

Abschlussbericht

Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur
Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen

Verbundabschlussbericht



gefördert durch das BMBF

Förderkennzeichen

13N10594

April 2013

Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie


Universität Stuttgart, Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung

Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen

DHI-WASY GmbH

Aquasoli Ingenieurbüro

Verbundpartner

	<p>Universität Stuttgart Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG) Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. András Bárdossy Pfaffenwaldring 61 70569 Stuttgart</p>
	<p>Universität Stuttgart Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW) Projektkoordination Prof.-Dr.-Ing. Silke Wieprecht Pfaffenwaldring 61 70569 Stuttgart</p>
	<p>Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (VuV) Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich Pfaffenwaldring 7 70569 Stuttgart</p>
	<p>Universität Stuttgart Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS ehemals ZIRN) Seidenstr. 36, 2. und 3. OG 70174 Stuttgart</p>
	<p>aquasoli Ingenieurbüro Inh. B. Unterreitmeier Haslacher Straße 14 D-83278 Traunstein</p>
	<p>DHI-WASY GmbH Niederlassung Syke Max Planck Str. 4-6 28857 Syke</p>

Kooperationspartner

	Landratsamt Calw Vogteistraße 42-46 75363 Calw
	Regierungspräsidium Karlsruhe 76247 Karlsruhe
	Stadt Altensteig Stadtverwaltung Rathausplatz 1 72213 Altensteig

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung.....	7
1.1	Aufgabenstellung.....	7
1.2	Voraussetzungen	9
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	13
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand	13
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	18
2	Eingehende Darstellung	19
2.1	Arbeitsergebnisse.....	19
2.1.1	Gesamtkonzeption (AP1)	19
2.1.2	Meteorologie/ Hydrologie (AP2)	26
2.1.3	Hydraulische Simulation Bad Reichenhall (AP3).....	39
2.1.4	Hydrauliksimulation zur Ermittlung der Verkehrsbehinderung durch Überschwemmungen und Ermittlung von Evakuierungswegen (AP3)..	49
2.1.5	Verhalten der betroffenen Bevölkerung (AP4).....	62
2.1.6	Fahrzeugstabilität in Strömungen (AP5).....	75
2.1.7	Modellierung und Optimierung verkehrlicher Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen (AP6)	89
2.1.8	Katastrophenschutzplanung (AP7).....	99
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	109
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	110
2.4	Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans.....	110
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	111
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	112
3	Literaturverzeichnis	114
4	Anhang	116
	Teilabschlussbericht AP2 - Meteorologie und Hydrologie	118
	Teilabschlussbericht AP4 - Verhalten der Bevölkerung	224
	Teilabschlussbericht AP5 - Fahrzeugstabilität in Strömungen.....	306
	Teilabschlussbericht AP6 - Verkehrssimulation	380

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Schematische Darstellung der Wirkungskette in EvaSim	7
Abb. 2.1: Arbeitsplan des Forschungsvorhabens EvaSim	19
Abb. 2.2: Nagoldtalsperre mit Sperrenstelle im Vordergrund.....	20
Abb. 2.3: Maximale Scheitelabflüsse 1969-2009 (UG Nagold).....	23
Abb. 2.4: Referenzereignis 2002, UG Bad Reichenhall (Saalach).....	25
Abb. 2.5: Automatische und manuelle Modellkalibrierung (HW 1990).....	35
Abb. 2.6: Ergebnisse des N/A-Modells – UG Bad Reichenhall.....	36
Abb. 2.7 Umgriff des 2d Abflussmodells (rote Linie) im Ortsbereich Bad Reichenhall inkl. dem Gewässersystem Seebach (blaue Linien), den Hochwasserschutzanlagen (schwarze Linien) und der Flusskilometrierung der Saalach	41
Abb. 2.8 Detailausschnitt zur Visualisierung der Gitterstruktur im Fkm 19,5 bis 18,9 (graue Linien: Elemente; schwarze Linien Materialgrenzen; schwarze Polygone: undurchströmbare Fließhindernisse wie Gebäude, Brückenpfeiler; blaue Punkte: Brückenunterkanten)	43
Abb. 2.9 Längsschnitt Wasserspiegellagen Modellkalibrierung	44
Abb. 2.10 Lageplan maximaler Gefahrenklassen bei HQ_{extrem} mit Gebäuden und Verkehrswegen im Hintergrund	48
Abb. 2.11: Ausschnitt aus dem verwendeten Berechnungsnetz (Mesh) mit den berücksichtigten Bauwerken im Bereich der Stadt Altensteig	52
Abb. 2.12: Verwendete Bauwerksdaten aus dem Katasterauszug der Stadt Altensteig	53
Abb. 2.13: Modellgebiet Nagold.....	53
Abb. 2.14: Zeitreihen für den gemessenen Wasserstand und Abfluss im Untersuchungsgebiet 1993.....	54
Abb. 2.15: DHI Flood Toolbox und Darstellung von Überflutungsflächen in Altensteig	58
Abb. 2.16: Darstellung der berechneten Überschwemmungsfläche mit den zugehörigen Wassertiefen als Shape-Datei.....	61
Abb. 2.17: Kraftwirkung auf ein teilumströmtes Fahrzeug nach Bonham u. a. (1967)	77
Abb. 2.18: Dokumentation der Versuchsdurchführung. Stabile Position (links) und instabile Position (rechts).....	81
Abb. 2.19: Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen im Vergleich.....	82

Abb. 2.20: Wattiefenzusammenstellung (PKW und Einsatzfahrzeug)	85
Abb. 2.21: Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Personenkraftwagen).....	86
Abb. 2.22: Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Einsatzfahrzeug).....	86
Abb. 2.23: Komponenten und Aufbau des Komplexmodells Niederschlag und Evakuierung.....	89
Abb. 2.24: Modellerte Verkehrsnachfragegruppen im Verkehrsmodell Bad Reichenhall.....	94
Abb. 2.25: Kumulierte Verteilung der Vorbereitungsdauern von Evakuierenden zu verschiedenen Tageszeiten.....	95
Abb. 2.26: Mittlere Evakuierungsdauern je Szenario.....	96
Abb. 2.27: Länge des überlasteten Straßennetzes nach dem Evakuierungsaufruf ...	97
Abb. 2.28: Beispiel für eine Auslastungskarte im Szenario "Sperrung B21"	98
Abb. 2.29 FLIWAS Benutzeroberfläche (Version 2.3).....	100
Abb. 2.30 Überschwemmungsgebiet Altensteig - Lastfall überströmte Dammkrone mit Breschenbildung.....	102
Abb. 2.31 Überschwemmungsgebiet Bad Reichenhall – Lastfall HQ_{extrem}	102
Abb. 2.32 Darstellung des Arbeitsablaufes zur Gefährdungsbeurteilung.....	104
Abb. 2.33 Intensitätsklassenverteilung Bad Reichenhall	105
Abb. 2.34 Befahrbarkeitsstatus Verkehrswegenetz Bad Reichenhall bei HQ_{extrem} ...	106
Abb. 2.32 Benutzeroberfläche FLIWAS für den Hochwassereinsatz- und Katastropheneinsatzplan der Stadt Bad Reichenhall.....	108

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Versagensmechanismen von Talsperren	24
Tab. 2.2: Gütemaße der N/A-Modellierung (UG Altensteig)	34
Tab. 2.3: Ergebnisse der Vorhersageverifizierung (Showalter-Index).....	37
Tab. 2.4: Gesamtdauern (einschließlich Sammelstelle und Weiterfahrt)	70
Tab. 2.5 Intensitätsklassifizierung nach „Schweizer Modell“	103

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben EvaSim - „Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen“ ist ein Beitrag im Rahmen des Sicherheitsforschungsprogramms der Bundesregierung, in dem innovative Lösungen entwickelt werden, um die Sicherheit der Bürgerinnen und Bürger zu erhöhen. Neben der Bedrohung durch terroristische bzw. kriminelle Aktivitäten muss die Maximierung der Sicherheit auch die Folgen von Naturkatastrophen oder Unfällen besonderen Ausmaßes und die Begrenzung der Schäden zum Arbeitsfokus haben.

Hier setzt das Vorhaben EvaSim an, indem es Lösungen bereitstellt, um bei extremen Überflutungssituationen eine optimierte Evakuierung der bedrohten Bevölkerung zu ermöglichen. Dies wird durch die Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen gewährleistet. Darauf basierend werden am Beispiel von zwei realen Standorten Evakuierungsszenarien für den Notfall entwickelt. Das Verfahren steht nach Projektabschluss für die Entwicklung von Evakuierungsplänen bei Hochwasser oder Talsperren- bzw. Deichbruch auch an anderen Standorten zur Verfügung.

Ausgangspunkt der Simulation sind Szenarien verschiedener hydraulischer Belastungen aufgrund eines extremen Hochwasserabflusses, Deichbruchs oder Talsperren(teil)versagens, wie sie beispielsweise bei den katastrophalen Hochwasserereignissen an Elbe (2002), Oder (1997) oder im Donaauraum (1999 und 2005) aufgetreten sind.

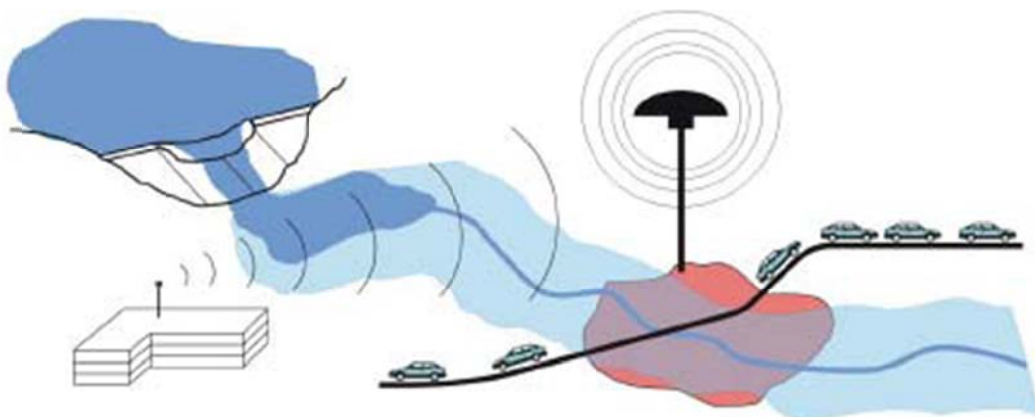


Abb. 1.1: Schematische Darstellung der Wirkungskette in EvaSim

Durch die Schnittstelle mit einer Simulation des Verhaltens der betroffenen Personen bezüglich der Routenwahl und der daraus resultierenden Verkehrsflüsse, ist es möglich den Evakuierungsprozess zeitlich und räumlich nachzubilden. In der Verkehrssimulation werden die Kapazitäten der Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt, die durch die Überflutungen zeitabhängig dann nur noch begrenzt zur Verfügung stehen. Dabei wird auch untersucht, ab wann welche Art von Verkehrsmittel aufgrund der auf den Verkehrswegen vorherrschenden Fließgeschwindigkeit oder Wassertiefe nicht mehr benutzt werden kann. Als Ergebnis der Simulation erhält man Werte für den Zeitbedarf einer Evakuierung, über eventuelle Engstellen im Verkehrsnetz und über die Zahl der Personen, die nicht rechtzeitig evakuiert werden können. Anhand dieser Ergebnisse erfolgt eine Optimierung des Routenwahlverhaltens wodurch sich ein angepasster Fluchtwegeplan ergibt, der unter den gegebenen Randbedingungen (Lage der Gebäude, Struktur der Verkehrswege, Zeit bis zur Überflutung) eine Evakuierung optimiert.

Die Beteiligung der Sozialwissenschaften hat bei dem Projekt eine wesentliche Bedeutung, um Wissen über das Verhalten von Menschen in einer Extremsituation (Evakuierung, Panikpotenzial) zu erhalten, das für die Modellierung des Verkehrsverhaltens eine wichtige Rolle spielt. Wie schnell tritt eine Person die Flucht an? Welches Verkehrsmittel wird zur Flucht gewählt? Wie viel Prozent flüchten gar nicht und benötigen dadurch gegebenenfalls Hilfe durch die Katastrophenschutzbehörden?

Durch Bereitstellung der entwickelten Simulationssoftware stehen den Behörden Informationen zur Verfügung, die eine sinnvolle Verkehrslenkung im Katastrophenfall ermöglichen. Außerdem werden Bereiche oder Höhenlagen ausgemacht, in denen keine Gefahr besteht. Diese Informationen sind für den Katastrophenschutz, aber auch für die betroffenen Bürger selbst, eine große Hilfe. Durch die Simulation mittels gekoppelter Hydraulik- und Verkehrsmodelle sind nicht nur qualitative sondern zuverlässige quantitative Aussagen möglich, aus der die Erstellung erheblich leistungsfähigerer Katastrophenpläne resultiert.

Die Akzeptanz der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse bei den Schutz- und Rettungskräften wird durch die Einbindung von Katastrophenschutzbehörden (Landratsamt Calw, Stadt Altensteig, Stadt Bad Reichenhall) und aktiver Rettungskräfte (Feuerwehr Bad Reichenhall) sichergestellt. Die gemeinsame Analyse gegenwärtiger Katastrophenschutzpläne und die Entwicklung praxisgerechter, zukünftiger Schutz- und Evakuierungsstrategien, unter Einbeziehung der in EvaSim erarbeiteten ingenieur- und sozialwissenschaftlichen Forschungsergebnisse, gewährleisten die Erhöhung der gegenwärtigen Sicherheitsstandards.

Zusammenfassend zeichnet sich EvaSim durch einen ganzheitlichen Ansatz aus, wonach von der meteorologischen Überwachung, zur maximal möglichen Verlängerung der Vorwarnzeit, bis zur aktiven Lenkung der Verkehrsströme zu sicheren Orten, in Abhängigkeit von der sich zeitlich ändernden Bedrohungslage und Mobilitätseinschränkungen für unterschiedliche Verkehrsträger, generell einsetzbare Lösungsstrategien und dafür angepasste Simulationsmodelle entwickelt werden.

Die Früherkennung von Störungen und die wirksame Krisenprävention durch zeitnahe und effiziente Einleitung von Rettungs- und Sicherheitsmaßnahmen sowie der wirksamen Notfallversorgung vor Ort unter Berücksichtigung aller relevanten Akteure, werden von EvaSim aufgegriffen. Durch die entsprechenden Maßnahmenplanungen wird ein Beitrag zur Erhöhung der zivilen Sicherheit gewährleistet.

1.2 Voraussetzungen

Durch die Zusammensetzung der Projektpartnerschaft des Verbundvorhabens EvaSim und die Definition der einzelnen Arbeitspakete, werden alle für die Erarbeitung umsetzungsfähiger Sicherheitslösungen notwendigen Disziplinen aus den Technik-, Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften eingebunden und auf ein gemeinsames Anwendungsziel ausgerichtet. Ingenieur- und sozialwissenschaftliche Institute bringen ihre Fachkompetenz in die interdisziplinäre Projektgruppe ein und lösen technische, naturwissenschaftliche und soziologische Fragestellungen im engen Verbund. Beteiligt an der Umsetzung des Vorhabens sind:

- **Universitäten und Forschungseinrichtungen**

- *Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW)*

Das Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung - Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW) besitzt große Expertise im Bereich der Risikoanalyse wasserbaulicher Anlagen und in der hydraulischen und physikalischen Modellierung. Mit der Versuchsanstalt für Wasserbau (VA) verfügt der LWW über ein wasserbauliches Labor, in dem eine Vielzahl von wasserbaulichen Fragestellungen in experimentellen Modellversuchen detailliert untersucht wird.

- *Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG)*

Das Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung - Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG) ist national und international ausgewiesen durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der Meteorologie, Hydrologie und Geohydrologie.

- *Universität Stuttgart, Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS)*

Das Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS) ist ein Schwerpunkt innerhalb des Internationalen Zentrums für Kultur- und Technikforschung (IZKT) an der Universität Stuttgart mit dem Ziel, die Bedingungen, Voraussetzungen und Folgen nachhaltiger Technikentwicklung sowie die Risiken und Chancen dieser Entwicklungen in Wechselwirkung von Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft systematisch zu erforschen. Hierbei werden auch die Verhaltensweisen und Reaktionsmuster der Bevölkerung in Krisensituationen untersucht. Bei ZIRIUS stehen die Erforschung der Bedingungen für eine am Postulat der Nachhaltigkeit orientierte Technikentwicklung sowie ein sozialverträglicher Umgang mit Risiken und Chancen der weiteren technischen und organisatorischen Modernisierung im Mittelpunkt der interdisziplinären Tätigkeit. Ein zentrales Element des Konzeptes von ZIRIUS ist, neben der Einbindung in das IZKT, die Kooperation mit der DIALOGIK GmbH, deren Tätigkeit im Spannungsfeld von Kommunikation, Kooperation und Konfliktschlichtung angesiedelt ist.

- *Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (VUV)*

Das Institut für Straßen und Verkehrswesen - Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (VUV) beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung und Bewertung von Modellen für die Planung und Steuerung des Verkehrsangebotes. Im Mittelpunkt aktueller und zukünftiger Forschung stehen die Entwicklung multimodaler Verkehrsmodelle, die sowohl den individuellen und öffentlichen Personenverkehr als auch den Güterverkehr umfassen; die Rückkopplung zwischen Planung und Betrieb durch die Nutzung von Messdaten aus dem Betrieb der Verkehrssysteme für ein kontinuierliches Monitoring der Angebotsqualität und die Bewertung vorhandener Planungs- und Steuerungsverfahren im Hinblick auf ihre Prognosequalität bzw. Wirksamkeit.

- **Industriepartner**

- *DHI-WASY GmbH*

Die DHI-WASY GmbH mit Sitz in Berlin und Niederlassungen u.a. in Syke und Dresden ist ein Tochterunternehmen des DHI, Dänemark, einer gemeinnützigen Forschungsstiftung. Die Niederlassung Syke ist die ehemalige DHI Wasser & Umwelt GmbH. DHI-WASY bietet eine breite Palette von Beratungsdiensten, Softwaretools und Modell-Testeinrichtungen an. Die MIKE-Modellpalette für die numerische Modellierung der Welt des Wassers in 1D,

2D und 3D findet weltweit Anwendung. Mit dem GIS-basierten Informations- und Entscheidungshilfesystem GeoFES verfügt DHI-WASY über ein System für das Katastrophenmanagement, das zunehmend Verbreitung findet.

- *Aquasoli Ingenieurbüro*

Das Ingenieurbüro Aquasoli ist eine Ingenieurgesellschaft mit den Kerngebieten Schutzwasserwirtschaft, Hydrodynamik und Hochwasserkatastrophenmanagement. Im Bereich Hochwasserschutz kann die Firma auf langjährige Erfahrungen bei der 2d-instationären Berechnung sowie Ermittlung von Überschwemmungsgebieten und die Planung von Schutzmaßnahmen verweisen.

- **Assoziierte Partner**

- *Stadt Altensteig*

Die Stadt Altensteig ist eine moderne Kleinstadt mit etwas mehr als 11.000 Einwohnern im Landkreis Calw (Region Nordschwarzwald) und gilt als ein dynamisches Unterzentrum mit einer gesunden Mischung aus Handel, Handwerk, Dienstleistung und Industrie. Altensteig liegt am Oberlauf der Nagold, einem Nebenfluss der Enz und an der Ostflanke des Nordschwarzwaldkamms. Bei extremen hydrologischen Situationen sind die im Talgrund liegenden Stadtbereiche in der Vergangenheit immer wieder von Hochwässern betroffen gewesen und haben entsprechend hohe Schäden verursacht.

Um die Stadt Altensteig vor den Folgen von Hochwässern zu schützen, und in Niedrigwasserzeiten den Abfluss zu erhöhen, wird in den Jahren 1965 bis 1970 die Nagoldtalsperre wenige Kilometer oberhalb der Stadt errichtet. Damit steht ein wirksamer Hochwasserschutz zur Verfügung, der jedoch nicht alle Extremereignisse beherrschen kann. Sollte z. B. in Folge einer nicht mehr zurückhaltbaren und durch die Betriebsorgane der Talsperre nicht mehr beherrschbaren, durch extreme Niederschläge verursachte außergewöhnliche Abflusssituation oder durch einen Dammbbruch das Nagoldtal überflutet werden, wäre, bei nicht rechtzeitig eingeleiteter Evakuierung, ein Verlust an Menschenleben nicht ausgeschlossen. Dieser Gefährdungslage möchte die Stadt Altensteig durch eine Anpassung der Katastrophenschutzmaßnahmen präventiv begegnen.

Die Stadt Altensteig ist bei Gefahrensituationen verpflichtet, Leib und Leben der Bevölkerung zu schützen und die Gefahrenabwehr zu organisieren. Hierzu existieren Katastrophenschutzpläne und Einsatzszenarien für die Einsatz- und Rettungskräfte, die als Ausgangspunkt für die innerhalb des Projektes zu entwickelnden Optimierungen dienen.

- *Stadt Bad Reichenhall*

Die Große Kreisstadt Bad Reichenhall mit einer Einwohnerzahl von rund 18.000 Bürgern liegt im Landkreis Berchtesgadener Land im Regierungsbezirk Oberbayern. Bad Reichenhall besteht aus der gewachsenen Kernstadt und den Ortsteilen Karlstein und Marzoll und ist die Heimat angestammten Brauchtums und der Gebirgsjäger. Im gesamten Bad Reichenhaller Talkessel finden sich Hinweise auf die Stadtgeschichte, geprägt von Salz und Saline.

- *Regierungspräsidium Karlsruhe*

Die Regierungspräsidien (RP) stehen als sogenannte Mittelbehörden in der Verwaltungshierarchie zwischen den Ministerien als oberster Ebene und den unteren Verwaltungsbehörden. Sie bündeln dabei die verschiedenen Verwaltungszweige unter einem Dach. Die große Zahl von Fachaufgaben, die bei den Ministerien auf die einzelnen Ressorts verteilt sind, wird auf der mittleren Verwaltungsebene von den Regierungspräsidien als einer homogenen Behörde wahrgenommen. Die Bündelung der Fachaufgaben ermöglicht sowohl die Koordinierung verschiedenster Fachbereiche wie auch den Ausgleich unterschiedlicher Auffassungen und Interessen. Die Regierungspräsidien führen darüber hinaus die Rechtsaufsicht über Stadt- und Landkreise, Gemeinden, Zweckverbände und Regionalverbände.

Das Referat 53.2 - Gewässer I. Ordnung, Hochwasserschutz, Bau und Betrieb ist, neben weiteren Aufgaben, für den Betrieb der Nagoldtalsperre verantwortlich, die als Eigenbetrieb des Landes Baden-Württemberg geführt wird. Die Nagoldtalsperre ist zentraler Bestandteil des Projektgebietes I des Forschungsvorhabens EvaSim, so dass das RP Karlsruhe als Betreiber alle wesentlichen und notwendigen Daten und Informationen bereitstellt, um die Forschungs- und Entwicklungsziele des Verbundvorhabens zu ermöglichen.

- *Landratsamt Calw*

Das Landratsamt ist die Verwaltung eines Landkreises und stellt sowohl die kommunale Selbstverwaltungsbehörde als auch die untere staatliche Verwaltungsbehörde dar. Dem Landratsamt steht der Landrat vor, der den (Land)Kreis nach außen vertritt. Zur Erfüllung der Aufgaben als Verwaltungsbehörde verfügt das Landratsamt Calw über Fachbereiche und Abteilungen für alle Bereiche des öffentlichen Lebens. Für das Projekt EvaSim zeichnet der Fachbereich „Umwelt und Ordnung“, und insbesondere die Abteilung Umwelt- und Arbeitsschutz, verantwortlich. In den in dem Projekt zu betrachtenden Gefahrenszenarien für die Stadt Altensteig durch Überflutungen in Folge eines Ablassens der Nagold-Talsperre, bzw. deren Versagen, ist der Landkreis in unterschiedlicher Funktion eingebunden.

Bei Hochwassersituationen ist zunächst die Gemeinde, vertreten durch den Bürgermeister, in der Pflicht, die Gefahrenabwehr zu organisieren. Sobald jedoch absehbar ist, dass das Ereignis mit den lokalen Mitteln der Gemeinde nicht beherrschbar ist und eine Katastrophensituation durch den Landrat festgestellt wird, geht die Zuständigkeit bei der Gefahrenabwehr auf den Landrat über, dem in diesem Zuge alle Einsatzkräfte unterstellt werden. Insofern ist bei der Weiterentwicklung der Katastrophenschutzpläne innerhalb des Projektes EvaSim die Erfahrung des Landratsamtes Calw unverzichtbar

Für die Durchführung des Vorhabens wird auf dem Markt verfügbare Simulationssoftware, wie die hydraulischen Simulationsmodelle Mike 21, Hydro AS und das Verkehrsmodell Visum, das vom Land Baden Württemberg eingeführte Flut- Informations- und Warnsystem Fliwas, sowie institutsintern entwickelte Softwarelösungen, wie das N/A-Modell des Lehrstuhls für Hydrologie und Geohydrologie, eingesetzt. Für die durchgängige Verknüpfung der Wirkungskette Meteorologie – Hydraulik – Verkehr - Katastrophenschutzplanung wird die Neuartigkeit der von EvaSim eingesetzten Methodik vor allem durch die wissenschaftliche Erarbeitung von Übergabealgorithmen an den Schnittstellen zwischen den fachspezifischen Modellen erreicht. Die grundsätzliche methodische Herangehensweise der Erstellung von Katastrophenschutzplänen ist in dieser Form auf andere Projektgebiete übertragbar.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wird vom Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Universität Stuttgart koordiniert. Durch regelmäßig ausgerichtete Projekttreffen, die sowohl im großen, den ganzen Forschungsverbund betreffenden Rahmen, als auch in kleinen Fachgruppen stattfinden, wird ein reger und intensiver Wissensaustausch und eine interdisziplinäre Zusammenarbeit gestaltet. Zur Schaffung einer gemeinsamen Datenbasis wird vom Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft ein FTP-Server eingerichtet, für den die Verbundpartner Zugriffsrechte erhalten, und alle im Projektverlauf gesammelten Daten ablegen, wodurch jederzeit ein schneller und sicherer Datentransfer gewährleistet ist.

Die Laufzeit des Vorhabens erstreckt sich über den Zeitraum vom 01.06.2009 bis zum 31.10.2012, dies entspricht einer Dauer von 41 Monaten.

1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Die Entwicklung im Umgang mit bestehenden Wasserbauwerken fordert immer weiterführende Untersuchungen der verbleibenden Restrisiken, die von diesen Bauwerken ausgehen (DIN 19700, 2004). Für Stauanlagen werden daher im

Rahmen von vertieften Untersuchungen die Restrisiken konstruktiver und hydraulischer Art ermittelt. Dabei werden unter anderem folgende Fragen behandelt: Kann die Anlage das Bemessungshochwasser abführen? Wie lassen sich terroristische Anschläge verhindern? Flutwellenberechnungen für die im Extremfall auftretenden Abflüsse sind zwar noch nicht allgemeiner Stand der Technik, werden an ausgewählten Talsperren oder Staustufen aber bereits durchgeführt. In anderen Ländern werden Flutwellenberechnungen für verschiedene Szenarien von den Genehmigungsbehörden häufiger verlangt als in Deutschland.

Das technische Risiko wird als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenspotenzial bestimmt. Für die Ermittlung der oben genannten Restrisiken werden daher Schadenskurven benötigt, die festlegen, wie hoch der Verlust bei einer spezifischen Beaufschlagung von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit ist. Teilweise liegen diese vor, so z. B. für Wohnhäuser, Häusergruppen, Bäume und Wald sowie Personen aus dem Forschungsprojekt „RESCDAM“ der TU Helsinki (HUT, 2000). Modellversuche dienten hier zur Ermittlung der Schadenskurven. In Deutschland beschäftigte sich das Projekt „MEDIS“ (Medis, 2005), im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundforschungsprogramms RIMAX, mit den Anforderungen an Schadensfunktionen, ausgehend von der Erfassung von Hochwasserschäden. Die Stabilität von Fahrzeugen unter Strömungseinfluss wird hierbei jedoch nicht behandelt. Für die Entwicklung von Stabilitätskriterien besteht somit noch Forschungsbedarf.

Im Bereich der Hydrologie werden Sturzfluten in kleinen Einzugsgebieten als zunehmend bedrohliches Szenario wahrgenommen. Diese können durch lokale Extremwittersituationen hervorgerufen werden. Es besteht weitgehender Konsens unter Hydrologen, dass die sich abzeichnenden Klimaveränderungen eine Zunahme derartiger Ereignisse sowohl hinsichtlich der Qualität als auch Quantität erwarten lassen. Die besondere Herausforderung zum Schutz und zur Rettung von Menschen liegt in der teilweise äußerst schnellen Entwicklung bedrohlicher Situationen, der mitunter sehr kurzen Vorwarnzeit und der oftmals schwierigen Wahrnehmbarkeit derartiger Situationen durch Laien.

Um hydrometeorologische Belastungsszenarien für Niederschlags-Abfluss-Modelle (N/A-Modelle) und im Falle des UG Altensteig für eine Talsperre zu erstellen, wird aus beobachteten Niederschlagsereignissen deren statistischen Eigenschaften sowie deren räumliche Ausdehnung und Stabilität abgeleitet. Durch die Berücksichtigung verschiedener Niederschlagsszenarien sowie deren gebietsspezifischer Auswertung und Untersuchung meteorologischer Messdaten wird die Grundlage für eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit und Vorwarnzeit geschaffen. Bei den Niederschlagsereignissen werden der räumliche und zeitliche Verlauf der jeweiligen Ereignisse betrachtet, um instationäre zeitlich hochaufgelöste Belastungs- und

Extremszenarien für die nachfolgende hydraulische Modellierung bereitstellen zu können.

Hydraulische Berechnungen des Wasserstandes, Fließgeschwindigkeit, Strömungsrichtung oder Sohlenschubspannung werden heutzutage oftmals zweidimensional ausgeführt. Im Falle von kleinräumigen Detailuntersuchungen kommen auch dreidimensionale Ansätze zum Einsatz. Der jeweilige Einsatzbereich richtet sich zum einen nach den Anforderungen an die Ergebnisse und ist zum anderen durch die gegebenenfalls deutlich längere Rechenzeit begrenzt. Als Stand der Technik können mit nahezu allen Modellen instationäre Berechnungen durchgeführt werden. Hierdurch werden reale abgelaufene Abflussereignisse repräsentiert und nicht wie bei der stationären Berechnung einem Modell unbegrenzt Wasser zugeführt, bis sich ein stationärer Zustand eingespielt hat. Hierbei wird häufig einem Modell mehr Wasser zugeführt, als dies in Natura möglich wäre. Es werden hierzu Zeitreihen von tatsächlichen Ereignissen verwendet, um keine Überschätzung der Gefahr zu erzeugen. Die DHI-WASY GmbH verwendet das Programmsystem MIKE FLOOD, was eine Kopplung mehrerer Programmteile zulässt. So können z. B. der Flussschlauch eindimensional und die Überschwemmungsflächen zweidimensional gerechnet werden. Dies bringt eine Rechenzeiterparnis mit sich, da an den entsprechenden Stellen mit dem jeweils besten Ansatz für die Fragestellung gerechnet wird. Als weiterer Vorteil kann zusätzlich eine Kanalnetzmodellierung mit angeschlossen werden, die gerade im Bereich besiedelter Flächen eine große Bedeutung haben kann. Mit den Programmlösungen von DHI ist somit eine Simulationssoftware im Einsatz, die sich schon in tausenden Projekten weltweit bewährt hat und somit verlässliche Ergebnisse für die Kopplung mit der Verkehrssimulation liefert.

Im Rahmen der Katastrophensoziologie sind eine Reihe von Modellen zum Verhalten von Individuen und Gruppen erstellt und getestet worden (Sorensen, Vogt, & Mileti, 1987). Ein weit verbreiteter Katastrophenmythos ist, dass bei einem Krisenfall die meisten Menschen in Panik ausbrechen. Systematische Studien von Panikverhalten während Katastrophenereignissen haben jedoch ergeben, dass Panik so gut wie nie vorkommt (vgl. Johnson 1988; Keating 1982). Menschen verfallen auch selten in eine Art Angststarre, die oft mit Panik in Verbindung gebracht wird. Meist verhalten sich Menschen den Umständen entsprechend normal. Die Evakuierung des World Trade Centers im Jahre 2001 ist zum Beispiel hauptsächlich von den Betroffenen selbst ruhig und diszipliniert organisiert worden, so können 99% der Leute, die sich unterhalb der Einschlagstelle befanden, beide Gebäude rechtzeitig verlassen. Insgesamt haben es 87% der Menschen in beiden Gebäuden geschafft, sich in Sicherheit zu bringen (vgl. Averill et al. 2005). Eine verbreitete Reaktion dagegen ist, dass sich Betroffene von der Realität entfernen und die Gefahr

ausblenden. Dies führt dazu, dass sie sich in Anbetracht der Situation viel zu ruhig verhalten und bei Evakuierungsauffrufen, z. B. erst mal ordnungsgemäß den Computer herunter fahren und ihren Schreibtisch aufräumen (vgl. Drury & Cocking 2007). In den meisten Fällen werden die Betroffenen jedoch schnell auf den Boden der Tatsachen zurückgeholt, sobald sie die Bedrohlichkeit der Situation erkennen (vgl. Sorensen & Vogt 2006).

Weitere Problemfelder betreffen die Kommunikation: Oft werden Nachrichten nicht gehört, falsch verstanden oder ausgelegt (Duclos, 1987). Ein Grund für eine falsche Wahrnehmung der kommunizierten Inhalte in einer Notfallsituation kann dabei sein, dass die Öffentlichkeit in den Phasen der vorangehenden Risikoabschätzung (kommunikativ) nicht involviert war. Eine optimale Strategie der Risikokommunikation geht davon aus, dass bereits in der Phase der Risikoabschätzung ein Dialog mit der Öffentlichkeit geführt werden muss. Ein tatsächlicher Dialog bedeutet eine zweiseitige Kommunikation, d. h. Risikomanager und Öffentlichkeit kommunizieren uneingeschränkt miteinander. Versuche, die Risikokommunikation auf die Vermittlung von Wahrscheinlichkeiten (z. B. des Schadenseintritts) oder auf Risikovergleiche zu beziehen (z. B. die Feststellung, dass viele individuelle Verhaltensweisen ein höheres Risiko in sich tragen als die betreffende technische Anlage), haben sich als nicht weiterführend erwiesen. Sofern jedoch die Öffentlichkeit bereits in der Risikoabschätzungsphase kommunikativ einbezogen wird, werden die entsprechenden Notfallwarnungen inhaltlich besser verstanden und eine Übertragung der empfangenen Warnung auf die aktuelle individuelle Lebenssituation ist leichter möglich. Zudem beschränken sich die meisten Warnungen in einem akuten Notfall auf kurze, eindeutige Anweisungen; wird der Hintergrund der Anweisungen bereits von der Öffentlichkeit während der Risikoabschätzung internalisiert steigt die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Befolgens der Anweisung. Neben dem Design optimaler Kommunikationsstrategien während einer akuten Bedrohung hat somit auch eine den Risikoabschätzungsprozess begleitende Kommunikation mit der Öffentlichkeit eine herausragende Bedeutung.

Im Bereich der Verkehrssimulationen ist die Nachbildung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer (Verkehrserzeugung, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl, Routenwahl) für den Einsatz im Rahmen der Verkehrsplanung Stand der Technik. Diese Nachbildung kann sowohl makroskopisch (Personengruppen) als auch mikroskopisch (Einzelpersonen) erfolgen. Mikroskopische Simulationen, basierend auf sog. zellulären Automaten, werden in der Vergangenheit bereits zur Simulation von Evakuierungen in Fußballstadien und Schiffen (Schreckenbergs, 2002) eingesetzt. Grundsätzlich unterscheidet sich die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens von üblichen Verkehrssimulationen in folgenden Punkten:

- In Verkehrssimulationsprogrammen wird in der Regel von einem konstanten Verkehrsangebot ausgegangen, d. h. die Verkehrswege weisen eine konstante Kapazität über die Zeit aus.
- Verkehrssimulationen bilden die Reaktionen der Verkehrsteilnehmer auf unverbindliche Informationen (z. B. Verkehrsfunk oder Wechselwegweisungen) nach. Gezielte Anweisungen bzgl. der Ziel- oder Routenwahl (z. B. Person x fährt erst nach Dorf 1, dann nach Dorf 2) werden derzeit noch nicht modelliert.

Die Kopplung von hydraulischer und Verkehrs-Simulation als logische Weiterführung von Flutwellenberechnungen wird in Deutschland bisher noch nicht angewendet, obwohl die Folgen eines Talsperrenbruchs für eine Talsperre in der Eifel und die resultierenden hydraulischen Belastungen auf eine Großstadt wie Düren schon untersucht worden sind (Huber, 2004).

Forscher in den Vereinigten Staaten haben zum Räumungs- und Fluchtverhalten das Modell LIFESim entwickelt (Aboelata, 2004), das diese Berechnungen ansatzweise ermöglicht. Die Simulation der Deichbrüche in New Orleans nach dem Hurrikan Katrina haben die Berechnungsansätze gestärkt (Stedje, 2006).

Das Programm LIFESim ist bislang nicht kommerziell zu erwerben und als Prototyp zurzeit auch nur von dem Entwickler zu bedienen. Der Ansatz des LIFESim Modells ist eine Neuerung, allerdings sind die Randbedingungen zum Großteil vorzugeben und werden nicht automatisch, aufgrund z. B. des Verhaltens der Personen, ermittelt. So muss der Anwender etwa die Zielorte definieren und auch die Wahl der Verkehrsmittel für jede Zelle muss vorgegeben werden.

Der Katastrophenschutz im „normalen“ Hochwasserfall ist fast flächendeckend entwickelt. Für den Fall eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses sollte an den größeren Flüssen ein Schutz für Siedlungen bestehen, sei es durch Dämme, Hochwasserschutzmauern oder mobile Hochwasserschutzelemente. Die Länder geben den ausführenden Behörden von Zeit zu Zeit Leitfäden oder Orientierungshilfen für die Entwicklung von Katastrophenschutzplänen an die Hand, wie beispielsweise das Umweltministerium in Baden-Württemberg (UMBW, 2006). Neue Rahmenbedingungen werden durch die EU-Hochwasser-Richtlinie vorgegeben, die die EU-Mitgliedsstaaten u. a. bis 2013 verpflichtet, Hochwasserrisikomanagementpläne zu entwickeln. Für den Fall der Überschreitung eines 100-jährlichen Abflusses bis hin zu extremsten Abflüssen aufgrund eines (Teil-) Versagens einer Talsperre sind bisher jedoch nur wenige Informationen zu finden. Zum einen, da diese schwer zu standardisieren sind und zum anderen, da die von Talsperren ausgehenden Restrisiken erst seit kurzer Zeit, und dann meist nur sehr verhalten, öffentlich diskutiert werden. Laut einer weltweiten Expertenbefragung im

Rahmen des RESCDAM-Projektes (Reiter, 2000) sind in einem Großteil der Länder bislang keine Vorkehrungen für den Fall eines Talsperrenversagens getroffen worden.

In Neuseeland wird in den vergangenen Jahren ein System aufgebaut, das einen speziellen Straßenabschnitt im Falle des Bruches eines Kraterseedamms sperrt (Keys, 2007). Hydraulische Berechnungen sind die Grundlage für die Erhöhung einer Straße und eine automatische Straßensperre mittels Schranken im Katastrophenfall. Hier ist zwar keine gekoppelte Simulation zu Grunde gelegt, jedoch werden die Resultate von hydraulischen Berechnungen in der Steuerung des Verkehrs berücksichtigt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

An dem Verbundprojekt sind sechs Projektpartner sowie vier assoziierte Partner beteiligt:

- **Universitäten und Forschungseinrichtungen**
 - Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW)
 - Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG)
 - Universität Stuttgart, Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS)
 - Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (VUV)
- **Industriepartner**
 - DHI-WASY GmbH
 - Aquasoli Ingenieurbüro
- **Assoziierte Partner**
 - Stadt Altensteig
 - Stadt Bad Reichenhall
 - Regierungspräsidium Karlsruhe
 - Landratsamt Calw

2 Eingehende Darstellung

2.1 Arbeitsergebnisse

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht die Struktur des Verbundprojektes und die Unterteilung in verschiedene Arbeitspakete (AP). Wie aus der Abbildung ersichtlich, werden Verknüpfungen von Simulationsmodellen, aus bislang völlig unabhängig voneinander entwickelten Fachgebieten, die darüber hinaus auf vollkommen unterschiedliche Prozesse, Grunddaten und Lösungsstrategien aufbauen, hergestellt. Auf diese Weise gelingt es die Optimierung von Evakuierungsstrategien beispielhaft an zwei Projektgebieten darzustellen und die erarbeiteten Methoden für zukünftige Anwendungen in der Praxis zur Verfügung zu stellen.

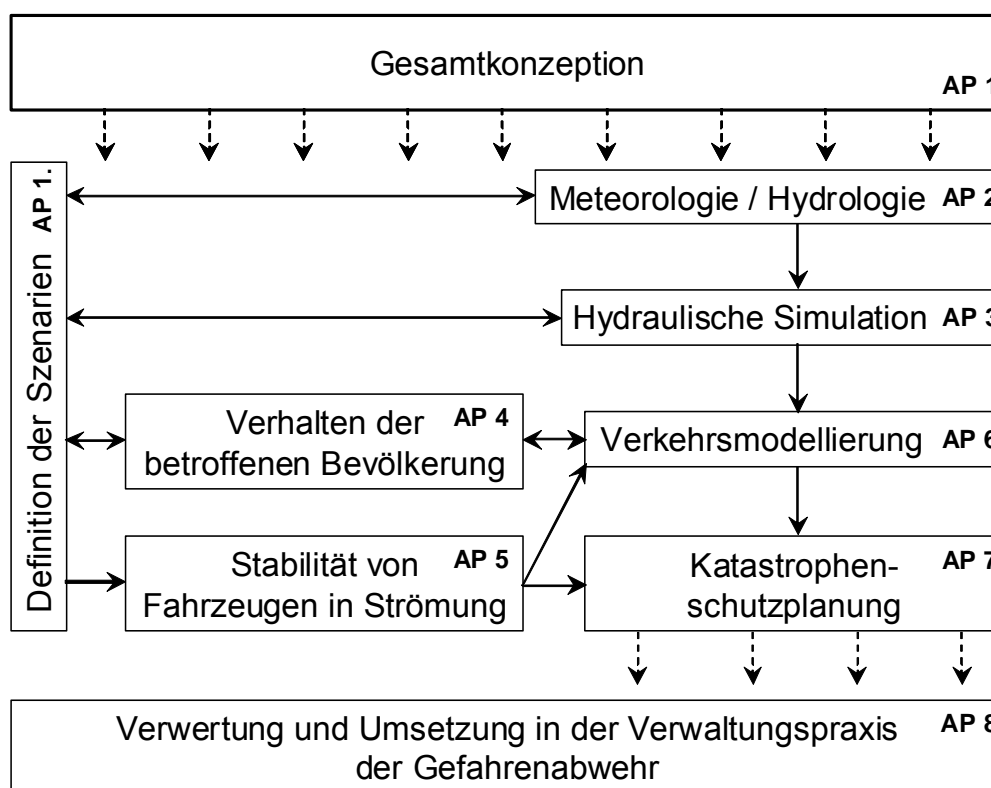


Abb. 2.1: Arbeitsplan des Forschungsvorhabens EvaSim

2.1.1 Gesamtkonzeption (AP1)

Der Definition der Anforderungen an die gemeinsame Datenbasis, der Schnittstellen zwischen den eigenständigen Fachlösungen sowie der räumlichen und zeitlichen Auflösung der von einem zum nächsten Modell übergebenen Simulationsergebnisse, kommt im Forschungsvorhaben EvaSim eine wichtige Bedeutung zu. Das AP1 beinhaltet die Entwicklung und Fortführung der Gesamtkonzeption zur Erstellung eines durchgängig einsetzbaren Gebrauchsmusters.

Um das entwickelte Katastrophenmanagementsystem zu testen, zu kalibrieren und zu evaluieren werden Konzepte für den Katastrophenschutz an Standorten

unterschiedlicher Charakteristik, unter Einsatz der genannten Modelle, erarbeitet und damit die bereits an den Standorten vorhandenen Evakuierungsstrategien ergänzt bzw. optimiert. Die Testregionen repräsentieren unterschiedliche meteorologische, hydrologische und hydraulische Gefährdungssituationen. Auch die verkehrliche Situation, die Verteilung der gefährdeten Bevölkerung im betroffenen Gebiet sowie die Struktur der Rettungskräfte sind grundlegend verschieden.

Um die Komplexität der Anwendung des entwickelten Katastrophenmanagementsystems auf realistische Situationen innerhalb der Projektphase zu begrenzen, sind Gemeinde- und Kleinstadtgebiete ausgewählt worden, für die sowohl die hydraulische als auch die verkehrstechnische Modellierung mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen bewerkstelligt werden kann. Letztlich besteht seitens der Behörden und Amtsinhaber in den beiden Testregionen ein außerordentlich starkes Interesse an der Entwicklung sowie dem späteren Einsatz eines Katastrophenmanagementsystems.

2.1.1.1 Untersuchungsgebiet Nagold

Die Nagoldtalsperre im nördlichen Schwarzwald besteht aus einem 32 m hohen Erdschüttdamm, dessen dahinter liegender Speicher Erzgrube vom Land Baden-Württemberg als Hochwasserrückhaltebecken mit Dauerstau betrieben wird. Unterstrom fließt die Nagold in einem Kerbtal ohne größere Bebauung ca. 10 km bis zur Stadt Altensteig.



Abb. 2.2: Nagoldtalsperre mit Sperrenstelle im Vordergrund

Der Betrieb der Stauanlage erlaubt grundsätzlich die gezielte Vermeidung bzw. Verminderung von Hochwasserauswirkungen auf die unterstrom gelegenen Siedlungsgebiete und stellt damit eine effiziente Schutzeinrichtung dar. In extremen Fällen, d. h. bei äußerst selten auftretenden meteorologischen Bedingungen, bei technischem Versagen oder auch bei absichtlich herbeigeführten Schäden am Sperrwerk, sind unbeherrschbare Abflusszustände denkbar, die einen unkontrollierten Wasserausfluss aus dem Speichersee zur Folge haben können. Aufgrund der Geometrie des Tales kann sich eine Flutwelle mit großem Zerstörungspotenzial ausbilden. Technische Möglichkeiten zur Abwendung von derart extremen Flutwellen sind derzeit nicht verfügbar, so dass zum Schutz der Menschen lediglich eine gut organisierte Evakuierung mit den zur Verfügung stehenden Mitteln als Option zur Katastrophenabwehr in Frage kommt. Den Simulationswerkzeugen und dem entwickelten Katastrophenmanagement kommt hier entscheidende Bedeutung zu.

2.1.1.2 Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall

Das Projektgebiet liegt in Bayern im Landkreis Berchtesgadener Land. Der zu betrachtende Raum umfasst die Kommunen Bad Reichenhall und Piding. Die Stadt Bad Reichenhall wird seit jeher durch den Kurbetrieb und das Gesundheitswesen bestimmt und verfügt über mehrere Krankenhäuser, Alten- und Pflegeheime. Die Gemeinde Piding ist durch große Gewerbebetriebe und Milchwirtschaft geprägt.

Die Stadt Bad Reichenhall zählt 17.400 Einwohner und umfasst eine Fläche von 3.943 ha, wovon 568 ha als Siedlungsfläche ausgewiesen sind. Die Gemeinde Piding zählt 5.210 Einwohner und umfasst eine Fläche von 1.754 ha. Das Gewässersystem wird im Wesentlichen durch die Saalach und die Stoißer Ache bestimmt. In beide Gewässer mündet eine Vielzahl von Wildbächen mit Einzugsgebieten kleiner als 10 km². Das Gewässersystem ist durch ein hochalpines und alpines Einzugsgebiet geprägt. Die Anlaufzeiten der Hochwasserwellen liegen im Bereich von wenigen Stunden und sind durch ausgeprägte Scheitelabflüsse charakterisiert.

Die Saalach ist ein großer alpiner Fluss. Innerhalb von Siedlungsgebieten bestehen Hochwasserschutzdeiche und sonstige Hochwasserschutzbauwerke. Das Überschwemmungsgebiet ist durch das Hochufer oder die Deichlinien begrenzt. Am südlichen Stadtrand befindet sich ein Stauwehr zur Wasserkraftnutzung.

Das Gewässersystem Saalach / Stoißer Ache liegt innerhalb des Verkehrsknotenpunktes Autobahn A8 / Bundesstraße B20 und dem Grenzübergang Salzburg. Die Bundesstraße B20 stellt auf deutscher Seite die einzige Verkehrsverbindung zwischen der Stadt Bad Reichenhall und der Angrenzergemeinde Piding dar. In den vergangenen Jahrhunderten und Jahrzehnten ereigneten sich mehrere extreme Hochwasserereignisse, die eine massive

Beeinträchtigung oder Zerstörung der Infrastruktur bewirkten. Die letzten großen Hochwasserereignisse traten im Jahr 2002 an der Stößer Ache mit einer 80-jährlichen Wiederkehrzeit und an der Saalach im Jahr 2005 mit einer 100-jährlichen Wiederkehrzeit auf.

Bei extremen Hochwasserereignissen oder Versagensfällen an wasserbaulichen Anlagen bestehen ein großes Gefährdungspotential und die Gefahr für Leib und Leben innerhalb der Siedlungsgebiete. Die fehlenden Vorwarnzeiten und schnell anlaufenden Hochwasserwellen lassen nur wenig Spielraum für die Durchführung von Hochwasserabwehr- und Evakuierungsmaßnahmen. Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre zeigen zudem die massive Beeinträchtigung der Verkehrssituation durch Überschwemmungen.

In dem Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall werden zusätzliche, plötzlich auftretende punktuelle Verschärfungen der Überflutungsszenarien vorgesehen, wie z. B. das Verlegen von Brücken- oder Rohrdurchlässen durch Treibgut.

2.1.1.3 Szenariendefinition

Neben der Projektsteuerung werden im AP1 Szenarien für die beiden Untersuchungsgebiete definiert und entwickelt, die einerseits die möglichen Gefährdungen und die daraus zu entwickelnden Gegenmaßnahmen in ihrer ganzen Breite darstellen, andererseits aber auch der Tatsache Rechnung tragen, dass der Entwicklung des komplexen Systems innerhalb der Projektlaufzeit Grenzen gesetzt sind, und insofern eine Reduzierung auf signifikante Ereignisse erfolgen muss.

2.1.1.3.1 Untersuchungsgebiet Nagold

Die Analyse der vergangenen Hochwasserereignisse der Jahre 1969 bis 2009 im Untersuchungsgebiet Nagold ist in der Abb. 2.3 dargestellt. Auf der Ordinate sind die maximalen Scheitelabflüsse der drei Pegel Erzgrube Zulauf, Erzgrube Auslauf und Altensteig über deren zeitlicher Abfolge auf der Abszisse aufgetragen.

Die bisherigen Extremereignisse traten in den Jahren 1990 und 1993 auf. Auffällig ist die Verteilung des Abflusses, von dem im Jahr 1993 nur ein Drittel aus der Erzgrube in das Kerbtal Richtung Altensteig fließt, der Rest wird durch Abflüsse aus den seitlichen Einzugsgebiete hervorgerufen.

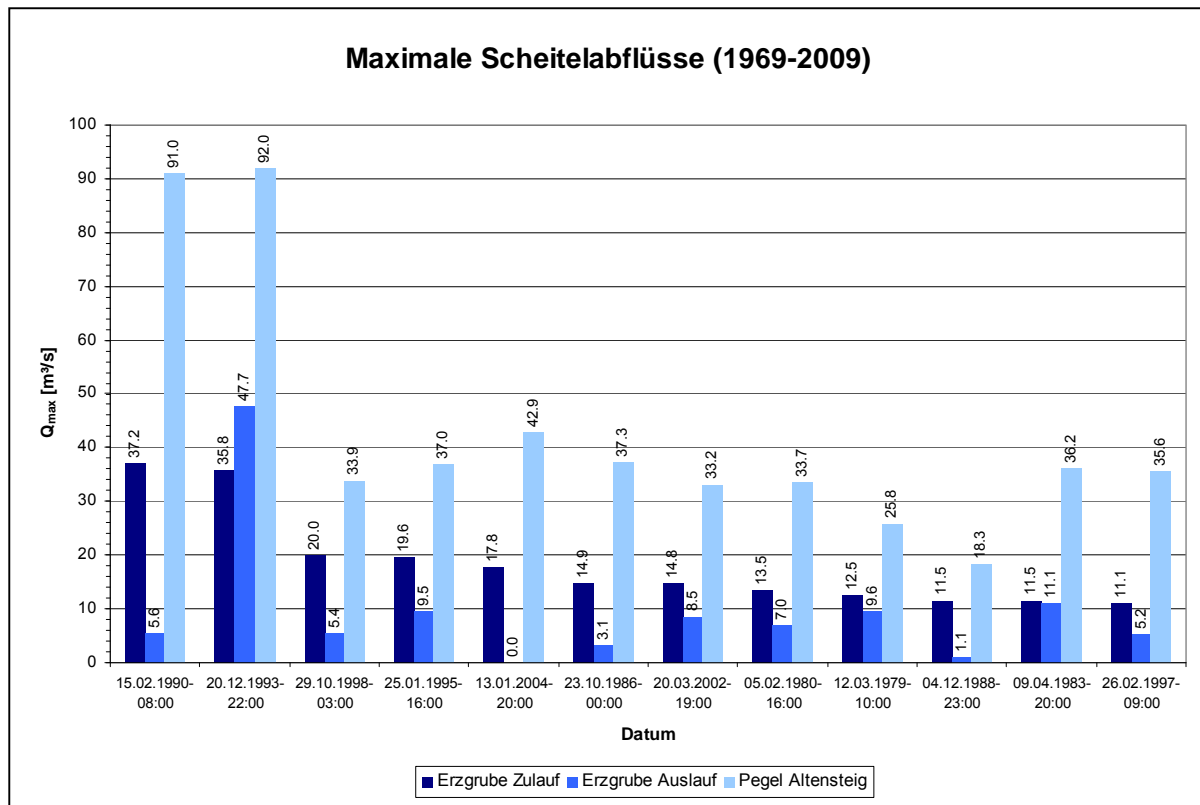


Abb. 2.3: Maximale Scheitelabflüsse 1969-2009 (UG Nagold)

Folgende Szenarien werden für das UG Nagold festgelegt:

- Szenario 1:

Der Rückhalteraum der Talsperre ist gefüllt und aufgrund eines extremen Niederschlagsereignisses springt die Hochwasserentlastung (HWE) mit voller Abflussleistung an. Aus der vertieften Sicherheitsüberprüfung der Nagoldtalsperre aus dem Jahr 2002 geht hervor, dass die abgedeckte Schusssrinne maßgebend für die Leistungsfähigkeit der gesamten Hochwasserentlastungsanlage ist, die bei einem Abfluss von 115 m³/s liegt und dem Bemessungshochwasser 1 entspricht (Giesecke, 2002).

- Szenario 2:

Bei dem zweiten Szenario handelt es sich um ein Teilversagen der Talsperre. Die Versagensursachen von Talsperren sind vielfältig und können je nach Herkunft in externe, interne und anthropogene Ursachen unterteilt werden. Die Tab. 2.1 liefert einen kurzen Überblick über mögliche Versagensursachen, Szenarien wie Grund- und Böschungsbruch, Röhrenbildung durch Dammkörper und Untergrund oder gestörte Betriebseinrichtungen können praktisch ausgeschlossen werden, sofern die Stauanlagen nach dem allgemein anerkannten Stand der Technik geplant, errichtet und betrieben werden (Fink, 1997).

Tab. 2.1: Versagensmechanismen von Talsperren

Extern	Intern	Anthropogen
<ul style="list-style-type: none"> • Überströmen • Erdbeben 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundbruch, Böschungsbruch • Durchströmung und Röhrenbildung • Unterströmung • Versagen von Betriebseinrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mangelnde Sachkenntnis, Nachlässigkeit • Mutwillige Zerstörung

Das Szenario 2 beinhaltet als Ursache für das Talsperrenversagen eine Überströmung der Talsperre. Bei Dämmen tritt wegen des Aufbaus aus geschüttetem Material unabhängig von der Bruchursache nur der progressive Bruch auf. Beim Überströmen kommt es an der schwächsten Stelle zur Bildung einer Initialbresche, welche progressiv erweitert wird und für deren Berechnung verschiedene Ansätze existieren (Sametz, 1981).

2.1.1.3.2 Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall

Im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall sind die bisher stärksten Hochwasserereignisse in den Jahren 1899 und 2002 aufgetreten, bei dem Ereignis von 1899 handelt es sich um das bisherige Extremereignis. Die Besonderheit des Projektgebietes Bad Reichenhall ist die Tatsache, dass es sich um ein sehr kleinräumiges Einzugsgebiet handelt, welches bei extremen Regenereignissen sehr schnell anspringt.

Es werden zwei Hochwasserereignisse aus den Jahren 2002 und 2005 als Referenzszenarien ausgewählt, für die Wasserspiegelfixierungen verfügbar waren. Die Scheitelabflüsse am Pegel Unterjettenberg (Saalach) betragen damals 865 m³/s bzw. 520 m³/s. Frühere Spitzenabflüsse werden nicht betrachtet, da aufgrund fehlender Dokumentation diese Ereignisse für die hydraulische Modellierung nicht uneingeschränkt verwendbar sind. Die Saalach unterliegt aufgrund ihrer alpinen Einzugsgebietscharakteristik einem sehr variablen Sediment- und Geschiebetransport. Dies zeigt sich in einer großen morphologischen Dynamik an der Gewässersohle. Diese ggf. bedeutenden Sohlveränderungen sind jedoch bei einigen zur Verfügung stehenden gemessenen Wasserspiegellagen nicht berücksichtigt. Werden diese Daten für die Kalibrierung oder Validierung der hydraulischen Modellierung verwendet, würde dies unter Umständen zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Die Extremszenarien werden aus den gewählten Referenzszenarien mit Hilfe einer N/A-Modellierung berechnet. Dafür werden die zugrunde liegenden räumlichen Niederschlagsverteilungen statistisch erhöht. Es wird ein Niederschlag generiert, dem Maximalwerte mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren für dieses Einzugsgebiet

und unterschiedliche Dauerstufen als Basis zur Verfügung standen. Für das Extremszenario an der Saalach wird eine Dauerstufe des Niederschlags von 24 Stunden gewählt, um ein sehr schnell anlaufendes Hochwasserereignis zu erzeugen.

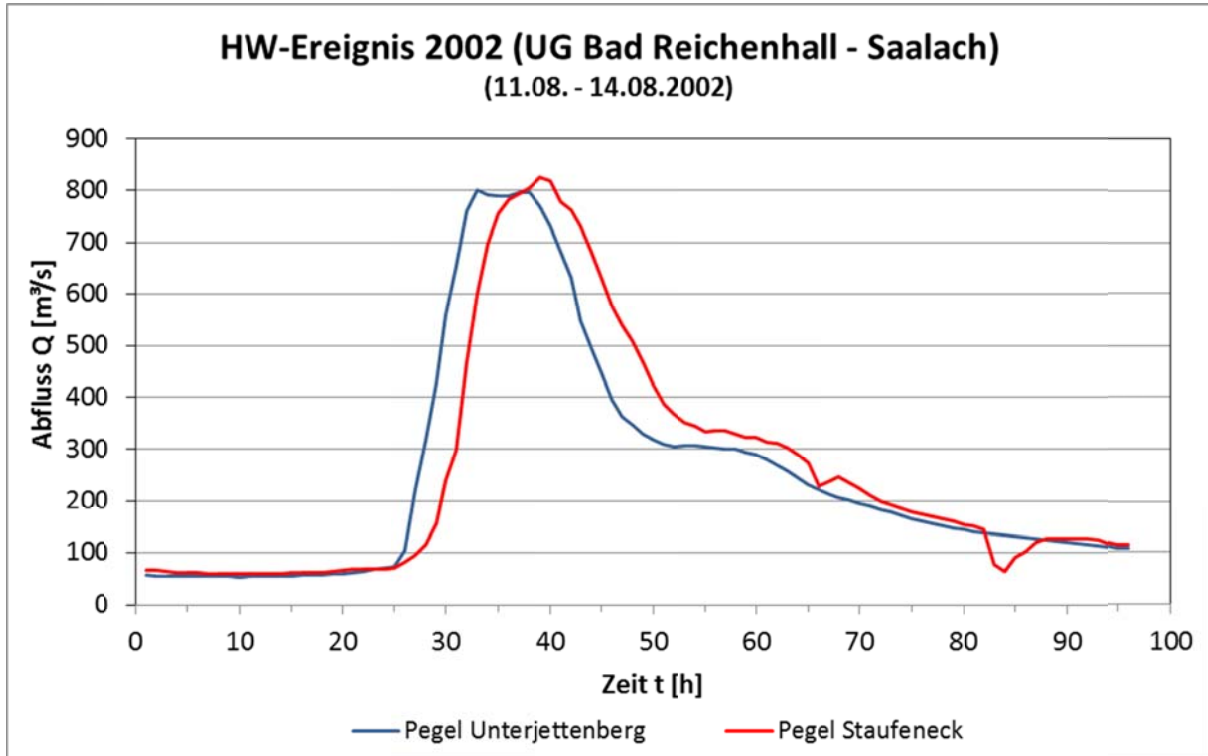


Abb. 2.4: Referenzereignis 2002, UG Bad Reichenhall (Saalach)

2.1.2 Meteorologie/ Hydrologie (AP2)

2.1.2.1 Einleitung

Das Arbeitspaket „Meteorologie und Hydrologie“ ist als Teil des Zielvorhabens „Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen“ beauftragt, realistische, aber in dieser Form noch nicht beobachtete Extremniederschläge und daraus resultierende Abflusssituationen zu generieren. Damit ist es möglich instationäre Überflutungsszenarien abzubilden und einen Beitrag zum Entwickeln von Evakuierungsplänen bei Extremhochwässern oder einem Talsperrenbruch zu leisten.

Außerdem liegt der Fokus auf der Untersuchung kleiner alpiner Einzugsgebiete und deren Gefährdung durch sehr lokal auftretende Sturzfluten, die durch konvektive Starkregenereignisse verursacht werden. Dafür werden eigene Wetterstationen in einem Pilotgebiet installiert, um solche kleinräumig auftretende Ereignisse besser erfassen und im hydrologischen Modell beschreiben zu können.

Anhand von meteorologischen Messungen an einer Seilbahn wird untersucht, ob mit den dort aufgezeichneten Daten Aussagen über die atmosphärische Schichtung getroffen werden können und inwiefern diese für eine lokale Unwettervorhersage einsetzbar sind.

2.1.2.2 Untersuchungsgebiete

Für das Projektvorhaben werden zwei reale Beispielstandorte gewählt, welche jeweils spezifische Eigenschaften besitzen, die und für das Forschungsvorhaben von besonderer Bedeutung sind.

Das Untersuchungsgebiet Altensteig/Nagold befindet sich im Nordschwarzwald und zeichnet sich durch seinen mittelgebirgigen Charakter aus. In diesem Untersuchungsgebiet befindet sich auch die Nagoldtalsperre, an der verschiedene Bedrohungsszenarien in Form von Talsperrenversagen oder unkontrollierten Abflussverhältnissen durch Extremniederschläge untersucht werden. Die Auswertung der größten gemessenen Scheitelabflüsse in diesem Einzugsgebiet zeigt, dass die großen Hochwässer verbunden mit der Schneeschmelze in den Wintermonaten auftreten. Dabei sind die beiden Hochwasserereignisse von 1990 und 1993 zu nennen, die auch im Mittelpunkt der hydrologischen Untersuchungen stehen. Daher wird in diesem Gebiet auch ein wesentliches Augenmerk auf die Schneeakkumulation und -schmelze gelegt, wobei gerade außergewöhnlich intensive Niederschlagsereignisse, verbunden mit der Schneeschmelze, zu extremen Abflussverhältnissen führen können. Die Gesamtfläche des berücksichtigten hydrologischen Einzugsgebietes beträgt 138 km².

Das zweite Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall, Saalach/Seebach liegt am Alpenrand im äußersten Südosten Bayerns nahe der österreichischen Grenze. In diesem Gebiet werden zwei Flusseinzugsgebiete betrachtet. Zum einen wird eine hydrologische Modellierung für die Saalach durchgeführt, welche sich durch ihre größtenteils hochalpine Einzugsgebietscharakteristik auszeichnet. Die Gesamteinzugsgebietsfläche der Saalach beträgt 1.021 km². Zum anderen wird das zweite Flussgebietsmodell für den Seebach, einem linksseitigen Zufluss der Saalach, erstellt, welcher mit 19 km² nur ein sehr kleines Einzugsgebiet besitzt. In diesen beiden Einzugsgebieten liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf schnell auftretenden Hochwasserereignissen, welche im Fall der Saalach zum einen durch ortsfeste und orographisch beeinflusste großflächigere Niederschlagsgebiete ausgelöst werden. Zum anderen dient das Einzugsgebiet des Seebachs für die Untersuchung der Gefährdung kleiner alpiner Flussgebiete durch sogenannte Sturzfluten, welche meist nur sehr lokal auftreten und durch sehr intensive kleinräumige konvektive Starkregenereignisse ausgelöst werden.

Mannigfaltige meteorologische, aber auch gebietsspezifische physikalische und hydrologische Prozesse beeinflussen die Hochwassergefahr eines Einzugsgebiets. Zweifelsfrei ist der Niederschlag dabei eine der wichtigsten Größen in der hydrologischen Modellierung. Für beide Beispielstandorte gilt, dass sie mit ihrer Lage im Schwarzwald und an bzw. in den Alpen zu den niederschlagsreichsten Regionen in Deutschland zählen.

2.1.2.3 Aufbau und Betrieb von Messtechnik

Das Arbeitspaket „Meteorologie und Hydrologie“ beinhaltet ebenfalls den Aufbau eines eigenen Messnetzes zum Erfassen von meteorologischen und hydrologischen Größen im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall.

Es werden zwei Wetterstationen im Gebiet installiert und betrieben. Die Standorte sind so gewählt, dass sie dazu beitragen die räumliche Niederschlagsvariabilität, zu erfassen, welche gerade bei den eingangs erwähnten Sturzfluten lokal sehr hoch sein kann. Solche Niederschlagsereignisse würden unter Umständen von den weiter entfernt liegenden bereits existierenden Messstationen gar nicht oder nicht in dieser Intensität aufgezeichnet werden, was sich schließlich fehlerhaft auf die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung auswirken kann. Aus diesem Grund befindet sich eine Station im Zentrum des Einzugsgebiets des Seebachs auf 472 müNN. Eine weitere Station ist auf dem 1.771 müNN hohen Hochstauen installiert. Dieser Standort wird gewählt, um die ausgeprägte Topographie und deren Einfluss auf die räumliche Niederschlagsverteilung besser erfassen zu können. Solche orographischen Niederschläge werden durch das Aufsteigen feuchter Luftmassen, verbunden mit Abkühlung und Kondensation an Gebirgen verursacht. Dort entstehen

dann sogenannte Stauniederschläge von unterschiedlicher Dauer und Intensität. Diese orographischen Effekte sind der Grund dafür, dass die Niederschlagssummen im Bergland im Mittel höher sind als im Flachland, was durch diese Station berücksichtigt werden soll.

Ein weiteres Ziel ist die Untersuchung der atmosphärischen Schichtung mit Hilfe von Messungen an einer Seilbahn. Dafür ist eine Gondel auf den 1.583 müNN hohen Predigtstuhl mit meteorologischen Sensoren ausgestattet. Es werden der Luftdruck, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte gemessen. Durch die Installation der Messtechnik auf einer Gondel ist es möglich in einer zeitlichen Auflösung von 10 Sekunden kontinuierliche Höhenprofile während der Berg- und Talfahrten aufzuzeichnen. Mittels dieser Messprofile wird untersucht, inwieweit Aussagen über die atmosphärische Stabilität getroffen und ob daraus kleinräumige Vorhersagen für das Auftreten von konvektiven Niederschlagsereignissen abgeleitet werden können.

Neben dem Aufbau meteorologischer Messtechnik wird der Seebach mit hydrologischer Messtechnik im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall ausgestattet. Dieses Einzugsgebiet war bis dato ein sogenanntes unbeobachtetes Gewässer, weshalb keine präzisen Aussagen über seine hydrologischen Eigenschaften gemacht werden können. Um für dieses kleine Einzugsgebiet hydrologische Modellberechnungen durchführen zu können, werden entlang des Seebachs Pegelmessstellen eingerichtet, die es ermöglichen, an vier Stellen kontinuierlich die Wasserstände des Seebachs aufzuzeichnen. Um die Wasserstandszeitreihen in die für das hydrologische Modell benötigten Abflusszeitreihen umzurechnen, werden während der gesamten Projektlaufzeit an den jeweiligen Pegelmessstellen Flügelmessungen durchgeführt, um daraus den Abfluss für bestimmte Wasserstände zu ermitteln. Dabei ist es von großer Bedeutung, die Messungen bei möglichst unterschiedlichen Wasserständen durchzuführen, um über Messwerte insbesondere bei höheren Abflüssen zu verfügen. Anhand der Punktmessungen wird anschließend mit einer Regressionsanalyse die Wasserstand-Abfluss- Beziehung bestimmt, womit für jeden Pegel eine Abflusskurve zur Verfügung stand. Damit werden die kontinuierlichen Abflusszeitreihen berechnet.

2.1.2.4 Hydrometeorologische Belastungsszenarien

Die hydrometeorologischen Belastungsszenarien dienen der Kalibrierung der hydraulischen Modelle, womit die Überflutungspotentiale in den Untersuchungsgebieten für gemessene Hochwasserereignisse aus der Vergangenheit aufgezeigt werden. Außerdem dienen diese Ereignisse als Grundlage für die nachfolgende Ableitung der hydrometeorologischen Extremszenarien, um mit deren Hilfe realistische bis dato unbeobachtete Hochwasserereignisse abzubilden und deren Folgen auf die Einzugsgebiete und deren Infrastruktur abzuschätzen.

Damit können instationäre Abflusszeitreihen für eine detaillierte hydraulische Berechnung zur Verfügung gestellt werden.

Für das Untersuchungsgebiet Nagold werden dafür die bereits erwähnten Hochwasserereignisse von 1990 und 1993 gewählt. Bei beiden Ereignissen traten in der Stadt Altensteig mit $91 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $92 \text{ m}^3/\text{s}$ ähnliche Abflüsse, sie werden jedoch durch unterschiedliche Randbedingungen und Witterungsverhältnisse verursacht. Bei dem Ereignis von 1990 waren in erster Linie nur wenige Stunden andauernde, jedoch sehr intensive Niederschläge, die in den Höhenlagen teilweise als Schnee fielen, verantwortlich. Den Niederschlägen überlagerte sich die Schneeschmelze, welche durch den über den Tag eingetretenen Temperaturanstieg ausgelöst wird. Dabei kann der Abflussanstieg aus dem Einzugsgebiet komplett durch die unterhalb liegende Nagoldtalsperre zurückgehalten werden. Das Hochwasser von 1993 hingegen wird durch mehrere Tage anhaltenden intensiven Regen und einhergehende Schneeschmelze ausgelöst. Durch den starken Vorregen hatte der Boden bereits einen hohen Sättigungsgrad erreicht und war bis zum Zeitpunkt des Scheitelabflusses nicht mehr aufnahmefähig. Außerdem kam es bei diesem Ereignis zu zwei Scheiteln der Hochwasserwelle. Die erste Hochwasserwelle im Oberlauf der Nagold kann komplett durch die Nagoldtalsperre abgefangen werden. Die zweite Hochwasserwelle kann nicht mehr im Speicher der Nagoldtalsperre zurückgehalten werden, was zu einem Anspringen der Hochwasserentlastung führte.

Damit sind für dieses Untersuchungsgebiet die beiden Referenzszenarien definiert: Zum einen ein großflächiges und intensives Niederschlagsgebiet, das trotz der Hochwasserschutzwirkung der Nagoldtalsperre zu Überschwemmungen in Altensteig führt. Zum anderen – analog zum Ereignis von 1993 – das Anspringen der Hochwasserentlastung, so dass sich trotz Talsperre unkontrollierte Abflussbedingungen einstellen.

Bei den Referenzszenarien an der Saalach im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall werden zwei Hochwasserereignisse aus der jüngeren Vergangenheit gewählt. Aufgrund des sehr variablen Sediment- und Geschiebetransports dieses alpinen Flusses werden keine früheren Ereignisse in Betracht gezogen, da keine Werte für die Sohlspiegellagen vorliegen und somit mit Unsicherheiten in der hydraulischen Modellierung infolge von Sohlveränderungen zu rechnen wäre. Die Referenzereignisse stammen aus den Jahren 2002 und 2005, wobei das Hochwasser 2002 mit $805 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Unterjettenberg das höchste bis dahin gemessene Hochwasser darstellt.

Für das Einzugsgebiet des Seebachs bieten sich etwas andere Voraus- und Zielsetzungen, da dort keine langjährigen Abflusszeitreihen zur Verfügung stehen. Somit liegen auch keine Daten für historische Hochwasserereignisse vor. Deshalb

werden aus den während der Projektlaufzeit aufgezeichneten Datenreihen, die höchsten Abflussereignisse ausgewählt und jeweils zwei Ereignisse bestimmt, die zum einen durch advective und zum anderen durch konvektive Niederschlagsereignisse ausgelöst werden. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass keines dieser Ereignisse zu Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Seebachs geführt hat.

Die räumliche Verteilung der Eingangsdaten, wie z. B. das digitale Höhenmodell, Landnutzung, Niederschlag, Temperatur etc. der hydrologischen Modelle hat ein Raster mit einer Auflösung von 500 m auf 500 m. Die meteorologischen Daten der Messstationen liegen nur als Punktinformation vor und mussten zunächst in eine räumliche Form überführt werden, um für jede Rasterzelle einen Niederschlags- bzw. Temperaturwert bereit zu stellen. Innerhalb dieser Untersuchung kommen diverse Kriging-Verfahren (Ordinary-Kriging (OK) und External Drift Kriging (EDK)) als Interpolationsmethode des Niederschlags und der Temperatur zum Einsatz. Kriging ist ein geostatistisches Werkzeug, das es ermöglicht aus benachbarten Stationswerten einen Wert für einen Ort ohne Messwerte zu interpolieren. Beim EDK geht als Zusatzinformation die topographische Höhe mit ein, wodurch Höhenlagen mit mehr Niederschlag als tiefere Lagen bedacht werden. Bei der Temperatur wird dadurch ein abnehmender Temperaturgradient mit zunehmender Höhe berücksichtigt. Außerdem werden beim EDK zwei weitere Methoden angewandt, indem zum einen das zugrunde liegende digitale Höhenmodell vorher geglättet und zum anderen in die bei dem Niederschlagsereignis vorherrschende Windrichtung gedreht wird. Bei der Glättung des Höhenmodells werden kleinräumig stark wechselnde Änderungen in der Topographie abgemindert. Dies hat zur Folge, dass auch sehr enge und steile Täler mit höheren Niederschlagsmengen bedacht werden. Beim ursprünglichen EDK werden die tieferen Lagen mit deutlich geringeren Niederschlagsmengen berücksichtigt, als die umliegenden Höhenlagen. Bei der Drehung des digitalen Höhenmodells in die vorherrschende Windrichtung werden dem Niederschlagsgebiet zugewandte topographische Erhebungen bzw. Rasterzellen (Luvseite) mit höheren und die abgewandte Leeseite mit geringeren Niederschlagsmengen bedacht. Dadurch können die Effekte der bereits beschriebenen orographischen Niederschläge berücksichtigt.

Nach der Kalibrierung der hydrologischen Modelle für die beschriebenen Hochwasserereignisse im jeweiligen Untersuchungsgebiet, erfolgt Berechnung der künstlich generierten Extremniederschlagsereignisse und deren Auswirkungen auf die Abflusssituation mit Hilfe der Referenzszenarien.

Dafür werden zunächst die den Referenzszenarien zugrunde liegenden Niederschlagsereignisse modifiziert und erhöht. Die Originalniederschlagsereignisse werden in ihrem zeitlichen Verlauf und ihrer Intensität übernommen. Die synthetische

Erhöhung der Niederschlagsreihen erfolgt mit Werten aus KOSTRA (Datenbank des Deutschen Wetterdienstes mit Starkniederschlagshöhen für unterschiedliche Dauerstufen und Jährlichkeiten in Deutschland). Diese Werte liegen dort für Rasterflächen mit einer Größe von 71,5 km² vor. Da der Niederschlag räumlich sehr stark variieren kann, werden die Rasterflächen betrachtet, in denen die Niederschlagsstationen positioniert sind. Die ausgeprägte räumliche Variabilität der Starkregenhöhen kann man aufgrund der markanten Topographie besonders gut im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall beobachten.

Für die Erhöhung der Ereignisse werden die Maximalwerte mit den Dauerstufen zwischen 6 und 12 Stunden für das Einzugsgebiet des Seebachs und Dauerstufen von 24, 48 und 72 Stunden für die anderen beiden Einzugsgebiete verwendet. Die genutzten Jährlichkeiten der KOSTRA-Werte sind 50 a und 100 a. Die sich über die jeweilige Dauerstufe ergebende Summendifferenz zwischen dem KOSTRA-Wert und dem gemessenen Niederschlag wird mit Hilfe einer Gleich- oder Normalverteilung an das Originalereignis angepasst und addiert. Dabei ist zu beachten, dass die erhöhte Niederschlagssumme den KOSTRA-Maximalwert für die jeweilige Dauerstufe und den möglichen stündlichen Maximalwert im betrachteten Rasterfeld nicht überschreitet.

Im Untersuchungsgebiet Nagold werden die künstlichen Extremereignisse in einigen Punkten modifiziert und untersucht. Die Veränderungen bestehen darin, dass die Temperaturzeitreihe so verschoben wird, dass die Schneeschmelze deutlicher mit den Niederschlagsspitzen zusammenfällt. Zum anderen wird den Niederschlagsereignissen ein Vorregen mit 20-jährlicher Wiederkehrzeit vorgeschaltet, um eine erhöhte Bodenfeuchte zu erzeugen.

Für die Extremszenarien im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall werden die Stationen, die im Bereich der höchsten Intensitäten des Originalereignisses liegen, mit einem 100-jährlichen Niederschlag erhöht. Zusätzlich werden einige Stationen am Rand des Niederschlagsgebiets mit einem Regen von einer 50-jährlichen Wiederkehrzeit belegt. Die Erhöhung der Niederschlagsereignisse für das Einzugsgebiet des Seebachs wird mit geringeren Dauerstufen durchgeführt, da hier der Fokus auf den kurzzeitigen Starkregenereignissen liegt.

2.1.2.5 Hydrologisches Flussgebietsmodell

Um die Auswirkungen der meteorologischen Extremszenarien quantifizieren zu können, wird für beide Untersuchungsgebiete ein hydrologisches Flussgebietsmodell implementiert, mit dem zeitlich hochaufgelöste Abflussganglinien dieser sehr selten auftretenden Extremszenarien generiert und dem hydraulischen Modell für

instationäre Berechnungen zur Verfügung gestellt werden. Dabei werden für die beiden Untersuchungsgebiete unterschiedliche Modellansätze gewählt.

Der räumlich verteilte Modellansatz für die hydrologische Modellierung der Einzugsgebiete der Nagold besteht aus einem Translations- (Zeitflächendiagramm) und Retentionsmodell (Linearer Speicher). Damit kann sowohl der schnelle Oberflächenabfluss, als auch der langsamere Zwischenabfluss abgebildet werden. Der zuvor bestimmte Effektivniederschlag wird dabei anteilig auf die beiden Modelle verteilt und der Gesamtabfluss anschließend durch die Addition der beiden Komponenten berechnet. Da die Nagold entlang ihrer Fließstrecke bis zur Gebietsgrenze der Stadt Altensteig durch die bereits erwähnte Nagoldtalsperre teilweise staugeregelt ist, wird für diesen Gewässerabschnitt eine Speichersimulation durchgeführt. Dabei werden die Vorgaben der Talsperrensteuerung berücksichtigt, was im Wesentlichen das Abfahren der Volumensollganglinie und das Einhalten der Mindest- und Höchstabgaben beinhaltet. Somit kann im Hochwasserfall über eine Volumenbilanz der Zu- und Ausflüsse und des vorhandenen Stauraums z. B. ein Anspringen der Hochwasserentlastung bei Überschreitung des vorhandenen Retentionsvolumens und die daraus resultierende Ausflussganglinie simuliert werden. Für die Fließstrecke zwischen dem Talsperrenauslass und dem Pegel Altensteig wird neben dem Einzugsgebietsmodell auch ein Wellenablaufmodell für die Hochwasserwelle, die aus der Talsperre abgegeben wird, implementiert. Dafür wird das Muskingum-Modell verwendet, welches zusätzlich laterale Zuflüsse entlang des Fließwegs berücksichtigt. Für die Bestimmung der Modellgüte werden das Bestimmtheitsmaß (r^2) und der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (N-S-Koeffizient) verwendet.

Für die hydrologischen Modellierungen im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall wird als Niederschlags-Abfluss-Modell (N/A-Modell) das am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie weiterentwickelte HBV-IWS-Modell angewandt, welches zu den konzeptionellen Modellen gehört und in einer räumlich verteilten Version rechnet. Die räumliche Auflösung der Eingangsdaten ist dabei die gleiche wie bei dem Modell für das Einzugsgebiet der Nagold. Als Gütemaß wird der N-S-Koeffizient verwendet.

2.1.2.6 Meteorologische Vorhersagen

Die mit meteorologischer Messtechnik ausgerüstete Gondel einer Seilbahn diente zur Untersuchung der lokalen vertikalen atmosphärischen Schichtung. Üblicherweise werden für diese Art der meteorologischen Messungen Wetterballons eingesetzt, welche frei und in deutlich größere Höhen aufsteigen. Da diese Messungen sehr aufwendig und teuer sind, ist die Durchführung im operationellen Einsatz nicht mehrmals täglich möglich.

Aus diesem Grund werden die Messungen an einer Gondel durchgeführt und die gemessenen Daten zunächst auf ihre Brauchbarkeit hin bewertet. Das vertikale Messprofil ist mit 1.100 m deutlich geringer als bei der Nutzung von Wetterballonen. Allerdings können während der Betriebszeiten mehrere Messungen durchgeführt werden. Es werden sogenannte Stabilitätsindices abgeleitet, welche eine Aussage zur atmosphärischen Stabilität erlauben.

Für die Ableitung dieser Stabilitätsindices werden zwei verschiedene Typen von Indices betrachtet. Die einen lassen sich als „statische“ Indices bezeichnen, da in ihre Berechnung nur gemessene Größen auf definierten Höhenstufen eingehen. Der andere Typ kann als dynamisch bezeichnet werden, da dort die sogenannte „Lifted Parcel Theory“ für die Berechnung der Indexwerte verwendet wird. Bei den dynamischen Indices wird ein virtuelles Luftpaket ohne Interaktion mit seiner Umwelt entlang der Trocken- bzw. Feuchtadiabaten auf die Endhöhe des Messprofils gehoben. Damit kann z. B. die theoretische Temperatur dieses Pakets errechnet und mit der tatsächlich gemessenen Temperatur zu einem Indexwert verrechnet werden. Als Beispiel für einen statischen Index sei an dieser Stelle der „K-Index“ (KI) genannt. Für den Typ der dynamischen Indices wird u.a. der „Showalter-Index“ (SI) verwendet.

Für die Berechnung der dynamischen Indices muss das Kondensationsniveau bestimmt werden, um zu entscheiden, ob das virtuelle Luftpaket bei seiner Hebung trocken- oder feuchtadiabatisch abgekühlt wird.

Da herkömmliche Grenzwerte für die Klassifizierung der Stabilität aufgrund des begrenzten vertikalen Messbereichs nicht direkt übertragbar sind, werden, neue Grenzwerte ermittelt. Dafür werden alle Indexwerte der Messfahrten anhand von operationellen Vorhersagen in aktive und nicht-aktive Fälle unterteilt. Ein aktiver Fall steht bei diesen Untersuchungen für eine instabile Wetterlage, d. h. es wird tatsächlich ein konvektives Niederschlagsereignis beobachtet. Dabei werden alle Indexwerte drei Stunden vor der Beobachtung des Ereignisses als aktiv gesetzt. Nun ist es möglich die Verteilungen der Indexwerte für die beiden Fälle zu untersuchen und mögliche Grenzwerte festzulegen.

Mithilfe der Grenzwerte für die verschiedenen Stabilitätsindices kann eine theoretische Klassifizierung in labile und stabile Wetterlagen und folglich eine Unwettervorhersage erfolgen. Diese Vorhersagen werden in einem nächsten Schritt mittels einer „Skill-Score-Analysis“ auf ihre Qualität hin überprüft. Dafür wird anhand der theoretischen Vorhersagen die Anzahl der möglichen Kombinationen (Skill-Score-Matrix) bestimmt, d. h. beispielweise in wie vielen Fällen eine Unwettervorhersage ausgegeben und anschließend tatsächlich auch ein konvektives Niederschlagsereignis beobachtet wird. Durch die Häufigkeit der einzelnen Kombinationen können Genauigkeits- bzw. Gütemaße, wie z. B. die Trefferrate, die

Erkennungswahrscheinlichkeit oder die Fehlalarmrate für die Vorhersagen der verschiedenen Indices berechnet werden. Diese Maße erlauben eine Bewertung der erstellten Unwettervorhersagen und somit auch eine Entscheidung über die Einsatzfähigkeit in der Praxis.

2.1.2.7 Ergebnisse

Die hydrologische Modellierung im Untersuchungsgebiet Nagold hat gezeigt, dass mit dem eingesetzten Modell sowohl die Dynamik, der Anstieg, als auch der Auslauf der Abflusskurve gut nachgebildet werden kann. Auch der Zeitpunkt der Abflussspitzen wird sehr gut getroffen. Allerdings ist bei der automatisierten Kalibrierung zu erkennen, dass der Scheitelabfluss in der Regel unterschätzt wird. Deswegen wird für die einzelnen Hochwasserereignisse eine manuelle Kalibrierung durchgeführt, was zu verbesserten Scheitelabflüssen führt. Allerdings drückt sich dies nicht unbedingt auch in einer Verbesserung der Gütemaße zur Bewertung der Modelleistung aus. In der nachfolgenden Abbildung ist dies beispielhaft an dem Hochwasserereignis von 1990 gezeigt. Links ist dabei das Modellergebnis mit einer automatisierten und rechts mit einer manuellen Optimierung der Modellparameter zu sehen. Außerdem sind die Bestimmtheitsmaße und die Nash-Sutcliffe-Koeffizienten für die beiden Ereignisse von 1990 und 1993 an den Pegeln Erzgrube-Zulauf und Altensteig mittels automatisierter Kalibrierung tabellarisch gegeben.

Tab. 2.2: Gütemaße der N/A-Modellierung (UG Altensteig)

Ereignis	Pegel Erzgrube-Zulauf		Pegel Altensteig	
	r^2	NS	r^2	NS
1990	0,910	0,890	0,924	0,704
1993	0,872	0,860	0,955	0,750

Die Ergebnisse des hydrologischen Modells im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall zeigen bei der automatischen Kalibrierung ebenfalls gewisse Defizite im Abbilden der Abflussspitzen. Auch hier kann jedoch mit Hilfe einer manuellen Anpassung der Modellparameter, speziell für einzelne Hochwasserereignisse, eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Das Ergebnis der Kalibrierung für das Referenzszenario 2005 an der Saalach ist in der nachfolgenden Abbildung oben gegeben. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient für dieses Ereignis beträgt 0,889. In der unteren Abbildung ist beispielhaft die Abflussganglinie für das berechnete Extremszenario basierend auf dem Ereignis von 2005 gegeben. Der Scheitelabfluss für das Referenzszenario beträgt 520 m³/s und das des Extremszenarios 1.455 m³/s. Der höchste bisher gemessene Scheitelabfluss am Pegel Unterjettenberg beträgt 805 m³/s.

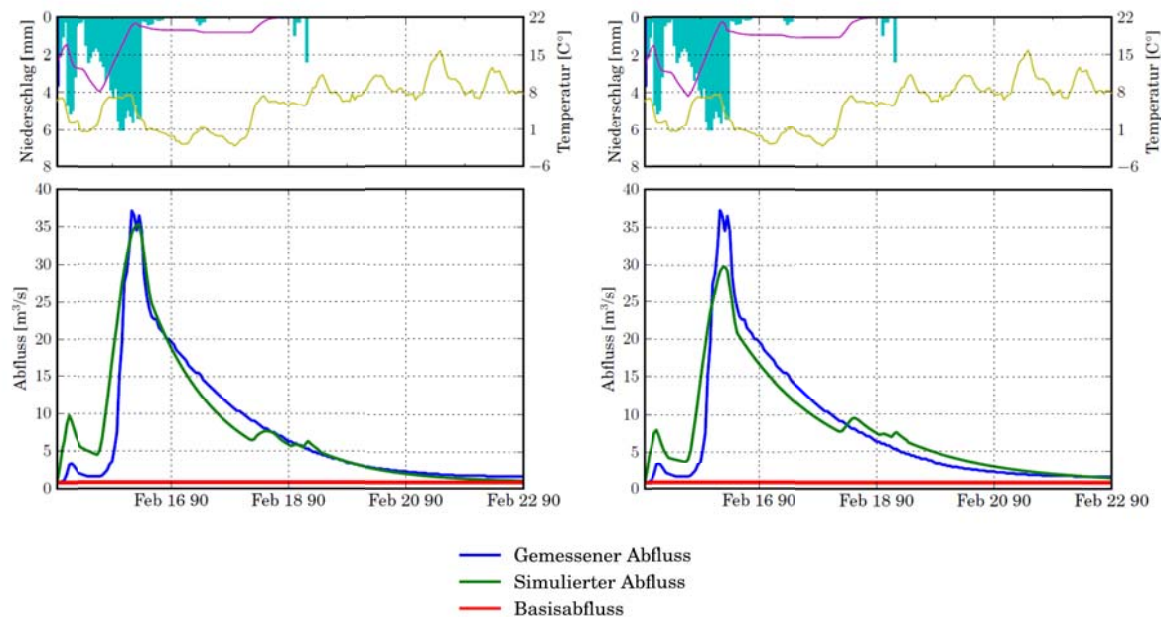


Abb. 2.5: Automatische und manuelle Modellkalibrierung (HW 1990)

Mithilfe der atmosphärischen Messungen an der Seilbahn soll die Brauchbarkeit für kleinräumige Vorhersagen in Bezug auf konvektive Niederschlagsereignisse überprüft werden. Die Messwerte können die vertikalen Profile der Messgrößen in sogenannten Stüve-Diagrammen, z. B. von Inversionswetterlagen plausibel abbilden. Die anhand der Stabilitätsindices erstellten Unwettervorhersagen zeigen allerdings keine klaren Ergebnisse. Es können teilweise klare Tendenzen im Tagesgang der Indexwerte bei Auftreten eines konvektiven Niederschlagsereignisses erkannt werden, auf die dann auch eine eine korrekte richtige Unwetterwarnung erfolgt. Allerdings zeigen die Vorhersageauswertungen auch, dass in zu vielen Fällen ein Fehlalarm ausgegeben wird. Die Untersuchungen zeigen, dass einige der gewählten Stabilitätsindices unbrauchbar sind.

Es können ebenfalls Unterschiede in der Vorhersagegüte beobachtet werden, die von der Wahl des feuchtadiabatischen Temperaturgradienten und der des virtuellen Luftpakets bei den dynamischen Indices abhängig sind. Die Entscheidung, ob eine reale instabile Luftschichtung vorliegt, wird anhand verschiedener Entscheidungshilfen durchgeführt. Hierbei kommen operationell erstellte Unwettervorhersagen, Blitzmessungen, Webcam-Bilder und eigene Messungen der Wetterstationen zum Einsatz. Auch hier zeigt sich, dass die Methode der Ereignisverifizierung Einfluss auf die Gütemaße der erstellten Vorhersagen hat. Abschließend wird ein multikriterieller Ansatz überprüft. Bei dieser Methode gehen neben dem Indexwert weitere Größen in die Vorhersageentscheidung für eine Unwetterwarnung mit ein. Dazu werden Messdaten, wie z. B. Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchte etc. der eigenen Wetterstation als Zusatzinformation herangezogen

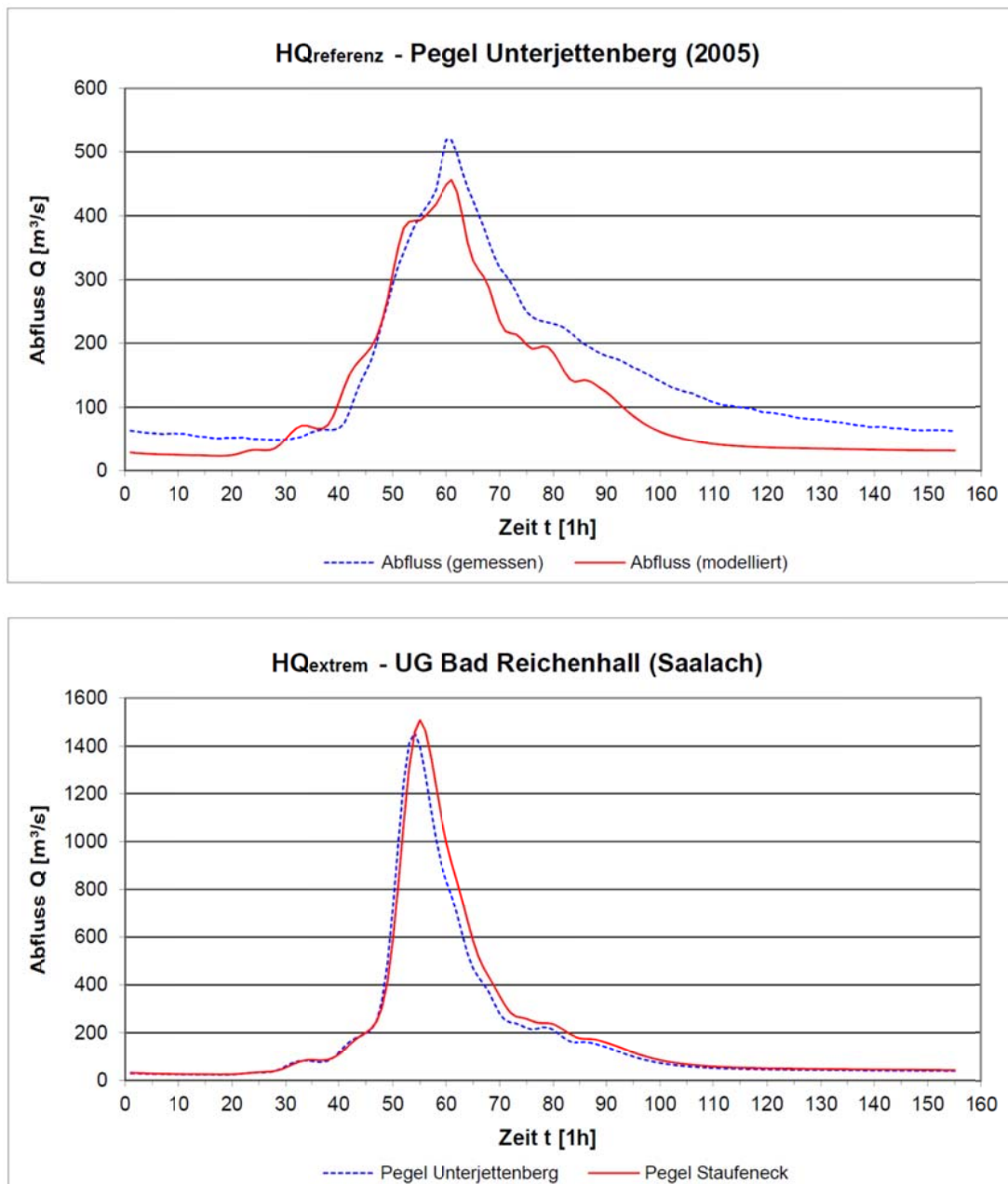


Abb. 2.6: Ergebnisse des N/A-Modells – UG Bad Reichenhall

Werden dabei gewisse Kriterien für Grenzwerte dieser Größen nicht erreicht, wird der Indexwert nicht mehr berücksichtigt und keine Vorwarnung ausgegeben. Dadurch können die Gütemaße, wie z. B. die Fehlalarmrate weiter verbessert werden. Eine kurze Übersicht der Ergebnisse ist in der nachfolgenden Tabelle anhand des „Showalter-Index“ (SI) gegeben.

Die römischen Ziffern stehen für die unterschiedlichen Konfigurationen, welche Informationen in die Vorhersage mit eingehen und welche Grenzwerte für die einzelnen Kriterien angewendet werden. Die Konfiguration I ist hierbei die beste Vorhersageversion, bei der lediglich die Werte des Stabilitätsindexes berücksichtigt werden. Die Konfiguration II umfasst die Berücksichtigung zusätzlicher meteorologischer Größen, ohne eine Optimierung der jeweiligen Grenzwerte. Bei den

Konfigurationen III bis VIII wird jeweils der Grenzwert einer Entscheidungsgröße optimiert. In Konfiguration IX ist das Ergebnis zu sehen, bei dem für alle Größen der beste Grenzwert bestimmt wird. Die Abkürzungen der Genauigkeits- bzw. Qualitätsmaße in der Tabelle stehen für die Trefferrate (HR), die Erkennungswahrscheinlichkeit (POD), die Fehlalarmrate (FAR), den Critical-Success-Index (CSI), den Heidke-Skill-Score (HSS) und den True-Skill-Score (TSS).

Tab. 2.3: Ergebnisse der Vorhersageverifizierung (Showalter-Index)

Skill Scores - MultiMeteo / Showalter-Index $SI(\Gamma_{5,0})$									
Index	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Genauigkeitsmaß									
HR	0.58	0.67	0.71	0.76	0.67	0.70	0.70	0.81	0.79
POD	0.78	0.78	0.74	0.67	0.77	0.74	0.75	0.62	0.66
FAR	0.77	0.73	0.70	0.66	0.72	0.71	0.71	0.59	0.62
CSI	0.21	0.25	0.27	0.29	0.26	0.27	0.26	0.33	0.32
Qualitätsmaß									
HSS	0.16	0.24	0.27	0.32	0.25	0.27	0.26	0.38	0.36
TSS	0.33	0.43	0.44	0.45	0.43	0.43	0.44	0.47	0.47

Wie anhand der Ergebnisse für den Showalter-Index zu erkennen ist, können mit Hilfe der verschiedenen Vorhersagemethoden Verbesserungen erzielt werden, wie z. B. bei der Trefferrate von 58% auf 79% und ebenso bei der Fehlalarmrate von 77% auf 62%.

2.1.2.8 Zusammenfassung

Im Untersuchungsgebiet Nagold wird ein verteiltes hydrologisches Modell entwickelt, welches trotz der Vereinfachung der physikalischen Prozesse und weniger benötigter Eingangsgrößen gute Modellergebnisse zeigt. Allerdings darf nicht unerwähnt bleiben, dass bei einer automatischen Kalibrierung des Modells die Abflussspitzen in der Regel unterschätzt werden, was durch eine manuelle Kalibrierung verbessert werden kann. Für die untersuchten Ereignisse zeigt sich, dass die Parameter der Schneeakkumulation und –schmelze eine entscheidende Rolle spielen.

Mit der Implementierung der Speichersimulation im hydrologischen Modell wird das gesamte Einzugsgebiet bis zum Pegel Altensteig modelliert. Die Speichersimulation ermöglicht es, unterschiedliche Steuerungen in Bezug auf die Höchstabgabe und das Zurückfahren auf die Volumensollganglinie nach einem Hochwasserereignis durchzuführen.

Bei der ereignisbezogenen Kalibrierung unterscheiden sich die Parameter zur Beschreibung der physikalischen Prozesse innerhalb des Modells zwischen den Ereignissen teilweise deutlich. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen

Ausgangssituationen bezüglich des Vorregens und der Bodenfeuchtigkeit zurückführen, weshalb die Bestimmung eines allgemeingültigen Parametersatzes nicht möglich ist.

Das entwickelte hydrologische Modell zeigt insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse. Ein wesentlicher Vorteil des Modells sind der einfache Aufbau und die einfache Anwendung durch vergleichsweise wenige Eingangsdaten und geringen Rechenaufwand.

Beim Einsatz des HBV-IWS-Modells im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall zeigen die Modellergebnisse in der täglichen und stündlichen Auflösung teilweise eine deutliche Unterschätzung der Spitzenabflüsse. Eine höhenabhängige Berücksichtigung und Optimierung der Feldkapazitäten ergeben jedoch entsprechend verbesserte Ergebnisse.

Für beide Untersuchungsgebiete werden Extremszenarien modelliert und als Eingangsdaten an die hydraulische Modellierung übergeben.

Die Ergebnisse der atmosphärischen Messungen an der Seilbahn lassen keinen eindeutigen Entschluss über die Brauchbarkeit für kleinräumige Unwettervorhersagen zu. Die Fehlalarmrate ist für einen operationellen noch Einsatz zu hoch. Ebenso sind die Qualitätsmaße in einem Bereich, indem eine derartige Vorhersage keinen Zugewinn für dieses Untersuchungsgebiet bringen würde.

Für eine eingehende Erläuterung der Vorgehensweise und Ergebnisdarstellung der hier beschriebenen Untersuchungen wird auf den ausführlichen Bericht des Arbeitspakets „Meteorologie und Hydrologie“ verwiesen.

2.1.3 Hydraulische Simulation Bad Reichenhall (AP3)

2.1.3.1 Arbeitsauftrag

Das Arbeitspaket 3 (AP3) „Hydrauliksimulation“ im Verbundvorhaben EvaSim beinhaltet die Berechnung von Überflutungsszenarien. Innerhalb der Verbundpartner erfolgt der Input durch die Szenariendefinition (AP1) sowie die Niederschlags-Abflussmodellierung (AP2) mit der Bereitstellung von Abflussganglinien an den Modellrändern der Hydrauliksimulation. Erarbeitete Ergebnisse werden an die Verkehrsmodellierung (AP6) sowie direkt an die Katastrophenschutzplanung (AP7) übergeben. Im Rahmen der Entwicklungsarbeit erfolgt zusätzlich eine Übergabe von hochauflösenden Detailergebnissen für die Beurteilung der Stabilität von Fahrzeugen in der Strömung (AP5).

Aquasoli ist im AP3 für die Erstellung und den Betrieb des hydraulischen Abflussmodells im Pilotprojektgebiet von Bad Reichenhall zuständig, das mit Saalach und Seebach zwei sehr unterschiedliche Gewässer beinhaltet. Beide Gewässer können bei Hochwasser großflächig ausufern und stellen für Teile der Stadt Bad Reichenhall ein hohes Schad- und Gefahrenpotential dar. Aquasoli verwendet HYDRO_AS-2D als zweidimensionales hydraulisches Abflussmodell. Für die Kopplung der Abfluss- und Verkehrsmodelle ist die Generierung einer Schnittstelle zur Verkehrssimulation mit VISUM sowie zum Evakuierungssystem FLIWAS erforderlich, um ein besseres Krisenmanagement zu ermöglichen.

2.1.3.2 Stand der Technik

Der Einsatz von hydraulischen Abflussmodellen zur Simulation der Fließvorgänge in Gewässern und deren Vorländer ist Stand der Technik. Für den Einsatz zur Evakuierungssimulation sollten Abflussmodelle folgende Eigenschaften aufweisen:

- Lösung der Flachwassergleichung (2d-Abflussimulation)
- Nass-/ Trocken-Algorithmus
- Instationäre Abflusssimulationen möglich
- Schnelles, stabiles Lösungsschema
- Parallelisierter Berechnungscode zur Nutzung moderner Mehrkern-CPU's
- Berechnung auf unstrukturierten Gitternetzen möglich
- Simulationsmöglichkeiten für jegliche Art von hydraulischen Strukturen wie Verrohrungen/ Durchlässen, Wehren sowie Brückenüberströmung
- Genauigkeit 2. Ordnung in Raum und Zeit
- Möglichkeiten zur Rechenzeitbeschleunigung

Die nachfolgend im Projektgebiet Bad Reichenhall eingesetzte Software HYDRO_AS-2D erfüllt diese Anforderungen.

Abflussmodelle liefern als Ergebnis jegliche Form von flächigen Ergebnisdarstellungen wie Überschwemmungsgebiet, Wassertiefenverteilung oder Gefahrenzonen. Eine direkte, automatische Übertragung der Ergebnisse auf die Infrastruktur (Verkehrswege, Gebäude) inkl. einer Bewertung der Betroffenheit ist bislang nicht verfügbar. Des Weiteren sind bisher keine automatisierten Entscheidungshilfen für die Einhaltung eines Sicherheitsabstandes an Verkehrswegen verfügbar.

2.1.3.3 Das Projektgebiet Bad Reichenhall

Das Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall wird aus hydraulischen Gesichtspunkten von der Saalach bestimmt, einem Gewässer 1. Ordnung. Die letzten 32 km der insgesamt 103 km fließt die Salzach durch Bayern. Im Bereich des Projektgebiets, der Stadt Bad Reichenhall, besitzt die Saalach ein Einzugsgebiet von etwa 1 000 km². Dieses Einzugsgebiet erstreckt sich über die östlichen Ausläufer der Kitzbühler Alpen und die Salzburger Kalkhochalpen. Die Wasserführung zeigt hochalpinen Charakter. Auf bayerischem Gebiet befinden sich drei von der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung betriebene Pegel: Unterjettenberg (Fkm 26,0), Staufeneck (Fkm 15,0) und Siezenheim (Fkm 5,5).

Das Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall erstreckt sich von Fkm 20,8 im Unterwasser der Talsperre Kibling bis zur Bundesstraßenbrücke am „Staufeneck“ bei Fkm 14,6. Um mit dem Abflussmodell alle Extremereignisse abbilden zu können, wird der gesamte Talraum der Saalach bis zum Hammerauer Wehr bei Fkm 9,2 modelliert.

Neben der Saalach wird für Bad Reichenhall noch der Seebach als dominantes Nebengewässer mit kleinem Einzugsgebiet näher betrachtet. Der Seebach ist der natürliche Auslauf aus dem Thumsee. Nach Einmündung von zwei Zwischeneinzugsgebieten mündet der Seebach bei Fkm 16,4 von Westen in die Saalach. Im Abflussmodell ist der Seebach, beginnend ab den ersten Gebäuden im Ortsteil Karlstein, detailgetreu abgebildet. Aufgrund des Einzugsgebiets sind für den Seebach Sturzflutereignisse typisch.

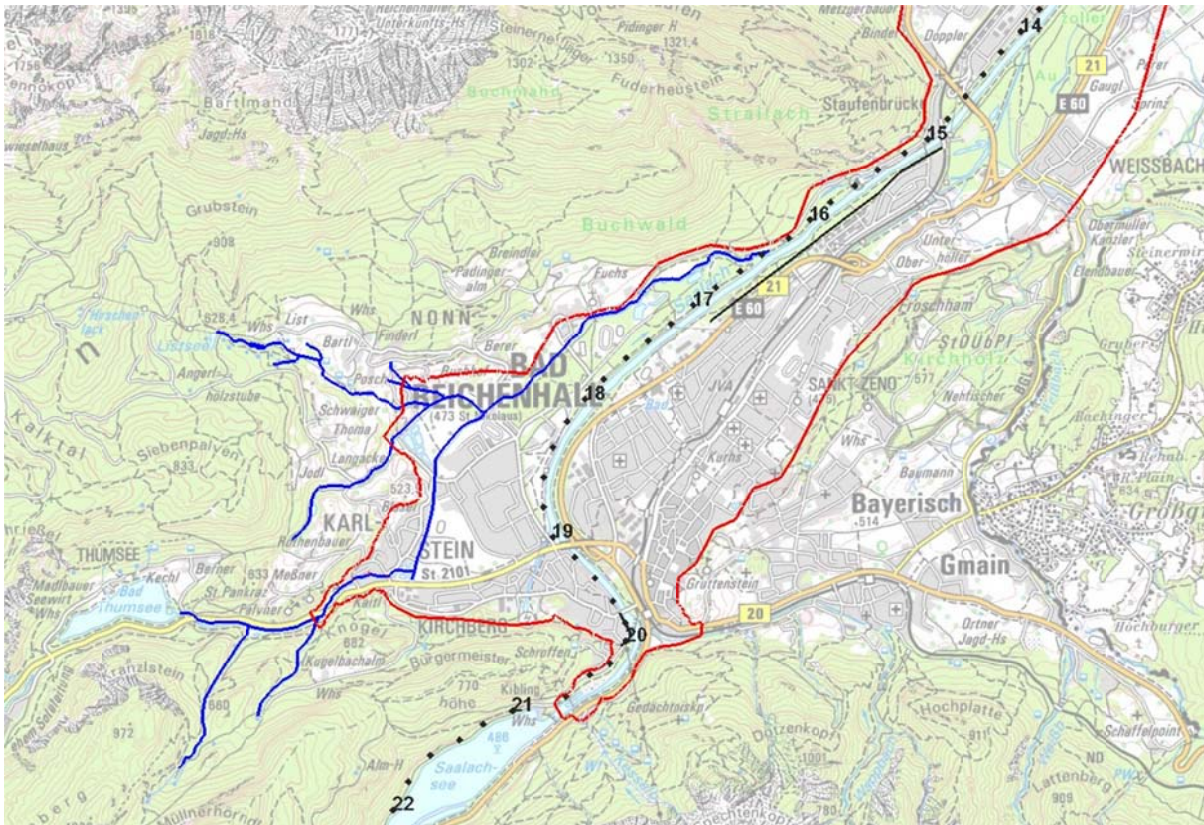


Abb. 2.7 Umgriff des 2d Abflussmodells (rote Linie) im Ortsbereich Bad Reichenhall inkl. dem Gewässersystem Seebach (blaue Linien), den Hochwasserschutzanlagen (schwarze Linien) und der Flusskilometrierung der Saalach

Eine Hochwassermauer existiert am linken Ufer der Saalach im Bereich Fkm 20,1 bis 19,7, ein Hochwasserdeich im rechten Vorland der Saalach im Bereich Fkm 17,1 bis 14,9. Am Seebach bestehen keine Hochwasserschutzanlagen.

2.1.3.4 Abflussmodell

2.1.3.4.1 Modellwahl

Entsprechend der Aufgabenstellung sind extreme Abflussereignisse im Projektgebiet Bad Reichenhall modellgestützt abzubilden. Mithilfe des zweidimensionalen Abflussmodells HYDRO_AS-2D können die Strömungsverhältnisse (Wassertiefen, -geschwindigkeiten, -richtung bzw. daraus abgeleitete Parameter wie Intensitäten) anhand der Flachwassergleichung an jedem Ort im Modellgebiet präzise berechnet und damit Aussagen über die Hochwasserbetroffenheit der Infrastruktur bis auf die Ebene der Einzelobjekte (Gebäude, Schutzgüter) bzw. Straßenabschnitte geliefert werden.

Entscheidungsgrundlage sind folgende Eigenschaften von HYDRO_AS-2D:

- Explizites Lösungsschema als Garant für absolute Stabilität der Berechnung auch bei steilen Gerinnen und/ oder extrem instationären Vorgängen (Damm-/ Deichbruch).
- Einsatz von unstrukturierten Gittern aus Dreiecks- und Viereckselementen ist möglich.
- Brückenbauwerke können zweidimensional modelliert werden (Konstruktionsunterkante als Randbedingung in Knoten).
- Für die Simulation von Verrohrungen/ Durchlässen, Wehren sowie Brückenüberströmung stehen eindimensionale Hilfsstrukturen zur Verfügung.
- Möglichkeit zur exakten Positionierung der Wasseranschlagslinie auch zwischen zwei Lösungsknoten.

2.1.3.4.2 Modellerstellung

Der Aufbau des Berechnungsgitters erfolgt anhand terrestrischer Profilvermessung für den aquatischen Bereich und DGM1 Daten aus einer Laserscann Befliegung für den terrestrischen Bereich. Alle Gebäude im Untersuchungsbereich sind anhand der digitalen Flurkarte detailgetreu und als „undurchströmbar“ im Berechnungsgitter abgebildet. Die Verkehrswege werden anhand der DGM1 Rasterdaten abgebildet. Im Rechengitter werden keine Auswerteknoten an Gebäuden oder Verkehrswegen für die spätere Ergebnisübergabe berücksichtigt. Damit die spätere Informationsübergabe der hydraulischen Belastung auf Gebäude und Verkehrswege trotzdem ohne Informationsverluste erfolgen kann, werden dafür die Schnittstellen speziell angepasst. Dieses Vorgehen sichert maximale Flexibilität bei der Modellerstellung und ist damit der Grundstein für die spätere Modellbeschleunigung hin zum Echtzeitbetrieb.

Alle inneren Randbedingungen wie Brückenunterkanten, die Überströmungsmöglichkeit von Brückenoberbauten sowie Durchlässe in den Vorländern werden anhand von Bauwerksplänen detailgetreu abgebildet.

Abbildung 2.5 zeigt eine Detailansicht der Gitterstruktur mit integrierten Gebäuden. Das Abflussmodell beschreibt mit 0,53 Millionen Knoten (1,04 Millionen Elementen) ein Gebiet von 13,9 km². Die hohe Dichte von ca. 38 000 Knoten/km² resultiert aus der detailgenauen Modellierung kleiner Strukturen (z. B. Seebach) sowie aus der Berücksichtigung aller Gebäude als Strömungshindernisse im Untersuchungsbereich. Die Landnutzung wird mittels ATKIS Daten detailliert im Modell abgebildet.

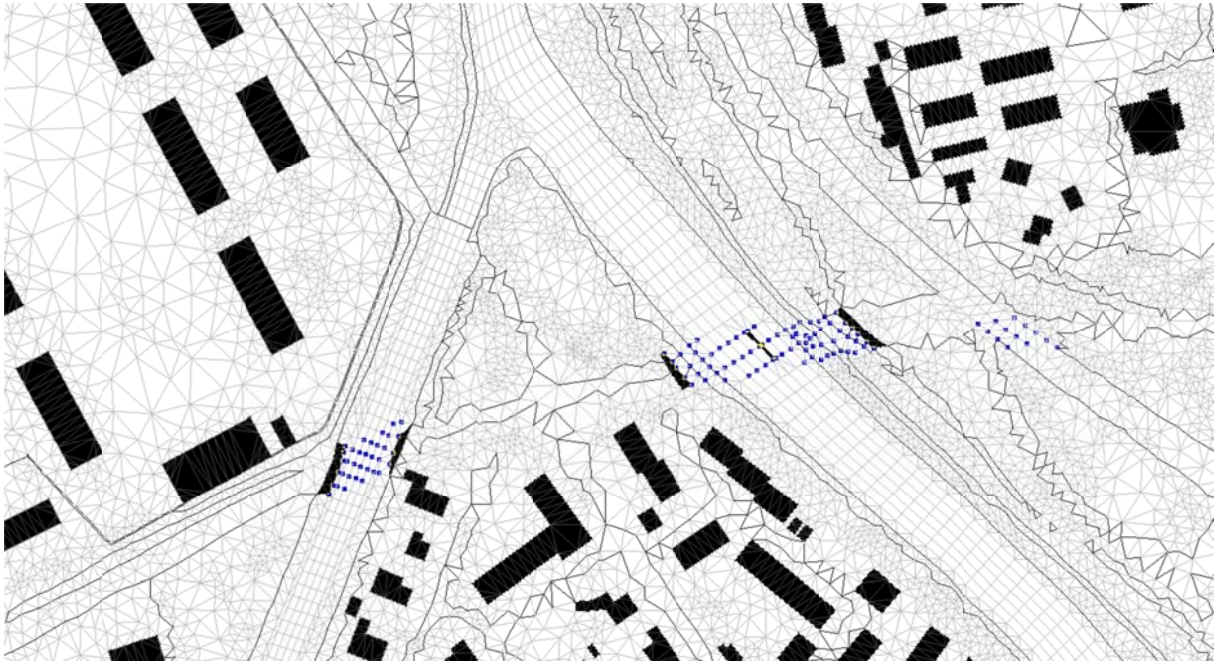


Abb. 2.8 Detailausschnitt zur Visualisierung der Gitterstruktur im Fkm 19,5 bis 18,9 (graue Linien: Elemente; schwarze Linien Materialgrenzen; schwarze Polygone: undurchströmbare Fließhindernisse wie Gebäude, Brückenpfeiler; blaue Punkte: Brückenunterkanten)

2.1.3.4.3 Modellkalibrierung und –validierung

Die Modellkalibrierung erfolgt anhand von Fixierungen von Hochwasserspiegellagen (Geschwemmsellinie) im Abstand von 200 m im gesamten Projektgebiet. Kalibriert werden die Reibungsbeiwerte im Gewässer (Sohle, Ufer) anhand der Fixierung des Hochwassers 2010. Die anschließende Validierung erfolgt anhand des Hochwassers 2002. Abb. 2.9 zeigt die berechneten Wasserspiegellagen mit den Fixierungen im Längsschnitt. Zur weiteren Plausibilisierung der beiden Fixierungen ist noch eine weitere vom Hochwasser 2006 eingetragen. Die mittlere Abweichung der Berechnung zur Fixierung beträgt bei der Validierung + 7 cm. Unter Berücksichtigung des hohen mittleren Geschiebetriebs von ca. 60 000 m³/a und den damit verbundenen Unsicherheiten der aufgenommenen Messungen, kann die Modellkalibrierung somit als sehr gut bezeichnet werden.

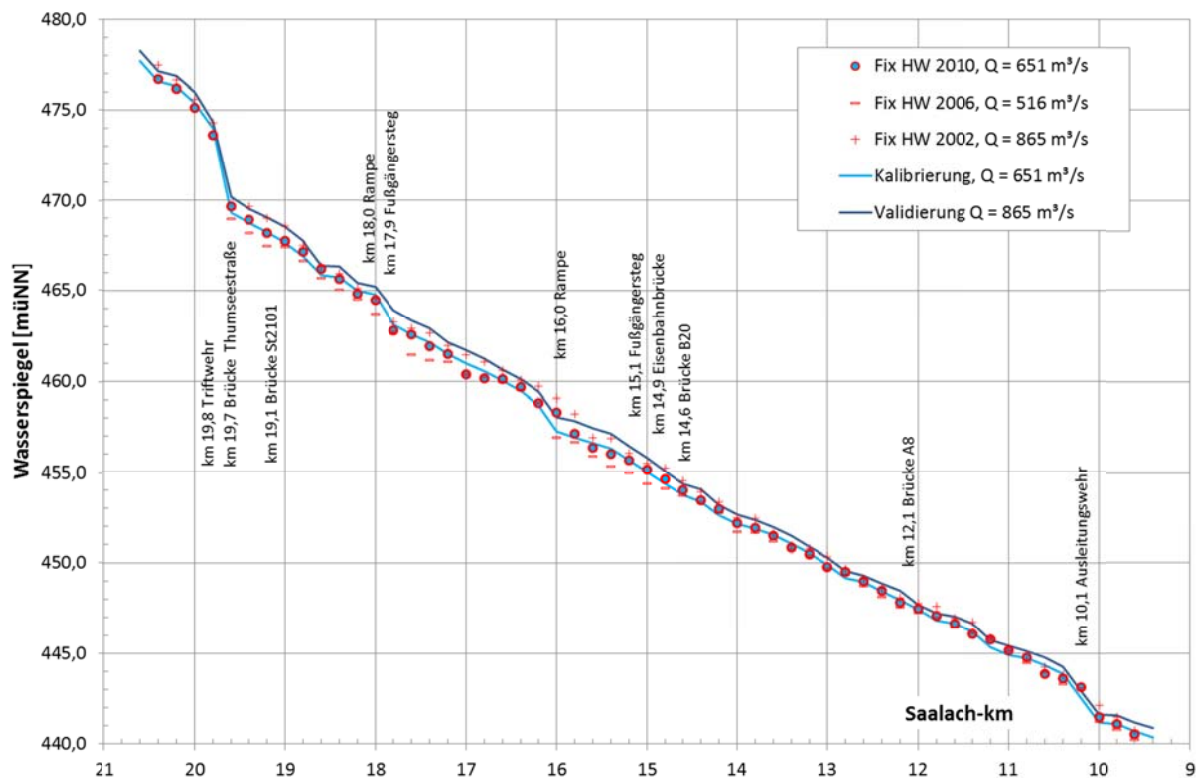


Abb. 2.9 Längsschnitt Wasserspiegellagen Modellkalibrierung

2.1.3.5 Simulation der Szenarien

Für die Katastrophenschutzplanung werden für die Saalach die Ereignisse HQ_{100} , HQ_{200} , HQ_{500} und HQ_{1000} sowie das HQ_{extrem} berechnet. Die fünf Jährlichkeiten werden jeweils mit und ohne funktionstüchtiger Hochwasserschutzdeiche berechnet, um die jeweils geschützten Bereiche zu ermitteln. Des Weiteren werden zur Ermittlung von zusätzlichem Schadenspotential im Versagensfall des Hochwasserschutzdeichs zwei Bruchszszenarien sowie für die Beurteilung der Hochwasserverteidigung drei temporäre Schutzlinien simuliert. Am Seebach wird das HQ_{extrem} (Sturzflut) berechnet.

Die HQ_{extrem} Berechnungen für die Saalach und den Seebach erfolgen instationär, die geringeren Ereignisse stationär. Die Abflussganglinien an den Modellrändern werden vom AP2 übergeben. Die Ergebnisse werden in 15 Minutenschritten dokumentiert.

Die Deichbruchszszenarien werden ebenfalls instationär berechnet. Zur Erfassung der Flutwellenausbreitung werden die Ausgabeintervalle auf 5 Minuten verkürzt.

2.1.3.6 Schnittstellenprogrammierung

Für die Übergabe der Berechnungsergebnisse der zweidimensionalen Abflusssimulation (AP3) an die Verkehrsmodellierung (AP6) und Katastrophenschutzplanung (AP7) werden entsprechende Schnittstellen geschaffen, die eine komplett automatische, schnell funktionierende Übertragung der flächigen hydraulischen Ergebnisse auf punkt-, linien- oder polygonförmige Objekte der

Infrastruktur erlauben. Die Herausforderung bei dieser Übertragung liegt in der unterschiedlichen räumlichen Diskretisierung von Abflussmodell und den jeweiligen Objekten. Aquasoli hat bei der Entwicklung der Übertragungsalgorithmen eine maximale Flexibilität in der Diskretisierung des Abflussmodells berücksichtigt, wodurch unterschiedliche Detaillierungsgrade des Rechengitters mit unterschiedlichen Rechenzeiten und –genauigkeiten möglich sind.

Die Schnittstellen unterscheiden sich grundlegend je nach der Geometrie der Objekte, auf die die Strömungsergebnisse übertragen werden sollen.

2.1.3.6.1 Übertragung der Strömungsergebnisse auf Punktobjekte

Typische Punktobjekte sind Pegelpunkte und Brückenkontrollpunkte zur Überwachung des Restfreibords an den Unterkanten. Alle Punktobjekte besitzen eine eindeutige ID Nummer. Die Extraktion von Strömungsparametern (an Pegel und Brücken v.a. die momentane Wasserspiegellage) ist für eine Schnittstelle ein trivialer Fall.

2.1.3.6.2 Übertragung der Strömungsergebnisse auf Linienobjekte

Als Linienobjekte sind nachfolgend die Verkehrswege (Polylinien) anzusehen und damit die Schnittstelle zum Verkehrsmodell AP6 und der Katastrophenschutzplanung AP7.

Alle Verkehrswege besitzen eine eindeutige ID Nummer in der Datenbank, mit der die Objekte von allen Beteiligten eindeutig identifiziert werden. Für jede Polylinie werden an Anfangs- und Endpunkt der Polylinie sowie an den Schnittstellen mit Gitterkanten Auswertpunkte generiert, auf die alle Rechenergebnisse projiziert werden. Die Strömungsvariablen (Wassertiefe bzw. Wasserspiegellage, Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung) bzw. daraus abgeleitete Größen (Energiehöhe, Intensität) können dann entweder für jeden der mitunter zahlreichen Auswertpunkte eines einzelnen Objektes oder bereits gebündelt als ein Wert je Objekt ausgegeben werden.

Bei der Ermittlung des Befahrbarkeitsstatus von Verkehrswegen ist über die reine Übertragung von Information hinaus noch die automatisierte Berücksichtigung der Sonderfälle Verkehrsweg über Gewässer (Brücke) und höhenfreie Verkehrswegekreuzung sowie eines Sicherheitsabstandes nötig (Analogon zum Freibord bei Hochwasserschutzanlagen).

Für die Integration des Sicherheitsabstandes als Entscheidungskriterium für eine Sperrung für den Individualverkehr, wird ein spezieller, allgemeingültiger Ansatz entwickelt. Er impliziert die Annahme der zeitlichen Invarianz des Sicherheitsabstandes. Für jedes Objekt wird in einer separaten, quasi-stationären

Abflusssimulation der kritische Abfluss ermittelt, ab dem der Verkehrsweg überflutet wird. Dieser kritische Abfluss ist für jedes Objekt mit einem kritischen Wasserspiegel an einem frei wählbaren Pegelpunkt verknüpft – für den praktischen Einsatz wird hier ein vorhandener Gewässerpegel verwendet. Unter Berücksichtigung des Sicherheitsabstands wird so für jeden Verkehrsweg ein für die Sperrung von Individualverkehr maßgebender Pegelstand zugewiesen.

Die Übertragung von Informationen aus dem Berechnungsgitter auf Linien (allgemein: Polylinien) muss für unterschiedlichste räumliche Auflösung von Berechnungsgitter (Größe der Elemente) und Polylinie (Anzahl von Stützstellen) möglich sein. Grundvoraussetzung ist ein auf die äußerst exakte Topographie des Rechengitters (Lagegenauigkeit kleiner 1 m) abgestimmtes Verkehrswegenetz, das aufgrund des gröberen Planungsmaßstabs eine deutlich schlechtere Lagegenauigkeit besitzt. Im Projektgebiet Bad Reichenhall sind deshalb laterale (virtuelle) Verschiebungen der Verkehrswege von durchschnittlich 5 – 10 m nötig, um eine sinnvolle Ergebnisübertragung zu realisieren.

2.1.3.6.3 Übertragung der Strömungsergebnisse auf Polygonobjekte

Als Polygone werden nachfolgend Gebäude bzw. Bezirke mit einer definierten Anzahl von Gebäuden verstanden. Jedes Objekt (Gebäude/ Bezirk) besitzt eine eindeutige ID Nummer in der Datenbank, mit der die Objekte von allen Beteiligten eindeutig identifiziert werden.

Die Übertragung von Informationen aus dem Berechnungsgitter auf Polygone muss für unterschiedliche räumliche Auflösungen von Berechnungsgitter (Größe der Elemente) und Polygon (Anzahl von Stützstellen) möglich sein. Der Algorithmus wird so flexibel gestaltet, dass eine Abbildung der Gebäude als Fließhindernis im Abflussmodell möglich aber nicht nötig ist.

Die Schnittstelle basiert auf dem Grundobjekt des Einzelgebäudes, für das analog zum Vorgehen bei Polylinien Auswertepunkte generiert werden. Bei der Klassifizierung des Einzelgebäudes zählt der gefährdetste Auswerteknoten. Sofern die Beurteilung eines größeren Bezirks nötig ist, wird die prozentuale Verteilung der Gefährdungsklassen der darin liegenden Einzelgebäude untersucht. Eine reine Flächenauswertung der Gefahrenklassen im Bezirk ohne den Zwischenschritt über die Einzelgebäude hat sich im Verlauf des Projektes als nicht zielführend herausgestellt, da sich Gebäude (in Gewässernähe) oftmals in höher gelegenen Bereichen befinden und damit geringer gefährdet sind als tiefer liegende Siedlungsfreiflächen.

2.1.3.7 Ergebnisübergabe

Die Berechnungsergebnisse aller Szenarien werden für die weitere Verwendung in den nachfolgenden Arbeitspaketen (AP 5, 6, 7) folgendermaßen aufbereitet:

- Als Flächenthema für jeden Zeitschritt (Polygon-Shape)
 - Überschwemmungsgebiet
 - Wassertiefenverteilung
 - Fließgeschwindigkeitsverteilung
 - Intensität (Produkt aus Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit)
 - Gefahrenklassen (z. B. nach Schweizer Modell, vgl. Tab. 2.5)
- Übertragung der Ergebnisse in die Objektdatenbanken für jeden Zeitschritt mittels der in Kap. 2.1.3.6 erläuterten Schnittstellen für
 - Brückenkontrollpunkte
 - Verkehrswege
 - Einzelgebäude und Bezirke

Die Deichbruchsimulationen werden eingehend ausgewertet und für die Verkehrs- und Katastrophenschutzsimulation u.a. als Filmdarstellung aufbereitet. Spezielles Augenmerk wird auf erhöhte Schäden (Schadklassen) durch den plötzlichen Versagensmechanismus bei den Gebäuden gelegt.

Für das Gewerbe- und Siedlungsgebiet bei Saalach-km 15 bis 16 werden aufgrund des hohen Schadenspotentials auch stationäre Rechenläufe zur Dimensionierung von Hochwasserverteidigungsmaßnahmen durchgeführt (stationär, HQ100 und HQ200). Für seltenere Ereignisse größer als HQ200 zeigt sich, dass eine Deichverteidigung überwiegend unwirksam ist, da die Überströmungsbereiche maßgebender Geländekanten mit zunehmendem Abfluss drastisch ansteigen.

Auch die Simulationen der Hochwasserverteidigung werden eingehend ausgewertet und für die Verkehrs- und Katastrophenschutzsimulation aufbereitet. Spezielles Augenmerk wird auf sekundäre, durch die Hochwasserverteidigung zusätzlich entstandene Schäden an Gebäuden gelegt. Diese zusätzlichen Schäden entstehen aufgrund höherer Wasserspiegellagen verursacht durch die Schutzlinien.

Als Beispiel für eine flächige Ergebnisdarstellung zeigt Abb. 2.8 das Gefährdungspotential im Projektgebiet Bad Reichenhall anhand der Verteilung der maximalen Gefahrenklassen beim HQ_{extrem} . Das Ergebnis stellt die Einhüllende der Lastfälle Seebach und Saalach dar.

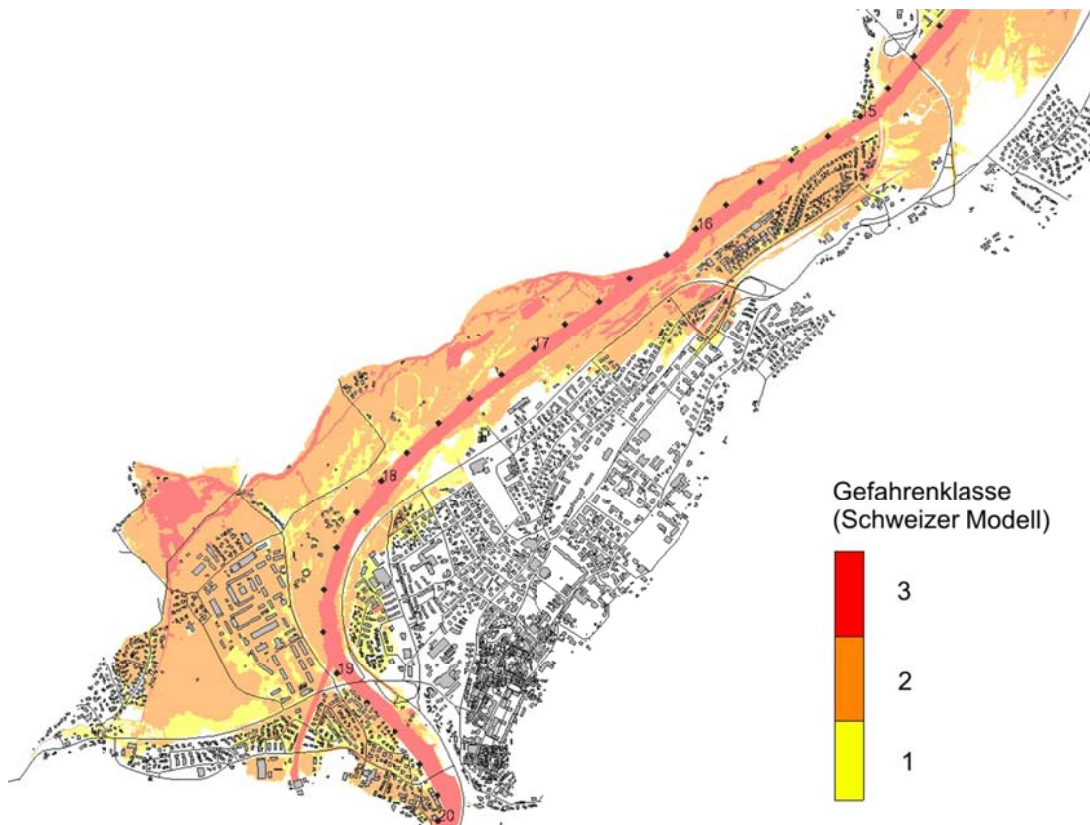


Abb. 2.10 Lageplan maximaler Gefahrenklassen bei HQ_{extrem} mit Gebäuden und Verkehrswegen im Hintergrund

2.1.3.8 Fazit und Ausblick

Für das Projektgebiet Bad Reichenhall wird dem Stand der Technik entsprechend ein zweidimensionales Abflussmodell erstellt und damit Überflutungsszenarien von Katastrophenlastfällen berechnet. Eine Neuentwicklung erfolgt beim Algorithmus der Schnittstellendefinition zur Übergabe der flächigen zweidimensionalen Überflutungsszenarien an die automatisierte weitere Verwendung in Verkehrsmodellen sowie im Katastrophenschutz. Die grundsätzliche Entwicklungsarbeit ist gut dokumentiert und für den Einsatz mit anderen Abflussmodellen sowie in anderen Projektgebieten allgemein einsetzbar. Aufgrund der Wahl des Abflussmodells HYDRO_AS-2D in Bad Reichenhall ist eine auf alle Details dieser Software abgestimmte, marktreife Softwarelösung entstanden.

Derzeit gibt es bereits erste Interessenten für die Schnittstelle aus dem Bereich des Katastrophenschutzes. Mit den erhofften Erfahrungen aus weiteren Einsatzgebieten sowie neu gekoppelten Softwareprodukten für die Weiterverarbeitung der hydraulischen Informationen wird eine permanente Weiterentwicklung des Produktes angestrebt

2.1.4 Hydrauliksimulation zur Ermittlung der Verkehrsbehinderung durch Überschwemmungen und Ermittlung von Evakuierungswegen (AP3)

Innerhalb des Arbeitspaketes 3 ist DHI-WASY mit der Durchführung von Hydrauliksimulationen zur Ermittlung der bei Extremereignissen zu erwartenden Hochwasserbelastung im Untersuchungsgebiet Altensteig betraut. Ziel dieses Teilprojektes ist die Generierung und Identifizierung von Überschwemmungsflächen für unterschiedliche Hochwasserszenarien mittels hydrodynamisch-numerischer Modellberechnungen.

Im betrachteten Gebiet befindet sich die Nagoldtalsperre, die durch einen Erddamm den Fluss Nagold ca. 10 km oberhalb der nächsten Ortschaft Altensteig, einstaut. In einem ersten Arbeitsschritt wird für das Untersuchungsgebiet ein hydrodynamisch-numerisches Modell aufgebaut. Dieses wird für die Berechnung von Szenarien mit unterschiedlichen hydraulischen Belastungen, wie Bemessungshochwasserabfluss und Talsperrenversagen, verwendet. Ergebnisse sind die in den jeweiligen Szenarien auftretenden Überschwemmungsflächen in Abhängigkeit von der Zeit.

2.1.4.1 Grundlagen und Stand der Technik

Die im AP3 verwendeten Methoden können in drei Bereiche untergliedert werden: eindimensionale Fließgewässermodellierung, zweidimensionale Fließgewässermodellierung und GIS-basierte Aufbereitung von Ergebnissen.

Den Schwerpunkt des im AP3 bearbeiteten Teilvorhabens stellten hydraulische Simulationen dar. Bei hydraulischen Berechnungen handelt es sich um die Ermittlung von Wassertiefe (Wasserstand), Fließgeschwindigkeit, Strömungsrichtung oder Sohlenschubspannung auf Basis von Vermessungsdaten, die die örtlichen Gegebenheiten widerspiegeln und um Eingangsparameter wie Zuflüsse, die eine Belastung des Systems darstellen. Diese können mittels verschiedener Simulationstechniken nachgebildet werden. Hierbei ist in der Dimensionalität zu unterscheiden. Bei 1-dimensionalen Berechnungen werden Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, usw. querschnittsgemittelt berechnet. Das heißt, es müssen für eine detaillierte Überschwemmungsstudie entsprechende Annahmen getroffen werden, um ein exaktes Abbild der natürlichen Gegebenheiten zu erhalten. Die Übernahme der Topographie erfolgt dabei über Querschnitte in einem frei spezifizierbaren Abstand, zwischen welchen linear interpoliert wird. Durch dieses Vorgehen kann ein mehrdimensionaler Prozess, wie er bei einer Ausuferung auftritt, mit einem vereinfachten Modell abgebildet werden. Vorteil dieser 1-dimensionalen Modelle ist eine schnelle Rechenzeit, was gerade für Online-Systeme unerlässlich ist. Nachteil hierbei ist, dass viele vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen.

Bei der 2-dimensionalen Modellierung wird auf einem Raster oder einem Netz gerechnet. Hierbei wird das Gelände flächenhaft in das Berechnungsmodell übernommen. Hieraus ist ein Vorteil zur 1D Berechnung ersichtlich. Ausuferungsprozesse oder Querströmungsprozesse müssen nicht durch genaue Geländekenntnisse vorhergesehen werden, um diese dann mit entsprechenden Maßnahmen nachbilden zu können. In einem 2D-Berechnungsnetz kann das Wasser sich anhand der Bathymetrie ausbreiten, da diese lückenlos in die Berechnung eingeht. Nachteil einer 2D Berechnung ist eine längere Berechnungszeit im Gegensatz zu 1D Modellen. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass im Rahmen der neuen Computertechnik gute Fortschritte gemacht werden konnten. Bei der Netzberechnung können Multiprozessor-Rechner voll ausgenutzt werden, da die verwendeten DHI-Programme eine vollständig parallelisierte Berechnung ermöglichen. Für das Projekt EvaSim wird ein unstrukturiertes Berechnungsnetz (Flexible Mesh) verwendet.

Als Stand der Technik werden alle Modelle instationär gerechnet. Dies gewährleistet, dass Wasserstände nicht ausgespiegelt werden, was bei einer stationären Betrachtung geschieht. Hier fließt dem Modell solange Wasser hinzu, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Das System muss dazu oft mit sehr großen Mengen Wasser über einen sehr langen Zeitraum beaufschlagt werden. Diese Menge entspricht aber nicht den natürlichen Gegebenheiten, da hierfür Regenereignisse benötigt werden, die in dieser Form regional nie auftreten würden. Es werden hierzu Zeitreihen von tatsächlichen Ereignissen verwendet. Die DHI-WASY GmbH verwendet für die oben vorgestellten Berechnungsmethoden die Programme MIKE 11 (1-D) und MIKE 21 (2-D). Über das Programmsystem MIKE FLOOD kann zusätzlich eine Kopplung mehrerer Programmkomponenten stattfinden. Durch eine Kopplung von MIKE 11 und MIKE 21 können z.B. Flussschläuche eindimensional und die Überschwemmungsflächen zweidimensional gerechnet werden. Dies bringt eine Rechenzeiterparnis mit sich, da an den entsprechenden Stellen mit dem jeweils besten Ansatz für die Fragestellung gerechnet wird. Mit den Programmlösungen von DHI ist somit eine Simulationssoftware im Einsatz, die schon in tausenden Projekten weltweit bewährt hat und somit verlässliche Ergebnisse für die Kopplung mit der Verkehrssimulation liefert.

Im Rahmen des Projektes EvaSim sind MIKE 11, MIKE 21 sowie die Kopplung dieser durch MIKE FLOOD zum Einsatz gekommen. Für die Auswertung und Weitergabe der Berechnungsergebnisse ist zusätzlich die Flood Toolbox verwendet worden. Hierbei handelt es sich um ein von DHI entwickeltes, GIS-basiertes Auswertungstool. Eine detaillierte Erläuterung dieser Programmanwendung ist in Kap. 2.1.4.5.2 dargestellt.

2.1.4.2 Modellaufbau

Zu Beginn des Projektes werden die für die Bearbeitung der jeweiligen Arbeitspakete erforderlichen Datengrundlagen bestimmt und Datenformate für den Austausch zwischen den unterschiedlichen Arbeitspaketen definiert.

Die für den Modellaufbau verwendeten Daten sind unter anderem die im Rahmen des Projektes Hochwassergefahrenkarten Baden-Württemberg (HWGK) vermessenen Flussquerschnitte von 2008 inkl. Informationen zu den im Modellgebiet befindlichen Brücken (Querbauwerke). Informationen zur Topografie liegen in Form eines digitalen Geländemodells (DGM) mit einem Rasterabstand von 1 m vor. Hier werden teilweise aufbereitete Daten von AP 2 übernommen. Ein genaues DGM ist für eine Interpolation der Flächen außerhalb des Flusslaufes erforderlich, da diese Flächen später die Überschwemmungsflächen darstellen. Zusätzlich liegen Informationen zur Lage der Verkehrswege und Bebauung (bzw. Flächennutzung) vor. Weiterhin liefern topografische Karten und Bildmaterial zusätzliche Informationen zu den örtlichen Gegebenheiten.

Die Auflösung und Ausdehnung des DGM (Digitales Geländemodell) wird zunächst auf ein grobes Modellgebiet reduziert und auf eine 1x1 m-Auflösung entlang der Nagold und in Altensteig sowie auf eine 2x2 m-Auflösung im übrigen Modellgebiet gebracht. Dann folgt eine endgültige Festlegung der Modellränder auf einer Höhenlinie von 20 m über der Uferlinie, da ein weiteres Ausufern ausgeschlossen werden kann.

Für die Einbindung des Flussschlauches in das Modell wird zunächst ein 1-dimensionaler Modellansatz (MIKE 11 by DHI) angewendet. Hierfür werden die vermessenen Querprofile der Nagold gesichtet, sortiert und eingelesen. Durch eine Interpolation der Querschnitte wird eine flächendeckende Abbildung der Gewässersohle generiert. Diese Höhen- und Lageinformationen (Bathymetrie) stellen die Grundlage der Flussschlauchmodellierung im 2D Modell dar.

Das gewählte Lösungsverfahren für die 2D-Hydrauliksimulationen (MIKE 21 FM) beruht auf der Finite-Volumen-Methode. Grundlage hierbei ist ein Berechnungsnetz (Mesh), welches die Berechnungselemente darstellt. Das Berechnungsnetz liefert dem Modell die Höhen- und Lageinformationen für das Modellgebiet. Innerhalb des Berechnungsnetzes werden für jeden Simulationszeitschritt die numerischen Gleichungen gelöst. Das Modellgebiet wird mittels eines unstrukturierten Meshs mit drei- und viereckigen Elementen (Abb. 2.11) abgebildet. Der Flussschlauch wird mit viereckigen Elementen und die Vorländer durch dreieckige Elemente repräsentiert.

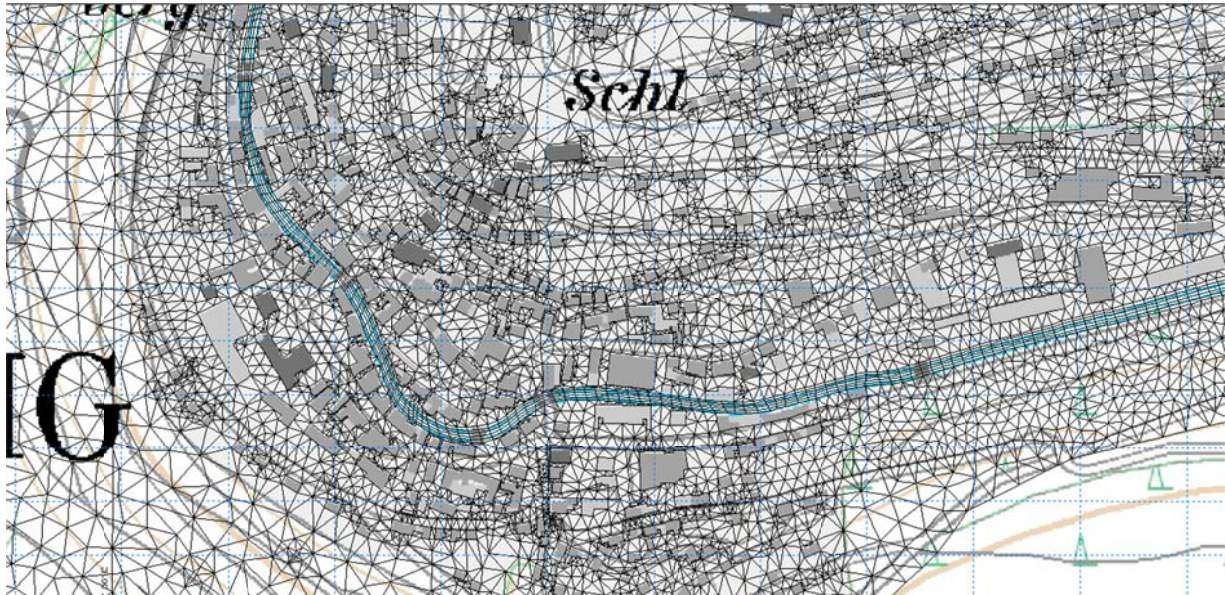


Abb. 2.11: Ausschnitt aus dem verwendeten Berechnungsnetz (Mesh) mit den berücksichtigten Bauwerken im Bereich der Stadt Altensteig

Für den Bereich im Modellgebiet, für den keine Flussschlauchdaten aus dem 1D-Modell vorliegen, wird das DGM hinzugezogen. Beide Teile zusammen ergeben eine flächendeckende Datengrundlage für sowohl die Höhe als auch die Lage des Untersuchungsgebietes. Diese Daten werden im Zuge des Modellaufbaus auf das diskretisierte Mesh interpoliert.

Dabei werden die örtlichen Gegebenheiten entsprechend ihres Einflusses auf die Berechnungsergebnisse diskretisiert und die erhaltenen Lage- und Höheninformationen der Topographie auf die Eckpunkte der drei- und viereckigen Elemente des Berechnungsnetzes übertragen. Als Grundlage für die Darstellung von Bauwerken im Untersuchungsgebiet dient ein digitalisierter Katasterauszug der Gemeinde Altensteig (Abb. 2.12). Nach Aufbereitung der Daten werden die Gebäude in der Stadt Altensteig im Mesh integriert. Hierfür werden die Bauwerksumrisse als Polygone definiert. Bei der Generierung des Berechnungsnetzes werden geschlossene Strukturen aus dem Mesh exkludiert und als wasserundurchlässige Elemente definiert.

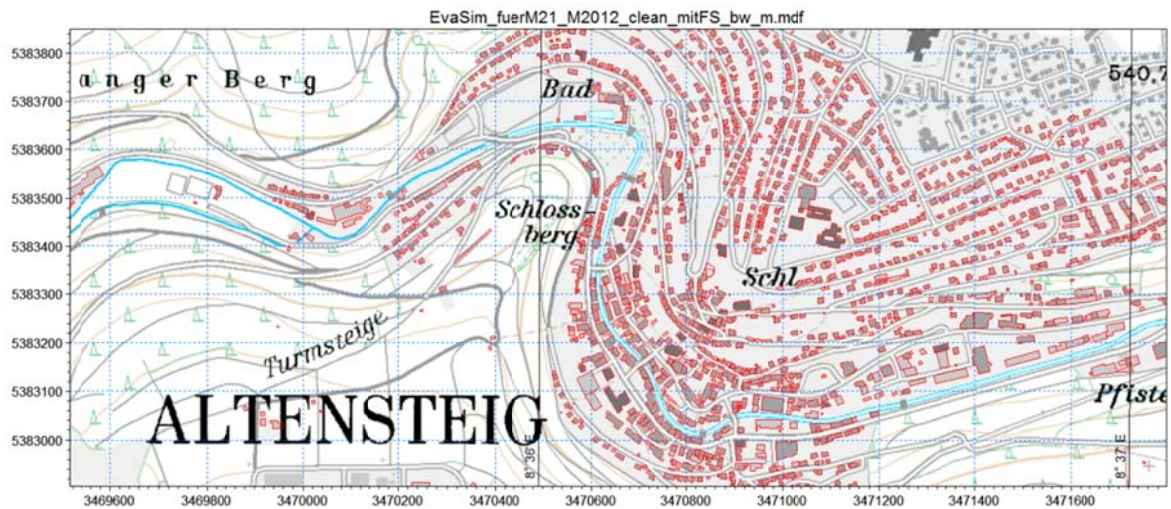


Abb. 2.12: Verwendete Bauwerksdaten aus dem Katastrerauszug der Stadt Altensteig
 Das vorhandene Verkehrsnetz wird diskretisiert und ebenfalls zur Meshgenerierung verwendet. Basierend auf den Verkehrsnetzknuten werden Zwangspunkte im Berechnungsnetz erzeugt. Die Berücksichtigung dieser Informationen ermöglicht die für die Schnittstelle zu AP6 (Verkehrsmodellierung) erforderliche Auswertung von Ergebnissen durch die Bereitstellung geeigneter Auswertungspunkte.

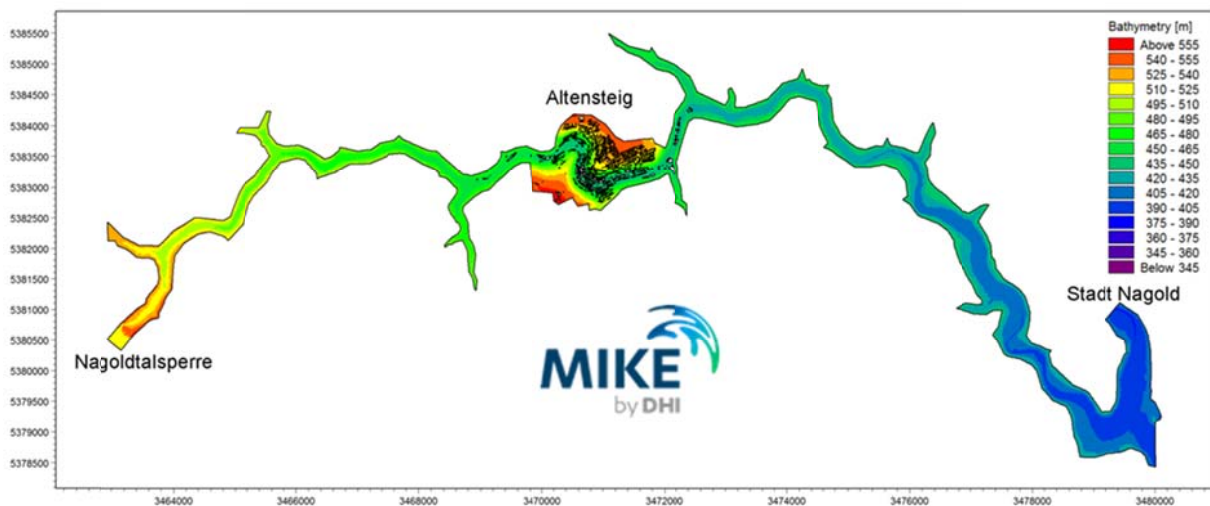


Abb. 2.13: Modellgebiet Nagold

Für die Modellierung werden ober- und unterstromseitig Randbedingungen benötigt, hierbei wird am oberen Modellrand (Nagoldtalsperre Erzgrube) der Abfluss (m^3/s) eingesteuert und am unteren Modellrand (Pegel in der Stadt Nagold) der Wasserstand (müNN).

2.1.4.3 Kalibrierung

Um für die soziologische Befragung sowie für die Erstellung des Katastrophenschutzplans belastbare Aussagen zu den zu erwartenden Überschwemmungsflächen treffen zu können, wird das Modell zunächst kalibriert. Durch Abgleich von in der Natur gemessenen und im Modell simulierten Parametern (in diesem Fall Wasserstand) wird im Zuge der Kalibrierung die Genauigkeit und naturgetreue Funktionsweise des numerischen Modells nachgewiesen.

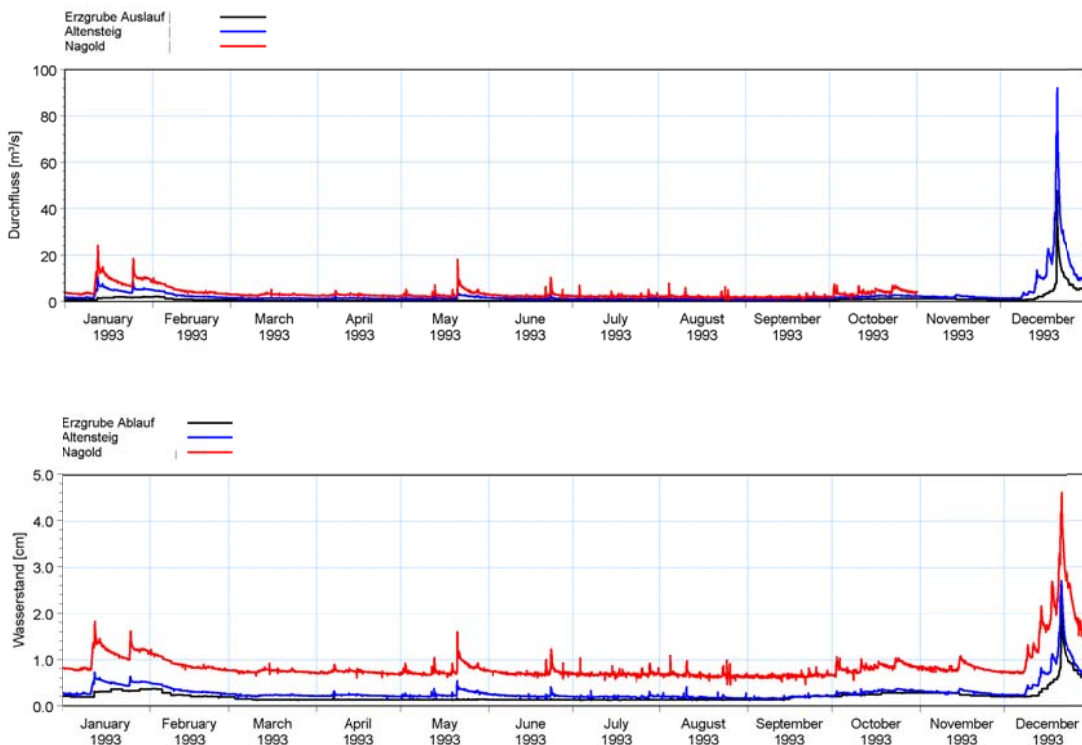


Abb. 2.14: Zeitreihen für den gemessenen Wasserstand und Abfluss im Untersuchungsgebiet 1993

Für die Kalibrierung wird zunächst der Zeitraum mit dem letzten aufgezeichneten, extremen Hochwasser vom Dezember 1993 herangezogen. Kalibrierparameter sind zum einen der Rauheitsbeiwert, der das Fließverhalten des Wassers über die Gewässersohle bzw. das Überflutungsgelände steuert. Zum anderen dienen Rückkontrollen im Mesh (Auflösung, Interpolation) und in der Bathymetrie ebenfalls der Kalibrierung. Für den gewählten Zeitraum kann eine den Anforderungen entsprechende Übereinstimmung erzielt werden. Die Abweichung des gemessenen Wasserstands zum modellierten liegt bei weniger als 10 cm, was einem guten Kalibrierergebnis entspricht. Für einen zusätzlichen Nachweis wird ein Zeitraum im Oktober 1993 hinzugezogen, in welchem über einen Zeitraum von mehreren Tagen ein konstanter, erhöhter Abfluss herrschte.

2.1.4.4 Untersuchte Szenarien

2.1.4.4.1 Voruntersuchung 1D-Modell

Um das Systemverhalten und Anhaltspunkte für potentielle Überschwemmungsflächen sowie die Dauer des Fortschreitens einer Flutwelle, bzw. das Eintreffen dieser im Stadtbereich Altensteig zu quantifizieren, werden im Vorfeld der Untersuchungen zwei Dammbuchszszenarien entwickelt und modelliert.

Unter Verwendung der Mike by DHI Software MIKE 11 und eines darin integrierten Dammbuchmoduls wird zunächst ein eindimensionales Modell der Nagold unter Berücksichtigung der Nagoldtalsperre aufgebaut. Es werden die zwei im Folgenden beschriebenen Versagensmechanismen untersucht: Dam Breach und Piping Failure.

Durch das Szenario **Dam Breach** (Breschenbildung) wird das Versagen eines Erddammes von der Dammkrone aus beginnend beschrieben. Dieser Fall kann z. B. eintreten, wenn extreme Wasserstände in einem Reservoir nicht über die vorhandene Hochwasserentlastungsanlage abgeführt werden können und es zu einem Überströmen der Dammkrone kommt. Zu Beginn des Dammversagens bricht die Dammkrone und es bildet sich eine vordefinierte initiale Bresche, die im weiteren Simulationsverlauf, basierend auf dem vorgegebenen Dammmaterial, weiter erodiert.

Im Szenario **Piping Failure** beginnt der Versagensmechanismus an einer Schwachstelle im Dammkörper, an welcher es zum Wasseraustritt und zur Bildung einer Sickerströmung kommt. Durch Erosion des Dammmaterials vergrößert sich die Schadensstelle bis zum Kollabieren der Dammkrone. Anschließend kommt der gleiche Ansatz wie beim Szenario Dam Breach zum Ansatz.

Das Ergebnis in Form von Abflusszeitreihen wird als Randbedingung für das 2D-Modell verwendet.

2.1.4.4.2 2D-Untersuchungen

Nach einer eingehenden Überprüfung und Optimierung der Modellstabilität, insbesondere bei der Berücksichtigung großer Wassermengen, können die finalen zu untersuchenden Szenarien festgelegt werden.

Auf Basis der eindimensionalen Voruntersuchungen, sowie einer Literaturrecherche, werden die zu untersuchenden Dammbuchszszenarien definiert. Es wird ein Dammbuch durch Versagen der Dammkrone simuliert (Dam Breach) sowie ein Versagensmechanismus durch Bildung von Sickerströmungen innerhalb des Dammkörpers (Piping). Für beide Dammbuchszszenarien werden die im 1D-Modell generierten Abflussganglinien als Randbedingung verwendet. Diese werden als Quellen im 2D Modell berücksichtigt (Abflussmenge und Ausbreitungsgeschwindigkeit).

Extreme Niederschläge können zu einem starken Anstieg des Wasserstandes im Reservoir führen, was einen Einsatz der Hochwasserentlastungsanlage erforderlich machen kann. Um die Auswirkungen eines solchen Szenarios nachzubilden, wird in der Modellierung ein Szenario angewendet, das den Betrieb der Hochwasserentlastung über einen Zeitraum von 2 Tagen berücksichtigt. Hierbei wird ein maximaler Abfluss von 146 m³/s angesetzt.

2.1.4.4.3 Zusatzuntersuchung Verklausungsszenarien

Bei extremen Hochwasserereignissen werden häufig große Mengen an Treibgut mit dem Wasserkörper mitgeführt. Werden Hindernisse wie Engpässe und Brückenöffnungen durchströmt, kann es an diesen Stellen zu einer Ablagerung des Materials kommen. Dies kann zu einem teilweisen oder gar vollständigen Verschluss des Durchflussquerschnittes (Verklausung) führen. Da im Projekt EvaSim extreme Hochwasserszenarien untersucht werden, sind in den Modellergebnissen Überflutungen auf Basis von Verklausungen zu erwarten. Diese resultieren aus der geringeren Abflusskapazität der Brückendurchlässe und einer damit einhergehenden Umströmung.

Um eine mögliche Verklausung in den hydraulischen Untersuchungen zu berücksichtigen, werden 24 Brücken entlang der Nagold zwischen den Pegeln Erzgrube und Nagold im numerischen Modell integriert und deren Abflusskapazität entsprechend einer Verklausung um 80 % reduziert.

2.1.4.5 Schnittstellen

Die Übergabe der Ergebnisse aus der hydraulischen Modellierung erfolgt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen, Formate und Softwareanwendungen. Die Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierung werden entsprechend den nachgestellten Bearbeitungsschritten ausgewertet und derart formatiert, dass die Weiterverwendung problemlos erfolgen kann. Übergabeformate werden zu Projektbeginn zwischen den betroffenen Instanzen abgesprochen und definiert. Im Folgenden wird auf die einzelnen, für die Schnittstellengenerierung erforderlichen Arbeitsschritte eingegangen.

2.1.4.5.1 Schnittstelle zu AP2

Im Rahmen des AP2 – Meteorologie / Hydrologie, werden historische Klimadaten für das Untersuchungsgebiet ausgewertet und extreme Belastungsszenarien für die Nagoldtalsperre an der Universität Stuttgart (Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie) generiert. Unter Berücksichtigung des zu erwartenden Klimawandels werden diese Ereignisse numerisch modelliert und Informationen über den räumlichen und zeitlichen Verlauf

möglicher hydrometeorologischer Extremereignisse daraus abgeleitet. Diese Erkenntnisse dienen der Verbesserung der Vorhersage bei Extremereignissen und somit zu einer Optimierung von Vorwarnzeiten. Die Ergebnisse dieser Berechnungen stehen in Form von Abflussganglinien zur Verfügung und können im AP3 als Eingangsparameter für die hydrodynamisch-numerische Untersuchung von Hochwasserereignissen übernommen werden. Eine angepasste Schnittstelle ist für diese Kopplung der Arbeitspakete 2 und 3 nicht erforderlich.

2.1.4.5.2 Schnittstelle zu AP4

Im AP4 wird durch die Forschungsgruppe ZIRIUS (Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung) an der Universität Stuttgart das Verhalten der betroffenen Bevölkerung im betrachteten Gebiet Altensteig erforscht. Im Fokus dieses Arbeitspaketes steht die Fragestellung, inwiefern sich die Reaktion und das Verhalten der Bevölkerung bei Evakuierungsmaßnahmen vorhersehen lassen. Da dieses Themengebiet noch nicht ausreichend erforscht ist, werden die aus einer Literaturrecherche gewonnenen Kenntnisse durch Untersuchungen im Rahmen von EvaSim erweitert. In einem ersten Schritt wird eine Befragung von Fokusgruppen durchgeführt, die stellvertretend für bestimmte Bevölkerungsgruppen, das Fluchtverhalten in einer Gefahrensituation wiedergeben. In einem zweiten Schritt findet eine umfangreichere telefonische Befragung der Bevölkerung Altensteigs statt. In einem dritten Schritt wird eine agentenbasierte Modellierung des Fluchtverhaltens im Fall eines Versagens der Nagoldtalsperre durchgeführt.

Für beide Befragungen sowie für die Modellierung sind detailliertere Kenntnisse zur potentiellen Gefahr im Falle eines extremen Überflutungsereignisses im Untersuchungsgebiet erforderlich. Diese Informationen werden den Ergebnissen des AP3 entnommen.

Hier kommt die von DHI entwickelte Flood Toolbox (Abb. 2.15) zum Einsatz. Bei der Flood Toolbox handelt es sich um ein Softwaretool, das der Unterstützung der Implementierung der EU- Hochwasserrahmenrichtlinie 2007/60/EG (EG-HWRL) und der darin geforderten Erstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen für Bewertung und Management von Hochwasserrisiken dient. Diese Anwendung ermöglicht eine GIS-basierte Auswertung der Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierung. Durch Interpolation der ermittelten Überschwemmungsflächen und Wasserspiegellagen mit dem DGM können die genauen Wassertiefen im Stadtgebiet Altensteig für beliebig gewählte Zeitpunkte im Verlauf der untersuchten Hochwasserereignisse ermittelt und in GIS-kompatiblen Formaten exportiert werden.

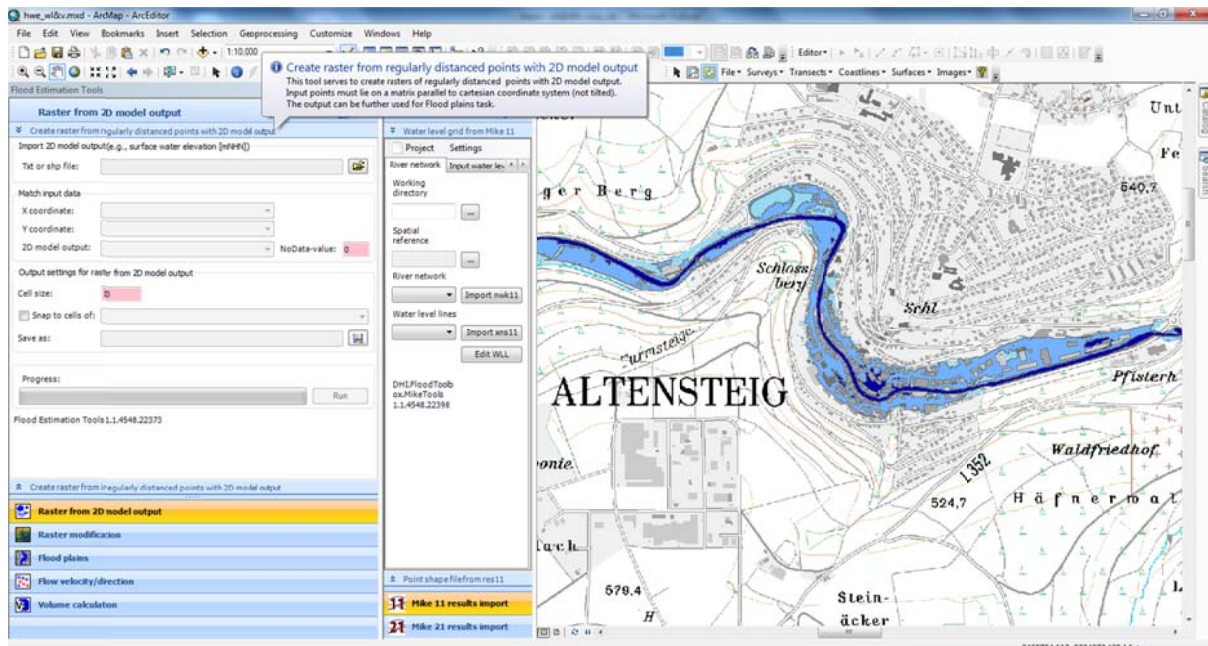


Abb. 2.15: DHI Flood Toolbox und Darstellung von Überflutungsflächen in Altensteig

Durch die Modellierung von Dammbrechtszenarien wird seitens DHI aufgezeigt, welche Flächen im Untersuchungsgebiet bei Eintritt eines solchen Extremereignisses überflutet werden und welche trocken bleiben. Auf Basis der Ergebnisse der 2D-Modellierung werden Überflutungskarten erstellt, die dem AP 4 zur Verfügung stehen. Die detaillierte Diskretisierung der Stadt Altensteig im Modell inkl. der vorhandenen Bebauung ermöglicht eine realistische und für die Bevölkerung verständliche Visualisierung der gefährdeten Gebiete. Eine zweite, bedeutende Information für die betroffene Bevölkerung ist der zu erwartende zeitliche Verlauf eines solchen extremen Hochwasserereignisses. Für die Befragungen werden die maximalen Überschwemmungsflächen in Form von Karten, sowie Informationen zum Eintrittszeitpunkt der Hochwasserwelle im Stadtgebiet Altensteig nach Beginn des Dammbrochs von AP3 zur Verfügung gestellt.

Für die agentenbasierte Simulation ist nicht nur die maximale Ausbreitung der Überflutungsflächen von Bedeutung, sondern auch der genaue zeitliche Verlauf dieser. Die Ergebnisübergabe findet in Form von Shape-Dateien statt, die jeweils in einer Zeitschrittweite von 15 Minuten die entstehende Überschwemmungsfläche darstellen.

2.1.4.5.3 Schnittstelle zu AP5

AP5 befasst sich mit der Stabilität von Fahrzeugen in Strömung. Hierzu werden neben einer Literaturrecherche physikalische Modellversuche am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart vorgenommen, um Informationen zu Stabilitätskriterien für diese Fragestellung zu gewinnen. Die

Untersuchungen anhand von physikalischen Modellen stellen eine Verbindung zwischen der hydrodynamischen Modellierung und der Verkehrsmodellierung dar, da über diesen Schritt Befahrbarkeitsparameter für überflutete Fahrbahnen ermittelt werden können. In einer Versuchsrinne im Labor wird unter Berücksichtigung variierender Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Anströmwinkel untersucht, inwiefern sich diese Parameter auf die Manövrierfähigkeit von Fahrzeugen auswirken. Die Grenzwerte werden sowohl für PKW als auch für Rettungsfahrzeuge ermittelt.

AP3 erhält von AP5 Angaben über die maximal zulässigen Wassertiefen als Übergabeparameter, die eine Grundlage für die Kopplung von AP3 und AP6 darstellen. Die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung werden mit den Ergebnissen der physikalischen Modellierung gekoppelt, indem eine Schnittstellenanwendung mit Matlab programmiert wird, die das Auslesen der relevanten Parameter (Wassertiefe, Strömungsgeschwindigkeit und -richtung) aus den Ergebnissen der simulierten extremen Hochwasserereignisse ermöglichte.

2.1.4.5.4 Schnittstelle zu AP6

Im AP6 werden Verkehrssimulationen für die untersuchten Beispielgebiete durchgeführt. Unter Berücksichtigung von Informationen zum Verkehrsangebot, zur Siedlungsstruktur, zum Verkehrsverhalten der Bevölkerung sowie den Kapazitäten des Verkehrswegenetzes werden unterschiedliche Szenarien berechnet. Neben typischen Aktivitätsmustern, von denen die tageszeitliche Belegung und Nutzung der Verkehrswege abhängt, wird die Verkehrsentwicklung bei Extremereignissen untersucht. Informationen und Ergebnisse der Soziologiestudien fließen in diese Simulationen mit ein.

Zur Nachbildung der zeitabhängigen Kapazitäten des Verkehrsnetzes im Falle extremer Überflutungsereignisse ist eine Weitergabe der Ergebnisse aus AP3 erforderlich. Anhand der hydraulischen Simulationen wird für jedes Element des abgebildeten Verkehrswegenetzes ermittelt, ab welchem Zeitpunkt die Befahrbarkeit eingeschränkt oder nicht mehr gegeben ist. Für eine zeitabhängige Ermittlung der vorhandenen Kapazitäten werden Informationen zur Wassertiefe, der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsrichtung aus dem hydraulischen Modell für jeden Untersuchungspunkt im betrachteten Verkehrswegenetz extrahiert. Das vorhandene Straßennetz wird in der von DHI entwickelten Schnittstelle für das Untersuchungsgebiet Nagold berücksichtigt.

Die Aufgabe des von DHI entwickelten Tools ist zunächst die Bestimmung und Ausgabe der Anströmwinkel und anderer Berechnungsergebnisse im Schnittstellenformat. In einem weiteren Verfahrensschritt kommt zu einem späteren Zeitpunkt die Ermittlung der zeitabhängigen Befahrbarkeit der Straßen hinzu, die die

in den physikalischen Versuchen von AP5 erarbeiteten Ergebnisse berücksichtigt. Bei der Feststellung der Befahrbarkeit der Straßen wird folglich nicht nur ermittelt, ob diese überflutet werden, sondern auch die Einhaltung eines vordefinierten Freibords analysiert. In dem ersten Bearbeitungsschritt zur Bestimmung des Anströmwinkels wird ein Arbeitsablauf entwickelt, der noch mehrere verschiedene Programme beinhaltet. Darunter befindet sich neben bestimmten MIKE-Ausgabefunktionen auch eigens für das Projekt EvaSim erstellte Batch-Tools und Matlab-Programme. Die Übergabe der Ergebnisse erfolgt für alle Knotenpunkte des Straßennetzes sowie für alle errechneten Zeitschritte im Textformat.

2.1.4.5.5 Schnittstelle zu AP7

Gesamtziel des Vorhabens EvaSim ist die Bereitstellung eines Systems zur Optimierung von Evakuierungsmaßnahmen aufgrund extremer hydrologischer Ereignisse, der vorhandenen Infrastruktur und soziologischer Randbedingungen (Vorhabensbeschreibung, 2009). In AP7 werden abschließend die Ergebnisse aller übrigen Arbeitspakete zusammengefasst und in einer Informationsplattform bereitgestellt, über welche im Falle eines extremen Überflutungsereignisses die Steuerung und Information von Rettungseinsätzen stattfinden kann. Da aufgrund der erforderlichen Rechenzeiten für die einzelnen Komponenten der Echtzeitbetrieb eines solchen Systems nicht möglich ist, werden vorab ermittelte Ergebnisdaten aus den hydrodynamischen Simulationen von AP7 verwendet. Diese können bei Inbetriebnahme des Warn- und Meldesystems an laufende Wasserstandsmessungen der Pegel im Untersuchungsgebiet gekoppelt werden. Eine Zuordnung von Wasserständen und den zugehörigen zeitabhängigen Überflutungsflächen wird so ermöglicht.

Die Ergebnisse aus den hydrodynamischen Simulationen werden für die Übergabe an AP7 in vordefinierte Formate überführt. Für eine zeitabhängige Darstellung des Überschwemmungsgebietes Altensteig wird die Überflutungsfläche für alle untersuchten Lastfälle in 15-Minuten Schritten aus den Ergebnisdateien extrahiert. Die Einarbeitung dieser Informationen erfolgt in AP7 in Form von Shape-Dateien. Ferner werden für die Katastrophenschutzplanung die Ergebnisse im gleichen Format für die Parameter Befahrbarkeitsstatus und Intensitätsverteilung der Überflutung (für Fußgänger und Gebäude) benötigt.

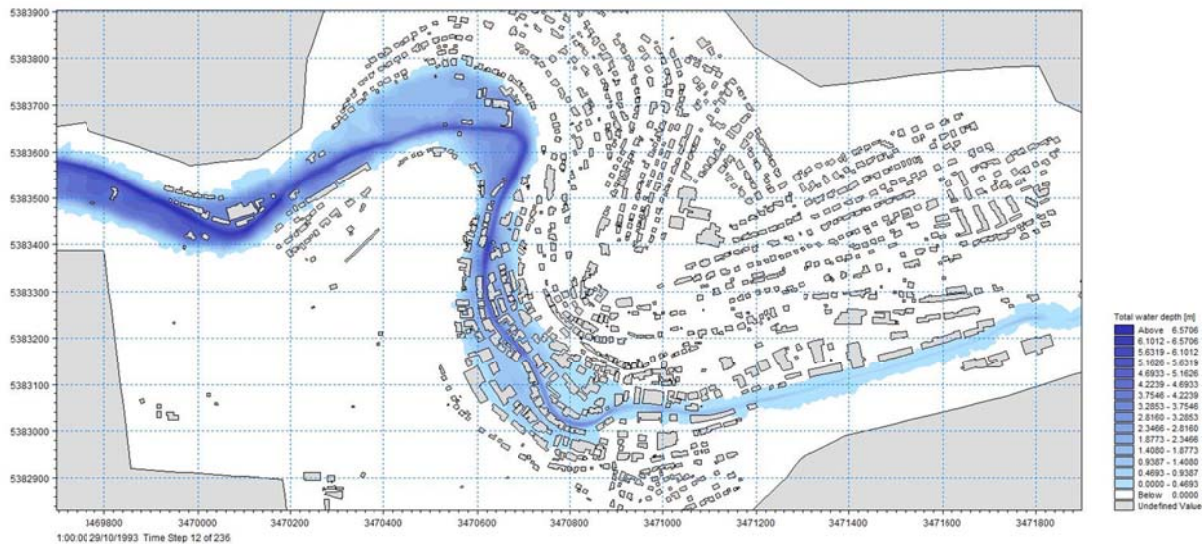


Abb. 2.16: Darstellung der berechneten Überschwemmungsfläche mit den zugehörigen Wassertiefen als Shape-Datei

2.1.4.6 Fazit

Die im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens EvaSim entwickelten Verfahren und Methoden, sowie die für die Kopplung der einzelnen Arbeitspakete generierten Schnittstellen, werden nach Abschluss des Projektes für die Anwendung in anderen Gebieten zur Verfügung stehen. Es können in Zukunft sowohl Teilaspekte als auch das Gesamtkonzept von EvaSim auf andere durch Überflutungen gefährdete Bereiche übertragen und somit zur Simulation und Optimierung von Evakuierungsszenarien an damm- und deichbruchgefährdeten Gebieten hinzugezogen werden. Die von DHI erarbeiteten Auswertungswerkzeuge können unter Berücksichtigung von Ergebnissen hydrodynamischer Simulationen sowie des Straßennetzes für andere beliebige Untersuchungsgebiete ohne projektspezifische Anpassung angewendet werden. Für eine vereinfachte Nutzung der programmierten Auswertungsmechanismen gibt es eine benutzerfreundliche grafische Nutzeroberfläche. Unter Berücksichtigung der technologischen Entwicklungen (schnellere PC-Hardware, Optimierung von Berechnungsalgorithmen) ist es nicht auszuschließen, dass zukünftig auch ein Online-Betrieb möglich ist.

2.1.5 Verhalten der betroffenen Bevölkerung (AP4)

Im Arbeitspaket 4 „Verhalten der betroffenen Bevölkerung“ wird untersucht inwiefern sich das Verhalten der Bevölkerung bei Evakuierungsmaßnahmen vorhersehen lässt. Als Untersuchungsgebiet dient die Stadt Altensteig. Um Erkenntnisse über das Verhalten und die Bedürfnisse der Bevölkerung in einer Evakuierungssituation zu erhalten, haben sozialwissenschaftliche Fragestellungen im Projekt eine zentrale Bedeutung, beispielsweise für die Ressourcenabschätzung der Notfallmanager (z. B. hinsichtlich Straßenkapazitäten, Zeitlimits usw.).

2.1.5.1 Erhebungsdesign, methodisches Vorgehen & besondere Anforderungen

Obwohl es in der Literatur einige Studien und Projekte zum Thema Evakuierungsverhalten gibt, ist eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den hier vorliegenden Fall Altensteigs nur bedingt möglich und muss im Einzelnen geprüft und gegebenenfalls revidiert oder ergänzt werden. Aus diesem Grund wird im Anschluss an die Literaturrecherche ein qualitatives Instrument eingesetzt. Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur und ortsspezifische Fragestellungen werden innerhalb von Fokusgruppen kritisch diskutiert, um realistische Annahmen über das Evakuierungsverhalten der Altensteiger Bevölkerung zu formulieren. Die inhaltlich auf den Erkenntnissen der Fokusgruppen aufbauende und repräsentativ angelegte Telefonumfrage, dient aus sozialwissenschaftlicher Sicht sowohl der Überprüfung (klassische Triangulation), als auch der Quantifizierung der Ergebnisse. Deshalb wird die Umfrage vor dem Hintergrund der Fragestellung ausgewertet, inwieweit sich die qualitativen Erkenntnisse auf die gesamte Bevölkerung Altensteigs übertragen lassen. Um aus den erhobenen Daten eine belastbare Prognose des Evakuierungsverhaltens zu erstellen, wird unter Berücksichtigung der quantitativen Ergebnisse und weiterer offizieller Statistiken, sowie den qualitativen Aussagen aus den Fokusgruppen Idealtypen gebildet, welche die Grundlage für die agentenbasierte Simulation darstellen.

Die Erhebung von validen Daten für eine Prognose bzw. Simulation von Verhaltenskomponenten ist aus unterschiedlichen Gründen schwierig. Ein zentrales Problem ist, dass dafür eine Abfrage von potentiell Verhalten notwendig ist, das heißt eine Reaktion auf die Frage: „*Was würden Sie tun wenn...?*“. Verhaltensfragen sollen ermitteln, was der Befragte zu tun beabsichtigt, so dass in allen Fällen lediglich über Verhaltensweisen berichtet wird („berichtetes Verhalten“). Der Befragte muss also nicht nur sein mögliches Verhalten verbal äußern, sondern er muss sich zudem in eine Situation versetzen, in der er wahrscheinlich keine Erfahrung hat und dann antizipieren, wie er handeln würde. Da Menschen solche Situationen unterschiedlich gut antizipieren können, ist es die Aufgabe der Forscher, mit realistischen Thesen und Fragestellungen diesen Prozess in Gang zu setzen und gleichzeitig

diesbezügliche Erkenntnisse innerhalb des Forschungsprozesses auf den Prüfstand zu stellen.

2.1.5.2 Zentrale Ergebnisse der Literaturrecherche

Im Folgenden werden relevante Erkenntnisse aus der Literatur dargestellt und argumentativ in Form von Annahmen auf die Situation im Untersuchungsgebiet Altensteig übertragen.

Die Literaturrecherche ergibt, dass ein hohes Ausmaß an Gruppenzugehörigkeit die Menschen dazu bringt, einander zu helfen. Dies kann positive und negative Auswirkungen haben, je nachdem, ob die Menschen wissen, wie sie sich in Krisensituationen gegenseitig helfen können oder nicht. Oft können unwissende, aber wohl-meinende Helfer die Folgen der Katastrophe verschlimmern. Falls unter gewissen Umständen nur eine Evakuierung zu Fuß möglich sein sollte, ist auch hier anzunehmen, dass die Menschen in Gruppen (Familie, Mitbewohner) fliehen und sich weitgehend strukturiert und normgerecht verhalten. Allerdings kann eine große Anzahl von fliehenden Menschen auch den Verkehr behindern, falls sich einige dazu entscheiden trotz Fahrverbot mit dem Auto zu evakuieren.

Falls bei der Simulation Situationen entstehen, bei denen die Bewohner von Altensteig unter bestimmten Umständen nicht in der Lage sind, sich aus dem Gebiet zu entfernen, müssen Strategien zur Suche nach geeigneten ortsnahen sicheren Räumen ebenfalls mit in die Planung einbezogen werden. Solche sicheren Räume können z. B. höher gelegene Wohnräume sein. Auf keinen Fall sollten in solchen Fällen nur bestimmte Bewohner (z. B. Bewohner die unterhalb einer bestimmten Höhe wohnen) aufgefordert werden das Gebiet zu verlassen, da anzunehmen ist, dass dann auch diejenigen fliehen, die eigentlich nicht betroffen sind und sich und andere damit in Gefahr bringen könnten.

Es gibt verschiedene Verhaltensweisen im Verkehr, die ebenfalls systematisch modelliert werden können. Manche Menschen fahren schneller als andere, sind allgemein rücksichtsloser oder zu rücksichtsvoll, Ortsunkundige wissen evtl. nicht, wo sie hinfahren sollen. Zudem ist anzunehmen, dass die meisten Verkehrsteilnehmer unter Stress stehen werden. All diese Dinge könnten das Verhalten im Straßenverkehr beeinflussen.

Diese und weitere Erkenntnisse der Literaturrecherche dienen dazu, ein Erhebungsdesign zur Datensammlung zu generieren.

2.1.5.3 Abgeleitete Fragestellungen

Ausgehend von der zentralen Frage, wie sich die Altensteiger Bevölkerung in einer Evakuierungssituation verhalten würde, können basierend auf den Ergebnissen der

Literaturrecherche für die weiteren Untersuchungen folgende Leitfragen formuliert werden:

- Was passiert in der Zeit zwischen der Evakuierungsaufforderung und der Evakuierung selbst (d. h. welche nächsten Verhaltensschritte unternehmen die Altensteiger Bürgerinnen und Bürger nach dem Hören der Evakuierungsaufforderung)?
- Wohin würde die Altensteiger Bevölkerung evakuieren?
- Welche Unterschiede können im Evakuierungsverhalten und in den Evakuierungsplänen hinsichtlich soziodemographischer Variablen festgestellt werden?
- Welche Art der Warnung bzw. Warnungsübermittlung wird von den Bürgerinnen und Bürgern als effektiv wahrgenommen?
- Welches Informationsbedürfnis haben die Bürgerinnen und Bürger Altensteigs?
- Welchen Informationsübermittlern würde vertraut werden und welchen nicht?
- Was wären alternative Informationsübermittler?

2.1.5.4 Fokusgruppen

Die Durchführung von Fokusgruppen dient neben der Überprüfung der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche auch einer explorativen Untersuchung der von den betroffenen Menschen vorgenommenen Einschätzungen der Gefahrenvorsorge und Gefahrenabwehr für den konkreten Fall Altensteigs. So geht es in diesem Schritt darum, Hintergrundinformationen für die quantitative Befragung zu erhalten, und die Variationsbreite des möglichen Verhaltens der Bürger Altensteigs nach einer Evakuierungsaufforderung zu erkunden. Zudem ist es durch die Methode der Fokusgruppe möglich, nicht nur Aussagen über das potentielle Verhalten der Bürger zu sammeln, sondern auch Begründungen für die jeweiligen Verhaltensmotive zu erfassen.

Die Fokusgruppen fanden am 14. März 2011 in den Räumlichkeiten der Friedrich-Boysen-Realschule in Altensteig mit 15 Bürgerinnen und Bürgern statt.

Als ein Ergebnis der Fokusgruppen ist festzuhalten, dass sich die Bürger weitgehend schlecht informiert fühlen. Hierzu gehören vor allem die Inhalte des Katastrophenplans und die Frage, welche Behörde wofür zuständig ist und wo man im Krisenfall Informationen bekommen kann. Auch ist den Bürgern nicht bewusst, wie sich die Behörden auf einen Katastrophenfall vorbereiten und wie viel Zeit ihnen in bestimmten Situationen zur Verfügung steht. Darüber hinaus bestätigen die Fokusgruppen zentrale Befunde und Annahmen aus der Literaturrecherche. So kann aufgrund der Diskussionen in den Fokusgruppen davon ausgegangen werden,

- dass sich auch die Bürger Altensteigs in einer durch ein Hochwasserereignis ausgelösten Katastrophensituation in den seltensten Fällen panisch verhalten würden;
- dass Persönlichkeitsvariablen wie Kontrollgefühl und Fatalismus eine erhebliche Rolle bei der Reaktion auf die Warnung spielen. Dies gilt in Altensteig vor allem bei dem auf Erfahrungswissen basierenden Kontrollgefühl bezüglich einer Hochwasserentwicklung;
- dass der Verbreitung von Informationen im Vorfeld einer potentiellen Katastrophe eine entscheidende Rolle zukommt.

Die Bereitschaft zur Evakuierung ist stark von der Erlebbarkeit der Krise abhängig. Einstimmig äußerten sich die Bürger dahingehend, dass man als Altensteiger die Nagold kenne und daher auf sein Erfahrungswissen mit dem Fluss baue. Das heißt, dass ein eigener Blick auf den Fluss als erste Reaktion erfolgt. Wenn keine persönliche Erlebbarkeit gegeben ist, sind Vorab-Informationen unumgänglich: Die Bürger müssen wissen, dass theoretisch die Möglichkeit besteht, dass obwohl zur Evakuierung aufgerufen wurde und noch kein Wasser sichtbar ist, die Warnung aber trotzdem ernst genommen werden muss. Die Quelle bzw. der Absender der Warnung muss den Bürgern im Vorfeld bekannt sein, damit der Warnung auch entsprechendes Vertrauen entgegengebracht wird.

2.1.5.5 CATI-Erhebung (Computer Assisted Telephone Interview)

Bei der telefonischen Umfrage geht es aus sozialwissenschaftlicher Sicht vor allem um einen weiterführenden Erkenntnisgewinn bezüglich der qualitativ gewonnenen Ergebnisse aus den Fokusgruppen. Aus diesem Grund wird ein repräsentativer Teil der Altensteiger Bewohnerinnen und Bewohner zu unterschiedlichen Themen quantitativ befragt. Die telefonische Befragung erfolgte durch das LINK Institut in Frankfurt/Main.

Da mit den Ergebnissen der Befragung im Gesamtprojekt weitere Ziele verfolgt werden, basiert die Konstruktion des Fragebogens auf mehreren Ansätzen. Neben sozialwissenschaftlichen Aspekten, enthält der Fragebogen auch Fragestellungen, die für verkehrswissenschaftliche Erkenntnisse (Arbeitspaket 6 Verkehrssimulation, VuV) sowie die agentenbasierten Simulation relevant sind. Der Fragebogen wird unter der Berücksichtigung der Kriterien der theoretischen Angemessenheit und der forschungspraktischen Durchführbarkeit entworfen und entsprechend angepasst. Die Konstruktion des Fragebogens erfolgt in enger Absprache mit dem LINK Institut, dem Projektpartner VuV und der traffgo GmbH, dem Anbieter der agentenbasierten Simulation.

Um eine repräsentative Stichprobe zu erreichen, wird eine telefonische Befragung gewählt. Die Samples werden hierbei aus der Auswahlgrundlage der Arbeitsgemeinschaft ADM-Telefonstichproben gezogen. Ziel ist es, einen möglichst repräsentativen Ausschnitt der Bevölkerung zu befragen, um dadurch plausible Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit der in Altensteig lebenden und/oder arbeitenden Bevölkerung ziehen zu können.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Fokusgruppen werden bei der Befragung folgende inhaltliche Schwerpunkte gesetzt:

2.1.5.5.1 Die Warnung

Im Fragebogen der CATI befassen sich mehrere Gesichtspunkte mit der Art und Weise sowie mit der Glaubwürdigkeit unterschiedlicher Warnsignale und in Abhängigkeit davon mit ihrer möglichen Befolgung. Insgesamt ergibt sich, dass Inhalt, Umstand und die Art und Weise der Übermittlung der Warnung von großer Bedeutung sind, wenn man eine rasche und vollständige Evakuierung anstrebt. Es ist demnach nicht davon auszugehen, dass alle Menschen einer Evakuierungsaufforderung blind folgen, ohne ihre eigenen Wahrnehmungen und Erfahrungen dieser gegenüber zustellen.

2.1.5.5.2 Erste Reaktion nach der Warnung

Allgemein wird durch die Befragung bestätigt, dass die Warnung vor einer vermeintlichen Gefahrenlage keine überstürzte Flucht oder unkontrollierte Massenpanik nach sich ziehen würde. Viel wahrscheinlicher sind überlegte Reaktionen, die auf die Suche nach weiteren Informationen und den Schutz anderer Mitmenschen abzielen oder auf die Wahrung des eignen Besitzes. Eine der wichtigsten Erkenntnisse ist jedoch die Tatsache, dass die Befragten es insgesamt als vergleichsweise „unwahrscheinlich“ ansehen, die offiziellen Warnungen und entsprechenden Anweisungen (Treffen am Sammelpunkt, außerhalb Altensteigs bleiben) ohne Umwege zu befolgen. Dieser Umstand rechtfertigt weitergehende Untersuchungen und das Forschungsvorhaben als Ganzes.

2.1.5.5.3 Informationen

Die Suche nach weiteren Informationen in einer Evakuierungssituation ist ein zentrales Anliegen der Befragten. Hierzu wird zunächst nach den unterschiedlichen Informationsquellen gefragt, mit der Bitte um Einschätzung, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie diese Möglichkeit jeweils in Betracht ziehen. Neben dem Radio, welches durch seine Aktualität und Verfügbarkeit die höchste Zustimmung als Informationsmedium erfährt, sind es auch die engen sozialen Netzwerke, welche in dieser Situation kontaktiert werden. Die Tatsache, dass 61% der Befragten es als

wahrscheinlich ansehen, auf die Straße zu gehen und sich umzuschauen, bekräftigt allerdings die Vermutung, dass die Bewohner Altensteigs sich nicht nur auf die indirekten Informationskanäle verlassen. Sie werden vielmehr ihr Verhalten auch an für sie direkt wahrnehmbaren Signalen orientieren, zum Beispiel am Verhalten der Nachbarn. Wenn die individuellen Sinneseindrücke der offiziellen Warnung zuwider laufen (z. B. fehlender Regen), könnte sich das negativ auf die Bereitschaft zur Evakuierung auswirken, da die meisten Menschen am liebsten zu Hause bleiben würden. Die Einbindung der offiziellen Institutionen wie Polizei und Feuerwehr sind zwar für die Glaubwürdigkeit der Warnung relevant, als Informationsmedien sind sie jedoch vergleichsweise wenig nachgefragt.

Inhaltlich interessieren sich die Befragten überwiegend für die genaueren Umstände, das heißt was genau passiert ist. Zu wissen wie und warum es zu der Evakuierungssituation gekommen ist, scheint einen Einfluss auf das anschließende Verhalten zu haben. Die zweite Frage gilt der Familie und den Angehörigen bzw. den Freunden und deren Sicherheit, noch bevor die Menschen wissen wollen, wie viel Zeit ihnen noch zur Evakuierung bleibt. Nicht ganz so häufig wird der Wunsch nach Informationen über die Dauer der Evakuierung („Wann kann ich wieder zurück?“), den sicheren Ort („Wo soll ich hin?“) und die Gründe der Evakuierung („Warum soll ich evakuieren?“) geäußert. Insgesamt liegt die Vermutung nahe, dass je weniger die Menschen sich informiert fühlen, desto mehr Zeit werden sie mit der Suche nach Informationen verbringen und sich damit nicht den Anweisungen entsprechend verhalten.

2.1.5.5.4 Ablauf der Evakuierung

Anhand der Befragungsergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die meisten Menschen mit dem Auto evakuieren würden und es sollten dementsprechend angepasste Informationen erfolgen. Dennoch sollte darauf geachtet werden, dass, – wenn auch wenige – Fahrradfahrer und Fußgänger unterwegs sein könnten. Einen dringenden Informationsbedarf gibt es vor allem für diejenigen, die in einer solchen Situation auf Hilfe angewiesen wären. Innerhalb dieser Gruppe würde die überwiegende Mehrheit passiv auf Hilfe warten.

2.1.5.6 Agentenbasierte Simulation

Angestrebt wird eine Simulation des Fluchtverhaltens der Bevölkerung in Altensteig, unter Berücksichtigung soziodemografischer Merkmale wie z. B. Familienstand, Alter, sowie situations- und lebensstilspezifische Aspekte wie z. B. Aufenthaltsort zum Zeitpunkt der Evakuierung, allgemeine Informationslage, Besitz von Haustieren, PKWs etc. Aus einer Kombination dieser Merkmale und in Anlehnung an die aus den Ergebnissen der Fokusgruppen abgeleiteten, verhaltensrelevanten Aussagen,

ergeben sich unterschiedliche Idealtypen, für die jeweils bestimmte Verhaltensketten mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Auf diesem Wege können unterschiedliche Szenarien hinsichtlich des Verhaltens von Personen bei erfolgter Evakuierungsaufforderung in Abhängigkeit sozialer und psychologischer Kontextfaktoren bereitgestellt, sowie Erkenntnisse zur Optimierung der Krisenkommunikation unter Einbezug dieser Kontextfaktoren gewonnen werden.

Basis dieser Simulation sind ein Rasterbild Altensteigs sowie die vom Projektpartner DHI-WASY (AP3: Hydraulische Simulationen) ermittelten Zeiträume verschiedener Hochwasserereignisse. Neben diesen Größen werden sozio-demographische Merkmale der Bevölkerung Altensteigs, deren erhobene Aufenthaltsorte während eines Tagesverlaufs, sowie eine Kombination von möglichen Verhaltenskomponenten in die agentenbasierte Simulation integriert. Dies erfolgt mittels einer Typenbildung.

Neben der Tageszeit der Evakuierung wird im Rahmen der Simulation auch der Einfluss der Informationslage der Agenten getestet. Für die Simulation ergeben sich damit vier verschiedene Szenarien:

1. Schlechte Informationslage, Tag (Vormittag/Mittag)
2. Schlechte Informationslage, Nacht (Abend/Nacht)
3. Gute Informationslage, Tag (Vormittag/Mittag)
4. Gute Informationslage, Nacht (Abend/Nacht)

Diese Aufteilung folgt aus der Literaturrecherche und den Erkenntnissen aus den Fokusgruppen, aus denen auch die generelle Wichtigkeit einer Informiertheit vor dem Schadensereignis hervorgeht. Die Ergebnisse der telefonischen Umfrage zeigen, dass sich die Aktionsketten am Vormittag und am Mittag kaum unterscheiden, das gleiche gilt auch für abends und nachts. Aus diesen Gründen werden die Zeiten entsprechend zusammengefasst. Die der Simulation zugrunde liegenden Idealtypen¹ werden auf Grundlage der vorhergehenden Erkenntnisse aus der Literaturrecherche, den Fokusgruppen sowie der telefonischen Befragung gebildet.

Ebenfalls werden die anhand verschiedener Gesichtspunkte gemessenen Verhaltensabsichten in die Typenbildung integriert, die zuvor erfolgreich mit soziodemografischen Merkmalen verknüpft werden konnten. Auf Grundlage der qualitativen Auswertung werden diese Verhaltensabsichten um die Hauptmotive für das jeweilige Handeln ergänzt, so dass die Typenbildung mit real geäußerten Aussagen der Altensteiger Bürger in den Fokusgruppen unterfüttert werden kann.

¹ Ein Idealtyp umfasst unterschiedliche, klar voneinander abgrenzbare Merkmale, die auf realen Beobachtungen beruhen. Dabei handelt es sich um eine theoretische Konstruktion, was zur Folge hat, dass er im Gegensatz zu einem Realtyp nicht an seiner Übereinstimmung mit der Realität gemessen wird.

Die Literaturrecherche sowie Aussagen in den Fokusgruppen stellen die anzunehmenden Reaktionszeiten der Agenten für einzelne Handlungen bereit. Da die Zeiten in den Fokusgruppen von einzelnen Teilnehmern unterschätzt werden und realiter so nicht angenommen werden können, dienen die Angaben in der Literatur als zusätzliche Kontrolle. In Folge können für jeden Typen entsprechende Verhaltensmuster verknüpft mit spezifischen Charakteristika, Aufenthaltsorten, Motiven und Reaktionszeiten sowie dessen wahrscheinliches Verhalten prozentual aufgeschlüsselt werden. Insgesamt ergeben sich damit sechs Haupttypen, sowie ein Sondertyp, den des Haustierbesitzers. Dieser wird prozentual über die Haupttypen verteilt, da in diesem Fall keine speziellen soziodemografischen Merkmale nachgewiesen werden können. Der Besitz von Haustieren ist jedoch insofern relevant, als dass hier von einer längeren Reaktionszeit ausgegangen werden muss:

- Typ A (15%): Alleinstehend oder Paarbeziehung, erwerbstätig, PKW
- Typ B (8%): Alleinstehend oder Paarbeziehung, nicht erwerbstätig, kein PKW
- Typ C (52%): Familie, PKW
- Typ D (19,5%): Rentner, PKW
- Typ E (5%): Pflegebedürftige
- Typ F (0,5%): Heldentyp
- Sondertyp S (37% über alle Typen A-F): Haustierbesitzer

Insgesamt leiten sich aus den Szenarien und den gebildeten Typen elf Aktivitätsketten ab, die sich für die vier Fälle „Tag“ und „Nacht“ jeweils untergliedert nach „gute Information“ und „schlechte Information“ ergeben. Ein Teil der Personen gibt an, dass sie nichts unternehmen würden. Der größte Teil plant von zu Hause aus über die Schule zur Sammelstelle zu fahren bzw. in den sicheren Bereich. Ein erheblicher Teil der Personen (29,2%) plant in der Nacht bei schlechter Informationslage eine Rückkehr aus dem sicheren Bereich zur Sammelstelle.

Unter der Annahme, dass die Reaktionszeitverteilung zwischen zehn Minuten (sehr schneller Aufbruch) und drei Stunden liegt, kann nicht vermieden werden, dass Personen vom Wasser erreicht werden, während sie noch evakuieren. Denn das Hochwasser erreicht Altensteig ca. 2:15 Stunden nach Eintritt des Schadensereignisses (Hochwasserentlastung oder Piping). Nimmt man hingegen an, dass die Reaktion schneller erfolgt (zwischen zehn Minuten und zwei Stunden), so kann eine Gefährdung der Bevölkerung durch das Hochwasser vermieden werden.

Die Abfahrt von der Sammelstelle dauert bei 1200 Personen zwischen einer und zwei Stunden. Bei 600 Personen dauert sie zwischen 45 Minuten (Nutzeroptimum) und einer Stunde (alle nehmen den kürzesten Weg). Das bedeutet, dass bei guter Information (15% = 600 Personen) für diese zweite Phase (nach der Sammelstelle)

eine Zeit zwischen 45 Minuten und einer Stunde, im anderen Fall (schlechte Information, 30% = 1200 Personen) zwischen einer und zwei Stunden zu beaufschlagen ist.

Tab. 2.4: Gesamtdauern (einschließlich Sammelstelle und Weiterfahrt).

	Tageszeit	Information	Reaktionszeit	Dauer min [hh:mm]	Dauer max [hh:mm]
Fall 1a	Tag	Gut	3 Stunden	3:45	4:00
Fall 1b	Tag	Schlecht	3 Stunden	4:00	5:00
Fall 2a	Nacht	Gut	2 Stunden	2:45	4:30
Fall 2b	Nacht	Schlecht	2 Stunden	3:00	5:30

Die minimale und maximale Dauer unterscheidet sich für den Fall 1 nur geringfügig, da die Reaktionszeit von drei Stunden die erste Phase dominiert und bei guter Information für die zweite Phase zwischen 45 Minuten und einer Stunde hinzukommt. Bei schlechter Information kommen ein bis zwei Stunden hinzu (Fall 1b). Im Fall 2a hingegen ist die Spannbreite größer, da die erste Phase zwei bis dreieinhalb Stunden dauert und bei guter Information eine Stunde für die Phase zwei hinzukommt. Im Fall 2b kommen zu den zwei bis dreieinhalb Stunden für die Phase eins noch einmal ein bis zwei Stunden für die Phase 2 hinzu. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Phase 2 geordnet abläuft, d. h. die Personen befinden sich in der Obhut von Hilfs- und Rettungskräften bzw. können von diesen informiert und angeleitet werden.

Die Dauer für Phase 1 vor der Sammelstelle ist etwas geringer als die maximale Reaktionszeit (als Parameter der vorgegebenen Verteilung), da aufgrund des Mittelwerts von einer Stunde und der Standardabweichung von 30 Minuten keine Personen später als nach 2 Stunden und 45 Minuten starten. Bei der längeren Reaktionszeit (Fall 1) ist die Streuung in den Ergebnissen geringer. Der Unterschied in den Dauern für Phase 1 (vor der Sammelstelle) rührt also von dem Unterschied zwischen Iteration 0 („kürzester Weg“) und Iteration 20 („nahe Nutzeroptimum“) her. Dieser ist bei hoher Verkehrsbelastung (kürzere Reaktionsspanne) größer.

Die Ergebnisse sind plausibel. Den entscheidenden Einfluss auf die Gesamtdauer hat die Reaktionszeitverteilung, insbesondere für die Phase 1 (vor der Sammelstelle) bzw. für die Fälle mit guter Information, bei der ein geringerer Anteil der Agenten zur Sammelstelle fährt. Der verkehrliche Ablauf wird im MATSim² Modell iterativ betrachtet. Ein Teil der synthetischen Population lernt mit jeder Iteration dazu und verfolgt dementsprechend eine bessere Strategie, die zu einer geringeren individuellen Gesamtdauer (für die Fahrtzeit) führt. Prinzipiell handelt es sich um eine

² Mehr Informationen zu MATSim finden sich auf www.matsim.org.

Nutzenfunktion, die individuell optimiert wird. In unserem Fall ist diese Funktion die Gesamtdauer. Das Ergebnis der Iteration ist (bei ausreichend hoher Zahl von Iterationen) ein Nutzeroptimum, bei der eine unilaterale Verbesserung durch eine Änderung des Weges nicht möglich ist (Nash-Gleichgewicht).

Es wird von der Vorbereitung sowie dem Informations- und Trainingsstand der Bevölkerung abhängen, inwieweit dieses Nutzeroptimum in der Realität erreicht werden kann. Das gleiche gilt für die Reaktionszeitverteilung, die sich hauptsächlich aus der Vorbereitungszeit und dem Zeitpunkt der Warnung der Bevölkerung ergibt. Da die angenommenen Reaktionszeiten relativ optimistisch geschätzt sind, ist die Voraussetzung für ihr Eintreffen, eine entsprechende Vorbereitung. Allerdings ist die Frage, welcher Teil der Bevölkerung überhaupt evakuiert werden müsste, hier nur ganz oberflächlich eingeflossen. Es ist z. B. denkbar, dass eine Evakuierung in die oberen Stockwerke für fast alle Einwohner ausreichend ist.

2.1.5.7 Fazit und Verwertungszusammenhang

Die Anwendung unterschiedlicher Methoden ermöglicht eine umfassende Generierung von Daten und Erkenntnissen im Hinblick auf mögliche Verhaltenskomponenten während einer Evakuierung. Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sowie die qualitativen Ergebnisse und Annahmen können weitgehend durch die quantitative Telefonumfrage und die agentenbasierte Simulation bestätigt werden. Aus diesem Grund können die Ergebnisse insgesamt als weitgehend verallgemeinerbar angesehen werden. Einschränkend muss man jedoch festhalten, dass hier lediglich die Stadt Altensteig als ein Fall untersucht wird, der beispielsweise topografische Besonderheiten aufweist. Wie bereits angedeutet, spielen für die Evakuierung eines Ortes oder einzelner Teile viele Faktoren eine Rolle, wie die Topographie, das Straßennetz, die Bevölkerungsdichte etc. Sie alle können sich auf das Verhalten der Bevölkerung auswirken. Deshalb sollten die für Altensteig generierten Ergebnisse, nicht ohne weitere Überprüfung auf andere Gemeinden übertragen werden.

Für das Fallbeispiel Altensteig können im Hinblick auf die zentralen Leitfragen folgende Erkenntnisse festgehalten werden, welche konkrete Informationen für einen Katastrophenschutzplan enthalten.

2.1.5.7.1 Wie soll gewarnt werden?

Eine Warnung wird dann als besonders vertrauenswürdig wahrgenommen, wenn sie von offizieller Seite ausgesprochen wird. Als besonders vertrauenswürdig wird hier eine persönliche Ansprache durch die Polizei und die Feuerwehr bzw. den Katastrophenschutz wahrgenommen. Bei nicht uniformierten Meldern wie beispielsweise Vertretern einer Behörde ist es wichtig, dass diese den Bürgern

persönlich bekannt sind, oder mit der Information über die Gefährdungslage auch eine Beschreibung des Amtes der warnenden Person erfolgt. Insgesamt werden von den Bürgern Warnungsmedien präferiert, die neben der eigentlichen Warnung auch Informationen transportieren (Radio, Internet etc.). Mehrdeutigen Warnmechanismen wird zunächst einmal weniger Aufmerksamkeit geschenkt, auch wenn beispielsweise Sirenen als besonders effektiv, da gut hörbar, eingeschätzt werden. Bei reinen Warnsignalen ist eine Vorabinformation wichtig, damit die Bürger wissen, welches Warnsignal was bedeutet und wie die Gefährdungslage einzuschätzen ist. Die mit der Warnung verbundene Information sollte prioritär die Fragen klären was passiert ist und was zu tun ist.

2.1.5.7.2 Welche ersten Reaktionen folgen auf die Warnung?

Als erste Reaktion nach einer Warnung, ist keine überstürzte Flucht oder unkontrollierte Massenpanik zu erwarten. Die wahrscheinlichsten Reaktionen sind eine weitere Informationssuche, die Kontaktaufnahme zu Angehörigen oder Nachbarn und die Haus- bzw. Gegenstandssicherung. Als eine der wichtigsten Erkenntnisse ist die Tatsache auszumachen, dass die Befragten es insgesamt als vergleichsweise „unwahrscheinlich“ ansehen, die offiziellen Warnungen und entsprechenden Anweisungen (Treffen am Sammelpunkt, außerhalb Altensteigs bleiben) ohne zu zögern zu befolgen. Gerade ältere Menschen haben das Bedürfnis trotz Evakuierungsaufforderung zu Hause zu bleiben. Auch hier ist eine Information zur Dringlichkeit der Befolgung der Warnung im Vorfeld eines Schadensereignisses zu vermitteln.

2.1.5.7.3 Wie wird die Bedrohung wahrgenommen?

Gerade die persönliche Gefährdungslage wird weitgehend unterschätzt. Das gilt vor allem für die körperliche Unversehrtheit. Eine persönliche Bedrohungssituation durch Hochwasser wird als wesentlich unwahrscheinlicher eingestuft als für Altensteig insgesamt. Auch die Gefahr für Leib und Leben wird von den Bürgern in der Regel ausgeschlossen. Solange keine Vorab-Information zur persönlichen Gefährdungslage an die Bürger in gefährdeten Gebieten herangetragen wird, wird die Bedrohung weitestgehend unterschätzt.

2.1.5.7.4 Wie würde die Evakuierung ablaufen?

Das bevorzugte Evakuierungsmittel ist das Auto, da dieses die Möglichkeit der Sachsicherung bietet. In Altensteig hat zudem der größte Teil der Bevölkerung ein Automobil zur Verfügung. Den größten Einfluss auf die Gesamtdauer der Evakuierung hat die Reaktionszeit auf die Warnung. Bei der eigentlichen Evakuierungszeit, ist von einer geringen individuellen Zeitdauer für die Fahrtzeit auszugehen. Entscheidende Größen für eine schnelle Evakuierung sind die

Vorbereitung auf ein mögliches Schadensereignis und der Informations- und Trainingsstand der Bevölkerung.

2.1.5.7.5 Generelle Annahmen

Generelle Annahmen

Aus der Untersuchung in *Arbeitspaket 4* lassen sich drei wesentliche Annahmen ableiten, die in allen Schritten des Methodendesigns bestätigt werden:

- Menschen verhalten sich in Katastrophensituationen, die durch Hochwasser ausgelöst werden, selten panisch. Diese Annahme wird bereits durch die Literaturstudie deutlich und wird auch durch die Ergebnisse der eingesetzten Methoden bestätigt. Auch die Annahme, dass Menschen in eine Art Angststarre verfallen, kann als widerlegt angesehen werden. In den meisten Situationen verhalten sich die Menschen normal.
- Persönlichkeitsvariablen, wie Selbstwertgefühl, Eigenkontrolle und Fatalismus spielen bei der Reaktion auf eine Warnung eine erhebliche Rolle. Dies führt auch zu einer verbreiteten Reaktion auf eine Warnung. Betroffene tendieren dazu, sich von der realen Bedrohung zu entfernen und die Gefahr auszublenden. Hier kann eine Verzögerung der Reaktion auf die Warnung erfolgen, die zu einer Verzögerung der Evakuierung und folglich zu einer höheren Gefährdung der betroffenen Bevölkerung führen kann.
- Informationen vor einer potentiellen Katastrophe sind entscheidend. Denn bei schlechter Informationslage ist die Informationssuche ein wichtiges Motiv, so dass sich auch hier die Reaktion auf die Warnung verzögern kann. Liegen den Betroffenen vor dem Ereignis bereits wichtige Informationen zur potentiellen Gefährdung und zu den wichtigen Schritten, die im Falle eines Schadensereignisses gemacht werden müssten, vor, so kann von einer schnelleren Reaktion auf die tatsächliche Warnung ausgegangen werden.

Aus den Erkenntnissen die im *AP4 – Verhalten der Bevölkerung* gewonnen werden können, lassen sich im Wesentlichen drei Schlüsse für ein erfolgreiches Katastrophenmanagement ableiten:

1. Eine eindeutige Identifizierung des Warnenden bzw. der warnenden Institution ist notwendig, um Glaubwürdigkeit und Vertrauen in den Inhalt der Warnung herzustellen. Eine Warnung wird dann als besonders vertrauenswürdig wahrgenommen, wenn sie von offizieller Seite ausgesprochen wird. Als besonders vertrauenswürdig wird hier eine persönliche Ansprache durch die Polizei und die Feuerwehr bzw. den Katastrophenschutz wahrgenommen, da diese Akteure an ihrer Uniform

direkt erkennbar sind. Sollten Vertreter von Ämtern die Warnung aussprechen, ist es empfehlenswert, dass diese ihre Funktion erläutern.

2. Die gewünschten Verhaltensweisen können nur durch spezifische Informationen im Vorfeld einer potentiellen Katastrophe beeinflusst werden. Betroffene suchen häufig nach einer zweiten Quelle, wenn eine Warnung ausgesprochen wird und sie nicht im Vorfeld über eine Gefährdung informiert wurden. Dieser Bestätigungswunsch bezüglich der Warnung kann eine angemessene Reaktion auf die Warnung verzögern. Haben die Gefährdeten aber bereits im Vorfeld Informationen zur potentiellen Gefährdung erhalten, so wird diese Information durch die Warnung selbst bestätigt. Ebenso ist es so auch möglich, dass die gewünschten Verhaltensweisen eher befolgt werden, da diese nicht zeitgleich mit der Warnung vermittelt werden müssen, sondern den Betroffenen schon bekannt sind.
3. Die Bevölkerung muss über ihre individuelle Gefährdungslage aufgeklärt sein. Persönlichkeitsvariablen wie Selbstwertgefühl, Eigenkontrolle und Fatalismus spielen nicht nur bei der Reaktion auf eine Warnung eine erhebliche Rolle, sondern auch bei der Einschätzung der persönlichen Gefährdungslage, die als Folge eher unterschätzt wird. Um die verbreitete Reaktion einer Ausblendung der persönlichen Gefährdung zu vermeiden, ist es ratsam potentiell Gefährdete über ihre individuelle Gefährdung aufzuklären und Informationen zu Reaktion auf verschiedene Gefährdungsstufen bereitzustellen.

Die Erkenntnisse aus Arbeitspaket 4 werden an den Projektpartner Aqua Soli (*AP7: Erstellung von Katastrophenschutzplänen*) übermittelt, wo sie in die konkrete Katastrophenschutzplanung einfließen. Weiterhin können die allgemeinen Erkenntnisse auf verschiedene Evakuierungssituationen übertragen werden, dies gilt vor allem für die Relevanz von Informationen der gefährdeten Gruppen vor einem potentiellen Schadensereignis. Wie diese im einzelnen Fall ausgestaltet sein müssen, sollte fallspezifisch überprüft werden.

2.1.6 Fahrzeugstabilität in Strömungen (AP5)

Die Dauer der Evakuierung gefährdeter Bevölkerung ist im Katastrophenfall von den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln abhängig und wird, bei bereits einsetzender Überflutung, wesentlich von den hydraulischen Parametern Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit bestimmt.

Für Fußgänger, Personenkraftfahrzeuge sowie Einsatzfahrzeuge ergeben sich dabei höchst unterschiedliche Grenzwerte für die Gefährdung durch den Strömungsangriff, bei denen eine ungefährdete Fortbewegung noch möglich ist. Während für Fußgänger und Personenkraftfahrzeuge entsprechende, aus Versuchen abgeleitete, Werte vorliegen, sind derartige Daten für Einsatzfahrzeuge kaum verfügbar, jedoch notwendige Voraussetzung für die Festlegung von Evakuierungsrouten bzw. Rettungswegen. Bei Extremereignissen können lokal signifikante erhöhte Fließgeschwindigkeiten auftreten, die beim Auftreffen auf ein Fahrzeug zu einem Aufstau und einer beschleunigten Strömung um das Fahrzeug führen. Die Aufstau- sowie die Kraftwirkung sind wesentlich von der Kontur des Fahrzeuges abhängig. Die von den Fahrzeugherstellern in aerodynamischen Untersuchungen ermittelten Widerstandsbeiwerte sind für die Berechnung der Umströmungsvorgänge nicht hilfreich, da diese für die Luftumströmung an der gesamten Karosserie (meist im Windkanal) gemessen werden.

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Fahrzeugstabilität in Strömungen“ werden Modelluntersuchungen an teileingetauchten Fahrzeugformen durchgeführt, die eine Beurteilung der Befahrbarkeit überfluteter Verkehrswege ermöglichen. Folgende Teilschritte werden innerhalb der vorliegenden Arbeiten untersucht:

Parameterermittlung und Literaturrecherche

Die Parameterermittlung dient der Bestimmung von Faktoren, welche die Mobilität von Fahrzeugen bei wasserbedeckten Fahrbahnen beeinflussen. In einem Modellversuch werden die maßgebenden Größen und Parameter bestimmt, die für die Ermittlung der wesentlichen Aussagen zur gegebenen Aufgabenstellung erforderlich sind. Anhand der wissenschaftlichen und technischen Literatur wird der Wissensstand über die Interaktion zwischen Fahrzeug bei Wasserumströmung zusammengetragen und für die in dem Projekt EvaSim relevanten Fragestellungen ausgewertet. Ansatzpunkte sind dabei die Kenntnisse zum Aquaplaning und die bei steigenden Wassertiefen dominierenden Faktoren für die Manövrierbarkeit von Fahrzeugen. Ein weiterer Aspekt umfasst die Abgrenzung von der Wassertiefe bzw. die Möglichkeit, die Dynamik einer Strömung zu parametrisieren und als weiteren Faktor zu berücksichtigen, um somit Abschätzungen des dynamischen Strömungseinflusses zu ermöglichen.

Durchführung von Modell- und Naturversuchen

Um Kriterien für die Beurteilung der Befahrbarkeit zu entwickeln, werden Modelluntersuchungen sowohl in einer Strömungsrinne als auch in einem Stahlbecken der Versuchsanstalt für Wasserbau durchgeführt.

Das Widerstandsverhalten verschiedener Fahrzeugtypen wird ermittelt, indem systematische Untersuchungen bei einer Vielzahl von Wassertiefen-Geschwindigkeits-Kombinationen in der Versuchsrinne vorgenommen werden. Hierfür werden geeignete Modellmaßstäbe und Modellgesetze bestimmt, die die Übertragung der physikalischen Simulation und die nachfolgende Beurteilung im natürlichen Maßstab gewährleisten. Da das reale Auftriebsverhalten für die Beurteilung der Stabilität von großer Wichtigkeit ist, wird außerdem in einem Versuch im Naturmaßstab ein Personenkraftwagen über eine Tragekonstruktion an einem Stahlbecken montiert und das Auftriebsverhalten des PKW methodisch untersucht.

Für die beiden genannten Untersuchungsansätze werden Versuchskonzepte entwickelt sowie geeignete Versuchsanlagen in der Versuchsanstalt für Wasserbau konstruiert. Die Auswertung der Ergebnisse ermöglicht die Ableitung von standardisierten Stabilitätskriterien, die geeignet sind, in den für die Evakuierungsszenarien verwendeten Simulationsmodellen implementiert zu werden.

Umsetzung der Versuchsergebnisse

Die Erkenntnisse aus den Modellversuchen finden als Grundinformation in der Verkehrssimulation Eingang und legen den Befahrbarkeitsstatus einzelner Verkehrswege in den Szenarienrechnungen für unterschiedliche Fahrzeugtypen fest. Um die Informationen in das Verkehrsmodell zu übergeben, wird eine Schnittstelle entwickelt, welche die Informationen Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe entlang eines Verkehrsweges auswertet und einen Befahrbarkeitsstatus zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Überflutungsereignisses ausgibt. Dies ermöglicht eine detaillierte Entwicklung von Katastrophenschutzplänen bzw. die Identifizierung von Schwachstellen bestehender Schutzpläne.

2.1.6.1 Parameterermittlung und Literaturrecherche

Die Stabilität von Fahrzeugen in einer Strömung hängt von einer Vielzahl von Kräften ab, welche auf den Fahrzeugkörper wirken. Dieser Kraftwirkung liegen verschiedene Einflussgrößen zugrunde, welche wechselseitig voneinander abhängen. In der Parameterermittlung geht es um die Bestimmung wesentlicher, die Mobilität bei nasser bzw. überströmter Fahrbahn, beeinflussender Parameter. Diese können in der Simulation zu den verschiedenen Zeitpunkten des Überflutungsereignisses aus den Berechnungen des hydraulisch-numerischen Modells ausgelesen und so die Grenze der Befahrbarkeit und Nutzbarkeit der Verkehrswege im Untersuchungsgebiet ermittelt werden.

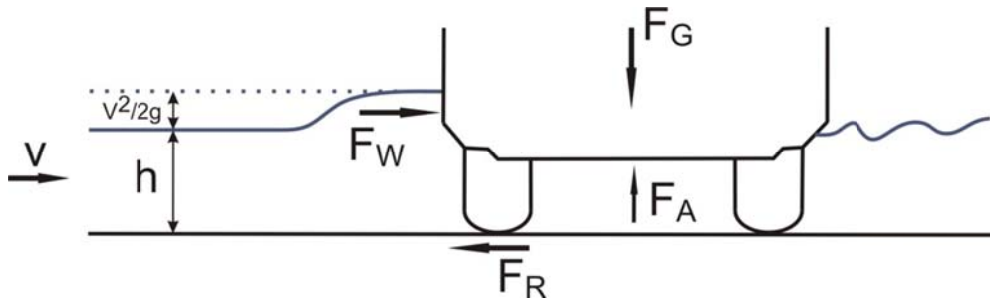


Abb. 2.17: Kraftwirkung auf ein teilumströmtes Fahrzeug nach Bonham u. a. (1967)

Sobald das Wasser ein stehendes Fahrzeug umströmt, übt die Strömung verschiedene Kräfte auf den Körper aus (siehe Abb. 2.17). Dies sind insbesondere die Auftriebskraft (F_A) und der Strömungswiderstand (F_W) als die Kraft, die auf den Körper aufgrund der Bewegung des Fluids wirkt. Die Auftriebskraft (F_A) beinhaltet einen statischen ($F_{A;s}$) sowie einen dynamischen Anteil ($F_{A;d}$). Der statische Anteil ist derjenige Anteil, den das Fluid in der Ruhelage auf den Körper ausübt, der dynamische Anteil ist von der jeweiligen Umströmung des Körpers abhängig. Für Fahrzeuge existieren hierfür keine Referenzwerte aus der Literatur oder physikalischen Versuchen.

Der Widerstandskraft steht die Reibungskraft (F_R) als Haltekraft entgegen, die wiederum von der Normalkraft (F_N), die sich aus der Differenz zwischen Gewichtskraft (F_G) des Fahrzeuges und Auftriebskraft (F_A) ergibt, sowie von dem Reibungskoeffizienten μ_R abhängig ist. Setzt man ein Kräftegleichgewicht in Strömungsrichtung an, ergibt sich der Bewegungsbeginn, sobald die Größe der Widerstandskraft diejenige der Haltekraft gerade übersteigt:

$$F_W = F_R$$

Die Widerstandskraft und die Haltekraft lassen sich berechnen zu:

$$F_W = c_w * A_w * \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$F_R = F_N * \mu_R$$

mit $F_N = F_G - F_A$

Gleichsetzen und Umformen ergibt:

$$c_w * A_w * \frac{1}{2} \rho v^2 = (F_G - F_A) * \mu_R$$

$$v = \sqrt{\frac{(F_G - F_A) * \mu_R}{c_w * A_w * \frac{1}{2} \rho}}$$

Mit der letzten Gleichung kann die kritische Fließgeschwindigkeit berechnet werden, bei der die Widerstandskraft gerade der Haltekraft entspricht. Die Gewichtskraft F_G und die projizierte Anströmfläche A_W lassen sich im Regelfall leicht bestimmen. Als Unbekannte in dieser Gleichung bleiben die Auftriebskräfte F_A , der Widerstandsbeiwert c_W sowie der Reibungskoeffizient μ_R . Ebenfalls lassen sich aus der Gleichung die physikalisch maßgeblichen Parameter für die Beurteilung der Stabilität ableiten:

- Wassertiefe h (in A_W enthalten),
- Fließgeschwindigkeit v ,
- Anströmwinkel (in c_W enthalten),
- Körperform und -gewicht (in c_W , A_W , F_A und F_G enthalten),
- Interaktion Reifen-Fahrbahn (in μ_R enthalten).

Zusätzlich spielen noch weitere Parameter für die Funktionalität eines Fahrzeugs eine Rolle, wie beispielsweise die Höhe der Luftansaugung des Motors, die Höhe der Lichtmaschine, der Zündung, usw. Diese werden im Zusammenhang mit der Wassertiefe ausführlicher dargestellt. Für weitergehende Details der Parameterermittlung und der Literaturrecherche wird auf den Teilbericht „AP 5: Fahrzeugstabilität in Strömungen“ verwiesen.

2.1.6.2 Physikalische Modellversuche

In der Versuchsanstalt für Wasserbau der Universität Stuttgart werden Modelluntersuchungen durchgeführt, um Stabilitätskriterien für Fahrzeuge zu entwickeln. Die Untersuchungen finden in einer Strömungsrinne („gelbe“ Kipprinne) mit den Abmessungen von 20 m Länge, 1 m Breite und 0,6 m Höhe sowie in einem Stahlbecken mit den Abmessungen 6,6 m Länge, 4,5 m Breite und 1,5 m Höhe statt.

Der Durchfluss wird bei beiden Versuchsständen mit magnetisch induktiven Durchflussmessgeräten in der Zuleitung gemessen. Ebenso sind beide Versuchsstände mit Ultraschallsensoren ausgestattet, wodurch die Erfassung von Wasserspiegellagen an verschiedenen Positionen erfolgt. In der Kipprinne wird die mittlere Fließgeschwindigkeit rechnerisch ermittelt. Um die auftretenden Kräfte zu erfassen, sind wiederum an beiden Versuchsständen Kraftaufnehmer implementiert, deren Positionierung in den späteren Beschreibungen der Messstände detailliert erläutert wird.

Auswahl der Versuchskörper

Die Untersuchungen werden für die beiden Fahrzeugtypen Einsatzfahrzeug und Personenkraftwagen durchgeführt. Für Personenkraftwagen liegen bereits Daten aus früheren Untersuchungen vor, dementsprechend werden die im Forschungsvorhaben

erhobenen Daten mit den bereits vorhandenen verglichen, analysiert und diskutiert. Die Untersuchungen an dem Einsatzfahrzeug stellen eine wichtige Erweiterung des derzeitigen Wissensstandes dar.

In früheren Modelluntersuchungen wurden die Modelle teilweise abgedichtet, teilweise jedoch auch in einem unabgedichteten Zustand untersucht. Für die Übertragung der Ergebnisse auf natürliche Verhältnisse wird bei Verwendung eines unabgedichteten Modells die Annahme zugrunde gelegt, dass die eindringende Wassermenge in Modell- und Naturausführung, auf den Maßstab bezogen, von gleicher Größenordnung ist. Bei den vorliegenden Maßstabsuntersuchungen wird für beide Versuchskörper der Ansatz eines abgedichteten Modells gewählt. Die Abdichtung bietet den Vorteil, dass die Gewichtskraft als konstant angesehen und Informationen über die Eindringmenge des Wassers nachträglich einbezogen werden können. Nachteilig ist eine mögliche Überschätzung des Auftriebsverhaltens, jedoch tendiert die Entwicklung in der Automobilindustrie immer mehr zu verbesserten Dichtungen und wasserdichteren Innenräumen.

Für die Untersuchungen am Personenkraftfahrzeug wird ein Volkswagen Golf als weit verbreitetes und repräsentatives Personenkraftfahrzeug ausgewählt. Der VW Golf weist sowohl im Jahr 2009 als auch im Jahr 2010 die höchsten Zulassungszahlen im deutschen Vergleich auf. Für die Experimente wird ein Modellauto im Maßstab 1:10 mittels selektiven Lasersinterns (SLS) hergestellt, einem Verfahren mit dem räumliche Strukturen durch Sintern aus einem pulverförmigen Ausgangsstoff hergestellt werden. Das Werkstück wird hierbei Schicht für Schicht aus Polyamid aufgebaut. Bei dem Fahrzeugmodell im Maßstab 1:10 werden sowohl das Gewicht als auch die Achslastverteilung maßstabsgetreu skaliert.

Als Prototyp für den Versuchskörper eines Einsatzfahrzeuges dient das Feuerwehrfahrzeug LF 10/6 (Löschgruppenfahrzeug), dieses Modell ist in seiner Kategorie in Deutschland am häufigsten zugelassen. Zudem handelt es sich um ein genormtes Fahrzeug mit festgelegten Vorgaben hinsichtlich Gewicht, Abmessungen und Beladung, die für alle Fahrzeughersteller verbindlich sind (Norm 14530/5 speziell für LF 10/6 und HLF 10/6). Das Modellfahrzeug basiert auf der Geometrieform des Ahmed-Body. Um ein geometrisch ähnliches Modell (Maßstab 1:13,1) zu konstruieren, werden wichtige Kenngrößen wie Leergewicht, Abmessungen (Länge, Breite, Höhe, Radstand) und die Achslastverteilung im Modell abgebildet.

Durchführung der Modellversuche

Für die Durchführung der Modellversuche werden verschiedene methodische Untersuchungsansätze ausgewählt, welche sich hinsichtlich des Messprinzips und der erfassten Parameter voneinander unterscheiden. Sogenannte Stabilitätsversuche

bilden eine wichtige Grundlage der experimentellen Untersuchungen und erlauben die Bestimmung des Bewegungsbeginns der Versuchskörper in der Strömungsrinne bzw. die Erstellung von Stabilitätsdiagrammen. Druck- und Strömungskraftmessungen werden zur messtechnischen Erfassung der Widerstandskraft eingesetzt und ermöglichen die Ableitung von Widerstandsbeiwerten für teilumströmte Fahrzeuge sowie die Berechnung der Stabilitätskurven unter veränderten Randbedingungen. Bei allen bisher beschriebenen Versuchsständen (Stabilitätsmessungen, Druckmessungen, Widerstandsmessungen) werden Versuche mit Variationen der Anströmwinkel durchgeführt. Um die Übertragbarkeit der Modellversuche auf die Natur zu bewerten, werden zusätzlich Auftriebskraftmessungen an einem Fahrzeugmodell im Naturmaßstab durchgeführt.

Bei den **Stabilitätsmessungen** werden die Versuchskörper in verschiedenen Anströmpositionen in der Rinne ausgerichtet. Der Rinnendurchfluss wird sukzessive bis zum Instabilitätspunkt gesteigert. Für diesen Instabilitätspunkt werden die Parameter Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit im stationären, ungestörten Zustand (ohne Strömungshindernis) bestimmt. Bevor diese Versuche durchgeführt werden können, ist eine Einstellung des Reibungsbeiwertes erforderlich.

Zur präzisen Erfassung des Instabilitätspunktes wird der Versuchskörper in der Kipp Rinne lokalisiert und in kleinen Intervallschritten mit einem kontinuierlich steigenden Durchfluss angeströmt. Unterschiedliche Strömungszustände werden durch eine Änderung der Rinnenneigung eingestellt. Auf diese Weise werden Abflusszustände im Bereich von Froude-Zahlen zwischen 0 und 1,7 untersucht. Die Begrenzung auf eine maximale Froude-Zahl von 1,7 ergibt sich aus einer Analyse der Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation für das UG Bad Reichenhall.

Abhängig von der Rinnenneigung kommt es zu einem Bewegungsbeginn des Modellkörpers bei einer bestimmten Kombination aus Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe sowie Anströmwinkel. Der Versuchskörper wird aus der Rinne entnommen, es stellt sich ein stationärer Abflusszustand bei konstantem Wasserdurchfluss ein. Die Kenngrößen für den jeweils kritischen Durchfluss und die kritische Wassertiefe werden im stationären Zustand über einen längeren Zeitraum messtechnisch erfasst. Die mittlere kritische Fließgeschwindigkeit wird aus diesen beiden Parametern über die Massenerhaltung rechnerisch ermittelt. Der typische Ablauf einer Stabilitätsmessung ist in den nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht. Ebenfalls ist die Bodenplatte (Festlegung des Reibungskoeffizienten) mit verschiedenen aufgetragenen Winkelpositionen zu erkennen. Zu Beginn der Messung befindet sich der Versuchskörper in einer stabilen Position, die Haltekraft ist größer als die auf den Körper wirkende Strömungskraft, es tritt keine Bewegung auf (Abb. 2.18 links).



Abb. 2.18: Dokumentation der Versuchsdurchführung. Stabile Position (links) und instabile Position (rechts).

Wird der Durchfluss weiter gesteigert, nimmt die Strömungskraft entsprechend zu und bei Überschreitung der Haltekraft kommt es zum Abdriften des Fahrzeugmodells (Abb. 2.18 rechts). Bei der Stabilitätsmessung handelt es sich um eine sehr verlässliche Methode, da aus messtechnischer Sicht die Parameter Durchfluss und Wassertiefe mit sehr geringen Unsicherheiten erfasst werden können. Lediglich in der exakten Erfassung des Instabilitätszeitpunktes kann es zu Abweichungen kommen. Der Reibungskoeffizient ist bereits aus den Vorversuchen festgelegt und beträgt in der ersten Versuchsreihe $\mu_R = 0,7$. Die Einhaltung des richtigen Reibungskoeffizienten wird durch die Positionierung des Modellkörpers auf einer Grundplatte, welche in der Rinne angebracht ist, sichergestellt. Der Reibungsbeiwert zwischen Fahrzeug und Fahrbahn wird innerhalb gewisser Grenzen variiert (zweite Messreihe, $\mu_R = 0,3$) und somit eine Bandbreite für die Stabilität angegeben. Die Versuchskörper werden in insgesamt drei Winkelpositionen gegenüber der Strömung ausgerichtet. Da die Fahrzeuglängsachse eine Symmetrieachse darstellt, ist es ausreichend eine Rotation des Körpers um 180° zu betrachten. Im Rahmen der Stabilitätsuntersuchungen wird eine frontale bis seitliche Anströmung genauer betrachtet, folgende Winkelpositionen werden untersucht:

- 0° : Versuchskörper mit der Frontseite entgegen der Strömung,
- 45° : Versuchskörper schräg zur Strömung,
- 90° : Versuchskörper mit der Längsseite quer zur Strömung.

Die grafischen Darstellungen der Messergebnisse zeigt die Abb. 2.19. Die Darstellung erfolgt entsprechend den in der Literatur üblicherweise verwendeten Stabilitätskurven. Auf der Ordinate sind die kritischen Fließgeschwindigkeiten zu den entsprechenden Wassertiefen auf der Abszisse aufgetragen. Die Größen sind bereits über die Modellgesetze auf Naturgrößen umgerechnet, jeder einzelne Punkt stellt einen Instabilitätspunkt dar (Bewegung des Versuchskörpers im Modellversuch). In den Diagrammen sind die Froude-Zahlen als durchgezogene Linien dargestellt.

Im ersten Versuchsdurchlauf wird ein Reibungskoeffizient von 0,7 gewählt. Das Gewicht entspricht dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeuges. Bei hydrostatischen Verhältnissen wird das Modellfahrzeug bei Wassertiefen von etwa 0,52 m (Natur) instabil, da hier die Auftriebskraft der Gewichtskraft entspricht. Bei höheren Froude-Zahlen erreicht die zugehörige kritische Wassertiefe ihr Maximum, da die dynamische Absenkung des Wasserspiegels um das Auto, die Auftriebskraft vermindert. Bei Froude-Zahlen größer als 0,5 nimmt der Einfluss der Strömungskraft auf die Stabilität wieder zu. Die Untersuchungsergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten, aufgrund des größeren Modellmaßstabs sind sie in einigen Bereichen sogar detaillierter. Die kritische Fließgeschwindigkeit zeigt eine klare Abhängigkeit vom Anströmwinkel. Das Fahrzeug ist bei einer Ausrichtung frontwärts entgegen der Strömung (0°) in seiner stabilsten Position während eine Ausrichtung von 45° die instabilste Position darstellt. Die Stabilitätskurve für einen Anströmwinkel von 90° liegt zwischen der 45° - und der 0° -Kurve.

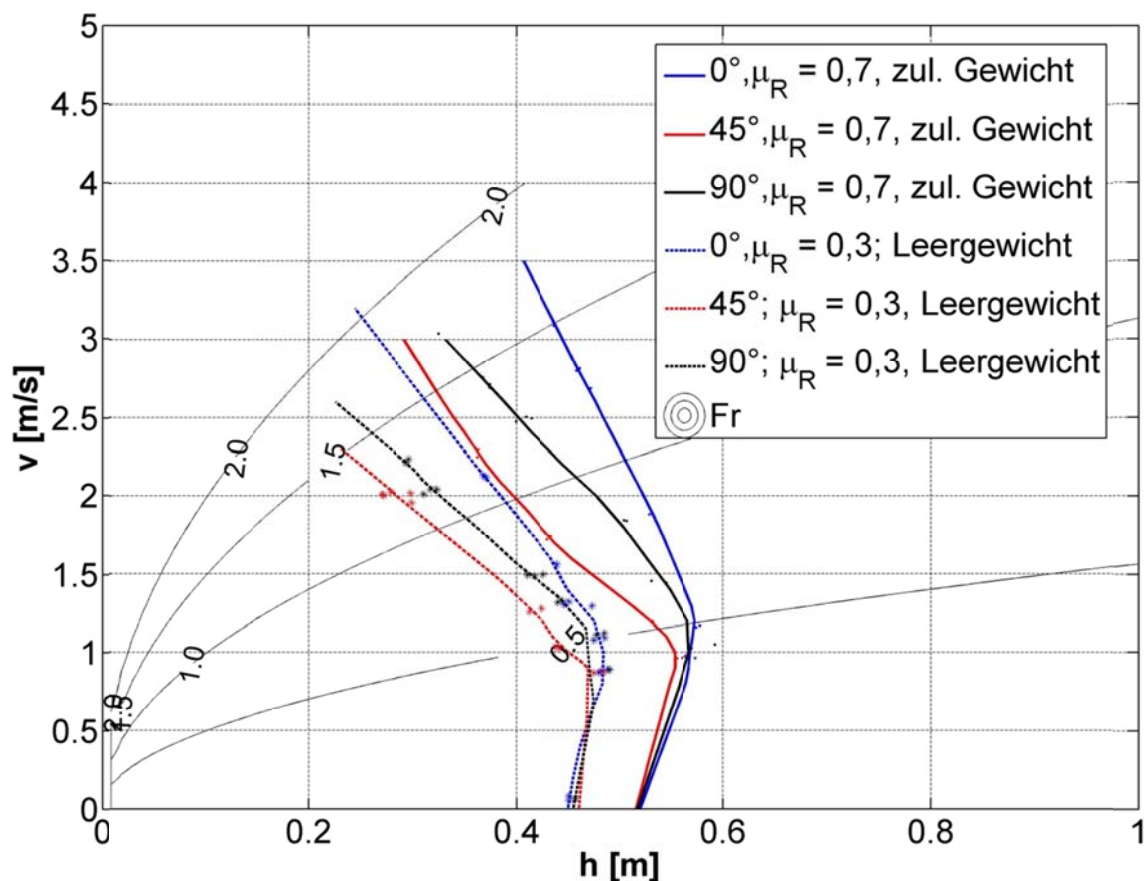


Abb. 2.19: Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen im Vergleich

In der zweiten Versuchsreihe werden mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu_R = 0,3$ und einem Versuchskörper der dem Leergewicht des Kraftfahrzeugs entspricht die pessimalen Randbedingungen gewählt. Im statischen Zustand wird der

Versuchskörper bereits bei einer Wassertiefe von 0,45 m (Natur) instabil. Der Verlauf der einzelnen Stabilitätskurven zeigt eine ähnliche Charakteristik wie die Verläufe der ersten Versuchsreihe, insgesamt sind die kritischen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für eine beginnende Instabilität entsprechend kleiner. Bei geringen Geschwindigkeiten ist die Auftriebskraft dominierend und für die Instabilität maßgebend, während sich bei höheren Fließgeschwindigkeiten der Einfluss der zunehmenden Strömungskraft bemerkbar macht. In der Abb. 2.19 ist ein Vergleich der beiden Messreihen dargestellt.

Die Stabilitätsuntersuchungen des Einsatzfahrzeuges werden in analoger Weise durchgeführt. Eine genauere Beschreibung dieser Versuchsdurchführungen sowie der Druck-, Widerstands- und Auftriebskraftmessungen findet sich im detaillierten Teilbericht zu AP 5.

2.1.6.3 Umsetzung der Versuchsergebnisse

Für die Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Praxis ist vor allem die Handhabbarkeit in der Erstellung von Gefahrenkarten sowie der Notfall- und Einsatzplanung ein wichtiges Kriterium. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Erkenntnis der Richtungsabhängigkeit der Fahrzeugstabilität zwar von Interesse, für die praktische Umsetzung kann dies jedoch kein anzusetzendes Kriterium sein, da z. B. der Rettungsverkehr im Katastrophenfall in der Lage sein muss, etwaige Wendemanöver durchzuführen. Es wird deshalb ein Ansatz gewählt, der den Anströmwinkel zur Beurteilung der Stabilität nicht benötigt.

Für die Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Praxis wird die Energiehöhe als Parameter zur Beurteilung der Verkehrstauglichkeit in Strömungen eingeführt. Die Ableitung der Energiehöhe für Gerinne erfolgt anhand der eindimensionalen Energiebilanz für einen beliebigen Querschnitt:

$$h_E = z + \frac{p}{\rho^* g} + \frac{v^2}{2g}$$

Bei Strömungen mit freier Wasseroberfläche entspricht die Druckhöhe dem Atmosphärendruck, womit sich folgende Gleichung für die Energiehöhe ergibt:

$$h_E = h + \frac{v^2}{2g}$$

Die Gründe, die für die Einführung der Energiehöhe als Parameter zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen bzw. der Verkehrstauglichkeit von Fahrzeugen sprechen, sind folgende:

- Der Kurvenverlauf der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wassertiefe bei einer konstanten Energiehöhe ist dem der Stabilitätskurven sehr ähnlich. In der Abb. 2.21 sind die Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen sowie die für eine konstante Energiehöhe dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Stabilitätskurven im Prinzip sehr gut angenähert werden.
- Die Energiehöhe entspricht im statischen Zustand der Wassertiefe. Auf diese Weise wird die Wassertiefe in die Beurteilung einbezogen und somit auch die grundsätzliche Verkehrstauglichkeit berücksichtigt, d. h. Parameter wie Höhe der Luftansaugung, Höhe der Lichtmaschine und Zündung, usw. sind in die Beurteilung per se aufgenommen.
- Die Energiehöhe ist ein physikalisch sinnvoller und gleichzeitig einfach zu ermittelnder Parameter, der in der Praxis relativ problemlos zum Einsatz kommen kann.

Bei Überflutungssituationen ist nicht vorgesehen die Befahrung der Verkehrswege mit privaten PKW zuzulassen. Vielmehr wird ein Sicherheitsabstand zwischen dem Wasserspiegel von ggf. umgebenden überfluteten Bereichen zu befahrbaren Verkehrswegen h_{SI} für den zivilen Personenverkehr von 0,5 m eingeführt. Dies wird als minimal tolerierbarer vertikaler Abstand zwischen dem Wasserstands-niveau von überfluteten Flächen und nicht überflutetem Verkehrsweg definiert. Die Forderung des Sicherheitsabstands ergibt sich aus dem Diskurs mit den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden. Der Wert von einem halben Meter ist an den in Baden-Württemberg empfohlenen Sicherheitszuschlag der Freibordbemessung angelehnt.

Die Empfehlungen für den Rettungsverkehr ergeben sich aus den experimentellen Untersuchungen sowie aus Überlegungen bezüglich der Wassertiefenzusammenstellungen (siehe Abb. 2.20). Bei der Festlegung der maßgebenden Grenzwerte wird das 5. Perzentil der Verteilung der Wassertiefen als Maßstab angesetzt. Bei einer Wassertiefe von 0,3 m sind 95% der in Abb. 5.2 aufgeführten Personenkraftwagen in der Lage zu waten (rote Linie). Auch kann davon ausgegangen werden, dass in den von den Fahrzeugherstellern angegebenen Werten ein Sicherheitsfaktor enthalten ist. Die Grenzwertfunktion für ($h_E = 0,3$ m konst.) für Personenkraftwagen ist in der Abb. 2.21 veranschaulicht.

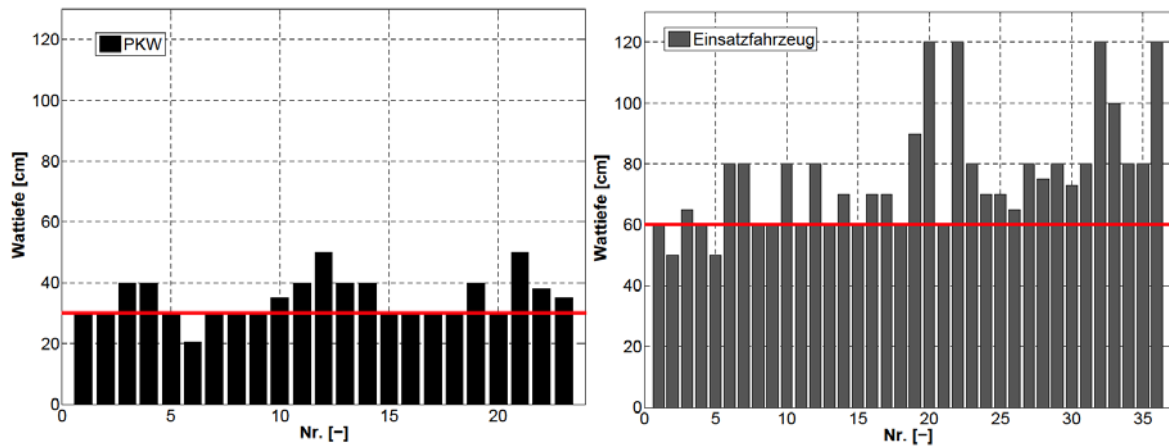


Abb. 2.20: Wattiefenzusammenstellung (PKW und Einsatzfahrzeug)

In der Abb. 2.21 sind außerdem die Stabilitätskurven aus den experimentellen Untersuchungen sowie zwei Gefahrenklassen (niedrige Gefährdung: grün, hohe Gefährdung: rot) und ein Übergangsbereich (blau) dargestellt. Die Differenzierung zwischen „niedriger Gefährdung“ und dem Übergangsbereich erfolgt anhand des bereits beschriebenen Grenzwertes der Wattiefe für Personenkraftwagen.

Der Übergangsbereich wird durch einen Aufschlag von 10 cm auf diesen Grenzwert definiert. Sobald Strömungszustände erreicht werden, die eine hohe Gefährdung von PKWs verursachen, sind die Verkehrswege keinesfalls mehr befahrbar. Eine analoge Vorgehensweise wird bei der Empfehlung des Grenzwertes für die Beurteilung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen für Einsatzfahrzeuge gewählt. Bei einer Wattiefe von 0,6 m sind ca. 95% der in der Wattiefenzusammenstellung (Abb. 2.20) aufgeführten Einsatzfahrzeuge im Hochwasserfall noch verkehrstauglich (rote Linie). Im Bereich zwischen $h = 0,6$ m und $h = 0,7$ m liegt wiederum der Übergangsbereich (Abb. 2.22).

Für die beiden getesteten Fahrzeugtypen Personenkraftwagen im Rettungsverkehr und Einsatzfahrzeug werden somit folgende maximale Grenzwerte für die Festlegung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen empfohlen:

- Personenkraftwagen (Rettungsverkehr): $h_E = 0,3$ m = konst.
- Einsatzfahrzeug: $h_E = 0,6$ m = konst.

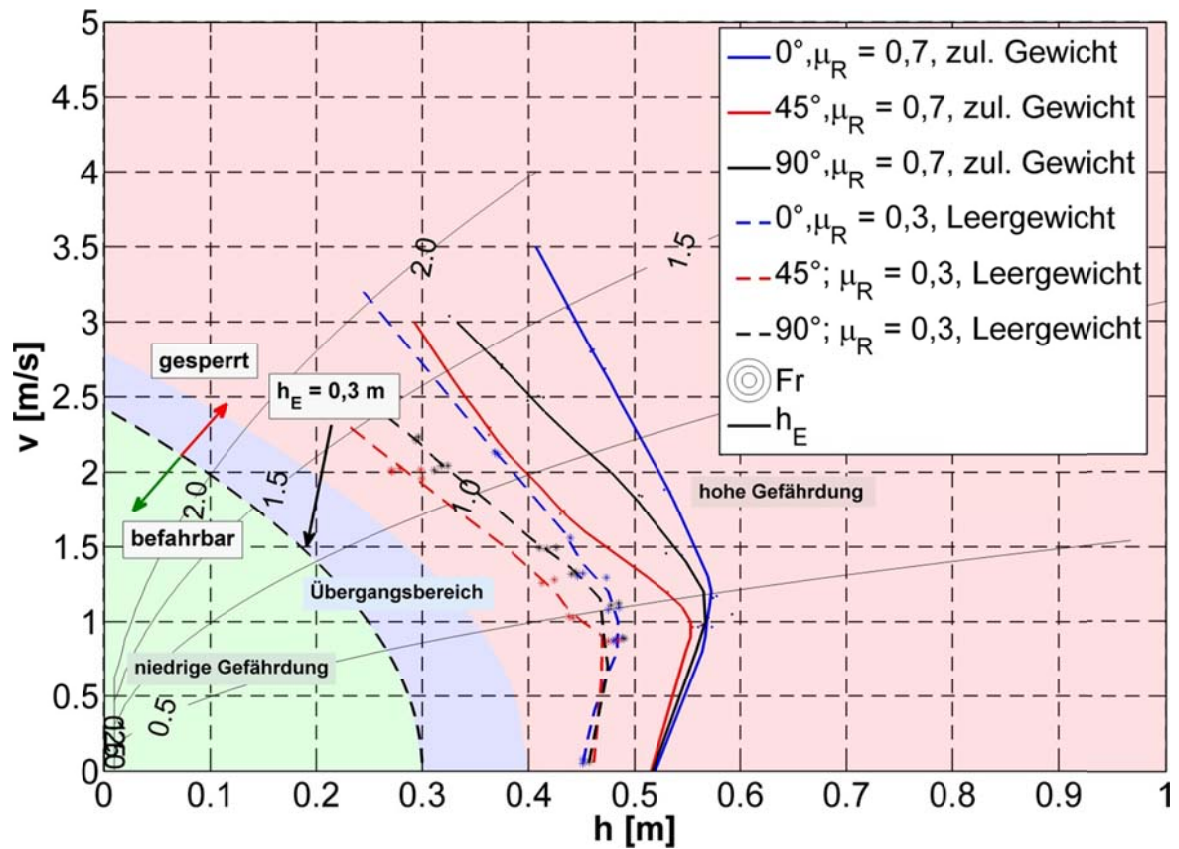


Abb. 2.21: Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Personenkraftwagen)

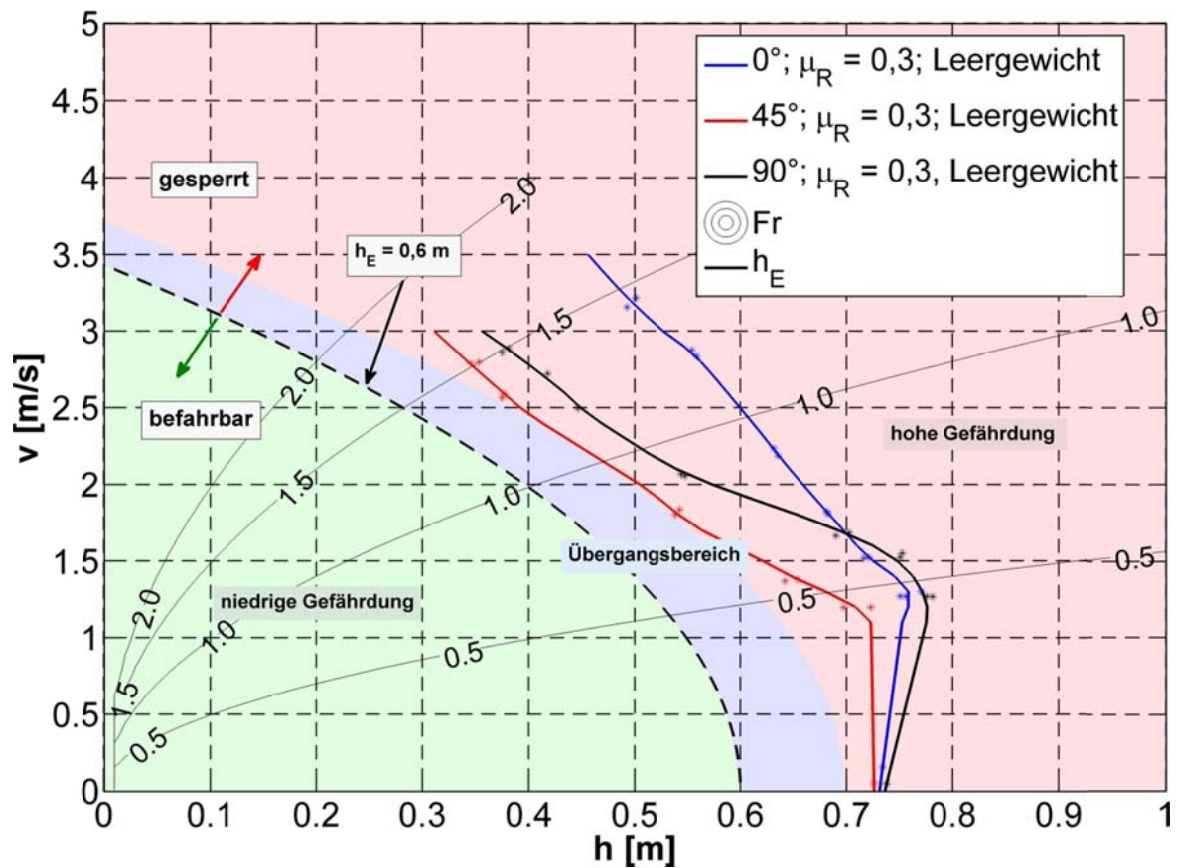


Abb. 2.22: Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Einsatzfahrzeug)

2.1.6.4 Zusammenfassung Fahrzeugstabilität in Strömungen

Das Ziel der Untersuchungen des Arbeitspaketes 5 „Verhalten von Fahrzeugen unter Strömungseinfluss“ besteht in der Definition von Grenzwerten für die Befahrbarkeit von Straßen für den Zivilverkehr und den Rettungsverkehr. Die zur Definition von Grenzwerten benötigten Parameter werden anhand von Modellversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau mit verschiedenen Fahrzeugtypen unter der Realität nachempfundenen hydraulischen Belastungen ermittelt.

Um den aktuellen Wissensstand bezüglich der Fahrzeugstabilität auf Überflutungsflächen zusammenzufassen und weiteren Forschungsbedarf zu identifizieren, wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. In den 1960er Jahren wurden an der Universität von New South Wales (Australien) die ersten Modellversuche bezüglich dieser Thematik durchgeführt. Außerdem wird aktuell an der Universität Cardiff zu der Thematik geforscht. Eine gängige Darstellung der Untersuchungsergebnisse erfolgt über sogenannte Stabilitätskurven, auf der Ordinate ist die kritische Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der kritischen Wassertiefe aufgetragen. Ein Wissensdefizit besteht insbesondere bezüglich der Stabilität von Einsatzfahrzeugen sowie der Kraftwirkung der Strömung auf Fahrzeugkörper bei unterschiedlichen Anströmpositionen.

Als Modellfahrzeuge werden der Volkswagen Golf sowie das Feuerwehrfahrzeug LF 10/6 als repräsentative Fahrzeugtypen ausgewählt und im Modell maßstäblich geometrisch ähnlich abgebildet. Bei der Erstellung der Versuchskörper wird die Achslastverteilung ebenfalls berücksichtigt. In den Untersuchungen werden Stabilitätsmessungen, Druckmessungen, Widerstandsmessungen und Auftriebskraftmessungen durchgeführt. Die Vielzahl der Untersuchungen ermöglicht eine Verifikation vorhandener Messergebnisse sowie die Berechnung von Stabilitätskurven unter veränderten Randbedingungen. Es zeigt sich, dass die größte Sensibilität hinsichtlich der Variation der Gewichtskraft des Fahrzeuges besteht, ein veränderter Reibungskoeffizient spielt nur bei größeren Froude-Zahlen eine Rolle.

Die ermittelten Stabilitätskurven beschreiben die Stabilität eines Fahrzeuges in Abhängigkeit der Parameter Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Anströmwinkel, Körperform und –gewicht sowie der Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn. Als generalisierter Parameter wird die Energiehöhe als Kriterium zur Beurteilung der Befahrbarkeit eingeführt. Hierdurch wird sowohl die Strömungssituation berücksichtigt als auch bautechnische Parameter (Höhe der Luftansaugung, Höhe der Lichtmaschine und Zündung, usw.) in die Beurteilung der Verkehrstauglichkeit einbezogen. Da die Energiehöhe im statischen Zustand der Wassertiefe entspricht, können die Werte aus der Wassertiefenzusammenstellung direkt übernommen werden.

Somit wird ein für die Praxis sehr einfach handhabbarer Parameter zur Verfügung gestellt.

Für den zivilen Personenverkehr wird ein Sicherheitsabstand zwischen dem Wasserspiegel von ggf. umgebenden überfluteten Bereichen zu befahrbaren Verkehrswegen eingeführt. Dies wird als minimal tolerierbarer vertikaler Abstand zwischen dem Wasserstands-niveau von überfluteten Flächen und dem nicht überflutetem Verkehrsweg definiert. Die Forderung des Sicherheitsabstands ergibt sich aus dem Diskurs mit den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden. Somit werden folgende Grenzwerte für die Beurteilung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen für den Rettungsverkehr und Zivilverkehr empfohlen:

- Zivilverkehr:
 - Sicherheitsabstand: $h_{Si} = 0,5 \text{ m}$
- Rettungsverkehr
 - Personenkraftwagen: $h_E = 0,3 \text{ m} = \text{konst.}$
 - Einsatzfahrzeug: $h_E = 0,6 \text{ m} = \text{konst.}$

Für die Anwendung der Untersuchungsergebnisse in den Projektgebieten wird eine Schnittstelle zwischen den hydraulischen Modellen (Hydro-AS, MIKE 21) und einem Verkehrsmodell (VISUM) bzw. einem Hochwassermanagementsystem (FLIWAS) entwickelt, die die Informationen aus dem hydraulischen Modell (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Sicherheitsabstand) zu jedem modellierten Zeitschritt mit den Informationen aus den physikalischen Modellversuchen koppelt und daraus einen zeitabhängigen Befahrbarkeitsstatus ermittelt und ausgibt. Anhand dieser zeitabhängigen Information wird die Entwicklung von Katastrophenschutzplänen verbessert bzw. die Identifizierung von eventuellen Schwachstellen in bestehenden Katastrophenschutzplänen ermöglicht. In Zusammenarbeit mit den anderen Arbeitspaketen wird durch die getätigten Untersuchungen bzw. die erarbeiteten Parameter eine Übertragbarkeit der Methodik auf andere Projektgebiete sichergestellt.

2.1.7 Modellierung und Optimierung verkehrlicher Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen (AP6)

2.1.7.1 Gekoppeltes Verkehrs- und Hydraulikmodell

Ziel des Forschungsprojektes ist es, durch eine Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen einen Beitrag zum besseren Krisenmanagement im Extremfall zu liefern. Am Beispiel realer Standorte werden durch die Anwendung der Simulation und Optimierung Evakuierungsszenarien für den Notfall entwickelt.

In dem Teilvorhaben „Modellierung und Optimierung verkehrlicher Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen“ am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik geht es dabei um die verkehrliche Simulation. Zur Abbildung der Evakuierungsverkehrsströme wird ein Simulationstool entwickelt. Abb. 2.23 zeigt die Einbettung der Verkehrsmodellierung in die Struktur des gekoppelten Verkehrs- und Hydraulikmodells.

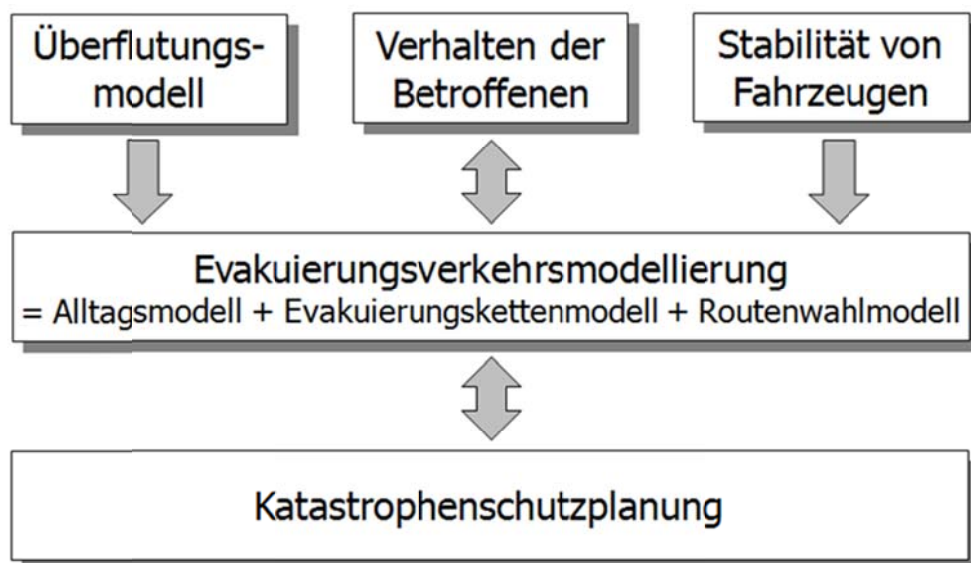


Abb. 2.23: Komponenten und Aufbau des gekoppelten Verkehrs- und Hydraulikmodells

Mit einem hydrologischen Modell (AP 2 und 3) wird die räumliche Ausbreitung des Wassers nachgebildet. Aus den modellierten Daten werden für die Verkehrsmodellierung im Evakuierungsfall zwei Informationen berechnet:

1. Überflutungsintensität einer Verkehrszelle

Im Verkehrsmodell wird jeder Verkehrszelle im Überflutungsgebiet eine von vier Intensitätsklassen zugeordnet, die den höchsten während der Katastrophe zu erwartenden Grad der Überflutung angibt. Die Einstufung erfolgt in Abhängigkeit der Parameter Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit. Aus der Intensitätsklasse

wird die Gefährdung der sich in dem betreffenden Gebiet aufhaltenden Personen abgeleitet. Abhängig von dieser Gefährdung erfolgt die Entscheidung über eine Evakuierung der Bewohner der betrachteten Zelle.

2. Befahrbarkeitsstatus von Modellstrecken

Für jeden 15-Minuten-Zeitschritt wird bestimmt, ob eine Strecke im Modell noch befahrbar ist oder ob die Überflutung bereits so stark ist, dass die Strecke für den Verkehr gesperrt werden muss. Die Bestimmung des Befahrbarkeitsstatus erfolgt durch einen Abgleich der Überflutungskenngrößen Wassertiefe, Anströmwinkel und Fließgeschwindigkeit aus dem Hydraulikmodell (AP 3) mit Grenzwerten, die im Rahmen der Stabilitätsuntersuchung von Fahrzeugen (AP 5) ermittelt werden. Dabei wird zunächst die Befahrbarkeit für den zivilen Verkehr geprüft. Hier werden aus Sicherheitsgründen nicht die Stabilitätsgrenzen der Fahrzeuge sondern der Überflutungsstatus der Straßen als Entscheidungskriterium angesetzt. Ist eine Straße beinahe oder bereits überflutet, ist sie für den Zivilverkehr nicht mehr frei gegeben. Für die Entscheidung über die Befahrbarkeit für den Einsatzverkehr werden die im Rahmen von AP 5 ermittelten Stabilitätsgrenzen der beiden betrachteten Fahrzeugtypen Pkw und Einsatzfahrzeug angesetzt. Im Evakuierungsverkehrsmodell werden während der Modellierung die Strecken für die Verkehrssysteme freigegeben, die bei der aktuellen Überflutungslage laut Befahrbarkeitsstatus die Strecke befahren dürfen. Für alle anderen Verkehrssysteme ist die Strecke gesperrt.

Neben den hydraulischen Daten dienen auch Ergebnisse der soziologischen Untersuchungen in AP 4 als Eingangsdaten für das Evakuierungsverkehrsmodell. Anhand von Befragungen und einer Literaturanalyse werden typische Verhaltensweisen von Personen während Evakuierungen bestimmt. Diese Verhaltensweisen werden im Evakuierungsverkehrsmodell nachgebildet. Folgende Aspekte sind dabei von Bedeutung:

- Art und Reihenfolge von Aktivitäten, die im Evakuierungsfall von Evakuierenden unternommen werden
- Befolungsraten
- Dauer, die die Vorbereitung auf die Evakuierung in Anspruch nimmt
- Verkehrsmittel und Besetzungsgrad für die Evakuierungsfahrt
- Unterschiede im Verhalten zwischen Personen mit verschiedenen sozio-ökonomischen Eigenschaften (Alter, Familienstand, Berufstätigkeit, etc.)
- Verhalten in der Nähe des Evakuierungsgebiet lebender, jedoch nicht direkt betroffener Personen

Die beschriebenen Eingangsgrößen fließen in die Modellierung des Evakuierungsverkehrs ein. Dadurch kann der Evakuierungsablauf realistisch nachgebildet werden. In Kapitel 2.1.7.2 wird das Evakuierungsverkehrsmodell näher beschrieben. Anhand der Ergebnisse der Verkehrsmodellierung können im Rahmen der Katastrophenschutzplanung geeignete Maßnahmen zur Beschleunigung des Evakuierungsablaufs entwickelt werden. Die Wirksamkeit der Maßnahmen werden mit Hilfe des Verkehrsmodells getestet und quantifiziert.

2.1.7.2 Evakuierungsverkehrsmodellierung

Das für die Darstellung der Evakuierung angewendete Verkehrsmodell umfasst die drei Teilmodelle Alltagsverkehrsmodell, Evakuierungskettenmodell und Routenwahlmodell. Bei den beiden erstgenannten Modellteilen handelt es sich um aktivitätskettenbasierte Agentenmodelle auf mikroskopischer Ebene. Die Umsetzung der Berechnung erfolgt in der Programmiersprache vba und wird mittels eines excelbasierten Makros durchgeführt.

Das entwickelte Tool bietet die Möglichkeit, durch Änderung der Eingangsparameter unterschiedliche Evakuierungsszenarien zu simulieren. Veränderbare Variablen sind dabei beispielsweise die Tageszeit, zu der die Evakuierung stattfindet, der Befolgungsgrad der Betroffenen sowie die Verkehrsmittelwahl. Im Folgenden werden die drei Teilmodelle vorgestellt.

Alltagsverkehrsmodell

Mit dem Alltagsverkehrsmodell werden die alltäglichen Aktivitäten der Personen des betrachteten Untersuchungsgebietes nachgebildet. Für jede in Bad Reichenhall lebende Person wird ein Agent mit einer ID im Modell erzeugt, dem, entsprechend dem Familienstand und der Erwerbstätigkeit der Person, eine Personengruppe zugeordnet wird. Für jeden Agenten wird ein Wohnort sowie die Pkw- und Rad-Verfügbarkeit festgelegt. Für einen Tag erhalten die Agenten Aktivitätsketten, die Informationen über Art, Ort, Reihenfolge und Aktivitätendauern enthalten. Außerdem wird berechnet, mit welchem Verkehrsmittel die einzelnen Aktivitäten aufgesucht werden.

Als Eingangsdaten liegen folgende Daten vor:

- Verkehrsnetz
- Verkehrsnachfrage des überörtlichen Verkehrs
- einwohnerbezogene Daten
- Strukturdaten des betrachteten Untersuchungsgebietes Bad Reichenhall
- verkehrliche Verhaltensdaten für den Alltag

Die Berechnungen erfolgen zeitdynamisch minutengenau, so dass im Ergebnis für jeden definierten Zeitpunkt der Aufenthaltsort und die Aktivität jedes Agenten ermittelt

werden kann. Diese Information wird für den Zeitpunkt des Evakuierungsbeginns an das Evakuierungskettenmodell übergeben, da vom Aufenthaltsort und der Aktivität zu Beginn der Evakuierung die Reaktion der Betroffenen auf den Evakuierungsaufwurf abhängt.

Evakuierungskettenmodell

Wie im Alltag werden auch im Evakuierungsfall die Aktivitäten der betroffenen Agenten in Abhängigkeit von ihrer Personengruppenzugehörigkeit ermittelt. Der Ort der Aktivitäten und das verwendete Verkehrsmittel für die Fahrt zwischen den Aktivitätenorten werden berechnet. Auch die Zeiten, zu denen die Aktivitäten durchgeführt werden, werden minutengenau bestimmt.

Mittels der Überflutungsintensitäten aus dem Hydraulikmodell können das Evakuierungsgebiet abgegrenzt und betroffene, dort lebende Agenten, identifiziert werden. Auf Basis von Erkenntnissen aus den soziologischen Untersuchungen werden Verhaltensparameter für die Personengruppen in Evakuierungssituationen abgeleitet und im Modell bei der Wahl der Aktivitäten oder der Verkehrsmittelwahl im Evakuierungsfall angewendet.

Ausgabegröße des Evakuierungskettenmodells sind Nachfragematrizen, die die Anzahl aller Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen während der Evakuierung enthalten. Die Matrizen beziehen sich auf vom Nutzer definierte Zeiteinheiten. Im Fall von Bad Reichenhall werden die Ortsveränderungen in 15-Minuten Intervallen übergeben.

Das Alltagsmodell und das Evakuierungskettenmodell sind rechentechnisch nicht miteinander gekoppelt und daher einzeln ausführbar. Die Verkehrsnachfragematrizen werden als mtx-Dateien gespeichert, die sich für die Modellierung der Routenwahl in die verwendete Modellierungssoftware VISUM einlesen lassen.

Routenwahlmodell

Das Routenwahlmodell schließt sich an das Evakuierungskettenmodell an. Es handelt sich um ein zeitdynamisches, makroskopisches Verfahren. Die mit dem Evakuierungskettenmodell berechneten Verkehrsmatrizen, die alle Ortsveränderungen während der Evakuierung, in Zeitschritten unterteilt, enthalten, werden in die Verkehrsmodellierungssoftware VISUM eingelesen. Mittels eines dynamisch-stochastischen Umlegungsverfahrens werden die Ortsveränderungen nach bestimmten Kriterien auf das Verkehrsnetz übertragen. Die stochastische Komponente im gewählten Umlegungsverfahren bezieht sich auf eine zufällige Abweichung des Routenwiderstandes vom deterministischen Wert. Damit wird der Schätzfehler von Verkehrsteilnehmern, der einer unvollständigen Kenntnis der aktuellen Verkehrslage geschuldet ist, über Routenwiderstände simuliert.

Bei der Routensuche werden nur die Straßen berücksichtigt, die zum betrachteten Zeitpunkt noch nicht überflutet sind. Die Informationen über das verfügbare Straßennetz werden mittels des Befahrbarkeitsstatus übergeben (siehe Kapitel 2.1.7.1).

Die Umlegung liefert im Ergebnis für jede Straße im Modell eine Belastung. Aus dem Verhältnis von Belastung und Kapazität einer Modellstrecke, der Auslastung, können Aussagen über den Verkehrsfluss oder ggf. Überlastungen der Straße abgeleitet werden. Darüber hinaus kann die Routenwahl aller Verkehrsteilnehmer während der Evakuierung nachvollzogen werden.

2.1.7.3 Anwendung im Projektgebiet Bad Reichenhall

Das beschriebene Evakuierungsverkehrsmodell wird für das Projektgebiet Bad Reichenhall angewendet. Dabei wird eine Evakuierung der Stadt Bad Reichenhall simuliert. Folgende, die Evakuierung beeinflussende, Faktoren werden dabei variiert:

1. Lage der sicheren Orte als Ziel von Evakuierungsfahrten
 - Lage außerhalb des Stadtgebietes
 - Lage innerhalb des Stadtgebietes
 - Lage außerhalb und innerhalb des Stadtgebietes
2. Straßensperrungen an unterschiedlichen Stellen im Netz aufgrund von Unfällen
 - Sperrung der B21 nördlich von Bad Reichenhall
 - Sperrung der Wittelsbacherstraße im Stadtzentrum auf Höhe Spielbank
 - Sperrung der Berchtesgadener Landstraße als östlich der Stadt gelegene Umfahrungsmöglichkeit
3. Evakuierung zu unterschiedlichen Tageszeiten (vormittags und nachts)
4. Verkehrliche Maßnahme: Umleitung des Durchgangsverkehrs
5. Kombinationen aus den genannten Maßnahmen
 - Kombi1: Straßensperrung Wittelsbacherstraße und Umleitung des Durchgangsverkehrs
 - Kombi2: Straßensperrung der B21 und der BGL4

Neben dem Verkehrsaufkommen, das durch die Einwohner Bad Reichenhalls erzeugt wird, wird die Verkehrsnachfrage weiterer in Abb. 2.24 dargestellter Verkehrsteilnehmer in der Modellierung berücksichtigt:

- Außen-/Durchgangsverkehr
Verkehrsströme, die nicht von Bewohnern Bad Reichenhalls unternommen werden und weder in Bad Reichenhall beginnen noch enden. Durchgangsverkehr bezeichnet die Fahrten aus dieser Menge, die durch das Stadtgebiet von Bad Reichenhall hindurch führen.
- Touristenverkehr

Fahrten von in Bad Reichenhall untergebrachten Touristen

- Pendlerverkehr

Fahrten von Personen, die außerhalb von Bad Reichenhall wohnen und zum Arbeiten oder für Erledigungen in die Stadt hinein fahren.

Im Ergebnis der Modellierung unterschiedlicher Szenarien kann die Veränderung im Evakuierungsablauf aufgrund von variierenden Einflussfaktoren und verkehrlichen Maßnahmen quantifiziert werden. Für alle Szenarien wird von einem Extremhochwasser (HQ₁₀₀₀) ausgegangen. Um im Modell das stärkste zu erwartende Verkehrsaufkommen zu erzielen, werden die Abfahrtszeiten der Evakuierenden stark gebündelt. Dies ist durch kurze Vorwarnzeiten zu erreichen. Für die in EvaSim zu berechnenden Szenarien wird daher eine Vorwarnzeit von 60 Minuten gewählt.

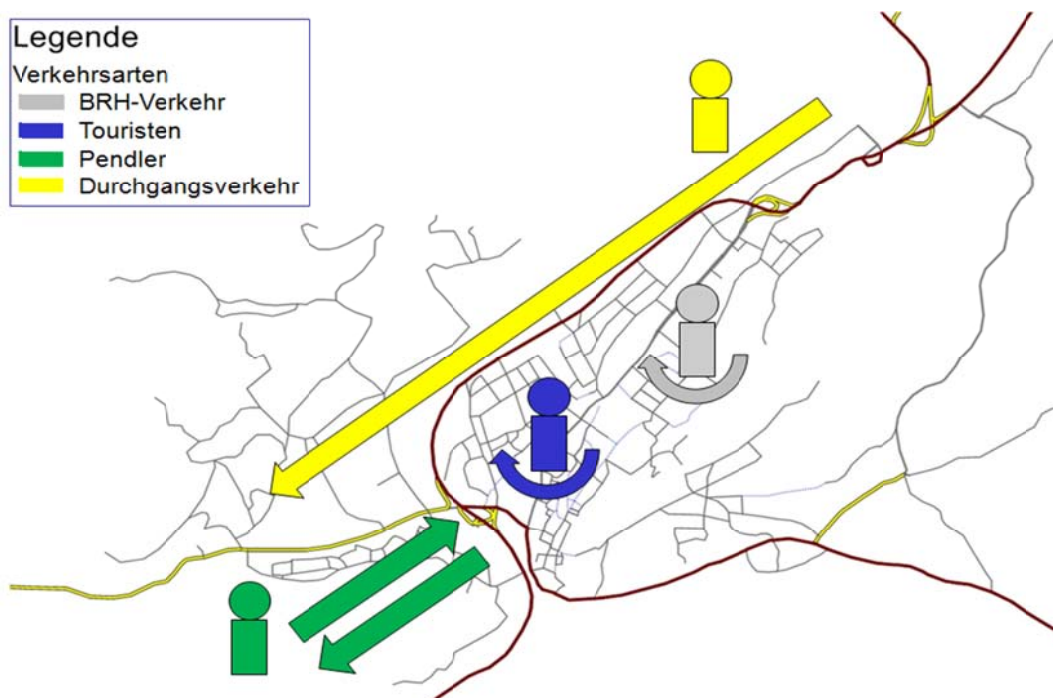


Abb. 2.24: Modellierte Verkehrsnachfragegruppen im Verkehrsmodell Bad Reichenhall

Für alle Szenarien wird eine Evakuierung am Vormittag angenommen. Der Einfluss der Tageszeit auf den Evakuierungsablauf wird durch die Variation der Uhrzeit des Evakuierungsbeginns deutlich. Der Aufenthaltsort zu Beginn der Evakuierung ist abhängig von der Tageszeit. Beginnt die Evakuierung vormittags, halten sich nur 45% der 2.500 Betroffenen in ihren Wohnungen im Evakuierungsgebiet auf. Die restlichen Bewohner unternehmen eine Aktivität außerhalb des Evakuierungsgebietes. Nachts beträgt der Anteil der Bewohner, die zu Hause sind, hingegen 100%. Vom aktuellen Aufenthaltsort hängt die Reaktion auf den Evakuierungsaufruf ab. Müssen viele Bewohner zu Beginn der Evakuierung erst nach Hause fahren, verzögert dies den Evakuierungsprozess.

Neben den Bewohnern müssen auch Personen evakuieren, die sich zu Evakuierungsbeginn im Evakuierungsgebiet aufhalten, dort jedoch nicht wohnen. Für Bad Reichenhall besteht dieses Problem nachts nicht. Kein außerhalb des Evakuierungsgebietes lebender Bad Reichenhaller hält sich zu dieser Zeit dort auf. Am Vormittag hingegen müssen neben den Einwohnern auch 600 Bürger Bad Reichenhalls evakuieren, die außerhalb des Evakuierungsgebietes leben, dort jedoch zu Evakuierungsbeginn einer Aktivität nachgehen.

Die unterschiedlichen Aktivitäten und Aufenthaltsorte zu Evakuierungsbeginn in den beiden Szenarien spiegeln sich in der Vorbereitungsdauer wider. In Abb. 2.25 sind die benötigten Vorbereitungsauern für die beiden untersuchten Zeiträume aufgetragen. Nachts haben ein Fünftel der Bewohner, die den Evakuierungsaufruf befolgen, ihre Vorbereitung bereits nach 10 Minuten abgeschlossen. Vormittags hingegen beginnen die Ersten erst nach ca. 15 Minuten zu evakuieren. Die mittlere Vorbereitungsdauer beträgt vormittags 38 Minuten, während es nachts nur 28 Minuten sind. Zu Beginn der Überflutung, 60 Minuten nach dem Evakuierungsaufruf, haben nachts bereits 97% der Evakuierenden den Weg zum sicheren Ort angetreten. Vormittags beträgt dieser Anteil 89%. 136 evakuierungswillige Einwohner Bad Reichenhalls haben zu Beginn der Überflutung die Evakuierungsfahrt noch nicht angetreten.

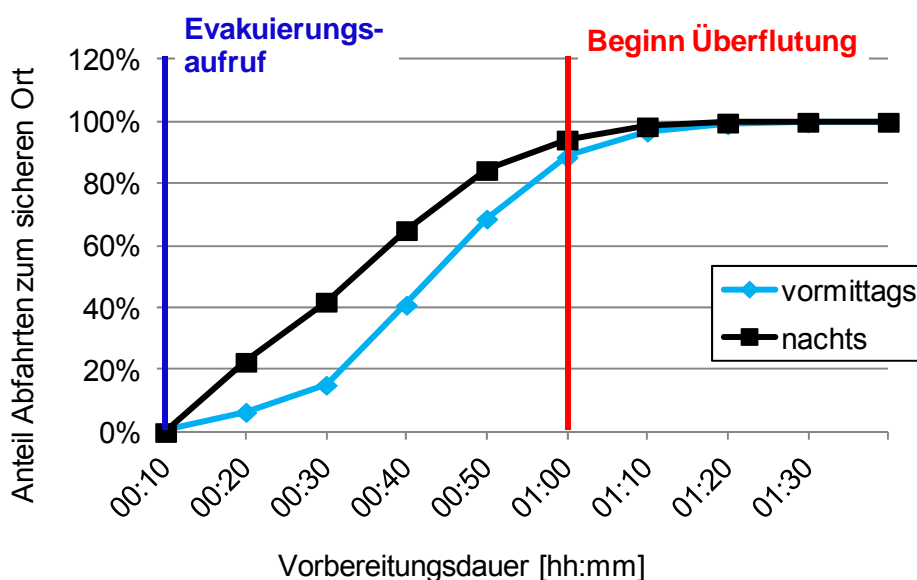


Abb. 2.25: Kumulierte Verteilung der Vorbereitungsauern von Evakuierenden zu verschiedenen Tageszeiten

Aus den kürzeren Vorbereitungsauern in der Nacht resultiert eine zeitigere Ankunft am sicheren Ort und damit eine kürzere Evakuierungsdauer, wie Abb. 2.26 verdeutlicht. Darüber hinaus wird durch ein niedrigeres Durchgangsverkehrs-

aufkommen nachts der Evakuierungsverkehr weniger behindert als am Tag. Es gibt weniger Engpässe im Netz, wie Abb. 2.27 zeigt. Auch dies führt zu einer kurzen Evakuierungsdauer in der Nacht.

Neben der Tageszeit beeinflusst auch die Lage der sicheren Orte die Evakuierungsdauer in Bad Reichenhall. Da die Evakuierungsfahrten in der Stadt beginnen, ist die Entfernung und damit die Fahrzeit zu den sicheren Orten im Stadtgebiet Bad Reichenhall (Szenario „Sichere Orte – io“) geringer als im Szenario „Sichere Orte – außerorts“ (ao). Noch kürzer wird die Fahrzeit und damit die Evakuierungsdauer im Szenario „Sichere Orte – innerorts und außerorts“. Bad Reichenhaller, die ihre Evakuierungsfahrt nicht im Stadtzentrum beginnen, können die sicheren Orte außerhalb der Stadt aufsuchen, wenn der Weg dorthin kürzer ist als zu den innerstädtischen sicheren Orten.

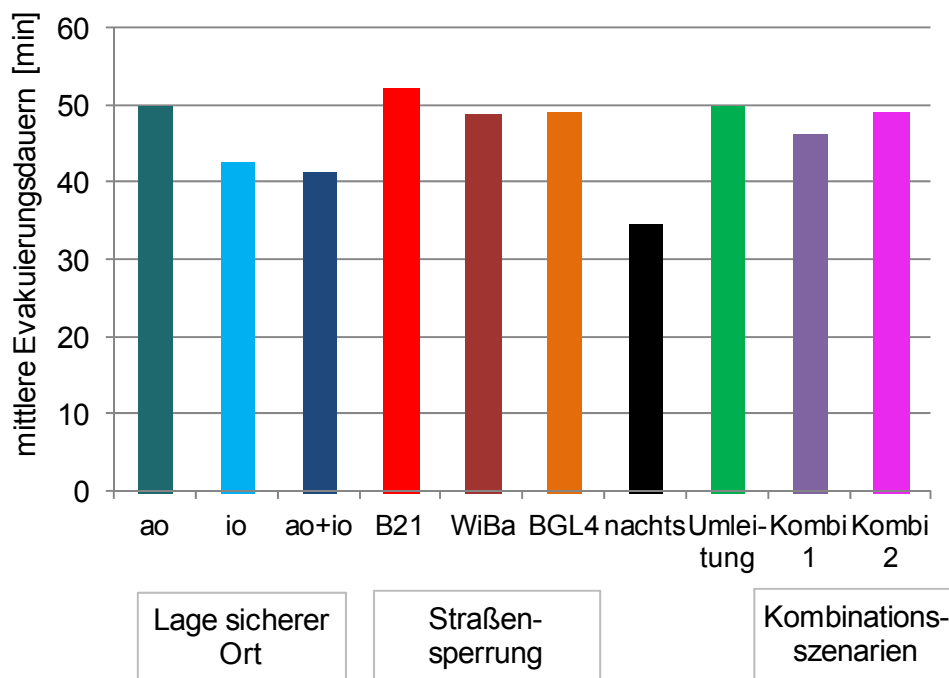


Abb. 2.26: Mittlere Evakuierungsdauern je Szenario

Im Szenario „Umleitung“ hat die Umleitung des Durchgangsverkehrs auf die Evakuierungsdauer hingegen nur einen geringen Einfluss. Die Evakuierenden können zwar schneller das Stadtgebiet von Bad Reichenhall verlassen, da es hier nur zu wenigen Engpässen kommt (Abb. 2.27). Diese Zeitersparnisse werden jedoch außerhalb der Stadt durch Behinderungen durch den umgeleiteten Durchgangsverkehr wieder kompensiert.

In Szenarien mit Straßensperrungen stehen sowohl dem Durchgangsverkehr als auch dem Evakuierungsverkehr weniger Routenalternativen zur Verfügung. Der Verkehr bündelt sich auf den befahrbaren Routen. Daher kommt es in diesen Szenarien häufiger zu Überlastungen im Straßennetz, wie Abb. 2.27 zeigt. Dies hat

jedoch wenig Einfluss auf die Evakuierungsdauer. Im Modell suchen die Evakuierenden bei Straßensperrungen den sicheren Ort auf, den sie in dieser Situation am schnellsten erreichen. Durch die relativ hohe Anzahl sicherer Orte unterscheiden sich die Fahrzeiten zu dem alternativen sicheren Ort und zu dem ohne Sperrung gewählten sicheren Ort nicht wesentlich.

Als weiteres Ergebnis der Berechnung wird die Verkehrslage für jeden Zeitschritt und jedes Szenario in Karten ausgegeben. Abb. 2.28 zeigt dies beispielhaft für das Szenario „Sperrung B21“ für den Zeitraum 15-30 Minuten nach dem Evakuierungsaufwurf am Vormittag. Die verschiedenen Farben zeigen die Auslastung auf den einzelnen Streckenabschnitten an. Übersteigt die Auslastung die Kapazität, ist die Straße überlastet, es kommt zu Engpässen. Die Auslastung liegt in diesem Fall über 100%.

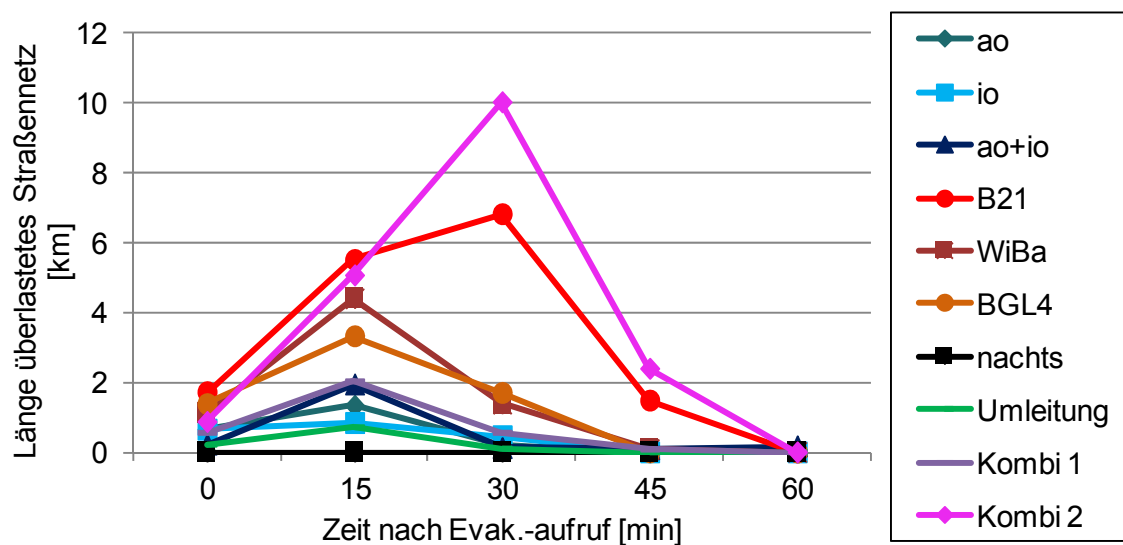


Abb. 2.27: Länge des überlasteten Straßennetzes nach dem Evakuierungsaufwurf

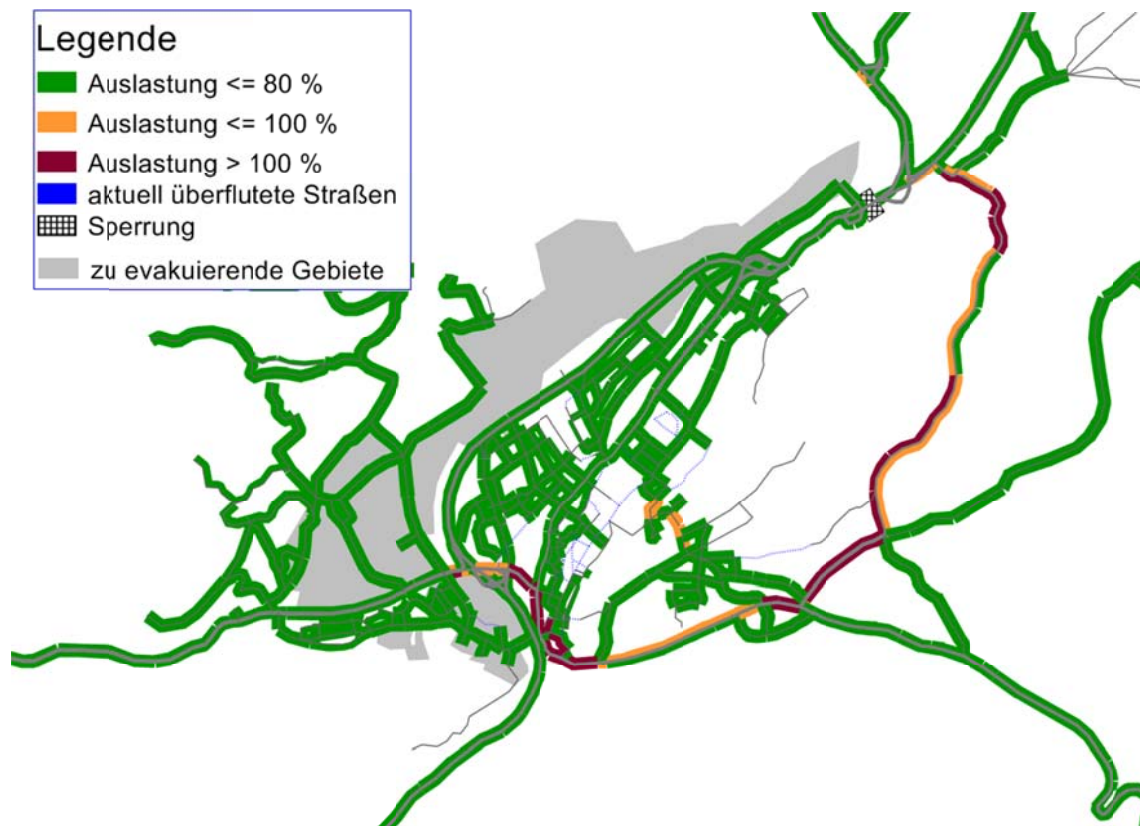


Abb. 2.28: Beispiel für eine Auslastungskarte im Szenario "Sperrung B21"

2.1.8 Katastrophenschutzplanung (AP7)

Ziel des Arbeitspakets 7 ist die Bereitstellung eines Systems zur Optimierung von Evakuierungsmaßnahmen auf Grund extremer hydrologischer Ereignisse, der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur und den soziologischen Randbedingungen. Das Ergebnis dynamischer Simulation, d. h. die zeitlichen Veränderungen unterworfenen Mobilität der einer Gefährdungssituation ausgesetzten Bevölkerung in dem betrachteten Gebiet, ist Grundlage für die Erstellung der Katastrophenschutzpläne, um die zur Verfügung stehenden Einsatzkräfte möglichst effektiv einsetzen zu können. Die zeitliche Dynamik ist hierbei eine besondere Herausforderung bei der Optimierung der Evakuierungsmaßnahmen, da z. B. das zeitlich variable Überfluten und Trockenfallen von Straßen besondere Lenkungsmaßnahmen und Evakuierungsstrategien erfordern.

Die aus den Simulationen des Hochwasserabflusses und der Verkehrssituation resultierenden Ergebnisse werden durch GIS-gestützte Analysewerkzeuge interpretiert und als Basisinformation für Einsatztaktik und Ressourcenplanung und das operationelle Hochwassermanagement verwendet (Wieprecht, 2009).

2.1.8.1 Grundlagen und Stand der Technik

2.1.8.1.1 Alarm- und Einsatzpläne zur Hochwasserabwehr

Der Hochwasserschutz im „normalen“ Hochwasserfall ist fast flächendeckend entwickelt. Bis zu einem 100-jährlichen Hochwasserereignis sind Siedlungen, Gewerbe und Infrastruktureinrichtungen in der Regel durch technische Hochwasserschutzanlagen wie Deiche, Schutzmauern, Rückhaltebecken oder mobile Elemente, bzw. durch Reaktivierung von Retentionsräumen, geschützt.

Für die Abwehr von Gefahren, die durch Hochwasser oder bei Versagen von Einrichtungen des Hochwasserschutzes drohen, sind die Kommunen und Gemeinden zuständig. Diese erstellen in Absprache mit der Wasserwirtschaftsverwaltung auf Grundlage von Hochwassergefahrenkarten, bzw. ausgewerteten vergangenen Hochwasserereignissen, Alarm- und Einsatzpläne. Die Länder geben den ausführenden Behörden von Zeit zu Zeit Leitfäden oder Orientierungshilfen für die Erstellung von Hochwassereinsatzplänen an die Hand, wie beispielsweise das Umweltministerium in Baden-Württemberg (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2006).

Eine Weiterentwicklung in diesem Bereich sind Hochwassermanagementsysteme wie z. B. INGE – Interaktive Gefahrenkarte für den kommunalen Hochwasserschutz oder FLIWAS – Flut-Informations- und Warnsystem. Mit diesen Systemen ist es möglich, den Entscheidungsträgern die zur Gefahrenabwehr benötigten Informationen schnell und unkompliziert bereitzustellen.

2.1.8.1.2 Hochwassermanagementsystem FLIWAS

Als Konsequenz aus den Erfahrungen zurückliegender Hochwasserereignisse wird seit 2004 im Rahmen des EU-Projektes „NOAH“ /1/ ein IuK-System zum Hochwasser- und Katastrophenschutz mit der Bezeichnung FLIWAS (Flut- Informations- und Warnsystem) entwickelt. Die deutschen Partner sind die Hochwasserschutzzentrale Köln und für das Bundesland Baden-Württemberg das Regierungspräsidium Karlsruhe.

Aufgabe von FLIWAS ist es, im Hochwasserfall für Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz die benötigten Informationen schnell und bedarfsgerecht bereit zu stellen. Hierzu werden bestehende Daten und Informationsdienste in FLIWAS eingebunden sowie neue Möglichkeiten des Informationsaustausches verwirklicht.

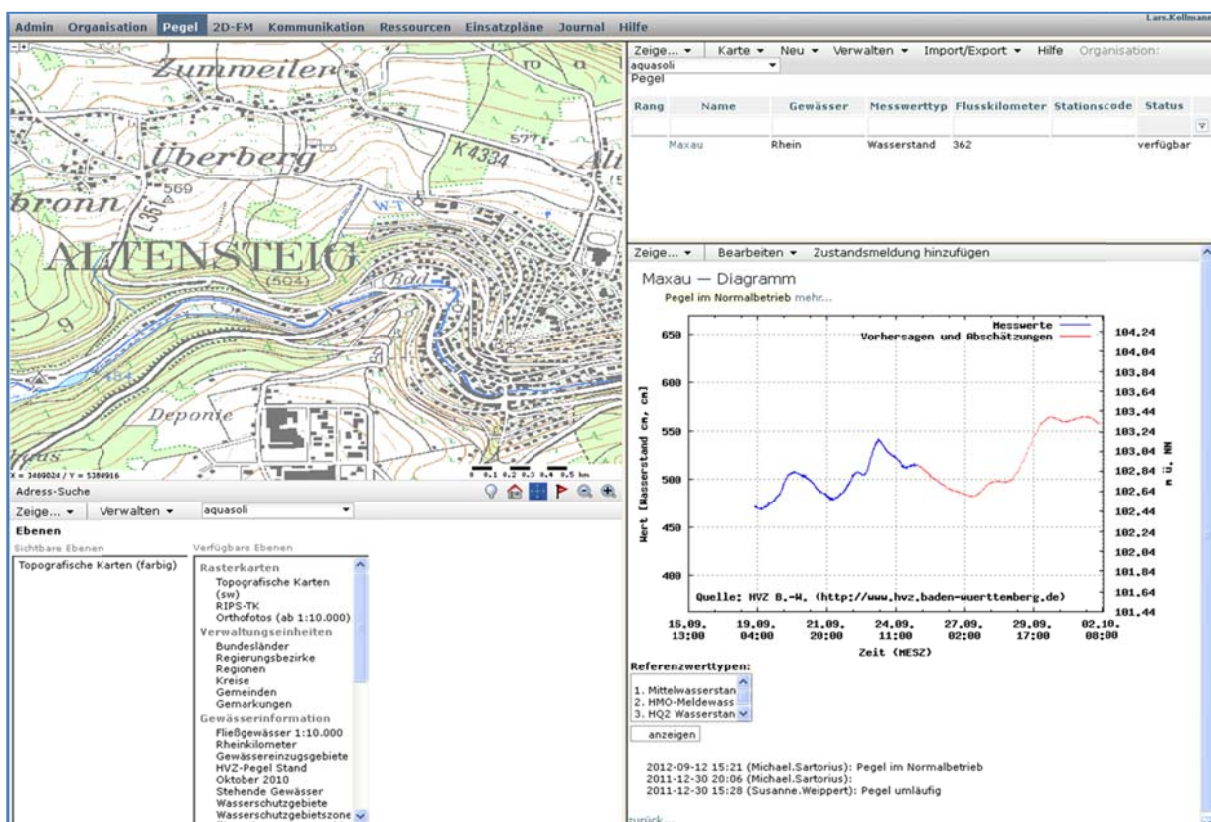


Abb. 2.29 FLIWAS Benutzeroberfläche (Version 2.3)

FLIWAS wurde 2008 in Baden-Württemberg landesweit eingeführt. Bis heute wird das Hochwassermanagementsystem ständig weiterentwickelt und jährlich ein neues Versionsupdate zur Verfügung gestellt.

2.1.8.2 Projektgebiete

Im Rahmen des EvaSim Projektes werden zwei Untersuchungsgebiete mit verschiedenen hydraulischen Lastfällen definiert.

Das Projektgebiet „Nagold“ umfasst in erster Linie die Nagoldtalsperre in Baden-Württemberg. Sie entspricht nach der Klassifizierung nach DIN 19700 einer Talsperre der Klasse I und ist eingebettet in einem 650 ha großen Landschaftsschutzgebiet im Schwarzwald mit einem Einzugsgebiet von 39 km². Die nächst größere Stadt ist in 10 km Entfernung die Stadt Altensteig an der Nagold mit ca. 11.000 Einwohnern.

Das Projektgebiet „Bad Reichenhall“ liegt in Bayern im Landkreis Berchtesgadener Land. Der zu betrachtende Raum umfasst die Kommune Bad Reichenhall. Das Gewässersystem wird im Wesentlichen durch die Saalach (Gewässer 1. Ordnung) und den Seebach (ein Abfluss aus dem Thumsee) bestimmt. In die Saalach münden eine Vielzahl von Wildbächen mit Einzugsgebieten unter 10 km².

2.1.8.3 Hydraulische Lastfälle

Für beide Untersuchungsgebiete werden je zwei Hochwasserszenarien entwickelt:

Untersuchungsgebiet Nagold

Die Szenarien der Nagold beschreiben zum einen den Versagensmechanismus an einer Schwachstelle im Dammkörper, aufgrund dessen es zum Wasseraustritt und zu Sickerströmungen, bis hin zum teilweisen Kollaps der Dammkrone kommt und zum anderen ein durch Überströmen der Dammkrone verursachtes (Teil-) Versagen der Talsperre.

Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall

Für das Gebiet Bad Reichenhall wird als ein Szenario ein Sturzflutereignis im Einzugsgebiet des Seebachs definiert. Das zweite Szenario beschreibt ein aufgrund lang anhaltender und intensiver Niederschläge resultierendes Hochwasserereignis der Saalach. Für die Erstellung des Hochwasser Alarm- und Einsatzplans, bzw. des Katastrophenschutzplans, werden Ereignisse von HQ₁₀₀ bis hin zu HQ_{extrem} mit unterschiedlichen Dammbuchsenzenarien simuliert.

2.1.8.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die aus den hydraulischen Simulationen des AP 3 resultierenden Ergebnisse werden über eine Schnittstelle im Shape-Format zur Verfügung gestellt. In Verbindung mit einer georeferenzierten topographischen Karte des Untersuchungsgebiets ist es somit möglich, das Überschwemmungsgebiet in seiner Ausbreitung mit der Verteilung der Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe darzustellen. Dadurch erhält man erste Erkenntnisse, wie sich das Überschwemmungsgebiet darstellt und welche Bebauungen, bzw. Infrastruktureinrichtungen betroffen sind. Eine Aussage über die Gefährdung der Objekte und dessen Bewohner kann jedoch noch nicht getroffen werden.

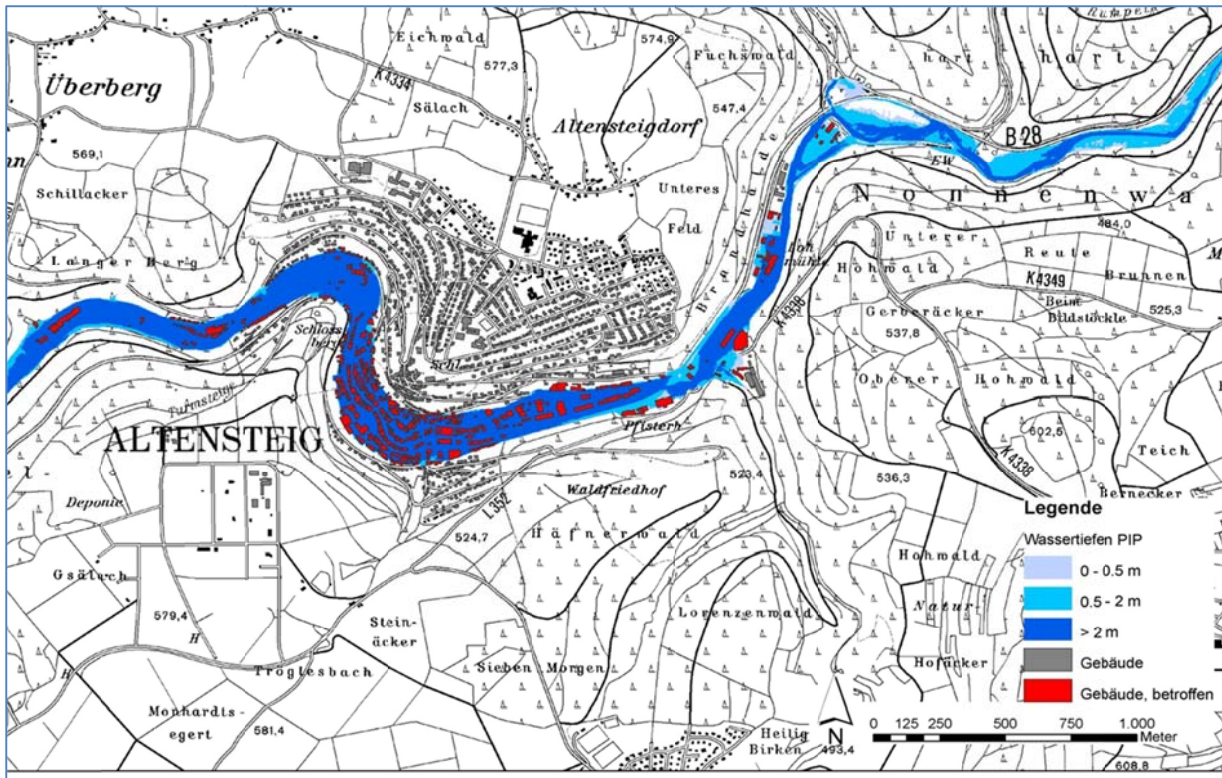


Abb. 2.30 Überschwemmungsgebiet Altensteig - Lastfall überströmte Dammkrone mit Breschenbildung

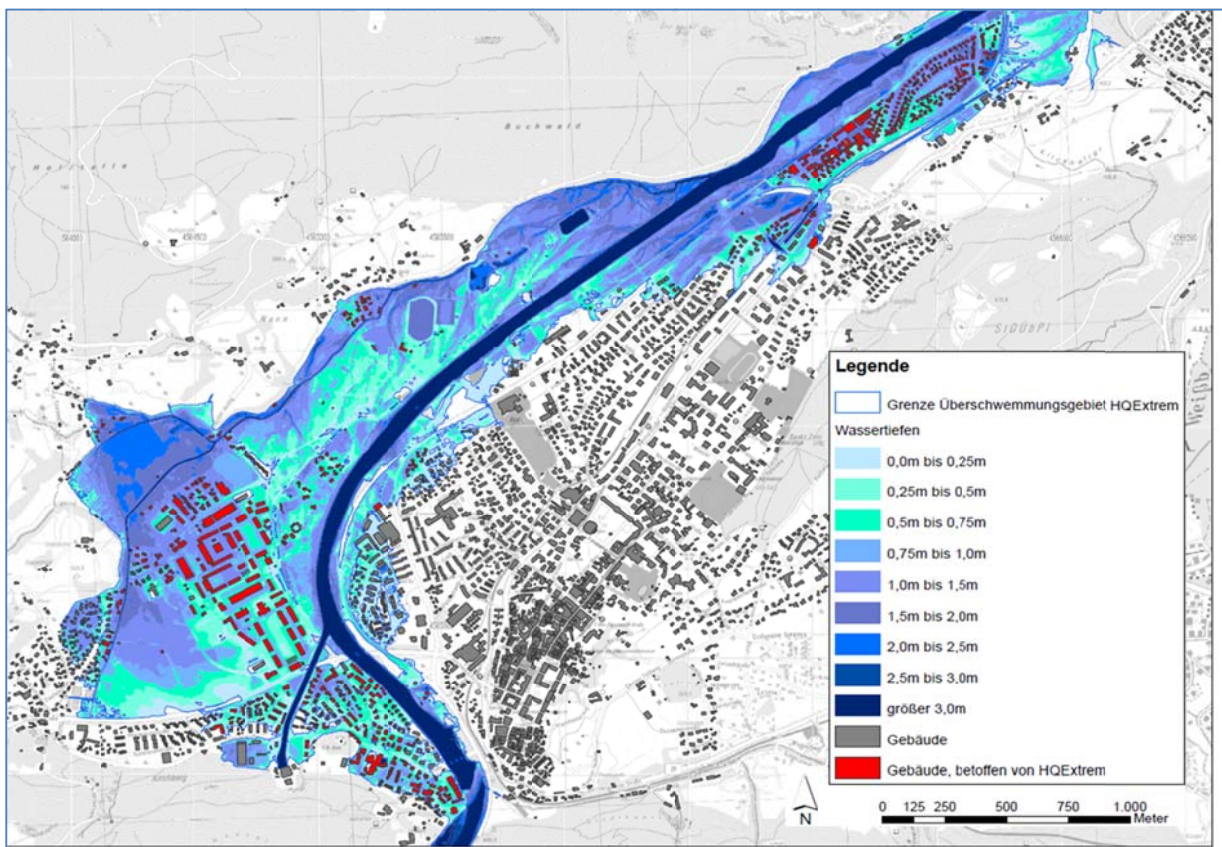


Abb. 2.31 Überschwemmungsgebiet Bad Reichenhall – Lastfall HQ_{extrem}

Um eine weiterführende Gefährdungsanalyse durchzuführen, werden zunächst die hydraulisch belasteten Objekte, Versorgungs- und Infrastruktureinrichtungen, aber auch die für die Hochwasserabwehr und für notwendige Evakuierungsmaßnahmen hydraulisch unbelasteten Objekte in einer Datenbank erfasst und klassifiziert.

Die Klassifizierung wird über die Schutzklasse „normal“ bzw. „hoch“ definiert. Diese differenzierte Betrachtungsweise ist erforderlich, um den Handlungsbedarf und die Schutzbedürftigkeit des jeweiligen Objektes zu ermitteln. Im Folgenden sind die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale aufgeführt, die die Schutzklasse „hoch“ von „normal“ unterscheidet:

- Objekte, die besonders schutzbedürftig sind und für die keine selbständige Evakuierung möglich ist (z. B. Krankenhaus, Kindergarten, Altersheim),
- Objekte, die für Evakuierungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung sind (z. B. Sammelstellen, öffentliche, med. Einrichtungen),
- Objekte, von denen im Hochwasserfall Gefahren ausgehen (z. B. Tankstellen, Umspannwerk, Gewerbe mit wassergefährdenden Stoffen),
- Objekte, die für Evakuierungsrouten von großer Bedeutung sind (z. B. Brücken Hauptverbindungsstraßen),
- Objekte, die dem Hochwasserschutz dienen (z. B. Dammbalken, Pumpwerke, Deiche, HW-Mauern).

Für die Objekte der Schutzklasse „hoch“ bestehen individuelle Auslösebedingungen von durchzuführenden Maßnahmen, in Abhängigkeit der unmittelbaren hydraulischen Belastung, bzw. der Erreichbarkeit im Hochwasserfall.

Für die Objekte der Schutzklasse „normal“ wird die Intensitätsklassifizierung nach dem Schweizer Modell definiert.

Tab. 2.5 Intensitätsklassifizierung nach „Schweizer Modell“

Intensitätsklasse	Grenzen	Gefahrenmerkmale	Ereignis
3 [stark]	$hw \geq 2,0 \text{ m}$ oder $q = v \cdot hw \geq 2,0 \text{ m}^2/\text{s}$	· Menschen innerhalb Gebäude stark gefährdet · Plötzliche Gebäudezerstörung möglich	· Gebäude ist betroffen · Evakuierung des Gebäudes
2 [mittel]	$2,0 > hw > 0,5 \text{ m}$ oder $2,0 \text{ m}^2/\text{s} > q = v \cdot hw > 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	· Menschen außerhalb von Gebäuden stark, innerhalb kaum gefährdet	· Gebäude ist betroffen · Bewohner ereignisbezogen informieren, Sensibilisierung
1 [schwach]	$hw \leq 0,5 \text{ m}$ oder $q = v \cdot hw \leq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	· Menschen außerhalb von Gebäuden kaum gefährdet, Sachschäden an Gebäuden	
0	keine Überflutung	keine Gefährdung	Gebäude ist nicht betroffen

Objekte der Intensitätsklasse 0 bis 2 werden für durchzuführende Evakuierungsmaßnahmen nicht berücksichtigt. Bewohner von Objekten der Intensitätsklasse 3 werden zur Evakuierung aufgerufen oder müssen bei Immobilität durch Einsatzkräfte evakuiert werden.

Der Arbeitsablauf zur Gefährdungsbeurteilung der gefährdeten Objekte lässt sich folgendermaßen schematisch darstellen:

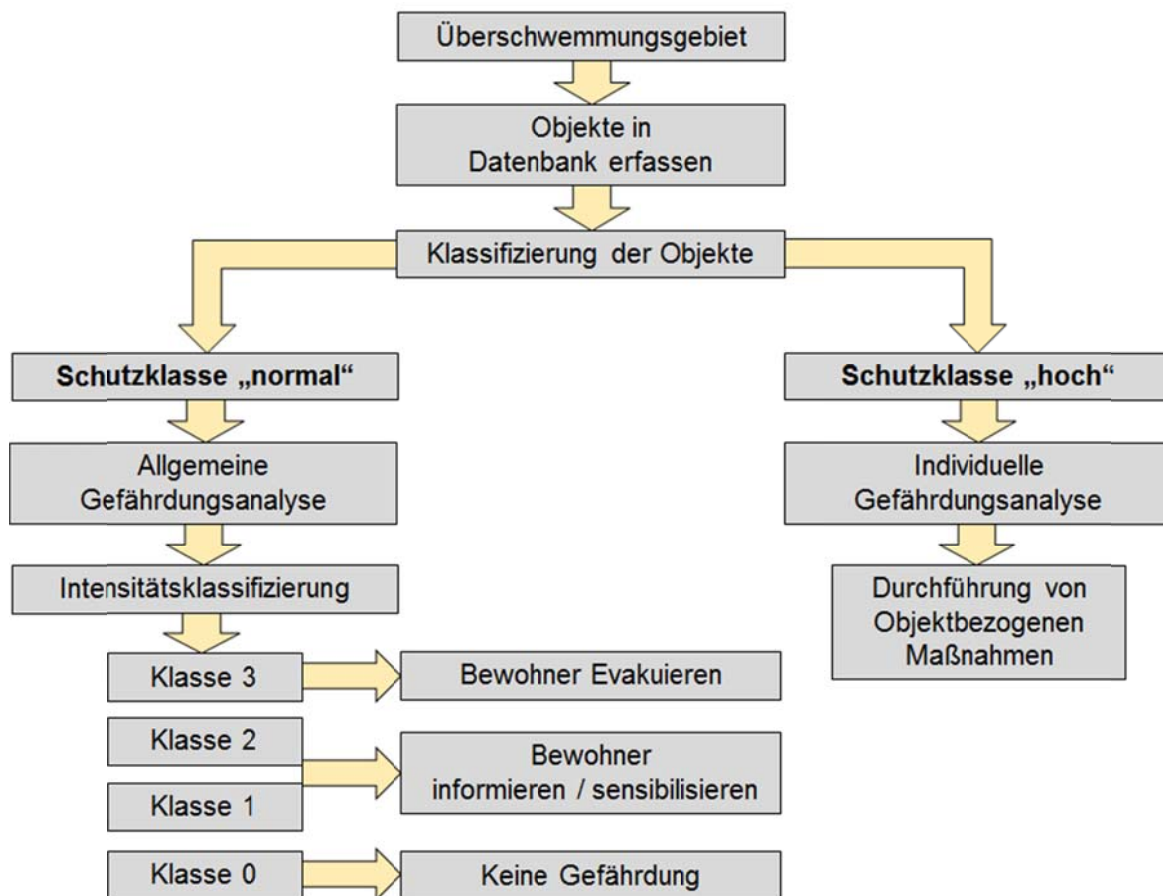


Abb. 2.32 Darstellung des Arbeitsablaufes zur Gefährdungsbeurteilung

Bei der Evakuierung im Hochwasserfall sind aufgrund der geringen Zeitverfügbarkeit, der Einschränkungen im Verkehr und der begrenzten Ressourcenverfügbarkeit die zu evakuierenden Personen auf ein Minimum zu beschränken. Das Überflutungsmodell liefert für die Zielsetzung „Minimaler Evakuierungsaufwand“ die entscheidenden Informationen durch eine gebäudescharfe Gefährdungsanalyse. Es wird vorausgesetzt, dass zum einen nur Gebäude zu räumen sind, die durch Strömungsbelastung einzustürzen drohen oder aufgrund von Überflutungen die Flucht innerhalb des Gebäudes nicht möglich ist und zum anderen Gebäude der Schutzklasse „hoch“, bei denen bereits bei geringer hydraulischer Belastung eine Aufrechterhaltung von zwingend erforderlichen Versorgungseinrichtungen nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Abb. 2.33 zeigt eine Darstellung der Intensitätsklassenverteilung im Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall bei HQ_{extrem}

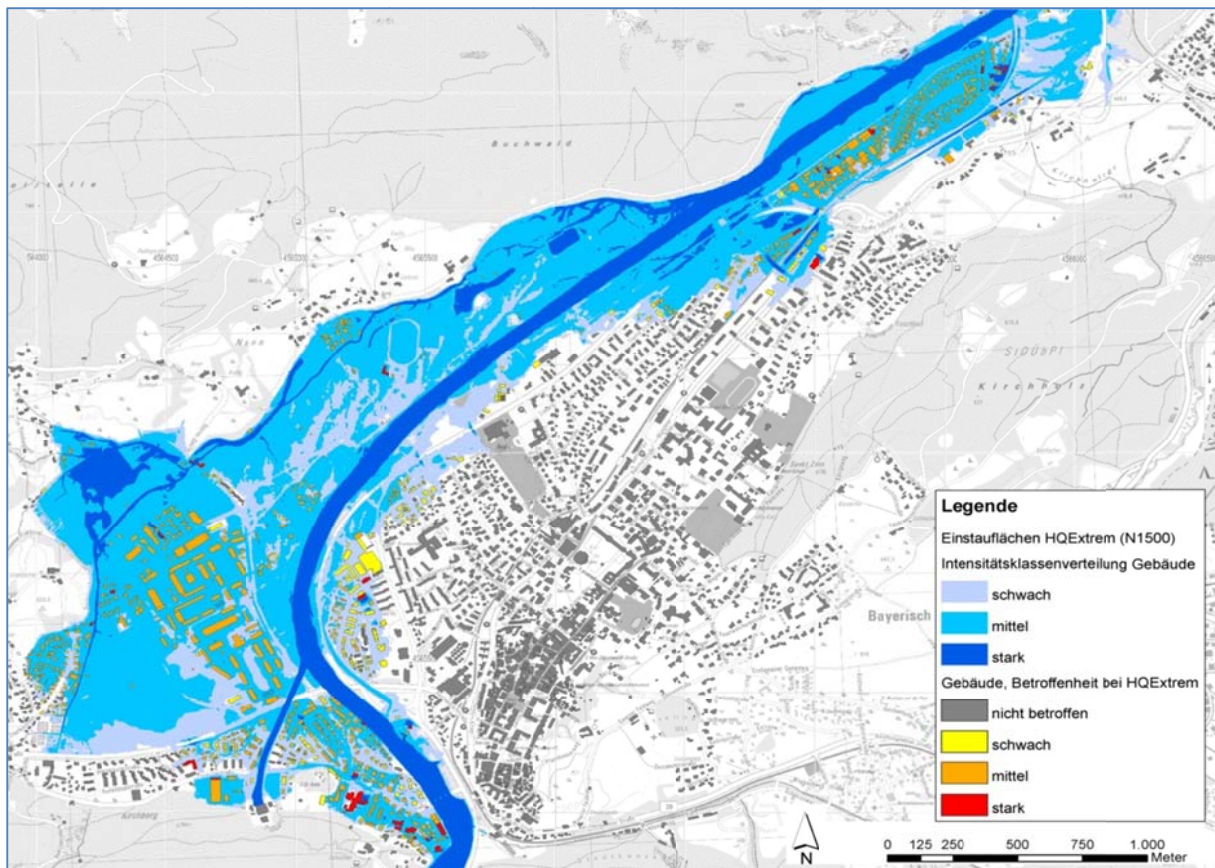


Abb. 2.33 Intensitätsklassenverteilung Bad Reichenhall

Neben der Gefährdungsbeurteilung der Objekte der Schutzklasse „normal“ und „hoch“ werden anhand von Verkehrsmodellierungen die Kapazitäten des Verkehrswegenetzes im Evakuierungsfall (Arbeitspaket 6) ermittelt. Hierfür werden die für den Evakuierungsfall erforderlichen Bewegungen im Individualverkehr, wie z. B. PKW's und Fußgänger simuliert.

Zusätzlich zu den hydraulischen Parametern gehen auch Untersuchungen der Soziologie in das Verkehrsmodell ein. Nur durch deren Beteiligung können wesentliche Informationen über das Verhalten der Bevölkerung in einer Extremsituation erlangt werden, die für die Modellierung des Verkehrsverhaltens eine wichtige Rolle spielen. Wie schnell tritt eine Person die Flucht an? Welches Verkehrsmittel wird zur Flucht gewählt? Wie viel Prozent flüchten gar nicht und benötigen dadurch gegebenenfalls Hilfe durch Einsatzkräfte.

Anhand von Befragungen und einer Literaturanalyse werden typische Verhaltensweisen von Personen während der Evakuierung bestimmt. Diese Verhaltensweisen werden im Evakuierungsverkehrsmodell nachgebildet und stellen für die Evakuierungsplanung eine geeignete Maßnahme zur Optimierung zur Durchführung des Evakuierungsablaufes dar.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Durchführung einer Evakuierung, ist der Kenntnisstand zum Befahrbarkeitsstatus von Verkehrswegen. Im Allgemeinen sind hydraulisch belastete Verkehrswege für den Zivilverkehr grundsätzlich nicht nutzbar.

In Abhängigkeit der Attribute Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit wird die zeitabhängige Kapazität jeder Strecke des Verkehrsmodells angepasst. Die Hydrauliksimulation gibt daher zum einen, einen zeitabhängigen Befahrbarkeitsstatus von Evakuierungsrouten für den Zivilverkehr und zum anderen, unter Berücksichtigung der Grenzwerte der Stabilität von Einsatzfahrzeugen unter Strömungsbelastung, einen Aufschluss über die Befahrbarkeit von überfluteten Verkehrswegen für Einsatzkräfte.

Die Ausgabe zum Befahrbarkeitsstatus von Verkehrswegen erfolgt in 4 Kategorien:

- Sicherheitsabstand (Freibord) der Straße mind. 50 cm
→ *frei befahrbar für alle Verkehrsteilnehmer*
- Sicherheitsabstand (Freibord) der Straße zwischen 50 und 0 cm
→ *frei befahrbar für Einsatzkräfte, für Zivilverkehr gesperrt*
- Straße hydraulisch belastet → Energiehöhe ≤ 30 cm
→ *frei befahrbar für Einsatzkräfte, für Zivilverkehr gesperrt*
- Straße hydraulisch belastet → Energiehöhe > 60 cm
→ *unpassierbar*

Die Befahrbarkeit der einzelnen Verkehrswege stellt sich für ein Teilgebiet in Bad Reichenhall folgendermaßen dar:

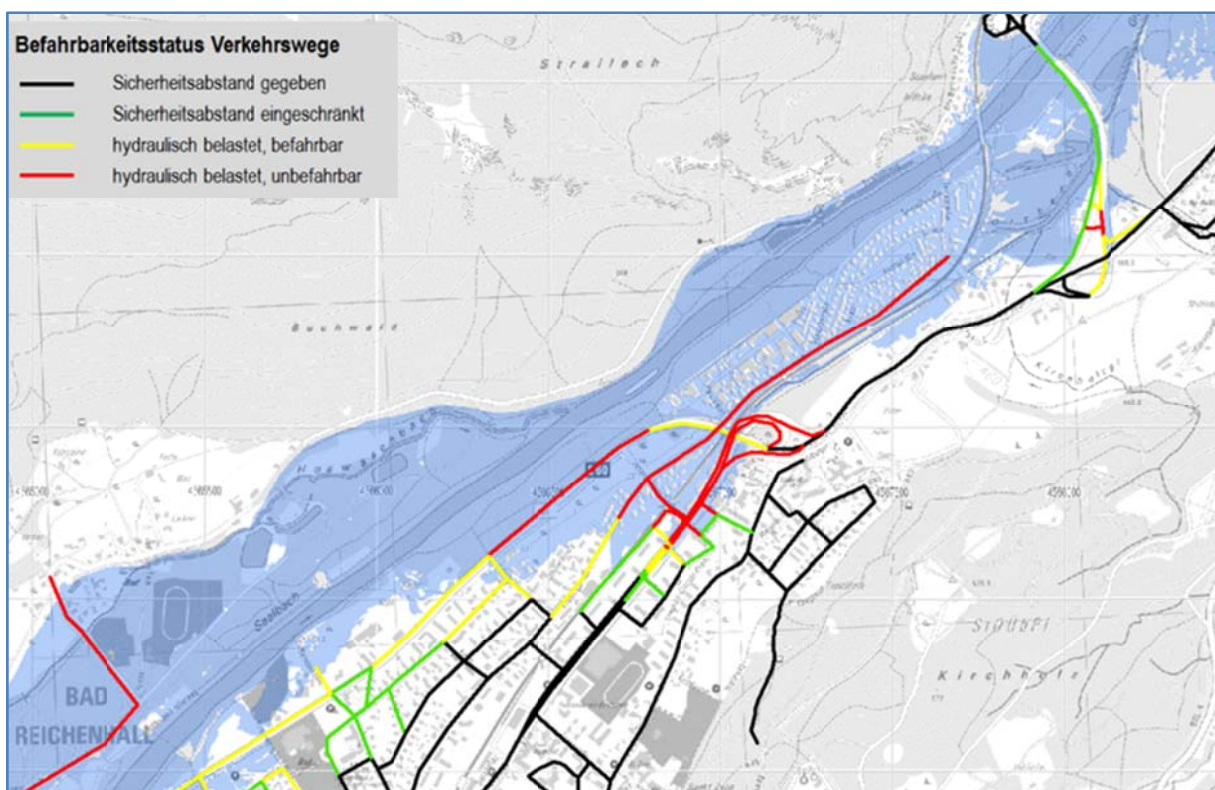


Abb. 2.34 Befahrbarkeitsstatus Verkehrswegenetz Bad Reichenhall bei HQ_{extrem}

Durch Erkenntnisse aus der Verkehrsmodellierung kann das Routenwahlverhalten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Überflutungsszenarien überprüft und die Fluchtwegpläne im Evakuierungsfall optimiert werden.

2.1.8.5 Katastrophenschutzplanung

Die zuvor beschriebenen Simulationen der Überflutungsflächen und des Verkehrsflusses werden durch Programmschnittstellen automatisiert und anschaulich aufbereitet an das GIS-gestützte Hochwassermanagementsystem FLIWAS übergeben.

Durch ein im Rahmen von EvaSim entwickeltes Analyseprogramm, wird für betroffene Objekte ein Status bezüglich der hydraulischen Belastung ermittelt. Für Objekte der Schutzklasse „normal“ werden die hydraulischen Belastungen entsprechend der Intensitätsklassifizierung unterschieden.

Die Auswertung der Überflutungsszenarien für Bad Reichenhall, unter Berücksichtigung des Belastungsstatus für Objekte der Schutzklasse „normal“ zeigen, dass ein großer Teil dieser Objekte während der Überflutung einen sicheren Aufenthalt ermöglichen und kein Evakuierungsbedarf besteht (siehe Abb. 2.33)

Auf Grundlage der oben beschriebenen Informationsbereitstellung und der objektdifferenzierten Betrachtung, werden folgende Analysen und Informationsaufbereitungen in den Untersuchungsgebieten durchgeführt:

- *Gefährdungsbeurteilung von Gebäuden und Objekten:*

Unter Berücksichtigung der Wassertiefe und der Fließgeschwindigkeit (Intensitätsklassifizierung), erfolgen individuelle und nutzungsspezifische Gefährdungsbeurteilungen. Dabei wird zwischen Objekten der Schutzklasse „normal“ und der Schutzklasse „hoch“ unterschieden. Alle hochwassergefährdeten Objekte werden in einer zentralen Datenbank verwaltet.

- *Erfassung der erforderlichen Maßnahmen zur Hochwasserverteidigung:*

Auf Grundlage der hydraulischen Simulation werden zum einen Schwachstellen oder Überlastungen an bestehenden Hochwasserschutzanlagen aufgezeigt und zum anderen strategisch wichtige Interventionslinien ermittelt.

- *Erfassung beeinträchtigter oder gestörter Verkehrswegebeziehungen:*

Für das gesamte Verkehrsnetz wird der Befahrbarkeitsstatus unter Berücksichtigung der 4 Kategorien ermittelt (siehe Abb. 2.34)

- *Ermittlung des Ressourceneinsatzes:*

Die zur Hochwasserabwehr benötigten Ressourcen (wie Material, Personal, Geräte nach Zeit und Dauer) werden ermittelt und verschiedenen Depots bzw. Institutionen zugeordnet.

- *Bestimmung des Evakuierungsbedarfs:*

Erfordert die Gefährdungsbeurteilung im Hochwasserfall eine Evakuierung, kann die Anzahl der zu evakuierenden Personen auf Grundlage der zentralen Datenbank abgeschätzt werden. Zusätzlich werden die Routen zwischen Evakuierungsgebiet und Sammelstelle auf die Befahrbarkeit überprüft.

- *Zeitabhängige Priorisierung von Einsatzmaßnahmen in der Gefahrenabwehr und im Evakuierungsfall*

Die im Forschungsvorhaben „EvaSim“ eingesetzten Instrumente und Werkzeuge stellen die Datengrundlage für das webbasierte Hochwasser- und Katastrophenmanagementsystem FLIWAS dar. Die Ergebnisse können über eine interaktive graphische Programmoberfläche zur Lagebeurteilung, zur Gefahrenabwehr und zur Durchführung von Evakuierungsmaßnahmen verwendet werden.

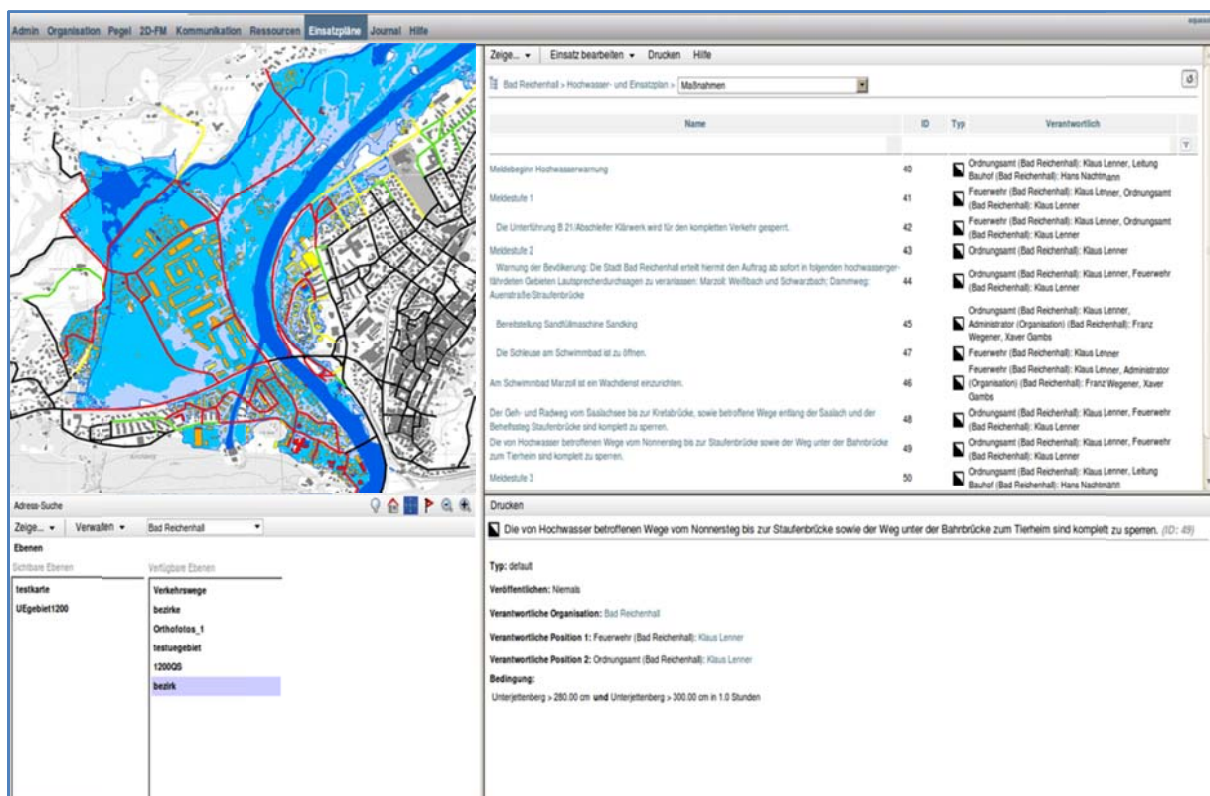


Abb. 2.35 Benutzeroberfläche FLIWAS für den Hochwassereinsatz- und Katastropheneinsatzplan der Stadt Bad Reichenhall

Unterlagen wie Alarmpläne und Meldelisten sind in das Hochwassermanagementsystem FLIWAS implementiert und können autorisierten Benutzern zentral zur Verfügung gestellt werden. Das Hochwassermanagementsystem FLIWAS ermöglicht, für simulierte Szenarien wie

z. B. Versagen von wasserbaulichen Anlagen, steigenden Pegelständen oder für Unwetterwarnungen Auslösekriterien für Einsatzmaßnahmen zu definieren. FLIWAS enthält hierzu eine automatisierte Übernahme von Pegelständen mit Datenfernübertragung.

2.1.8.6 Fazit

Die Simulation von Hochwasserereignissen, vom Niederschlagsereignis bis hin zum Überflutungsszenario, ermöglicht, zusammen mit einem gekoppelten Verkehrsmodell, das die Identifizierung von Verkehrsquellen und -zielen, sowie den Befahrbarkeitsstatus von Verkehrswegen berücksichtigt, die Bereitstellung eines Planungswerkzeugs für eine optimierte Evakuierung. Mit dem Hintergrundwissen um das Verhalten der Bevölkerung bei Evakuierungsaufforderungen und die Fahrstabilität von Fahrzeugen auf überfluteten Verkehrswegen wird damit eine präzise Steuerung sowohl des Zivilverkehrs, als auch der Einsatzkräfte bei Evakuierungsmaßnahmen möglich.

Ergebnisse sind neue, innovative Hochwassereinsatz- und Katastrophenschutzpläne für den gezielten und effektiven Ressourceneinsatz. Es wird ein auf die Software FLIWAS abgestimmtes EDV gestütztes Managementsystem entwickelt. Dieses ist im kommunalen Hochwasserschutz zukünftig für kleine Hochwasserereignisse bis hin zu Katastrophenereignissen anwendbar und stellt einen durchgängigen, zuständigkeitsübergreifenden Informationsfluss sicher.

Bereits der Aufbau dieses Hochwassermanagementsystems liefert wichtige Erkenntnisse über mögliche Hochwassergefährdungen und -schadenspotentiale und sensibilisiert Entscheidungsträger für geeignete Abwehrstrategien und Vorsorgemaßnahmen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Rahmen dieses Vorhabens erhaltenen Mittel wurden wie geplant für die jeweiligen Einzelpositionen verwendet. Eine detaillierte Zusammenstellung findet sich im Verwendungsnachweis.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Kopplung von Simulationsmodellen verschiedenster Fachrichtungen (Hydrologie, hydraulisch numerische Modellierung, Verkehrssimulation, Soziologie) unter Einbezug von Ergebnissen physikalischer Modellversuche ist eine konsequente und durchgängige Methodik zur Verbesserung bestehender Katastrophenschutzpläne und wird im Rahmen des Forschungsprojektes EvaSim erstmalig in Deutschland an zwei beispielhaften Projektgebieten verwirklicht. Hiermit kann die Machbarkeit dieses Ansatzes, der von der Hydrologie des Einzugsgebietes bis hin zum operationellen Einsatz im Hochwasserfall reicht, aufgezeigt werden. Dieses Gebrauchsmuster steht nun für andere Projekte zur Verfügung.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans

Als universitäre Forschungseinrichtungen haben die beteiligten Lehrstühle der Universität Stuttgart keine direkten wirtschaftlichen Verwertungspläne. Durch die entwickelten Module für die Software VISUM und FLIWAS werden aber insbesondere die Verbundpartner DHI-WASY GmbH und Aquasoli GmbH in die Lage versetzt, zusammen mit ihren bisherigen und in EvaSim entwickelten Methoden auch Gemeinden und Behörden außerhalb der zwei Pilotprojekte eine umfassende Analyse und Optimierung der Katastrophenschutzpläne anzubieten. Bei der Entwicklung der Module für VISUM wird besonderer Wert darauf gelegt, dass sie nicht nur für die in EvaSim definierten Szenarien einsetzbar sind, sondern auf möglichst viele Arten von Hochwasser und Talsperrenversagen sowie andere Regionen übertragbar sind.

Die an dem Projekt beteiligten Lehrstühle haben innerhalb der Projektlaufzeit ihre Kompetenzen in den jeweiligen Fachbereichen unter besonderer Berücksichtigung des interdisziplinären Ansatzes erhöht. Ebenfalls wird durch den regen Austausch mit den beteiligten Behörden ein Bewusstsein für die praxisnahen Fragestellungen im operationellen Hochwasserschutz geschaffen. Diese Anregungen werden beispielsweise bei der Festlegung der Grenzwerte für die Befahrbarkeit von Straßen für den zivilen Personenverkehr berücksichtigt.

Nach dem Nachweis der grundsätzlichen Einsatzfähigkeit des entwickelten Gesamtsystems und der Auswertung erster Betriebserfahrungen in den beiden Pilotprojekten wird sich die Eigennutzung einzelner Komponenten in anderen Anwendungen anschließen. Es können allgemeine Erkenntnisse auf verschiedene Evakuierungssituationen übertragen werden. Dies gilt beispielsweise für die aus den physikalischen Modellversuchen abgeleiteten Grenzwerte für die Befahrbarkeit von Verkehrswegen im Hochwasserfall sowie für die Relevanz von Informationen der gefährdeten Gruppen vor einem potentiellen Schadensereignis. Persönlichkeitsvariablen wie Selbstwertgefühl, Eigenkontrolle und Fatalismus spielen

bei der Reaktion auf eine Warnung eine erhebliche Rolle. Ebenso sind Informationen vor einer potentiellen Katastrophe entscheidend. Diese Erkenntnisse sollten in Katastrophenschutzplänen unter Berücksichtigung lokaler Spezifika beachtet werden.

Die Lehrstühle beabsichtigen, die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt in der Lehre, der Forschung sowie bei der Bearbeitung von Drittmittelprojekten einzusetzen. Bereits während der Projektphase erfolgte eine Nutzung im Lehr- und Wissenschaftsbetrieb, z. B. durch Einbindung von Diplomanden und Doktoranden sowie die Einbeziehung in Lehreinheiten in den jeweiligen Fachgebieten. Daneben streben die Lehrstühle an, die durch die Projektarbeit gewonnenen Erkenntnisse in den jeweiligen Spezialgebieten in wissenschaftlichen Nachfolgeprojekten einzubringen.

Am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik wird im Rahmen von EvaSim die Software VISUM der Firma PTV AG (Karlsruhe) um zusätzliche Module für die Evakuierungssituation erweitert. Da VISUM bereits in vielen Gemeinden und Ingenieurbüros in Deutschland für verkehrsplanerische Zwecke verwendet wird, ist eine weitere Nutzung der technischen Entwicklungen auch außerhalb des Lehrstuhls möglich.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hydrologie: Dem ZE ist während der Durchführung kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

Fahrzeugstabilität in Strömungen: Zeitgleich zu den EvaSim Untersuchungen zur Fahrzeugstabilität in Strömungen werden an der Universität in Cardiff ebenfalls experimentelle Untersuchungen in einer Strömungsrinne durchgeführt und in mehreren Artikeln publiziert (Xia, Falconer, Lin, & Wang, 2011; Shu, Xia, Falconer, & Lin, 2011; Teo, Xia, Falconer, & Lin, 2012).

In einer Neuauflage des Leitfadens „Australian Rainfall and Runoff“ wird eine Literaturstudie über Sicherheitskriterien für Fahrzeuge veröffentlicht (Shand, Cox, & Smith, 2011).

Verkehrsmodellierung: Dem ZE ist während der Durchführung kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

Katastrophensoziologie: Die Innenbehörde zum Katastrophenschutz in Hamburg hat eine Information der Bevölkerung vor einem Versagen der Hochwasserschutzanlagen auf ihrer Homepage umgesetzt. Hier ist an einem Beispiel zu erkennen, wie eine Information vor einem Schadensereignis umgesetzt und wie über die Art der Warnung sowie über die individuelle Gefährdungslage informiert werden kann (Merkblatt, 2012).

Ziel des Verbundvorhabens Last Mile ist die Entwicklung eines Tsunami-Frühwarn- und Evakuierungsinformationssystems am Fallbeispiel der indonesischen Stadt Padang (West Sumatra). Dort wird ähnlich wie bei EvaSim mittels MATSim die Strömungsdynamik bei einer Überflutung des Stadtgebiets von Padang und das Fluchtverhalten der Bevölkerung vor den einbrechenden Wassermassen simuliert (Matsim, 2012).

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Veröffentlichungen

Unterreitmeier, B., Elsner, T., Kollmann, L. (2012) Projektvorstellung im Fachmagazin CP – Crisis Prevention. Ausgabe 03/12

Unterreitmeier, B., Elsner, T., Kollmann, L. (2013) Veröffentlichung Fachbeitrag zum Verbundprojekt EvaSim. Jahrbuch Gewässer-Nachbarschaften 2013, Schulungen und Erfahrungsaustausch, naturnahe Gewässerunterhaltung, präventiver Hochwasserschutz. DWA-Landesverband Sachsen/Thüringen. März 2013. ISBN 978-3-942964-75-3

Hochschulschriften (Dissertationen, Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten)

Liu, L (2011): Modeling the Evacuation in Large Regions. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Roesch, S. (2011): Stabilität von Fahrzeugen in Strömung. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Lorang, M. (2012): Hydrologische Modellierung kleiner Einzugsgebiete im Mittelgebirge – Anwendung des Zeitflächendiagramms und Implementierung eines Speichermoduls. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Eisele, M. (2012): Hydrologische Modellierung eines kleinen alpinen Einzugsgebietes – Sensitivitätsanalysen zum Einfluss von hydrologischen Eingangsparametern auf die Modellgüte. Bachelorarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Hummel, A. (2012): Verkehrliche Maßnahmen in Katastrophenschutzplänen. Universität Stuttgart. Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Schlegel, A. (2012): Verhaltensparameter für Verkehrsmodelle in Evakuierungssituationen. Universität Stuttgart. Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Konferenzbeiträge und Poster

Kuhn, R.; Unterreitmeier, B. (November 2011): Postersession mit Projektvorstellung Forschungsforum Öffentliche Sicherheit - Workshop Naturereignisse und Naturkatastrophen 14./15. im Paul-Löbe-Haus des Deutschen Bundestages.

Kramer, M., Wieprecht, S. (2011): Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen. 13. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten, Hannover.

Herma, F., Seidel J., Bárdossy A. (2011): Measurement of temperature and humidity profiles on a cable car as a tool for the determination of atmospheric stability, EGU General Assembly 2011, Wien.

Friedrich, M., Immisch, K. (2011): Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen. Vortrag im Rahmen der Universitätstagung 2011, Wuppertal:

Herma, F., Seidel J., Bárdossy A. (2012): Stability Indices derived from Atmospheric Measurements on a Cable Car, EGU General Assembly 2012, Wien.

Vorträge

Wieprecht, S., Kramer, M. (2010): Vorstellung des Verbundprojektes EvaSim in der Gemeindeversammlung in Altensteig am 26.10.2010, Altensteig.

Immisch, K. (2011): Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen. Vortrag im Rahmen der VSVI-Mitgliederversammlung 2011

Unterreitmeier, B., Kollmann, L. (2011) Präsentation des EvaSim Projektes auf der Messe acqua alta in Hamburg vom 11.10.-13.10.2011

Unterreitmeier, B., Kollmann, L. (2011) Vorstellung des EvaSim Projektes im Open Space – Ausstellerforum auf der Messe acqua alta in Hamburg am 13.10.2011

Unterreitmeier, B., Kollmann, L. (2012) Präsentation des EvaSim Projektes auf der Messe acqua alta alpina in Salzburg vom 08.03 - 10.03.2012

Wieprecht, S., Friedrich, M., Herma, F., Elsner, T., Kuhn, R., Kramer, M., Immisch, K., Kollman, L., Rosport, E. (2012): Abschlusskolloquium EvaSim an der Universität Stuttgart. Öffentliche Veranstaltung.

Unterreitmeier, B., Kollmann, L. (2012) Präsentation des EvaSim Projektes vor Vertretern des Landratsamt BGL, der Stadt Bad Reichenhall, sowie der Kreisbrandinspektion in Bad Reichenhall am 09.07.2012

Unterreitmeier, B., Kollmann, L. (2012) Präsentation und Abstimmung der Ergebnisse zur Hochwasser- und Katastrophenschutzplanung vor Vertretern des Landratsamt BGL, sowie des Ordnungs- und Tiefbauamtes der Stadt Bad Reichenhall in Bad Reichenhall am 13.09.2012

Unterreitmeier, B., (2012) Präsentation des EvaSim Projektes auf der Messe Intergeo in Hannover vom 09.10 - 11.10.2012

Friedrich M., Immisch, K. (2013): Vortragsreihe der Deutschen verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft, Bezirksvereinigung Württemberg. Vorträge junger

Verkehrswissenschaftler 2013, Stuttgart: Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen.

3 Literaturverzeichnis

- Aboelata, M. B. (2004). Transportation model for evacuation in estimating dam failure life loss. *Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Conference*. Melbourne, Victoria, Australia.
- DIN 19700. (2004). Stauanlagen. Normungsausschuss Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung.
- Duclos, L. S. (1987). Community Evacuation Following a Chlorine Release, Mississippi. *Disasters, Vol. 11, No 4*.
- Fink, T. (1997). Parameteranalyse zur rechnergestützten Modellierung von Flutwelle, Räumungsverkehr und Personenschaden. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau.
- Giesecke, J. (2002). Gutachten für die vertiefte Sicherheitsüberprüfung der Nagoldtalsperre. Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau.
- Huber, N. P. (2004). Aspekte der Risikoanalyse für Stauanlagen am Beispiel der Rurtalsperre. *13. Deutsches Talsperrensymposium*. Weimar.
- HUT. (2000). *RESCDAM - The use of physical models in dam-break flood analysis*. Helsinki University of Technology.
- Keys, H. J. (2007). Lahars from Mount Ruapehu – mitigation and management. Department of Conservation, Turangi, New-Zealand.
- Matsim. (2012). Überflutung von Padang, Indonesien.
- Medis. (2005). Rimax Medis Workshop "Erfassung von Hochwasserschäden". Dresden.
- Merkblatt. (2012). Sturmflut - Hinweise für die Bevölkerung. Behörde für Inneres und Sport, Katastrophen und Bevölkerungsschutz.
- Merkblatt. (2012). Sturmflut - Hinweise für die Bevölkerung. Behörde für Inneres und Sport, Katastrophen und Bevölkerungsschutz.
- Perry, R. W. (1985). Comprehensive Emergency Management: Evacuating Threatened Populations. *Contemporary Studies in Applied Behavioral Science, Vol. 3*.
- Reiter, P. (2000). International methods of risk analysis, damage evaluation and social impact studies concerning dam-break accidents. *International seminar on the RESCDAM project*. Seinäjoki, Finnland.
- Sametz, L. (1981). Beitrag zur Frage der Flutwellenbildung bei progressiven Damnbrüchen infolge Überströmung. Dissertation, Technische Universität Graz, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Schreckenberger, M. S. (2002). Pedestrian and Evacuation Dynamics. *Springer, Berlin*.
- Shand, T., Cox, R. J., & Smith, M. J. (2011). Appropriate safety criteria for vehicles: Literature Review (Stage 2). *Report Number P10/S2/020 Australian Rainfall and Runoff (AR&R)*. Manly Vale Australia.
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R. A., & Lin, B. (2011). Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*.
- Sorensen, J. H., Vogt, M. B., & Mileti, D. S. (1987). Warning and Evacuation Dynamics. *Springer Berlin*.

- Stedje, G. L. (2006). *Estimating Loss of Life from Hurricane-Related Flooding in the Greater New Orleans Area*. Alexandria, VA, USA: Report for U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources.
- Teo, F. Y., Xia, J., Falconer, R. A., & Lin, B. (2012). Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International Journal of River Basin Management*.
- UMBW. (2006). *In 5 Schritten zum Hochwasseralarm- und Einsatzplan – Eine Orientierungshilfe für die Erstellung, Ergänzung und Aktualisierung von kommunalen Hochwasseralarm- und Einsatzplänen*. WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg.
- Umweltministerium Baden-Württemberg. (2006). *In 5 Schritten zum Hochwasseralarm- und Einsatzplan*. Heidelberg: Herausgegeben von der WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg.
- Wieprecht, S. (2009). *Vorhabensbeschreibung - EvaSim - Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen*.
- Xia, J. Q., Falconer, R. A., Lin, B., & Wang, G. (2011). Numerical assessment of people and vehicles safety in flash floods.

4 Anhang

Teilabschlussbericht

Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur
Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen

AP 2: Meteorologie und Hydrologie



gefördert durch das BMBF
Förderkennzeichen
13N10594

April 2013

Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Dipl.-Ing. Felix Herma
Dr. rer.nat Jochen Seidel
Prof. Dr. rer.nat. Dr.-Ing. András Bárdossy

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Vorgehensweise	2
2. Untersuchungsgebiete	4
2.1. Altensteig - Nagold	4
2.1.1. Topographie	4
2.1.2. Geologie, Böden und Landnutzung	5
2.1.3. Klima	6
2.1.4. Hydrologie	6
2.1.5. Nagoldtalsperre	8
2.2. Bad Reichenhall - Saalach/Seebach	8
2.2.1. Topographie	9
2.2.2. Geologie, Böden und Landnutzung	9
2.2.3. Klima	10
2.2.4. Hydrologie	11
3. Aufbau und Betrieb von Messtechnik	14
3.1. Meteorologische Messtechnik	14
3.1.1. Wetterstation Pegelhaus	14
3.1.2. Wetterstation Hochstaufen	15
3.1.3. Predigtstuhlbahn	15
3.2. Hydrologische Messtechnik	16
3.3. Abflussmessungen	18
4. Datengrundlage	20
4.1. Datenverfügbarkeit	20
4.1.1. Gebietsdaten	20
4.1.1.1. UG Nagold	20
4.1.1.2. UG Bad Reichenhall	21
4.1.2. Meteorologische Daten	21
4.1.2.1. UG Nagold	21
4.1.2.2. UG Bad Reichenhall	22
4.1.3. Hydrologische Daten	22

4.1.4.	Daten zur Talsperre	23
4.1.5.	Eigene Messdaten	25
4.2.	Datenaufbereitung	25
4.2.1.	Gebietsdaten	26
4.2.2.	Meteorologische Daten	27
4.2.3.	Hydrologische Daten	29
4.3.	Datenkorrektur	29
4.3.1.	Auffüllen von Zeitreihen	30
4.3.2.	Verkrautung	30
4.3.3.	Unsicherheit der Wasserstand-Abfluss-Beziehung	31
5.	Hydrometeorologische Belastungsszenarien	33
5.1.	Referenzszenarien	33
5.1.1.	UG Nagold	33
5.1.2.	UG Bad Reichenhall	35
5.2.	Extremwertstatistik	36
5.3.	Hydrometeorologische Extremereignisse	37
6.	Hydrologisches Flussgebietsmodell	40
6.1.	UG Nagold	40
6.1.1.	Modellstruktur	40
6.1.1.1.	Einzugsgebietsmodell	40
6.1.1.2.	Wasserlaufmodell	42
6.1.1.3.	Speichersimulation	42
6.1.2.	Modellanpassung	43
6.1.3.	Ergebnisse	43
6.1.3.1.	Belastungsszenarien	44
6.1.3.2.	Hydrometeorologische Extremereignisse	48
6.1.4.	Zusammenfassung	48
6.2.	UG Bad Reichenhall	50
6.2.1.	Modellstruktur	50
6.2.2.	Modellanpassung	51
6.2.3.	Ergebnisse	52
6.2.3.1.	Belastungsszenarien	52
6.2.3.2.	Hydrometeorologische Extremereignisse	60
6.2.4.	Zusammenfassung	60
7.	Meteorologische Vorhersagen	62
7.1.	Atmosphärische Messungen	62
7.1.1.	Messprofil	62
7.1.2.	Datenaufbereitung	63
7.1.2.1.	Berechnung von Zwischengrößen	63
7.1.2.2.	Stüvedigramme	64
7.2.	Ableitung von Stabilitätsindices	65
7.2.1.	Grundlagen	65
7.2.2.	Berechnung	65
7.2.2.1.	„Statische Indices“	66

7.2.2.2. „Dynamische Indices“	67
7.3. Vorhersage von instabilen Wetterlagen	68
7.3.1. Methodik	68
7.3.1.1. Bestimmung von instabilen Wetterlagen	68
7.3.1.2. Berechnung der Warnschwellen	70
7.3.2. Verifizierung und Unsicherheit	71
7.3.2.1. Vorgehensweise - Skill Score Analysis	71
7.3.2.2. Ergebnisse	72
8. Zusammenfassung	76
Literaturverzeichnis	78
Anhänge	81
A. Datengrundlage	82
A.1. Datenaufbereitung	82
A.2. Datenkorrektur	83
A.2.1. Verkrautung	83
A.2.2. Unsicherheit der Abflusskurve	84
B. Generierung von Extremniederschlägen	85
C. Hydrologisches Flussgebietsmodell	86
C.1. UG Nagold - Altensteig (Speichersimulation)	86
C.2. UG Bad Reichenhall - Saalach/Seebach	88
D. Meteorologische Vorhersagen	92
E. Veröffentlichung der Ergebnisse	95

Tabellenverzeichnis

2.1.	UG Nagold - Jährlichkeiten der Hochwasserabflüsse	8
2.2.	Abflusskennwerte Saalach (1951 - 2006)	12
3.1.	Übersicht zu den Abflussmessungen (UGBR - Seebach)	19
4.1.	Bewirtschaftungsregeln der Nagoldtalsperre	23
5.1.	UG Nagold - Extremwertstatistik der HW-Abflüsse	36
5.2.	UG Bad Reichenhall - Extremwertstatistik der HW-Abflüsse	37
6.1.	Modellgüte - Pegel Erzgrube-Zulauf	44
6.2.	Modellgüte - Pegel Altensteig	47
6.3.	Modellgüte - Saalach (Tagesdaten)	52
6.4.	Modellgüte Referenzszenario 2005 - Saalach (Stundendaten)	53
6.5.	Niederschlagsereignisse - Einzugsgebiet (EZG) Seebach	54
6.6.	Messstationskonfiguration - Abflussbeiwert Pegel Nonn	55
6.7.	Abflusskorrektur - Abflussbeiwerte Seebach (Konfiguration I)	55
6.8.	Verkrautungseinfluss Pegel Pegelhaus - Modellgüte	56

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Digitales Höhenmodell (DHM) - UG Nagold	5
2.2.	Landnutzung - UG Nagold	6
2.3.	Einzugsgebiet (EZG) der Nagold (Pegel Altensteig)	7
2.4.	Maximale Scheitelabflüsse im EZG (1989 - 2004)	7
2.5.	Digitales Höhenmodell (DHM) - UG Bad Reichenhall	9
2.6.	Landnutzung - UG Bad Reichenhall	10
2.7.	Hydrologische Einzugsgebiete - UG Bad Reichenhall	12
3.1.	UG Bad Reichenhall - Wetterstationen	15
3.2.	UG Bad Reichenhall - Messtechnik Predigtstuhlbahn	16
3.3.	UG Bad Reichenhall - Pegelmessstellen Seebach	17
3.4.	UG Bad Reichenhall - Umbau am Pegel Messwehr	18
4.1.	UG Nagold - DWD Messstationen	21
4.2.	UG Bad Reichenhall - Messstationen	22
4.3.	Ganglinien des Wasserstands und Stauziele (Nagoldtalsperre)	24
4.4.	Stauinhalts- und Stauflächenkennlinie (Nagoldtalsperre)	25
4.5.	Räumliche Niederschlagsberechnung	26
4.6.	Schema zur Glättung und Drehung eines DHM	27
4.7.	Abflusskurve Pegel Nonn (Seebach)	28
4.8.	Pegel Pegelhaus (Seebach) - Verkräutungsproblematik	29
4.9.	Wasserstandsganglinie Pegel Pegelhaus (Seebach)	30
4.10.	Abflusskurve Pegel Pegelhaus (Seebach)	31
5.1.	UG Nagold - HW-Referenzszenarien	34
5.2.	UG Bad Reichenhall - HW-Referenzszenarien	35
5.3.	Generierung eines Extremniederschlagsereignisses (Beispiel)	38
6.1.	Isochronenflächen der Varianten für das Zeitflächendiagramm	41
6.2.	Schema des angewendeten hydrologischen Modells	42
6.3.	Modellergebnisse - Pegel Erzgrube-Zulauf	44
6.4.	HW 1990 mit manueller Kalibrierung (Pegel Erzgrube-Zulauf)	45
6.5.	Speichersimulation - Wasserstand (HW 1990)	45
6.6.	Speichersimulation mit gemessenem Zulauf (Hochwasser (HW) 1990)	46
6.7.	Modellergebnisse - Altensteig	47
6.8.	UG Nagold - Extremszenario	49
6.9.	Schematische Modellstruktur (HBV-IWS)	51
6.10.	Pegel Unterjettenberg (Saalach) - Modellergebnisse	53
6.11.	Pegel Unterjettenberg - Modellergebnisse HQ_{ref}	54
6.12.	Abfluss Pegel Messwehr (Ereignis 2, Konfiguration I)	57
6.13.	Abfluss Pegel Messwehr (Ereignis 2, Konfiguration II)	58

6.14. Abfluss Pegel Messwehr (Ereignis 2, Konfiguration III)	59
6.15. Modellergebnisse HQ_{extrem} - Saalach	60
7.1. Atmosphärische Schichtung - Stüvediagramm (Lufttemperatur)	64
7.2. Histogramme zur Gewitteraktivität (KI)	69
7.3. Zeitlicher Verlauf - Showalter-Index (SI)	70
7.4. Kontingenztabelle („Skill Score Analysis“)	71
7.5. Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung	73
7.6. Temperaturverteilung nach Wetterlagen	73
7.7. Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung (Lifted-Index)	74
A.1. Abflusskurve Pegel Thumsee (Seebach)	82
A.2. Abflusskurve Pegel Messwehr (Seebach)	82
A.3. Abflusskorrektur mit dem Eta-Verfahren	83
A.4. Pegel Pegelhaus - Abflusskorrektur mit dem Eta-Verfahren	83
A.5. Messunsicherheiten der Abflussmessung (LUBW, 2004)	84
B.1. Generierung von Extremniederschläge - Auswahl des Niederschlagsereignisses .	85
B.2. Generierung von Extremniederschläge - Anpassung der Verteilungsfunktion . .	85
B.3. Generierung von Extremniederschläge - Erhöhung des Niederschlagsereignisses	85
C.1. Speichersimulation mit gemessenem Zulauf (HW 1993)	86
C.2. Speichersimulation mit neuen Bewirtschaftungsregeln (HW 1990)	87
C.3. Speichersimulation mit neuen Bewirtschaftungsregeln (HW 1993)	87
C.4. Pegel Staufeneck (Saalach) - Modellergebnisse	88
C.5. Pegel Staufeneck - Modellergebnisse HQ_{ref}	88
C.6. Abfluss Pegel Nonn (Ereignis 3, Konfiguration I)	89
C.7. Abfluss Pegel Nonn (Ereignis 3, Konfiguration II)	90
C.8. Abfluss Pegel Nonn (Ereignis 3, Konfiguration III)	91
D.1. Atmosphärische Schichtung - Stüvediagramm (Spezifische Feuchte)	92
D.2. Verteilungen weiterer meteorologischer Größen nach Wetterlagen	93
D.3. Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung (Showalter-Index)	94
D.4. Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung (K-Index)	94

Abkürzungsverzeichnis

BI	Boyden-Index	66
c_{melt}	Schmelzfaktor	41
CP	Circulation Pattern	28
CSI	Critical Success Index	72
dd	Windrichtung	15
DHM	digitales Höhenmodell	4
DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	
DWD	Deutscher Wetterdienst	3
E	Sättigungsdampfdruck	63
e	Dampfdruck	63
EDK	External Drift Kriging	27
EZG	Einzugsgebiet	IV
FAR	Fehlalarmrate	72
FC	Feldkapazität	5
G	Globalstrahlung	14
GIS	Geoinformationssystem	20
h_N	Niederschlagshöhe	14
h_{Ne}	Effektivniederschlag	41
HQ	Höchster Wert im Beobachtungszeitraum	
HR	Trefferrate	71
HS	Hochstufen	15
HSS	Heidke Skill Score	72
HW	Hochwasser	V
IWS	Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung	50
KI	George's K-Index	66
KOI	Konvektiv-Index	67
KS-Test	Kolmogorow-Smirnow-Test	37
LCL	Kondensationsniveau	63
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt	22
LI	Lifted Index	68
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen & Naturschutz Baden-Württemberg	20
MHQ	Mittel der HQ aller Jahre	
MLM	Maximum-Likelihood-Methode	36
MM	Momenten-Methode	36
MNQ	Mittel der NQ aller Jahre	
MQ	Mittel eines oder aller Jahre	
MUP	Most Unstable Parcel	67
N/A-Modell	Niederschlags-Abfluss-Modell	2
NQ	Niedrigstes Tagesmittel im Beobachtungszeitraum	
N-S	Nash-Sutcliffe-Koeffizient	43

OK	Ordinary Kriging	27
p	atmosphärischer Luftdruck	3
PH	Pegelhaus	14
POD	Erkennungswahrscheinlichkeit	72
Q	Abfluss	19
q	Mischungsverhältnis	63
Q_D	Direktabfluss	41
$Q_{ges.}$	Gesamtabfluss	19
Q_i	Teilabfluss	19
r^2	Bestimmtheitsmaß	43
rF	relative Luftfeuchte	3
s	spezifische Luftfeuchte	63
SI	Showalter Index	67
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	21
T_a	Lufttemperatur	3
T_c	Konzentrationszeit	40
T_D	Taupunkttemperatur	63
TEZG	Teileinzugsgebiet	4
T_K	absolute Temperatur	63
TSS	True Skill Statistics	72
TTI	Totals-Totals-Index	66
Θ	Potentielle Temperatur	63
$\Theta_{E,K}$	Absolute äquivalente potentielle Temperatur	63
T_K	Absolute Temperatur	63
$T_{v,K}$	Absolute virtuelle Temperatur	63
TT	Grenztemperatur	41
u	Windgeschwindigkeit	15
UG	Untersuchungsgebiet	1
UGBR	UG Bad Reichenhall	4
UGN	UG Nagold	4
V_{mes}	gemessenes Volumen	
V_{sim}	simuliertes Volumen	
W	Wasserstand	19
WQ	Wasserstand-Abfluss	18
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik	3

1. Einleitung

Das Vorhaben EvaSim war ein Beitrag im Rahmen des Sicherheitsforschungsprogramms der Bundesregierung, in dem innovative Lösungen entwickelt werden sollten, um die Sicherheit der Bürgerinnen und Bürger zu erhöhen. Ein Aspekt hierbei war die Verwundbarkeit der Gesellschaft, in Folge der Abhängigkeit von reibungslos funktionierenden Versorgungssystemen und deren Anfälligkeit gegen kleine Abweichungen vom Normalzustand, auf ein geringstmögliches Maß zu reduzieren. Neben der Bedrohung durch terroristische bzw. kriminelle Aktivitäten musste die Maximierung der Sicherheit, auch in Folge von Naturkatastrophen oder Unfällen besonderen Ausmaßes und die Begrenzung der Schäden zum Arbeitsfokus haben.

Hier setzte das Vorhaben EvaSim an, indem es nun Lösungen bereitstellt, um bei extremen Überflutungssituationen eine optimierte Evakuierung der bedrohten Bevölkerung zu ermöglichen.

1.1. Motivation

Überflutungsereignisse unterhalb von Talsperrenstandorten oder in Folge von extremen Niederschlägen auf Siedlungen und Verkehrswege können in gravierenden Fällen die Notwendigkeit zur (Teil-)Evakuierung der betroffenen Bevölkerung zur Folge haben. Ziel des Forschungsprojektes war es, durch eine Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen einen Beitrag zum besseren Krisenmanagement im Extremfall zu liefern.

Am Beispiel von realen Standorten sollten durch die Anwendung der Simulation und Optimierung Evakuierungsszenarien für den Notfall entwickelt werden. Als Beispielstandorte wurden das Untersuchungsgebiet (UG) Nagold mit der Stadt Altensteig im nördlichen Schwarzwald und das UG Bad Reichenhall am Alpenrand im Südosten Bayerns ausgewählt. Das Verfahren sollte nach Abschluss des Forschungsprojektes für die Entwicklung von Evakuierungsplänen bei HW oder Talsperren- bzw. Deichbruch an anderen Standorten zur Verfügung stehen.

Als zunehmend bedrohliches Szenario werden außerdem Sturzfluten in kleinen EZG wahrgenommen, die durch lokale Extremniederschläge hervorgerufen werden können. Es besteht weitgehender Konsens unter Hydrologen, dass die sich abzeichnenden Klimaveränderungen eine Zunahme derartiger Ereignisse sowohl in Qualität als auch Quantität erwarten lassen. Die besondere Herausforderung zum Schutz und zur Rettung von Menschen liegt in der teilweise äußerst schnellen Entwicklung bedrohlicher Zustände, der mitunter sehr kurzen Vorwarnzeit

und der oftmals schwierigen Wahrnehmbarkeit derartiger Situationen durch Laien. Je mehr Vorwarnzeit besteht, umso effektiver können Maßnahmen gesetzt werden, verbleiben deutlich mehr Handlungsspielräume und sind situationsabhängige Anpassungen der Strategien der Rettungskräfte möglich. Insofern kam der Verbesserung der Vorhersagequalität von Extremereignissen eine Schlüsselrolle zu, da durch eine frühzeitige Erkennung von Gefahrensituationen der Schutz der Bevölkerung erhöht wird und durch die rechtzeitige Alarmierung der Einsatzkräfte eine deutliche Verbesserung der Rettungsaktivitäten erzielbar ist.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel des Teilvorhabens „Hydrometeorologische Szenarien und Vorhersagen“ war die Bereitstellung von möglichen hydrometeorologischen Extremereignissen mit Informationen über deren räumlichen und zeitlichen Verlauf. Daraus konnten beispielsweise Belastungsszenarien für Talsperren abgeleitet werden. Des Weiteren sollten die Erkenntnisse der Verbesserung der Vorhersage von hydrometeorologischen Extremereignissen dienen. Daraus sollte eine Verlängerung der Vorwarnzeit resultieren, die es den Entscheidungsträgern zukünftig ermöglichen soll, entsprechende Maßnahmen (Evakuierung, Sperrung von Verkehrswegen, etc.) rechtzeitig einleiten zu können.

Aufgrund der meist kleinräumigen Ausdehnung sturzflutrelevanter Niederschlagsereignisse, waren die bestehenden Niederschlagsmessnetze am Boden oft nicht geeignet, diese mit ausreichender Genauigkeit abzubilden. Deshalb wurde durch die Installation eigener Messstationen im UG Bad Reichenhall versucht, solche kleinräumigen Niederschlagsereignisse besser zu erfassen und zu beschreiben.

Im UG Bad Reichenhall wurden mit Hilfe atmosphärischer Messungen Unwetterwarnungen erstellt, die für das kleine EZG spezifische Vorhersagen für konvektive Niederschlagsereignisse ermöglichen sollte. Diese Vorhersagen sollten die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Niederschlagsereignisses mit HW-Potential quantifizieren.

1.3. Vorgehensweise

Um hydrometeorologische Belastungsszenarien für ein hydrologisches Modell bzw. ein Niederschlags-Abfluss-Modell (N/A-Modell) und für eine Talsperre im UG Altensteig zu erstellen, wurde aus beobachteten Niederschlagsereignissen deren statistische Eigenschaften sowie deren räumliche Ausdehnung und Stabilität abgeleitet. Durch die Berücksichtigung verschiedener Niederschlagsszenarien sowie deren gebietsspezifischer Auswertung und Untersuchung meteorologischer Messdaten wurde die Grundlage für eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit und Vorwarnzeit geschaffen. Bei den Niederschlagsszenarien wurden der räumliche und zeitliche

Verlauf der jeweiligen Ereignisse betrachtet, um instationäre Belastungsszenarien für die nachfolgende hydraulische Modellierung bereitstellen zu können. Außerdem wurden unterschiedliche Ursachen eines HW berücksichtigt.

Diese können sich in der Niederschlagsform, -dauer und -intensität unterscheiden, wie z.B. länger andauernde advective Ereignisse mit meist geringer Intensität oder kurzzeitige sehr intensive Konvektionsregen. Aufgrund der bergigen Eigenschaften der Untersuchungsgebiete wurde auch der Einfluss der Schneeakkumulation und -schmelze auf das Abflussgeschehen im HW-Fall miteinbezogen.

Die Untersuchungen zur Vorhersage hydrologischer Extremereignisse wurde in zwei Pilotgebieten durchgeführt. Hierfür wurden in erster Linie Beobachtungen von Messstationen benutzt. Als Datenquelle diente hierbei der Deutsche Wetterdienst (DWD) und die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Diese Erkenntnisse waren die Basis zur Generierung der Extremereignisse.

Um realistische Extremereignisse abschätzen zu können, wurden beobachtete Niederschlagsereignisse stochastisch in ihrer Intensität erhöht. Diese Ergebnisse dienten als Eingangsdaten für ein N/A-Modell, um die Abflüsse für Extremereignisse zu ermitteln. Damit war eine Grundlage für die hydraulische Modellierung als weiteres Arbeitspaket im Verbundvorhaben geschaffen.

Im UG Bad Reichenhall wurden zudem für eine genauere Niederschlags- und Temperaturerfassung zwei eigene Messstationen installiert. Diese sind in verschiedenen Höhen aufgestellt worden, um der ausgeprägten Topographie im EZG gerecht zu werden.

Des Weiteren wurden meteorologische Sensoren zur Erfassung der Lufttemperatur (T_a), der relativen Luftfeuchte (rF) und des atmosphärischen Luftdrucks (p) an einer Kabine der Seilbahn auf den Predigtstuhl in Bad Reichenhall montiert. Durch den Höhenunterschied von über 1.100 m zwischen Tal- und Bergstation konnten Vertikalprofile zur Untersuchung der atmosphärischen Schichtung gewonnen werden.

2. Untersuchungsgebiete

Die beiden Beispielstandorte UG Nagold (UGN) und UG Bad Reichenhall (UGBR) wurden für die Untersuchungen gewählt, da sie jeweils wichtige Eigenschaften besitzen, auf denen der Fokus in diesem Vorhaben lag.

Im UGN befindet sich eine Talsperre, für welche Belastungsszenarien auf Grundlage historischer Hochwasserereignisse abgeleitet wurden. Im UGBR wurden zwei Flussgebiete betrachtet: Das EZG der Saalach und das des Seebachs. Das EZG des Seebachs ist dabei Teileinzugsgebiet (TEZG) der Saalach. Die Saalach zeichnet sich durch ihre hochalpine EZG-Charakteristik aus. Der Seebach wird aus alpinem Gelände gespeist und hat eine sehr kleine EZG-Fläche. Dadurch sollte an diesem Standort die Gefahr von kurzen und schnell auftretenden Sturzfluten untersucht werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird ein detaillierter Einblick in die EZG-Charakteristika gegeben.

2.1. Altensteig - Nagold

Das UGN liegt im nördlichen Schwarzwald in Baden-Württemberg. Die Nagold entspringt in Urnagold in der Gemeinde Seewald. Nach etwa 7,5 km wird sie beim Ortsteil Erzgrube zur Nagoldtalsperre aufgestaut, bevor sie etwa 10,5 km unterstrom der Talsperre die Stadt Altensteig durchfließt. Bis dahin erstreckt sich innerhalb der Untersuchungen das hydrologische EZG. Im weiteren Verlauf der Nagold liegen u.a. die Städte Calw, Nagold und Bad Liebenzell, bevor sie auf der Höhe von Pforzheim mit der Enz zusammenfließt. Der Zusammenschluss von Nagold und Enz mündet dann bei Besigheim als Enz in den Neckar.

2.1.1. Topographie

Das EZG der Nagold weist einen mittelgebirgigen Charakter auf und fällt von Westen nach Osten hin Richtung Altensteig ab. Der höchste Punkt im EZG liegt auf 880 müNN, unweit dem Ursprung der Nagold. Der niedrigste Punkt liegt in der Stadt Altensteig bei 440 müNN. Somit beträgt der Höhenunterschied innerhalb des EZG 440 m. In Abbildung 2.1 ist ein digitales Höhenmodell (DHM) für das Untersuchungsgebiet gegeben.

Untersuchungsgebiet Nagold - Digitales Höhenmodell (1m)

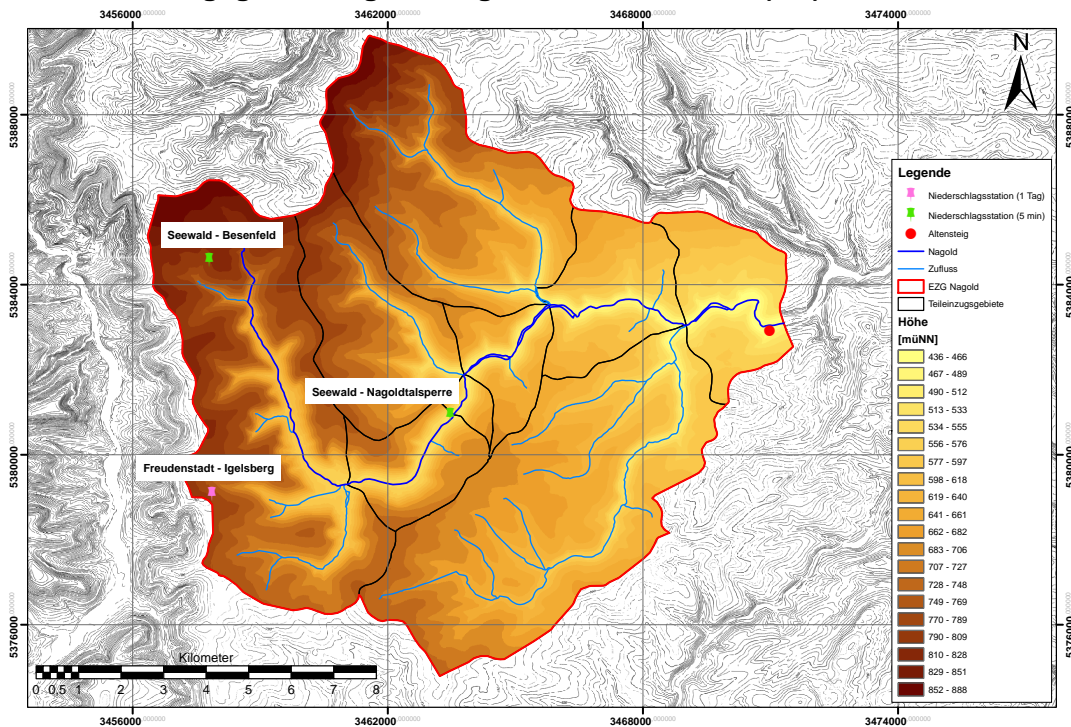


Abbildung 2.1.: Digitales Höhenmodell (DHM) - UG Nagold

2.1.2. Geologie, Böden und Landnutzung

Geologie

Der Nordschwarzwald besitzt im Vergleich zum Südschwarzwald noch mächtige Deckschichten. Die obere geologische Schicht des Untersuchungsgebiets ist hauptsächlich durch den aus der Trias-Zeit stammenden Buntsandstein geprägt. Dieser kann in unteren, mittleren und oberen Buntsandstein untergliedert werden. Der Buntsandstein im nördlichen Schwarzwald besteht aus rotbraunen Geröll- und Konglomeratsandsteinen. Im grobkörnigen Gesteinsanteil treten untergeordnet auch geröllfreie Sandsteine sowie schluffige Tonsteine auf. Die Fein- und Mittelkiesgerölle bestehen hauptsächlich aus quarzreichen Gesteinen (GEYER und GWINNER, 2011).

Böden

Durch den geringen Anteil an Schluff und Ton weist der sandige Boden ein recht hohes Versickerungsvermögen auf. Die Feldkapazität (FC) variiert im EZG zwischen 145 mm und 210 mm (GIESECKE, 2002). Dadurch kann wenig Wasser gespeichert werden und Nährstoffe werden aus dem Boden gespült. Es bilden sich überwiegend karge Böden, welche die landwirtschaftliche Nutzung erschweren. Durch die nährstoffarmen Böden, die Höhenlage und das raue Klima wird eine dichte Bewaldung begünstigt.

Landnutzung

Die dichte Bewaldung verdeutlicht sich durch die im EZG vorherrschende Landnutzung. Die Abbildung 2.2 zeigt in einer räumlichen Auflösung von 500 m x 500 m Rasterzellen die Landnutzung im EZG. Zu etwa 78 % liegen bewaldete Flächen vor, 20 % fallen auf Ackerflächen und Grünland. Nur 2 % der Flächen werden als Siedlungsflächen eingestuft, weshalb der Einfluss von versiegelten Flächen bei Starkniederschlagsereignissen nur sehr gering ist (LUBW, 2007).

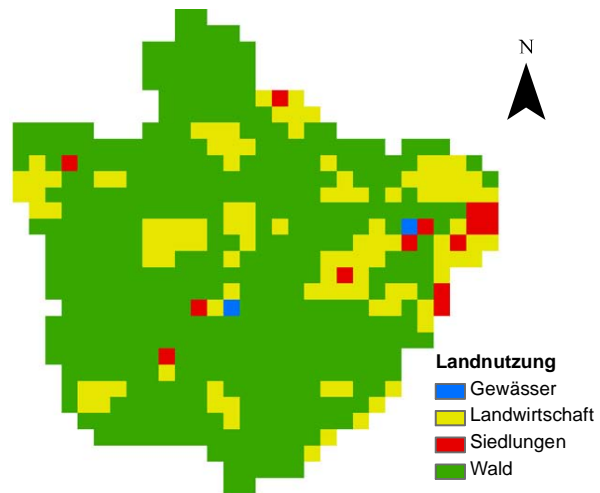


Abbildung 2.2.: Landnutzung - UG Nagold

2.1.3. Klima

Das Klima im Untersuchungsgebiet ist durch den Mittelgebirgscharakter des Schwarzwaldes geprägt. Die Niederschlagshöhen am westlichen Rand des Schwarzwaldes sind mit bis zu 1.600 mm im Jahr generell hoch. Der Grund für die hohen Niederschläge sind vor allem die atlantischen Westwinde. Die meist feuchten Luftmassen steigen an den westlichen Schwarzwaldflanken auf und regnen dort ab. Der Niederschlag im Nordschwarzwald unterscheidet sich auffallend vom mittleren- und südlichen Schwarzwald. Obwohl der Nordschwarzwald insgesamt eine geringere Höhe aufweist, sind die Jahresniederschläge im Norden höher. Die aus dem Westen kommenden Luftmassen besitzen auf der Höhe des Nordschwarzwaldes eine höhere Luftfeuchtigkeit als weiter südlich. Dies liegt an den westlich des Schwarzwaldes gelegenen Vogesen. Auf der Höhe des Nordschwarzwaldes sind die Erhebungen der Vogesen nicht so ausgeprägt wie im Süden. Daher verlieren die Luftmassen im südlichen Teil bereits mehr Luftfeuchtigkeit in Form von Steigungsregen an den Bergflanken der Vogesen (LUBW, 2012).

Der Nordschwarzwald gehört neben den Alpen zu den regenreichsten Gebieten Deutschlands. Die Winter sind relativ mild und schneereich (LUBW, 2012). Dadurch besteht in den Wintermonaten eine wesentliche Hochwassergefahr für das Untersuchungsgebiet, wo es durch die Schneeschmelze zu sehr hohen Abflusssituationen kommen kann.

2.1.4. Hydrologie

In Abbildung 2.3 sind der Verlauf der Nagold von der Quelle bis Altensteig sowie deren Zuflüsse zu erkennen. Das TEZG vom Ursprung der Nagold bis zum Pegel Erzgrube-Zulauf hat eine Größe von etwa 34 km². Die Fläche des TEZG zwischen dem Pegel Erzgrube-Zulauf und Erzgrube-Auslauf, in dem auch die Nagoldtalsperre liegt, beträgt 6 km². Das größte TEZG

vom Pegel Erzgrube-Auslauf bis zum Pegel Altensteig hat eine Ausdehnung von 98 km². Somit beträgt die Gesamtfläche des EZG 138 km² und wird für die nachfolgende hydrologische Modellierung in drei TEZG untergliedert.

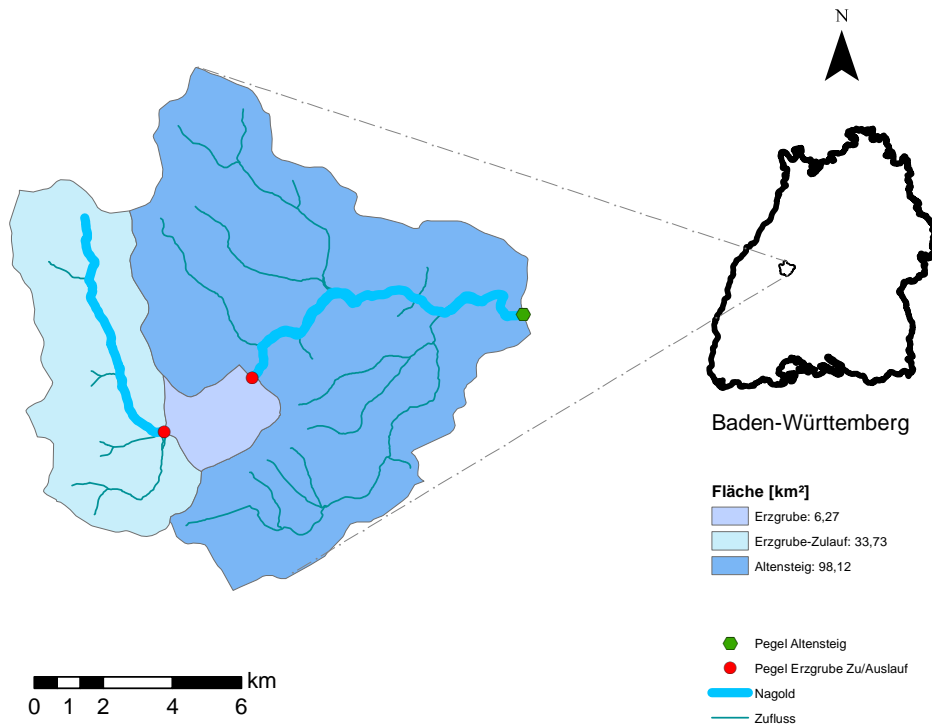


Abbildung 2.3.: Einzugsgebiet (EZG) der Nagold (Pegel Altensteig)

In Abbildung 2.4 sind die zehn höchsten gemessenen Scheitelabflüsse an den drei Pegeln im Untersuchungsgebiet im Zeitraum von 1989 bis 2004 gegeben. Dabei ist zu erkennen, dass die Hochwasser im Wesentlichen im hydrologischen Winterhalbjahr aufgetreten sind.

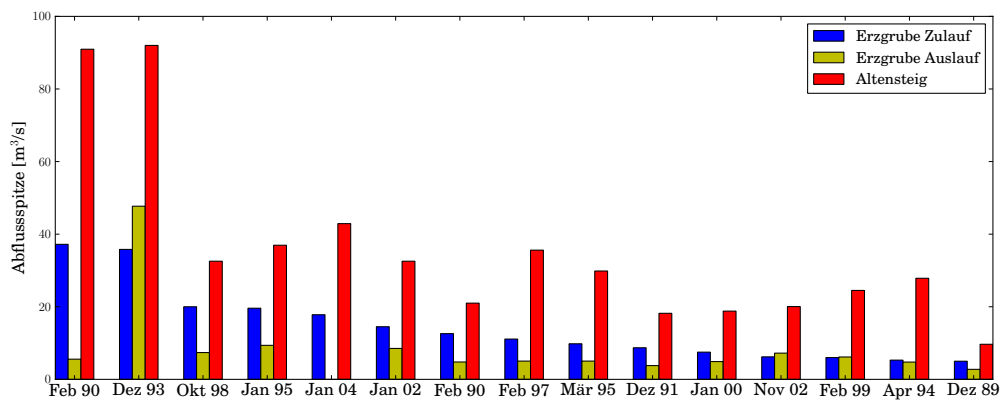


Abbildung 2.4.: Maximale Scheitelabflüsse im EZG (1989 - 2004)

Einige Jährlichkeiten der Hochwasserabflüsse [m^3/s] der Nagold an den Pegeln Erzgrube-Zulauf und Altensteig sind in Tabelle 2.1 aufgeführt (LUBW, 2007).

Pegel	Erzgrube-Zulauf	Altensteig
HQ ₂	9,5	26,3
HQ ₁₀	19,5	52,5
HQ ₂₀	23,9	63,6
HQ ₅₀	30,3	78,8
HQ ₁₀₀	35,5	90,8

Tabelle 2.1.: Jährlichkeiten der HW-Abflüsse an den Pegel Erzgrube-Zulauf und Altensteig

2.1.5. Nagoldtalsperre

Die Besonderheit im UGN ist, dass die Nagold in ihrem Verlauf bis Altensteig durch die Nagoldtalsperre anthropogen in ihrem natürlichen Abflussregime beeinflusst wird.

Die Nagoldtalsperre liegt im Oberlauf der Nagold zwischen den Pegeln Erzgrube Zu- und Auslauf (siehe Abb. 2.3) unterhalb der Ortschaft Erzgrube. Die Talsperre wurde in den Jahren von 1965 bis 1970 erbaut. Primär dient sie dem Hochwasserschutz und der Niedrigwassererhöhung am Unterlauf der Nagold. Außerdem wird sie zur Stromerzeugung genutzt und hat sich zu einem wichtigen Freizeit- und Naherholungsgebiet entwickelt.

Der etwa 2850 m lange Stausee unterteilt sich in eine Vor- und Hauptsperre. Die Vorsperre erfüllt dabei in erster Linie Zwecke des Natur- und Landschaftschutzes. Sie bleibt von der Talsperrenbewirtschaftung unbeeinflusst (EPPLER, 2001).

2.2. Bad Reichenhall - Saalach/Seebach

Das UGBR liegt ganz im Südosten Bayerns nahe der österreichischen Grenze, wo direkt die Stadt Salzburg angrenzt. Hier wurden für die Stadt Bad Reichenhall und deren Teilorte hydrometeorologische Extremszenarien untersucht und berechnet. Die Kernstadt Bad Reichenhall zählt 17.513 Einwohner (BAYLFSTAD, 2013) und ist für seine Salzproduktion, Heilquellen und seinen Kurbetrieb bekannt. Dementsprechend findet man dort einen bedeutenden Anteil an Hotels und Kurkliniken. Aufgrund dieser Eigenschaften sind besondere Anforderungen bei potentiellen Evakuierungsmaßnahmen an die dortigen Leitstellen gestellt. Weitere wichtige Eigenschaften des UG im Bezug auf seine Topographie, Hydrologie etc. werden in den nachfolgenden Punkten beschrieben.

2.2.1. Topographie

Das EZG der Saalach besitzt bis zur unteren EZG-Grenze am Pegel Staufeneck in Bad Reichenhall eine alpine bis hochalpine Topographie. Die höchste Erhebung befindet sich auf etwa 2.590 müNN und die niedrigste auf 420 müNN. Der Höhenunterschied beträgt 2.170 m. In Abbildung 2.5 ist das digitale Höhenmodell des EZG gegeben, wo man auch die zwei TEZG der Saalach bis zum Pegel Unterjettenberg bzw. Staufeneck erkennen kann. Man kann ebenfalls beobachten, dass der größte Teil des EZG auf österreichischem Staatsgebiet liegt.

Das EZG des Seebachs, welches in den hydrologischen Modellierungen gesondert zur Saalach betrachtet wurde, ist Teil des Saalach-EZG. Hier reichen die topographischen Erhebungen von 460 müNN im Stadtgebiet Bad Reichenhall bis auf den 1.770 müNN hohen Hochstaufen.

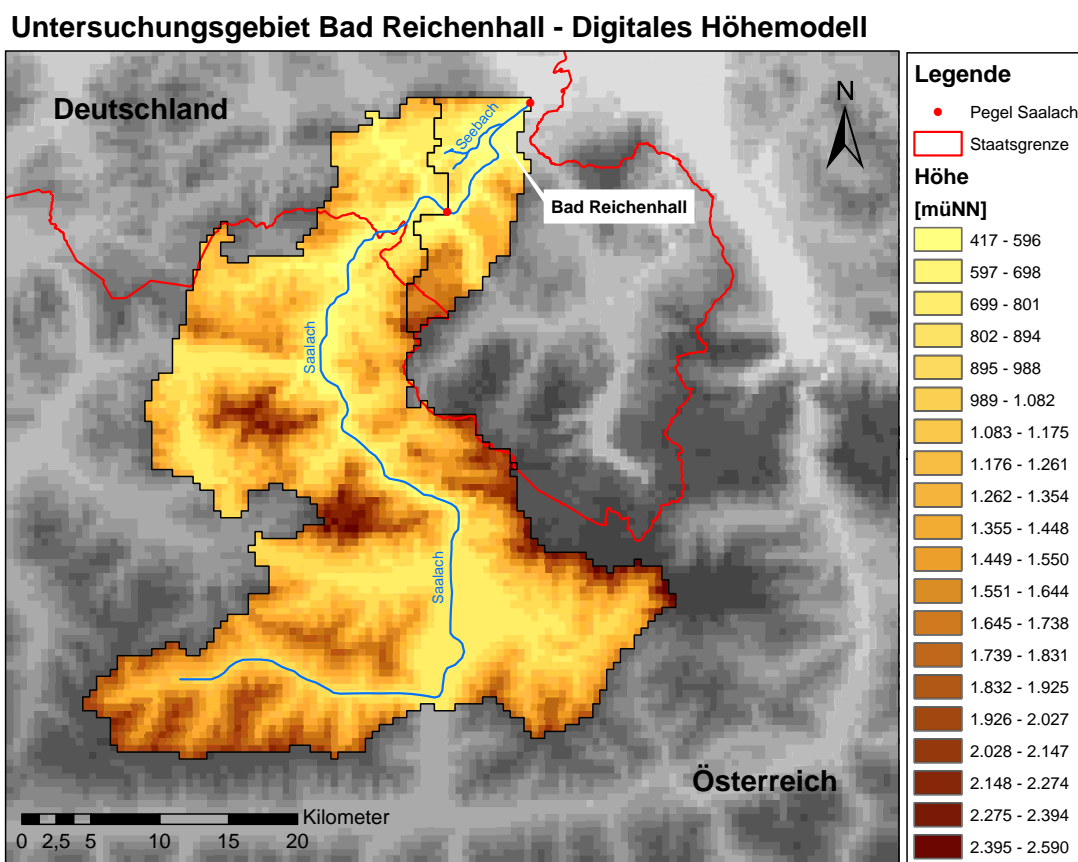


Abbildung 2.5.: Digitales Höhenmodell (DHM) - UG Bad Reichenhall

2.2.2. Geologie, Böden und Landnutzung

Geologie

Das UGBR ist im deutschen Bereich geologisch den Chiemgauer und Berchtesgadener Alpen zuzuordnen, welche allgemein auch als die Nördlichen Kalkalpen bezeichnet werden. Dabei wird das EZG von der Reiteralmdcke (Berchtesgadener Schubmasse) und der Staufen-Höllengebirgs-Decke (Tirolikum) durchzogen. Im Tirolikum, aber auch in der Reiteralmdcke sind der

sogenannte Dachsteinkalk und Hauptdolomit zu finden. In dieser Region sind oft auch die Wälder felsdurchsetzt und die Talstrukturen sind durchwegs v-förmig mit geringen Sohlenauffüllungen. Außerdem sind durch den Kalkstein Karstformen anzutreffen (PFAFFL und HIRCHE, 2011). Die Festgesteine weisen grobkörnige und im Wesentlichen chemische Eigenschaften auf (BMU, 2001). Hydrogeologisch sind im UGBR Kluft- und Karstgrundwasserleiter mit ausgedehnten und sehr ergiebigen Grundwasservorkommen anzutreffen (BMU, 2001).

Böden

Die Böden im UGBR lassen sich grob in Böden der Flusslandschaften und Niederungen und Böden der Alpen untergliedern. Die Böden der Flusslandschaften und Niederungen bestehen aus Auenböden und Gleyen mit sandigen bis tonigen Flusssedimenten in kleinflächigem Wechsel. Die Böden der montanen und subalpinen Höhenstufen der Alpen bestehen aus Kalk- und Dolomitgesteinen, wie z.B. Rendzina und Kalkbraunerde sowie aus kalkfreien Silikatgesteinen, wie z.B. Podsol-Braunerde und Pseudogley. Außerdem sind in den alpinen, subnivalen und nivalen Fels- und Frostschuttgebieten Rohböden vorzufinden (BMU, 2001).

Die FC für land- und forstwirtschaftliche Flächen lässt sich als sehr gering bis gering einstufen. In den Hochlagen weist die FC weniger als 100 mm auf. In den tieferen Lagen variiert die FC zwischen 100 mm und 225 mm (BMU, 2001).

Landnutzung

Die Landnutzung wurde für das UGBR in vier Klassen aufgeteilt. Dabei wurde zwischen Freiflächen (Fels und Wiesen), Wald, offenen Wasserflächen und bebauten Siedlungsflächen unterschieden. Die Abbildung 2.6 zeigt die Landnutzung im gesamten EZG in einer räumlichen Auflösung von 500 m x 500 m (BIS BAYERN, 2013). Die Anteile der einzelnen Landnutzungsformen teilt sich dabei für das gesamte Gebiet wie folgt auf. Etwa 57 % sind sogenannte Freiflächen, wie felsige Gebiete und Wiesenflächen in den höheren Lagen. Die bebauten Siedlungsflächen nehmen ca. 7,5 % und die Waldflächen ca. 35 % ein. Der Anteil an offenen Wasserflächen beträgt knapp 0,5 %.

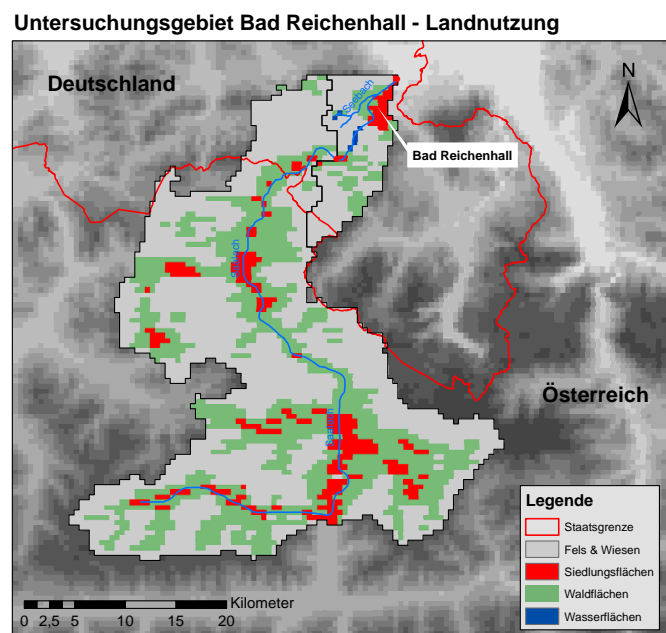


Abbildung 2.6.: Landnutzung - UG Bad Reichenhall

2.2.3. Klima

Das Klima für die Stadt Bad Reichenhall lässt sich trotz seiner alpinen Umgebung als relativ mild beschreiben, was auch auf die Lage im Flusstal der Saalach zurückzuführen ist (WIKIPEDIA,

2013a). Die deutschen Alpen und deren Vorland gehören neben dem Schwarzwald zu den niederschlagsreichsten Regionen in Deutschland. Die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen reichen dabei von 1.100 mm bis 1.500 mm in den tiefen und mittleren Lagen im UGBR und liegen bei über 2.000 mm in den Hochlagen (BMU, 2001). Die Jahresmitteltemperatur für die Stadt Bad Reichenhall beträgt 7 °C bis 8 °C. Die mittleren Höhenlagen haben eine Jahresmitteltemperatur von 4 °C bis 7 °C. In den Hochlagen erreicht die Jahresmitteltemperatur nicht mehr als 0 °C bis 3 °C (BIS BAYERN, 2013).

Die mittlere tatsächliche Verdunstungshöhe reicht von 350 mm/a bis 500 mm/a in den Hochlagen und kann in den niederen Flusstälern bis zu 650 mm/a erreichen (BMU, 2001).

2.2.4. Hydrologie

Für die hydrologische Modellierung des UGBR wurden, wie eingangs erwähnt, das Flusssystem der Saalach bis zum Pegel Staufeneck und das des Seebachs bis zur Mündung oberstrom des Pegels Staufenecks in die Saalach betrachtet (Vgl. Abbildung 2.7).

EZG-Saalach

Das Quellgebiet der Saalach befindet sich in den Kitzbüheler Alpen im österreichischen Bundesland Salzburg. Sie ist ein 103 km langer Zufluss der Salzach, in die sie etwa auf der Höhe der Stadt Salzburg hineinfließt (WIKIPEDIA, 2013b).

Kurz oberhalb der Stadt Bad Reichenhall befindet sich der Saalachsee, welcher ein künstlicher Stausee für die Wasserkraftgewinnung ist. Da dieser Stausee keine Aufgaben für den Hochwasserschutz erfüllt und im Hochwasserfall die anfallenden Abflussmengen direkt weitergeben werden, wurde er in der Untersuchung nicht als gesteuertes Speicherbauwerk betrachtet.

Die zwei betrachteten TEZG der Saalach weisen eine Gesamtfläche von 1.021 km² auf, wobei das TEZG vom Quellgebiet bis zum Pegel Unterjettenberg eine Fläche von 929 km² hat. Das TEZG zwischen Unterjettenberg und dem Pegel Staufeneck ist mit 92 km² nur ein Zehntel so groß.

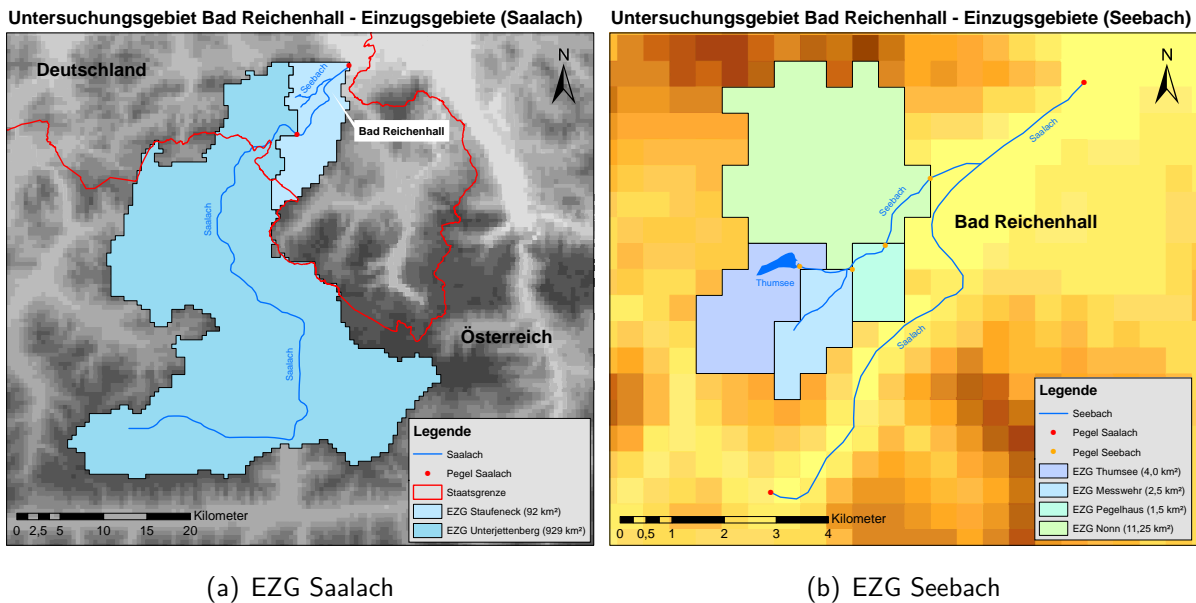


Abbildung 2.7.: Hydrologische Einzugsgebiete - UG Bad Reichenhall

Der Pegel Staufeneck liegt bei Flusskilometer 15 und der Pegel Unterjettenberg bei Flusskilometer 26. Die Fließstrecke zwischen den beiden Pegeln, entlang derer sich das Stadtgebiet Bad Reichenhalls befindet, beträgt demnach 11 km (LFU, 2013).

Charakteristische Abflusskennwerte der Saalach an diesen beiden Pegeln sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Pegel	Unterjettenberg	Staufeneck
NQ	4,5	4,7
MNQ	9,0	10,9
MQ	38,4	42,3
MHQ	359	393
HQ	805	846

Tabelle 2.2.: Abflusskennwerte [m³/s] der Saalach (1951 - 2006) (LFU, 2013)

EZG-Seebach

Der Seebach entspringt dem südwestlich von Bad Reichenhall gelegenen Thumsee. Die Fließstrecke des Seebachs bis zur Mündung in die Saalach beträgt etwa 6 km. Dabei durchquert er die Stadtteile Karlstein und Nonn, welche zur Stadt Bad Reichenhall gehören. Die Gesamtfläche des EZG umfasst etwa 19 km² und wurde für die nachfolgenden Untersuchungen in vier TEZG unterteilt (Vgl. Abbildung 2.7).

Das Quelleinzugsgebiet bis zum Pegel Thumsee hat eine Fläche von 4 km². Dabei ist zu erwähnen, dass der Thumsee während der Trockenwetterphasen keine permanenten oberirdischen Zuflüsse aufweist und ausschließlich aus unterirdischen Karstquellen gespeist wird. Dennoch lässt sich auch während längerer Trockenphasen ein relativ konstanter Ausfluss beobachten. Die beiden unterstrom folgenden Zwischeneinzugsgebiete Messwehr und Pegelhaus haben jeweils eine TEZG-Fläche von 2,5 km² bzw. 1,5 km². Das größte TEZG mit einer Fläche von 11,25 km² liegt zwischen den Pegeln Pegelhaus und Nonn. Zwischen diesen beiden Pegeln vereint sich der Seebach mit dem Hammerbach, was bei Trockenwetterabfluss etwa zu einer Verdoppelung des Abflusses am Pegel Nonn führt. Nach kurzer Fließstrecke unterhalb des Pegels Nonn mündet der Seebach in die Saalach.

Für den Seebach lagen zum Zeitpunkt des Projektbeginns keine hydrologischen Messdaten vor, weshalb er als sogenanntes unbeobachtetes EZG über keine amtlichen bzw. charakteristischen Abflusskennwerte verfügt.

3. Aufbau und Betrieb von Messtechnik

Der Aufbau und Betrieb von zusätzlicher meteorologischer und hydrologischer Messtechnik erfolgte im UG Bad Reichenhall. Dabei ging es um die Installation von zusätzlichen Wetterstationen an exponierten Lagen und die Implementierung von Sensoren zum Messen atmosphärischer Größen auf einer Kabine der Predigtstuhlbahn, einer Luftseilbahn auf den 1.613 müNN hohen Predigtstuhl im Stadtgebiet Bad Reichenhalls. Außerdem wurden an dem in Kapitel 2.2 bereits erwähnten Seebach vier Pegelmessstellen eingerichtet, um dort hydrologische Daten aufzeichnen zu können.

Es wurden sowohl kontinuierliche Messungen an den Stationen und der Seilbahn als auch punktuelle hydrologische Messungen zum Erstellen von sogenannten Abflusskurven (WQ-Beziehungen) vorgenommen. In den folgenden Kapiteln wird beschrieben, wo diese Messtechnik im UG aufgebaut worden ist und welche meteorologischen und hydrologischen Größen aufgezeichnet wurden.

3.1. Meteorologische Messtechnik

Wie bereits in Kapitel 1.3 erwähnt wurde, diente der Aufbau eigener meteorologischer Messtechnik dazu, die räumliche Variabilität von Niederschlagsereignissen besser erfassen zu können. Außerdem sollte es durch die Ausstattung einer Seilbahn mit Messtechnik möglich sein, Aussagen über den Zustand der bodennahen atmosphärischen Schichtung zu treffen und so potentielle konvektive Niederschlagsereignisse vorhersagen zu können (Vgl. Kapitel 7).

3.1.1. Wetterstation Pegelhaus

Da aufgrund der relativ großen Entfernung zur nächstgelegenen operationell betriebenen Wetterstation mit zur Verfügung stehenden Daten eine ungenügende Abbildung von lokalen Starkniederschlagsereignissen zu erwarten war, wurde eine komplette Wetterstation im UG installiert. Diese Station befindet sich im Stadtteil Karlstein auf 472 müNN (Abbildung 3.1) und wird im Folgenden mit Wetterstation Pegelhaus (PH) benannt. Die Datenabfrage ist durch ein GSM-Modem per Fernübertragung möglich.

Die Station zeichnet neben den für das hydrologische Modell wichtigen Eingangsdaten Niederschlagshöhe (h_N) [mm] und Lufttemperatur (T_a) [°C] weitere meteorologische Größen, wie relative Luftfeuchte (rF) [%], atmosphärischer Luftdruck (p) [hPa], Globalstrahlung (G)

[W/m^2], Windgeschwindigkeit (u) [m/s] und Windrichtung (dd) [$^\circ$] auf.



(a) PH (Niederschlag)

(b) PH (Wind & Globalstrahlung)

(c) HS Kompaktstation

Abbildung 3.1.: UG Bad Reichenhall - Wetterstationen

3.1.2. Wetterstation Hochstaufen

Eine weitere Kompaktwetterstation wurde auf dem 1.771 müNN hohen Hochstaufen (HS) installiert (Abbildung 3.1). Hier wurden für die weiteren Untersuchungen lediglich die Niederschlags- und Temperaturdaten verwendet. Das Auslesen der Daten erfolgte manuell im wöchentlichen Rhythmus. Die Station wurde nicht während der Wintermonate betrieben, da sie nicht beheizt werden konnte und keine Datenübertragung innerhalb dieser Zeit möglich war. Der Standort wurde gewählt, um die ausgeprägte Topographie des UG besser erfassen zu können. Das Ziel war es, mit den dort gemessenen Daten den Einfluss orographischer Niederschläge quantifizieren zu können. Da orographische Niederschläge durch das Aufsteigen feuchter Luftmassen, verbunden mit Abkühlung und Kondensation an Gebirgen verursacht werden, entstehen dort Stauniederschläge von unterschiedlicher Dauer und Intensität. Aufgrund dieser orographischen Effekte sind die Niederschlagssummen im Bergland im Mittel höher und sollten mit Hilfe dieser Station berücksichtigt werden (BÁRDOSSY, 2003).

3.1.3. Predigtstuhlbahn

An einer Kabine der Predigtstuhlbahn wurde eine Wetterschutzhütte installiert, in der ein Sensor zum Messen der rF und T_a installiert wurde (Abbildung 3.2). Die Stromversorgung der Messtechnik wurde über eine Autobatterie im Inneren der Kabine gewährleistet, wo außerdem ein Luftdrucksensor und Datenlogger mit GSM-Datenfernübertragung untergebracht war. Dadurch war eine kontinuierliche Messung und automatische Datenübertragung per E-Mail möglich.



(a) Messaufbau an der Kabine

(b) Streckenverlauf der Seilbahn

Abbildung 3.2.: UG Bad Reichenhall - Messtechnik Predigtstuhlbahn

Der Messbereich zwischen der Talstation (476 müNN) und der Bergstation (1.583 müNN) betrug somit etwa 1.100 m. Die Messdaten für die Höhenprofile lagen lediglich für die Betriebszeiten der Seilbahn vor, welche bei guten Wetterbedingungen von 8:00 Uhr bis 16:00 Uhr (MEZ) waren. Der Messaufbau wurde ebenfalls nicht über die Wintermonate betrieben, da die Gefahr einer Beschädigung der Messsensoren aufgrund der Witterungsverhältnisse zu groß war. In welcher Form die hiermit gewonnenen Messdaten Verwendung innerhalb dieser Untersuchung fanden, wird detailliert in Kapitel 7 erläutert.

3.2. Hydrologische Messtechnik

Die Installation von hydrologischer Messtechnik beschränkte sich auf den Flusslauf des Seebachs, der wie in Kapitel 2.2.4 erwähnt bis dahin ein unbeobachtetes Gewässer war. Dabei wurden, wie in Abbildung 2.7 zu sehen, insgesamt vier Pegelmessstellen entlang des Seebachs eingerichtet, welche ihrer Lage nach von oberstrom nach unterstrom die Namen Thumsee, Messwehr, Pegelhaus und Nonn haben. Eine Übersicht der eingerichteten Messstellen im UG ist in Abbildung 3.3 gegeben.

Am **Pegel Pegelhaus** bestand bereits eine Messvorrichtung zur Messung des Wasserstandes

mit Hilfe der Einperlmessung, welche durch die Stadt Bad Reichenhall betrieben wird. Allerdings dienten die Messungen bis dahin lediglich der Überwachung einer Abwasserpumpstation für die Kläranlage und hatte für die Hydrologie des Seebachs keine Relevanz. An dieser Messstelle mussten, außer einer regelmäßigen Entfernung des Uferbewuchses und der Verkrautung im Gewässer, während der Projektlaufzeit keine weiteren baulichen Maßnahmen vorgenommen werden.



(a) Pegel Thumsee



(b) Pegel Messwehr



(c) Pegel Pegelhaus



(d) Pegel Nonn

Abbildung 3.3.: UG Bad Reichenhall - Pegelmessstellen Seebach

Am **Pegel Thumsee** wurde eine Drucksonde zum Messen der Änderungen des Seespiegels im Thumsee installiert. Die in Abbildung 3.3 gezeigte Stelle ist der Ausfluss des Seebachs aus dem Thumsee, wo auch die in Kapitel 3.3 beschriebenen Abflussmessungen durchgeführt wurden. Diese Stelle entspricht nicht ganz der Position der Drucksonde, weshalb diese nur relative Wasserstände aufgezeichnet hat. Durch das Vermessen des Pegelnullpunktes am Pegel Thumsee konnten dort mit Hilfe der Messdaten der Sonde die tatsächlichen Wasserstände berechnet werden.

An der **Pegelmessstelle Messwehr** konnte ein bereits vorhandener Geschiefbefang nach

geringen baulichen Umbaumaßnahmen genutzt werden. Die Überfallkante des Wehrs wurde durch das Einsetzen eines Bretts und das rückseitige Verfüllen mit Sandsäcken verbessert (Vgl. Abbildung 3.4). Es wurde ebenfalls eine Drucksonde installiert, die die relativen Wasserstände im Staubereich des Wehrs maß. Außerdem wurde ein Lattenpegel angebracht, welcher eine schnelle visuelle Überprüfung der Wasserstände ermöglichte. Als Pegelnullpunkt wurde das eingesetzte Brett definiert, für welche die tatsächlichen Wasserstände berechnet wurden.



(a) Pegel Messwehr (vorher)

(b) Pegel Messwehr (nachher)

Abbildung 3.4.: UG Bad Reichenhall - Umbau am Pegel Messwehr

Der **Pegel Nonn** ist die letzte Messstelle entlang des Seebachs, bevor dieser in die Saalach mündet. Wie in Abbildung 3.3 zu erkennen ist, hat dieser Pegel ein klares rechteckiges Profil und besitzt zudem eine ebene und stabile Sohle, weshalb die hier gewonnenen Messwerte direkt als die tatsächlichen Wasserstände verwendet werden konnten. In Nonn wurde ebenfalls ein Lattenpegel zur visuellen Überwachung und ein Schwimmerpegel zum Messen der Wasserstände angebracht. Der Einsatz eines Schwimmerpegels wurde an dieser Stelle aufgrund der potentiellen Vereisungsgefahr des Gewässers gewählt, um einen Schaden an der Messtechnik abzuwenden.

3.3. Abflussmessungen

Durch die Messungen an den Pegeln lagen kontinuierliche Wasserstands-Zeitreihen vor, welche für die hydrologische Modellierung in Abflusszeitreihen umgerechnet werden mussten. Aus diesem Grund waren während der gesamten Projektlaufzeit Abflussmessungen nötig, um sogenannte Wasserstand-Abfluss (WQ)-Beziehungen für jeden einzelnen Pegel aufstellen zu können.

Die Messungen wurden mit Hilfe eines hydrometrischen Flügels realisiert. Die diskontinuierliche Punktmessung wurde je nach Wassertiefe als eine Ein-Punkt- oder Zwei-Punkt-Messung an den jeweiligen Lotrechten durchgeführt. Durch die Messung wurde die mittlere Fließgeschwindigkeit an den einzelnen Messlotrechten bestimmt. Die Messlotrechten wurden in 10 cm- bzw. 20 cm-

Schrittweiten festgelegt, um Unregelmäßigkeiten im Querschnitts- und Geschwindigkeitsprofil bestmöglich zu erfassen. Des Weiteren sind Vorgaben wie eine möglichst parallele, laminare Anströmung und stabile Profilbedingungen, sprich keine Veränderungen durch Sohlerosion, Verlandung oder Verkrautung, eingehalten worden. Die Berechnung des Gesamtabflusses (Q_{ges}) in m^3/s erfolgte durch die Summierung der Teilabflüsse (Q_i), wobei diese durch die Mittelung der gemessenen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit zwischen zwei Lotrechten erfolgt ist (LUBW, 2002).

In Tabelle 3.1 ist eine Übersicht gegeben, die die Anzahl an Messungen an den einzelnen Pegeln beinhaltet und die kleinsten und größten gemessenen Wasserstände (W) und Abflüsse (Q) an den einzelnen Pegeln beinhaltet.

Pegel- name	Anzahl d. Messungen	Minimum		Maximum	
		W [m]	Q [m^3/s]	W [m]	Q [m^3/s]
Thumsee	9	0,168	0,139	0,258	0,344
Messwehr	12	0,055	0,144	0,280	0,841
Pegelhaus	12	0,434	0,141	1,265	1,348
Nonn	12	0,370	0,257	0,730	2,039

Tabelle 3.1.: Übersicht zu den Abflussmessungen (UGBR - Seebach)

Für die in Kapitel 4.2 gezeigten Abflusskurven ist zum einen die Anzahl an Messungen entscheidend gewesen, aber zum anderen auch einen möglichst großen Bereich an Wasserständen und somit Abflüssen erfasst zu haben. Ausschließlich Messungen im Bereich des Trockenwetterabflusses hätten zu einer mit großen Unsicherheiten behafteten Extrapolation der Abflusskurve für HW-Abflüsse geführt.

4. Datengrundlage

In diesem Kapitel wird auf die notwendigen und verfügbaren Daten eingegangen, die als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung verwendet wurden. Dabei war es von Bedeutung, in welcher zeitlichen bzw. räumlichen Auflösung die einzelnen Daten vorlagen, um für das Zielvorhaben verwendet werden zu können.

Im Wesentlichen handelte es sich um Gebietsdaten wie digitale Höhenmodelle (DHM) und Informationen zur Landnutzung, Geologie und Bodenbeschaffenheit der beiden Untersuchungsgebiete. Für das UGN mussten zusätzlich Informationen zur Nagoldtalsperre in Form der Betriebstagebücher und der Betriebsanleitung der Talsperre beschafft werden. Außerdem waren meteorologische und hydrologische Eingangsdaten für die Modellierung notwendig, wobei es sich hauptsächlich um Niederschlags-, Temperatur- und Abflussdaten handelte.

4.1. Datenverfügbarkeit

4.1.1. Gebietsdaten

Ein DHM ist die Grundlage eines rasterbasierten, verteilten hydrologischen Modells. Weitere Gebietskenngrößen, wie etwa EZG, Gefälle, Fließlängen und -geschwindigkeiten können aus dem DHM mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) abgeleitet werden.

Die räumliche Auflösung spielt dabei abhängig von der Zielsetzung der Modellierung eine primäre Rolle. Die Auflösung des Modells sollte hoch genug sein, um die räumliche Variabilität, sofern sie das hydrologische Modell beeinflusst, zu erfassen. Eine detaillierte Auflösung führt jedoch zwangsläufig zu einem höheren Rechenaufwand. Die angemessene Auflösung korrespondiert mit der größten Zellgröße, welche noch grundlegende Charakteristiken des Gebiets und der räumlichen Verteilung wiedergibt. Wenn durch eine höhere Auflösung der Informationsgehalt nicht zunimmt, macht eine detailliertere Auflösung keinen Sinn (VIEUX, 2004).

4.1.1.1. UG Nagold

Im UGN lag ein DHM mit einer räumlichen Auflösung von 1 m x 1 m von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen & Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) vor. Dabei umfasste eine Datei jeweils eine Kachel von 1 km x 1 km mit den x-, y- und z-Koordinaten, welche zur weiteren Verwendung noch bearbeitet werden mussten (siehe Kap. 4.2.1).

Die Informationen zu Einzugsgebieten, Landnutzung, Geologie, Böden und Feldkapazitäten wurden aus (LUBW, 2007) verwendet.

4.1.1.2. UG Bad Reichenhall

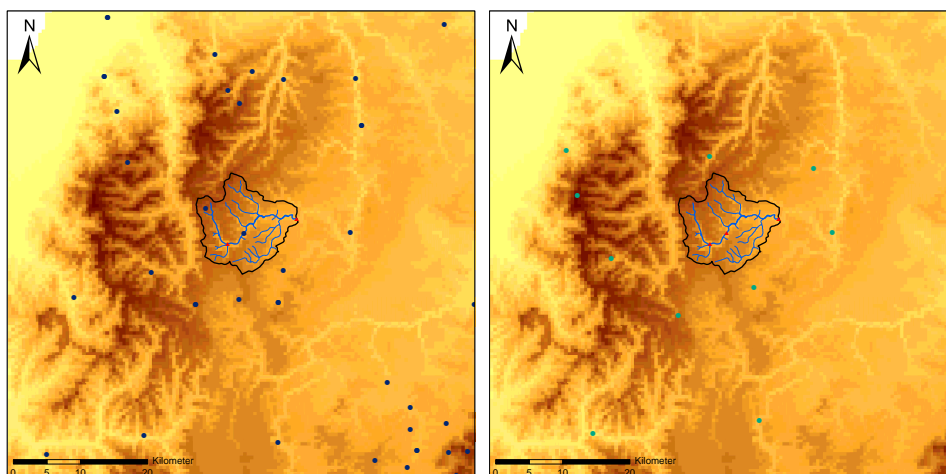
Für das UGBR stand kein hochaufgelöstes DHM wie im UGN zur Verfügung, weshalb aus frei verfügbaren Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 30 m x 30 m das DHM erstellt wurde. Die Einzugsgebiete wurden mit Hilfe von GIS abgeleitet. Die Informationen zur Landnutzung, Böden und Feldkapazitäten wurden aus (BMU, 2001) gewonnen. Grundlegende Angaben zur Geologie und der Bodenbeschaffenheit stammen aus (PFAFFL und HIRCHE, 2011).

4.1.2. Meteorologische Daten

Die Datenverfügbarkeit der meteorologischen Daten gestaltete sich räumlich als auch zeitlich als nicht einheitlich, weshalb unterschiedliche Datensätze für die hydrologische Modellierung zur Verfügung standen.

4.1.2.1. UG Nagold

Die meteorologischen Daten stammen von umliegenden Wetterstationen des DWD. Die Daten lagen in einer täglichen und stündlichen Auflösung für den Niederschlag und eingeschränkt in stündlicher Auflösung für die Temperatur vor. Von 36 Niederschlagsstationen und zehn Temperaturstationen gingen die Daten in die weiteren Berechnungen ein (Vgl. Abbildung 4.1). Es wurden HW-Ereignisse in den Jahren 1990 bis 2004 betrachtet, wobei nicht für den gesamten Zeitraum Daten an jeder Station vorlagen.



(a) Niederschlagsstationen

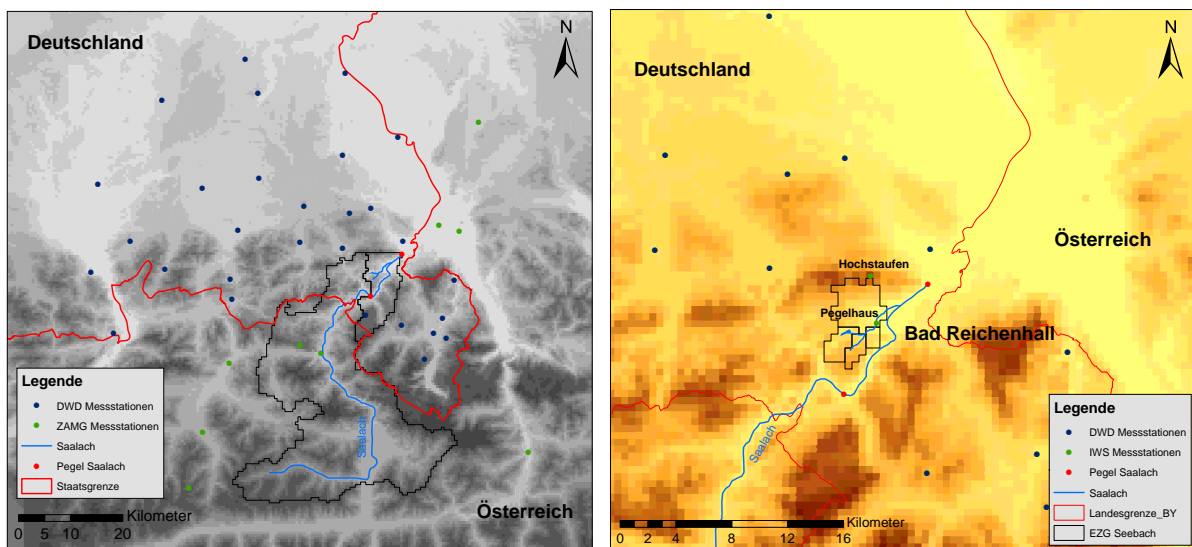
(b) Temperaturstationen

Abbildung 4.1.: UG Nagold - DWD Messstationen

4.1.2.2. UG Bad Reichenhall

Die meteorologischen Daten für das UGBR stammen ebenfalls in Teilen vom DWD. Da der größte Teil des Saalach-EZG auf österreichischem Staatsgebiet liegt (Vgl. Abbildung 2.7), wurden auch Daten von der ZAMG verwendet. Anders wäre eine räumliche Betrachtung des Niederschlags nicht möglich gewesen. Es lagen Niederschlags- und Temperaturdaten in täglicher und stündlicher Auflösung vor. Für den Modellierungszeitraum von 2000 bis 2006 standen für die Saalach 57 Niederschlagsstationen mit Tagesdaten und 39 Stationen mit Stundendaten zur Verfügung. Die Temperaturdaten gingen von 23 Stationen in täglicher Auflösung und von 21 Stationen in stündlicher Auflösung in die weiteren Berechnungen ein. Der Modellierungszeitraum des Seebachs erstreckte sich über die Jahre 2010 bis 2012, wobei 28 Niederschlags- und zehn Temperaturstationen mit Stundendaten verwendet wurden.

Eine Übersicht der Niederschlagsstationen für beide Modellierungszeiträume ist in Abbildung 4.2 gegeben, wo auch die Lage der selbst installierten Wetterstationen zu erkennen ist.



(a) EZG Saalach

(b) EZG Seebach (Ausschnitt)

Abbildung 4.2.: UG Bad Reichenhall - Messstationen

4.1.3. Hydrologische Daten

Bei den hydrologischen Daten handelte es sich um Abflussdaten in 15-minütiger oder stündlicher Auflösung. Die Daten für das **UG Nagold** an den drei Pegeln Erzgrube-Zulauf, -Auslauf und Altensteig (Vgl. Abbildung 2.3) wurden von der LUBW bereit gestellt. Die Abflussdaten für das **UG Bad Reichenhall** an den Pegeln Unterjettenberg und Staufeneck an der Saalach stammen vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU). Die Wasserstandsdaten am Pegel Pegelhaus (Seebach) wurden von der Stadt Bad Reichenhall zur Verfügung gestellt.

4.1.4. Daten zur Talsperre

Trotz vorhandener Talsperre führten HW-Ereignisse in den vergangenen Jahren, insbesondere die Ereignisse vom Februar 1990 und Dezember 1993, zu erheblichen Schäden. Neben den von der DVWK 231 (1995) vorgeschriebenen jährlichen Sicherheitsberichten wurde im Jahr 2002 eine vertiefte Sicherheitsprüfung der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau durchgeführt (GIESECKE, 2002). Sie wurde aufgrund anstehender Erhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten und Änderungen der Bemessungsgrundlagen von Talsperren als notwendig erachtet. Bei der Einbindung der Talsperre in das hydrologische Modell wurden sowohl die alten, bis 2001 geltenden Betriebsvorschriften zur Steuerung und Bewirtschaftung, als auch die neuen berücksichtigt. Die in Kapitel 5.1.1 erläuterten Belastungsszenarien wurden mithilfe der neuen, aktuell gültigen Betriebsvorschriften berechnet. Allerdings erfolgte die Kalibrierung des hydrologischen Modells auf Basis der alten Betriebsvorschriften, da sich die Referenzszenarien vor der Einführung der neuen Talsperrensteuerung ereignet haben.

Monat	Mindestabgabe [m ³ /s]	Höchstabgabe [m ³ /s]	
		bis 2001	ab 2001
November	0,34	5,35	15
Dezember	0,34	7,47	15
≤ 15. Januar	0,34	7,47	15
>15. Januar	0,34	3,25	15
Februar	0,34	4,77	15
März	0,34	3,96	15
April	0,34	3,28	15
Mai	0,34	4,34	15
Juni	0,34	3,20	15
Juli	0,34	<3,20	15
August	0,34	<3,20	15
September	0,34	3,20	15
Oktober	0,34	3,20	15

Tabelle 4.1.: Bewirtschaftungsregeln der Nagoldtalsperre

Bewirtschaftung der Talsperre

Die in Kapitel 6.1.1.3 erläuterte Speichersimulation der Füll- und Ablassvorgänge in der Talsperre wurde nach folgenden Bewirtschaftungsregeln durchgeführt (TALSPERRENBUCH, 1999):

- Einhalten der Mindestwasserabgabe und nach Möglichkeit Unterschreitung der Maximalabgabe
- Nachfahren der Volumensollganglinie, bei Einhaltung der Mindestwasserabgabe und Unterschreitung des Maximalabflusses

- Beckeneinstau in den gewöhnlichen Hochwasserschutzraum, wenn der Zufluss am Pegel Erzgrube-Zulauf den Maximalabfluss übersteigt
- Abwirtschaften des Beckenvolumens auf die Volumensollganglinie nach einem HW mit einer maximalen Absenkgeschwindigkeit des Wasserspiegels in der Talsperre von 20 cm/d.

In Tabelle 4.1 sind nochmals die Bewirtschaftungsregeln für die Mindest- und Höchstabgaben für die einzelnen Monate nach der alten und neuen Betriebsvorschrift aufgeführt.

In Abbildung 4.3 sind graphisch der Verlauf der Sollganglinie des Wasserstands, der Mindestfüllung und verschiedene Stauziele dargestellt. Dabei liegt das außergewöhnliche Stauziel bei einem Wasserstand von 549 müNN. Ab diesem Wasserstand springt die Hochwasserentlastung an.

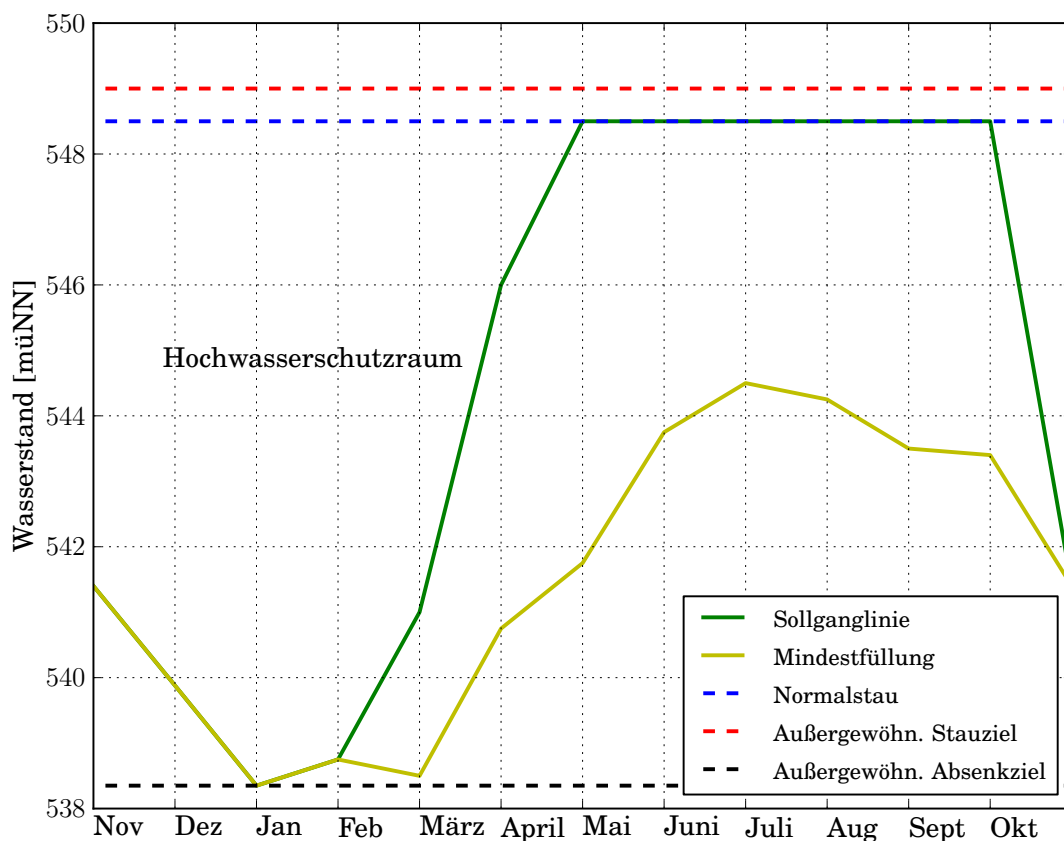


Abbildung 4.3.: Ganglinien des Wasserstands und Stauziele (Nagoldtalsperre)

Die Beziehung zwischen Wasserstand und Stauinhalt bzw. Stauffläche ist in Abbildung 4.4 gegeben. Das maximale Volumen der Talsperre beträgt etwa 4,3 Mio. m³. Die Hauptsperre hat im Normalstau eine Fläche von 376.000 m² (EPPLER, 2001).

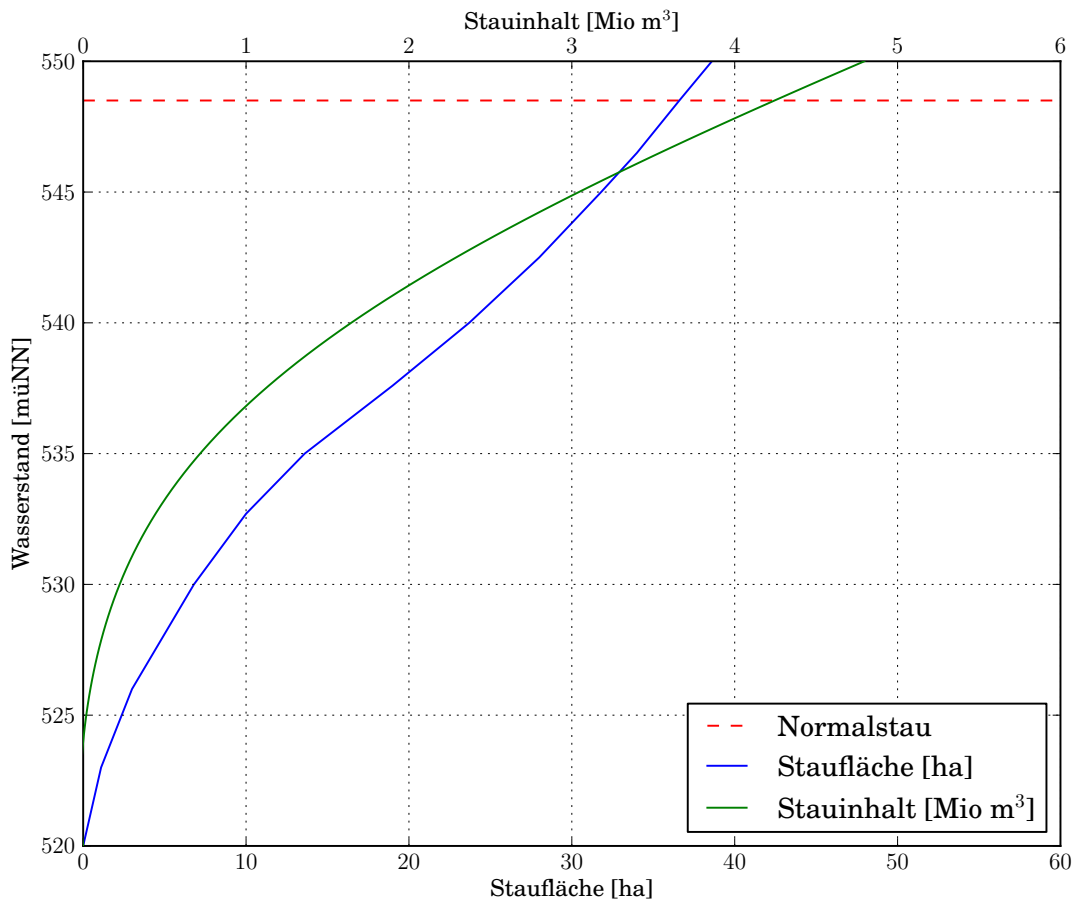


Abbildung 4.4.: Stauinhalts- und Staufflächenkennlinie (Nagoldtalsperre)

4.1.5. Eigene Messdaten

Eigene Messdaten standen nur im UGBR zur Verfügung. Dabei lagen die für die hydrologische Modellierung relevanten Niederschlags- und Temperaturdaten an den Wetterstationen Pegelhaus und Hochstauen in 5-minütiger Auflösung vor. Die kontinuierlich gemessenen Wasserstände an den Pegeln Thumsee, Messwehr und Nonn entlang des Seebachs wurden in 5- bzw. 15-minütiger Auflösung aufgezeichnet.

4.2. Datenaufbereitung

Bei den zur Verfügung stehenden Daten war teilweise eine Aufbereitung notwendig, um sie für die hydrologische Modellierung verwenden zu können. Dabei handelte es sich z.B. um die Aggregation von Zeitreihen der meteorologischen und hydrologischen Messdaten in die richtige zeitliche Auflösung. In den Untersuchungen wurden Zeitschritte von einem Tag (1d) und einer Stunde (1h) verwendet. Außerdem musste die räumliche Auflösung der Gebietsdaten, wie z.B. das DHM oder die Landnutzung auf die des Modells angepasst werden. Des Weiteren

waren Daten, die lediglich als Punktinformation, wie z.B. Niederschlags- und Temperaturdaten vorlagen, mit einem geeigneten Interpolationsverfahren in eine räumliche Struktur zu überführen. In den nachfolgenden Erläuterungen zur Datenaufbereitung wird nicht zwischen den beiden Untersuchungsgebieten unterschieden, insofern die Vorgehensweise identisch war.

4.2.1. Gebietsdaten

Die räumliche Auflösung der Eingangsdaten für das hydrologische Modell wurde mit einem Raster von 500 m x 500 m für beide Untersuchungsgebiete gewählt. Dementsprechend mussten alle Informationen zu den Gebietsdaten in diese räumliche Auflösung überführt werden. Durch die gewählte räumliche Auflösung wurde der Rechenaufwand des hydrologischen Modells effizienter, ohne dass ein relevanter Informationsverlust der hydrologischen Eigenschaften zu befürchten war.

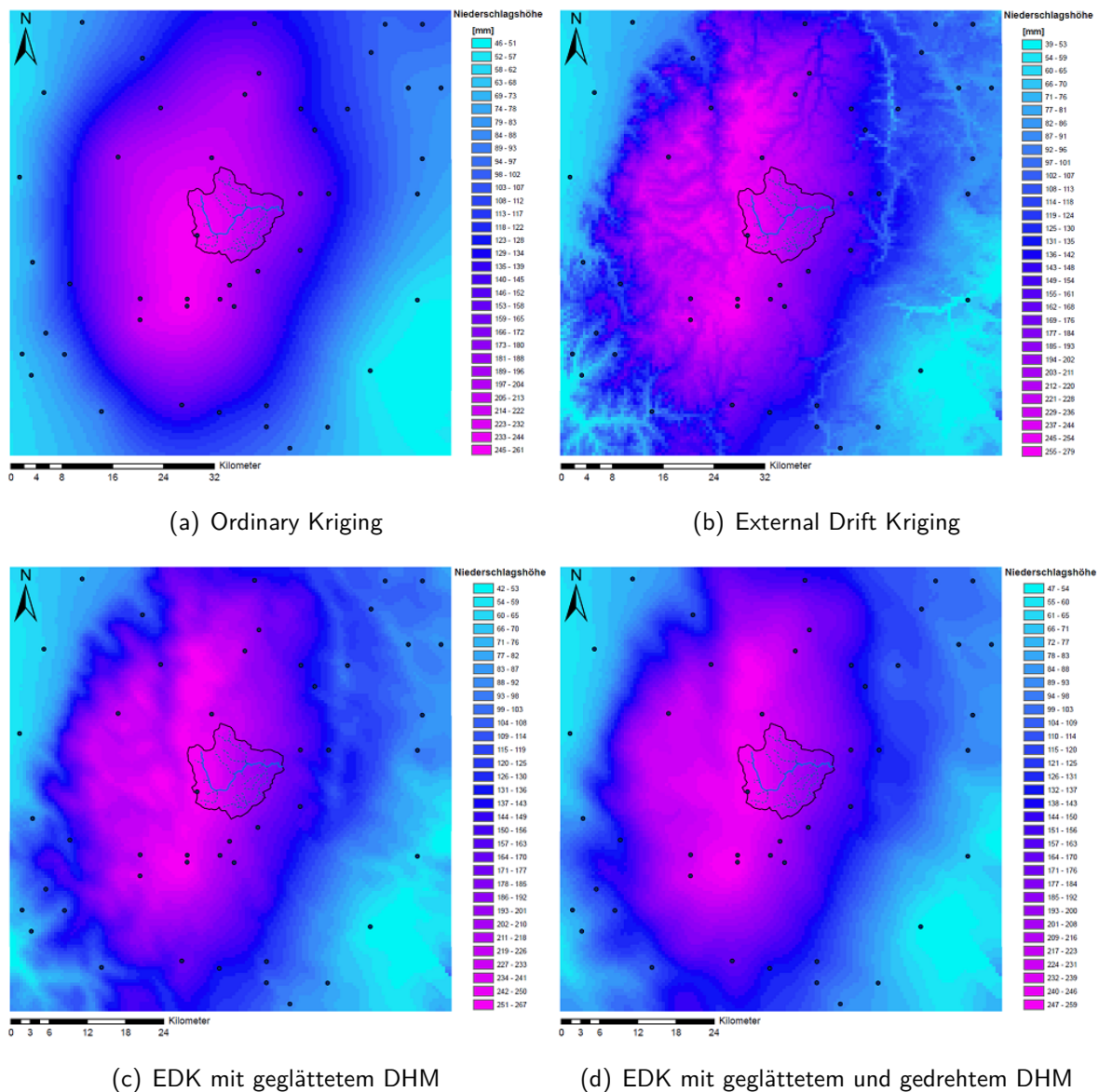


Abbildung 4.5.: Räumliche Niederschlagsberechnung

UG Nagold

Zunächst wurden die Kacheln (1 km x 1 km) mit ihrer ursprünglichen Auflösung in einem GIS zusammengefügt. Anschließend wurden die Daten des DHM durch ein Resampling in eine räumliche Auflösung von 500 m x 500 m überführt, bevor das DHM mit den EZG-Grenzen mit den einzelnen TEZG-Flächen verschnitten wurde. Somit lagen die topographischen Informationen, wie Koordinaten und Höhen, für jedes TEZG separat vor und konnten so dem hydrologischen Modell als Eingangsdaten übergeben werden.

In ähnlicher Weise wurden die Informationen der anderen Gebietskenngrößen in die erforderliche räumliche Auflösung gebracht. Dabei wurde z.B. bei der Landnutzung die dominierende Nutzungsform für die höhere Auflösung übernommen.

UG Bad Reichenhall

Die Gebietsdaten im UGBR sind in ähnlicher Weise aufbereitet worden. Allerdings lagen hier einige Informationen, wie z.B. die Landnutzung und Bodenformen nicht in digitaler Form und teilweise in sehr grober räumlicher Auflösung vor, weshalb hier mit Hilfe von Satellitenbildern manuell nachgearbeitet wurde. Die EZG der Saalach und des Seebachs wurden aus den Informationen des DHM mit speziellen Werkzeugen in GIS abgeleitet.

4.2.2. Meteorologische Daten

Die Zeitreihen der meteorologischen Daten wurden zunächst korrigiert, indem fehlende Zeitschritte mit Fehlwerten aufgefüllt und unplausibel hohe Messwerte durch Fehlwerte ersetzt wurden. Außerdem mussten die Zeitreihen teilweise auf die benötigten Zeitschritte von 1 d bzw. 1 h aggregiert werden.

Die meteorologischen Daten wie Niederschlag und Temperatur lagen wie bereits erwähnt nur als Stationswerte vor und mussten ebenfalls in eine räumliche Form überführt und mit den EZG verschnitten werden. Damit erhielt jede Rasterzelle einen Wert für Niederschlag bzw. Temperatur. Für diese Untersuchung wurden diverse Kriging-Verfahren als Interpolationsmethode für Niederschlags- und der Temperaturwerte angewandt. Kriging ist ein geostatistisches Werkzeug, welches es ermöglicht aus benachbarten Stationswerten einen Wert für einen Ort ohne Messwerte zu interpolieren. Es kam hierbei das Ordinary Kriging (OK) und External Drift Kriging (EDK) zum Einsatz. Beim EDK ging als

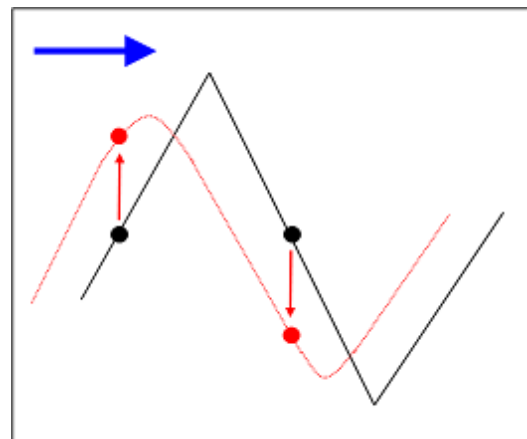


Abbildung 4.6.: Schema zur Glättung und Drehung eines DHM

Zusatzinformation, der sogenannten Drift die topographische Höhe mit in die Berechnungen ein, wodurch Höhenlagen mit mehr Niederschlag als tiefere Lagen bedacht wurden. Bei Temperaturdaten hat das EDK folglich den Effekt, dass mit der Höhe ein abnehmender Temperaturgradient berücksichtigt wird.

Für die mit dem EDK berechneten Niederschlagsverteilungen der beiden Untersuchungsgebiete wurden zusätzlich zwei weitere Methoden zur Verbesserung der Ergebnisse angewandt. Zum einen ging nicht das originale DHM in das EDK als Zusatzinformation mit ein, sondern es wurde zuvor geglättet. Dadurch wurden enge und tiefe Täler mit höheren und Höhenlagen mit geringeren Niederschlagsmengen bedacht. Zum anderen wurde das DHM in die Windrichtung der zu einem Niederschlagsereignis herrschenden Wetterlage gedreht. Die Wetterlage wurde anhand von sogenannten Circulation Pattern (CP) bestimmt. Diese Methode hatte zur Folge, dass dem Niederschlagsgebiet zugewandte topographische Erhebungen bzw. Rasterzellen (Luvseite) mit höheren und die abgewandte Leeseite mit geringeren Niederschlagsmengen bedacht wurden. Die beiden Methoden sind schematisch in Abbildung 4.6 dargestellt. Für eine vertiefende Erläuterung der eingesetzten Methoden sei auch auf (LIU, 2010) verwiesen.

In Abbildung 4.5 ist beispielhaft gezeigt, wie sich die beiden Kriging-Verfahren und die Methode mit dem geglätteten bzw. gedrehten DHM auf die räumliche Struktur des Niederschlagfeldes auswirken. Dabei ist die 7-Tagessumme des Niederschlags zu sehen, welche 1993 zu einem nennenswerten Hochwasser im UGN geführt hat.

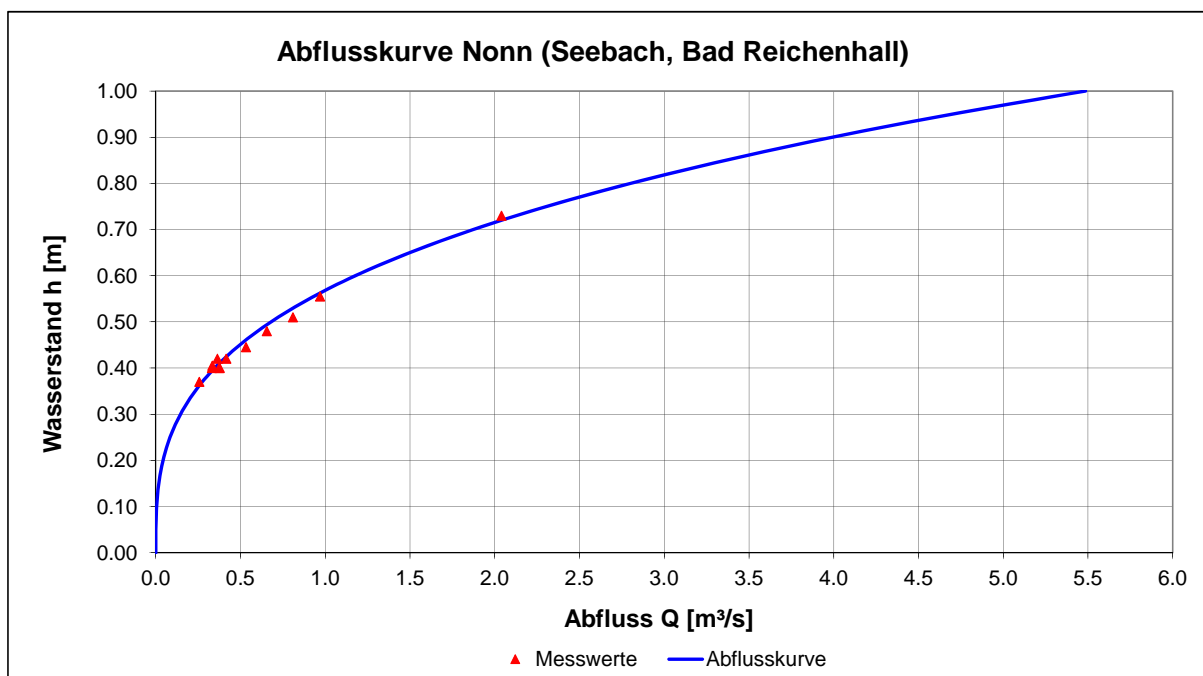


Abbildung 4.7.: Abflusskurve Pegel Nonn (Seebach)

4.2.3. Hydrologische Daten

Die Abflusszeitreihen, die von der LUBW und der LfU bezogen wurden, waren bereits geprüfte Daten und wurden nicht weiter korrigiert. Es hat lediglich eine Aggregation auf die benötigten zeitlichen Auflösungen stattgefunden.

Die Wasserstandsdaten, die an den Pegeln des Seebachs gemessen wurden, mussten mit Hilfe der Abflusskurven (WQ-Beziehungen) in Abflussdaten umgerechnet werden. Dies geschah mit den Daten der Abflussmessungen (Vgl. Tabelle 3.1), wo für bestimmte Wasserstände der Abfluss bekannt war. Durch eine Regressionsanalyse wurde für die einzelnen Punktmessungen eine Beziehung zwischen gemessenem Wasserstand und zugehörigem Abfluss bestimmt. In Abbildung 4.7 ist die Abflusskurve für den Pegel Nonn gegeben. Die Abflusskurven für die restlichen Pegel entlang des Seebachs sind im Anhang A.1 (S. 82) gezeigt.

4.3. Datenkorrektur

Wie bereits bei der Datenaufbereitung der meteorologischen Daten erwähnt wurde, mussten einige Messdaten für die weitere Verwendung korrigiert werden. Bei den von Dritten bezogenen Messdaten beschränkte sich die Korrektur auf das Auffüllen von Datenlücken mit Fehlwerten, um für jeden Zeitschritt einen Eintrag zu haben. Außerdem wurden offensichtlich unplausible Messwerte mit Fehlwerten ersetzt.

Bei den selbst erhobenen Messdaten mussten im Wesentlichen bei den hydrologischen Daten des Seebachs Korrekturen vorgenommen werden, die in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden.



(a) Sommer

(b) Winter

Abbildung 4.8.: Pegel Pegelhaus (Seebach) - Verkräutungsproblematik

4.3.1. Auffüllen von Zeitreihen

Am Pegel Thumsee wurde während der Projektlaufzeit beschlossen, die Datenspeicherung der Sonde umzustellen, um Speicherplatz zu sparen und längere Ausleseintervalle zu bekommen. Dies lies sich auch dadurch begründen, dass der Seespiegel keinen großen Wasserstandsschwankungen innerhalb kürzester Zeit ausgesetzt war. Dadurch wurden nur Messungen bei einer Wasserstandsänderung von $\Delta h \geq 0,15$ cm aufgezeichnet. Im Falle eines deutlichen Seespiegelanstiegs war somit gewährleistet, dass für jedes Messintervall Daten abgespeichert wurden und bei erhöhten Abflussbedingungen keine Informationen verloren gingen. Außerdem wurde bei einem 15-minütigen Speicherintervall mindestens jeder zehnte Messwert gespeichert, auch wenn keine Wasserstandsänderung $\Delta h \geq 0,15$ cm stattgefunden hat.

In niederschlagsfreien Zeiträumen ohne nennenswerte Seespiegeländerungen war ein Auffüllen der Messwerte erforderlich, um Wasserstandszeitreihen in der notwendigen zeitlichen Auflösung zu bekommen. Dies geschah mit einer einfachen linearen Interpolation der aufgezeichneten Messwerte. Da das gewählte Δh sehr klein gewählt wurde, können durch diese Auffüllmethode entstandene Fehler vernachlässigt werden.

4.3.2. Verkrautung

Die Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss unterliegt bei den meisten Fließgewässern einer mehr oder weniger großen zeitlichen Veränderung. Durch das Pflanzenwachstum während der Vegetationsperiode können sich die hydraulischen Verhältnisse verändern. Die Querschnittsfläche wird z.B. durch den Bewuchs eingeengt, so dass bei gleichem Abfluss ein höherer Wasserstand zu beobachten ist. Unter solchen Bedingungen können sich die WQ-Beziehungen innerhalb und außerhalb der Vegetationsperiode deutlich unterscheiden, was bei einer Nichtberücksichtigung dieses Effekts zu Fehlern bei der Berechnung der Abflüsse führen kann.

Der Gewässerabschnitt des Seebachs am Pegel Pegelhaus unterliegt einem großen Verkrautungseinfluss, was sehr gut in Abbildung 4.8 zu erkennen ist. In Abbildung 4.9 ist die Wasserstandsganglinie für die Vegetationsperiode im Jahr 2011 gezeigt, bei der während der Sommermonate ein kontinuierlicher Anstieg des Wasserstands stattfand. Aus diesem Grund lag es auf der Hand, dass eine ganzjährig gültige Abflusskurve zu Fehlern in den Abflusszeitreihen

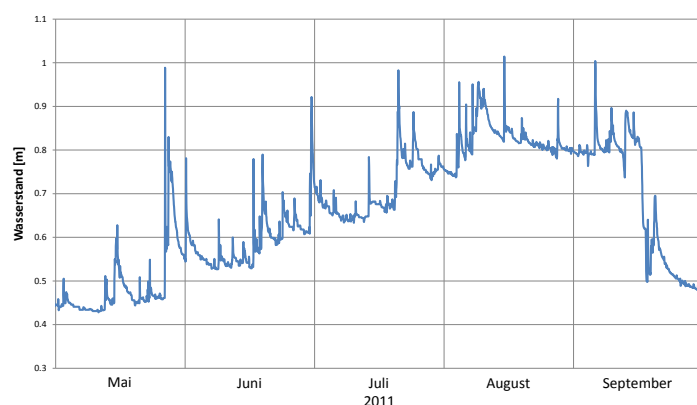


Abbildung 4.9.: Wasserstandsganglinie Pegel Pegelhaus (Seebach)

führen würde. In Abbildung 4.10 sind die Datenpunkte der Abflussmessungen und die daraus generierte Abflusskurve zu erkennen. Man kann erkennen, dass bei gleichen Wasserständen deutlich unterschiedliche Abflüsse gemessen wurden.

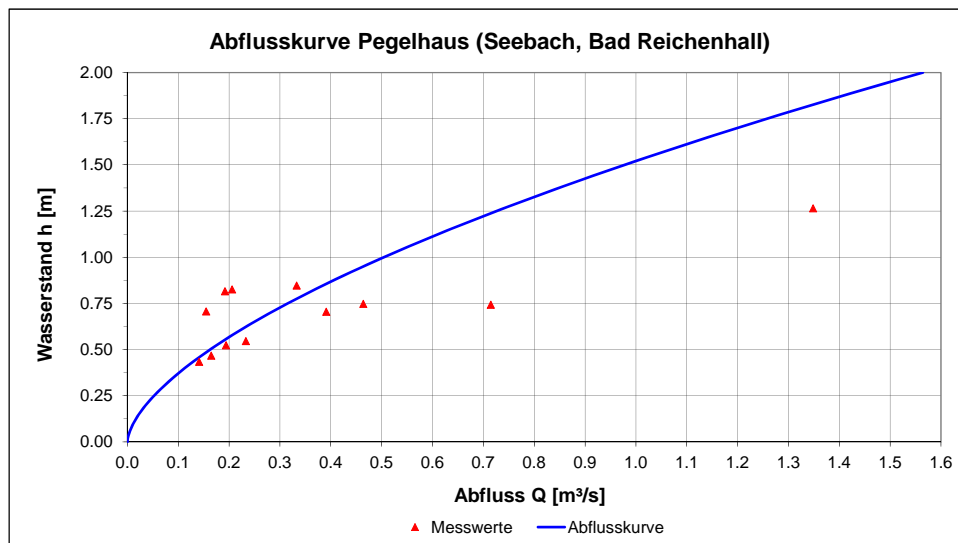


Abbildung 4.10.: Abflusskurve Pegel Pegelhaus (Seebach)

Aus diesem Grund war eine Korrektur der WQ-Beziehung notwendig und wurde mit dem sogenannten Eta-Verfahren (η -Verfahren) durchgeführt. Dabei wurden die Werte der Abflussmessungen jeweils den Sommer- bzw. Wintermonaten zugeordnet und die Abflusskurve in eine Sommer- (Q_o) und Winterkurve (Q_u) unterteilt (Vgl. A.2.1, S. 83). Dadurch stand eine Abflusskurve ohne und eine bei maximal wirksamer Durchflussbehinderung zur Verfügung. Diese Korrektur der Abflusskurve konnte auf die gewünschte zeitliche Auflösung angewandt werden, womit die korrigierte Abflusskurve je nach η ($0 \leq \eta \leq 1$) zwischen den beiden Hüllkurven schwankte (siehe auch Anhang A.2.1, S. 83) (STEINBRÜCKE et al., 2012).

4.3.3. Unsicherheit der Wasserstand-Abfluss-Beziehung

Messfehler können sowohl bei den kontinuierlichen Wasserstandsmessungen als auch den punktuellen Abflussmessungen auftreten und zu Unsicherheiten in der Abflusskurve führen. Diese Unsicherheiten bei der Wasserstandsmessung sind z.B. abhängig von der Wassertiefe sowie den pegelspezifischen Eigenschaften. Dabei handelt es sich nicht um kleine Wasserstandsschwankungen, die durch Wellenbildung verursacht und weitestgehend durch die Mittelwertbildung eliminiert werden können, sondern um konstante Abweichungen des Messwertes vom wahren Wert, wie z.B. verursacht durch stehende Wellen (LUBW, 2004).

Für die hydrologischen Daten des Seebachs wurde lediglich die Unsicherheit bei der Abflussmessung und deren Einfluss auf die Ergebnisse untersucht. Dabei enthält die Abflussmessung eine Vielzahl an Unsicherheiten, die man zusammenfassend als Durchflussmessfehler $u_{(ISO748)}$

bezeichnet. Sie basieren auf der Grundlage der ISO 748 und setzen sich aus einem systematischen und einem zufälligen Fehler zusammen.

Der systematische Fehler $u_{(ISO748)s}$ ist ein fester Wert, der nicht von der Anzahl der Messungen abhängig ist. Durch eine korrekte Durchführung der Messungen mit dem geeigneten Verfahren und exakten Kalibrierung der Messgeräte kann er jedoch reduziert werden.

$$u_{(ISO748)s} = \pm \sqrt{f_c^2 + f_a^2 + f_i^2} \quad [\%]$$

mit

f_c :	Genauigkeit der Kalibrierung	(0,5 %)
f_a :	Flächenfehler	(2,0 %)
f_i :	Unsicherheit Impulszählgerät	(0,5 %)

Der zufällige Fehler $u_{(ISO748)z}$ ist kein fester Wert. Seine Ursache liegt in unvermeidlichen Ungenauigkeiten der Messgeräte, des Beobachters und anderen Zufälligkeiten bei der Messung. Er kann durch steigende Anzahl an Messwiederholungen verringert werden (LUBW, 2004).

$$u_{(ISO748)z} = \pm \sqrt{f_v^2 + \frac{1}{L} (f_b^2 + f_t^2 + f_e^2 + f_p^2 + f_c^2)} \quad [\%]$$

mit

f_v :	Anzahl der Lotrechten	(3,0 - 20 %)
f_b :	Breite des Messquerschnitts	(1,0 - 13 %)
f_t :	Tiefe des Messquerschnitts	(0,1 - 10 %)
f_e :	Messdauer in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit	(6,0 - 50 %)
f_p :	Messpunkte je Lotrechte	(5,0 - 15 %)
f_c :	Fließgeschwindigkeit	(2,0 - 18 %)
L :	Anzahl der Lotrechten	

Im Anhang A.2.2 (S. 84) sind die Messunsicherheiten für einige Parameter der Abflussmessung aufgeführt, die besonders für die Messstellen am Seebach von Bedeutung waren.

5. Hydrometeorologische Belastungsszenarien

Für die Kalibrierung der hydraulischen Modelle im UG Nagold und UG Bad Reichenhall wurden bestimmte HW-Ereignisse ausgewählt, auf denen auch der Fokus bei der Kalibrierung des hydrologischen Modells lag. Diese HW-Ereignisse dienten als Grundlage für die spätere Ableitung der hydrometeorologischen Extremszenarien. Diese Extremereignisse sollten es ermöglichen, realistische bis dato unbeobachtete HW-Ereignisse abzubilden und deren Folgen auf die EZG und deren Infrastruktur abschätzen zu können.

Von Seiten des Arbeitspakets „Meteorologie und Hydrologie“ wurden sowohl stationäre Scheitelabflüsse als auch instationäre Abflusszeitreihen bereitgestellt.

5.1. Referenzszenarien

Die Auswahl der Referenzszenarien erfolgte nach den Zielsetzungen des jeweiligen Untersuchungsgebiets. Die Kriterien für die ausgewählten HW-Ereignisse werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

5.1.1. UG Nagold

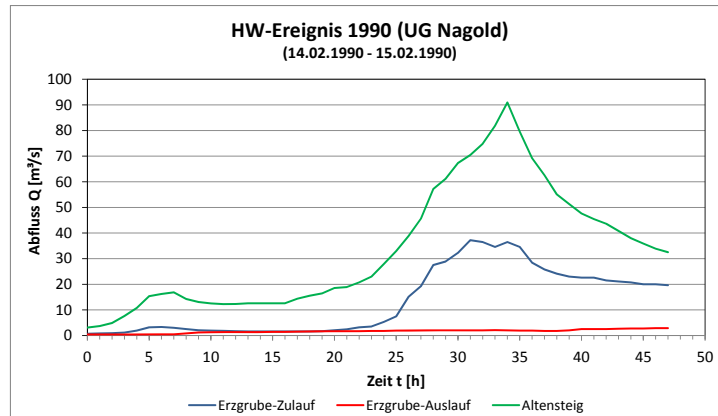
Die ausgewählten HW-Ereignisse im UG Nagold sind die seit höchsten Beginn der Aufzeichnungen am Pegel Erzgrube-Zulauf im Jahr 1969 gemessenen Abflüsse (Vgl. Abbildung 2.4). Der Scheitelabfluss betrug im Jahr 1990 $37 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Jahre 1993 $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Dabei wurden beide Ereignisse durch unterschiedliche Randbedingungen und Witterungsverhältnisse verursacht.

Starker Vorregen und mehrere Tage anhaltender intensiver Regen bewirkten 1993 einen hohen Sättigungsgrad des Bodens. In den höheren Lagen fiel der Niederschlag überwiegend als Schnee, welcher allerdings bis zum 19. Dezember wegschmolz und zusätzlich zur Sättigung des Bodens beitrug. Dies führte dazu, dass zum Zeitpunkt des Scheitelabflusses am Abend des 20. Dezembers der Niederschlag auf einen nicht mehr aufnahmefähigen Boden fiel und somit fast der gesamte Niederschlag abflusswirksam wurde. Ausschlaggebend für die verheerenden Schäden durch das HW war aber die zweite Abflussspitze am darauffolgenden Tag. Das Wasser floss durch die natürliche Versiegelung des Bodens sehr schnell ab (GEWÄSSERDIREKTION, 1997).

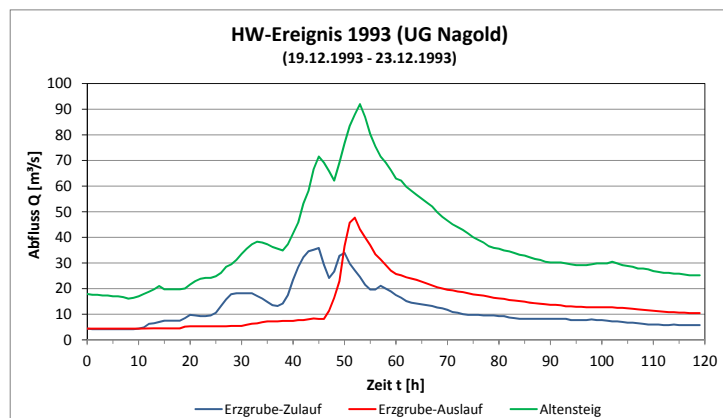
Zusätzlich konnte die zweite Abflussspitze durch die Steuerung der Nagoldtalsperre nicht mehr abgefangen werden, was ein Anspringen der Hochwasserentlastung zur Folge hatte, was

maßgeblich zu den Überschwemmungen unterhalb der Talsperre beitrug.

Das HW-Ereignis von 1990 wurde durch wenige Stunden anhaltende, jedoch recht intensive Regenereignisse verursacht. Insbesondere in den höheren Lagen fiel der Niederschlag teilweise als Schnee. Verursacherin der extremen Abflussspitze war die durch die Temperaturschwankungen über den Tag bedingte Schneeschmelze, die zusätzlich den starken Regenfällen überlagert war (GEWÄSSERDIREKTION, 1997).



(a) HW-Ereignis 1990



(b) HW-Ereignis 1993

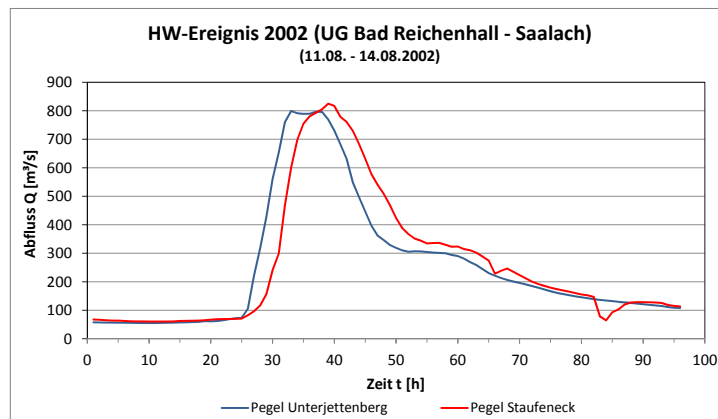
Abbildung 5.1.: UG Nagold - HW-Referenzszenarien

Diese Ereignisse zeigen typische HW-Potentiale für die Lage dieses EZG, denn beide Ereignisse fanden, verbunden mit Schneeschmelze in den Wintermonaten statt. Dies ist ein charakteristisches Verhalten für im Mittelgebirge gelegene EZG mit hohem Waldanteil (GIESECKE, 2002). In Abbildung 5.1 sind die Abflussganglinien der beiden Ereignisse für alle drei berücksichtigten Pegel im UG gezeigt. Dort kann man erkennen, dass bei dem HW 1993 ein starker Anstieg des Abflusses am Pegel Erzgrube-Auslauf stattfand, was das Anspringen der Hochwasserentlastung wiedergibt. Zu diesem Zeitpunkt herrschten unkontrollierte Abflussbedingungen, was einem Szenario für die weiteren Berechnungen entspricht. Vergleicht man nun die beiden HW-Ereignisse miteinander, kann man erkennen, dass am Pegel Altensteig fast identische Spitzenabflüsse aufgetreten sind. Allerdings trug bei dem Ereignis von 1990 das TEZG oberhalb der Talsperre

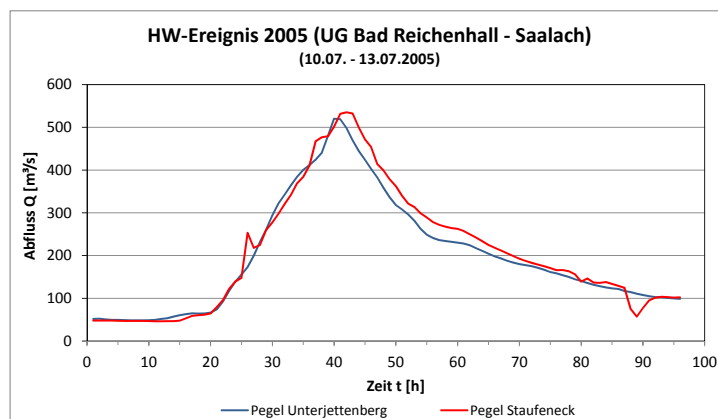
kaum etwas zu diesem Ereignis in Altensteig bei, da wie man an den Abflussdaten des Pegels Erzgrube-Auslauf erkennen kann, nur die konstante Höchstabgabe durchgeleitet wurde. Deshalb wurde solch eine Konstellation als weiteres Szenario gewählt, bei dem extreme großflächige Niederschläge ein nennenswertes HW auslösten, ohne dass zwangsläufig die HW-Entlastung angesprungen ist.

5.1.2. UG Bad Reichenhall

Im UG Bad Reichenhall wurden als Referenzszenarien HW-Ereignisse mit einem Scheitelabfluss am Pegel Unterjettenberg (Saalach) von $805 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Jahr 2002 und eines mit $520 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Jahr 2005 ausgewählt (siehe Abbildung 5.2). Frühere Spitzenabflüsse wurden nicht betrachtet, da diese Ergebnisse für die hydraulische Modellierung nicht brauchbar waren. Die Saalach unterliegt aufgrund ihrer alpinen Charakteristik einem sehr variablen Sediment- und Geschiebetransport, was über die Zeit zu bedeutenden Sohlveränderungen führen kann. Daher hätten die zur Verfügung stehenden Sohlspiegellagen für die hydraulische Modellierung unter Umständen keine Gültigkeit gehabt und zu Fehlern in den Ergebnissen geführt.



(a) HW-Ereignis 2002



(b) HW-Ereignis 2005

Abbildung 5.2.: UG Bad Reichenhall - HW-Referenzszenarien

Die HW-Ereignisse wurden durch advective und länger andauernde Niederschlagsereignisse ausgelöst. Die Schneeschmelze spielte keine Rolle, da beide Ereignisse in den Sommermonaten stattfanden.

Für das EZG des Seebachs boten sich andere Voraus- und Zielsetzungen als bei den beiden größeren EZG. Einerseits waren für den Seebach keine langjährigen Abflusszeitreihen vorhanden und somit gab es auch keine amtlichen Jährlichkeiten für HW-Ereignisse bzw. keine Auswahl an gemessenen Extremabflüssen. Andererseits sollte der Fokus dieses sehr kleinen EZG auf sogenannten Sturzfluten liegen, welche in der Regel durch sehr kurze und intensive konvektive Niederschlagsereignisse ausgelöst werden. Deshalb wurden aus den zur Verfügung stehenden eigenen Messreihen vier HW-Ereignisse zur genaueren Untersuchung ausgewählt. Dabei ließen sich zwei der dazugehörigen Niederschlagsereignisse als advektiv und zwei als konvektiv einstufen. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass keines der vier Ereignisse zu Überschwemmungen im UG geführt hat.

5.2. Extremwertstatistik

Um der hydraulischen Modellierung Anhaltswerte für Extremabflüsse mit einer Wiederkehrzeit von mehr als 100 Jahren (HQ_{100}) liefern zu können, wurde eine Extremwertstatistik durchgeführt. Somit konnten Scheitelabflüsse eines Hochwassers mit einer Jährlichkeit von größer als HQ_{100} als Wert für stationäre hydraulische Berechnungen verwendet werden.

Bei der Anpassung der theoretischen an die empirische Verteilungsfunktion der maximalen Jahresabflüsse wurden die Gumbel-, die 2-parametrische Exponential-, die Pareto- und die Weibullverteilung als statistische Verteilungsfunktionen getestet. Als Parameterschätzverfahren kam die Momenten-Methode (MM) und die Maximum-Likelihood-Methode (MLM) zum Einsatz. In Tabelle 5.1 sind die mit der 2-parametrischen Exponentialverteilung und Momenten-Methode berechneten Jährlichkeiten an den Pegeln im UG Nagold gegeben. Es ist eine gute Übereinstimmung mit den amtlichen statistischen HW-Werten (Vgl. Tabelle 2.1) zu erkennen.

Pegel	Erzgrube-Zulauf	Altensteig
HQ_{1000}	54,6	134
HQ_{500}	49,4	121
HQ_{200}	42,5	104
HQ_{100}	37,2	91,4
HQ_{50}	32,0	78,7
HQ_{10}	19,8	49,3

Tabelle 5.1.: Extremwertstatistik der HW-Abflüsse am Pegel Erzgrube-Zulauf und Altensteig

Für die Pegel an der Saalach konnte kein Vergleich gemacht werden, da dort keine amtlichen Werte vorlagen. Aufgrund der Datenlage konnte nur für den Pegel Unterjettenberg eine Extremwertstatistik durchgeführt werden. Es standen hierfür die maximalen Jahresabflüsse von 110 Jahren zur Verfügung. Hier wurde die Gumbel-Verteilungsfunktion mit beiden Parameterschätzverfahren (MM oder MLM) gewählt.

Für beide Schätzverfahren zeigte der Kolmogorow-Smirnow-Test (KS-Test) eine gute Übereinstimmung der theoretischen mit der empirischen Verteilungsfunktion. Die Tabelle 5.2 zeigt die sich daraus ergebenden Jährlichkeiten der HW-Abflüsse am Pegel Unterjettenberg.

HW-Jährlichkeiten	Gumbelverteilung	
	MM	MLM
HQ ₁₀₀₀	1112	1043
HQ ₅₀₀	1029	967
HQ ₂₀₀	919	867
HQ ₁₀₀	836	791
HQ ₅₀	752	714
HQ ₁₀	555	534

Tabelle 5.2.: Extremwertstatistik der HW-Abflüsse am Pegel Unterjettenberg, Saalach

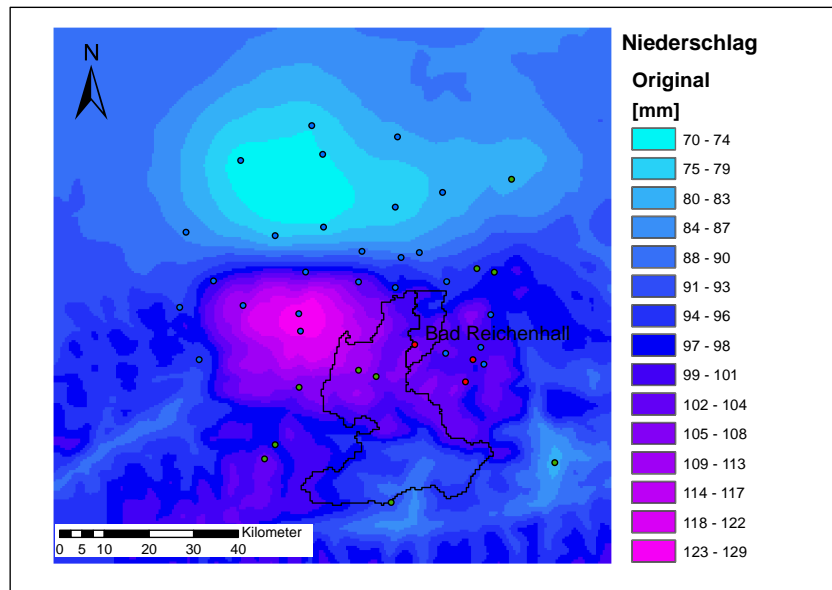
5.3. Hydrometeorologische Extremereignisse

In diesem Abschnitt wird auf die Generierung der Extremniederschlagsereignisse eingegangen. Die dazugehörigen Ergebnisse der modellierten HW- Ereignisse werden in Kapitel 6 gezeigt.

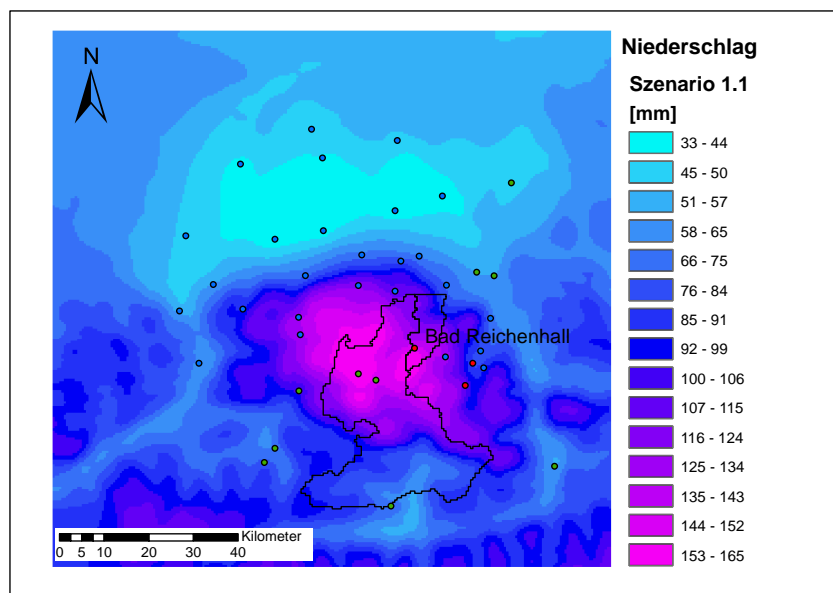
Die im Kapitel 5.1 beschriebenen Referenzszenarien für beide Untersuchungsgebiete wurden künstlich erhöht. Die Vorgehensweise war grundsätzlich für beide UG identisch, wobei im UG Nagold noch einige zusätzliche Modifikationen vorgenommen wurden, die im Folgenden weiter erläutert werden. Prinzipiell wurde der zeitliche Verlauf und die Intensität, der den Referenzszenarien zugrundeliegenden Niederschlagsereignissen übernommen. Dies waren für das UG Nagold die HW-Ereignisse von 1990 und 1993 und im UG Bad Reichenhall das Ereignis von 2005 an der Saalach und ein Starkregenereignis im Jahr 2012 am Seebach.

Die Erhöhung der synthetischen Niederschlagsreihen erfolgte mit Werten aus (KOSTRA, 2005), welche eine Datenbank des DWD mit Starkniederschlagshöhen für Deutschland ist. Die Ausgabe der bundesweiten räumlichen Starkniederschlagsverteilungen erfolgt in Kartendarstellungen mit einer Auflösung der Rasterflächen von 71,5 km². Mit KOSTRA stehen für diese Rasterflächen Starkniederschläge mit unterschiedlichen Dauerstufen und Jährlichkeiten zur Verfügung. Die Werte für die Starkniederschläge können räumlich sehr stark variieren, weshalb

den Niederschlagsstationen der Wert der jeweiligen Rasterfelder zugeordnet wurde, in welchem sie sich befanden. Die räumliche Variabilität konnte man besonders ausgeprägt im UG Bad Reichenhall beobachten, was sich durch die markante Topographie erklären lässt.



(a) Gemessenes Originalereignis



(b) Modifiziertes Extremereignis

Abbildung 5.3.: Generierung eines Extremniederschlagsereignisses (Beispiel)

Für die Erhöhung der Ereignisse wurden für das UGN die Maximalwerte mit einer Dauerstufe von 24, 48 und 72 Stunden und Jährlichkeiten von 100 a und 50 a aus KOSTRA entnommen. Die sich über die Dauerstufen ergebenden Summendifferenzen zwischen dem KOSTRA-Wert und beobachtetem Niederschlag wurden mit einer Gleich- oder Normalverteilung an das Ereignis angepasst und addiert. Dabei wurde beachtet, dass die Niederschlagssumme auf keinen Fall den

KOSTRA-Maximalwert für die jeweilige Dauerstufe und den möglichen stündlichen Maximalwert im betrachteten Rasterfeld überschritt. Im UGN waren, wie bereits erwähnt, auch von der Schneeschmelze verursachte HW-Ereignisse von Interesse, weshalb eine Modifikation darin bestand, die Temperaturzeitreihe zu verschieben. Dadurch fiel die Schneeschmelze mit den Niederschlagsspitzen zusammen und der Scheitelabfluss an der Nagold wurde zusätzlich erhöht. Eine weitere Konfiguration bestand darin, einem veränderten 100-jährlichen Niederschlagsereignis zusätzlich einen Vorregen mit 20-jährlicher Wiederkehrzeit vorzuschalten, um so eine bereits erhöhte Bodenfeuchte zu erzeugen.

Im UGBR wurden für die Modellierung der Extremszenarien für die Saalach die gleichen Dauerstufen wie im UGN gewählt. Hier wurde die räumliche Verteilung der Niederschlagssumme herangezogen, die das HW im Jahre 2005 ausgelöst hat. In diesem Fall wurden die Stationen, die im Bereich der höchsten Intensitäten lagen, wie bereits erläutert mit einem 100-jährlichen Niederschlag erhöht. Einige Stationen, die am Rand dieses Niederschlagsgebietes lagen, wurden zusätzlich mit einem Regen von einer 50-jährlichen Wiederkehrzeit belegt. In diesem Fall wurden nicht alle Stationen, die für die räumliche Niederschlagsinterpolation verwendet wurden, künstlich erhöht. Aufgrund des relativ großen EZG hätte die großflächige Erhöhung der Niederschläge zu einem unrealistisch hohen Niederschlagsvolumen im EZG geführt.

In Abbildung 5.3 ist anhand der Niederschlagsverteilung für das Referenzszenario für die Saalach von 2005 gezeigt, wie sich die Erhöhung des Niederschlags räumlich im UG auswirkt. Das Szenario 1.1 wurde mit einer Dauerstufe von 24 Stunden berechnet. Im Anhang B (S. 85) findet sich eine kurze graphische Darstellung über die allgemeine Vorgehensweise bei der Generierung dieser Extremniederschlagsereignisse.

Für den Seebach im UGBR wurde das gleiche Verfahren zur Erhöhung der Niederschlagsereignisse angewandt. Allerdings wurden hier mit Dauerstufen von 3 h, 6 h, 12 h und 24 h gerechnet, da hier der Fokus mehr auf kurzzeitigen Starkregenereignissen lag. Als Referenzszenario wurde hierbei ein HW im Juni 2012 genutzt.

6. Hydrologisches Flussgebietsmodell

Um die Auswirkungen der meteorologischen Extremszenarien quantifizieren zu können, musste für beide Untersuchungsgebiete ein hydrologisches Flussgebietsmodell implementiert werden. Das Ziel der hydrologischen Modellierung war es, zeitlich hochaufgelöste Abflussganglinien dieser sehr selten auftretenden Extremszenarien zu generieren und diese dem hydraulischen Modell für instationäre Berechnungen zur Verfügung zu stellen.

Dabei wurden für die beiden Untersuchungsgebiete unterschiedliche Modellansätze angewandt, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Außerdem werden anhand der Referenzszenarien die wichtigsten Ergebnisse der Modellkalibrierung und die hydrometeorologischen Extremereignisse gezeigt. Die Kenntnis der aus den Niederschlagsereignissen generierten Abflüsse in den Bach- bzw. Flussläufen bildete schließlich die Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte, d.h. die Berechnungen der zeitlichen und örtlichen Veränderungen von Überflutungshöhen, Strömungsgeschwindigkeiten und verbleibenden Mobilitätsmöglichkeiten.

6.1. UG Nagold

Der Modellansatz für das UGN bestand im Wesentlichen aus einem Einzugsgebietsmodell, welches eine Kombination aus Translations- und Retentionsmodell beinhaltet, der Speichersimulation für die Nagoldtalsperre und einem Wasserlaufmodell zur Berücksichtigung der Wellenverformung entlang der Fließstrecke zwischen den Pegeln Erzgrube-Auslauf und Altensteig. Die zeitliche Auflösung des Modells betrug eine Stunde.

6.1.1. Modellstruktur

6.1.1.1. Einzugsgebietsmodell

Das Einzugsgebietsmodell bestand aus einer Kombination aus Translationsmodell (Zeitflächendiagramm) und Retentionsmodell (Linearer Speicher). Auch in diesem Fall war es wichtig, die räumliche Variabilität der Eingangsdaten, wie Niederschlag, Temperatur etc., durch einen verteilten rasterbasierten Ansatz zu gewährleisten. Dafür wurden für jede Rasterzelle im EZG die Konzentrationszeiten (T_c) und Fließlängen bis zum Gebietsauslass (Pegel) bestimmt. Durch die daraus resultierenden Isochronenflächen konnte das EZG in Flächen mit gleicher T_c unterteilt werden. Für die Erstellung des Zeitflächendiagramms wurden unterschiedliche Varianten zur

Bestimmung der Isochronen und somit des Oberflächenabflusses angewandt (Vgl. Abbildung 6.1).

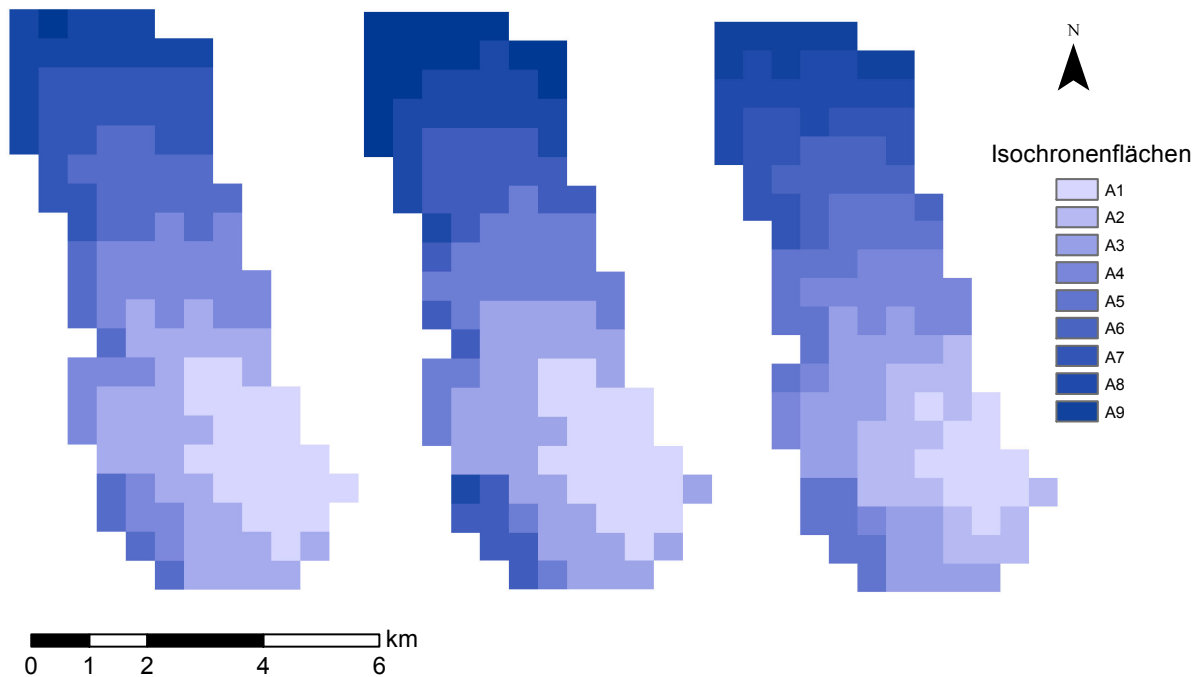


Abbildung 6.1.: Isochronenflächen der Varianten für das Zeitflächendiagramm

Die Unterschiede der Varianten zur Bestimmung der Isochronen lag neben dem Ansatz zur Berechnung der T_c mit der Formel nach Kirpich in der Berücksichtigung der Landnutzung und verschiedener Rauigkeitsbeiwerte nach Manning für den Oberflächenabfluss.

Mit dem Zeitflächendiagramm konnte der Oberflächenabfluss abgebildet werden. Für die vollständige Darstellung des Abflussvorgangs wurde das Translations- mit einem Retentionsmodell verknüpft, um so den langsameren Zwischenabfluss mit einzubeziehen. Dabei läuft ein Teil x des Effektivniederschlags (h_{Ne}) zur Berechnung des Oberflächenabflusses über das Zeitflächendiagramm. Der restliche Teil des abflusswirksamen Niederschlags $1-x$, welcher wie bereits erwähnt den Zwischenabfluss darstellt, durchläuft einen linearen Speicher (Retentionsmodell). Den gesamten Direktabfluss (Q_D) erhält man durch die Addition dieser beiden Abflusskomponenten (Vgl. Abb. 6.2).

In diesem UG traten die bedeutenden HW-Ereignisse verbunden mit Schneeschmelze im Winter auf (Vgl. Kap. 5). Deshalb musste dem Modell eine Routine für die Schneeschmelze und -akkumulation implementiert werden, die in ihrer Funktionsweise der im HBV- Modell enthaltenen Schneeroutine entspricht, welches im UG Bad Reichenhall eingesetzt wurde. Die Grenztemperatur (TT) und der Schmelzfaktor (c_{melt}) bestimmen den Vorgang der Schneeschmelze und -akkumulation. Wird die TT überschritten, so fällt der Niederschlag als Regen bzw. akkumulierter Schnee beginnt zu schmelzen. Der c_{melt} bestimmt die Schmelzrate, d.h.

wie viel mm Schnee pro Tag und °C abschmelzen. Diese Vorgänge wurden für jede Rasterzelle berücksichtigt, um auf die räumliche Variabilität des Niederschlags und der Temperatur und somit auch auf die gebirgige Topographie des EZG einzugehen.

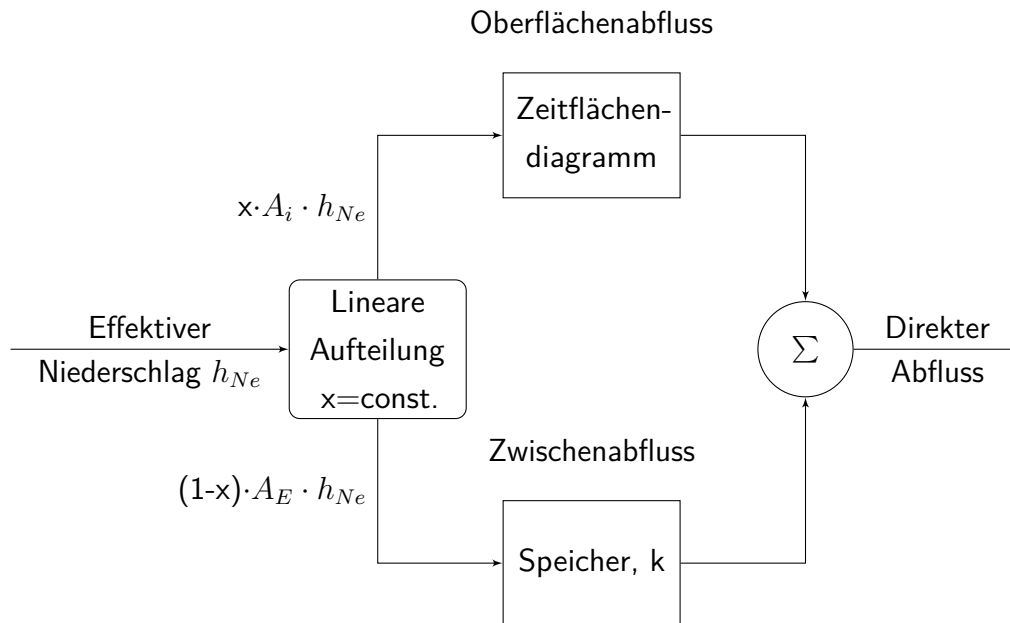


Abbildung 6.2.: Schema des angewendeten hydrologischen Modells

6.1.1.2. Wasserlaufmodell

Für die Fließstrecke der Nagold zwischen den Pegeln Erzgrube-Auslauf und Altensteig wurde für die aus der Nagoldtalsperre abgegebenen Hochwasserwellen ein Wasserlaufmodell implementiert, um die sich infolge von natürlichen Retentionseffekten im Flussbett einstellende Wellenverformungen zu berücksichtigen. Für die Modellierung der Wellenverformung kam das Muskingum-Verfahren zum Einsatz, welches bei der Parameterbestimmung laterale Zuflüsse zwischen den beiden Pegeln miteinbezogen hat.

6.1.1.3. Speichersimulation

Das Gesamt-EZG der Nagold ist bis zum Pegel Altensteig mit der Nagoldtalsperre teilweise staugeregelt (Vgl. Kap. 2.1.5 und 4.1.4). Die Talsperre hatte einen erheblichen Einfluss auf das Abflussverhalten unterstrom und musste daher in der hydrologischen Modellierung mit Hilfe einer Speichersimulation berücksichtigt werden. Der abflusswirksame Niederschlag, der über dem TEZG der Nagoldtalsperre fällt, wurde in der Volumenbilanz ebenfalls berücksichtigt. Die Simulation wurde unter strenger Beachtung der geltenden Bewirtschaftungsregeln durchgeführt. Außerdem konnten die Szenarien mit Hilfe der Speichersimulation mit den neuen Höchstabgaben gerechnet und somit verglichen werden, wie die HW-Ereignisse unter diesen Randbedingungen abgelaufen wären. Die Randbedingungen für die Speichersimulation waren mit dem vorhandenen

Speichervolumen, den gemessenen Abflusszeitreihen an den Pegel Erzgrube-Zulauf und -Auslauf und dem Direktabfluss aus dem TEZG gegeben. Für die HW-Ereignisse standen manuelle Aufzeichnungen der Wasserstände in der Talsperre zur Verfügung, welche es ermöglichten den beobachteten Wasserstandsverlauf nachzubilden. Die Speichersimulation erfolgte über eine Volumenbilanz des vorhandenen Stauraums und der Zu- bzw. Ausflüsse aus der Talsperre. Mit Hilfe der Talsperren-Kennlinien (Vgl. Abbildung 4.4) konnten die berechneten und gemessenen Wasserstände bzw. Stauvolumina miteinander verglichen werden.

6.1.2. Modellanpassung

Bei der Anpassung des Modells zum Bestimmen der besten Modellparameter kam sowohl eine automatisierte als auch eine manuelle Kalibrierung zum Einsatz. Diese Modellparameter waren notwendig, um alle hydrologischen Prozesse, welche nicht aus den Gebietsdaten heraus abzuleiten waren, beschreiben zu können.

Als Zielfunktion wurde die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet, um die Differenz zwischen modellierten und gemessenen Abflusswerten zu minimieren. Zur Bestimmung der Modellgüte wurde das Bestimmtheitsmaß (r^2) und der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (N-S) verwendet. Um die Kalibrierung des Modells durchführen zu können, mussten neben den Gütemaßen noch weitere Beurteilungskriterien hinzugezogen werden. Das Bestimmtheitsmaß und der Nash-Sutcliffe-Koeffizient bieten zwar eine gute quantitative Einschätzung der Modellgüte, weisen aber durchaus ihre Schwächen auf. So gibt der N-S-Koeffizient bei einer schlechten Modellgüte z.B. keinerlei Aufschlüsse über die Art des Fehlers. Deswegen müssen diese durch qualitative Kriterien, wie etwa der visuellen Beurteilung oder der linearen Regressionsanalyse, ergänzt werden (JAIN und SUDHEER, 2008).

Die optische Betrachtung der Ergebnisse für die modellierten Abflusszeitreihen erlaubt es, ein Gefühl für den Einfluss der verschiedenen Parameter auf das Modell zu entwickeln. Dadurch können unter Umständen nach der automatischen Parameteroptimierung manuelle Anpassungen der Modellparameter durchgeführt werden. Obwohl die visuelle Betrachtung einer gewissen Subjektivität unterliegt, erlaubt sie es, alle wichtigen Beurteilungskriterien einer guten Vorhersage zu erfassen. Hierbei waren der zeitliche Verlauf, die Höhe des Scheitelabflusses und die Dynamik der Abflussganglinie von besonderem Interesse.

6.1.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden HW-Ereignisse aus den Jahren 1990 und 1993 werden in den nachfolgenden Kapiteln gezeigt. Außerdem ist ein mögliches Extremereignis in seinem Verlauf für alle Pegel gegeben.

6.1.3.1. Belastungsszenarien

In Abbildung 6.3 sind die Modellergebnisse für die beiden Referenzszenarien am Pegel Erzgrube-Zulauf gegeben.

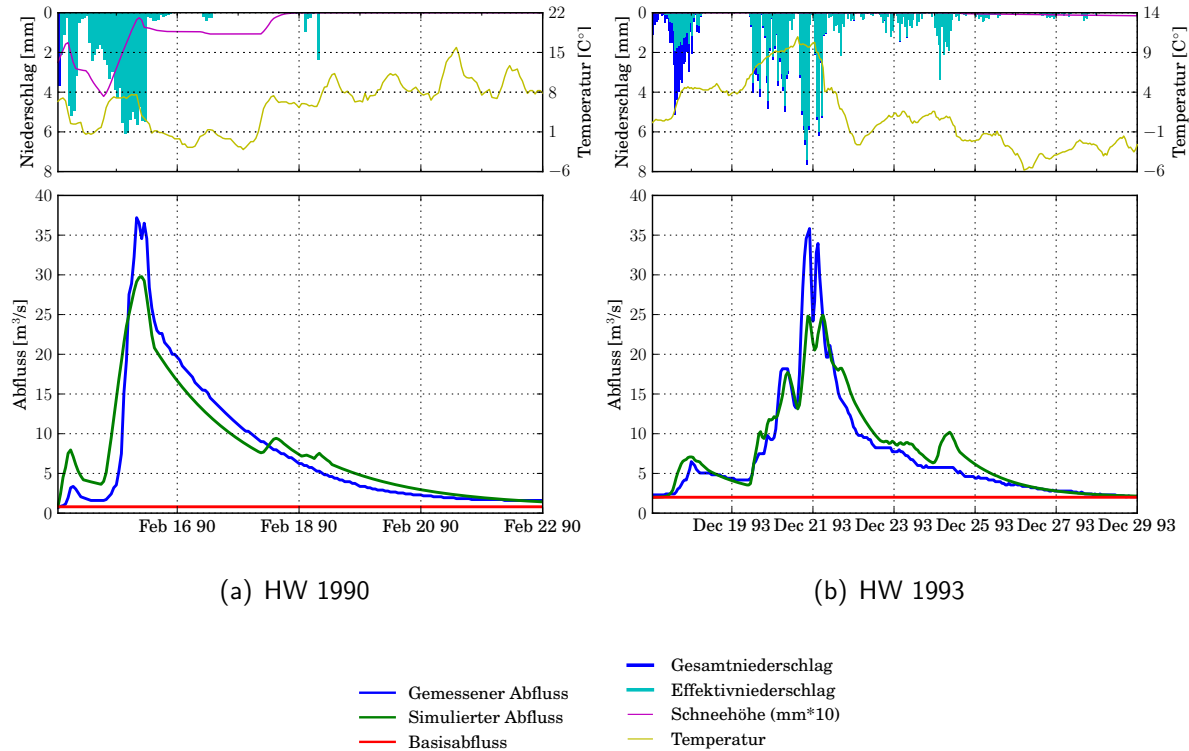


Abbildung 6.3.: Ergebnisse mit optimierten Parametern für den Pegel Erzgrube-Zulauf

Die modellierten Abflusszeitreihen zeigen bei beiden HW-Ereignissen die gleichen Merkmale. Die Dynamik sowie der Anstieg als auch der Auslauf konnten gut nachgebildet werden. Der Zeitpunkt der Abflussspitzen wurde sehr gut getroffen. Allerdings wurde der Abflussscheitel unterschätzt, obwohl hohe Werte für die Gütemaße erreicht wurden.

Ereignis	r^2	NS	V_{mes}/V_{sim}
1990	0,910	0,890	0,961
1993	0,872	0,860	0,925

Tabelle 6.1.: Modellgüte - Pegel Erzgrube-Zulauf

Am Beispiel des HW aus dem Jahre 1990 konnte durch eine manuelle Optimierung der Modellparameter eine bessere Vorhersage des Scheitelabflusses erzielt werden. Eine zusätzliche

Erhöhung konnte durch das Anpassen der Schneeparameter erreicht werden. Die Modellgüte fiel dadurch allerdings etwas schlechter aus. Das r^2 und der N-S-Koeffizient hatten Werte von 0,884 bzw. 0,877. Das Volumenverhältnis von gemessenen zu simulierten Abflüssen reduzierte sich auf einen Wert von 0,961 auf 0,953.

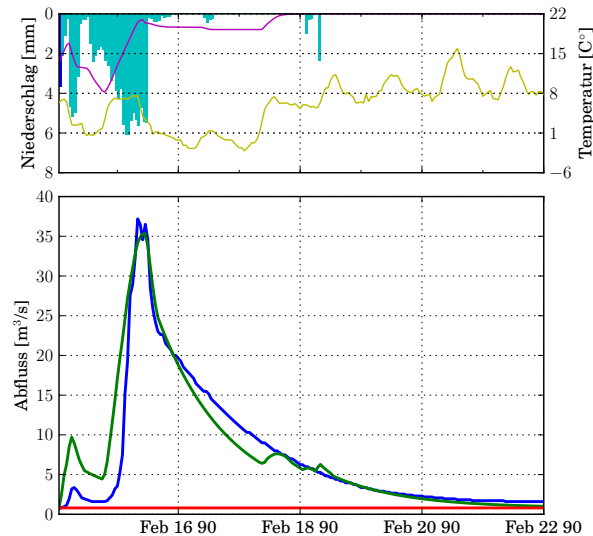


Abbildung 6.4.: HW 1990 mit manueller Kalibrierung (Pegel Erzgrube-Zulauf)

Die Wahl des Parametersatzes für eine bessere Vorhersage hängt verstärkt von der Zielsetzung der Modellierung ab. Der Pegel Erzgrube-Zulauf misst den Zufluss in die Talsperre, wobei der Anstieg und Ablauf der Hochwasserwelle für die Zielsetzung von geringerer Bedeutung waren. Für die Speichersimulation waren der Zeitpunkt und die Höhe des Scheitelabflusses sowie das Volumen des gesamten Ereignisses von besonderer Relevanz.

Die Güte der Speichersimulation wurde über die Bilanzierung der Volumina geprüft. Dabei wurde das Speichervolumen aus den Zu- und Ausflüssen über die Zeit berechnet. In Abbildung 6.5 ist der Vergleich des gemessenen und simulierten Wasserstands in der Talsperre für das HW 1990 gegeben. Der Wasserstand konnte aus der Volumeninhaltsganglinie der Talsperre bestimmt werden.

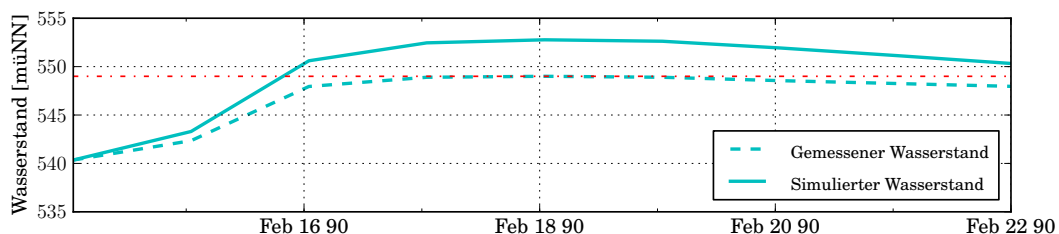


Abbildung 6.5.: Speichersimulation - Wasserstand (HW 1990)

Es ist zu erkennen, dass der gemessene Wasserstand mit bis zu 4 m mehr deutlich überschätzt wurde. Dies führte ebenfalls zu hohen Abweichungen zwischen simuliertem und tatsächlichem

Volumen. Für diese deutlichen Unterschiede konnten mehrere Faktoren ausschlaggebend sein. Eine mögliche Ursache für die Volumendifferenz konnte der Zufluss in die Talsperre sein, der zum einem aus gemessenen Abflüssen am Pegel Erzgrube-Zulauf und zum anderen aus dem berechneten Direktabfluss aus dem TEZG der Talsperre selber bestand. Außerdem waren die Annahmen über die Speicherdimensionen, wie Fläche und Speichervolumen, nur Schätzungen, was eine weitere Fehlerquelle sein konnte. Die zugrunde liegenden Wasserstandsdaten der Talsperre basierten auf manuell abgelesenen Werten an einem Lattenpegel. Dies ist eine grobe Methode zum Bestimmen des Wasserstands, was für die dortigen Anwendungen ausreichend ist, bei einer Simulation aber deutliche Abweichungen in den berechneten Volumina verursachen kann.

In Abbildung 6.6 sind der zeitliche Verlauf des Speichervolumens, des Wasserstands in der Talsperre und der Abfluss am Pegel Erzgrube-Auslauf gegeben. Es wurden die alten Bewirtschaftungsregeln der Talsperre eingehalten (Vgl. Kap. 4.1.4).

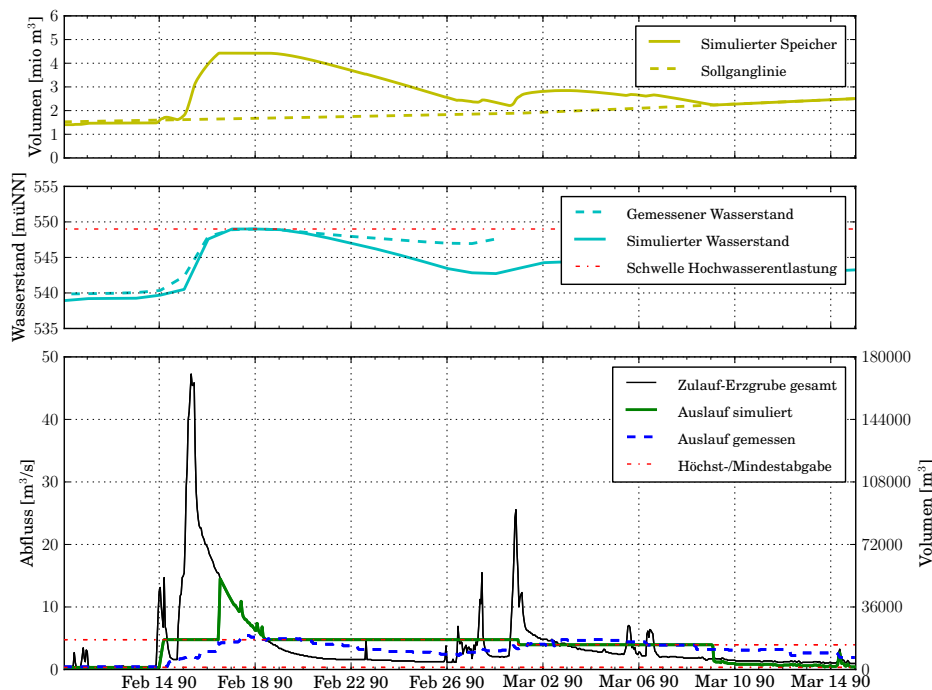


Abbildung 6.6.: Speichersimulation mit gemessenem Zulauf (HW 1990)

Es ist zu erkennen, dass in der Simulation die Höchstabgabe am 16. Februar 1990 überschritten wurde und dadurch die Hochwasserentlastung angesprochen ist. In der Simulation war das Einhalten der Sollganglinie nicht mehr möglich, womit das Volumen im Speicher zunahm. Um den Retentionsraum so groß wie möglich zu halten, wurde am Auslauf die maximale Abflussmenge abgegeben. Es zeigt sich, dass der Wasserstand im Einstau gut durch die Speichersimulation abgebildet wurde. Allerdings ist die Hochwasserentlastung im Gegensatz zur Simulation in Wirklichkeit nicht angesprochen. Somit wurde das Abflussvolumen in der Simulation überschätzt. Die Ergebnisse der Speichersimulation für das HW-Ereignis von 1993 sind im Anhang C auf

Seite 86 zu finden. Außerdem ist dort der Verlauf der HW-Ereignisse gegeben, wie sie nach den neuen Bewirtschaftungsregeln mit einer Höchstabgabe von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ verlaufen wären.

Das dritte TEZG zwischen den Pegeln Erzgrube-Auslauf und Altensteig wurde mit Hilfe des Zeitflächendiagramms in zwölf Isochronenflächen für die hydrologische Modellierung unterteilt. Nach zwölf Stunden trägt das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss bei. Die unterschiedlichen Abflusskomponenten am Pegel Altensteig setzten sich aus dem Abfluss des Zeitflächendiagramms, des linearen Speichers und dem Ausfluss aus der Talsperre zusammen. Die Gütemaße des Modells für die beiden Referenzszenarien sind in Tabelle 6.2 gegeben.

Ereignis	r^2	NS	V_{mes}/V_{sim}
1990	0,924	0,704	0,866
1993	0,955	0,750	0,810

Tabelle 6.2.: Modellgüte - Pegel Altensteig

In Abbildung 6.7 sind die Modellergebnisse für den Pegel Altensteig gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Simulationen am Pegel Altensteig das Abflussverhalten bezüglich der Dynamik, des Scheitelabflusses und der Volumina gut nachbildeten.

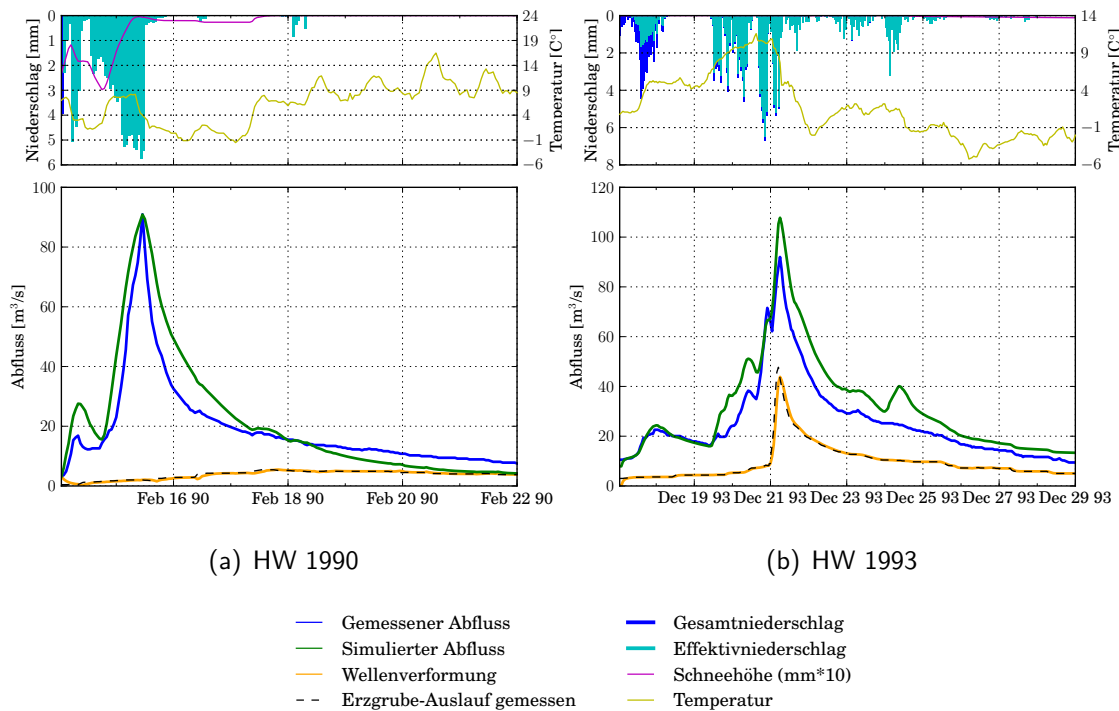


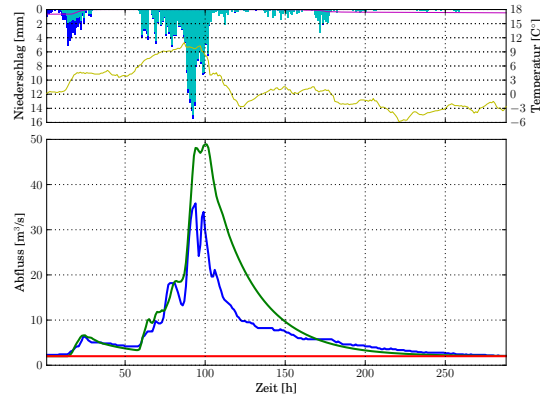
Abbildung 6.7.: Ergebnisse mit optimierten Parametern für den Pegel Altensteig

6.1.3.2. Hydrometeorologische Extremereignisse

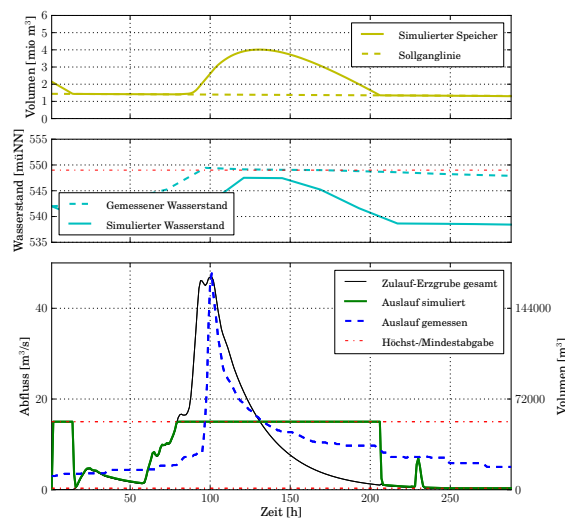
Das kalibrierte N/A-Modell diente als Basis für die Vorhersage von hydrologischen Extremereignissen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Parameter des Modells vom Vorregen und weiteren Faktoren, die den Zustand des Bodens zu Beginn des Ereignisses beeinflussen, abhängen. Für die Berechnung der Extremszenarien wurden die optimierten Parametersätze des kalibrierten Modells für das jeweilige Referenzszenario verwendet. In Abbildung 6.8 ist ein Extremszenario an allen drei Pegeln im Untersuchungsgebiet gegeben. Das zugrunde liegende Niederschlagsereignis wurde mit einem KOSTRA-Regen mit einer 100-jährlichen Wiederkehrzeit modifiziert. Es ist zu sehen, dass mit den neuen Bewirtschaftungsregeln und einer Höchstabgabe von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Erzgrube-Auslauf die Hochwasserentlastung nicht angesprungen ist.

6.1.4. Zusammenfassung

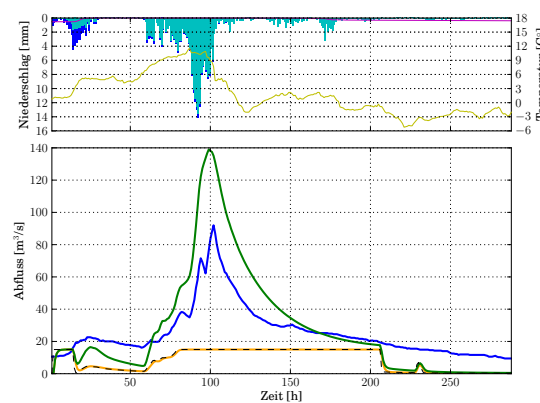
Für das UG Nagold konnte ein verteiltes hydrologisches Modell entwickelt werden, welches trotz gewisser Vereinfachungen der physikalischen Prozesse und wenigen Eingangsparametern die HW-Ereignisse gut abbilden konnte. Die Fähigkeit des Modells die Abflussvolumina, den Zeitpunkt und die Höhe des Scheitelabflusses gut modellieren zu können, war ein wichtiges Kriterium, um die generierten Abflusszeitreihen als Eingangsdaten für die hydraulische Modellierung verwenden zu können. Das Modell benötigt des Niederschlags, der Temperatur und der Landnutzung als Eingangsdaten. Die eingesetzten Gütemaße für die Modellverifizierung haben für die Referenzszenarien gute Ergebnisse wiedergegeben. Es konnte aber auch erkannt werden, dass die Scheitelabflüsse oft unterschätzt wurden, was teilweise durch eine manuelle Optimierung der Parametersätze verbessert werden konnte. Es konnte gezeigt werden, dass bei den betrachteten Ereignissen die Wahl der Parameter für die Schneeakkumulation und -schmelze einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Außerdem wurde festgestellt, dass die Temperaturdaten einen wesentlichen Einfluss auf die simulierten Ergebnisse hatten. Für die meisten Stationen lagen die Temperaturdaten nur in täglicher Auflösung vor, weshalb die Niederschläge für die Berechnung der Schneeschmelze und -akkumulation ebenfalls auf Tageswerte aggregiert wurden. Anschließend wurden diese Werte wieder auf Stundendaten disaggregiert und mit dem Regen addiert, weshalb mangels der hohen zeitlichen Auflösung der Temperaturdaten der Tagesgang verloren ging. Dadurch konnten Übergänge von Schnee in Regen oder der umgekehrte Fall aufgrund von Temperaturschwankungen während eines Tages von der Schneeroutine nicht erfasst werden. Dies war eine potentielle Fehlerquelle, dass bei einem starken Temperaturanstieg im Tagesverlauf in der Realität der Schnee in Regen übergegangen ist, das Tagesmittel der Temperatur aber noch unterhalb der TT war, und somit den ganzen Tag eine Schneeakkumulation statt -schmelze angenommen wurde.



(a) Erzgrube-Zulauf



(b) Erzgrube



(c) Altensteig

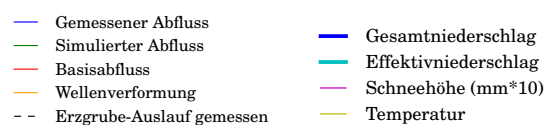


Abbildung 6.8.: Extremszenario an den Pegeln Erzgrube-Zulauf, Erzgrube-Auslauf und Altensteig

Für dieses Problem wurden die stündlichen Temperaturdaten, die für eine Station vorlagen, mit einem linearen zu- bzw. abnehmenden Temperaturgradienten auf die anderen Stationen umgerechnet. Somit lagen abgeschätzte stündliche Temperaturzeitreihen für alle Stationen vor. Dies führte zu deutlichen Verbesserungen in der Schneeroutine, da bereits geringe Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt Auswirkungen auf die Schneehöhe haben können. Allerdings waren die Ergebnisse der Schneeroutine mit diesem Ansatz nicht zufriedenstellend, da die erstellte räumliche Temperaturverteilung anhand der Pseudo-Stundendaten sehr grob sind.

Durch die Implementierung einer Speichersimulation im Modell konnte das gesamte EZG der Nagold bis zum Pegel Altensteig trotz des staugeregelten Teils der Nagoldtalsperre modelliert werden. Es konnten außerdem die alten und neuen Bewirtschaftungsregeln angewandt werden, um die unterschiedlichen Auswirkungen der HW-Ereignisse aus den Jahren 1990 und 1993 zu untersuchen. Die Speichersimulation berechnete teilweise deutliche Unterschiede in den Speichervolumina, was zum einen durch die Unterschiede der gemessenen und modellierten Zuflüsse des Pegels Erzgrube-Zulauf zustande kam, zum anderen den ungenauen Talsperren-Kenndaten geschuldet war.

Die Ergebnisse des N/A-Modells am Pegel Altensteig zeigten ebenfalls gute Ergebnisse. Die Dynamik, der zeitliche Verlauf, die Abflussvolumina und die Abflussspitzen konnten mit Hilfe des Modells gut abgebildet werden. Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass die Parameter des hydrologischen Modells zwischen den HW-Ereignissen deutlich variieren können, wodurch kein allgemeingültiger Parametersatz bestimmt werden konnte.

6.2. UG Bad Reichenhall

6.2.1. Modellstruktur

Für die hydrologischen Modellierungen im UG Bad Reichenhall wurde als N/A-Modell das HBV-IWS-Modell verwendet. Das ursprüngliche HBV-Modell wurde von (BERGSTRÖM, 1995) entwickelt und am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS) sukzessive weiterentwickelt (Vgl. Abb. 6.9). Das HBV-IWS ist ein konzeptionelles Modell und wurde für die Berechnungen in der räumlich verteilten Version auf Tages- bzw. Stundenbasis angewandt. Bei dieser Modellversion konnten Niederschlags- und Temperaturdaten rasterzellengenau als Eingangsdaten für das jeweilige TEZG im Modell berücksichtigt werden. Ebenso war dies für die physikalischen und meteorologischen Prozessgrößen, wie Topographie, Landnutzung, Feldkapazitäten, potentielle Evapotranspiration etc. möglich. Für die hydrologischen Untersuchungen lag ein Raster mit einer räumlichen Auflösung von 500 m mal 500 m zugrunde. Als Gütemaß bzw. Zielfunktion der Modellberechnungen wurde der N-S-Koeffizient verwendet.

Für die Untersuchungen im UG Bad Reichenhall wurde das HBV-IWS in zwei Punkten verändert. Zum einen wurde die Modellstruktur so angepasst, dass es möglich war, in einer stündlichen Auflösung zu rechnen, zum anderen wurden die Werte für die FC höhenpezifisch berücksichtigt und optimiert. Somit war es möglich, die ausgeprägte topographische Variabilität im EZG und die damit verbundenen Eigenschaften bezüglich der Bodenfeuchte abzubilden. Eine vertiefte Beschreibung des verwendeten Modells findet sich in (SINGH, 2010). Dort sind die Funktionsweisen und Parameter der einzelnen Modellbereiche detailliert beschrieben.

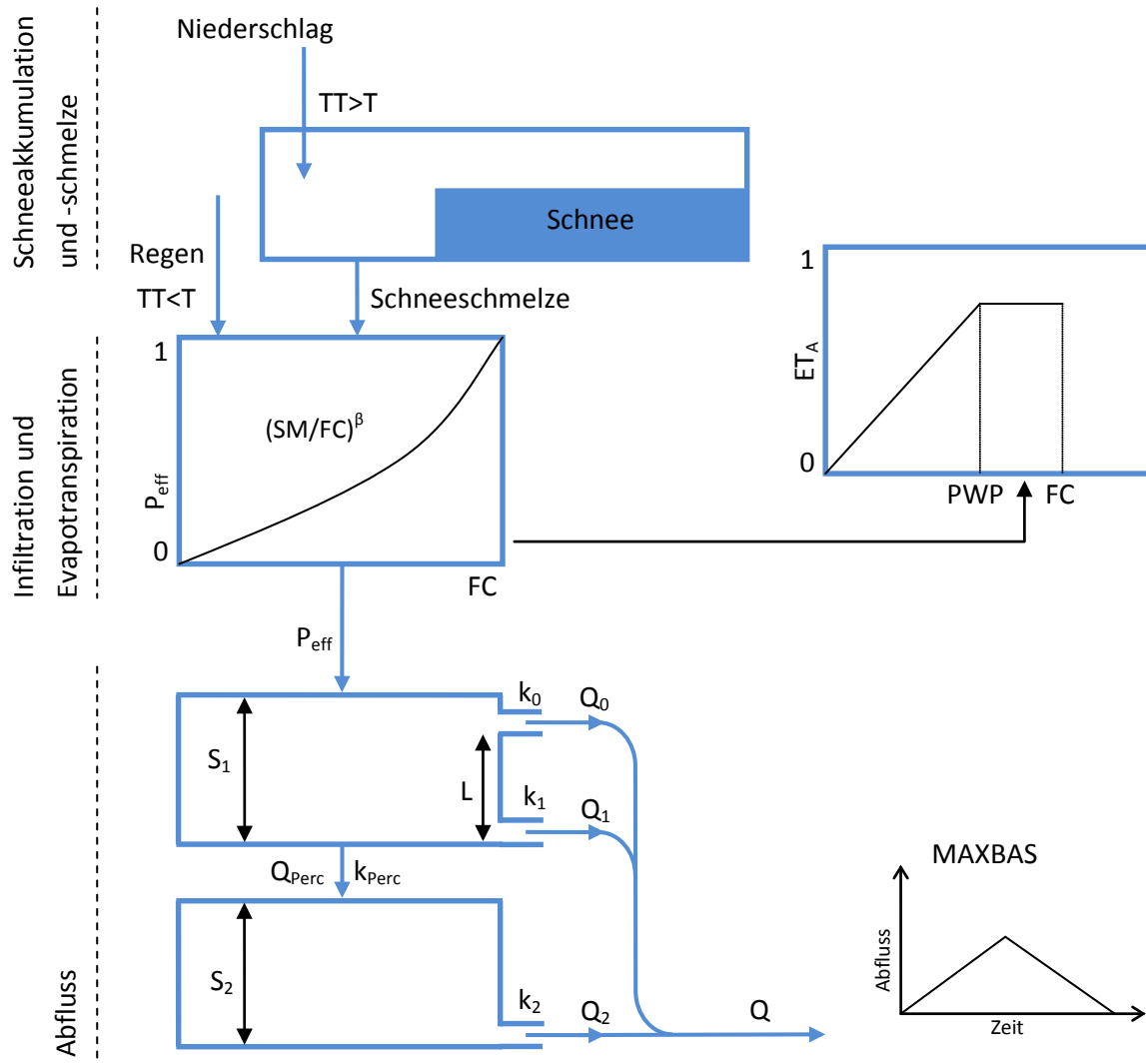


Abbildung 6.9.: Schematische Modellstruktur (HBV-IWS)

6.2.2. Modellanpassung

Das HBV-Modell wurde sowohl auf Tages- als auch auf Stundenbasis anhand der beobachteten Niederschlags-, Temperatur- und Abflusszeitreihen angepasst. Dies bedeutet, dass Modellparameter, die nicht direkt aus physikalischen Größen wie der Landnutzung direkt hergeleitet werden konnten, zunächst über eine automatische Optimierung des Modells bestimmt werden mussten.

Dabei wurden die Modellparameter gesucht, die in Bezug auf deren Verlauf und Volumen die beste Übereinstimmung von simulierten und beobachteten Abflussganglinien lieferten. Das HBV-IWS verfügt über eine automatische Kalibrierung, wobei als Optimierungsalgorithmus das „Simulated Annealing“ verwendet wird. Eine Aussage über die Modellgüte konnte anhand der Werte des N-S-Koeffizienten gemacht werden.

6.2.3. Ergebnisse

6.2.3.1. Belastungsszenarien

Saalach

Zunächst wurde das HBV-Modell auf Basis von täglichen Daten kalibriert und validiert, um die allgemeine Konfiguration des Modells auf seine Richtigkeit hin zu überprüfen. Damit konnte sichergestellt werden, dass alle Eingangsdaten und -parameter in der räumlich verteilten Version korrekt berücksichtigt wurden.

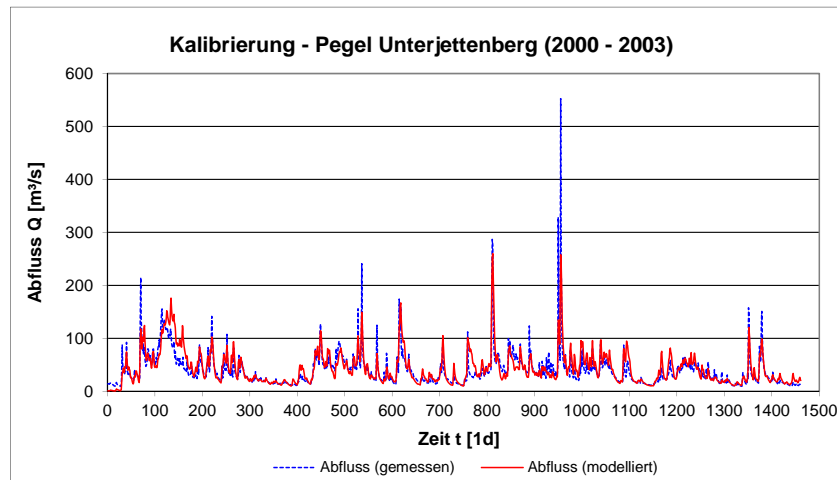
Die Ergebnisse für den Kalibrierungszeitraum von 2000 bis 2003 und den Validierungszeitraum von 2004 bis 2006 bestätigten, dass das Modell korrekt funktionierte. Der N-S-Koeffizient ergab sowohl für den Kalibrierungs- als auch den Validierungszeitraum zufriedenstellende Ergebnisse. Allerdings zeigten die modellierten Abflussganglinien gerade bei den für die Projektfragestellungen wichtigen HW-Ereignissen ihre Schwächen, da die Spitzenabflüsse im Allgemeinen deutlich unterschätzt wurden. In Abbildung 6.10 sind die Ergebnisse am Pegel Unterjettenberg, Saalach für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum gezeigt. Die Modelleregnergebnisse für den Pegel Staufeneck sind im Anhang C auf Seite 88 dargestellt. Die Werte für den N-S-Koeffizienten für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum in täglicher Auflösung sind in Tabelle 6.3 gegeben.

Pegel	Kalibrierung (2000 - 2003)	Validierung (2004 - 2006)
Unterjettenberg	0,691	0,739
Staufeneck	0,714	0,716

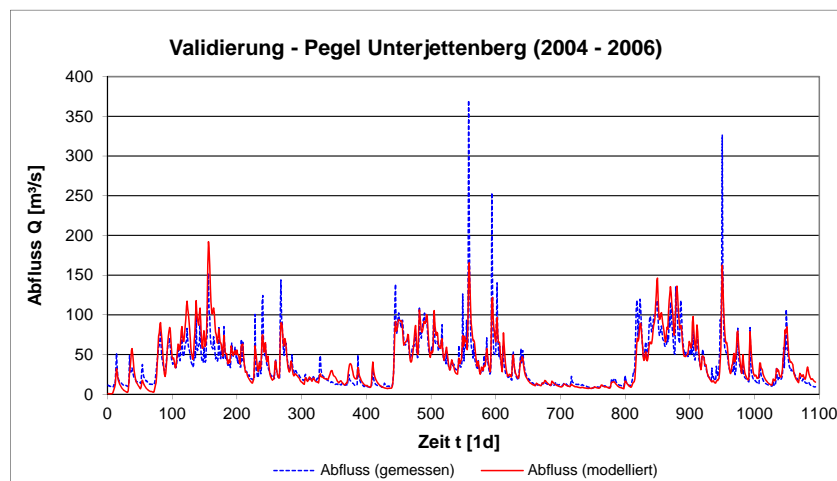
Tabelle 6.3.: Modellgüte - Saalach (Tagesdaten)

Für die Generierung der Extremszenarien waren Abflussganglinien in einer täglichen Auflösung nicht ausreichend, da diese Zeitschritte für eine genügende Vorwarnzeit und das rechtzeitige Einleiten von Evakuierungsmaßnahmen zu groß sind. In der Regel entstehen außergewöhnliche Abflusssituationen innerhalb weniger Stunden und dauern nur kurze Zeit an, was bei Tagesdaten nicht in benötigtem Maße abgebildet werden kann. Aus diesem Grund mussten HW-Ereignisse in stündlicher Auflösung kalibriert werden, um als Referenzszenario zur Verfügung zu stehen. In Abbildung 6.11 ist der Verlauf eines HW-Ereignisses aus dem Jahr 2005 und das dazugehörige

Modellergebnis am Pegel Unterjettenberg gezeigt, welches für die Generierung eines Extremereignisses an der Saalach als Referenzszenario diene. Das entsprechende Modellergebnis für den Pegel Staufeneck ist im Anhang C auf Seite 88 zu finden.



(a) Kalibrierung (2000 - 2003)



(b) Validierung (2004 - 2006)

Abbildung 6.10.: Pegel Unterjettenberg (Saalach) - Modellergebnisse (Tagesdaten)

Die N-S-Koeffizienten für das Ereignis sind in Tabelle 6.4 aufgeführt. Um den Scheitelabfluss in seiner Höhe besser berechnen zu können, wurde nach der automatischen Optimierung eine weitere manuelle Anpassung der Modellparameter vorgenommen.

Ereignis	Pegel Unterjettenberg	Pegel Staufeneck
HW_{ref} 2005	0,889	0,860

Tabelle 6.4.: Modellgüte Referenzszenario 2005 - Saalach (Stundendaten)

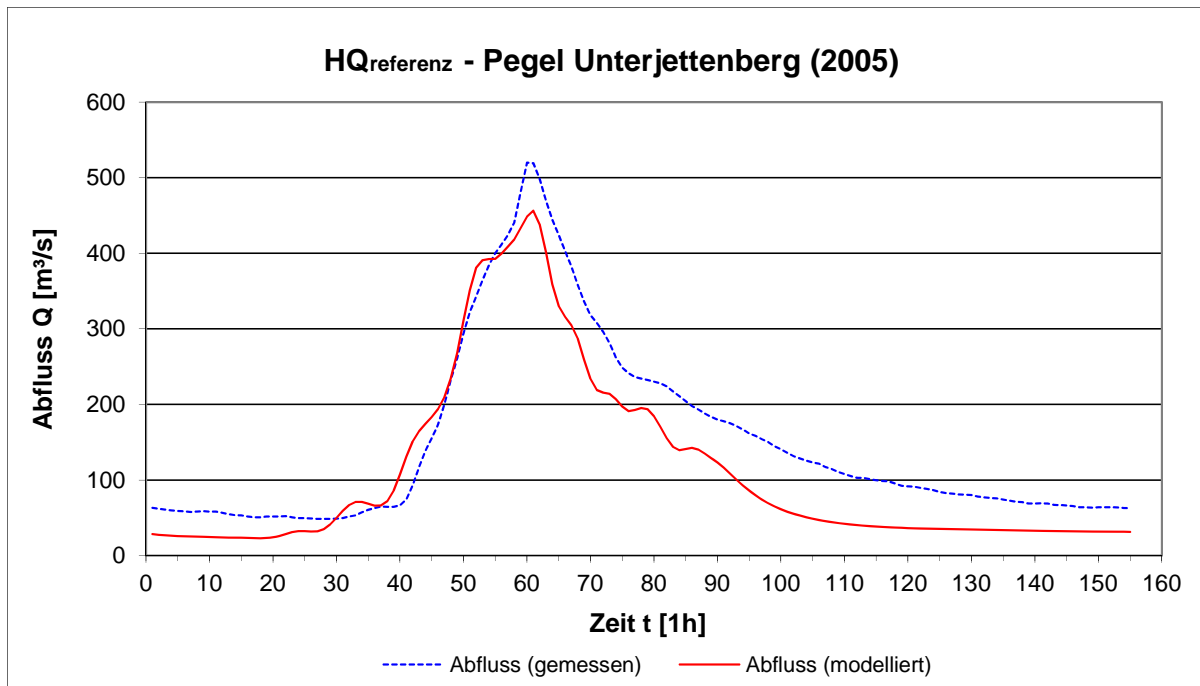


Abbildung 6.11.: Pegel Unterjettenberg (Saalach) - Modellergebnisse HQ_{ref} (Stundendaten)

Seebach

Bei der Darstellung der Modellergebnisse des Seebachs soll im Folgenden gezeigt werden, wie sich die Konfiguration der Niederschlagsstationen und die in Kapitel 4.3 beschriebenen Datenkorrekturen ausgewirkt haben. Dabei wird auch auf den Abflussbeiwert eingegangen, welcher das Verhältnis zwischen abflusswirksamem Niederschlags- und tatsächlichem Niederschlagsvolumen beschreibt. Die vier Niederschlagsereignisse, die innerhalb dieses Vorhabens eingehend untersucht wurden, unterteilen sich in zwei advective und zwei konvektive Ereignisse, deren Eigenschaften in Tabelle 6.5 dargestellt sind. Die advectiven Ereignisse haben die Nummerierung „1“ und „2“ und die konvektiven Ereignisse die Nummerierung „3“ und „4“. Die Niederschlagshöhen wurden an der Wetterstation Pegelhaus im EZG des Seebachs gemessen.

Ereignis	Niederschlagshöhe [mm]	Dauer [h]
1	91,9	42,0
2	40,8	43,0
3	31,9	2,5
4	43,6	2,0

Tabelle 6.5.: Niederschlagsereignisse - EZG Seebach

Die Konfigurationen der Niederschlagsstationen werden in der weiteren Darstellung mit römischen Ziffern versehen. Bei der Konfiguration I wurden nur die Messstationen der operationell

betriebenen Messnetze des DWD und der ZAMG für die Berechnungen der räumlichen Niederschlagsverteilungen berücksichtigt. Bei der Konfiguration II wurden zusätzlich die beiden installierten Wetterstationen Pegelhaus und Hochstaufer im UGBR mit in die Berechnungen aufgenommen. Die Konfiguration III bezog nur die Station Pegelhaus mit ein. Die mit den unterschiedlichen Stationskonfigurationen berechneten räumlichen Niederschlagsverteilungen sollten Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss die Dichte des Messnetzes auf die Modellergebnisse hat.

Nonn	Konfiguration I	Konfiguration II	Konfiguration III
Ereignis 1	0,07	0,07	0,06
Ereignis 2	0,04	0,04	0,04
Ereignis 3	0,63	0,21	0,23
Ereignis 4	0,09	0,04	0,04

Tabelle 6.6.: Messstationskonfiguration - Abflussbeiwert Pegel Nonn (Seebach)

Bei der Untersuchung der Abflussbeiwerte hat sich gezeigt, dass sich die Dichte des Messnetzes bei advektiven Niederschlagsereignissen kaum auf die Ergebnisse auswirkt. Advektive Niederschlagsereignisse treten meist großflächiger auf und sind von längerer Dauer, wodurch die kleinräumige Variabilität meist nicht sehr ausgeprägt ist und die Dichte des Messnetzes nicht zwangsläufig zu einer eindeutigen Verbesserung führt. Betrachtet man allerdings die Abflussbeiwerte der unterschiedlichen Konfigurationen für die konvektiven Niederschlagsereignisse, kann man deutliche Unterschiede erkennen. Bei den Ergebnissen der Konfiguration I muss merklich mehr gefallener Niederschlag abflusswirksam werden. In Tabelle 6.6 sind die berechneten Abflussbeiwerte für die vier untersuchten Ereignisse gezeigt.

	Thumsee		Messwehr		Pegelhaus		Nonn	
	ISO ₇₄₈	ohne	ISO ₇₄₈	ohne	ISO ₇₄₈	ohne	ISO ₇₄₈	ohne
Ereignis 1	0,14	0,08	-	-	0,07	0,06	0,07	0,07
Ereignis 2	0,05	0,03	0,10	0,09	0,04	0,04	0,05	0,04
Ereignis 3	-	-	1,69	1,52	0,66	0,59	0,67	0,63
Ereignis 4	-	-	0,15	0,13	0,09	0,08	0,09	0,09

Tabelle 6.7.: Abflusskorrektur - Abflussbeiwerte Seebach (Konfiguration I)

Tabelle 6.7 zeigt die Abflussbeiwerte der gewählten Ereignisse, die sich mit und ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Erstellen der Abflusskurve ergeben haben (Vgl. Kap. 4.3.3).

Alle Werte beziehen sich dabei auf die Stationskonfiguration I. Es ist zu erkennen, dass die Abflussbeiwerte, bei denen die Messunsicherheit nach ISO₇₄₈ berücksichtigt wurde, größer oder gleich zu den unkorrigierten Abflussbeiwerten sind. In diesem Fall wurde davon ausgegangen, dass die Abflusskurve die tatsächlichen Abflüsse unterschätzt, womit bei der Korrektur höhere Abflüsse berechnet wurden. Es kommt zu einer Erhöhung der Abflussbeiwerte, da ein größeres Abflussvolumen bzw. abflusswirksamer Niederschlag errechnet worden ist. Bei Ereignis 3 am Pegel Messwehr kann in Tabelle 6.7 erkannt werden, dass der Abflussbeiwert sogar Werte größer eins annimmt. Dies bedeutet, dass weniger gemessenes Niederschlagsvolumen als berechnetes Abflussvolumen zur Verfügung stand. Dieser Wert hat sich bei Konfiguration II auf 0,52 bzw. bei Konfiguration III auf 0,55 verbessert.

Am Pegel Pegelhaus wurde der Verkrautungseinfluss untersucht und die Abflusskurve an diesem Pegel mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Eta-Verfahren korrigiert. Die Modellergebnisse am Pegel Pegelhaus sind anhand des N-S-Koeffizienten in Tabelle 6.8 gegeben.

	Pegelhaus (gesamter Betrachtungszeitraum)
mit η -Verfahren	0,52
ohne η -Verfahren	0,02

Tabelle 6.8.: Verkrautungseinfluss Pegel Pegelhaus - Modellgüte (N-S-Koeffizienten)

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse des HBV-Modells für die unterschiedlichen Stationskonfigurationen anhand des Ereignisses 2 am Pegel Messwehr gezeigt. Dabei sind die N-S-Koeffizienten jeweils für das Ereignis und den gesamten Kalibrierungszeitraum gegeben. Im Anhang C auf den Seiten 89 ff. sind die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung für ein konvektives Niederschlagsereignis am Pegel Nonn gegeben.

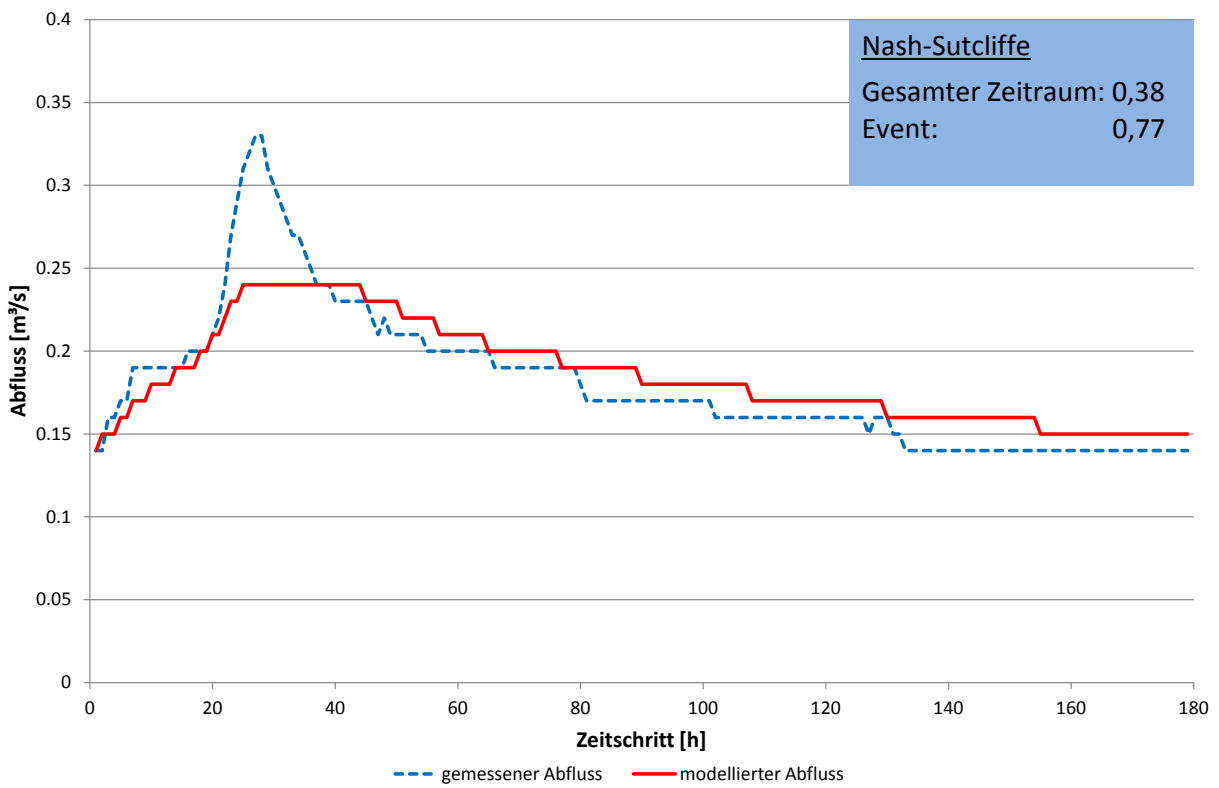
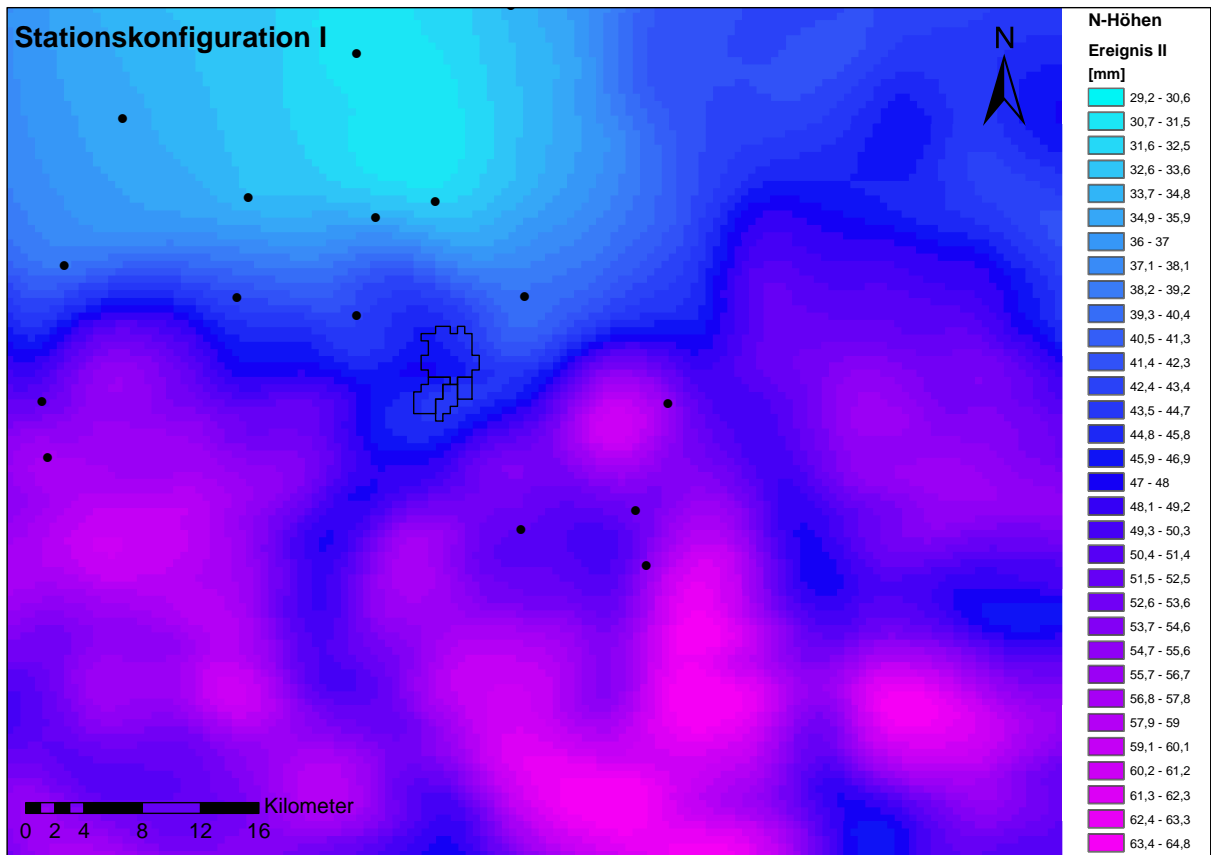


Abbildung 6.12.: Abfluss Pegel Messwehr (Ereignis 2, Konfiguration I)

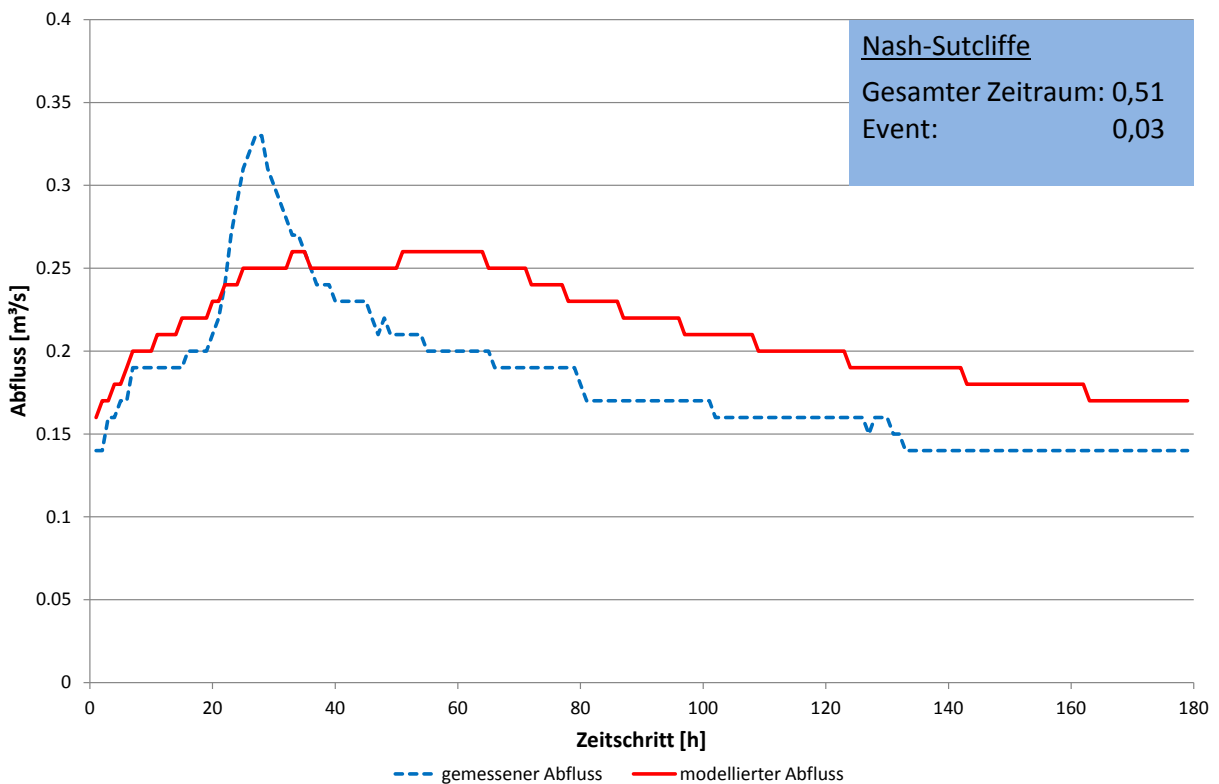
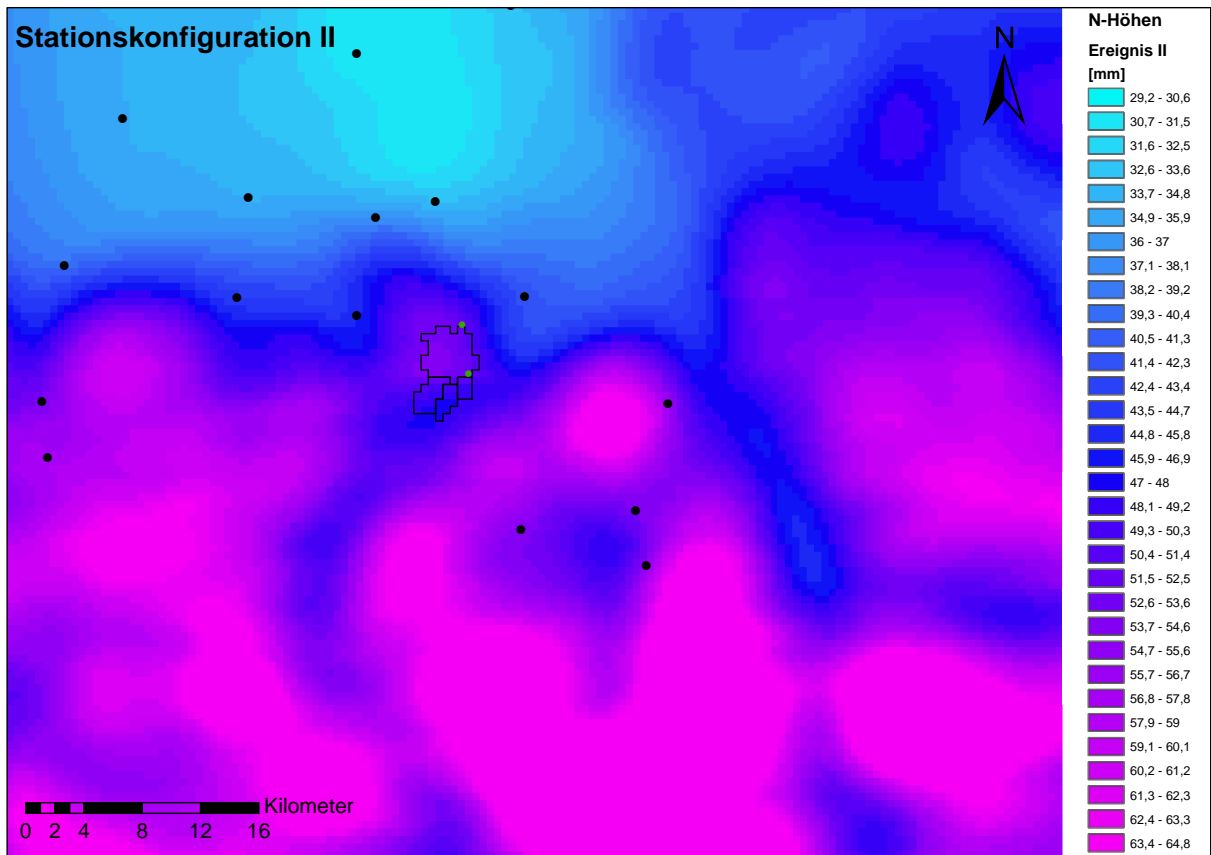


Abbildung 6.13.: Abfluss Pegel Messwehr (Ereignis 2, Konfiguration II)

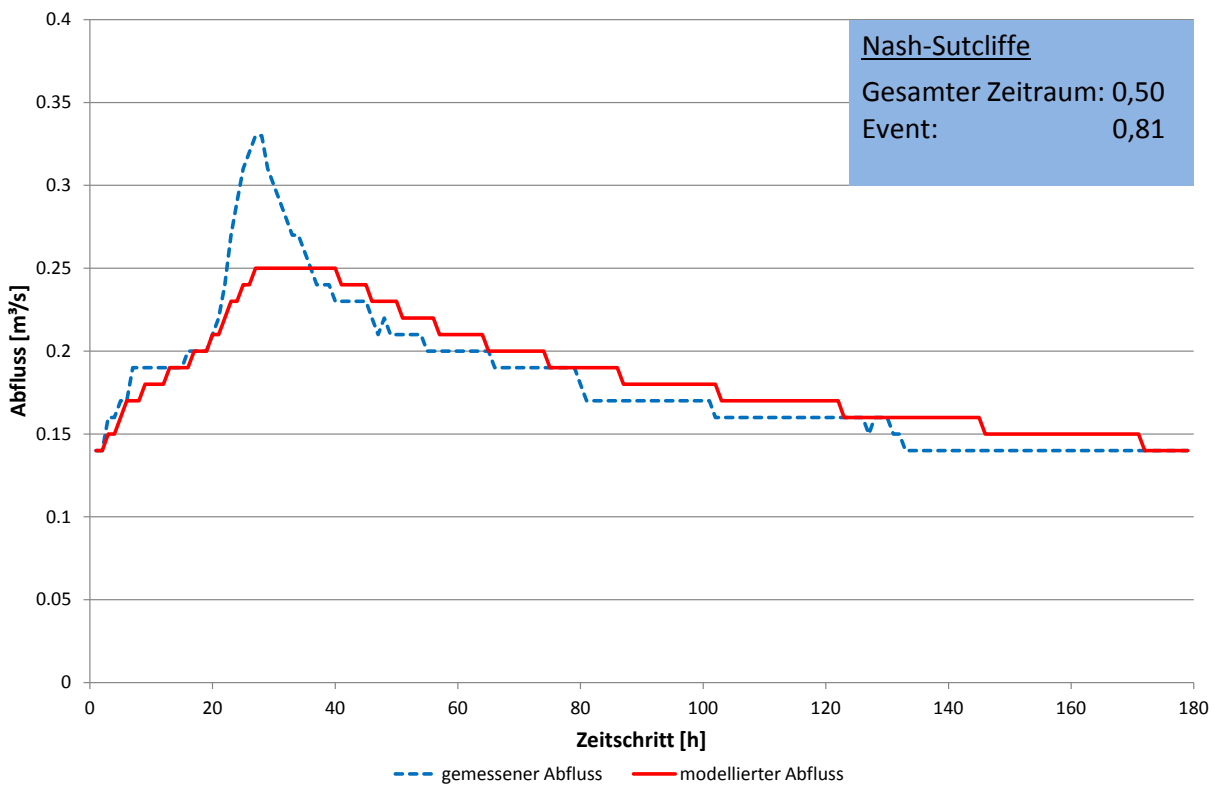
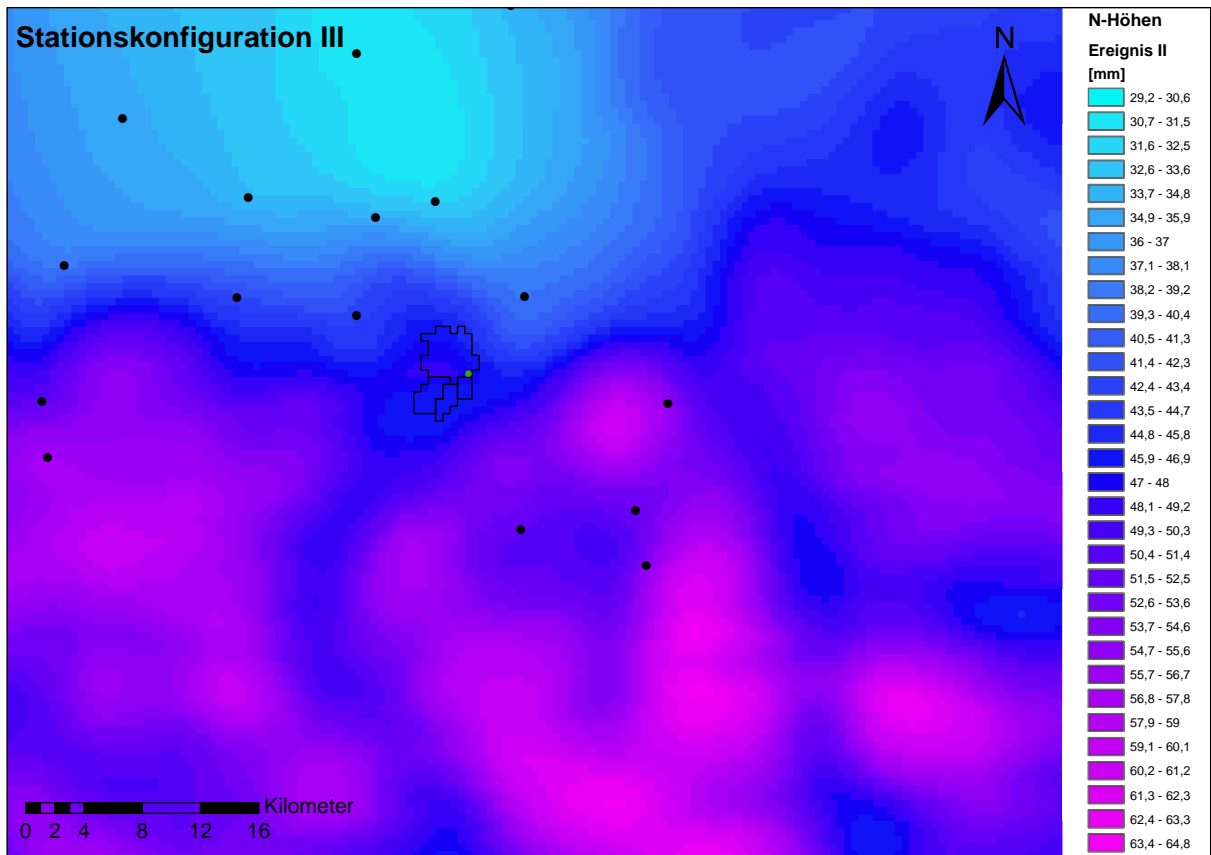


Abbildung 6.14.: Abfluss Pegel Messwehr (Ereignis 2, Konfiguration III)

6.2.3.2. Hydrometeorologische Extremereignisse

Das hydrometeorologische Extremszenario für die Saalach wurde mit Hilfe der in Kapitel 5.3 beschriebenen Methode generiert. Als Referenzszenario diente ein HW-Ereignis aus dem Jahre 2005 (Vgl. Abbildung 5.2). Das Originalereignis hatte einen Scheitelabfluss von $520 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Unterjettenberg. Der Scheitelabfluss für das generierte Extremszenario betrug $1.455 \text{ m}^3/\text{s}$. In Abbildung 6.15 sind die Abflussganglinien des Extremzenarios an den beiden Pegeln Unterjettenberg und Staufeneck gegeben.

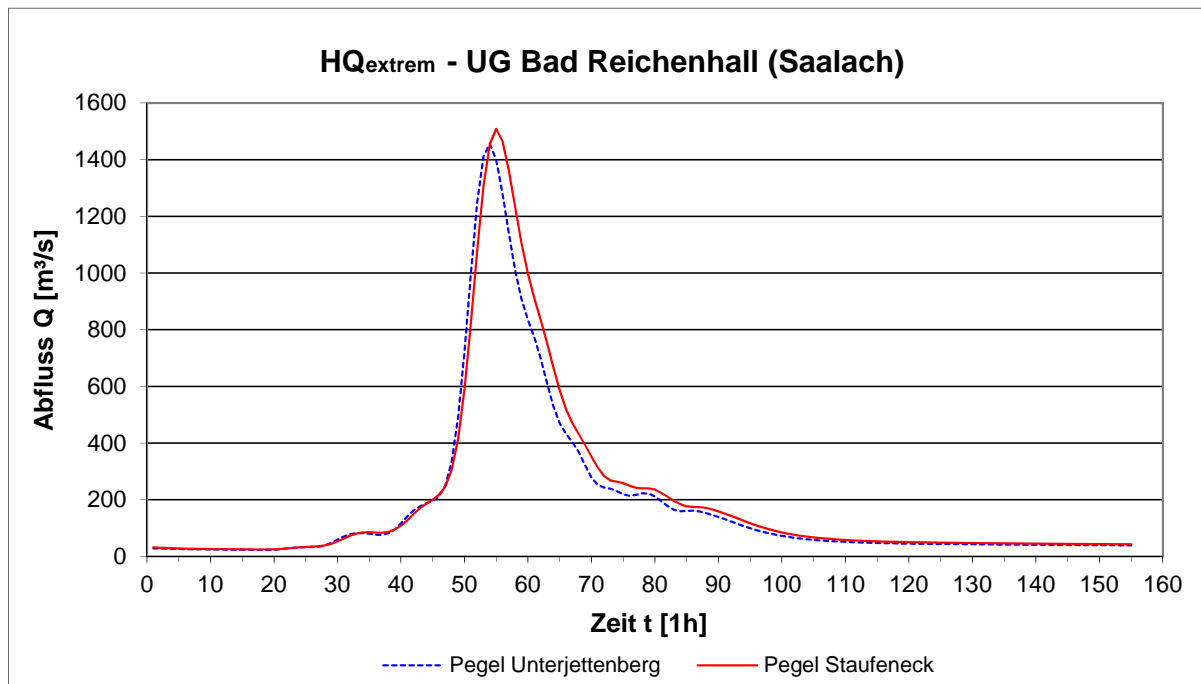


Abbildung 6.15.: Modellergebnisse für das Extremszenario HQ_{extrem} - Saalach

6.2.4. Zusammenfassung

Für das UG Bad Reichenhall musste für zwei EZG ein verteiltes hydrologisches Modell implementiert werden, um ein hydrologisches Extremszenario berechnen zu können. Für das EZG der Saalach konnten für die Scheitelabflüsse mit Hilfe einer höhenabhängigen Berücksichtigung und Optimierung der FC gute Ergebnisse in stündlicher Auflösung erzielt werden. Eine manuelle ereignisbezogene Anpassung der Parametersätze des Modells führte zu einer weiteren Verbesserung der modellierten Abflussganglinien im HW-Fall. Somit konnte anhand des Referenzszenarios ein Extremszenario generiert und an das hydraulische Modell übergeben werden.

Das EZG des Seebachs war anfangs ein unbeobachtetes Gewässer, in welchem zu Projektbeginn vier Pegelmessstellen eingerichtet wurden. Mit Hilfe der Abflussmessungen und den daraus

errechneten Abflusskurven für jeden einzelnen Pegel lagen kontinuierliche Abflusszeitreihen vor. An diesen Messwerten wurden verschiedene Methoden zur Datenkorrektur untersucht. Es hat sich gezeigt, dass eine Korrektur der Abflusszeitreihen bei einem verkrautungsanfälligen Gewässer zwingend notwendig ist.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Messnetzdichte von Niederschlagsstationen wurde beobachtet, dass der Einfluss zusätzlicher Stationen im UG für advektive Niederschlagsereignisse gering ist und zu keiner eindeutigen Verbesserung der hydrometeorologischen Modellergebnisse führte. Bei lokal auftretenden konvektiven Niederschlagsereignisse wurde mit zusätzlichen Stationen allerdings eine deutliche Verbesserung der räumlichen Niederschlagsverteilung erreicht. Es konnte gezeigt werden, dass solch ein Ereignis unter Umständen von den benachbarten und weiter entfernt liegenden Stationen nur in einem sehr geringen Maße aufgezeichnet wurden. Dadurch kam es ohne die Messstationen im UG zu einer erheblichen Unterschätzung der Niederschlagsmengen und somit zu schlechteren Modellergebnissen.

Trotz der relativ kurzen Abflusszeitreihen für den Seebach konnten erste Rückschlüsse auf das Abflussverhalten in diesem EZG gemacht und befriedigende Modellergebnisse erzielt werden.

7. Meteorologische Vorhersagen

In Kapitel 3.1.3 wird erläutert, dass die Gondel einer Seilbahn mit meteorologischer Messtechnik ausgerüstet wurde, um Untersuchungen der lokalen vertikalen atmosphärischen Schichtung durchzuführen. Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Einsatzfähigkeit dieser Messungen für die Unwettervorhersage, d.h. das Auftreten von konvektiven Niederschlagsereignissen zu prüfen. Es wurden sogenannte Stabilitätsindices abgeleitet, welche eine Aussage zur atmosphärischen Stabilität erlauben. Anhand dieser Indices konnte eine Unwettervorhersage erstellt werden, deren Qualität mittels einer sogenannten „Skill Score Analysis“ und daraus berechneten Genauigkeits- und Gütemaßen verifiziert wurde.

7.1. Atmosphärische Messungen

Normalerweise werden für solche Messungen Wetterballons eingesetzt, welche frei und in deutlich größere Höhen aufsteigen. Diese Art der Messung ist sehr aufwendig und teuer, weshalb die Durchführung im operationellen Einsatz nicht mehrmals täglich möglich ist. Aus diesem Grund wurden die Messungen an einer Gondel durchgeführt und die gemessenen Daten zunächst auf ihre Brauchbarkeit hin bewertet. Während der Betriebszeiten der Seilbahn konnten täglich mehrere Messungen durchgeführt werden und somit eine Anpassung der Vorhersagen in zeitlich hoher Auflösung vorgenommen werden.

7.1.1. Messprofil

Der technische Aufbau der Messinstrumente wird in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Für die weiteren Berechnungen wurden die Messdaten bei den Fahrten einige Meter nach Verlassen der Station und vor der Ankunft in die Station nicht berücksichtigt. Damit sollte verhindert werden, dass die Messwerte durch Störquellen wie die Gebäude oder die Nähe zum Boden beeinflusst werden. Es stand ein vertikales Messprofil von 1.100 m zur Verfügung und ist somit deutlich geringer als bei Wetterballonaufstiegen. Des Weiteren hat sich zu Beginn der Untersuchungen gezeigt, dass es sinnvoll war, nur die Talfahrten auszuwerten. Die Ausrichtung der Seilbahn und deren Stationen zum Tagesgang der Sonneneinstrahlung machte dies notwendig. Gerade in den Hochsommermonaten ist die Talstation einer erheblichen Sonneneinstrahlung ausgesetzt, welche das Gebäude und die Gondel stark aufheizt. Die Bergstation ist mit ihrer sonnenabgewandten Seite von diesen Effekten nicht betroffen. Damit konnte sicher gestellt werden, dass die

Messwerte den meteorologischen Bedingungen in der Umgebung entsprachen bzw. sich innerhalb kürzester Zeit auf diese einstellten. Während einer Talfahrt standen die Messwerte für die T_a , die r_F und den p in einer Auflösung von zehn Sekunden zur Verfügung.

7.1.2. Datenaufbereitung

Die gemessenen Daten mussten für die weitere Verwendung aufbereitet werden. Zunächst mussten die Position und die Standzeiten der Gondel bestimmt werden. Dies geschah über die Werte des atmosphärischen Luftdrucks. Bei einem $\Delta p > 1,2$ hPa zwischen zwei Messintervallen war die Gondel in Bewegung. Außerdem wurden die topographischen Höhen für jedes Messintervall mit der barometrischen Höhenformel berechnet (HÄCKEL, 2008). Für die weiteren Untersuchungen wurden die topographischen Höhen als Referenz verwendet, um Messwerte bei bestimmten Höhenniveaus nutzen zu können. Da der Luftdruck permanenten Schwankungen und Veränderungen aufgrund der Großwetterlage unterliegt, wurden die aus der Höhenformel berechneten Höhen bei jeder Standzeit auf die topographische Höhe der Tal- bzw. Bergstation gesetzt. Dadurch wurde eine Verschiebung der berechneten topographischen Höhen infolge von Luftdruckänderungen vermieden.

7.1.2.1. Berechnung von Zwischengrößen

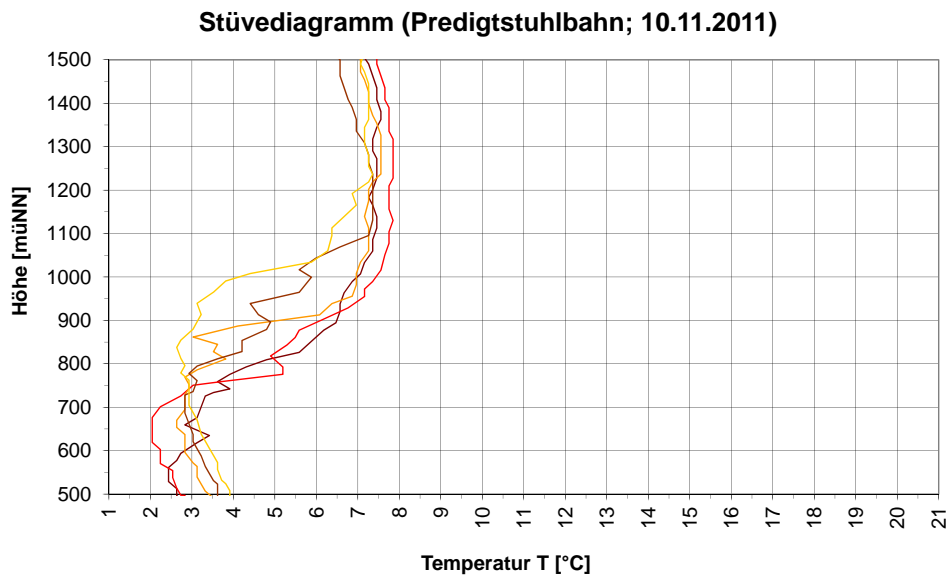
Für die Ableitung von Stabilitätsindices und den im folgenden Abschnitt beschriebenen Stüvediagrammen mussten verschiedene Zwischengrößen berechnet werden:

- spezifische Luftfeuchte (s)
- Taupunkttemperatur (T_D)
- Dampfdruck (e)
- Sättigungsdampfdruck (E)
- Mischungsverhältnis (q)
- Kondensationsniveau (LCL)
- Absolute Temperatur (T_K)
- Absolute virtuelle Temperatur ($T_{v,K}$)
- Potentielle Temperatur (Θ)
- Absolute äquivalente potentielle Temperatur ($\Theta_{E,K}$)

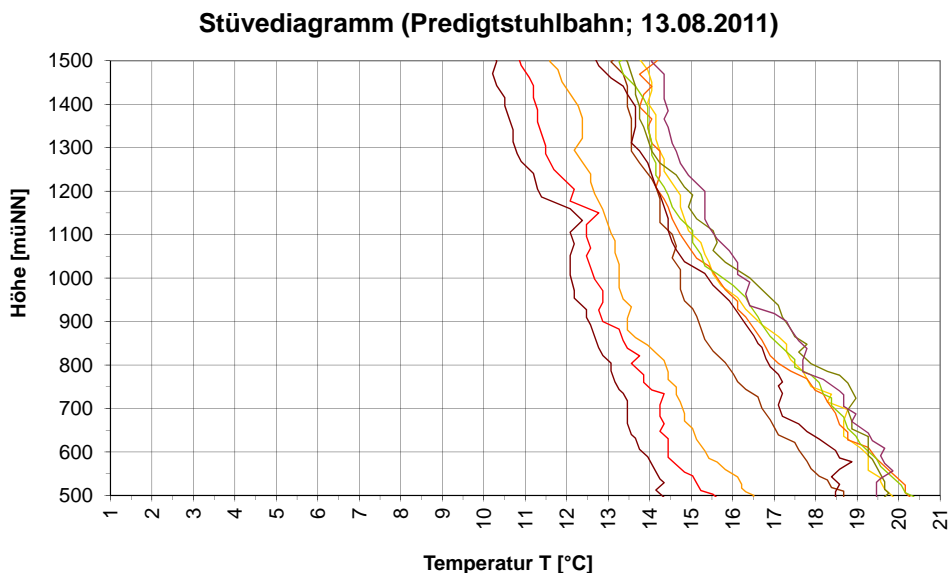
Auf eine eingehende Darstellung der Formeln zur Berechnung der meteorologischen Größen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die einschlägige Literatur verwiesen. Es finden sich weitere Informationen u.a. in (HÄCKEL, 2008), (BOLTON, 1980) und (GROENEMEIJER, 2005).

7.1.2.2. Stüvedigramme

In den im Rahmen dieser Untersuchungen erstellten Stüvedigrammen wurden lediglich die Temperatur und die spezifische Feuchte als Vertikalprofil über die topographische Höhe dargestellt. Damit konnte ein erster Eindruck über den vertikalen aber auch zeitlichen Verlauf dieser meteorologischen Größen gewonnen werden. In Abbildung 7.1 sind die Diagramme für eine instabile Schichtung und eine Inversionswetterlage gezeigt.



(a) Inversionswetterlage



(b) Instabile Wetterlage

Abbildung 7.1.: Atmosphärische Schichtung - Stüvedigramm (Lufttemperatur)

Die Stüvedigramme der spezifischen Feuchte für dieselben Wetterlagen sind im Anhang D.1 auf Seite 92 gegeben.

7.2. Ableitung von Stabilitätsindices

7.2.1. Grundlagen

Für die Ableitung der Stabilitätsindices wurden zwei verschiedene Typen von Indices betrachtet. Die einen lassen sich als „statische“ Indices bezeichnen, da in ihre Berechnung nur gemessene Größen auf definierten Höhenstufen eingingen. Der andere Typ kann als „dynamisch“ bezeichnet werden, da dort die sogenannte „Lifted Parcel Theory“ für die Berechnung der Indexwerte verwendet wurde (MANZATO und GRIFFITH, 2003). Bei den „dynamischen“ Indices wird ein virtuelles Luftpaket ohne Interaktion mit seiner Umwelt entlang der Trocken- bzw. Feuchtadiabaten auf die Endhöhe des Messprofils gehoben.

Stabilitätsindices lassen eine Aussage über die Stabilität der atmosphärischen Schichtung zu. Dabei kann, je nach Index, eine Unterteilung in mehrere Klassen erfolgen. Diese Klassen können z.B. sehr stabil, stabil, potentiell labil oder labil sein. Innerhalb dieser Untersuchungen wurde lediglich zwischen labilen und stabilen Schichtungen unterschieden. Im Folgenden werden labile Wetterlagen als „aktiv“ bezeichnet. Sie beschreiben einen Zustand, bei dem konvektive Niederschlagsereignisse auftreten können. Stabile Wetterlagen werden als „nicht-aktiv“ bezeichnet.

7.2.2. Berechnung

Für die Berechnung der Stabilitätsindices mussten einige Modifikationen an der ursprünglichen Form vorgenommen werden. Da der übliche Messbereich wie bei Radiosondenaufstiegen nicht zur Verfügung stand, konnten die benötigten Messgrößen nicht an den vorgegebenen Druckhöhen bestimmt werden. Deshalb wurden die Luftdrücke im zur Verfügung stehenden Messbereich in topographische Höhen umgerechnet. Die ursprünglich benötigten Druckhöhen zur Berechnung der Stabilitätsindices wurden an den vorhandenen Messbereich angepasst. Die Indizierung der nachfolgend beschriebenen Indices bezieht sich demnach auf die topographischen Höhen des Messbereichs der Seilbahn.

In den beiden nachfolgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur Berechnung der „statischen“ und „dynamischen“ Stabilitätsindices erläutert. Insgesamt wurden sechs verschiedene Indices auf ihre Brauchbarkeit hin untersucht. Dabei fielen vier Indices in die Gruppe der „statischen“ Indices und zwei in die der „dynamischen“ Indices. Bei den „dynamischen“ Indices wurden weitere Modifikationen zur Berechnung der Größen des virtuellen Pakets untersucht. Die Messwerte wurden alle zehn Sekunden gespeichert und lagen aufgrund der kontinuierlichen Messung nicht an definierten Höhen vor. Deshalb wurden die Messwerte zur Bestimmung der Messgröße an den erforderlichen Höhen mittels einer linearen Interpolation bestimmt.

7.2.2.1. „Statische Indices“

Die typischen Druckhöhen, die bei der Berechnung der „statischen“ Indices herangezogen werden, liegen bei 850 hPa, 700 hPa und 500 hPa. Entsprechend dieser Druckhöhen wurden die Höhengniveaus 500 müNN, 930 müNN und 1500 müNN innerhalb des Messbereichs der Seilbahn definiert. Im Folgenden werden die untersuchten „statischen“ Indices und ihre Eigenschaften beschrieben.

- Boyden-Index (BI)

$$BI = 0,1 \cdot (Z_{845 \text{ hPa} - 935 \text{ hPa}}) - T_{930} \quad [-]$$

Der BI erlaubt eine bessere Diagnose von Frontgewittern. In der Berechnung des Indexes sind keine Informationen über die Luftfeuchte enthalten (RAMMB, 2011). $Z_{845 \text{ hPa} - 935 \text{ hPa}}$ ist die Schichtdicke zwischen den entsprechenden Höhen bei 845 hPa und 935 hPa und T_{930} die Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) bei 930 müNN. Die berechneten Indexwerte nahmen einen Wertebereich von 64 bis 82 ein, wobei hohe Werte ein erhöhtes Gewitterrisiko wiedergeben.

- George's K-Index (KI)

$$KI = (T_{500} - T_{1500}) + T_{D,500} - (T_{930} - T_{D,930}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Der KI berücksichtigt mit dem Temperaturgradienten, der Luftfeuchte der unteren Troposphäre und der vertikalen Ausdehnung der feuchten Schichtung drei Komponenten, die für konvektive Instabilität entscheidend sind (RAMMB, 2011). T ist die Lufttemperatur und T_D die Taupunkttemperatur auf den entsprechenden Niveaus (müNN) in $^{\circ}\text{C}$. Beim KI stehen ebenfalls hohe Indexwerte für eine hohe Gewitterwahrscheinlichkeit. Eine detaillierte Klassifizierung des KI und den daraus resultierenden Witterungen kann (ERMERT, 2007) entnommen werden. Der Wertebereich des KI betrug -25°C bis 24°C .

- Totals-Totals-Index (TTI)

$$TTI = 2 \cdot (T_{K,500} - T_{K,1500}) - T_{K,500} + T_{K,D,500} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Der TTI verwendet die Differenz der T_K zwischen den Höhengniveaus von 1.500 müNN und 500 müNN. Außerdem gehen jeweils die T_K und die absolute Taupunkttemperatur ($T_{K,D}$) bei jeweils 500 müNN in die Berechnungen ein. Hohe Indexwerte lassen auf eine höhere Gewitterwahrscheinlichkeit schließen (WALKER et al., 2008). Der Wertebereich des TTI betrug -14°C bis 13°C .

- Konvektiv-Index (KOI)

$$KOI = 0,5 \cdot (\Theta_{E,K,930} + \Theta_{E,K,1500} - 2 \cdot \Theta_{E,K,500}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Mit dem KOI wird die konvektive Instabilität einer Luftmasse identifiziert. Er repräsentiert den mittleren vertikalen Gradienten der absoluten äquivalenten potentiellen Temperatur ($\Theta_{E,K}$) (ERMERT, 2007). Der KOI nahm Werte zwischen -11°C und 12°C an. Beim KOI stehen niedrige Indexwerte für eine hohe Gewitterwahrscheinlichkeit.

7.2.2.2. „Dynamische Indices“

Bei der Berechnung der „dynamischen“ Indices wurde ein Luftpaket mit den Werten eines bestimmten Höhengniveaus virtuell auf ein anderes Höhengniveau gehoben, ohne dabei im Austausch mit seiner Umgebung zu stehen. Hierfür wurde das Kondensationsniveau bestimmt. Anhand des LCL konnte bestimmt werden, ob die Größe des Luftpakets mit einem trocken- oder feuchtadiabatischen Temperaturgradienten berechnet werden mussten. Lag das LCL innerhalb des Messbereich von 500 müNN und 1.500 müNN fand ein Wechsel des Temperaturgradienten statt. Somit wurde das virtuelle Luftpaket auf seine Endhöhe von 1.500 müNN gehoben und die Werte entsprechend berechnet. Der Verlauf der Adiabaten wurde als linear angenommen. Der trockenadiabatische Temperaturgradient betrug $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ und der feuchtadiabatische Temperaturgradient wurde mit Werten zwischen $-0,4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ und $-0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ angenommen. Die untersuchten „dynamischen“ Indices ließen sich aus der Differenz der gemessenen und virtuellen Temperatur auf einem bestimmten Höhengniveau berechnen.

- Showalter Index (SI)

$$SI = T_{1500} - T'_{500 \rightarrow 1500} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Der SI berechnet sich aus der Differenz der gemessenen Temperatur auf einem Höhengniveau von 1.500 müNN und der Temperatur des virtuellen Luftpakets, welches entlang der Adiabaten von 500 müNN auf 1.500 müNN gehoben wird (RAMMB, 2011).

Mit dem „Most Unstable Parcel (MUP)“ werden die Startwerte des Luftpakets bestimmt. Für den SI waren es immer die gemessenen Werte auf einem festen Höhengniveau von 500 müNN. Beim SI geben niedrige Indexwerte eine erhöhte Gewitterwahrscheinlichkeit wieder. Je kleiner der Indexwert ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein schweres Gewitter auftritt (RAMMB, 2011). Der Wertebereich für den SI betrug $-2,5^{\circ}\text{C}$ bis $12,5^{\circ}\text{C}$.

- Lifted Index (LI)

$$LI = T_{v,1500} - T_{v,500 \rightarrow 1500}^{parcel} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Der LI berechnet sich aus der Differenz der $T_{v,K}$ auf 1.500 müNN und der $T_{v,K}$ des auf 1.500 müNN virtuell gehobenen Luftpakets (GROENEMEIJER, 2005). Beim LI war das „MUP“ nicht bei einem festen Höhenniveau definiert. Es wurden drei verschiedene Methoden getestet, um das „MUP“ zu bestimmen (MANZATO und GRIFFITH, 2003). Für die Bestimmung des „MUP“ wurden die ersten zehn Messwerte herangezogen. Als Startwerte wurden beim „maxLI“ alle benötigten Werte auf dem Höhenniveau verwendet, bei welchem die maximale $\Theta_{E,K}$ berechnet wurde. In der Variante „avgLI“ wurden die Mittelwerte aller benötigten Größen genutzt. In der dritten Modifikation „normavgLI“ wurden ebenfalls die Mittelwerte aus den ersten zehn Messwerten gebildet. Allerdings bestand der Unterschied zum „avgLI“ darin, dass die Starttemperatur nicht die berechnete $T_{v,K}$, sondern die tatsächlich gemessene T_a war. Die Modifikationen des LI wurden ebenfalls mit unterschiedlichen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten berechnet. Der Wertebereich für die unterschiedlich bestimmten LI betrug etwa -2°C bis 12°C .

7.3. Vorhersage von instabilen Wetterlagen

7.3.1. Methodik

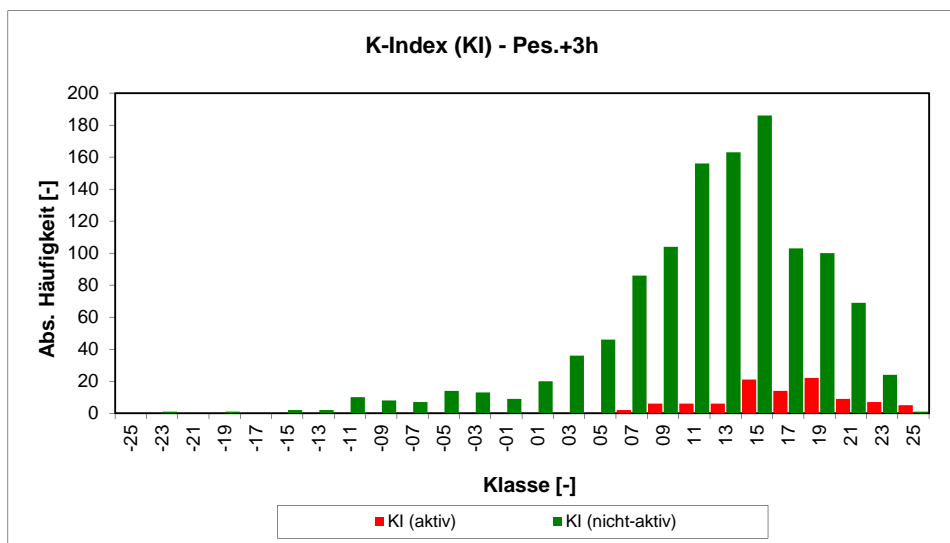
Mit den berechneten Indexwerten konnte eine Unwettervorhersage erstellt werden. Dafür mussten zunächst die beobachteten instabilen Wetterlagen bestimmt werden. Des Weiteren musste für jeden einzelnen Stabilitätsindex ein Grenzwert gefunden werden, der die Vorhersage in „aktive“ und „nicht-aktive“ Wetterlagen unterteilt. Für die Unwettervorhersage wurden alle Indexwerte bis zu drei Stunden vor dem Eintreten des Gewitters berücksichtigt.

7.3.1.1. Bestimmung von instabilen Wetterlagen

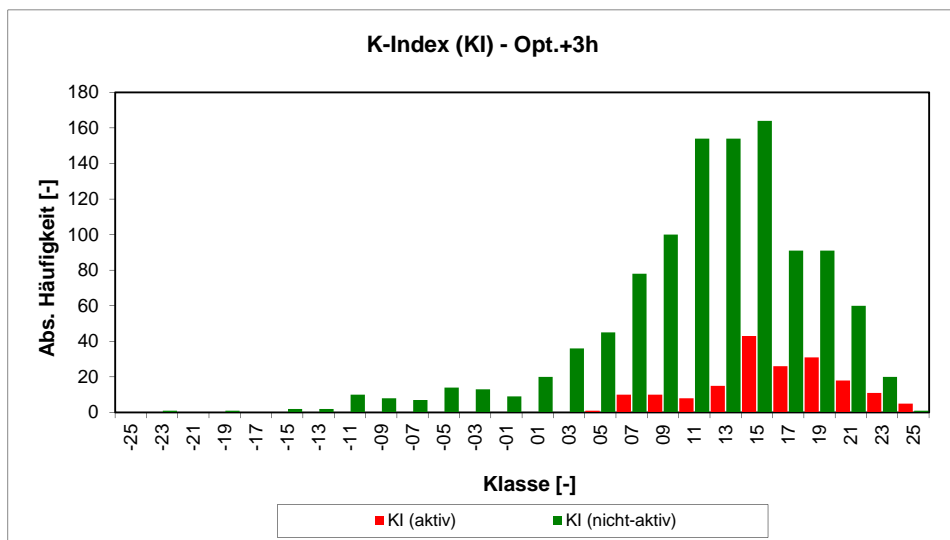
Für die Bestimmung der instabilen Wetterlagen lagen keine Messdaten, wie für den Niederschlag oder die Temperatur vor. Aus diesem Grund musste anhand von operationell erstellten Unwettervorhersagen, Blitzkarten, Webcambildern und Wetterstationsdaten im UG eine Aussage über die Wetterlage getroffen werden. Dies erfolgte in verschiedenen Konfigurationen, d.h. in die Entscheidungsfindung gingen unterschiedlich viele Zusatzinformationen mit ein. Somit war es möglich instabile Wetterlagen zu identifizieren, an denen eine Unwetterwarnung ausgegeben werden sollte.

Mit Hilfe der Unterteilung in stabile und instabile Wetterlagen war es möglich die berechneten

Werte für die unterschiedlichen Indices in „aktive“ und „nicht-aktive“ Fälle zu unterteilen. Dabei bekamen alle Indexwerte innerhalb der drei Stunden vor Auftreten des Gewitters eine „aktive“ Markierung. In Abbildung 7.2 sind die Verteilungen der „aktiven“ und „nicht-aktiven“ Fälle für den K-Index gezeigt. Dabei sind zwei verschiedene Arten zur Bestimmung von instabilen Wetterlagen verwendet worden. Bei beiden Methoden gingen alle vorhandenen Informationen in die Entscheidungsfindung mit ein, wobei „Opt. + 3h“ als „aktiv“ gesetzt wurde, wenn das Gewitter auch in unmittelbarer Nähe des UG aufgetreten ist. „Pes. + 3h“ beinhaltet ausschließlich „aktive“ Fälle, wo tatsächlich ein Gewitter über das UG gezogen ist.



(a) Pes. + 3h



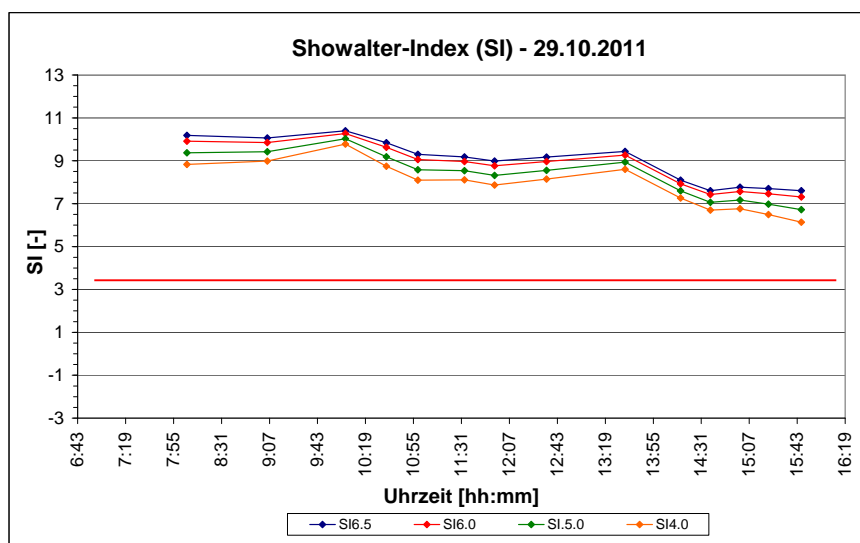
(b) Opt. + 3h

Abbildung 7.2.: Histogramme zur Gewitteraktivität (K-Index)

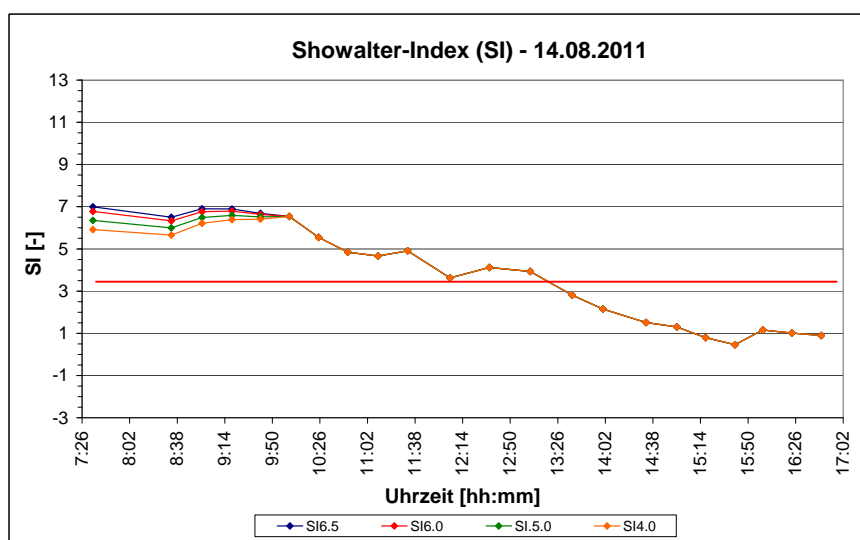
7.3.1.2. Berechnung der Warnschwellen

Für das Festlegen der Warnschwellen der einzelnen Indices wurde der Median aller Daten berechnet. Je nach Index bedeutete ein Über- bzw. Unterschreiten des Grenzwertes die Ausgabe einer Unwetterwarnung. Neben dem Median wurden weitere statistische Größen zum Bestimmen der Grenzwerte benutzt. So wurden z.B. verschiedene Quantile der „aktiven“ oder „nicht-aktiven“ Datensätze als Grenzwerte verwendet.

In Abbildung 7.3 ist der zeitliche Verlauf des SI mit verschiedenen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten für eine stabile und instabile Wetterlage gegeben. In diesem Fall lag die Warnschwelle bei einem Indexwert von 3,1. Es ist zu erkennen, dass dieser bei der instabilen Wetterlage unterschritten wird und in diesem Fall eine Unwetterwarnung ausgegeben wurde.



(a) Stabile Wetterlage



(b) Instabile Wetterlage

Abbildung 7.3.: Zeitlicher Verlauf - Showalter-Index (SI)

7.3.2. Verifizierung und Unsicherheit

Die Einsatzfähigkeit der erstellten Unwettervorhersagen mittels der Stabilitätsindices wurde mit einer „Skill Score Analysis“ überprüft. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

7.3.2.1. Vorgehensweise - Skill Score Analysis

Die Vorhersagenprüfung wurde mittels einer sogenannten „Skill Score Analysis“ durchgeführt. In Abbildung 7.4 ist die verwendete Kontingenztabelle gezeigt, welche mit den erstellten Vorhersagen und beobachteten Wetterlagen aufgefüllt wurde. Anhand der Einträge in der Kontingenztabelle konnten Genauigkeits- und Gütemaße berechnet werden, mit denen es möglich war die Vorhersagen qualitativ zu bewerten.

		Vorhersage		
		Ereignis vorhergesagt +	Ereignis nicht vorhergesagt -	
Beobachtung	Ereignis beobachtet +	Richtig informiert 40 (A) Richtige Vorhersage	Nicht informiert 10 (B) Überraschung	50
	Ereignis nicht beobachtet -	False information 20 (C) Falscher Alarm	Richtig informiert 30 (D) Richtige Vorhersage	50
		60	40	100

Abbildung 7.4.: Kontingenztabelle - „Skill Score Analysis“ (HOFFMANN, 1974)

Für die Bewertung der Vorhersagen wurden folgende Genauigkeits- und Gütemaße für die einzelnen Stabilitätsindices berechnet (HUNTRIESER et al., 1996), (JOLLIFFE und STEPHENSON, 2003):

Genauigkeitsmaße

- Trefferrate (HR)

$$HR = \frac{(A + D)}{n} \quad [0 \leq HR \leq 1]$$

- Erkennungswahrscheinlichkeit (POD)

$$POD = \frac{A}{(A + B)} \quad [0 \leq HR \leq 1]$$

- Fehlalarmrate (FAR)

$$FAR = \frac{C}{(A + C)} \quad [0 \leq HR \leq 1]$$

- „Critical Success Index (CSI)“

$$CSI = \frac{A}{(A + B + C)} \quad [0 \leq HR \leq 1]$$

Gütemaße

- „Heidke Skill Score (HSS)“

$$HSS = \frac{2 \cdot (AD - BC)}{[(A + B)(B + D) + (A + C)(C + D)]} \quad [-1 \leq HR \leq 1]$$

- „True Skill Statistics (TSS)“

$$TSS = \frac{A}{(A + B)} - \frac{C}{(C + D)} \quad [-1 \leq HR \leq 1]$$

7.3.2.2. Ergebnisse

Bei der Vorhersagenverifizierung wurden verschiedene Methoden angewandt, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Abbildungen für die Indices mit den besten Eigenschaften gezeigt werden. Die Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung für alle untersuchten Stabilitätsindices in Abbildung 7.5 beruhen auf einer univariaten Auswertung. In diesem Fall wurde lediglich mit Hilfe des Indexes eine Unwettervorhersage erstellt. Für die Indices, bei denen verschiedene Temperaturgradienten bzw. MUP untersucht wurden, werden nur die besten Ergebnisse gezeigt. Für den SI und LI zeigten sich bei einem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten von 5 °C/1.000 m die besten Vorhersageergebnisse. Beim LI ließ sich erkennen, dass die Methode „normavgLI“ zur Bestimmung des MUP zu den besten Ergebnissen führte.

Reihenfolge der Indexgüte (Alle Genauigkeits- und Qualitätsmaße)						
Index	normavgLI ($\Gamma_{5.0}$)	KI	SI ($\Gamma_{5.0}$)	TTI	KOI	BI
Genauigkeitsmaß						
HR	0.58	0.58	0.58	0.57	0.56	0.49
POD	0.78	0.79	0.78	0.75	0.71	0.45
FAR	0.78	0.78	0.78	0.79	0.80	0.87
CSI	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.11
Qualitätsmaß						
HSS	0.16	0.16	0.16	0.14	0.12	-0.03
TSS	0.32	0.34	0.32	0.29	0.25	-0.05

Abbildung 7.5.: Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung (Index-Rangliste)

Eine weitere Methode der Unwettervorhersage war ein multivariater Ansatz, bei dem meteorologische Messdaten an der Wetterstation Pegelhaus berücksichtigt wurden. Dabei wurde untersucht, ob diese Daten Tendenzen bei stabilen bzw. instabilen Wetterlagen aufweisen. In Abbildung 7.6 kann anhand der Verteilung für die Lufttemperatur bei den beiden definierten Wetterlagen beobachtet werden, dass unter einer bestimmten T_a keine instabilen Wetterlagen beobachtet wurden. Somit wurde für die T_a ebenfalls ein Grenzwert festgelegt, unter dem es keine Vorwarnung geben kann. In diesem Fall wurde der Indexwert nicht mehr berücksichtigt. Diese Methode wurde für weitere meteorologische Größen untersucht (Vgl. Anhang D, S. 93).

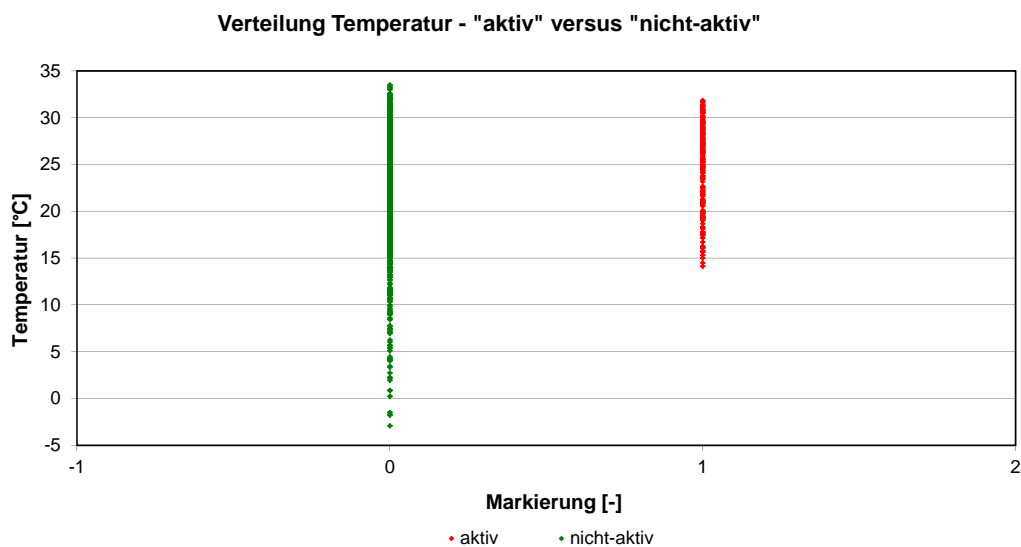


Abbildung 7.6.: Temperaturverteilung nach Wetterlagen

Dieser multivariate Ansatz wurde mit verschiedenen Kombinationen untersucht. In Abbildung 7.7 sind die Ergebnisse für den LI gegeben.

Dabei wurden entsprechend der Nummerierung folgende Veränderungen durchgeführt:

1. **Orig. (Opt.+3h):** Das beste Vorhersagenergebnis mittels der univariaten Auswertung, bei der nur der Indexwert verwendet wurde.
2. **MultiMeteo:** Bei dieser Konfiguration wurden neben dem Indexwert auch alle meteorologischen Größen bei der Vorhersage mitberücksichtigt.
3. **Index-Grenzwert:** Die Warnschwelle für den Indexwert wurde optimiert. Die Grenzwerte der meteorologischen Größen blieben konstant.
4. **Luftdruck-Grenzwert:** Die Warnschwelle für den atmosphärischen Luftdruck wurde optimiert. Die Grenzwerte der restlichen meteorologischen Größen und der Indexwert blieben konstant.
5. **Temperatur-Grenzwert:** Die Warnschwelle für die Lufttemperatur wurde optimiert. Die Grenzwerte der restlichen meteorologischen Größen und der Indexwert blieben konstant.
6. **Feuchte-Grenzwert:** Die Warnschwelle für die absolute Feuchte wurde optimiert. Die Grenzwerte der restlichen meteorologischen Größen und der Indexwert blieben konstant.
7. **Taupunkt-Grenzwert:** Die Warnschwelle für die Taupunkttemperatur wurde optimiert. Die Grenzwerte der restlichen meteorologischen Größen und der Indexwert blieben konstant.
8. **Grenzwert:** Bei dieser Konfiguration wurden für den Indexwert und die meteorologischen Größen das jeweilige Optimum als Grenzwert angenommen.
9. **Opt. Grenzwert:** In der Variante „Opt. Grenzwert“ wurde durch die Optimierung der Grenzwerte aller Größen das beste Vorhersageergebnis bestimmt.

Skill Scores - MultiMeteo / Lifted-Index normavgLI($\Gamma_{5,0}$)									
Index	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Genauigkeitsmaß									
HR	0.58	0.66	0.71	0.73	0.67	0.70	0.70	0.79	0.76
POD	0.79	0.78	0.72	0.71	0.78	0.74	0.75	0.63	0.69
FAR	0.77	0.73	0.70	0.69	0.73	0.71	0.71	0.64	0.66
CSI	0.21	0.25	0.27	0.28	0.25	0.27	0.26	0.30	0.30
Qualitätsmaß									
HSS	0.16	0.24	0.27	0.29	0.24	0.27	0.26	0.34	0.33
TSS	0.33	0.43	0.43	0.45	0.43	0.44	0.44	0.44	0.46

Abbildung 7.7.: Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung - MultiMeteo (Lifted-Index)

Die in der Abbildung 7.5 gegebenen Genauigkeits- und Gütemaße für die einzelnen Stabilitätsindices zeigen, dass die Vorhersagegüte teilweise deutliche Unterschiede aufweist. Der BI gab abschließend in allen Konfigurationen die schlechteste Vorhersagegüte wieder. Der LI mit der Konfiguration „normavg“ zur Bestimmung des MUP und einem feuchtadiabatischen

Temperaturgradienten von $5\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$ führte innerhalb dieser Untersuchungen zu den besten Vorhersageergebnissen. Die Erkennungswahrscheinlichkeit von instabilen Wetterlagen war bei den meisten Stabilitätsindices gut. Allerdings konnte bei dem univariaten Ansatz erkannt werden, dass bei allen Indices die Fehlalarmrate hoch war.

In Abbildung 7.7 sind anhand des LI die Qualitätsmaße für den multivariaten Vorhersageansatz aufgeführt. Eine Übersicht der Ergebnisse für den SI und KI sind im Anhang D auf Seite 94 zu finden. Die Methode dass weitere meteorologische Informationen in der Vorhersage berücksichtigt werden, hat eine deutliche Verbesserung der Vorhersageergebnisse erzielt. Gerade die Werte für die Trefferrate (HR) und die Fehlalarmrate (FAR) zeigten eine verbesserte Tendenz. Die Ergebnisse für die Qualitätsmaße wurden ebenfalls gesteigert.

8. Zusammenfassung

Im UG Nagold wurde ein verteiltes hydrologisches Modell entwickelt, welches trotz der Vereinfachung der physikalischen Prozesse und weniger benötigter Eingangsgrößen gute Modellergebnisse geliefert hat. Allerdings darf nicht unerwähnt bleiben, dass bei der automatischen Kalibrierung des Modells die Abflussspitzen in der Regel unterschätzt wurden, was durch eine manuelle Kalibrierung verbessert werden konnte. Für die untersuchten Ereignisse hat sich gezeigt, dass die Parameter der Schneeakkumulation und -schmelze eine entscheidende Rolle spielten. Mit der Implementierung der Speichersimulation im hydrologischen Modell konnte das gesamte Einzugsgebiet bis zum Pegel Altensteig modelliert werden. Die Speichersimulation ermöglichte es, unterschiedliche Steuerungen im Bezug auf die Höchstabgabe und das Zurückfahren auf die Volumensollganglinie nach einem Hochwasserereignis durchzuführen.

Es hat sich gezeigt, dass sich bei der ereignisbezogenen Kalibrierung die Parameter zur Beschreibung der physikalischen Prozesse innerhalb des Modells zwischen den einzelnen HW-Ereignissen deutlich unterscheiden haben. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Ausgangssituationen bezüglich des Vorregens und der Bodenfeuchtigkeit zurückführen, weshalb die Bestimmung eines allgemeingültigen Parametersatzes nicht möglich war. Das entwickelte hydrologische Modell zeigte insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse. Ein wesentlicher Vorteil des Modells sind der einfache Aufbau und die einfache Anwendung durch vergleichsweise wenige Eingangsdaten und geringen Rechenaufwand.

Der Einsatz des Modells HBV-IWS im UG Bad Reichenhall konnte erfolgreich bewerkstelligt werden. Hier zeigten die Modellergebnisse in der täglichen und stündlichen Auflösung teilweise eine deutliche Unterschätzung der Spitzenabflüsse. Dies konnte durch eine höhenabhängige Berücksichtigung und Optimierung der Feldkapazitäten verbessert werden. Außerdem konnte auch beim HBV-IWS-Modell durch eine manuelle ereignisbezogene Optimierung der Parametersätze eine weitere Verbesserung der Abflussspitzen erzielt werden.

Durch die Implementierung eines eigenen meteorologischen und hydrologischen Messnetzes war es möglich Untersuchungen zu kleinräumigen Starkregenereignissen zu machen. Durch den Aufbau und Betrieb neuer Pegelmessstellen konnte mit dem Seebach ein sehr kleines alpines Gewässer modelliert werden, welches zuvor ein unbeobachtetes EZG war. Dadurch waren dort auch Rückschlüsse auf das Abflussverhalten bei sogenannten Sturzfluten möglich.

Die Ergebnisse der atmosphärischen Messungen an der Seilbahn ließen keinen eindeutigen Entschluss über die Brauchbarkeit für kleinräumige Unwettervorhersagen zu. Die Trefferrate

und Erkennungswahrscheinlichkeit zeigte gute Ergebnisse. Allerdings ist die Fehlalarmrate für einen operationellen Einsatz zu hoch. Auch die anderen Gütemaße, wie der „Critical Success Index“ oder „Heidke Skill Score“ zeigten keine so eindeutigen Ergebnisse, was eine Implementierung in eine operationelle Vorhersage rechtfertigen würde. Mit Hilfe eines multivariaten Vorhersageansatzes konnte gegenüber einer univariaten Methode, wo nur der jeweilige Indexwert berücksichtigt wurde, allerdings eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass einige Indices nicht brauchbar waren und welchen Einfluss die Methode zur Bestimmung von instabilen Wetterlagen, die feuchtadiabatischen Temperaturgradienten oder die Wahl des MUP hat.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der aktuelle Stand der Ergebnisse der erstellten Unwetterwarnungen keinen Zugewinn zu dem vorhandenen Angebot an operationellen Vorhersagen für dieses EZG bringt.

Das Arbeitspaket „Meteorologie und Hydrologie“ konnte mit der Bereitstellung der hydrometeorologischen Extremszenarien einen wichtigen Beitrag für die Evakuierungssimulation in den beiden Untersuchungsgebieten leisten. Durch die zeitlich hochaufgelösten Abflussganglinien der Extremszenarien waren grundlegende Eingangsdaten für eine instationäre hydraulische Modellierung gegeben und realistische und dynamische Evakuierungsszenarien bei Extremhochwässern konnten simuliert werden.

Literaturverzeichnis

- BAYLfSTAD, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG (2013). *GENESIS-Online Datenbank*. Homepage. aufgerufen auf: <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/>; zuletzt besucht am 22.03.2013.
- BERGSTRÖM, S. (1995). *The HBV model*. V.P. Singh (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Highland Ranch, Colorado, USA.
- BIS BAYERN, BODENINFORMATIONSSYSTEM BAYERN (2013). *GeoFachdatenAtlas*. Homepage. aufgerufen auf: <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do>; zuletzt besucht am 25.03.2013.
- BMU, BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2001). *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Elektronische Ressource.
- BOLTON, DAVID (1980). *The Computation of Equivalent Potential Temperature*. Monthly Weather Review, 108:1046 – 1053.
- BÁRDOSY, ANDRÁS (2003). *Hydrologie I (Grundlagen)*. Manuskript zur Vorlesung Hydrologie; Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie, Universität Stuttgart.
- EPPLER, ALWIN (2001). *Nagoldtalsperre Sicherheitsbericht*. Technischer Bericht, Ingenieurbüro Alwin Eppler.
- ERMERT, VOLKER (2007). *Erklärungen zu den Radiosondendiagrammen*. Technischer Bericht, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität Köln.
- GEWÄSSERDIREKTION, NÖRDLICHER OBERRHEIN (1997). *Ablauf und Vergleich der Hochwasserereignisse von 1990, 1993 und 1997*. Technischer Bericht, Bereich Freudenstadt.
- GEYER, OTTO F. und M. P. GWINNER (2011). *Geologie von Baden-Württemberg*, Bd. 5., völlig neu überarbeitete Auflage. Schweizerbart.
- GIESECKE, J. (2002). *Gutachten für die vertiefte Sicherheitsprüfung der Nagoldtalsperre*. Technischer Bericht, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- GROENEMEIJER, PIETER (2005). *Sounding-derived parameters associated with severe convective storms in the Netherlands*. Technischer Bericht, Institute of Marine and Atmospheric Research Utrecht (IMAU).

- HÄCKEL, HANS (2008). *Meteorologie*. Eugen Ulmer KG. 6. Auflage.
- HOFFMANN, A. (1974). *Vorhersageprüfung*. Heft 4 4. Jahrgang, Deutscher Wetterdienst (DWD). Meteorologische Fortbildung.
- HUNTRESER, H., H. H. SCHIESSER, W. SCHMID und A. WALDVOGEL (1996). *Comparison of Traditional and Newly Developed Thunderstorm Indices for Switzerland*. *Weather and Forecasting*, 12:108 – 125.
- JAIN, S. K. und K. SUDHEER (2008). *Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash-Sutcliffe index*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13:981.
- JOLLIFFE, IAN T. und D. B. STEPHENSON, Hrsg. (2003). *Forecast Verification - A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. Wiley.
- KOSTRA, DWD 2000 (2005). *Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 - 2000)*. Technischer Bericht, Deutscher Wetterdienst - Hydrometeorologie, Offenbach.
- LFU, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013). *Hochwassernachrichtendienst*. Homepage. aufgerufen auf: <http://www.hnd.bayern.de/>; zuletzt besucht am 29.03.2013.
- LIU, MIN (2010). *Study of Topographic Effects on Hydrological Patterns and the Implication on Hydrological Modeling and Data Interpolation*. Doktorarbeit, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2002). *Durchflussermittlung mit Messflügeln*. Technischer Bericht, Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg.
- LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2004). *Unsicherheit von Durchflusswerten*. Technischer Bericht, Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg.
- LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2007). *Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg*. DVD. ISBN 978-3-88251-322-6.
- LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2012). *Klimaatlas Baden-Württemberg*. Homepage. aufgerufen auf: www2.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/abt5/klimaatlas_bw/klima/niederschlag/beschreibung/index.html; zuletzt besucht am 01.03.2013.
- MANZATO, AGOSTINO und M. J. GRIFFITH (2003). *Evaluating the sounding instability with the Lifted Parcel Theory*. *Atmospheric Research*, 67 - 68 (2003):455 – 473.
- PFÄFFL, FRITZ und T. HIRCHE (2011). *Die Geologie und Mineralogie der Bayerischen Alpen*

und des Alpenvorlandes, Bd. 5. Ohtaler Verlag.

- RAMMB (2011). *Regional and Mesoscale Meteorology Branch - Stability Indices*. Homepage. aufgerufen auf: <http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/satmanu-eumetsat/satmanu/basic/convection/parameters.htm>; zuletzt besucht am 27.05.2011.
- SINGH, SHAILESH KUMAR (2010). *Robust Parameter Estimation in Gauged and Ungauged Basins*. Doktorarbeit, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- STEINBRÜCKE, JOACHIM, B. FRÖHLINGS und R. WEISSHAUPT (2012). *Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet: HYMOG*. Lelystad.
- TALSPERRENBUCH (1999). *Nagoldtalsperre Erzgrube - Betriebsvorschrift und Dienstanweisung*. Technischer Bericht, Gewässerdirektion Nördlicher Oberrhein - Bereich Freudenstadt.
- VIEUX, BAXTER E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Nr. XVI. Kluwer, Dordrecht [u.a.], 2. Aufl.
- WALKER, IRA, V. CHAKRAPANI und W. ELMAHBOUB (2008). *The development of a shape factor instability index to guide severe weather forecasts for aviation safety*. *Meteorological Applications*, 15:465 – 473. Wiley InterScience.
- WIKIPEDIA (2013a). *Bad Reichenhall - Klima*. Homepage. aufgerufen auf: http://de.wikipedia.org/wiki/Bad_Reichenhall; zuletzt besucht am 25.03.2013.
- WIKIPEDIA (2013b). *Saalach*. Homepage. aufgerufen auf: <http://de.wikipedia.org/wiki/Saalach>; zuletzt besucht am 25.03.2013.

Anhänge

A. Datengrundlage

A.1. Datenaufbereitung

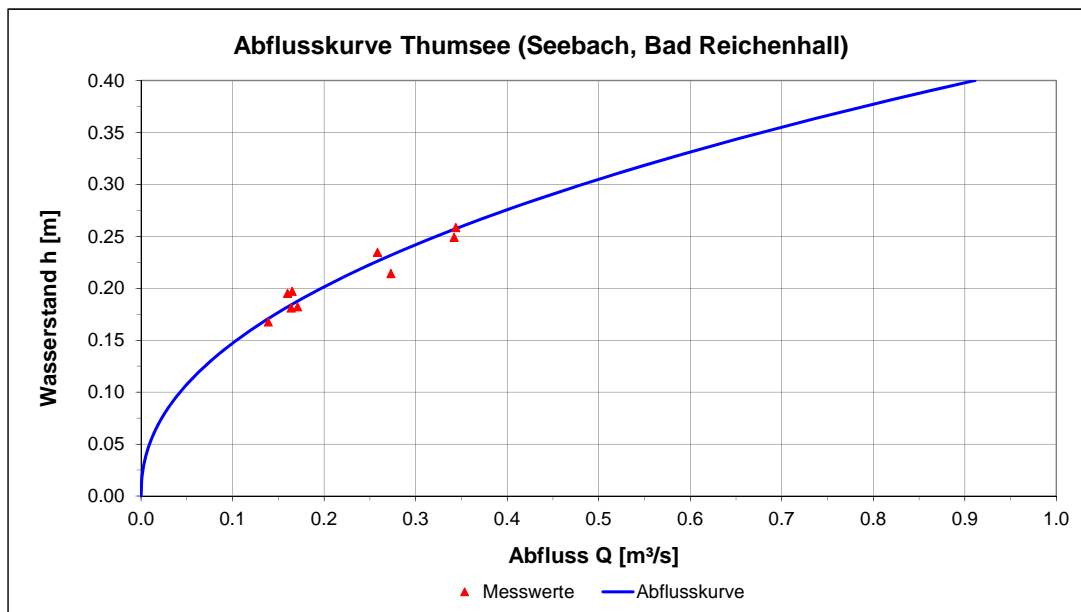


Abbildung A.1.: Abflusskurve Pegel Thumsee (Seebach)

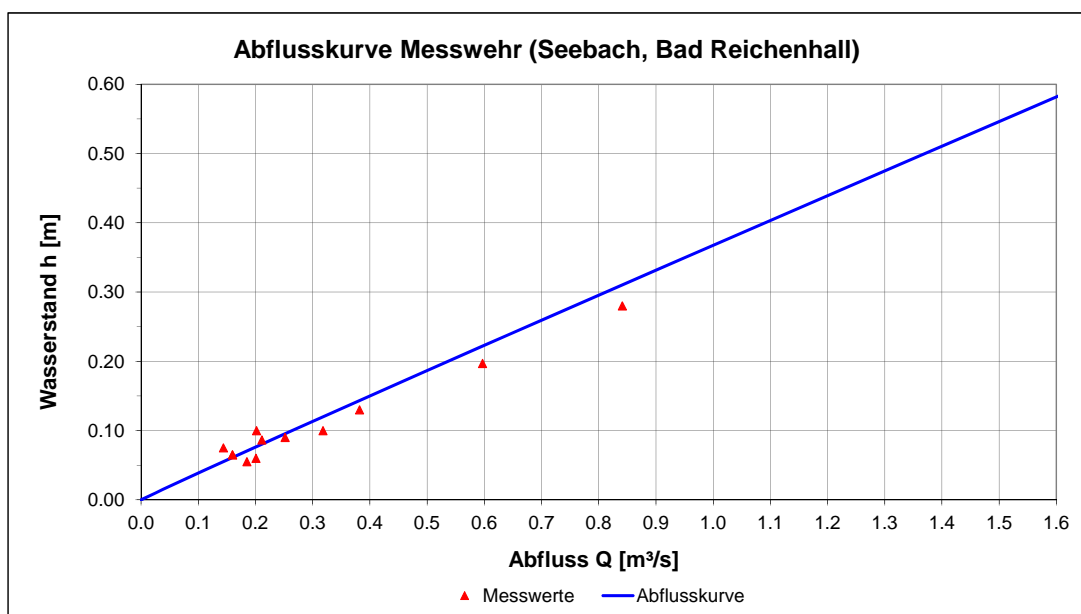


Abbildung A.2.: Abflusskurve Pegel Messwehr (Seebach)

A.2. Datenkorrektur

A.2.1. Verkräutung

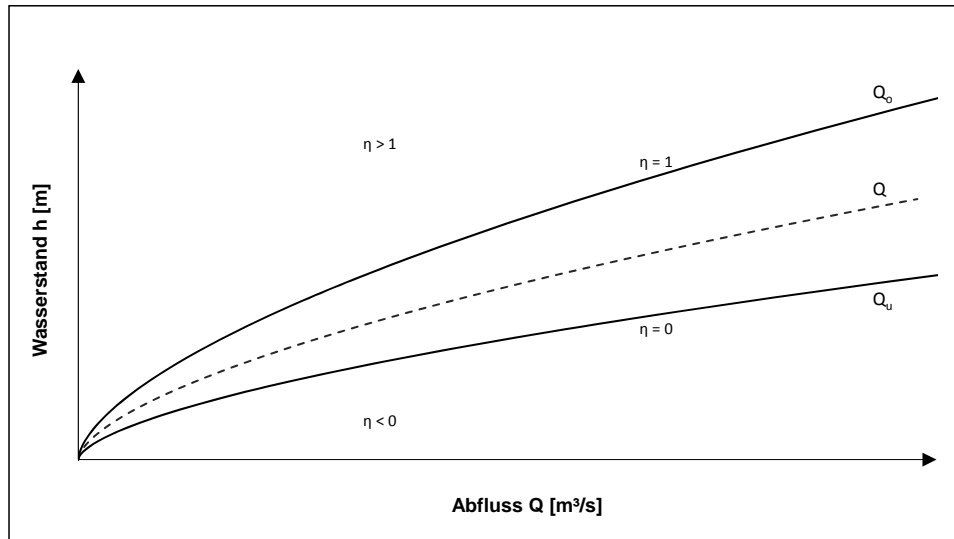


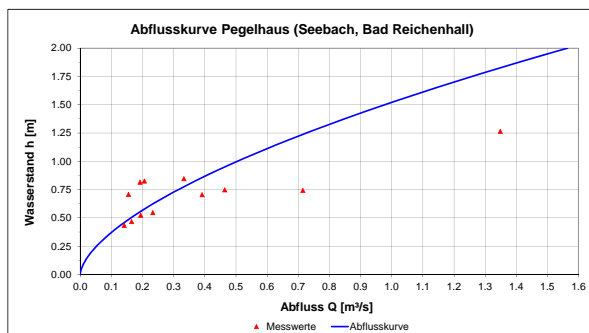
Abbildung A.3.: Abflusskorrektur mit dem Eta-Verfahren

Die Korrektur des Abflusses erfolgt mit folgender Formel:

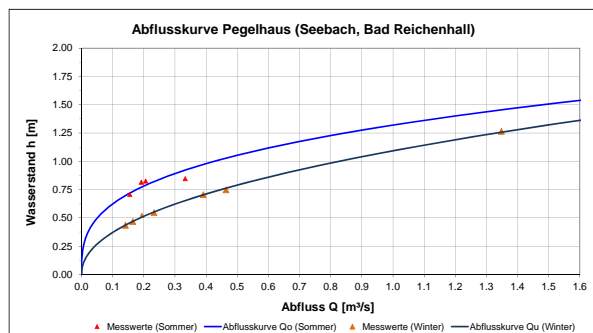
$$Q = Q_u + \eta \cdot (Q_o - Q_u)$$

mit

Q :	Korrigierter Abfluss	$[m^3/s]$
Q_u :	Abfluss ohne Durchflussbehinderung	$[m^3/s]$
Q_o :	Abfluss mit maximaler Durchflussbehinderung	$[m^3/s]$
η :	Eta-Wert	$[-]$



(a) unkorrigiert



(b) korrigiert

Abbildung A.4.: Pegel Pegelhaus - Abflusskorrektur mit dem Eta-Verfahren

A.2.2. Unsicherheit der Abflusskurve

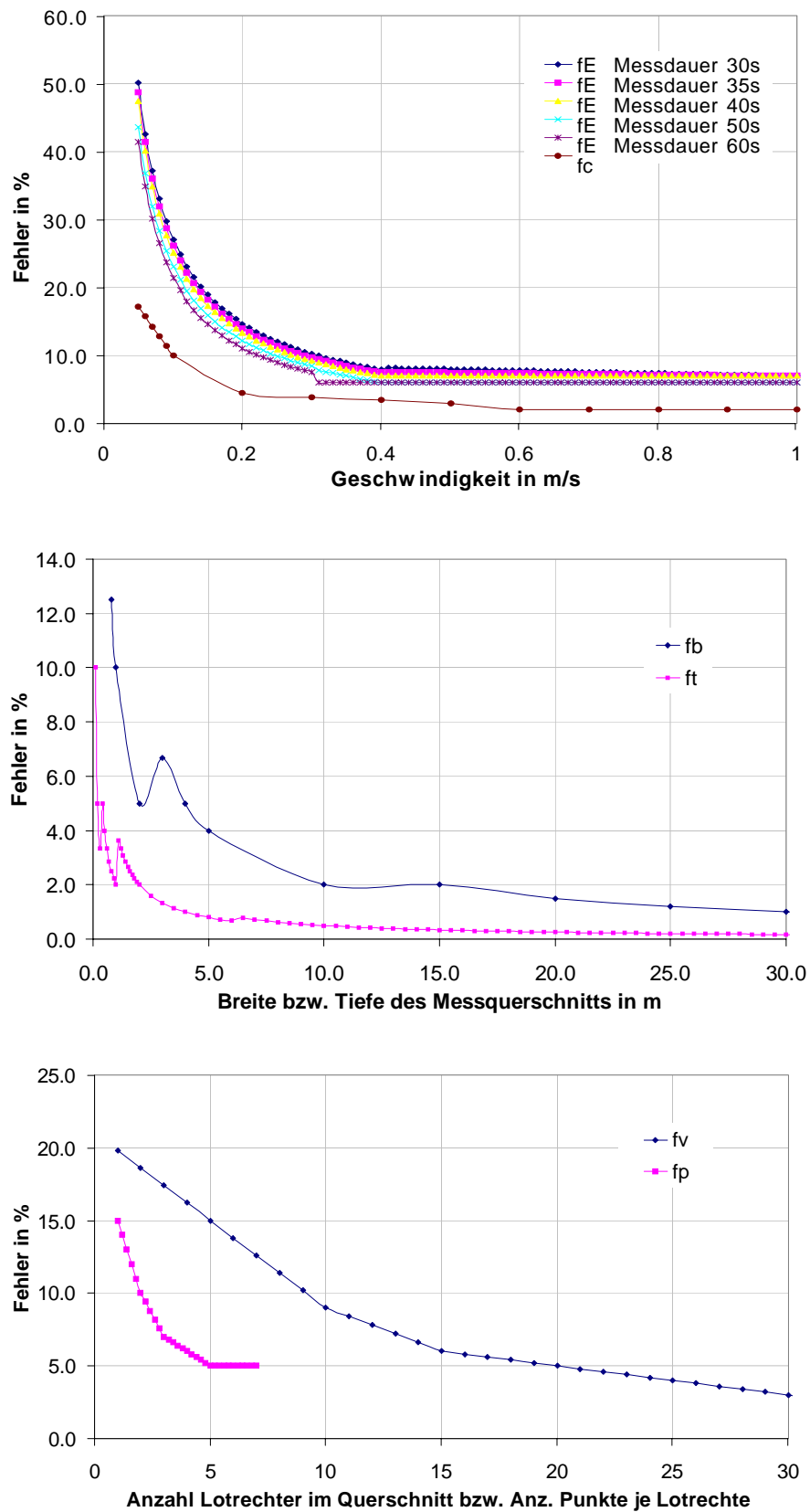


Abbildung A.5.: Messunsicherheiten der Abflussmessung (LUBW, 2004)

B. Generierung von Extremniederschlägen

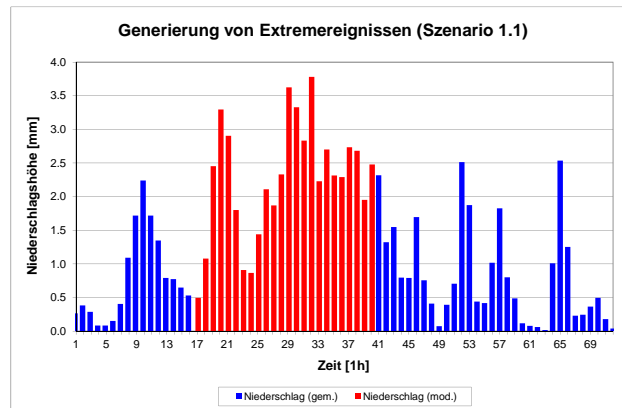


Abbildung B.1.: Auswahl des Niederschlagsereignisses

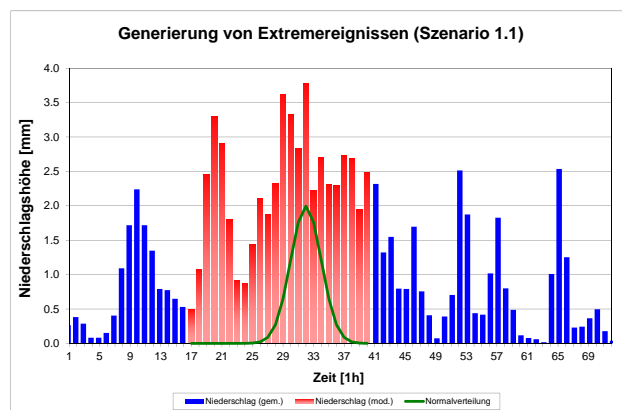


Abbildung B.2.: Anpassung einer Verteilungsfunktion entsprechend der Dauerstufe

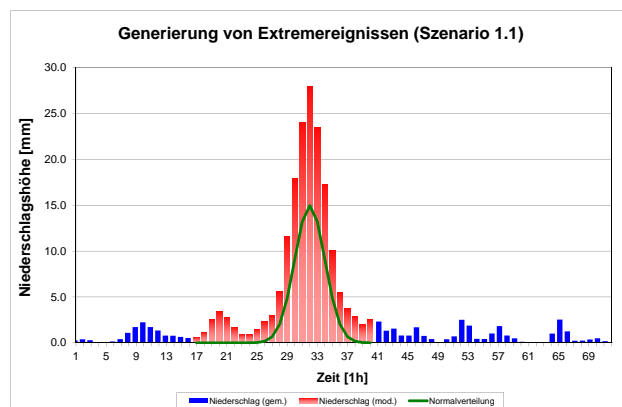


Abbildung B.3.: Erhöhung des Niederschlagsereignisses entsprechend der angepassten Verteilung

C. Hydrologisches Flussgebietsmodell

C.1. UG Nagold - Altensteig (Speichersimulation)

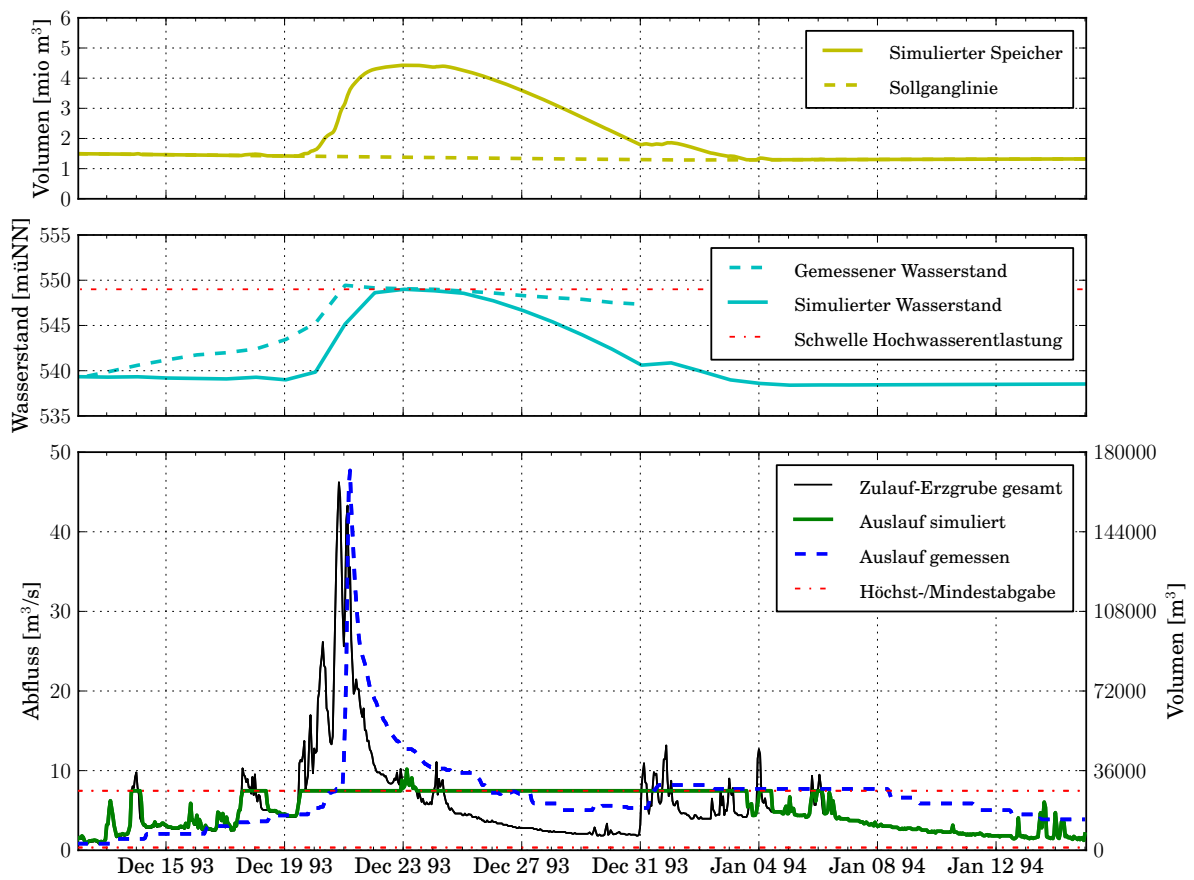


Abbildung C.1.: Speichersimulation mit gemessenem Zulauf (HW 1993)

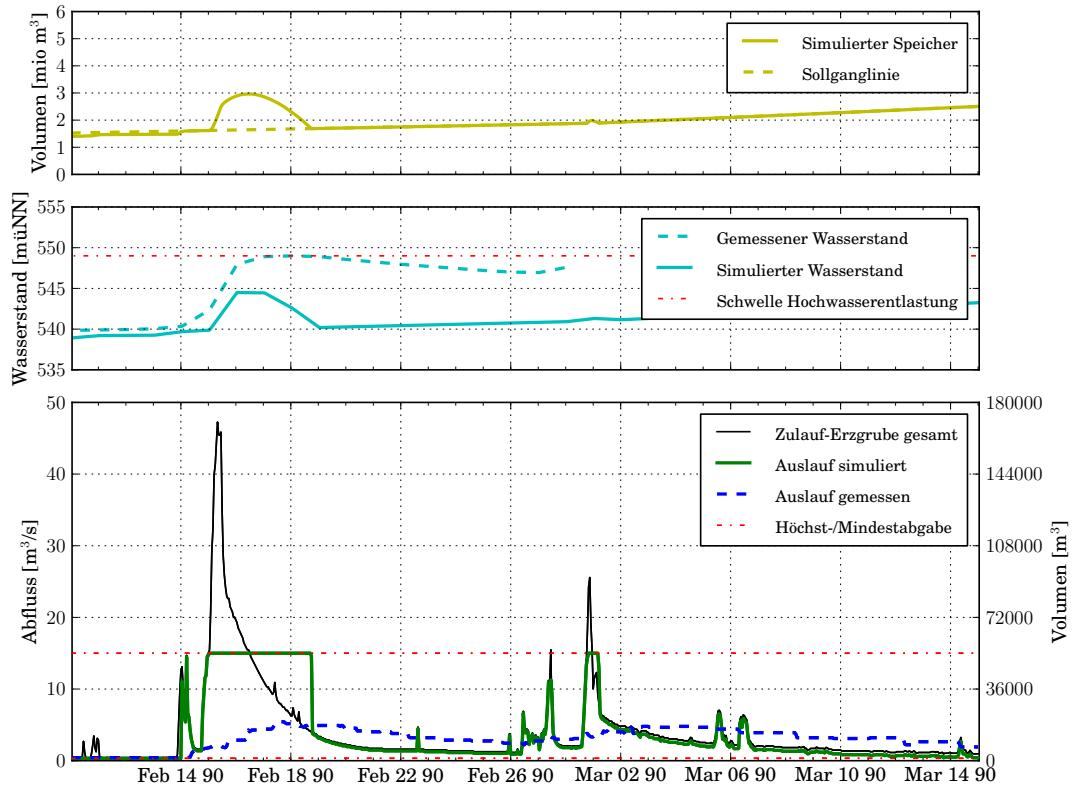


Abbildung C.2.: Speichersimulation mit neuen Bewirtschaftungsregeln (HW 1990)

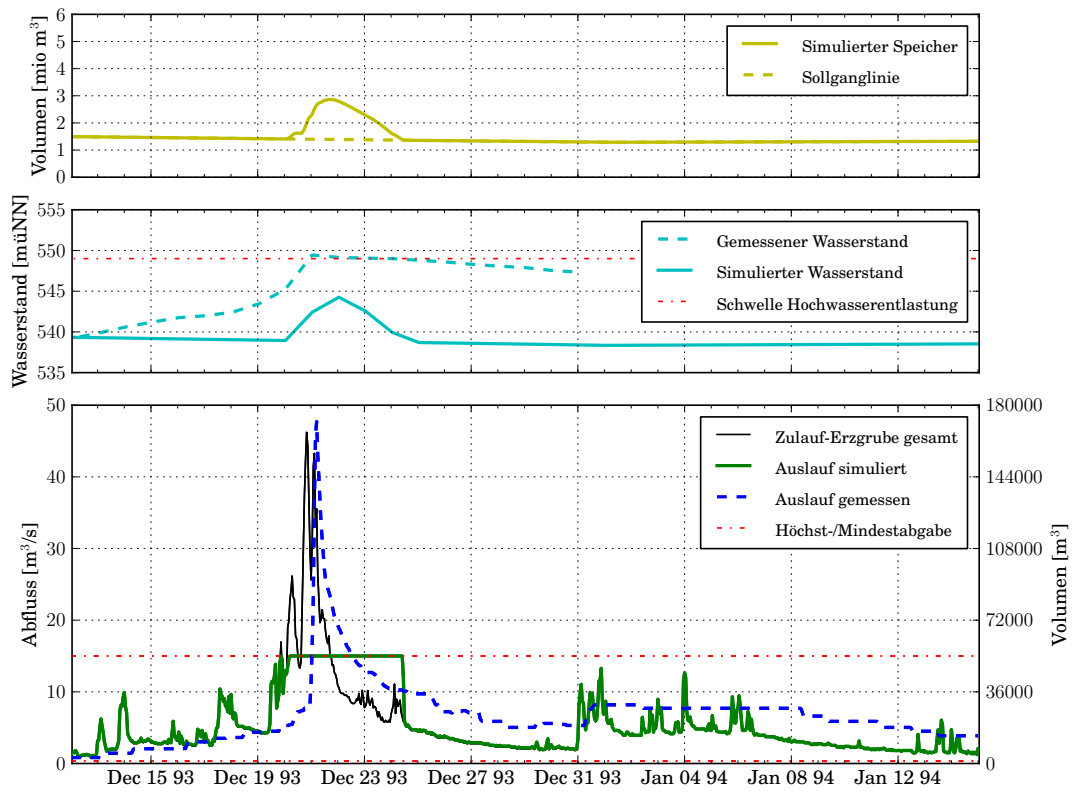
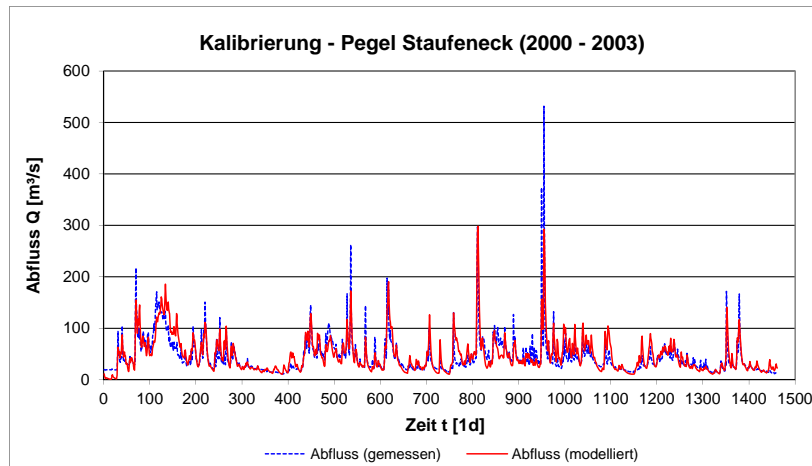
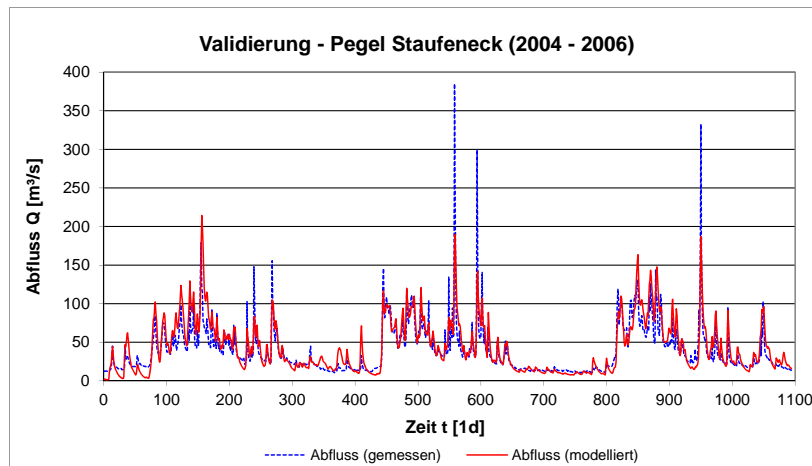


Abbildung C.3.: Speichersimulation mit neuen Bewirtschaftungsregeln (HW 1993)

C.2. UG Bad Reichenhall - Saalach/Seebach



(a) Kalibrierung (2000 - 2003)



(b) Validierung (2004 - 2006)

Abbildung C.4.: Pegel Staufeneck (Saalach) - Modellergebnisse (Tagesdaten)

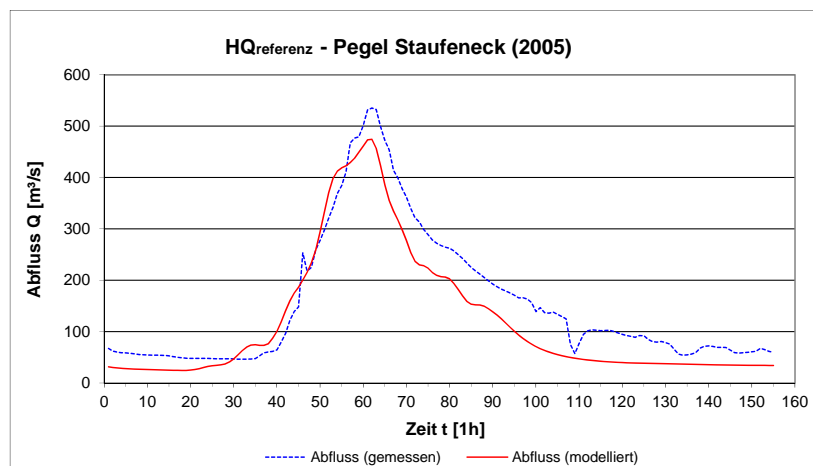


Abbildung C.5.: Pegel Staufeneck (Saalach) - Modellergebnisse HQ_{ref} (Stundendaten)

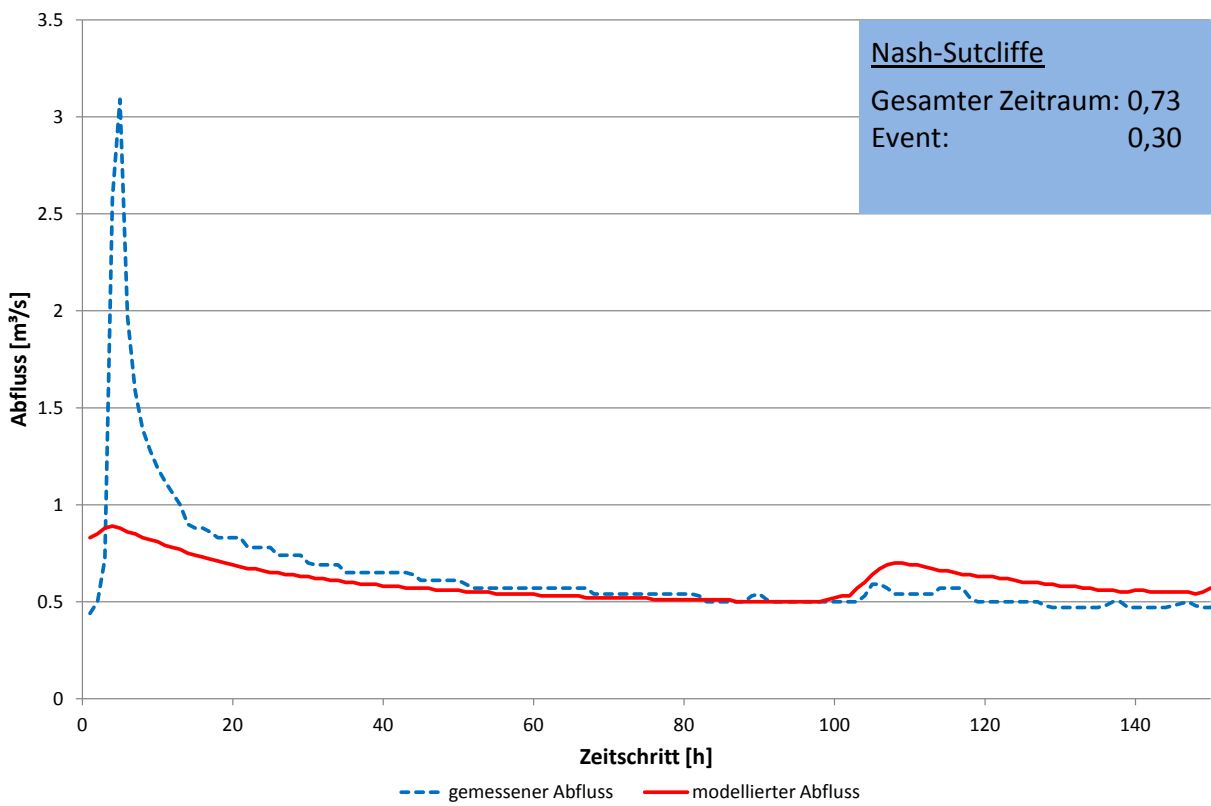
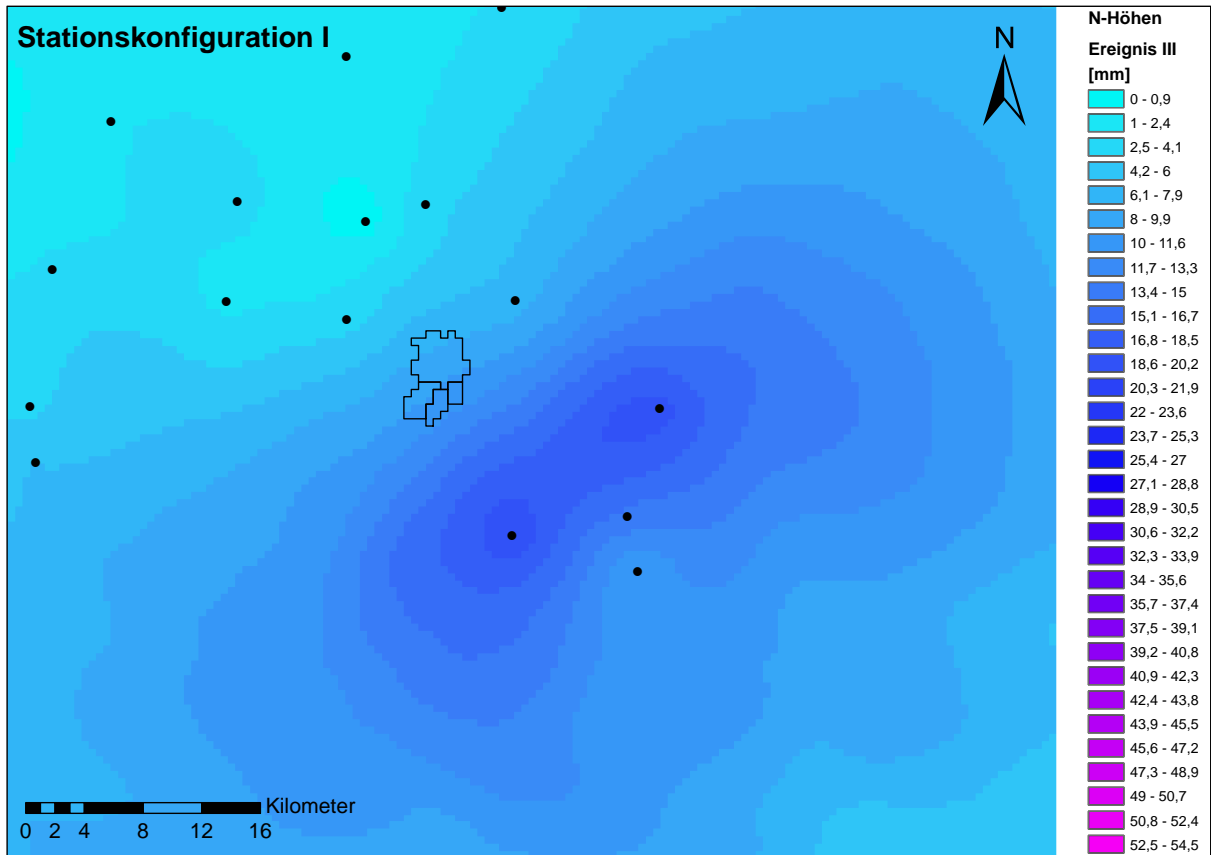


Abbildung C.6.: Abfluss Pegel Nonn (Ereignis 3, Konfiguration I)

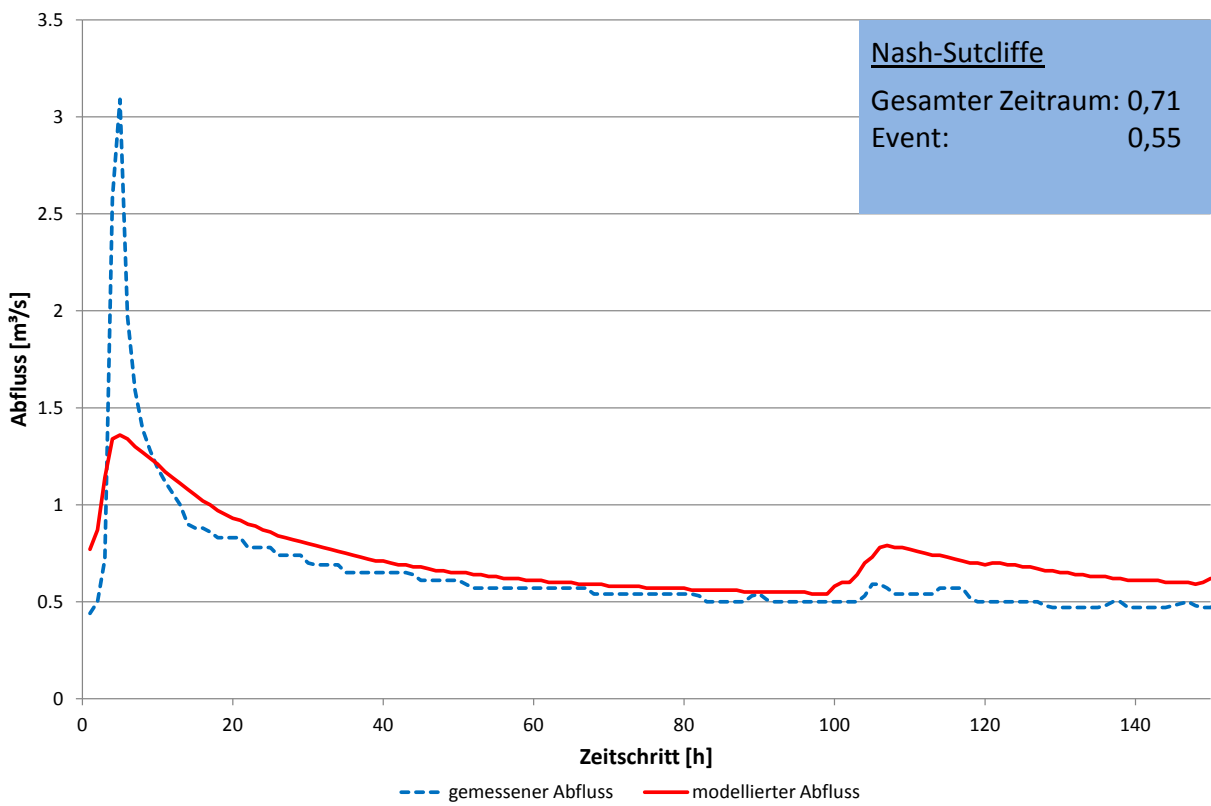
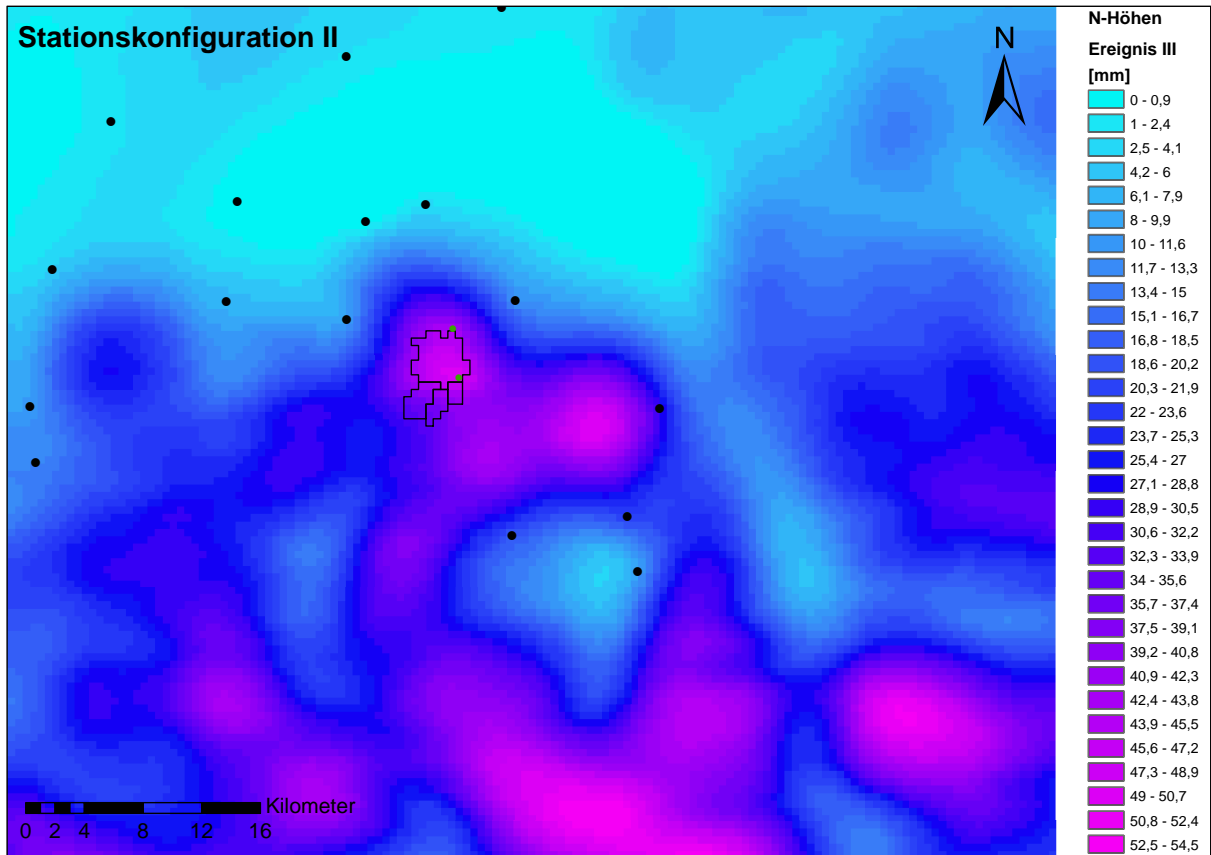


Abbildung C.7.: Abfluss Pegel Nonn (Ereignis 3, Konfiguration II)

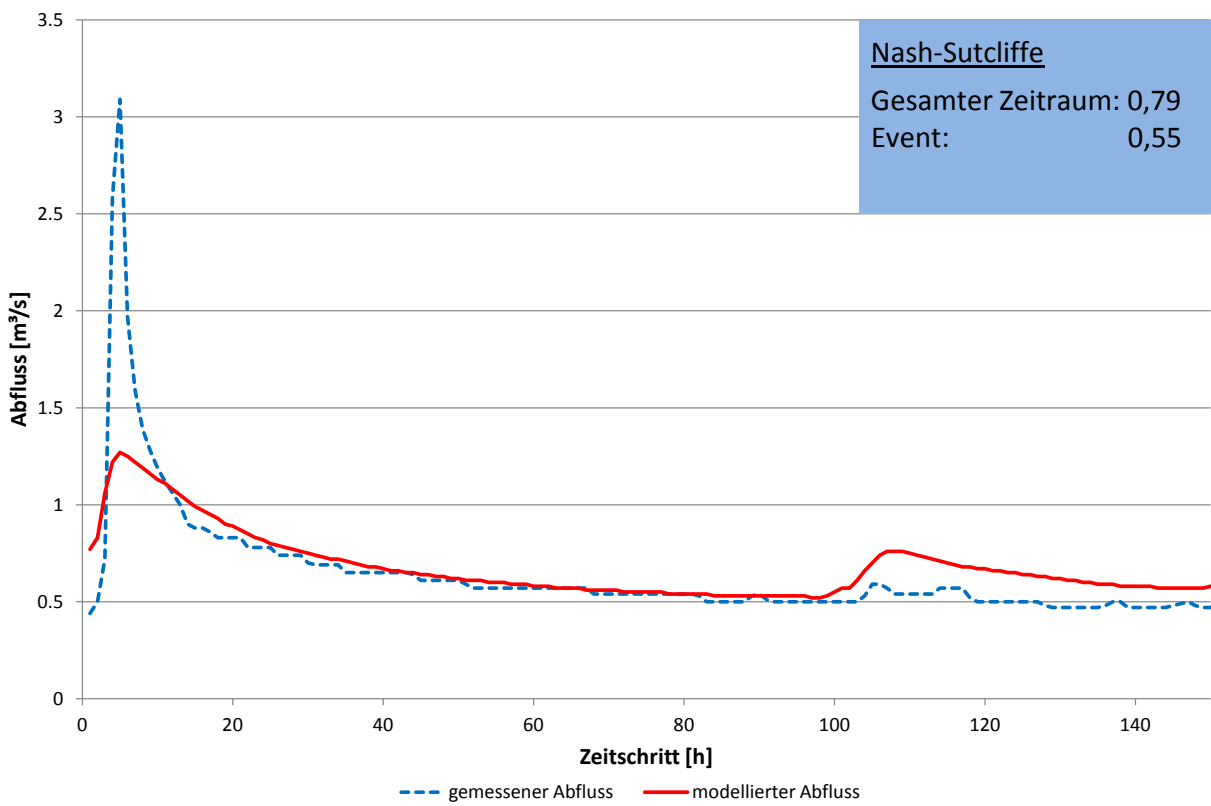
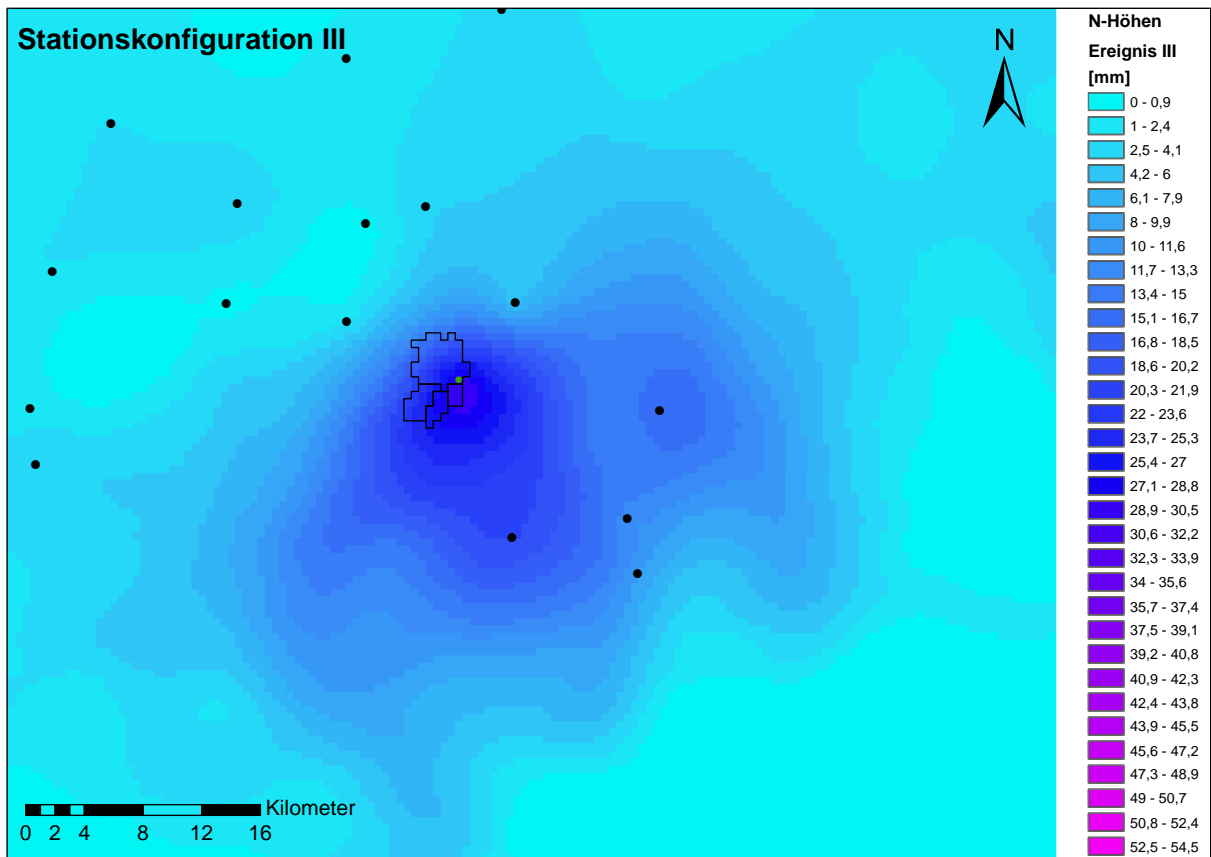
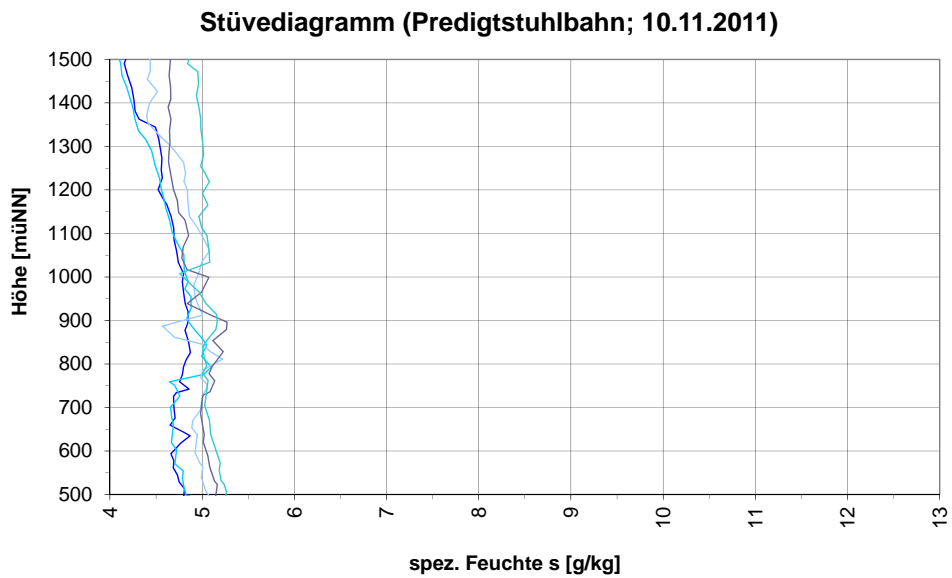
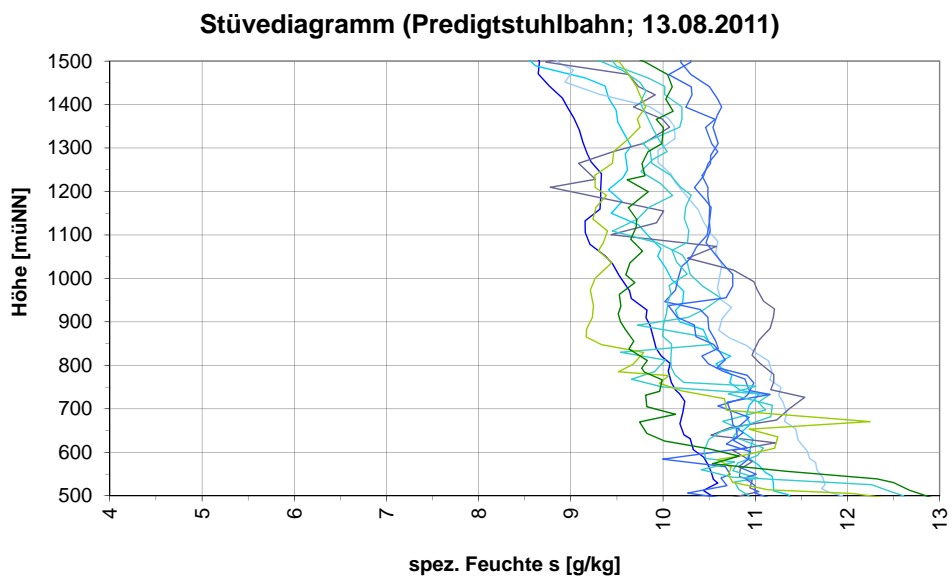


Abbildung C.8.: Abfluss Pegel Nonn (Ereignis 3, Konfiguration III)

D. Meteorologische Vorhersagen

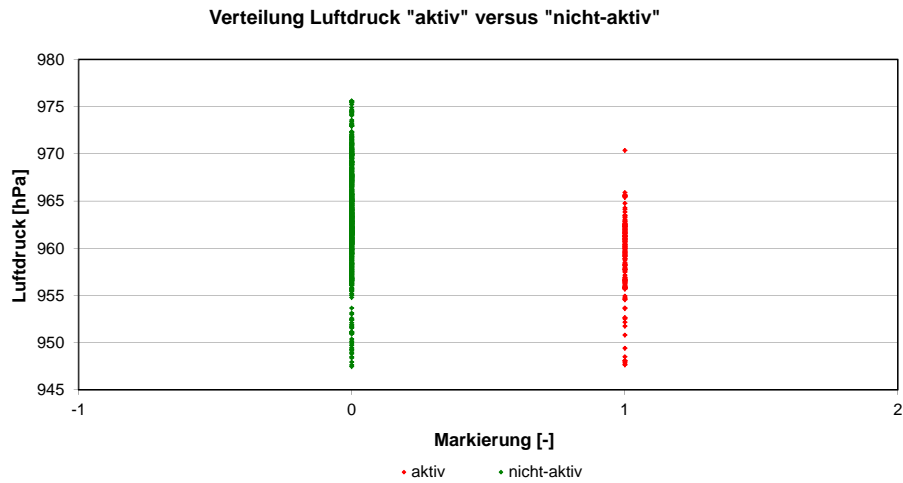


(a) Inversionswetterlage

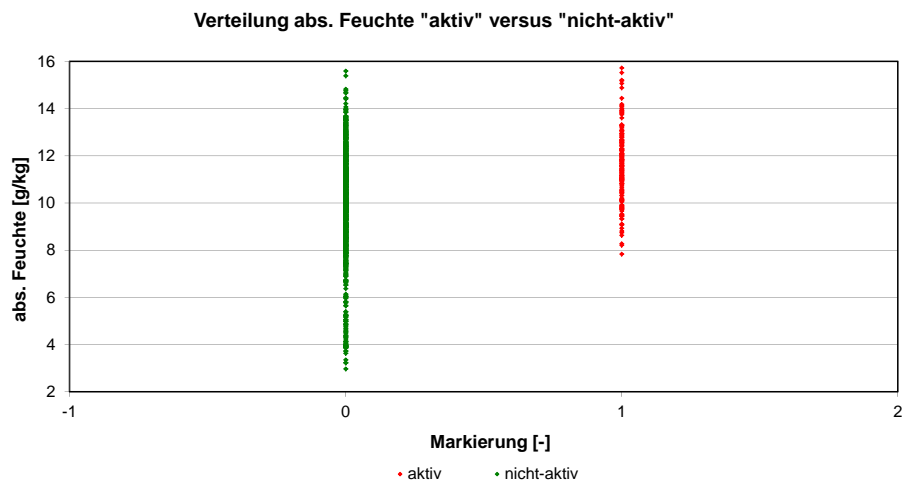


(b) Instabile Wetterlage

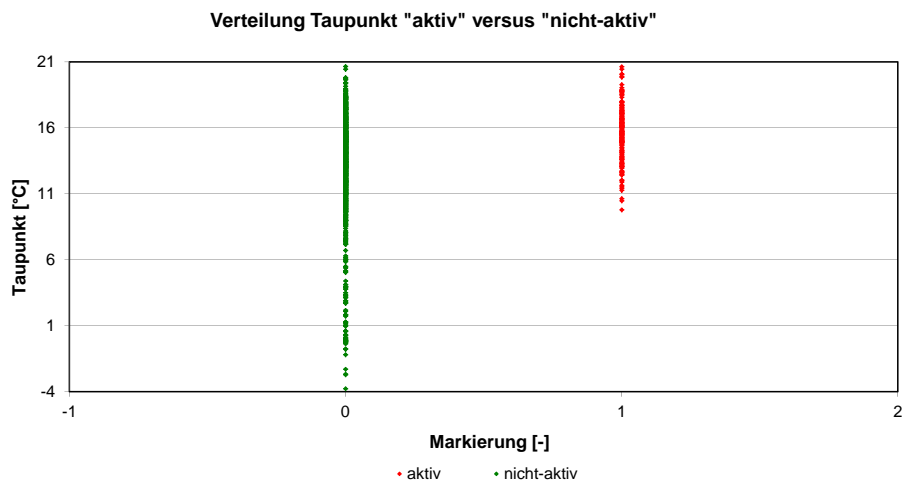
Abbildung D.1.: Atmosphärische Schichtung - Stüvediagramm (Spezifische Feuchte)



(a) Luftdruck (p)



(b) Absolute Feuchte (s)



(c) Taupunkttemperatur (T_D)

Abbildung D.2.: Verteilungen weiterer meteorologischer Größen nach Wetterlagen

Skill Scores - MultiMeteo / Showalter-Index SI($\Gamma_{5,0}$)									
Index	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Genauigkeitsmaß									
HR	0.58	0.67	0.71	0.76	0.67	0.70	0.70	0.81	0.79
POD	0.78	0.78	0.74	0.67	0.77	0.74	0.75	0.62	0.66
FAR	0.77	0.73	0.70	0.66	0.72	0.71	0.71	0.59	0.62
CSI	0.21	0.25	0.27	0.29	0.26	0.27	0.26	0.33	0.32
Qualitätsmaß									
HSS	0.16	0.24	0.27	0.32	0.25	0.27	0.26	0.38	0.36
TSS	0.33	0.43	0.44	0.45	0.43	0.43	0.44	0.47	0.47

Abbildung D.3.: Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung - MultiMeteo (Showalter-Index)

Skill Scores - MultiMeteo / K-Index (KI)									
Index	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Genauigkeitsmaß									
HR	0.57	0.66	0.68	0.77	0.66	0.66	0.66	0.78	0.77
POD	0.79	0.77	0.75	0.69	0.76	0.77	0.77	0.67	0.69
FAR	0.78	0.73	0.72	0.65	0.73	0.73	0.73	0.64	0.65
CSI	0.21	0.25	0.25	0.30	0.25	0.25	0.25	0.31	0.31
Qualitätsmaß									
HSS	0.16	0.23	0.24	0.34	0.23	0.23	0.23	0.35	0.34
TSS	0.32	0.41	0.42	0.47	0.41	0.41	0.41	0.47	0.48

Abbildung D.4.: Ergebnisse der Vorhersagenverifizierung - MultiMeteo (K-Index)

E. Veröffentlichung der Ergebnisse



Measurement of temperature and humidity profiles on a cable car as a tool for the determination of atmospheric stability

Felix Herma, Jochen Seidel, and András Bárdossy

Institute of Hydraulic Engineering, University of Stuttgart, Germany (felix.herma@iws.uni-stuttgart.de)

The purpose of this contribution is to assess the potential of meteorological data collected from a cable car for the development of atmospheric stability indices in the lower troposphere. This research is conducted within the EvaSim-Project (Coupled Traffic and Hydraulic Simulation to Aid in Emergency Response Planning) which is part of the research program "Rescue and Protection of Humans" founded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The central point of the project is the increase of the safety of the population in urban areas during floods. The main interest from the viewpoint of hydrology is focused on extreme rainfall events and flooding of urban areas and transportation infrastructure, dam failure or flash floods. One of the investigation areas of this project is located in the south-eastern German Alps close to the Austrian border. This is a small alpine catchment for which is prone to flash floods and therefore a reliable forecast for such floods mostly caused by convective rainfall events is important.

Commonly, weather balloons with radiosondes are used for the analysis of vertical atmospheric layering. These weather balloons reach high altitudes and atmospheric layering can be determined for the entire troposphere. On the other hand, these balloon ascents are expensive, require the appropriate equipment and permissions and cannot be conducted several times a day on an operational basis. Therefore, a cable car in the study area was equipped with meteorological instruments which provide continuous data during the operating hours. The meteorological parameters that are measured on the cable car are atmospheric pressure, humidity and air temperature. This data is used for the derivation of further meteorological variables (e.g. specific humidity, vapour pressure, dew point temperature, etc.) which are relevant for atmospheric layering. Although the measurement range is limited to 1100 m of vertical elevation between the valley and the summit station of the cable car, it is one aim of this research work to evaluate how these data can be used to determine small-scale vertical air layering in this catchment area and if tendencies for convective thunderstorm events can be recognized. If this proves successful, these cable car measurements could be implemented in a (real-time) thunderstorm forecasting system in this small alpine catchment and thus extend the forecast lead time.



Stability Indices derived from Atmospheric Measurements on a Cable Car

F. Herma, J. Seidel, and A. Bárdossy

Universität Stuttgart, Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems, Germany
(felix.herma@iws.uni-stuttgart.de)

Stability indices are meteorological parameters to describe vertical atmospheric layering and therefore it is possible to predict convective events such as thunderstorms.

Commonly, weather balloons with radiosondes are used for the analysis of vertical atmospheric layering. These weather balloons reach high altitudes and atmospheric layering can be determined for the entire troposphere. On the other hand, these balloon ascents are expensive, require the appropriate equipment and permissions and cannot be conducted several times a day on an operational basis. Due to the limitations of the application of weather balloons the unconventional idea came up to equip a cable car with meteorological instruments for vertical profile measurements. To some extent the meteorological instruments had to be customized to the particular requirements and data are transmitted via GSM.

The investigated area is a small alpine catchment which is prone to flash floods and thus a reliable forecast for such floods mostly caused by convective rainfall events is important. Therefore the purpose of this contribution is to proof if a cable car can be used for measuring continuous data during the operating hours and whether it is possible to derive reliable conclusions about the stability in the lower troposphere.

Several stability indices (e.g. Lifted-, Showalter-, Boyden- and Convective-Index) were investigated. Indices which are calculated on the basis of the "Lifted Parcel Theory" were tested with different approaches to determine the most unstable parcel and therefore the initial values of the required parameters. The derived indices were flagged in active (thunderstorms) and non-active (no thunderstorms) cases. The classification results from available lightning maps in this region. Threshold values were established to distinguish stable, potential indifferent and unstable atmospheric conditions. On the basis of this division pre-warnings for the occurrence of thunderstorms are declared. The verification of the quality of these predictions is done by a skill score statistic.

Teilabschlussbericht

Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur
Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen

AP 4: Verhalten der Bevölkerung



gefördert durch das BMBF

Förderkennzeichen

13N10594

April 2013

Universität Stuttgart, Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt
Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung (ZIRN)

Sophia Alcántara, M.A.; Rainer Kuhn, M.A.; Prof. Dr. Dr. h.c. Ortwin Renn;
Dipl.Ing. (FH) Silvia Renn, Piet Sellke, M.A.

Inhaltsverzeichnis

1.	AP4 „Verhalten der Bevölkerung“	5
1.1.	Literaturrecherche	6
1.1.1	Allgemeines Verhalten in Katastrophen	7
1.1.2	Die Warnung	9
1.1.3	Die Evakuierung	16
1.1.4	Verhalten im Straßenverkehr	23
1.1.5	Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	30
1.2.	Fragestellungen und methodisches Vorgehen	32
1.2.1.	Fokusgruppen	33
1.2.2.	CATI-Erhebung (Computer Assisted Telephone Interview).....	35
1.2.3	Agentenbasierte Simulation	37
1.3	Zentrale Ergebnisse der empirischen Untersuchungen.....	40
1.3.1	Erkenntnisse aus den Fokusgruppen.....	40
1.3.2	Erkenntnisse aus der CATI	44
1.4	Agentenbasierte Simulation	65
1.4.1	Typenbildung und Umsetzung der Szenarien	65
1.4.2	Ergebnisse der Simulation	68
1.5	Fazit und Verwertungszusammenhang	72
2.	Literatur.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Erhebungsdesign	6
Abb. 2: Aufruf zur Teilnahme an Fokusgruppen im Altensteiger Amtsblatt.....	34
Abb. 3: Altensteig und Umgebung	40
Abb. 4: Warnung Aufmerksamkeit	46
Abb. 5: Warnung Glaubwürdigkeit	46
Abb. 6: Warnung Vertrauenswürdigkeit	47
Abb. 7: Szenario 1 - Was würden Sie tun?	49
Abb. 8: Szenario 2 - Was würden Sie tun?	50
Abb. 9: Szenario 3 - Was würden Sie tun?	51
Abb. 10: Informationsquellen	54
Abb. 11: Informationsinhalt	55
Abb. 12: Evakuierungserfahrung	56
Abb. 13: Gefährdung Altensteig.....	56
Abb. 14: Gefährdung Haus	57
Abb. 15: Gefährdung Arbeitsstelle	57
Abb. 16: Gründe gegen Evakuierung.....	58
Abb. 17: Verkehrsmittelwahl	59
Abb. 18: Externe Hilfe.....	60
Abb. 19: Art der Hilfe	61
Abb. 20: Alter	62
Abb. 21: Schulabschluss	62
Abb. 22: Haushaltsnettoeinkommen.....	64
Abb. 23: Ausländeranteil.....	64
Abb. 24: Screenshot der Simulation	70

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zeiten hinsichtlich eines Hochwasserereignisses.....	33
Tab. 2: Zitat aus den Fokusgruppen: Informiertheit.....	40
Tab. 3: Zitate aus den Fokusgruppen: Warnungsmechanismen	41
Tab. 4: Zitat aus den Fokusgruppen: Wahrnehmung der Bedrohung bei einem „normalen“ Hochwasser.....	41
Tab. 5: Zitat aus den Fokusgruppen: Wahrnehmung der Bedrohung bei einem „normalen“ Hochwasser.....	42
Tab. 6: Zitate aus den Fokusgruppen: Eltern.....	43
Tab. 8: Persönliche Gefahreinschätzung.....	48
Tab. 9: Personentypen und Pläne	67
Tab. 10: Pläne und Anteil der Personen, die diese verfolgen	68

1. AP4 „Verhalten der Bevölkerung“

Im Arbeitspaket 4 „Verhalten der betroffenen Bevölkerung“ lag der Fokus der Untersuchung darauf, inwiefern sich das Verhalten der Bevölkerung bei Evakuierungsmaßnahmen simulieren lässt. Dies ist ein bedeutender Bestandteil für die Ressourcenabschätzung der Notfallmanager (z.B. hinsichtlich Straßenkapazitäten, Zeitlimits, Art der Warnung, Warnmechanismen usw.).

Die Erhebung von validen Daten für eine Prognosen bzw. Simulation von menschlichem Verhalten, ist aus unterschiedlichen Gründen schwierig. Ein zentrales Problem ist, dass dafür eine Abfrage von potentiell Verhalten notwendig ist, d.h. eine Reaktion auf die Frage: „Was würden Sie tun wenn...?“. Verhaltensfragen sollen ermitteln, was der Befragte zu tun beabsichtigt, so dass in allen Fällen immer nur über beabsichtigte Verhaltensweisen berichtet wird („berichtetes Verhalten“). Der Befragte muss also nicht nur sein Verhalten verbal äußern, sondern er muss sich zudem in eine Situation versetzen, in der er wahrscheinlich über keine Erfahrung verfügt, und sich dann vorstellen, wie er handeln würde. Da Menschen solche Situationen unterschiedlich gut antizipieren können ist es die Aufgabe der Forscher, mit realistischen Techniken und Fragestellungen einen für die Interviewpartner nachvollziehbaren Simulationsablauf zu gewährleisten und gleichzeitig, mit der notwendigen kritischen Distanz, die daraus entstandenen Erkenntnisse innerhalb des Forschungsprozesses zu interpretieren (vgl. Schnell et al. 1999).

Gesucht wurde deshalb ein Erhebungsdesign, das unterschiedliche Methoden kombiniert und gleichzeitig eine Validierung der im Projekt gewonnenen Ergebnisse ermöglicht. Hierzu wurde im Projekt EvaSim nach dem Prinzip der Methodentriangulation vorgegangen und ein between-method-Design gewählt. Die Kombination von quantitativen und qualitativen Methoden sollte zum einen repräsentative Rückschlüsse ermöglichen und zum anderen unterschiedliche Perspektiven der befragten Individuen im Sinne von Grundkonzepten und mentalen Mustern (mind maps) widerspiegeln. So kann ein umfassendes Bild des Untersuchungsgegenstandes gezeichnet werden, welches über den Erkenntnishorizont, der beim Einsatz nur einer Methode zu erwarten wäre, hinausragt (vgl. Kuhn 2012).

Obwohl es in der Literatur einige Studien und Projekte zum Thema Evakuierungsverhalten gibt, ist eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den hier vorliegenden Fall nur bedingt möglich. So muss im Einzelnen geprüft werden, inwieweit eine Übertragbarkeit der Annahmen auf das Untersuchungsgebiet sinnvoll ist. Aus diesem Grund wurde zunächst ein qualitatives Instrument eingesetzt. Allgemeine Erkenntnisse aus

der Literatur und ortsspezifische Fragestellungen wurden innerhalb von Fokusgruppen kritisch diskutiert, um realistische Annahmen über das Evakuierungsverhalten der Altensteiger Bevölkerung zu formulieren.

Die inhaltlich auf den Erkenntnissen der Fokusgruppen aufbauende und repräsentativ angelegte Telefonumfrage diente sowohl der Überprüfung (klassische Triangulation), als auch der Quantifizierung der Ergebnisse. Im Vordergrund stand dabei die Frage, inwieweit sich die Erkenntnisse auf die gesamte Bevölkerung von Altensteig übertragen lassen. Um aus den erhobenen Daten eine belastbare Prognose des Evakuierungsverhaltens zu erstellen, wurde unter Berücksichtigung der quantitativen Ergebnisse und weiterer offizieller Statistiken, sowie den qualitativen Aussagen aus den Fokusgruppen Idealtypen gebildet, welche die Grundlage für die agentenbasierte Simulation bilden.

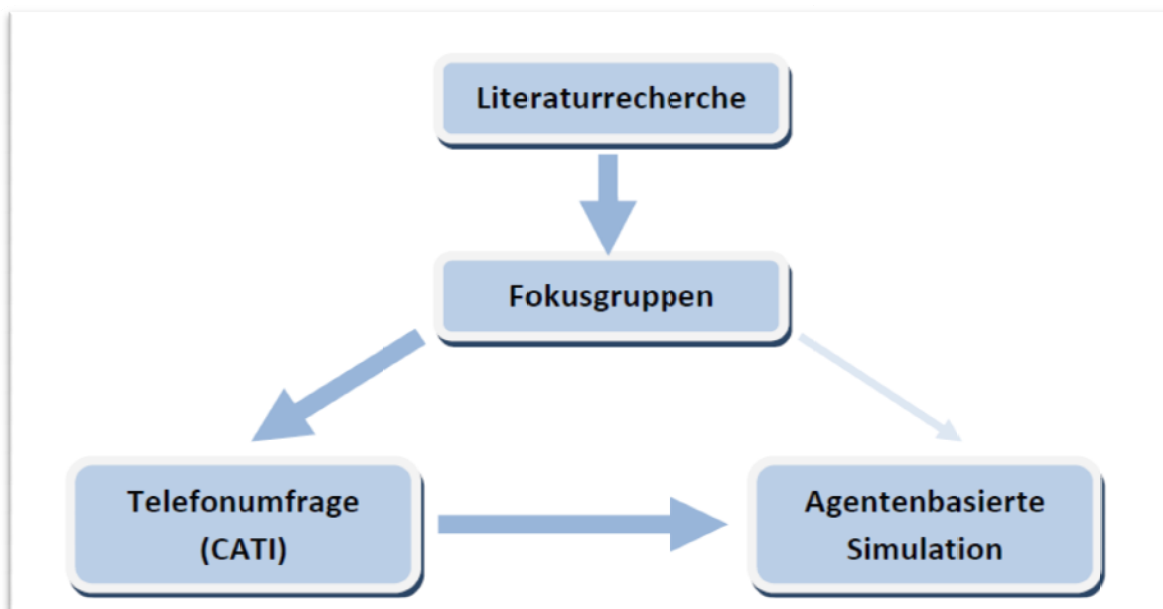


Abb. 1: Erhebungsdesign

Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Methoden in ihrer chronologischen Reihenfolge vorgestellt, ihre empirische Durchführung erläutert sowie zentrale Ergebnisse dargestellt. Abschließend werden die Erkenntnisse im Hinblick auf ein erfolgreiches Katastrophenmanagement aufbereitet.

1.1. Literaturrecherche

Um das zu erwartende Verhalten von Bürgern im Fall eines Damm- oder drohenden Deichbruchs darzustellen und sinnvoll zu modellieren, muss auf deren Reaktion zu den unterschiedlichen Evakuierungsphasen eingegangen werden. Aus der Auswertung der Literatur geht hervor, dass folgende Phasen zu beachten sind:

- Das Wahrnehmen einer Warnung,
- Die Reaktion auf die Warnung,
- Die Evakuierung und die damit verbundenen Verhaltensmuster.

Alle drei Phasen sind von Bedeutung, da sich das Verhalten der Menschen in allen drei Phasen unterschiedlich auf den Evakuierungsprozess auswirken kann.

Zu dem Verhalten von Menschen, die einem Dammbbruch ausgesetzt sind, gibt es so gut wie keine Studien. Die zahlreiche Literatur über den Orkan Katrina in den USA erwies sich jedoch als aufschlussreich, da dieser Orkan mit einem Deichbruch verbunden war und eine Situation herbeiführte, die mit dem Worst Case Scenario in Altensteig vergleichbar scheint. Ebenfalls fanden sich einige wissenschaftliche Studien über einen Evakuierungsprozess bei Überschwemmungen.

Das Verhalten von Bürgern in Deutschland in Katastrophenfällen ist bisher kaum untersucht worden. Daher stützen sich die meisten Erkenntnisse auf amerikanische Studien. Diese befassen sich zum Großteil mit Evakuierungen, die aufgrund von Orkanereignissen oder Überschwemmungen angeordnet worden sind. Es bleibt zu prüfen, inwieweit sich diese Erkenntnisse auf Deutschland übertragen lassen.

Zudem gibt es bislang nur wenig deutsche Literatur, die sich mit dem Verhalten von Autofahrern während einer Evakuierung befasst. Daher wurde bei dieser Literaturrecherche das allgemeine Verhalten von Menschen während Katastrophen sowie deren Reaktionen auf eine Warnung untersucht. Ergänzt wurden diese Recherchen durch die Analyse von Ergebnissen zum allgemeinen Verhalten im Straßenverkehr bei Stresssituationen. Die Ergebnisse wurden folgend dazu benutzt, die wenigen Studien mit dem Thema „Verhalten während Evakuierungen“ zu ergänzen. Die Erkenntnisse aus der Literatur wurden zudem immer wieder auf die konkrete Situation in Altensteig bezogen und entsprechend eingeordnet.

1.1.1 Allgemeines Verhalten in Katastrophen

Ein weit verbreiteter Katastrophenmythos ist, dass bei einem Krisenfall die meisten Menschen in Panik ausbrechen. Systematische Studien von Panikverhalten während Katastrophenereignissen haben jedoch ergeben, dass Panik so gut wie nie vorkommt (vgl. Brown 1965; Johnson 1988; Keating 1982; Quarantelli 1960; Sime 1983). Nicht einmal bei Ereignissen wie der atomaren Bombardierung von Japan, im Jahre 1945 (vgl. Janis 1951), dem Kings Cross Underground Feuer im Jahre 1987 (vgl. Donald & Canter 1990), dem Großbrand im Summerland Complex im Jahre 1973 (vgl. Sime 1983) oder beim World Trade Center Anschlag von 2001 konnte panisches Verhalten im größeren Stil nachgewiesen werden. Eine Studie von Blake et al. ergab,

dass nur 0.8% der Menschen im World Trade Center panisch reagierten (Blake et al. 2004).

Menschen verfallen auch selten in eine Art Angststarre, die oft mit Panik in Verbindung gebracht wird. Meist verhalten sich Menschen den Umständen entsprechend normal. Die Evakuierung des World Trade Centers im Jahre 2001 ist zum Beispiel hauptsächlich von den Betroffenen selbst ruhig und diszipliniert organisiert worden, so konnten 99% der Leute, die sich unterhalb der Einschlagstelle befanden, beide Gebäude rechtzeitig verlassen. Insgesamt haben es 87% der Menschen in beiden Gebäuden geschafft, sich in Sicherheit zu bringen (vgl. Averill et al. 2005).

Eine verbreitete Reaktion dagegen ist, dass sich Betroffene von der Realität entfernen und die Gefahr ausblenden. Dies führt dazu, dass sie sich in Anbetracht der Situation viel zu ruhig verhalten und bei Evakuierungsaufrufen, z.B. erst mal ordnungsgemäß den Computer herunter fahren und ihren Schreibtisch aufräumen (vgl. Drury and Cocking 2007). In den meisten Fällen werden die Betroffenen jedoch schnell auf den Boden der Tatsachen zurückgeholt, sobald sie die Bedrohlichkeit der Situation erkennen (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Katastrophenerfahrung

In den letzten 100 Jahren gab es in Altensteig zweimal große Hochwasserereignisse, bisher jedoch ohne Dambruch. Die Erfahrungen, bereits eine Katastrophe miterlebt zu haben, wirken sich auf das spätere Handeln in weiteren Katastrophenfällen aus. Jedoch ist dieses Handeln nicht konsistent. Das Erleben von Katastrophen hat scheinbar keinen einheitlichen Einfluss auf die Interpretation von Warnungen, Entscheidungsprozessen, Verhalten oder Informationsfindung (vgl. Lindell/Perry 2004). Eine Studie von Siegrist und Gutscher zeigte allerdings einen Unterschied in der Einschätzung der negativen Effekte einer Überschwemmung, zwischen Personengruppen mit Hochwassererfahrung und ohne Hochwassererfahrung. So zeigten die 201 durchgeführten Interviews, dass Menschen die bisher keine Erfahrungen mit einem Hochwasser gemacht haben die negativen Wirkungen dieses Ereignisses stark unterschätzen (vgl. Siegrist/Gutscher 2008). In Orkansituationen lassen sich Leute eher von ihrer eigenen Risikoeinschätzung, den spezifischen, mit dem Sturm verbundenen Gefahrenfaktoren, dem Ort und dessen Nähe zur Gefahr sowie der Beschaffenheit ihres Hauses leiten (vgl. Lindell et al. 2005).

Umso weiter entfernt die Menschen von einem gefährdeten Gebiet wohnen, desto weniger interessieren sie sich für ihre persönliche Gefährdung bzw. informieren sich

darüber (vgl. Hanson et al. 1979). Zudem bedeutet eine generelle Aufmerksamkeit nicht automatisch, dass Menschen dann auch auf öffentliche Warnungen adäquat reagieren. In der Regel sind sie nur eher bereit, Informationen aufmerksam zu verfolgen. Bei manchen Menschen verhindert eine positive Erfahrung (kein Schaden trotz Warnung) eine adäquate Reaktion auf eine Warnung; eine negative Erfahrung hingegen (Schaden nach Warnung) verstärkt die Bereitschaft, die geforderten Handlungen auszuführen (vgl. Sorensen 2000).

Charaktereigenschaften

Es wird angenommen, dass Charaktereigenschaften wie Kontrollverlust (etwas liegt nicht mehr in meiner Hand) oder Fatalismus (was passiert, passiert, egal was ich dagegen unternehme) Evakuationsverhalten beeinflussen. Zum Beispiel hat sich der ehemalige US-Präsident Harry Truman dazu entschieden in seinem Haus zu bleiben, als Mt. St. Helen ausbrach, weil er annahm dass sein Schicksal von einer höheren Autorität bestimmt wurde (er starb während der Eruption) (vgl. Green et al. 2002).

Es gibt ebenfalls Studien die belegen, dass ein Hang zum Fatalismus die Reaktion auf Warnungen bei Erdbeben (vgl. Turner et al. 1981) und Tornados (vgl. Sims/Baumann 1972) einschränkt. Wenn Menschen eine Warnung hören, reagieren sie oft erstmals mit Unglauben: „mir kann das ja nicht passieren“ oder „mich wird es schon nicht treffen“.

Sims und Baumann (1972) fanden heraus, dass nicht etwa die erwartete Stärke von Tornados, sondern die subjektive Selbsteinschätzung dazu führte, ob Einwohner das Gefühl hatten, selber die Kontrolle über die Situation zu haben oder nicht. Hanson et al. (1979) bestätigten dies mit ihrer Studie, die aufzeigte, dass die Tatsache, dass man einer Gefahr ausgesetzt ist, keinen Einfluss darauf hat, ob man auf Warnungen reagiert.

1.1.2 Die Warnung

Eine besonders effektive Maßnahme zur Eindämmung von Schäden infolge einer Katastrophe ist ein funktionierendes Warnsystem. Bei rechtzeitiger Warnung können gefährdete Gebiete evakuiert oder andere Vorkehrungsmaßnahmen getroffen werden. Die Früherkennung ist wohl die wichtigste Voraussetzung für ein erfolgreiches Katastrophenmanagement (vgl. Gailer 2007/2008). Wichtige Modifikatoren für ein erfolgreiches Katastrophenmanagement, die man mit der Warnung in Verbindung bringt, sind die Einwohnerzahl, die Anzahl an Einwohnern mit Einschränkungen (wie z.B. Gehörlose, Blinde etc.), Gebäude/Institutionen, in denen sich viele Menschen

aufhalten wie Schulen, Gefängnisse oder Krankenhäuser, und die Möglichkeit das Warnsystem regelmäßig zu testen (vgl. Myers et al. 2002).

Warnungsempfinden

Orkanstudien aus den USA belegen, dass die Reaktion auf eine Warnung nicht simultan erfolgt, sondern einen komplexen Informationsverarbeitungsprozess auslöst der wenig mit der eigentlichen Gefahr zu tun hat (vgl. Carter 1980). Der Erfolg einer Warnung hängt hier nicht nur von technischen Warnsystemen und deren Funktion ab, sondern auch von den Wahrnehmungs- und Reaktionszeiten der Betroffenen (vgl. Dombrowski 2005).

Es gibt zahlreiche Menschen die

- vor einer Warnung Gebiete verlassen,
- aufgrund von einer Warnung im Nachbargebiet ihr Haus verlassen, obwohl sie nicht gefährdet sind oder
- die trotz Wahrnehmung der Warnung und der Erkenntnis der eigenen Gefährdung den Warnhinweisen nicht folgen.

Eine typische Reaktion auf eine Warnung ist es, deren Inhalt nochmals bestätigt haben zu wollen (vgl. Drabek 1969). Der Bestätigungswunsch erhöht sich bei Gefahren mit langer Vorwarnzeit (vgl. Perry et al. 1981), bei Warnungen die von Medien ausgegeben werden (vgl. Dillman et al. 1983; Sorensen 1992) und bei Sirenen oder einem akustisch ausgelösten Alarm (vgl. Sorensen 1992). Der Bestätigungswunsch nimmt ab, wenn die Warnung sehr spezifische Informationen enthält (Cutter/Barnes 1982) und wenn die Erstwarnung durch die Polizei/Feuerwehr erfolgt ist, die entweder von Tür zu Tür gehen oder ein Einsatzfahrzeug mit Lautsprecher benutzen (vgl. Sorensen 1992).

Der Aufnahmeprozess einer Warnung löst innerlich eine mentale Prozesskette aus. Mileti und Sorensen 1992 charakterisieren diese wie folgt:

- Die Warnung hören
- Die Inhalte der Warnung verstehen
- Den Inhalten der Warnung Glauben schenken
- Die Warnung mit sich selbst in Verbindung bringen
- Bestätigen, dass die Warnung tatsächlich wahr ist und sehen, dass andere bereits reagieren
- Auf die Warnung reagieren

Die folgenden Punkte führen dazu, dass Menschen nicht oder nicht adäquat auf Warnungen reagieren

- Es wird keine Warnung ausgesprochen oder aktiviert
- Der Zeitpunkt der Warnung ist falsch
- Vorenthaltung von Informationen
- Inadäquate Kommunikation
- Das Risiko wird nicht erklärt
- Warnungen wurden nicht an bestimmte Gruppen weitergeleitet
- Sirenen oder Alarme wurden überhört.

Menschen neigen außerdem dazu Warnungen zu missachten, wenn sie dem widersprechen, was sie selber beobachten können oder wenn die Medien gegensätzliche Informationen vermitteln (Lindell/Perry 2004).

Ausländer und Randgruppen

Einige Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Zugehörigkeit zu einer Randgruppe zur sozialen Isolation beiträgt und dadurch die Wahrscheinlichkeit eingeschränkter Reaktionsfähigkeit und Reaktionswilligkeit erhöht (vgl. Perry et al. 1981; Gladwin and Peacock 1997). Andere Studien kommen jedoch zu dem Schluss, dass Ethnie keinen Effekt auf das Evakuierungsverhalten hat, wenn die drohende Gefahr erstmals wahrgenommen wird (vgl. Perry/Lindell 1991). Während eines Tornados in Saragossa, Texas zum Beispiel gab es einen sehr hohen Anteil an spanischsprachigen Opfern. Dies lag vor allem daran, dass die Warnungen nicht adäquat ins Spanische übersetzt wurden (vgl. Aquirre et al. 1991). Dies deutet darauf hin, dass es enorm wichtig ist, Warnungen in sämtlichen Sprachen herauszugeben, wenn die drohende Gefahr nicht oder noch nicht direkt wahrnehmbar ist.

Perry ist aufgrund seiner Untersuchungen überzeugt davon, dass ethnischen Unterschiede kaum eine Rolle spielen, wenn es um die Einschätzung von Glaubwürdigkeit der Quelle und der entsprechenden Reaktion auf Warnhinweise geht. Unabhängig von der ethnischen Zuordnung gilt, dass Glaubwürdigkeit der Quelle und Adäquatheit der Reaktionen hoch miteinander korrelieren. Dies zieht sich durch alle Ethnien hindurch (vgl. Perry/Lindell 1991).

Allerdings wird eine Warnung nur dann als glaubwürdig empfunden, wenn die Quelle glaubhaft ist. Es kann also sein, dass unterschiedliche Bevölkerungsgruppen unterschiedlichen Autoritäten oder Quellen Glauben schenken, dies sollte bei Warnungen und Anordnungen mit bedacht werden. Zum Beispiel reagieren vor allem Randgruppen oftmals negativ auf uniformierte Autoritätspersonen (vgl. Emergency Evacuation

Guidebook 2006). Eine Studie von Baker (2004) ergab jedoch, dass demographische Eigenschaften mit dem Entschluss auf eine Warnung zu reagieren, in keinem Zusammenhang stehen.

Menschen mit besonderen Bedürfnissen

Menschen mit besonderen Bedürfnissen sind oft auf unterschiedliche Warnmedien angewiesen. Manche erhalten die Warnung von Familienangehörigen, Pflegern oder Nachbarn. Blinde und taube Menschen brauchen teilweise spezielle Warnmedien.

Menschen mit besonderen Bedürfnissen

Ein ebenso weit verbreiteter Mythos ist das bekannte „Cry Wolf Syndrom“ oder Warnmüdigkeitssyndrom, bei dem die Betroffene auf Alarmmeldungen nicht mehr reagieren, weil es zuvor zu viele Fehlalarme gegeben hat. Dieses Syndrom, so plausibel es auch erscheinen mag, ist bislang empirisch noch nicht nachgewiesen worden (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Bei einem Fehlalarm, der zu Evakuierungen führt, sind die Betroffenen nur dann vom „Cry Wolf Syndrom“ betroffen, wenn die Ursache des Fehlalarms nicht erklärt wurde (vgl. Baker 1987). Das „Cry Wolf Syndrom“ tritt allerdings dann auf, wenn es bekannt ist, dass häufig Fehlalarme oder Übungsalarme ausgelöst werden, ohne dass man genau unterscheiden kann, ob der Alarm gerechtfertigt ist oder nicht. Vor allem in öffentlichen Gebäuden (wie Schulen) oder in Fabrikräumen ist oft eine Indifferenz gegenüber Alarmen zu beobachten, weil niemand an eine echte Bedrohung glaubt (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Medien

Zahlreiche Studien zum Verhalten bei Orkanen belegen, dass Warninformationen, die über nationale oder lokale Fernsehsender übertragen werden, die Hauptquelle für Informationen sind, gefolgt von Radiosendungen, Familie/Freunde/Kollegen und Katastrophenschutzbehörden. Driscoll und Salwen (1996) untersuchten die Einstufung der Quellen nach der zugeschriebenen Fachkompetenz der Quellen sowie deren Glaubwürdigkeit. Wenn es um die Kompetenz der Quellen ging, war die Reihenfolge Fernsehen, Radio und Zeitungen gefolgt von Bekannte/Verwandte. Wenn es darum ging zu welchen Quellen die Befragten mehr Vertrauen hatten, veränderte sich die Reihenfolge. An der Spitze stehen weiterhin Fernsehen und Radio, dann folgen aber Familie/Freunde/Bekannte und erst zum Schluss Zeitungen (vgl. Lindell et al. 2005b).

Resümee

Damit Warnungen effektiv sind, müssen sie klar, verständlich und eindeutig formuliert sein. Die Botschaft sollte parallel von verschiedenen Medien in einer Vielzahl von Kanälen ausgesprochen werden. Sie sollte die Bevölkerung über das wo, wann, wie, und warum (die Gefahr besteht oder bestehen könnte und wieso Personen auf die eine oder andere Weise handeln sollten) aufklären (vgl. Lindell/Perry 2004). Katastrophenpläne sollten eine Liste mit Personen beinhalten, die für die Warnung zuständig und verantwortlich sind. Die Positionen und Funktionen der einzelnen Personen müssen deutlich aufgezeigt werden. Nur wenn die Betroffenen auch Vertrauen in die Warnungsübermittler haben kann davon ausgegangen werden, dass sie die Warnung ernst nehmen und sich angemessen auf diese verhalten (vgl. Wachinger et al. 2012).

Trotz der vorab geplanten Vorkehrungen müssen die Warnungen flexibel bleiben, da in Katastrophensituationen häufig unerwartete Ereignisse auftreten können. Damit eine Warnung Erfolg hat, sollte die Öffentlichkeit von vornherein über die Gefahrensituationen und möglichen Schutzmaßnahmen informiert werden. Ein gutes Mittel sind Broschüren, gut sichtbare Hochwassermarkierungen oder Evakuierungsrouten, z.B. durch farbige Streifen auf der Fahrbahn (vgl. Myers et al. 2002).

Vor der Warnung

Wie bereits erwähnt, reagieren Menschen sehr unterschiedlich auf Warnungen. Diese Unterschiede, können jedoch ein Stück weit minimiert werden, indem man die Einwohner schon, bevor ein Ereignis eintritt, über die Warnung und die verschiedenen Hinweise, die mit ihr verbunden sind, informiert (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Öffentliche Aufklärung sollte zwei Aspekte beinhalten:

- Die Vertrautheit mit dem Alarmsystem und die Art der Warnung,
- Wissen über mögliche Verhaltensweisen und Reaktionen auf die verschiedenen Warnungen und Aufrufe.

Es ist sinnvoll den Leuten zu erklären, wo die Informationen über die Gefahrenlage und die Handlungsanweisungen herkommen werden. Man muss den Bürgern schon vor Eintreten des Ereignisses klar machen, dass die den Warnungen und den Empfehlungen zugrundgelegten Botschaften von Wissenschaftlern, bzw. Fachleuten (z.B. dem deutschen Wetterdienst) erarbeitet werden. Das schafft mehr Vertrauen und zudem können sich politisch oder institutionell Verantwortliche damit gegen Fehlentscheidungen zum Teil absichern. Falls es doch mal zu einem Fehlalarm kommen sollte, ist es leichter, den betroffenen Menschen den Grund dafür zu erklären, wenn

sie bereits vorab mit der Informationslage (bzw. Datenlücken) und den unterschiedlichen Quellen vertraut gemacht worden sind (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Um ein Warnsystem erfolgreich in die Gemeinde einzubetten, sollte es regelmäßig getestet werden. Die verantwortlichen Betreiber müssen regelmäßig geschult und die Bevölkerung muss kontinuierlich informiert werden. Man hat erkannt, dass ein vollautomatisches Warnsystem meist ignoriert wird, d.h. es sollten immer einige Fachkräfte vor Ort sein um die Angaben des Warnsystems zu überprüfen bzw. zu bestätigen. Dies gilt ebenfalls für die Warnung selbst, die nicht computergeneriert sein sollte (vgl. Myers et al. 1992). Des Weiteren darf die Aufklärung über Warnungen und Alarmgeräusche keinen Raum für Fehlinterpretationen zulassen. Zum Beispiel ist es wichtig den Einwohnern frühzeitig zu erklären, was verschiedene Alarmgeräusche oder Stufen bedeuten.

Informationen über Art und Form der Warnungen sollten einheitlich von den verschiedenen Medien verbreitet werden. Sie sollten Verhaltensregeln aufzeigen, die man vorkehrend treffen kann. Gleichzeitig sollen Informationen darüber gegeben werden, was jeder einzelne tun kann, wenn eine Warnung erfolgt. Am besten ist es, wenn diese Informationen von den Katastrophenschutzbehörden verbreitet werden, die in einem Ernstfall auch die Warnung aussprechen bzw. den Betroffenen Menschen zur Hilfe kommen. Man sollte die Einwohner auch auf den Wortlaut oder die Bedeutung von akustischen Signalen vorbereiten, damit sie im Ernstfall auch eindeutig wissen, was die Warnung bedeutet und wie sie sich zu verhalten haben.

Verhaltenshinweise müssen konkret sein. Falls Anwohner zum Beispiel an Orte evakuieren sollen, die höher gelegen sind, sind Markierungen sinnvoll, die sichere Höhen aufzeigen. Die Einwohner müssen jedoch vorher auf diese Markierungen hingewiesen werden, damit sie diese auch im Ernstfall erkennen.

Da in Deutschland die Bevölkerung bei Katastrophenschutzübungen nicht miteinbezogen wird, ist das Wissen über ein zielgerichtetes Verhalten bei Gefahrensituationen gering. Die Bevölkerung kann aber über Schutzübungen einbezogen werden, indem beispielsweise solche Schutzübungen in die Lehrpläne von Kindertagesstätten oder Schulen integriert werden. Eine solche Einbindung könnte auch dazu beitragen, dass Eltern ein Gefahrenbewusstsein ausbilden und sich planvolles Vorgehen bei Gefahrensituationen durchsetzt. So muss ein Bewusstsein für Risiken vorhanden sein, damit die Warnung effektiv sein kann (vgl. Benighaus et al. 2005a; Benighaus et al. 2005b).

Die Warnung selber

Warnungen sollten ständig wiederholt werden (auf unterschiedlichen Medien und Informationskanälen, vor allem auch heute auf Mobiltelefonen und E-Mail-Servern), weil Menschen eher Informationen aufnehmen, wenn diese sie auf unterschiedliche Weise erreichen. Änderungen in der Warnung oder in den Anweisungen, sollten immer erklärt werden (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Eine Warnung sollte die folgenden Aspekte beinhalten:

- Anleitung/Beratung
- Ortsangabe
- Zeitpunkt Art der Bedrohung
- Quelle der Information

Der Inhalt der Warnung sollte sein:

- Spezifisch: Es darf nichts der Fantasie überlassen werden
- Gewiss: Oft sind nicht genug Informationen da. Den Menschen sollte erklärt werden, dass eine Gefahr z.B. zu 60% eintreten kann, dass aber trotzdem evakuiert werden muss.
- Klar: Es sollten keine Fach- oder Fremdwörter benutzt werden.
- Akkurat: Die Warnung sollte auf den Punkt gebracht werden und nicht zu sehr ausgeschmückt sein.
- Konsistent: Wenn Warnungen inkonsistent sind, wählen Betroffene die Wahrheit, die sie glauben möchten, dies führt in der Regel zu unterschiedlichen Reaktionen und eventuell zu Chaos.

Die wichtigste Information in einer Warnung ist die Anleitung, wie die Betroffenen auf die Gefahrensituation reagieren sollen. Dies klingt einfach, ist aber häufig sehr komplex, da die Ausgangssituation erklärt, der weitere Verlauf plausibel dargestellt und Handlungsoptionen aufgezeigt werden müssen.

Zu beachten ist, dass eine Warnung die Menschen nicht in die Irre leitet. Ihnen soll auf keinen Fall vorgegaukelt werden, dass alles in Ordnung sei. Die Öffentlichkeit kann und muss mit der Wahrheit konfrontiert werden, sonst sind effektive Schutzmaßnahmen kaum umzusetzen. Es ist außerdem sinnvoll, ein systematisches Monitoring der Informationsweitergabe vor allem der Medien zu betreiben, um gegebenenfalls gegenzusteuern zu können.

Der Zeitpunkt für eine Warnung ist ebenfalls sehr wichtig. Warnungen sind viel effektiver, wenn sie mit einem erlebbaren Ereignis einhergehen. Im Fall von Altensteig,

könnte dies z.B. eine Hochwassersituation sein, welche die Einwohner deutlich wahrnehmen können. Präventiv könnte auch auf das Dambrisiko hingewiesen werden, auch wenn der Damm noch nicht zu brechen droht. Zum Beispiel kann man bei einer Hochwasserwarnung auch gleichzeitig Informationen über die Stabilität des Dammes übermitteln. So werden die Menschen auf das Problem aufmerksam gemacht und können in einem zukünftigen Ernstfall eher auf eine Warnung über einen bevorstehenden Dambruch reagieren.

Fehlalarme können dazu benutzt werden, die Anwohner über das Dambrisiko aufzuklären, da ihre Aufmerksamkeit diesbezüglich bereits geweckt wurde. Falls sich in anderen Teilen von Deutschland oder der Welt ein Dambruch ereignet, könnte auch dieser Zeitpunkt genutzt werden, um die Anwohner darüber zu informieren, welche Schutzmaßnahmen die Gemeinde getroffen hat und wie sich Einwohner selber schützen können.

Die Annahme, dass Warnungen kurz sein müssen ist falsch. Vor allem bei Katastrophen sind Betroffene informationshungrig und suchen mehrere Quellen auf, um an die notwendigen Informationen zu kommen. Warnungen sollten ca. alle 15 Minuten wiederholt werden. Es muss auch bedacht werden, dass es immer Menschen gibt, die nicht auf eine Warnung hören oder reagieren.

1.1.3 Die Evakuierung

In Nordamerika (USA und Kanada) gehören Evakuierungen zum täglichen Wahrnehmungsbestand. Straßen sind sichtbar als „Evacuation Routes“ ausgeschildert, auf Supermarkttüten finden sich Aufdrucke über das richtige Verhalten bei Evakuierungen, im Fernsehen geben Lauftexte beständig Auskunft über bevorstehende Evakuierungsmaßnahmen. Durch diese Dauerpräsenz erscheinen Evakuierungen als vollkommen normal und vollkommen sinnvoll. In Deutschland dagegen verbindet sich mit Evakuierung eine unterschwellige negative Konnotation (vgl. Dombrowski 2001).

Evakuierungen sind von zeitlicher als auch räumlicher Natur, sie können angeordnet werden bevor etwas passiert, als Vorsichtsmaßnahme oder nachdem etwas passiert ist, als Schutz- bzw. Protektivmaßnahme. Es kann von wenigen Stunden bis hin zu mehreren Wochen oder Monaten dauern, bis evakuierende Menschen wieder in ihre Heimat zurückkehren. In seltenen Fällen ziehen sie ganz weg von gefährdeten Gebieten (vgl. Sorensen et al. 1987).

Menschen evakuieren oft anders als man denkt. Es gibt die sogenannte Schatten-evakuierung, bei der Betroffene ein Gebiet verlassen, das außerhalb der Gefahrenzone liegt und die Warnung eigentlich nicht für sie gegolten hat. Es gibt außerdem die sogenannten frühen oder spontanen Evakuierungen bei denen die Einwohner das Gebiet verlassen, bevor überhaupt eine Warnung ausgesprochen wurde. Dann gibt es wiederum diejenigen die nach einem Evakuierungsaufruf in das Gebiet hineinfahren um (meist) Angehörigen zu helfen. Ebenfalls wichtig ist, dass Evakuierungen mehrere Phasen haben, oft wird vergessen, dass zu einer Evakuierung nicht nur die Abreise, sondern auch die Rückreise gehört.

Evakuierungen beinhalten eine Reihe an organisatorischen und individuellen Entscheidungen. Auf der organisatorischen Ebene, müssen die folgenden Entscheidungen getroffen werden:

- Soll überhaupt gewarnt werden?
- Soll evakuiert werden?
- Welche Orte sollten evakuiert werden?
- Wann soll die Warnung erfolgen?
- Durch welche Medien soll die Warnung ausgesprochen werden?
- Was für Empfehlungen und Instruktionen müssen den zu Evakuierenden mit auf den Weg gegeben werden?

Auf der individuellen oder Haushaltsebene, müssen ähnliche Entscheidungen getroffen werden:

- Soll evakuiert werden?
- Wann soll man evakuieren?
- Wen/Was soll man mitnehmen?
- Wie soll man evakuieren (zu Fuß, mit dem Fahrzeug, mit dem öffentlichen Verkehr)?
- Muss man noch jemanden abholen?
- Wohin soll man evakuieren?
- Welche Route soll man nehmen?
- Wann soll man zurückkehren?

Evakuierungsverhalten

In vielerlei Hinsicht ist die Evakuierung ein proaktives und keine reaktives Phänomen. Zum Beispiel evakuieren viele Menschen schon dann, wenn sie das Anzeichen einer Katastrophe wahrnehmen, andere wiederum bleiben erst einmal wo sie sind und holen sich mehr Informationen ein, wieder andere, werden sich auf die Suche nach Familienmitgliedern machen, manche werden direkt an einen sicheren Ort fahren,

während andere verschiedene Stopps einplanen, bevor sie ihr Ziel erreichen. Diejenigen, die sofort aufgebrochen sind, könnten schon dann zurückkehren, wenn andere erst das Gebiet verlassen, wiederum andere bleiben einfach am Ort und evakuieren nicht (vgl. Quarantelli 1985).

In einer Studie wurden 5 Hypothesen über das Reaktionsverhalten bei Evakuierungen während Orkanereignissen festgehalten (vgl. Lindell et al. 2005a):

- Einwohner in hohen Risikozonen verlassen sich überwiegend auf lokale Nachrichtensender, nationale Nachrichten Sender, Bekanntenkreis, lokale Behörden und das Internet
- Menschen die im Gefahrengebiet leben, interessieren sich für gewisse Informationen mehr als diejenigen die außerhalb leben. Die Reihenfolge ist: Sichtbare Hinweise/Bestätigung in der Umgebung, soziale Hinweise (z.B. Ladenbesitzer machen ihre Läden zu, Bekannte evakuieren etc., Evakuierungshindernisse. Hierfür gibt es keine demografische Systematik.
- Der Evakuierungswille ergibt sich wahrscheinlich durch die Nähe zur Gefahr, der Baubeschaffenheit des Hauses, die Quelle der Informationen und wird negativ beeinflusst durch Evakuierungshindernisse.
- Der Zeitpunkt der Evakuierungsentscheidung ist ebenfalls abhängig von den Gegebenheiten in Punkt 3, aber auch die Tageszeit ist von entscheidender Bedeutung. (Leute evakuieren lieber morgens, selbst wenn offizielle Behörden die Leute aufrufen schon abends zu evakuieren).
- Die Evakuierungsvorbereitungszeit dauert in der Regel zwischen 60 und 450 Minuten, mit einem Durchschnitt von 229 Minuten und einer Standardabweichung von 85.2 Minuten.

Gründe um einem Evakuierungsaufruf nicht Folge zu leisten, können sein: kein Zugang zu einem Fahrzeug, eine geistige oder körperliche Behinderung, Arbeit, wenn eine Person eine andere pflegt, ungenügende finanzielle Möglichkeiten, die Annahme, dass der Ort an dem man sich befindet sicher ist. Evakuierungsraten für schleichende Gefahren (Hochwasser) sind meist gering. Hoch (90%) dagegen sind sie bei Unfällen mit Gefahrenstoffen, an Hochrisikogebieten wie Küstenstreifen, wenn ein Unwetter oder hoher Wellengang droht.

Bei Evakuierungen von einzelnen, aber auch von Massen/Gruppen muss bedacht werden, dass nicht die Überreaktion sondern die Unterreaktion meist tödlich ist, dies passiert fast immer dann, wenn Menschen das Risiko nicht ernst nehmen und daher nicht handeln. Es gibt Belege dafür, dass Menschen gewisse Risiken falsch einschätzen und glauben, dass gewisse negative Ereignisse nicht wirklich eintreffen

können oder sie glauben, dass bestimmte Ereignisse nur andere treffen können, aber nicht sie selbst (vgl. Drury und Cocking 2007).

Die rechtliche Lage

In seltensten Fällen werden Evakuierungen zwangsverordnet. Die meisten Evakuierungen setzen ein gewisses Maß an gesundem Urteilsvermögen voraus, indem die Öffentlichkeit selbst entscheiden kann ob sie evakuiert oder nicht (vgl. Sorensen et al. 1987). Ob bei angeordneten Evakuierungsmaßnahmen Zwangsmaßnahmen eingesetzt oder unterlassen werden, ergibt sich in der Praxis jedoch seltener aus der immer wieder angeführten „Einsicht der Betroffenen in den Ernst der Lage“, als vielmehr aus der einer noch immer vorherrschenden obrigkeitlichen Orientierung der anordnenden Behörde (vgl. Dombrowsky 2001).

Evakuierung vor der Warnung

Ein häufiges Phänomen ist, dass Menschen evakuieren bevor überhaupt eine Warnung ausgesprochen wird. Zum Beispiel berichteten Lindell et al. (2005a) dass 60% der Menschen die an ihrer Studie teilnahmen, evakuierten und viele dies taten, bevor offizielle Warnungen herausgegeben wurden. Dieser Befund wurde durch ähnlich frühe Evakuierungshandlungen vor dem Orkan Katrina im Jahre 2005 bestätigt (vgl. Lindell/Prater 2006).

Systematik bei Evakuierungsentscheidungen

Leider konnte bislang so gut wie keine Systematik, in der Entscheidung tatsächlich zu evakuieren, nachgewiesen werden. Fakt ist, dass eine Evakuierung ein komplexer psychologischen Prozess ist und nicht eine spontane Reaktion/Handlung auf eine Warnung oder ein Ereignis. Während diese Entscheidungen getroffen werden, wird häufig kommuniziert und etliche soziale Interaktionen werden ausgeführt (vgl. Sorensen 2006).

Zum Beispiel berichteten Dow und Cutter (2002), dass 65% der Bewohner bei Orkan Floyd dem Evakuierungsauftrag in South Carolina Folge leisteten; Riad et al. (1999) berichteten dass 42% vor Orkan Hugo und Andrew flüchteten; Prater et al. berichteten von einer Evakuierungsrate von 34% bei Orkan Bret; und Lindell et. al (2005b) berichteten, dass zwischen 11.7% und 86.8% evakuierten, je nach Gemeinde und Distanz zum Auge des Orkans. Baker (1991) erstellte 15 Studien und fand heraus, dass die Evakuierungsrate von einem Sturm zum nächsten, an der gleichen Stelle stark variierte (47-68% in dem Ort Gavelston, während drei ähnlich starken Orkanereignissen) und von einem Ort zum anderen, bei einem bestimmten Sturm (33-97% bei Orkan Frederic).

Es wird angenommen, dass Mieter eher evakuieren als Hauseigentümer und Familien eher als Singles, dies ist jedoch bislang nicht empirisch nachgewiesen worden (vgl. Lindell et al. 2006).

Massenevakuierungen

Da es sich bei diesem Projekt um eine mögliche Evakuierung einer Gemeinde handelt, ist es sinnvoll, das Verhalten von Massen in Katastrophen zu beleuchten. Dies ist wichtig für die Modellierung, da eine unkontrollierte Masse den Straßenverkehr negativ beeinflussen könnte

Von einem Massendesaster spricht man dann, wenn (1) eine größere Anzahl an Menschen beteiligt ist, (2) diese Menschen wahrnehmen (ob richtiger- oder fälschlicherweise), dass ihr Leben bedroht ist und wenn (3) die Situation so ist, dass zumindest subjektiv die Chance besteht das eigene Leben zu retten, indem man so schnell wie möglich reagiert (vgl. Quarantelli 2001).

Der Begriff Massenpanik suggeriert, dass eine Masse weniger bedacht oder intelligent reagiert als ein Individuum, und dass eine Masse dazu neigt, sich in einer Katastrophe disproportional zur eigentlichen Gefahr zu Verhalten. In diesem Fall wird oft angenommen, dass Instinkte stärker sind als soziales Verhalten oder Normen und dass der eigene Überlebenswille die Überhand gewinnt und es zu egoistischen und wettkampftartigen Verhaltensweisen kommt, wie dem Drängeln sogar dem Trampling, um in Sicherheit zu gelangen. Trampling- und Drängelwellen, können sich rasch innerhalb der Masse ausbreiten, in einem Prozess der im Englischen als „contagion“ bezeichnet wird (vgl. Ross 1908; McDougall 1920). Dieses Verhalten passiert, wenn andere Menschen unkritisch das asoziale Verhalten der anderen Menschen nachahmen, ohne über die Konsequenzen nachzudenken (vgl. Drury/Cocking 2007).

Massenpanik ist jedoch extrem selten und noch nie bei der Evakuierung von Gemeinden vorgekommen. Die aktuelle Forschung auf diesem Gebiet hat ergeben, dass Massenverhalten in Evakuierungsfällen sozial strukturiert ist, sich Menschen gegenseitig helfen und dass sich Menschen sofern möglich, nicht von Familie und/oder Freunden trennen wollen (vgl. Drury/Cocking 2007).

Weitere Forschungen haben gezeigt, dass das Verhalten von Gruppen während Evakuierungen stark dem Verhalten im Normalfall ähnelt. Zum Beispiel helfen in der Regel, auch im Katastrophenfall, Jüngere den Älteren und Männer helfen Frauen, mehr als dass Frauen Männern helfen. Geschlechterrollen werden auch in Krisenfäl-

len nicht aufgegeben. Allgemein wird inzwischen angenommen, dass Massenevakuierungen bei Katastrophen keinesfalls unkontrolliert ablaufen (Aguirre 2005; Johnson 1988; Johnson et al. 1994).

Es gibt inzwischen zahlreiche Studien die speziell auf das Verhalten von Massen bzw. Gruppen eingehen. Zum Beispiel haben Todesfalluntersuchungen bei Großfeuern ergeben, dass Familien oft entweder alle flüchten oder alle zusammen sterben. Anstatt sich nur um sich selbst zu kümmern, sind die meisten Betroffenen nicht bereit, geliebte Menschen zurück zu lassen.

Solche Ergebnisse haben dazu geführt, dass man folgende Verhaltensweisen bei Massenevakuierungen annehmen kann:

- Während einer Bedrohung, sind Betroffene viel mehr motiviert sich auf bekanntes Territorium einzulassen, als direkt zu flüchten.
- Wenn Familien Mitglieder oder Freunde dabei sind, hat das meist einen beruhigenden Effekt, der gegen den „Kampf ums eigene Überleben“ wirkt.

Besonders hervorzuheben ist außerdem, dass sich individuelle Panik meist nicht auf eine evakuierende Masse ausbreitet. Vielmehr nehmen sich häufig fremde Menschen rasch den sichtbar verstörten oder in Panik geratenen Mitmenschen an und beruhigen sie (vgl. Drury and Cocking 2007). In seltenen Fällen kann Massenpanik vorkommen, vor allem bei Ereignissen wie Feuer bei Konzerten, wenn wahrgenommen wird, dass nicht alle Personen das Gebäude oder den gefährdeten Bereich verlassen können und dass eine allgemeine Lebensgefahr herrscht.

Wichtig für dieses Projekt ist jedoch, dass eine Massenpanik noch nie bei Gemeinde-Evakuierungen aufgetreten ist (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich Einwohner einer Gemeinde als eine homogene Gruppe betrachten. Studien belegen, dass während einer Katastrophe, diejenigen, die sich der Gruppe zugehörig fühlten, viel eher bereit waren, denjenigen zu helfen, die ebenfalls in dieser Gruppe waren, obwohl die Hilfsaktion die eigene Flucht vor der Gefahr verzögert hat. Eine subjektive Studie ergab, dass Menschen, die sich einer Gruppe zugehörig fühlten, ein größeres Gefühl der Hilfsbereitschaft gespürt haben, als diejenigen die keiner Gruppe angehörten (vgl. Drury/Cocking 2007). Dieselbe Studie hat ergeben, dass sich eine gewisse Gruppenzugehörigkeit erst während der Katastrophe gebildet hat. In fast allen Fällen entstand eine Zugehörigkeit zur Gruppe, „gemeinsam von einer Katastrophe betroffen zu sein“. Das heißt, dass diese Gruppenidentität (und die Hilfe die damit einher geht) ein Ergebnis bei

Schadensereignissen ist und daher ein dynamisches Verhältnis zwischen Katastrophen, Identitäten und Verhalten angenommen werden muss.

In Interviews mit Menschen die von Massenkatastrophen betroffen waren, berichtete die Hälfte aller Befragten von einer gemeinsamen Massenidentität während des Ereignisses. Diejenigen die eine hohe Gefahr für die gesamte Masse wahrgenommen hatten, berichteten ebenso, dass sie einen starken Zusammenhalt in dieser Masse spürten und sich zugehörig fühlten. Betroffene, die nicht wahrgenommen hatten, dass die gesamte Masse bedroht war, hatten auch kein Gefühl der Zusammengehörigkeit mit den anderen Betroffenen. Diejenigen, die sich nicht der Gruppe (Masse) zugehörig fühlten, berichteten auch am wenigsten davon, dass sie anderen Leuten geholfen haben.

Panik und die Presse

Der Grund dafür, dass man annimmt dass Menschen vor allem wenn sie in Massen sind, leicht in Panik geraten, kann damit begründet werden, dass das Wort Panik oft fälschlich benutzt wird, z.B. in Interviews mit Betroffenen oder von den Pressesprechern selbst. Der Begriff Panik wird meist verwendet, um individuelle Angst auszudrücken, die oft in Schreien oder Weinen resultiert, allerdings nicht in Verhaltensweisen, die einer wirklichen Panik zugeschrieben werden und welche sich auf andere Personen ausbreiten (vgl. Drury/Cocking 2007).

Bei dem Terroranschlag in London im Jahre 2005 zum Beispiel, gab es keine Massenpanik in den U-Bahnen oder U-Bahn Haltestellen. Obwohl das Wort Panik in 141 Zeitungsberichten erwähnt wurde und 57 Augenzeugen dieses Wort gebrauchten. Es gab Augenzeugen die explizit darauf hinwiesen, dass Leute zwar Angst hatten aber dass sie/er keine Menschen gesehen hätte, die wirklich in Panik ausgebrochen sind. Menschen berichteten sogar von einer Art Ruhe und gaben an, dass sie beobachteten wie die Menschen in den U-Bahn Stationen von alleine diszipliniert und ruhig evakuierten. Dies obwohl Menschen von großer Angst berichteten und annahmen, dass sie bald sterben würden.

Information bei Massenevakuierungen

Massen evakuieren am effektivsten wenn sie richtig informiert sind. Informationen während des Ereignisses vorzuenthalten ist nicht nur ineffektiv, sondern kann auch im Vor- oder Nachhinein dazu führen dass Betroffene (und die allgemeine Öffentlichkeit) den Autoritäten (Politikern, Katastrophenschutzbeauftragten etc.) in Zukunft nicht mehr trauen werden (vgl. Drury/Cocking 2007).

1.1.4 Verhalten im Straßenverkehr

Es folgt eine kurze Übersicht über Verhaltensweisen von Menschen im Straßenverkehr, die wichtig sind, um ein realistisches Verkehrsmodell erstellen zu können.

Im Normalfall

Man geht heute davon aus, dass es in der Regel drei Hauptursachen für Verkehrsunfälle gibt:

- menschliches Versagen,
- Straßenbeschaffenheit und äußere Einflüsse
- und das Fahrzeug selbst.

Menschliches Versagen allein, ist die Ursache für 60% aller Verkehrsunfälle und zu 90% in Kombination mit den anderen beiden Ursachen (vgl. Sabey/Taylor 1980; Green/Senders 1997). Autofahrer selber nehmen an, dass die Hauptursache für Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurück zu führen ist, obwohl schlechte Fahrzeugbeschaffenheit und Wetterereignisse auch eine signifikante Ursache für Verkehrsunfälle sein können (vgl. Delhomme 1991; Badger 1996; Beenstock/Gafni 2000).

Wenn es um Geschwindigkeit geht, stufen sich Frauen und ältere Menschen eher als langsamere (als der Durchschnitt) Fahrer ein. Autofahrer die sich selbst als langsamere Autofahrer einstufen, bekommen in der Regel auch weniger Strafzettel, tragen eher einen Anschnallgurt und sind an weniger Unfällen beteiligt als die Normal- oder Schnellfahrerguppe (vgl. Kandalaidis 2003).

Zahlreiche Studien haben ergeben, dass Geschwindigkeitserhöhungen in direktem Zusammenhang mit einer steigenden Anzahl an Verkehrsunfällen stehen (vgl. Evans 1991). Auch schlechte Wetterkonditionen, wie Regen oder Schnee, können die Kapazität und Fahrgeschwindigkeit (um 10-15%) von Straßen enorm einschränken (vgl. Goldblatt 2004).

Emotionaler Stress kann dazu führen, dass die Leistung im Straßenverkehr abnimmt. Es ist zum Beispiel erwiesen, dass Menschen die eine Scheidung durchleben ein größeres Risiko haben, in einen Verkehrsunfall zu geraten. Autofahrer die unter hohem Stress stehen haben ein höheres Risiko bei Verkehrsunfällen getötet zu werden, als diejenigen, die nicht unter Stress stehen. Zum Beispiel werden Kinder häufiger als Fußgänger getötet, kurz bevor ihr Geburtstag ansteht, was dazu führen kann, dass das Kind seine normale Vorsicht vergisst (vgl. Evans 1991).

Im Katastrophenfall

Es hat inzwischen zahlreiche Verkehrsmodellierungen von Evakuierungssituationen gegeben, allerdings sind die meisten sehr ungenau. Oft wird vergessen, dass nicht alle Menschen evakuieren oder dies zu unterschiedlichen Zeitpunkten tun, dass nicht alle registrierten Fahrzeuge genommen werden (viele haben zwei Autos, Familien bleiben aber eher zusammen), dass einige Menschen vor der Warnung evakuieren und dass nicht immer die vorgeschlagenen Routen genommen werden (vgl. Lindell et al. 2007).

Während diejenigen Betroffenen, die von der Gefahr weiter weg wohnen, einen längeren Entscheidungsprozess bis zur Evakuierung aufweisen, brauchen sie eher wenig Zeit ihre Häuser auf die Gefahr vorzubereiten. Diejenigen, die im direkten Gefahrengebiet wohnen, entscheiden sich zwar in der Regel schneller zu evakuieren, sie brauchen aber im Schnitt länger ihre Häuser zu sichern und wichtige Besitztümer zusammen zu suchen und einzupacken. Dies hat zur Folge, dass die Gesamtzeit zwischen der Warnung bis hin zur Evakuierung für diejenigen die näher an der Gefahr dran sind und denen die weiter weg sind, ungefähr gleich ausfällt (vgl. Lindell et al. 2007). Für die Verkehrsmodellierung sollte dies bedacht werden.

Die Familieneinheit

Es ist wichtig die Anzahl an evakuierenden Fahrzeugen an der Anzahl der Haushalte zu bemessen. Fünfzig Jahre Katastrophenforschung haben ergeben, dass Haushaltsmitglieder fast immer zusammenkommen und gemeinsam das gefährdete Gebiet verlassen. Wobei sie allerdings davor in verschiedenen Autos erst einmal entweder von außen in das Gefahrengebiet rein fahren oder innerhalb des Gebietes noch Kinder, andere Familienmitglieder oder Sachgüter abholen, bevor sie sich dann wieder treffen und mit einem Fahrzeug gemeinsam das Gebiet verlassen (vgl. Drabek et al. 1996). Jedoch gibt es auch untypische Katastrophen, bei denen nur rund 2/3 der Familien als Einheit evakuierten (vgl. Quarantelli 1986). Dies war zum Beispiel der Fall nach einem Nuklearunfall (Three Mile Island) und einem Erdbeben in Alaska. Ob dies damit zu tun hat, dass beide Katastrophen überraschend und mit dem sofortigen Aufruf zur Evakuierung einher gingen, ist unklar.

Die meisten Studien über Evakuierungen in Autos sind anhand von Orkanereignissen erstellt worden. Der Gebrauch von Fahrzeugen ist recht konstant und über alle untersuchten Ereignisse messbar. In den USA evakuieren 65-75% der Fahrzeuge. Im Durchschnitt benutzt ein Haushalt 1,3 Fahrzeuge, um zu evakuieren. Während Orkan Floyd evakuierten 1,18 und 1,48 der Fahrzeuge pro Haushalt. Diese Varianz war in der Regel auf die Nähe zur Gefahr zurück zu führen. Normalerweise werden im Ge-

fahrangebiet mehr Fahrzeuge benutzt als in Gebieten die weiter weg liegen (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Zeitpunkte

Der Zeitpunkt an dem die Leute die Warnung hören, ist der stärkste Indikator dafür wann Menschen evakuieren, vor allem dann wenn es schnell gehen muss. Bei Ereignissen mit längerer Warnzeit (über 24 Stunden z.B. bei Hochwasser) richtet sich die Abfahrt gewöhnlich nach der Zeit in der die Leute sowieso mobil sind, z.B. vor oder nach der Arbeit/Schule (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006). Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, gibt es auch Spontan- und Schattenevakuierungsverhalten. Über 90% der Bevölkerung sind zwischen 22 Uhr und 6 Uhr zu Hause. Aber ca. nur ein Drittel ist zwischen 10 und 15 Uhr zu Hause (vgl. Klebeis 2001). Evakuierungsaufrufe und Modelle müssen deshalb mit einbeziehen, dass Erwachsene aller Wahrscheinlichkeit nach erst nach Hause fahren, und ein Großteil der Kinder erst von der Schule nach Hause kommen muss, bevor der Haushalt evakuiert. Dies ist vor allem bei Ereignissen wichtig, die schnell eintreten können wie bei Damnbrüchen oder Nuklearunfällen (vgl. Hobeika et al. 1994; Urbanik 2000). Bei einer lange Vorwarnzeit (über 24 Stunden), tendieren die Betroffenen eher dazu, nicht zur Arbeit oder in die Schule zu gehen, sondern morgens direkt das gefährdete Gebiet zu verlassen (vgl. Lindell/Prater 2006; Lindell et al. 2005a).

Um heraus zu finden, wie lange Betroffene bräuchten um zu evakuieren, wurden sie in einer Studie dazu aufgefordert grob einzuschätzen wie viel Zeit sie benötigen würden, um sich auf das Verlassen der Arbeit vorzubereiten, von der Arbeit nach Hause zu fahren, alle Familienmitglieder zu versammeln, das Notwendigste einzupacken und ihr Haus zu sichern, bevor sie tatsächlich mit der Evakuierung beginnen. In der Regel schätzten sie zwischen 60 und 450 Minuten mit einem Durchschnitt von 229 Minuten und einer Standardabweichung von 85.2 Minuten (vgl. Lindell et al. 2001). Spätere Vergleiche mit tatsächlichen Evakuierungszeiten ergaben, dass diese Einschätzungen mit der tatsächlichen Vorbereitungszeit übereinstimmen (vgl. Klang et al. 2007).

Die Tageszeit, der Wochentag, die Jahreszeit und besondere Ereignisse wie etwa die Bundesgartenschau oder ein Fußballspiel können den Verkehrsfluss während einer Evakuierung beeinflussen. Die relative Erfolgsrate bzgl. der Evakuierung von Orkan Katrina z.B. könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Evakuierung an einem Wochenende stattfand und daran, dass der Sturm zu keinen signifikanten Einschränkungen im Straßenverkehr geführt hatte (vgl. Wolshon 2007).

Dieselbe Studie zeigt, dass die meisten Menschen ca. 24 Stunden nach dem Evakuierungsaufruf (Freitagmorgen) die Stadt verließen. Dies fing samstagsmorgens an und zog sich über den ganzen Tag hinweg, durch die Nacht hindurch, erreichte den Höhepunkt am Sonntagmorgen und flaute bis 8 Uhr abends fast ganz ab. Der Orkan hat in den frühen Morgenstunden (am Montag), den Staat Louisiana erreicht. Erfahrungen in Louisiana und anderen Gebieten haben gezeigt, dass Evakuierende typischerweise erst Gebiete verlassen, wenn sie sich direkt und unmittelbar bedroht fühlen. Dies passiert bei Orkanen in der Regel erst 48 Stunden bevor das Ereignis eintrifft.

Da es in der Nähe von Altensteig einen Campingplatz und mehrere Hotels gibt, sind Jahreszeit und Wochentag von großer Bedeutung, damit Touristen evakuiert werden können. Diese Zeitpunkte sollten in das Modell, die Planung, Warnung und Nothilfe miteinbezogen werden (vgl. Hobeika et. al. 1994; Lindell et al. 2002).

Staus/Verkehrsbelastung

Evakuierungen führen nur extrem selten zu einer überdurchschnittlich großen Anzahl an Fahrzeugen. Aus einer Studie über das Verkehrsaufkommen bei der Evakuierung von New Orleans und anderen von Katrina bedrohten Gebieten geht hervor, dass selbst bei diesem Großereignis und der Massenevakuierung, in fast allen Fällen weniger Fahrzeuge auf den Straßen waren als zu den Stoßzeiten an normalen Arbeitstagen. Dies galt sowohl für den innerstädtischen Verkehr (auch für Baton Rouge und New Orleans) als auch für Autobahnen. Einige wenige Landstraßen wiesen jedoch für kurze Zeit eine überdurchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen auf. Der einzige Unterschied zum Normalverkehr war, dass das Höchstvorkommen an Fahrzeugen bei der Evakuierung fast zwei Tage andauerte, während die hohe Anzahl an Fahrzeugen zu Stoßzeiten, in der Regel nur 2 Stunden andauert (vgl. Wolshon 2007).

Am ersten Tag des Evakuierungsaufrufs kam es zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen in Richtung New Orleans. Dies ist höchstwahrscheinlich auf ein Football Spiel zurück zu führen, sowie auf die Tatsache, dass zahlreiche Menschen Familienangehörige und Freunde abholen oder ihre Häuser vor dem Sturm absichern wollten. Dies war jedoch ein Ereignis mit relativ langer Vorwarnzeit. Die Situation kann sich stark ändern, wenn ein Evakuierungsaufruf zu Stoßzeiten erfolgt und das Gebiet sofort verlassen werden muss.

Behördliche Eingriffe

Falls es nötig ist, die Leute auf neue Strecken umzuleiten, sollten Behörden aktiv mit Schildern oder Präsenz die Autofahrer umleiten. Zu beachten ist, dass unbekannte

Routen die Evakuierenden, eher verwirren/verunsichern können. Dies kann zu erhöhtem Stress führen, was wiederum das Unfallrisiko erhöht (vgl. Lindell et al. 2007). Sind die Behörden allerdings den Einwohnern schon bekannt (auch nur durch eine Uniform) könnte dies Stress reduzierend wirken, da Menschen in Krisensituationen nach Vertrautem suchen.

Evakuierungen führen oft auch durch ländliche Gegenden, die nicht auf eine hohe Anzahl an Fahrzeugen vorbereitet sind. Dies bedeutet, dass man in diesen Gegenden dafür sorgen muss, dass die Evakuierenden Zugang haben zu Benzin, Medizin, Decken und Essen/Getränken, falls es auf diesen Strecken zu Stau kommt (vgl. Wolshon 2007). Hier könnte die Verkehrssimulation Auskunft darüber geben, wann eine Evakuierung mit dem Fahrzeug nicht mehr möglich ist (z.B. Zwischen 7-9 und 16-18 Uhr ist von einer Evakuierung mit einer Warnzeit von unter 2 Stunden abzuraten, es sei denn der Morgen-/Feierabendverkehr wird umgeleitet und die Straße wird nur für Anwohner, die Angehörige abholen, freigegeben).

Menschen mit besonderen Bedürfnissen

Katastrophenmanager differenzieren zwischen Einwohnern, Durchreisende/Touristen und den Menschen, die an spezielle Institutionen gebunden sind, da diese Personengruppen oft unterschiedlich stark motiviert sind zu evakuieren und dies eine Auswirkung bei der Modellierung hat, wenn es darum geht einzuschätzen wie viel Fahrzeuge tatsächlich das Gebiet verlassen werden (vgl. Drabek 1986). Drabek (1994) fertigte zahlreiche Studien an, die belegen, dass die meisten Hotels oder Gaststätten keine Katastrophenschutzpläne aufweisen, um ihr Klientel aus der Gefahrenzone zu bringen. Hier müssen evtl. die Behörden Betroffene mit Bussen evakuieren (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Menschen mit besonderen Bedürfnissen werden oft fälschlicherweise in eine einheitliche Kategorie gesteckt. Bei der Planung von der Evakuierung und Warnung ist zu bedenken, dass selbst Menschen in Altenheimen, Krankenhäusern, Schulen oder Gefängnissen, jeweils individuelle Bedürfnisse haben (Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Oft sind Menschen, die besondere Hilfe brauchen nicht in einem Heim, sondern sie wohnen in der Gemeinde. In manchen Fällen brauchen diese Personen Hilfe bei der Evakuierung, weil sie eine Warnung nicht wahrgenommen haben oder kein Auto besitzen bzw. nicht in der Lage sind Auto zu fahren. Während der Evakuierung vor dem Orkan Floyd waren 3 -11% der Bevölkerung auf externe Hilfe angewiesen - je nachdem wie nah sie an dem Gefahrengbiet dran waren. In der Regel erhielten diese

Personen Hilfe von Familien und Freunden. Ein bis zwei Prozent waren auf Hilfe von Behörden angewiesen (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Kinder

Die meisten Schulen haben Evakuierungspläne. Es gibt zwei typische Strategien:

- Frühzeitiges Entlassen der Kinder, bei dem sie entweder nach Hause geschickt werden oder in ein Schutzzentrum gebracht werden (oft ist das die Schule selbst)
- Die Kinder werden sofort alle in das Schutzzentrum gebracht (z.B. mit Bussen), wenn sich die Schule dafür nicht eignet.

Bei beiden Situationen kann es passieren, dass Eltern ihre Kinder abholen kommen. Dies stört in der Regel den Evakuierungsprozess nicht, kann ihn jedoch leicht verzögern (vgl. Emergency Evacuation Guidebook 2006).

Tiere

Die meisten öffentlichen Schutzeinrichtungen erlauben es nicht, Tiere mitzunehmen. Zahlreiche Studien haben ergeben, dass das Zurücklassen von Haustieren viele Menschen davon abhält zu evakuieren. In der Regel nehmen 75% der Evakuierenden ihre Haustiere mit (vgl. Nelson et al. 1989). Einige lassen ihre Tiere auch erst einmal im Gefahrengebiet zurück. Dies führt allerdings häufig dazu, dass die Tierbesitzer zurückkehren um ihre Tiere zu holen oder zu füttern, auch wenn das Gebiet noch nicht sicher ist (vgl. Heath 2001a).

Die Evakuierung von Nutztieren stellt eine besondere Herausforderung dar, weil sich Tiere nicht selbst evakuieren können, sondern einen hohen Aufwand an Personal, Versorgung, Pflege, Kontrolle und Unterbringung erfordern. Dies gilt insbesondere dann, wenn größere Distanzen überbrückt werden müssen, die die Tiere nicht selbst zurücklegen können. Hier muss für das Verkehrsmodell auch bedacht werden, dass größere Tiere in Anhängern evakuiert werden.

Im Kontext von BSE, Maul- und Klauenseuche wie auch anderen Infektionskrankheiten wirft insbesondere eine länger andauernde Tierevakuierung kaum lösbare Probleme auf, weil isolationsähnliche Unterbringungsmöglichkeiten fehlen und sich in der Regel alle Landwirte weigern, eigene Bestände mit Fremdbeständen zu durchmischen (vgl. Dombrowski 2001). Eventuell muss aufgrund von Seuchengefahr eine Kontrolle in umliegenden Gebieten erfolgen. Je nachdem wie lange die Tierbesitzer das Gebiet verlassen, können tote Tiere ein Gesundheitsrisiko für Helfer, Nicht-Evakuierer oder Rückkehrer darstellen.

Wohin?

Auch wenn öffentliche Schutzzentren in der Nähe angeboten werden, kommen die meisten Menschen bei einer Evakuierung bei Familienmitgliedern, Freunden oder in Hotels unter. Die Nutzung von öffentlichen Schutzzentren ist stark abhängig von der Katastrophenart. Bei Orkanen nutzen die Evakuierenden in der Regel zu ca. 1% die Schutzzentren und bei Gefahrenstoffen benutzen sie sie, zu über 40%. Es scheint, dass sozial Schwache und ältere Menschen eher in eine öffentliche Schutzeinrichtung gehen als junge, wohlhabendere Menschen (vgl. Mileti et al. 1992). Auch Durchreisende bzw. Touristen neigen eher dazu, von öffentlichen Schutzzentren Gebrauch zu machen (vgl. Drabek 1996). Barrett et al. (2000) identifizierten drei mögliche Gesichtspunkte bzgl. des Ortes an den die Betroffenen evakuieren:

- der Ort der am wenigsten weit von dem Gefahrenort entfernt ist,
- der Ort der am nächsten ist in dem Verwandte wohnen,
- der Ort an dem man am wenigsten Geld aufbringen muss, um dort für eine Zeit zu bleiben.

Die Rückkehr

Die Rückkehr der Evakuierenden wird sehr häufig bei der Planung vernachlässigt. Oftmals verhält sich die Bevölkerung anders als es die Behörden erwarten. Bekannt ist, dass Betroffene so schnell wie möglich zurück zu ihrem Haus möchten, dass sie wünschen, nicht weit weg von ihrem zu Hause unter zu kommen und dass Menschen ein extremes Stress und Unwohlsein empfinden, wenn man sie daran hindert zurück zu kehren (vgl. Dash/Morrow 2001; Nelson et al. 1989).

Richtlinien für die Rückkehr sind oft nicht vorhanden, was zur Folge hat, dass Frührückkehrer erneut gezwungen werden müssen ihr Haus zu verlassen, was die Situation der Betroffenen oft verschlimmert (vgl. Menker/Floren 1986). Dies kann vor allem dann passieren, wenn Gefahrenstoffe in der Gegend freigelassen oder gefunden werden (auch durch sekundäre Ereignisse).

Die Regelung des Verkehrs bei der Wiedereinkehr in das betroffene Gebiet kann problematischer sein, als bei der Evakuierung aus dem Gebiet. Witzig und Shillenn (1987) veröffentlichten eine Studie über Verkehrsunfälle während 300 Evakuierungen und fanden heraus, dass Staus öfter bei der Heimkehr vorkommen, als beim Verlassen des Gebietes.

Verhalten während der Evakuierung

Es gibt so gut wie keine empirischen Daten über die psychologischen Hintergründe für eine Routenentscheidung während einer Evakuierung. Es wird jedoch angenommen, dass die meisten Evakuierenden die Routen nehmen, die ihnen bekannt sind, anstatt weniger befahrene aber unbekannte Straßen. Dies bestätigte eine Studie von Lindell und Prater (2007), in der sie bewiesen, dass die Evakuierenden diejenige Route nahmen, die sie bei einem früheren Orkan bereits benutzt hatten, um zu evakuieren.

In den Fällen, bei denen auch die Gegenfahrbahnen benutzt wurden um ein Gebiet zu evakuieren (Contra Flow), haben Verkehrspolizisten wahrgenommen, dass die Fahrer, die an der Spitze der Fahrzeugkolonne fuhren, schneller unterwegs waren als eigentlich erlaubt. Jedoch wurden diese Verkehrsteilnehmer nicht am Evakuieren gehindert, damit sich der Verkehr nicht dadurch verzögern würde. In Florida wurde diese Situation erfolgreich verhindert in dem Polizei-Autos vorweg fahren (vgl. Wolshon 2007).

Es gibt etliche Gründe, sich nicht an Evakuierungsrouten zu halten. Zum Beispiel kommen Arbeitnehmer oft ins Gefahrengebiet rein oder nehmen einen Umweg in Kauf, um Familienangehörige abzuholen. Rettungspersonal oder selbst ernannte Retter fahren ebenfalls häufig in evakuierte Gebiet rein, um zu helfen (vgl. Goldblatt 2004). Es ist anzunehmen, dass das Fahrverhalten (aggressiv, vorsichtig, etc.) von Autofahrern die Evakuierung beeinflussen kann, da Verkehrsteilnehmer unterschiedlich auf Lücken, Fahrbahnwechsel, andere Verkehrsteilnehmer und dem Einhalten von Evakuierungsrouten reagieren. Dies könnte vor allem bei jüngeren Autofahrern der Fall sein, da sie in hohem Maße dazu neigen, sich zu überschätzen (vgl. Yuan/Han 2007).

1.1.5. Zusammenfassung der Literaturrecherche

Man kann davon ausgehen, dass die Bürger von Altensteig nicht panisch reagieren oder sich asozial im Verkehr verhalten falls der Damm brechen sollte. Dies ist sowohl bei kurzer als auch bei längerer Vorwarnzeit anzunehmen.

Wie lange diese Vorwarnzeit sein müsste, um alle Bürger sicher zu evakuieren, lässt sich weder experimentell noch theoretisch exakt vorhersagen. Hier ist man auf plausible Simulationen angewiesen. Über die notwendige Vorbereitungszeiten bis hin zur Evakuierung sind zwar aus der Literatur Angaben bekannt (zwischen 60 und 450 Minuten, durchschnittlich 229 Minuten), aber die genaue Fahrzeit aus Altensteig her-

aus lässt sich im Falle einer Evakuierung nur durch eine Simulation abschätzen (siehe agentenbasierte Simulation).

Bei dem Modell sollte bedacht werden, dass Betroffene trotz Warnung und Hinweisen oft anders evakuieren als geplant. Menschen die außerhalb des Gefahrengebietes wohnen, evakuieren häufig trotzdem, manche evakuieren noch vor der Warnung, andere fahren erst einmal in das gefährdete Gebiet hinein, um Familienangehörige oder Bekannte abzuholen oder um zu helfen (viele Menschen wollen einfach helfen, wissen aber nicht, was sie konkret tun sollen und sind deshalb für die professionellen Krisenstäbe eher eine Last als eine Hilfe). Andere evakuieren trotz Warnung und drohender Gefahr nicht. Evakuierungsraten für schleichende Gefahren (Hochwasser) sind eher gering. Hoch (90%) dagegen sind sie bei Unfällen mit Gefahrenstoffen und an Hochrisikogebieten, wenn ein Unwetter oder hoher Wellengang droht.

Über 90% der Bevölkerung ist zwischen 22 Uhr und 6 Uhr zu Hause. Aber nur ein Drittel ist zwischen 10 Uhr und 15 Uhr zu Hause. Das bedeutet, dass zu dieser Zeit viele Menschen erst einmal in das Gefahrengebiet rein fahren werden, um Angehörige abzuholen oder Häuser zu sichern. Die Rückkehr in ein betroffenes Gebiet muss ebenfalls bei einer Evakuierung berücksichtigt werden. Studien haben ergeben, dass es bei der Rückkehr öfter zu Staus kommt als bei dem Verlassen des Gebietes.

Bei Situationen mit sehr kurzer Warnzeit muss bedacht werden, dass Angehörige, die tagsüber zu Hause sind, evtl. kein Fahrzeug besitzen, um das Gebiet zu verlassen. Weil Familien in der Regel auch in extremen Situationen zusammenhalten, kann angenommen werden, dass ein Großteil der außerhalb arbeitenden Familienmitglieder, trotz großer Gefahr in das Krisengebiet einfahren, um Angehörige abzuholen. Dies ist vor allem der Fall, wenn sich Kinder oder ältere Menschen in dem Gefahrengebiet aufhalten. Bekannte Menschen, Umgebungen und auch Fahrstrecken wirken beruhigend auf Menschen in Krisensituationen. Für die Modellierung ist wichtig zu bedenken, dass Evakuierende die ihnen bekannten Strecken wählen, selbst wenn die Warnungen einen anderen Streckenverlauf empfehlen.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass ein hohes Ausmaß an Gruppenzugehörigkeit die Menschen dazu bringt, einander zu helfen. Dies kann positive und negative Auswirkungen haben, je nachdem, ob die Menschen wissen, wie sie sich in Krisensituationen gegenseitig helfen können oder nicht. Oft können unwissende, aber wohlmeinende Helfer die Folgen der Katastrophe verschlimmern. Falls unter gewissen Umständen nur eine Evakuierung zu Fuß möglich sein sollte, ist auch hier anzunehmen, dass die Menschen in Gruppen (Familie, Mitbewohner) fliehen und sich weitgehend strukturiert und normgerecht verhalten. Allerdings kann eine große Anzahl von

fliehenden Menschen auch den Verkehr behindern, falls sich einige dazu entscheiden trotz Fahrverbot mit dem Auto zu evakuieren.

Falls bei der Simulation Situationen entstehen, bei denen die Bewohner von Altensteig unter bestimmten Umständen nicht in der Lage sind, sich aus dem Gebiet zu entfernen, müssen Strategien zur Suche nach geeigneten ortsnahen Schutzräumen ebenfalls mit in die Planung einbezogen werden. Solche Schutzräume können höher gelegene Wohnräume oder wasserdichte Kellerräume in Arbeitsstätten sein. Auf keinen Fall sollten in solchen Fällen nur bestimmte Bewohner (z.B. Bewohner die unterhalb einer bestimmten Höhe wohnen) aufgefordert werden das Gebiet zu verlassen, da anzunehmen ist, dass dann auch diejenigen fliehen, die eigentlich nicht betroffen sind und sich und andere damit in Gefahr bringen könnten.

Es gibt verschiedene Verhaltensweisen im Verkehr, die ebenfalls systematisch modelliert werden können. Manche Menschen fahren schneller als andere, sind allgemein rücksichtsloser oder zu rücksichtsvoll, Ortsunkundige wissen evtl. nicht, wo sie hinfahren sollen. Zudem ist anzunehmen, dass die meisten Verkehrsteilnehmer unter Stress stehen werden. All diese Dinge könnten das Verhalten im Straßenverkehr beeinflussen.

Diese und weitere Erkenntnisse der Literaturrecherche dienen dazu, ein Erhebungsdesign zur Datensammlung zu generieren.

1.2. Fragestellungen und methodisches Vorgehen

Ausgehend von der zentralen Frage, wie sich die Altensteiger Bevölkerung in einer Evakuierungssituation verhalten würde, können basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche für die weiteren Untersuchungen folgende Leitfragen formuliert werden:

- Was passiert in der Zeit zwischen der Evakuierungsaufforderung und der Evakuierung selbst (z.B. welche nächsten Verhaltensschritte unternehmen die Altensteiger Bürgerinnen und Bürger nach dem Hören der Evakuierungsaufforderung)?
- Wohin würde die Altensteiger Bevölkerung evakuieren?
- Welche Unterschiede können im Evakuierungsverhalten und in den Evakuierungsplänen hinsichtlich soziodemographischer Variablen festgestellt werden?
- Welcher Art der Warnung bzw. Warnungsübermittlung wird von den Bürgerinnen und Bürgern als effektiv wahrgenommen?

- Welches Informationsbedürfnis haben die Bürgerinnen und Bürger Altensteigs?
- Welchen Informationsübermittlern würde vertraut werden, welchen nicht?
- Was sind alternative Informationsübermittler?

Im Folgenden werden die im Projekt Eva-Sim verwendeten quantitativen und qualitativen Methoden näher erläutert und aufgezeigt, auf welche Weise die Methoden inhaltlich verknüpft wurden.

1.2.1. Fokusgruppen

Die Durchführung von Fokusgruppen diente neben der Überprüfung der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche auch einer explorativen Untersuchung der von den betroffenen Menschen vorgenommenen Einschätzungen der Gefahrenvorsorge und Gefahrenabwehr für den konkreten Fall Altensteigs. So ging es in diesem Schritt darum, Hintergrundinformationen für die quantitative Befragung zu erhalten, und die Variationsbreite des möglichen Verhaltens der Bürger Altensteigs nach einer Evakuierungsaufforderung zu erkunden. Zudem war es durch die Methode der Fokusgruppe möglich, nicht nur Aussagen über das potentielle Verhalten der Bürger zu sammeln, sondern auch Begründungen für die jeweiligen Verhaltensmotive zu erfassen.

Rekrutierung

Für die Rekrutierung der Teilnehmer wurde im ersten Schritt eine Anzeige im Amtsblatt Altensteig geschaltet. In der Anzeige wurden die Bürger über den Inhalt der Fokusgruppen informiert und aufgerufen, sich unter einer Kontakttelefonnummer oder E-Mail-Adresse zu melden (siehe Abb. 1).

Die Rekrutierungsquote aufgrund der Anzeige war allerdings zu gering. Auf diesem Wege konnten lediglich drei Personen für die Fokusgruppen gewonnen werden. Um die notwendige Anzahl von Teilnehmern nachträglich zu rekrutieren, wurden in einem zusätzlichen Schritt zufällig ausgewählte Bürger per Telefon kontaktiert. Die Auswahl erfolgte anhand des örtlichen Telefonbuchs. So wurden 18 weitere Anmeldungen erreicht, was zu einer Teilnehmerzahl von sieben Bürgern pro Fokusgruppe führte und damit die Durchführung der Fokusgruppen in Altensteig ermöglichte. Die ursprünglich angestrebte Aufteilung in die drei Gruppen „Single“, „Junge Mütter“ und „Rentner“, musste aufgrund der soziodemographischen Zusammensetzung der interessierten Bürger aufgegeben werden.

Liebe Bewohnerinnen und Bewohner von Altensteig,

wir bitten um Ihre Mithilfe am **Forschungsprojekt EvaSim**: Gekoppelte Verkehrs- und Hochwassersimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen. Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Sicherheit für besiedelte Bereiche Altensteigs gegen Überschwemmungskatastrophen zu erhöhen und einen Beitrag zu einem besseren Krisenmanagement zu leisten.

Für unsere Simulation brauchen wir **freiwillige Einwohnerinnen und Einwohner aus Altensteig**. Sie werden an abends stattfindenden **Diskussionsrunden** teilnehmen, die 2 bis 3 Stunden dauern. Für ihre Mithilfe erhalten Sie eine Aufwandsentschädigung von 50€.

Bitte melden sie sich unter der Telefonnummer **(0711-68583966)** oder per Email (**fokusgruppen@dialogik-expert.de**).

Wir danken Ihnen für Ihre Mithilfe und freuen uns mit Ihnen diskutieren zu dürfen.

Ihr Forscherteam von

ZIRN Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Risiko und nachhaltige Technikentwicklung
an der Universität Stuttgart

Kooperationspartner:

Landratsamt Calw	Regierungspräsidium Karlsruhe	Stadt Altensteig
		

Abb. 1: Aufruf zur Teilnahme an Fokusgruppen im Altensteiger Amtsblatt

Zuvor wurden diese Merkmale von allen potentiellen Teilnehmern während des Telefongesprächs abgefragt. Stattdessen erfolgte die Gruppeneinteilung nach verschiedenen Szenarien, so dass je nach Gruppe von einer Evakuierung um 11 Uhr vormittags, um 16.30 Uhr nachmittags und um 2 Uhr nachts ausgegangen wurde. Da eine homogene Gruppeneinteilung in die drei Gruppen, wie es bei Fokusgruppen in der Regel der Fall ist, nicht möglich war, wurden heterogene Gruppen gebildet, die jeweils nach Geschlecht, Alter und Bildung gemischt wurden. Dies erfolgte mit der zusätzlichen Absicht, ein möglichst breites Meinungsspektrum zu erfassen, dass mittels der telefonischen Befragung zusätzlich verifiziert werden sollte (vgl. Kuhn 2012; Schulz 2012). Die entsprechende Änderung im Design ist zusätzlich durch Annahmen der Literaturrecherche begründet, wonach sich die Verhaltensweisen in Evakuierungssituationen je nach Tageszeit unterscheiden.

Durchführung der Fokusgruppen

Die Fokusgruppen fanden am 14. März 2011 in Räumlichkeiten der Friedrich-Boysen-Realschule in Altensteig statt. Von den 21 ursprünglich rekrutierten Teilnehmern, nahmen am Ende nur 15 Bürger Altensteigs teil. Vor Ort musste aus diesem Grund von den drei geplanten Fokusgruppen auf zwei Fokusgruppen umdisponiert

werden, um für die einzelnen Fokusgruppen genügend Teilnehmer und dadurch eine gehaltvolle Diskussion sicherzustellen. Die ungewöhnlich hohe Anzahl an *No-Shows*, also Personen die sich zwar angemeldet hatten aber nicht erschienen, ergibt sich normalerweise aus der Unverbindlichkeit einer telefonischen Rekrutierung. Um diesen bekannten Effekt abzumildern, wurden allen rekrutierten Personen zusätzliche Bestätigungsschreiben versandt, die in diesem Fall bei sechs potenziellen Teilnehmern vermutlich nicht die gewünschte Wirkung erzielten.

1.2.2. CATI-Erhebung (Computer Assisted Telephone Interview)

Wie in der Einleitung bereits beschrieben, ging es bei der telefonischen Umfrage aus sozialwissenschaftlicher Sicht vor allem um einen weiterführenden Erkenntnisgewinn bezüglich der qualitativ gewonnenen Ergebnisse aus den Fokusgruppen. Aus diesem Grund wurde ein repräsentativer Teil der Altensteiger Bewohnerinnen und Bewohner quantitativ befragt. Die telefonische Befragung erfolgte durch das LINK Institut in Frankfurt/Main.

Fragebogenkonstruktion

Da mit den Ergebnissen der Befragung im Gesamtprojekt unterschiedliche Ziele verfolgt wurden (zum Beispiel Verknüpfung mit *Arbeitspaket 6*), basiert die Konstruktion des Fragebogens auf mehreren Ansätzen. Neben sozialwissenschaftlichen Aspekten enthielt der Fragebogen auch Fragestellungen, die für verkehrswissenschaftliche Erkenntnisse sowie die agentenbasierten Simulation interessant waren.

Der Fragebogen wurde anhand der Kriterien der theoretischen Angemessenheit und forschungspraktischer Durchführbarkeit entworfen und entsprechend angepasst. Die erhobenen inhaltlichen Blöcke waren im Einzelnen:

- Verhaltensintention
- Warnungsperzeption
- Situationsperzeption
- Gefährdungslage Altensteigs
- Ortsinformationen
- persönliche Lage
- Soziodemographie

Diese inhaltliche Strukturierung des Fragebogens basierte im Wesentlichen auf den Vorkenntnissen, die aufgrund der Literaturrecherche und den Fokusgruppen vorlagen. Des Weiteren wurden, wie oben bereits erwähnt, Sachverhalte mit aufgenommen, die sowohl für das *VuV (AP 6 - Verkehrssimulation)* als auch für die agentenba-

sierte Simulation benötigt wurden. Die Konstruktion des Fragebogens wurde deshalb in enger Absprache mit dem *Link-Institut*, dem Projektpartner *VuV* und der *traffgo GmbH*, dem Anbieter der agentenbasierten Simulation, durchgeführt.

Stichprobenziehung

Um eine repräsentative Stichprobe zu erreichen, wurde eine telefonische Befragung gewählt. Diese erfolgte auf Anraten des Link-Institutes. Aber auch andere Anbieter (TNS emnid, tns infratest) bei denen Angebote eingeholt wurden, empfahlen dieses Vorgehen, um die Ausschöpfungsquote sicherzustellen. Die Samples wurden hierbei aus der Auswahlgrundlage der Arbeitsgemeinschaft ADM-Telefonstichproben gezogen. Erstellungsbasis dieser Auswahlgesamtheit waren die Rufnummernstammliste der Bundesnetzagentur (BNA) und das aktuelle Telefonverzeichnis. Das Sample war als haushaltsproportionale Gemeindestichprobe konzipiert. Jede Telefonnummer musste eindeutig regional verortet sein, um die Befragung von Personen aus Altensteig sicherzustellen. Nicht eingetragene Telefonnummern sind nur dann eindeutig verortbar, wenn sich alle eingetragenen Rufnummern des Blocks in einer einzigen Gemeinde befinden. War dies nicht der Fall, wurde bei den generierten Rufnummern mit mehreren möglichen Gemeindekennziffern eine Nummer per Zufall innerhalb des betreffenden Blockes ausgewählt.

Diese Zufallsauswahl ist per Bedeutungsgewicht so gesteuert, dass die Häufigkeitsverteilung der Gemeindekennziffern der nicht-eingetragenen Nummern im jeweiligen Block, der Verteilung der eingetragenen Nummern entsprach. Die Auswahlgrundlage enthielt also lediglich Telefonnummern und qualifizierende Sekundärmerkmale, jedoch keine Namen und Adressen, da diese für eine anonyme Befragung unerheblich sind. Dieses Erstellungsverfahren sicherte die Inklusion aller vergebenen Rufnummern mit berechenbaren Auswahlwahrscheinlichkeiten. Es garantierte auch die Selektion von Rufnummern ohne Eintrag und ebenso die Auswahl von Nummern, die in Blöcken ohne Eintrag lagen. Damit sind vor allem auch die Anschlüsse der Haushalte bei den neuen Netzbetreibergesellschaften enthalten.

Die Grundgesamtheit der Untersuchung bildet die deutschsprachige Wohnbevölkerung, die älter als 14 Jahre ist, in der vom Projektraum definierten Region in Privathaushalten lebt und dabei mindestens einen Festnetzanschluss (ca. 95%) besitzt. Die Telefonnummern der potentiell Teilnehmenden wurden nach einem zweistufigen Zufallsprinzip (Haushalts- und Personenebene¹) computergestützt ausgewählt.

¹ Bei der Haushaltsstichprobe handelte es sich um die benannte ADM-Telefonstichprobe, in der zufällig generierte Nummern verwendet werden, bei der Personenstichprobe wurde die Last-Birthday-Methode eingesetzt, bei der die Person im Haushalt befragt wird, die als letztes Geburtstag hatte.

Durchführung der CATI

Die Programmierung und die technischen Tests des Fragebogens fanden im November 2011 statt, bevor ein Pretest² am Ende des Monats durchgeführt wurde. Der Pretest ergab unter anderem, dass der Fragebogen mit einer durchschnittlichen Befragungszeit von 22 Minuten pro Teilnehmer veranschlagt werden musste.

Nach der erfolgreichen Durchführung des Pretests, erfolgte die Feldphase in einem Zeitraum von zwei Wochen zu unterschiedlichen Uhrzeiten (Mo. bis Fr. 17:00 bis 21:00 Uhr / Sa. 10:00 bis 17:00 Uhr / So. 11:00 bis 16:00 Uhr) und an unterschiedlichen Tagen (Montag bis Sonntag). Bis zu acht Mal versuchten die Interviewerinnen und Interviewer, die ausgewählten, in Altensteig wohnenden und/oder arbeitenden Personen telefonisch zu erreichen.

Insgesamt wurden die Daten von 674 Befragten erfasst, wovon 570 das Telefoninterview frühzeitig beendeten (d.h. ca. 100 Befragte sind so genannte Dropouts). Bei einer durchschnittlichen Befragungsdauer von 22 Minuten ist die Zahl der Abbrüche allerdings als niedrig einzustufen. Dies kann vermutlich auf eine erneut geschaltete Anzeige im Amtsblatt zurückgeführt werden, in der die Bürgerinnen und Bürger über die zu dieser Zeit stattfindende Befragung informiert wurden. Ziel war es, einen möglichst repräsentativen Ausschnitt der Bevölkerung zu befragen, um dadurch plausible Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit der in Altensteig lebenden und/oder arbeitenden Bevölkerung ziehen zu können.

1.2.3 Agentenbasierte Simulation

Angestrebt wurde eine Simulation des Fluchtverhaltens der Bevölkerung in Altensteig, unter Berücksichtigung soziodemografischer Merkmale wie z.B. Familienstand, Alter, sowie situations- und lebensstilspezifische Aspekte wie beispielsweise der Aufenthaltsort zum Zeitpunkt der Evakuierung, die allgemeine Informationslage, der Besitz von Haustieren, PKWs etc. Aus einer Kombination dieser Merkmale und in Anlehnung an die aus den Ergebnissen der Fokusgruppen abgeleiteten verhaltensrelevanten Aussagen, sind unterschiedliche Idealtypen entstanden denen jeweils bestimmte Verhaltensketten mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet wurden. Auf diesem Wege konnten unterschiedliche Szenarien hinsichtlich des Verhaltens von Personen bei erfolgter Evakuierungsaufforderung in Abhängigkeit sozialer und psychologischer Kontextfaktoren bereitgestellt, sowie Erkenntnisse zur Opti-

² Der Pretest diente neben der Ermittlung der durchschnittlichen Befragungsdauer auch dem Ziel zu prüfen, ob die Fragen im Fragebogen korrekt verstanden werden.

mierung der Krisenkommunikation unter Einbezug dieser Kontextfaktoren gewonnen werden.

Variiert wurden zunächst zwei Ausgangssituationen: Einmal wurde von einer schlechten Informationslage ausgegangen (entsprechend der geschilderten Ausgangslage in der CATI Befragung). Dies lässt einen vergleichsweise hohen Prozentsatz an ungünstigen Verhaltensweisen vermuten, d.h. mehrere Agenten verhalten sich nicht ideal. Im zweiten Fall wurde die Bevölkerung entsprechend informiert, so dass hier davon ausgegangen wird, dass die Anzahl d.h. die Häufigkeit der negativen Verhaltensweisen stark zurück geht und eine Verkürzung der gesamten Evakuierungszeit erwartet werden konnte.

Neben den zwei geschilderten Ausgangssituationen, wurden in der agentenbasierten Simulation auch das Evakuierungsgebiet sowie der Aufenthaltsort der Agenten auf Basis der Befragungsdaten variiert. Betrachtet wurde das Gebiet Altensteig Stadt, entferntere Teilorte waren damit nicht Gegenstand der Simulation. Während der Befragung mussten die Teilnehmer angeben, wo genau sie sich zu vier unterschiedlichen Zeiten aufhalten (morgens, mittags, abends und nachts). Um die Komplexität der Simulation zu begrenzen, wurde das Verhalten der Bevölkerung zu zwei Zeitpunkten simuliert: Vormittags und abends. Diese Zusammenlegung wurde im Hinblick auf die Befragungsdaten vorgenommen, da sich die Aufenthaltsorte der Befragten zu den zusammengelegten Zeiten kaum unterschieden.

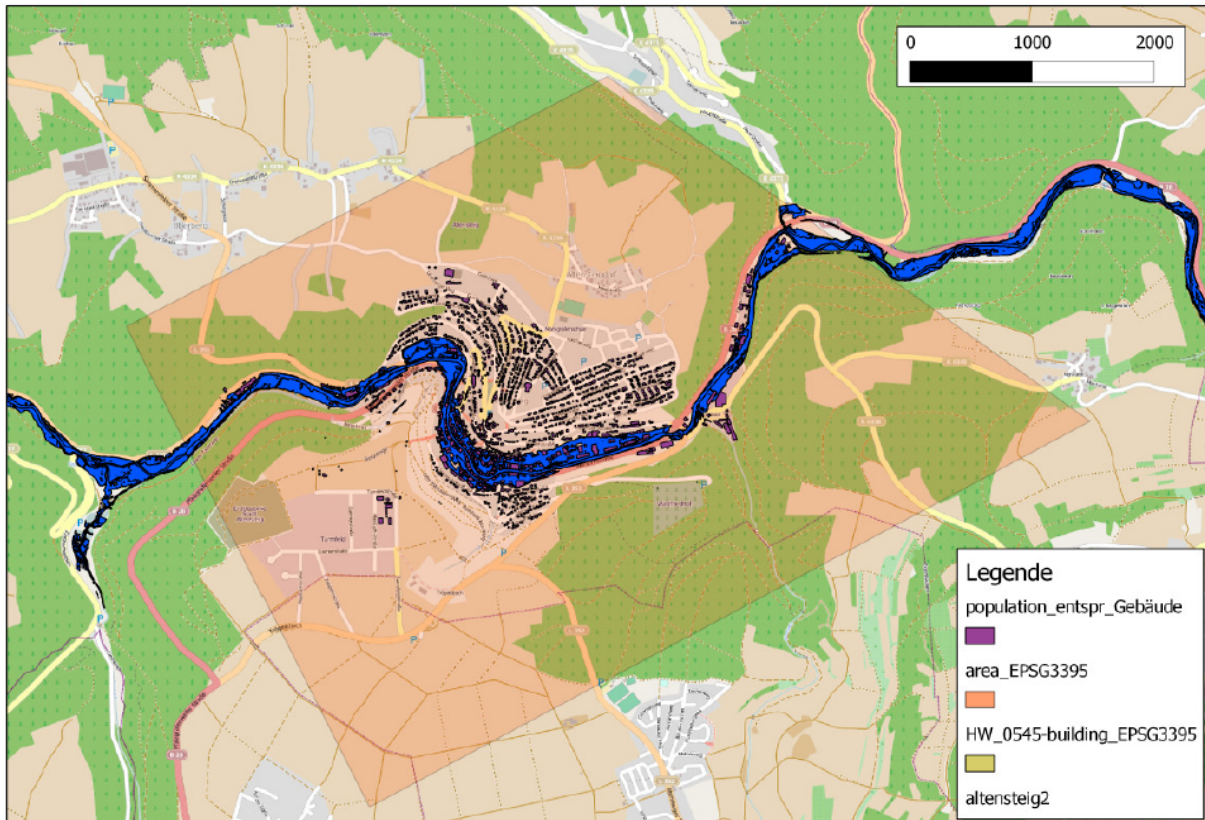


Abb. 3: Altensteig und Umgebung

Der in der Abbildung gezeigte Kartenausschnitt wurde als Rasterbild (GeoTiff) für den Hintergrund der Darstellung der Simulationsergebnisse verwendet. Für die Zeitspanne der Evakuierung wurde der Zeitpunkt $t=0$ als Eintritt des Schadensereignisses, folglich des Hochwassers, festgelegt. Die notwendige Zeit der Evakuierung der einzelnen Agenten ergab sich dann aus der Summe der Reaktionszeit und der Fahrtzeit. Die verfügbare Zeit ergab sich aus der Überflutungserrechnung die vom Projektpartner *DHI Wasy (AP3: Hydraulische Simulationen)* bereitgestellt wurde. Folgende Tabelle bietet hier einen Überblick, in welcher Zeit bei den angenommenen Schadensereignissen mit dem Beginn der Überflutung zu rechnen ist und wann der Zeitpunkt der maximalen Überflutung erreicht ist.

	Start: Dammversagen/ Entlastung	Beginn: Überflutung in Altensteig	Max. Überflutung in Altensteig
HW-Entlastung	00:00	01:30	03:00
Dammbruch	00:00	01:15	02:30

Tab. 1: Zeiten hinsichtlich eines Hochwasserereignisses

Als Kriterium für eine sichere Evakuierung wurde folglich $t_{\text{verfügbar}} > t_{\text{notwendig}}$ bzw. $t_{\text{evakuierung}} < t_{\text{bedrohung}}$ festgelegt. Die Evakuierungsdauer wurde im weiteren Verlauf mit Hilfe der Simulation ermittelt. Dabei wurde die verfügbare Zeit bzw. die Zeit, bis die Bedrohung so angewachsen ist, dass eine sichere Evakuierung nicht mehr möglich wäre, als äußerer Parameter betrachtet, d.h., sie wurde nicht abgeleitet, sondern als gegeben angenommen. Das bedeutet, dass ausreichend Zeit vorhanden ist, um alle Personen zu evakuieren, bevor sie von einer Gefahr bedroht sind. Die Zeit $t_{\text{verfügbar}}$ wurde durch die Ausbreitung des Hochwassers bestimmt und liegt bei ca. 2:15 h. Da $t_{\text{evakuierung}} = t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarmierung}} + t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Fahrt}}$ und für die Reaktionszeit aus Befragungen bis zu drei Stunden ermittelt wurden, ergab sich allein hieraus $t_{\text{evakuierung}} < t_{\text{verfügbar}}$.

Die beiden folgenden Leitfragen wurden mit der agentenbasierten Simulation verknüpft: (1) Wie wirkt sich die Veränderung auf die gesamte Evakuierungssituation aus? (2) Welche Informationen scheinen besonders relevant für einen reibungslosen Ablauf?

1.3 Zentrale Ergebnisse der empirischen Untersuchungen

Zunächst werden die zentralen Ergebnisse der quantitativen und qualitativen Untersuchung dargestellt, wobei der Fokus auf der Überprüfung einzelner Annahmen besteht. Da die Erkenntnisse daraus als Input für die Agentenbasierte Simulation dienen, erfolgt deren entsprechende Darstellung im nächsten Kapitel

1.3.1 Erkenntnisse aus den Fokusgruppen

Als erstes Ergebnis der Fokusgruppen ist festzuhalten, dass sich die Bürger weitgehend *schlecht informiert fühlen*. Hierzu gehören vor allem die Inhalte des Katastrophenplans sowie die Information, welche Behörde für was zuständig ist und wo man im Krisenfall Informationen bekommen kann. Auch ist den Bürgern nicht bewusst, wie sich die Behörden auf einen Katastrophenfall vorbereiten und wie viel Zeit ihnen in welchen bestimmten Situationen zur Verfügung steht.

„Also so einen allgemeinen Plan, oder auch mal das veröffentlichen, dann weiß man zumindest mal, da gibt es Leute, die haben sich darüber mal Gedanken gemacht. Wenn das dann sag ich mal 5 Jahre her ist, dann würde ich eher sagen, ja, funktioniert denn das noch überall. Also wenn, dann müssten sie es in einem bestimmten Turnus dann wieder aktualisieren, oder auch dahingehend bringen, dass man es dann einfach publiziert.“ <FG I; 00:52:37>

Tab. 2: Zitat aus den Fokusgruppen: Informiertheit

Neben den fehlenden Informationen wünschen sich die Bürger eindeutigere *Warnungsmechanismen*, wie beispielsweise eine Warnung per SMS oder eine Sirenen-

warnung. Auch eine *Infohotline*, deren Nummer im Vorfeld bekannt gegeben wurde, wäre eine bevorzugte Informationsquelle. Bedenken bestehen bei einer Warnung per Lautsprecherwagen, da eine solche Warnung oft nicht gehört wird und damit als ineffektiv angesehen wird. Zudem wird die Warnung dann als vertrauenswürdig eingeschätzt, wenn sie von offizieller Seite kommt. Genannt wurden hier explizit die Polizei oder die Feuerwehr. Dies gilt ebenso für eine Radiowarnung, bei der neben der Polizei und der Feuerwehr auch eine Person aus der städtischen Verwaltung als vertrauenswürdig empfunden wurde. Allerdings wird die Effektivität einer Radiowarnung in Frage gestellt, denn die Befragten sind der Überzeugung, dass sie die Warnung höchstwahrscheinlich überhören würden, wenn das Radio überhaupt angeschaltet ist.

„(...) also ich könnte mir zum Beispiel vorstellen, dass man halt einfach das was man bisher noch nicht genutzt hat, also SMS und solche Sachen (...) in Zukunft nutzt.“ <FG II; 00:32:12>
„Könnte man das nicht aber auch so machen, wie früher mit der Sirene? Wenn die Sirene einmal heult, dann weiß man es kommt Hochwasser, wenn es zweimal heult, dann ist es Feuer, oder irgend so was. Das war doch früher auch, da (...) hat man auch so Übungen gehabt. Wo jeder wusste, wann was was bedeutet. Das weiß heutzutage kein Mensch mehr“ <FG II; 00:38:46>

Tab. 3: Zitate aus den Fokusgruppen: Warnungsmechanismen

Die Teilnehmer der Fokusgruppe stehen einem möglichen Hochwasser als *Bedrohung* eher gelassen gegenüber. Sie sehen geschlossen keine Lebensgefahr durch ein solches Ereignis. Der entstehende Sachschaden wurde ambivalent eingeschätzt: Bürger, die im von vergangenen Hochwassern betroffenen Gebieten wohnen schätzten die Sachschäden als durchaus hoch bis sehr hoch ein, wohingegen Teilnehmer aus anderen Ortsbereichen, das Thema Schaden insgesamt stärker als einen reinen Versicherungsaspekt wahrnehmen. Solange der Schaden nach dem Ereignis ersetzt wird, stellt der vorübergehende Verlust kein Problem dar, wobei hiervon viele ideelle Werte ausgenommen sind (z.B. Fotosammlungen, persönliche Dokumente, Festplatten etc.)

„(...) in Altensteig ist so viel Auslauf da, das selbst in so einer Situation das Wasser nicht plötzlich so schnell wird, dass man nicht mehr fort kann“ <FG I; 01:22:07>

Tab. 4: Zitat aus den Fokusgruppen: Wahrnehmung der Bedrohung bei einem „normalen“ Hochwasser

Anders sieht die Einschätzung der Teilnehmer bei einem sehr schnellen Hochwasser oder einer Flutwelle aus. Hier wird die Bedrohung als gravierender empfunden, da im Vorfeld keine Einschätzungen vorgenommen und Vorkehrungen getroffen werden können. Würde die Nagoldtalsperre brechen, oder (was auch genannt wurde) durch

einen Terroranschlag gesprengt, wird die Bedrohung für Leib und Leben als wesentlich höher eingestuft. Allerdings wurde die Möglichkeit einer Überflutung durch einen Dammbrech als nahezu unmöglich angesehen, da es sich um einen Naturdamm handle, der wenn überhaupt nur teilweise brechen könnte. Ein Terroranschlag im Nagoldtal wird auch als vollkommen unwahrscheinlich eingeschätzt.

Die *Bereitschaft zur Evakuierung* ist stark von der Erlebbarkeit der Krise abhängig. Die Bürger äußerten einstimmig, dass man als Altensteiger die Nagold kenne und daher auf sein Erfahrungswissen mit dem Fluss baue. Das heißt, dass ein eigener Blick auf den Fluss als erste Reaktion erfolgt. Wenn es seit Tagen nicht geregnet hat, nehmen die Teilnehmer die Warnung als unglaublich wahr. Genauso besteht die Möglichkeit, dass die Warnung als Scherz aufgefasst wird, wenn sie nicht von offizieller Seite geäußert wird.

Wenn keine persönliche Erlebbarkeit gegeben ist, ist Vorab-Information unumgänglich: Die Bürger müssen wissen, dass die Möglichkeit besteht, dass wenn zur Evakuierung aufgerufen wird noch kein Wasser sichtbar ist, die Warnung aber trotzdem ernst genommen werden muss. Die Quelle der Warnung muss den Bürgern im Vorfeld klar sein, damit Vertrauen aufgebaut werden kann.

„Also wie gesagt, da kann ich die Nagold selber irgendwo auch ein Stück beobachten und da kann ich mich schon irgendwo, werde ich dann schon auch denken, okay, jetzt könnte es kritisch werden. Aber ich habe noch genügend Zeit um nach oben zu gehen.“ <FG I; 00:34:31>

Tab. 5: Zitat aus den Fokusgruppen: Wahrnehmung der Bedrohung bei einem „normalen“ Hochwasser

Diejenigen Teilnehmer die ein Auto besitzen, würden dieses auch zur *Evakuierung* nutzen. Wenn mehrere Personenkraftwagen in einem Haushalt vorhanden sind sowie auch mehrere Führerscheininhaber, würden alle Fahrzeuge in die Evakuierung mit einbezogen. Wenn genug Zeit verbleibt, würden darin auch so viele Dinge wie möglich verstaut. Nahezu alle Teilnehmer würden wichtige Papiere, Geld und Wertgegenstände sowie persönliche Erinnerungsstücke einpacken. Von jeweils der Hälfte der Teilnehmer wurden Mobiltelefone, Notebooks, Medikamente, Fotoalben und Nahrungsmittel als Dinge genannt, die sie bei einer Evakuierung einpacken würden.

Das *Verhalten während der Evakuierung* zeigt, dass Eltern in jedem Fall persönlich zum Aufenthaltsort ihrer Kinder fahren, auch wenn sie dafür in das Evakuierungsgebiet hineinfahren müssen. Das gilt auch dann, wenn im Evakuierungsfall darüber informiert wird, dass die Kinder an einen sicheren Ort gebracht werden, sofern keine ganz klaren Angaben zum Aufenthaltsort der Kinder gemacht werden können, bzw.

kein persönlicher Kontakt hergestellt wurde. In abgeschwächter Form gilt dies auch für Haustiere, hauptsächlich für Hunde. Die Befragten stellen zudem sicher, dass ihr Umfeld bzw. ihre Nachbarschaft informiert ist und helfen gegebenenfalls Pflegebedürftigen.

„Ich würde erst mal zur Schule fahren. Also da würde ich in dem Moment nur an meine Kinder denken“ <FG I; 00:46:33>

„Aber es müsste eine Information da sein. Also es müsste, weil dieser Druck ist so enorm. Und da entscheidet man nicht mehr rational. Also da müsste Information von der Schule rausgehen. <FG II; 00:48:52>

Tab. 6: Zitate aus den Fokusgruppen: Eltern

Empfohlene Orte die als Sammelpunkt vorgeschlagen werden, würden nur teilweise angenommen. Für die geringe Akzeptanz von Sammelpunkten gab es mehrere Gründe: Zum einen planten viele der Teilnehmer eine Evakuierung zu Bekannten/Verwandten und die dafür in Frage kommende Strecke führte in vielen Fällen nicht am vorgeschlagenen Sammelpunkt vorbei. Zudem wurde erwartet, dass der sichere Ort (Sammelpunkt) chaotische Bedingungen aufweist da davon ausgegangen wurde, dass sehr viele Personen dorthin evakuieren. Weiterhin wird vom Sammelpunkt zunächst kein Mehrwert in der speziellen Situation erwartet, wie z.B. Informationen oder andere Unterstützungen. Einige Teilnehmer sagten jedoch, dass sie, nachdem sie ihre Angehörigen und relevanten Güter in Sicherheit gebracht hätten, beim Sammelpunkt vorbeischauchen würden.

Die Teilnehmer der Fokusgruppen hielten insgesamt die *Informationenlage* über den Katastrophenschutz für nicht ausreichend. Dabei sahen sie diese auch als ausschlaggebend dafür an, dass sie sich selbst mehr nach eigenen Überlegungen als nach offiziellen Ratschlägen verhalten würden. Dies betrifft letztlich alle in den Fokusgruppen diskutierten Schritte, von der Informationseinholung über das Vertrauen in bereitgestellte Informationen bis hin zur Evakuierungsbereitschaft und dem tatsächlichen Evakuierungsverhalten. Die Befragten der Fokusgruppen sprachen sich als Schlussfolgerung der Diskussion für einen integrativen Ansatz des Katastrophenschutzes aus. Ein integrativer Katastrophenschutz bedeutet im Verständnis der Fokusgruppenteilnehmer, dass im Vorfeld der Katastrophe ausführlich über alle Einzelheiten der Notfallplanung informiert wird. Zudem kann auch die Bevölkerung in größeren Abständen in Übungen mit einbezogen werden.

„(...) wenn man da drüber informiert wäre, über diese Katastrophenpläne, was da dann passieren würde, wer da dann verantwortlich ist, wie diese Mechanik stattfindet hier, was da dann passiert, also da wäre ich dann auch persönlich beruhigter. Hier, also ich sage ja ich habe auch jemanden

hier in dem Krisenstab von der Polizei, der mir schon darüber berichtet hat, aber das ist nicht der Informationsstand von den normalen Leuten hier, also und insofern würde ich also schon sagen, dass das also ganz arg wichtig ist und das man also doch schon, so wie sie das sagen heir, in bestimmten Abständen einfach auch mal bekannt gibt – hier und da dran erinnert – dass es sowas gibt. Also das finde ich schon wichtig.“ <FG II; 00:58:27>

Tab. 7: Zitat aus den Fokusgruppen: Einbezug in Katastrophenschutz

Die Bedrohung durch ein Hochwasser wird insgesamt aufgrund der *geographischen Lage* als eher gering eingestuft, da Altensteig zum größten Teil am Hang liegt und sich die Teilnehmer sicher sind, in einer Überflutungssituation relativ schnell, – notfalls auch zu Fuß – aus dem Gefahrengebiet zu entkommen. Für eine Evakuierung wären genug Wege sowohl für Personenkraftwagen als auch für den Fußgänger vorhanden, so dass nicht mit Problemen gerechnet wird. Manche Teilnehmer vertraten jedoch die Ansicht, dass die Hochwassergefahr aufgrund der scheinbar beruhigenden geographischen Lage eher unterschätzt wird und daher mit größeren Schäden gerechnet werden muss.

Zwischenfazit

Die Fokusgruppen bestätigen somit die zentralen Befunde und Annahmen aus der Literaturrecherche. So kann durch die Diskussionen in den Fokusgruppen davon ausgegangen werden,

- dass sich auch die Bürger Altensteigs in einer durch ein Hochwasserereignis ausgelösten Katastrophensituation in den seltensten Fällen panisch verhalten würden;
- dass Persönlichkeitsvariablen wie Kontrollgefühl und Fatalismus eine erhebliche Rolle bei der Reaktion auf die Warnung spielen. Dies gilt in Altensteig vor allem bei dem auf Erfahrungswissen basierenden Kontrollgefühl bezüglich einer Hochwasserentwicklung;
- dass Informationen im Vorfeld einer potentiellen Katastrophe eine entscheidende Rolle zukommt.

1.3.2 Erkenntnisse aus der CATI

Da manche Fragenkomplexe für andere Projekt- und Arbeitspaketschritte (*AP 6 - Verkehrssimulation; Agentenbasierte Simulation*) in die Befragung aufgenommen wurden, umfasst die folgende Ergebnisdarstellung nicht alle im Fragebogen abgefragten Items. Die Ergebnisdarstellung und -strukturierung orientiert sich weitgehend am Verhalten der Bevölkerung, basierend auf den Erkenntnissen aus den Fokusgruppen und stellt diese einander gegenüber.

Die Warnung

Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit der Frage, auf welche Weise und von wem die Bevölkerung gewarnt werden möchte. Die Fokusgruppenteilnehmenden äußerten sich dahingehend, dass eine Warnung dann als vertrauenswürdig empfunden wird, wenn sie von offizieller Seite aus geäußert wird (z.B. Polizei, Feuerwehr, städtischer Verwaltungsapparat, etc.). Es wurde aber auch deutlich, dass die Teilnehmenden in einer derartigen Situation auch immer auf ihr Erfahrungswissen setzen, d.h. sie überprüfen die Wahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses persönlich durch einen Blick auf die Nagold. Falls es beispielsweise tagelang nicht geregnet hat, würde eine derartige Warnung als unglaubwürdig eingestuft werden.

Im Fragebogen der CATI befassten sich mehrere Items mit der Art und Weise und der Glaubwürdigkeit unterschiedlicher Warnsignale. Zunächst wurde den Befragten eine Liste mit mehreren Warnungen mit der Bitte vorgelesen jeweils anzugeben, welcher sie am ehesten Aufmerksamkeit schenken würden (vgl. Abb. 4). Auch wenn die Unterschiede nicht sehr stark ausgeprägt sind, so erfahren doch die Warnungen von offizieller Seite durch Polizei oder Katastrophenschutz die größte Aufmerksamkeit (96%), gefolgt von anderen eindeutigen Warnsignalen wie Lautsprecherwagen und Sirenen. Der Warnung durch persönliche Netzwerke wird ebenfalls vergleichsweise hohe Aufmerksamkeit geschenkt (79%), im Gegensatz zu Signalen wie Kirchenglocken, Böllerschüssen und SMS (zw. 14-34%). Dies könnte zum einen an der Mehrdeutigkeit der Signale liegen, welche Raum zur Spekulation lassen, da sie auch in anderen Situationen eingesetzt werden. Zum anderen ist bei dieser Art von Signalen der Rückschluss auf die Identität des Warnenden bzw. der warnenden Institution nicht eindeutig möglich und verringert damit die Glaubwürdigkeit. Das schlechte Abschneiden der SMS als Warnmedium steht im Widerspruch zu den Ergebnissen aus der Fokusgruppe, wo dieses als vertrauenswürdig eingestuft wurde.

Der allgemeine Trend in Richtung institutionalisierte Ansprache und eindeutige Gefahrensignale wird in Abb. 5 bestätigt, in der nach der Glaubwürdigkeit der unterschiedlichen Signale gefragt wurde. Bis auf wenige Ausnahmen bleibt die Reihenfolge der Zustimmung gleich, allein der persönliche Anruf von Polizei oder Katastrophenschutz wird im Vergleich deutlich weniger glaubwürdig eingestuft (69%). Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Befragten aufgrund ihres Erfahrungswissens einen polizeilichen Anruf als wenig wahrscheinlich ansehen. Interessant ist, dass unter der Kategorie „Sonstiges“ von einigen Befragten noch das Fernsehen als glaubwürdiges Warnsignal genannt wurde, sowie das Internet und die Zeitung. Ebenfalls damit zusammenhängend ist die Frage nach der Vertrauenswürdigkeit bestimm-

ter Institutionen (siehe Abb. 6). Hier genießen Polizei und Feuerwehr ein Hohes Maß an Vertrauen (94%), noch vor dem Bürgermeister (65%) und den städtischen Behörden (mit 57%).

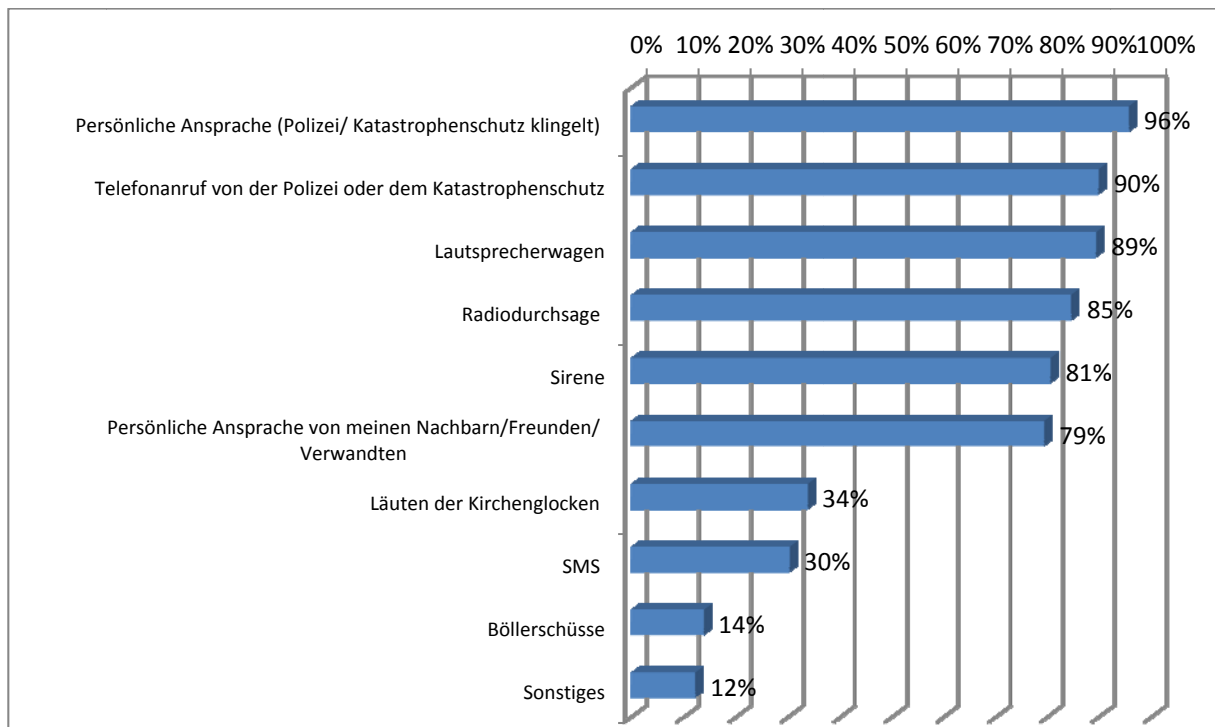


Abb. 4: Warnung Aufmerksamkeit

Alle Angaben in Prozent. An 100% fehlend: keine Aufmerksamkeit bzw. weiß nicht/keine Angabe. n=570. Originalfrage: Welcher der folgenden Warnungen würden Sie bei einer Evakuierung Altensteigs am ehesten Aufmerksamkeit schenken? Mögliche Antwortkategorien: ja/nein/keine Angabe.

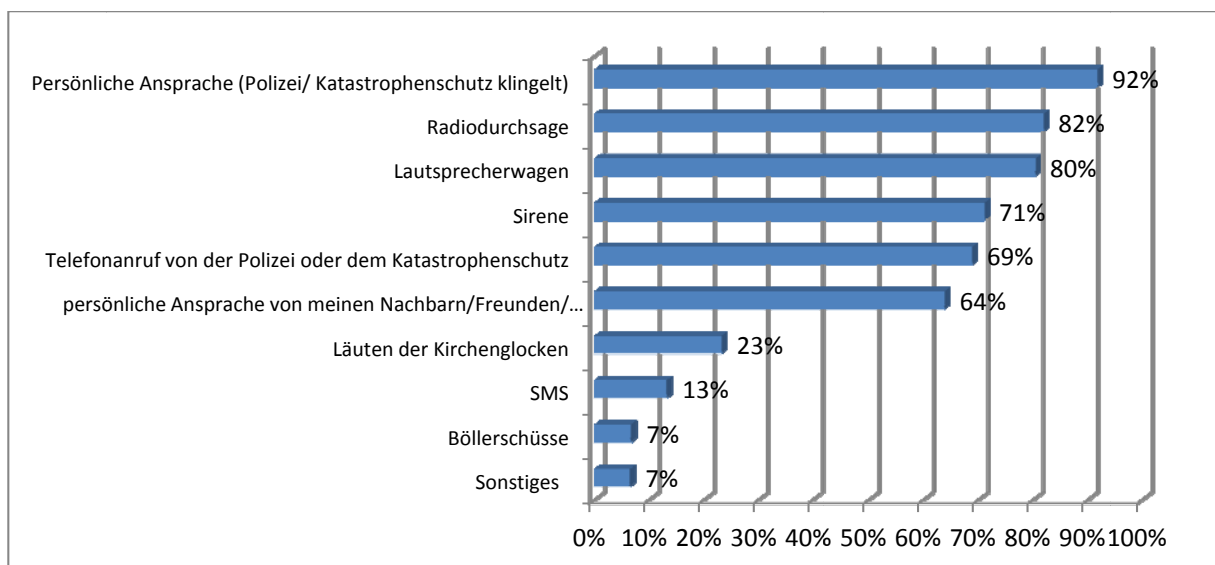


Abb. 5: Warnung Glaubwürdigkeit

Alle Angaben in Prozent. An 100% fehlend: nicht glaubwürdig. n=567. Originalfrage: Ich lese Ihnen verschiedene Warnungen vor, sagen Sie mir bitte welche Sie am glaubwürdigsten finden.

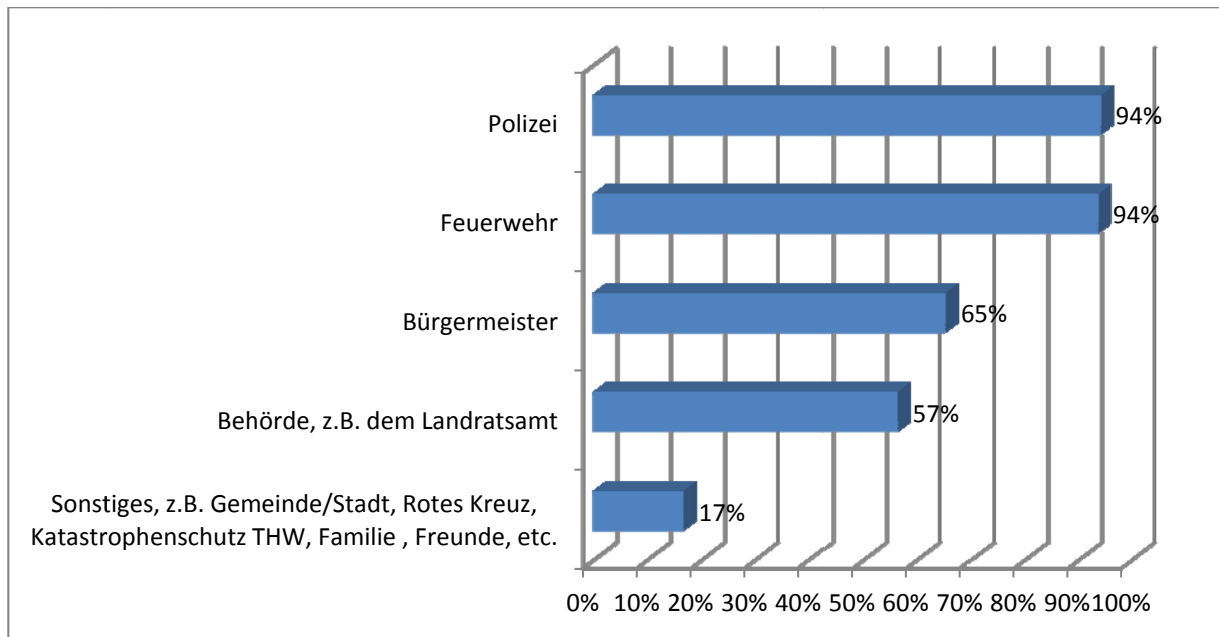


Abb. 6: Warnung Vertrauenswürdigkeit

Alle Angaben in Prozent. An 100% fehlend: nicht vertrauenswürdig. n=567. Originalfrage: Welcher der folgenden Institutionen würden Sie am meisten vertrauen, wenn die Aufforderung käme, Ihr Haus zu verlassen, da ein Hochwasser Sie bedroht?

Den eindeutigen Warnsignalen in Kombination mit als vertrauenswürdig eingestuften Absendern, würden von insgesamt über 90% der Befragten im Falle einer Katastrophe Aufmerksamkeit geschenkt werden (siehe Abb. 5).

Analog zu der Zugehörigkeit zu bestimmten Szenarien (Aufenthalt im Haus, bei der Arbeitsstelle oder außerhalb Altensteigs) wurden die Befragten gebeten, sich in eine Evakuierungssituation hineinzusetzen und darüber Auskunft zu geben, wie sie sich verhalten würden. Dabei wurde unter anderem gefragt für wie wahrscheinlich sie es halten, dass sie sich, entgegen den offiziellen Anweisungen, trotzdem auf die eigene persönliche Einschätzung der Gefahr verlassen würden (vgl. Tab. 8).

Über 50% der Befragten gaben an, dass sie, trotz der Anweisung das Haus oder die Arbeitsstelle zu verlassen, im Zweifel doch auf ihr Bauchgefühl hören würden, d.h., dass ihre persönliche Einschätzung der Gefahr handlungsleitend wäre. Allerdings erfolgt die Evakuierungsaufforderung in besagten Szenarien ohne detailliertere Informationen über die Stärke und das Ausmaß des Hochwassers. Die Frage wird noch zu klären sein, inwieweit eine vollständige und transparente Informationspolitik diesen individuellen Überlegungen und Handlungen entgegen wirken kann. Das Forschungsvorhaben möchte mit seinen Handlungsempfehlungen zum Katastrophenschutzplan die Voraussetzungen dazu schaffen

	sehr wahr- scheinlich	ziemlich wahr- scheinlich	nicht sehr wahr- scheinlich	überhaupt nicht wahr- scheinlich	trifft nicht zu
Szenario 1 ³ : Ich verlasse mich auf mein Bauchgefühl, weil ich die Nagold kenne.	35%	15%	25%	19%	3%
Szenario 2 ⁴ : Ich verlasse mich auf mein Bauchgefühl, weil ich die Nagold kenne.	34%	17%	23%	22%	4%

Tab. 8: Persönliche Gefahreinschätzung

Szenario 1: n= 193; Mittelwert 2,29, Median 2; Modus 1, Standardabweichung 1,17; Alle Angaben in Prozent, an 100% fehlend: keine Angabe/weiß nicht.

Szenario 2: n= 189; Mittelwert 2,35; Median 2; Modus 1, Standardabweichung 1,18; alle Angaben in Prozent; an 100% fehlend: keine Angabe/weiß nicht.

Unabhängig davon verweist dieser Befund jedoch auf die Tatsache, dass Inhalt, Umstand und die Art und Weise der Übermittlung der Warnung von großer Bedeutung sind, wenn man eine rasche und vollständige Evakuierung anstrebt. Es ist demnach nicht davon auszugehen, dass alle Menschen Evakuierungsaufforderungen blind folgen, ohne ihre eigenen Wahrnehmungen und Erfahrungen dem gegenüber zustellen.

Erste Reaktion nach der Warnung

Aus den Ergebnissen der Fokusgruppen geht hervor, dass die Menschen in einer Gefahrensituation das Bedürfnis haben, mit anderen Menschen (Angehörigen, Nachbarn, Bekannte etc.) in Kontakt zu treten, um sich über die Situation allgemein, sowie anstehende und notwendige Handlungen auszutauschen.

Wie bei der Frage nach der persönlichen Gefahreinschätzung bereits erläutert, wurden den Befragten der CATI in Abhängigkeit ihres Aufenthaltsortes (Zu Hause = Szenario 1, bei der Arbeit in Altensteig = Szenario 2, Außerhalb Altensteigs = Szenario 3) unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten vorgelegt und danach gefragt, für wie wahrscheinlich sie es halten, diese oder jene Handlung in einer Evakuierungssituation vorzunehmen.

³ Szenario 1: Stellen Sie sich bitte vor, dass Altensteig von einem Hochwasser bedroht wird und Sie zur Evakuierung aufgefordert werden. Wie stark das Hochwasser sein wird wissen Sie zu diesem Zeitpunkt nicht. Sie bekommen nur die Anweisung Ihr Haus zu verlassen und zu einem speziell eingerichteten Sammelpunkt zu fahren. Was würden Sie tun?

⁴ Szenario 2: Stellen Sie sich bitte vor, dass Altensteig von einem Hochwasser bedroht wird und Sie zur Evakuierung aufgefordert werden. Wie stark das Hochwasser sein wird wissen Sie zu diesem Zeitpunkt nicht. Sie bekommen nur die Anweisung Ihren Arbeitsplatz (oder anderen aktuellen Aufenthaltsort) zu verlassen und zu einem speziell eingerichteten Sammelpunkt zu fahren. Was würden Sie tun?

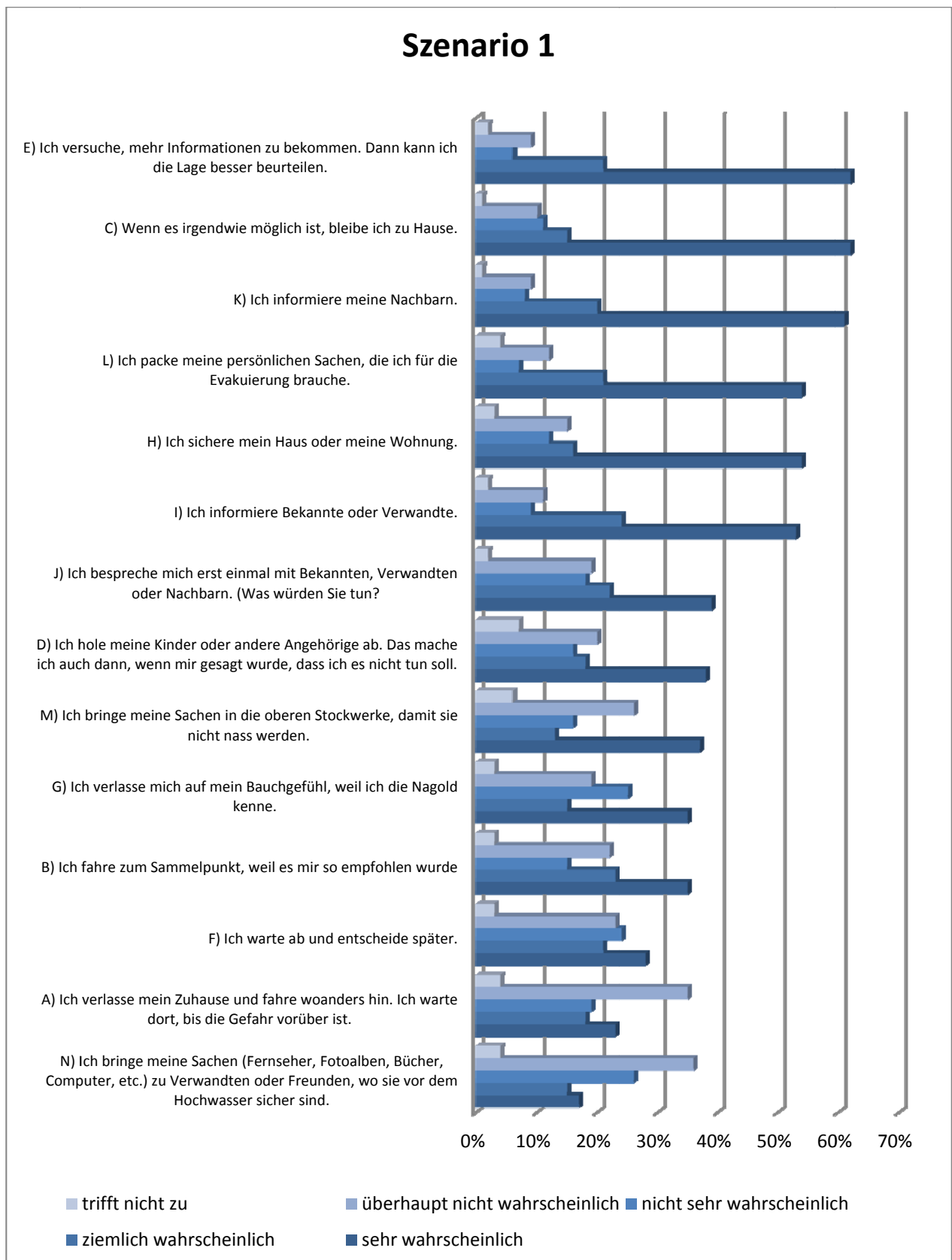


Abb. 7: Szenario 1 - Was würden Sie tun?

n= 193, alle Angaben in Prozent, an 100% fehlend: keine Angabe/weiß nicht.

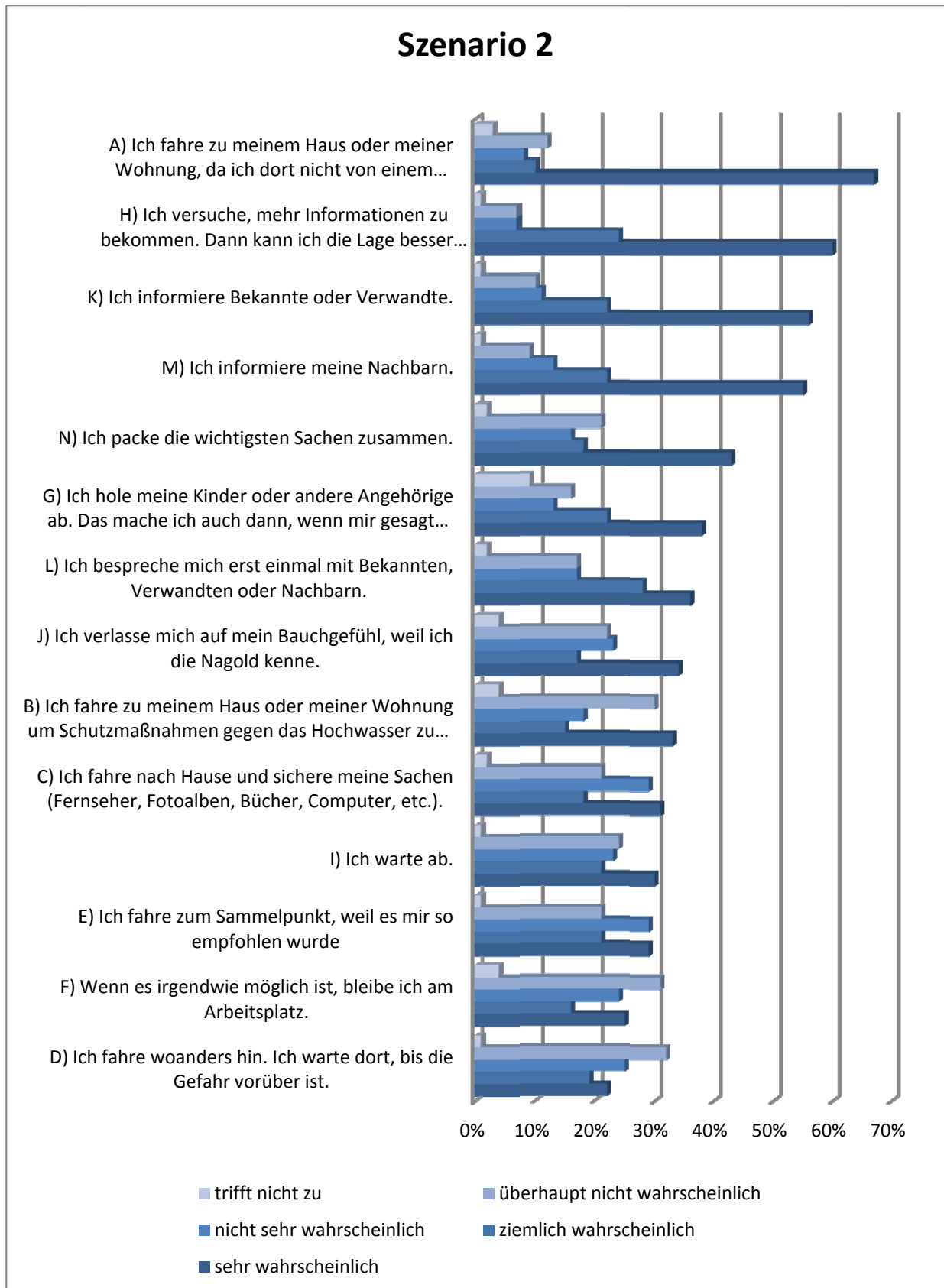


Abb. 8: Szenario 2 - Was würden Sie tun?

n= 189, alle Angaben in Prozent, an 100% fehlend: keine Angabe/weiß nicht.

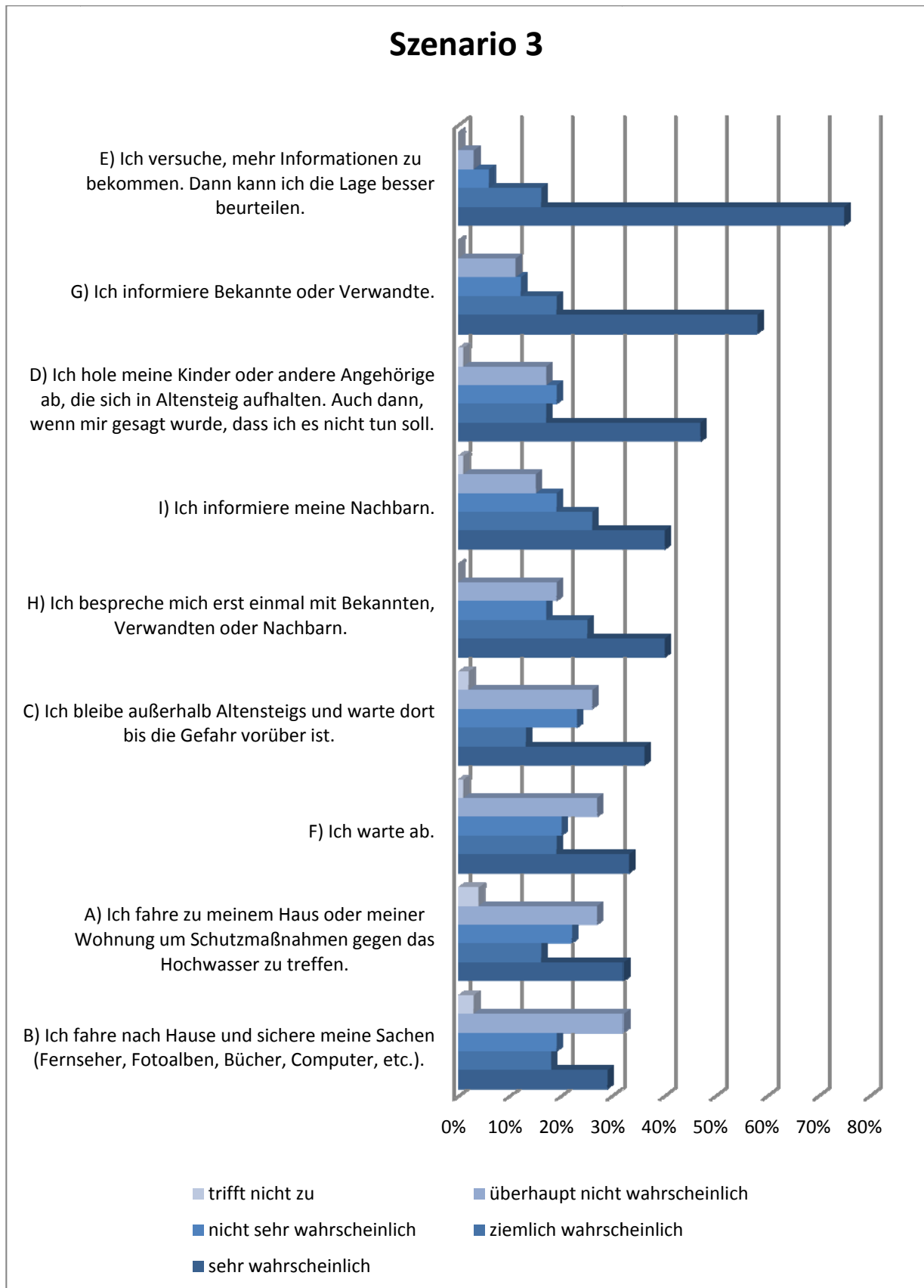


Abb. 9: Szenario 3 - Was würden Sie tun?

n= 188, alle Angaben in Prozent, an 100% fehlend: keine Angabe/weiß nicht.

Entgegen den Ergebnissen aus den Fokusgruppen, steht bei allen drei Gruppen die Suche nach weiteren Informationen an vorderster Front. Dies könnte jedoch durch die Szenarioformulierung bedingt sein, die explizit auf die mangelhafte Informationslage hinweist. Vergleichsweise wichtig erscheint den meisten Befragten, ihre Bekannten, Verwandten und/oder Nachbarn zu informieren (bei allen Szenarien an 2. und/oder 3. Stelle). Der Drang nach sozialem Austausch zur Entscheidungsfindung lässt sich allerdings nicht so deutlich festmachen, wie es die Aussagen der Teilnehmenden in den Fokusgruppen suggerieren. So wird die Möglichkeit, sich erst einmal mit Verwandten und Bekannten zu besprechen, über alle drei Gruppen hinweg nur von ca. 40% der Befragten als sehr wahrscheinlich angesehen.

Das Abholen der Kinder und Angehörigen ist ebenfalls eine sehr wahrscheinliche Reaktion, wobei hier die vollständige Zustimmung bei den Befragten des 3. Szenarios mit 47% am größten ist, gefolgt von den beiden anderen mit jeweils 38%. Letzteres trifft allerdings schwächer auf diejenigen zu, die sich tagsüber im Haus befinden. Diese Ausnahme lässt sich biografisch erklären, denn es befinden sich viele dieser Personen im Rentenalter, d.h. sie haben in der Regel keine direkte Verantwortung mehr für ihre Kinder und Enkelkinder, sondern werden im Gegenteil eher von diesen unterstützt/umsorgt (Koeffizient Phi zwischen Alter und Szenario: 0.65 bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0%).

Einzelne Unterschiede wie z.B. das Aufsuchen des eigenen Hauses bei Szenario 2, welches nicht in der Gefahrenlage liegt, sind gruppenspezifisch zu erklären. Dies trifft auch auf einen Aspekt zu, der nur für die Gruppe der „Daheimgebliebenen“ erhoben wurde: die allgemeine Abneigung, überhaupt das Haus verlassen zu müssen („Wenn es irgendwie möglich ist, bleibe ich daheim). Bei dieser Gruppe spielt der Wunsch nach Sicherung des Hauses und der persönlichen Wertgegenstände ebenfalls eine große Rolle.

Allgemein wird deutlich, dass die Warnung vor einer vermeintlichen Gefahrenlage keine überstürzte Flucht oder unkontrollierte Massenpanik nach sich zieht. Viel wahrscheinlicher sind überlegte Reaktionen, die auf die Suche nach weiteren Informationen und den Schutz anderer Mitmenschen abzielen oder auf die Wahrung des eigenen Besitzes. Der letzte Aspekt wurde in den Fokusgruppen nicht so deutlich benannt, was sich durch den, durch die Gruppe verstärkten Effekt der sozialen Erwünschtheit erklären ließe. Das altruistische Motiv sich erst um die Belange anderer sprich Angehörige, Nachbarn und Freunde zu kümmern, erfährt eine höhere soziale Anerkennung, als der Wunsch zuerst das eigene Hab und Gut zu schützen. Eine weitere Erklärung beruft sich auf eine in der Literatur aufgestellte Annahme (die im

Rahmen dieser Studie nicht untersucht wurde), dass Mieter eher bereit sind zu evakuieren als Eigentümer. Bereits angedeutet wurde die Abhängigkeit der Reaktion von der Lebenssituation, d.h. ob man die direkte Verantwortung für Kinder unter 18 Jahren trägt oder nicht.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse ist jedoch die Tatsache, dass die Befragten es insgesamt als vergleichsweise „unwahrscheinlich“ ansehen, die offiziellen Warnungen und entsprechenden Anweisungen (Treffen am Sammelpunkt, außerhalb Altensteigs bleiben) ohne Umwege zu befolgen. Dieser Umstand rechtfertigt weitergehende Untersuchungen und das Forschungsvorhaben als Ganzes.

Informationen

Die Suche nach weiteren Informationen in einer Evakuierungssituation ist ein zentrales Anliegen der Befragten. Hierzu wurden zunächst nach den unterschiedlichen Informationsquellen gefragt, mit der Bitte um Einschätzung ob sie diese Möglichkeit jeweils in Betracht ziehen.

Neben dem Radio (Zustimmung 88%), welches durch seine Aktualität und Verfügbarkeit die höchste Zustimmung als Informationsmedium erfährt, sind es hier auch wieder die engen sozialen Netzwerke, welche in dieser Situation kontaktiert werden (78% würden Freunde und Familie anrufen). Interessanterweise wird der vorgeschlagene Sammelpunkt als Informationsquelle von einer Mehrheit in Betracht gezogen (62%). Allerdings ist dies, unter Berücksichtigung der vorherigen Ergebnisse, in der Regel wohl nicht der erste Weg bzw. die erste Handlung. Das Fahren oder Laufen zum Sammelpunkt zielt auf das Einholen von Informationen ab und nicht auf die Suche nach Schutz und Unterkunft. Aus diesem Grund wäre für Altensteig ein zentraler Informationspunkt von Vorteil, bzw. eine dementsprechende Kommunikation, wo weitere Informationen erhalten werden können. Eventuell wäre die Einrichtung eines Informationskanals über die neuen Medien (Apps, etc.) ebenfalls interessant, die im konkreten Fall aktiviert werden, jedoch nicht als Warninstrument (aufgrund der mangelnden Glaubwürdigkeit), sondern als Informationsmedium zur weiteren Entwicklung des Hochwassers.

Die Tatsache, dass 61% der Befragten es als wahrscheinlich ansehen, auf die Straße zu gehen und sich umzuschauen, bekräftigt die Vermutung, dass die Bewohner Altensteigs sich nicht nur auf die indirekten Informationskanäle verlassen, sondern ihr Verhalten auch an für sie direkt wahrnehmbaren Signalen orientieren, d.h. zum Beispiel am Verhalten der Nachbarn, anhaltender Regen etc. Wenn die individuellen Sinneseindrücke der offiziellen Warnung zuwider laufen, könnte es Probleme bei der

Bereitschaft zur Evakuierung geben, da die meisten Menschen am liebsten zu Hause bleiben würden (62% Zustimmung: „Wenn es irgendwie geht bleibe ich zu Hause“). Auch deshalb ist es wichtig, die Warnung einerseits auf unterschiedlichen Kanälen zu kommunizieren, um möglichst viele Menschen zu erreichen und andererseits, wenn nötig, darauf hinzuweisen, warum die Gefahr zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ersichtlich ist (zum Beispiel bei einem Dambruch (Piping)).

Die Einbindung der offiziellen Institutionen wie Polizei und Feuerwehr sind zwar für die Glaubwürdigkeit der Warnung relevant, als Informationsmedien sind sie jedoch vergleichsweise wenig nachgefragt (40%).

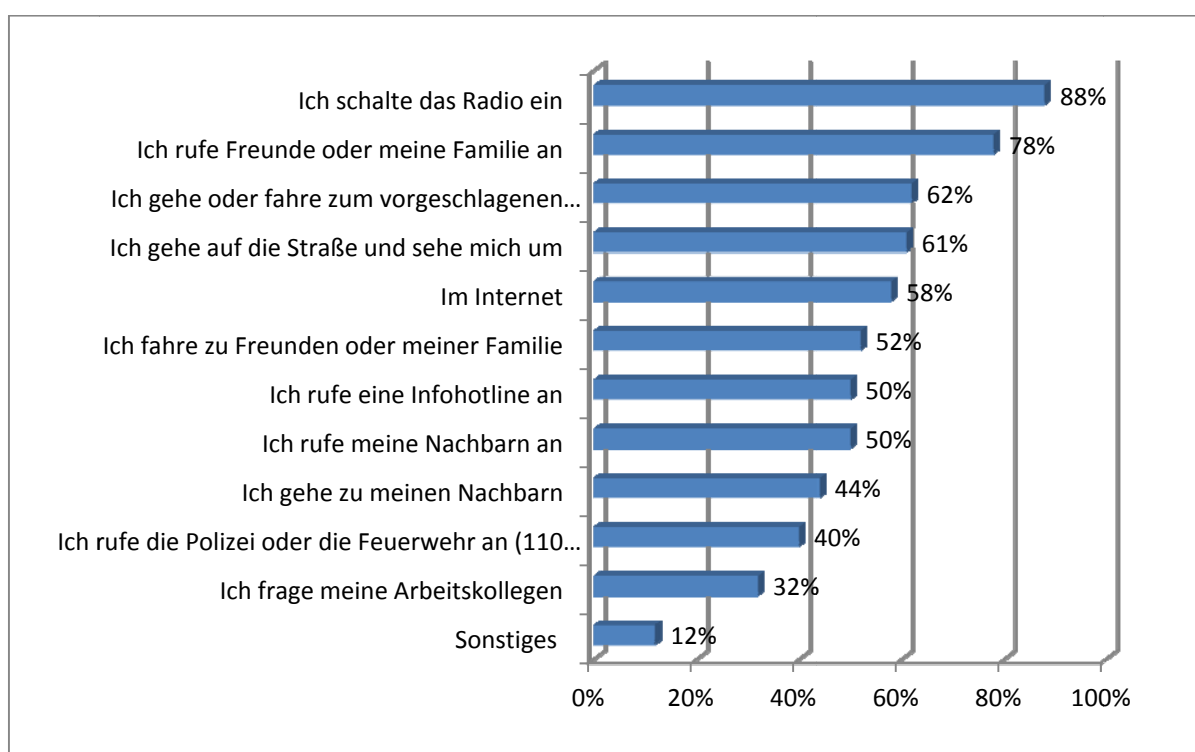


Abb. 10: Informationsquellen

n= 540, alle Angaben in Prozent. Originalfrage: Bitte sagen Sie mir zu jeder Möglichkeit, ob Sie hier nach mehr Informationen suchen würden.

Neben potentiellen Informationskanälen bzw. -quellen wurden die Teilnehmer gebeten anzugeben, welches die wichtigste Information sei (vgl. Abb. 10) nach der sie suchen würden. Nach einer qualitativen Klassifizierung der Aussagen zeichnen sich drei Bereiche ab, die jeweils über 100-mal genannt wurden. Am meisten interessieren sich die Befragten für die genaueren Umstände, d.h. was genau passiert ist. Zu wissen wie es zu der Evakuierungssituation kommt, scheint einen Einfluss auf das anschließende Verhalten zu haben. Die zweite Frage gilt der Familie und den Angehörigen bzw. den Freunden und deren Sicherheit, noch bevor die Menschen wissen

wollen wie viel Zeit Ihnen noch zur Evakuierung bleibt. Nicht ganz so häufig, aber immer noch über 50-mal, wurde der Wunsch nach Informationen über die Dauer der Evakuierung („Wann kann ich wieder zurück?“), den sicheren Ort („Wo soll ich hin?“) und Gründe der Evakuierung („Warum soll ich evakuieren?“) geäußert.

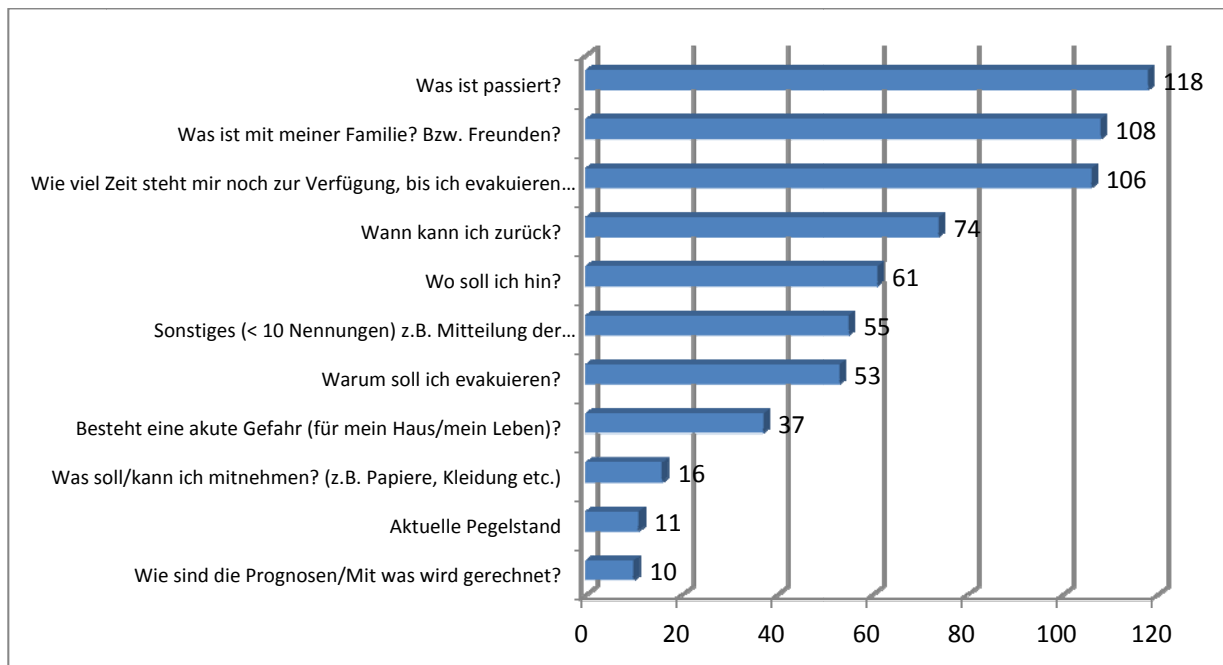


Abb. 11: Informationsinhalt

Originalabfrage offen: Welches ist die für Sie wichtigste Information? Antworten wurden klassifiziert, die angegebenen Häufigkeiten entsprechen der absoluten Anzahl der Nennungen, da einzelne Person mehrere Aspekte benannt haben. Abgebildete Antwortkategorien: > 9 Nennungen.

Durch die offene Abfrage und der nach der Klassifizierung eindeutigen Rangfolge der gewünschten Informationen wird einmal mehr deutlich, dass für einen reibungslosen Evakuierungsverlauf konkrete Informationen über den Evakuierungsanlass und die Evakuierungssituation einerseits und den Verbleib von Familie und Freunden andererseits eine wichtige Rolle spielen. Die Vermutung liegt nahe, dass je weniger die Menschen sich informiert fühlen, desto mehr Zeit werden sie mit der Suche nach Informationen verbringen und sich damit nicht entsprechend möglicher Anweisungen verhalten.

Wahrnehmung der Bedrohung

Für das Verhalten von Personen in Evakuierungssituationen, spielt auch die individuelle Wahrnehmung der Bedrohung eine Rolle. Diese kann wiederum durch zwei wesentliche Faktoren beeinflusst werden. Zum einen das persönliche Erlebnis, so wurden die Bewohner gefragt, ob sie bereits einmal ein Gebäude in dieser Gegend um Altensteig aufgrund von Gefahr verlassen mussten. Evakuierungserfahrung haben demnach nur 16% der Befragten (siehe Abb. 12).

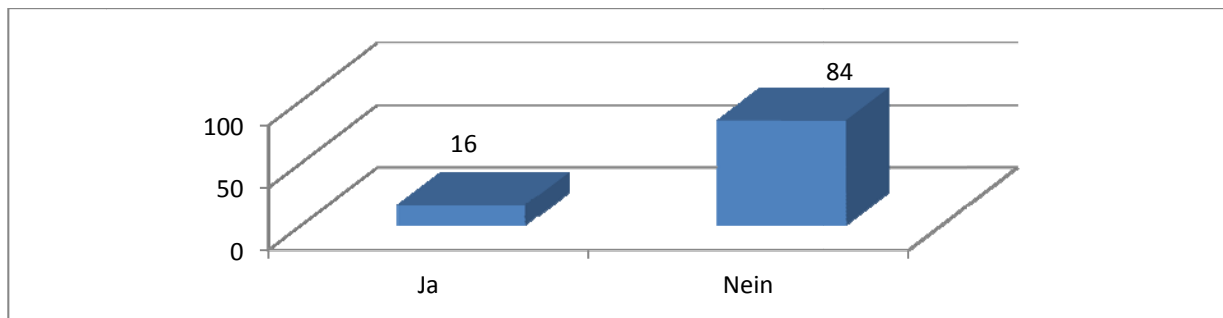


Abb. 12: Evakuierungserfahrung

Alle Angaben in Prozent, n= 570. Fragelaut im Original: Bestand für Sie selbst schon einmal die Notwendigkeit, ein Gebäude oder eine Gegend um oder in Altensteig bei einer Gefahr zu verlassen?

Zum anderen die Einschätzung, ob sie Altensteig und ihr persönliches Lebensumfeld (eigenes Haus oder Arbeitsstelle) überhaupt als potentiell gefährdet ansehen.

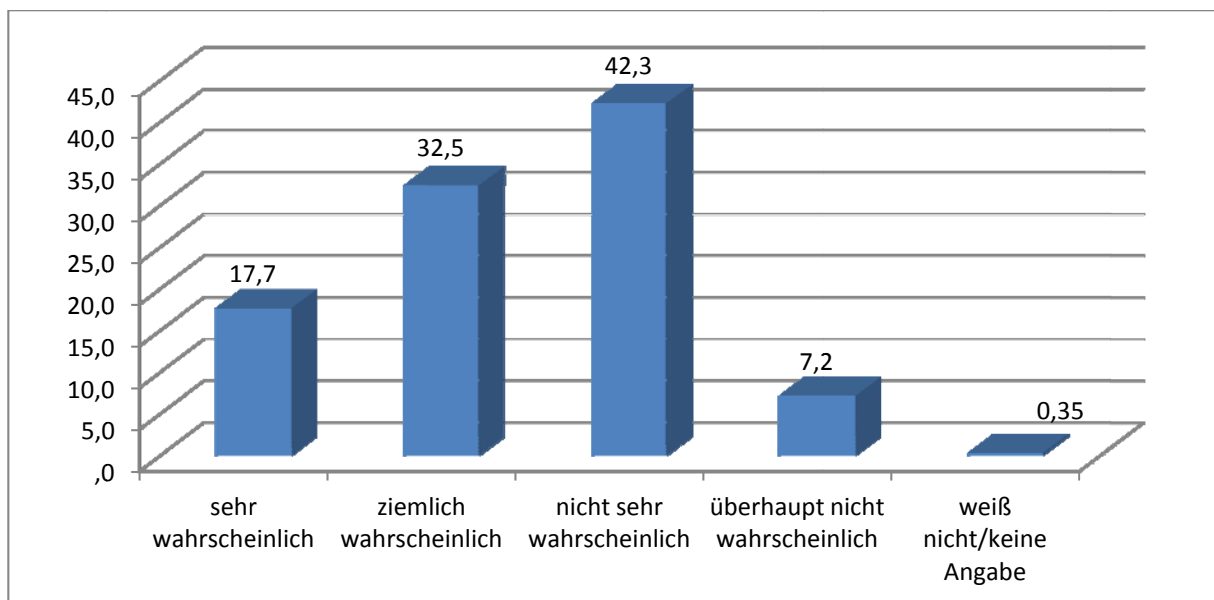


Abb. 13: Gefährdung Altensteig

Alle Angaben in Prozent; n= 570; Mittelwert 2,39, Median 2, Modus 3, Standardabweichung 0.86 (ohne fehlende Werte=keine Angabe/weiß nicht); Fragelaut im Original: Könnten Sie sich vorstellen, dass in Altensteig eine Hochwasserkatastrophe eintreten könnte?

Obwohl nur 16% der Befragten bereits einmal evakuieren mussten und auch die wenigsten ihr Haus (6%, vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) oder ihre Arbeitsstelle in Altensteig (23%, vgl.) als gefährdet ansehen, so wird die Bedrohung für Altensteig insgesamt deutlich stärker wahrgenommen (ca. 50 % der Befragten halten eine Hochwasserkatastrophe in Altensteig für wahrscheinlich, vgl. Abb. 13). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass knapp die Hälfte der Teilnehmer, eine (katastrophale) Gefährdung Altensteigs durch Hochwasser als relativ unwahr-

scheinlich ansehen. In den Fokusgruppen wurde als Begründung dafür die geographische Lage der Stadt genannt, die jederzeit eine Flucht zu Fuß ermöglicht und so ein katastrophales Ausmaß verhindern würde.

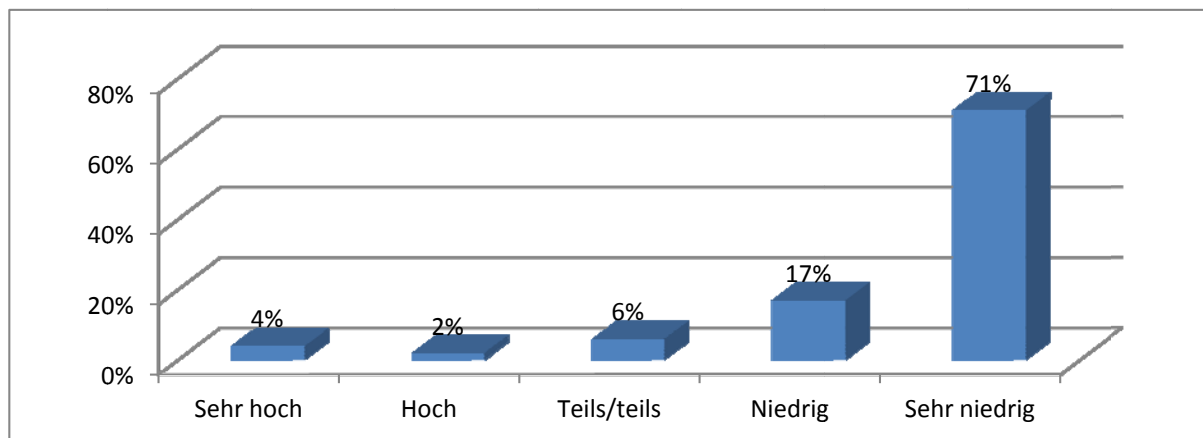


Abb. 14: Gefährdung Haus

Alle Angaben in Prozent; n=570, Mittelwert 4.49, Median 5, Modus 5, Standardabweichung 0.99; (ohne fehlende Werte=keine Angabe/weiß nicht); Fragelaut im Original: Für wie gefährdet durch ein Hochwasser halten Sie Ihre Wohnung/Ihr Haus?

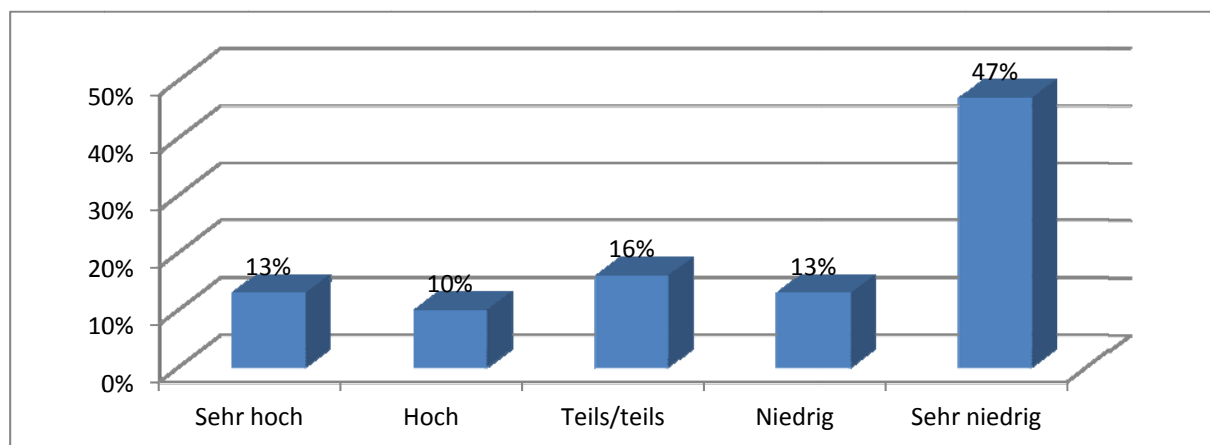


Abb. 15: Gefährdung Arbeitsstelle

Alle Angaben in Prozent, n= 216; Mittelwert 3.72, Median 4, Modus 5, Standardabweichung 1.47; (ohne fehlende Werte=keine Angabe/weiß nicht); Fragelaut im Original: Für wie gefährdet durch ein Hochwasser halten Sie Ihre Arbeitsstelle (bzw. den Ort der anderen Aktivitäten)?

Die Unterschiede bezüglich der Einschätzung von Arbeitsstelle und Haus liegt ebenfalls in der geographischen Lage Altensteigs begründet: Viele Geschäfte und Büros Altensteigs befinden sich im unteren, flusssnahen Teil entlang der Hauptstraßen, während sich ein Großteil der Wohnhäuser in Hanglage befindet.

Einblicke in die Wahrnehmung der Bedrohung durch die Teilnehmer, ergibt sich auch durch die Frage nach den Gründen, warum sie ihr Haus nicht verlassen würden. Die meisten würden auf jeden Fall gehen (150 absolute Nennungen, vgl. Abb. 16). Je-

doch wurden insgesamt doppelt so viele Gründe angegeben, die aus Sicht der Befragten gegen eine Evakuierung sprechen könnten (300). Am wichtigsten ist die Klärung des Schicksals der Angehörigen (75-mal genannt), vor der fehlenden Wahrnehmung einer unmittelbaren Bedrohung. Für 59 Befragte wären dies Gründe, zu Hause zu bleiben. In Übereinstimmung mit den vorherigen Ergebnissen, sehen 56 der Befragten ein Hochwasser als nicht evakuierungsnotwendig an, da sie sich nicht davon betroffen fühlen.

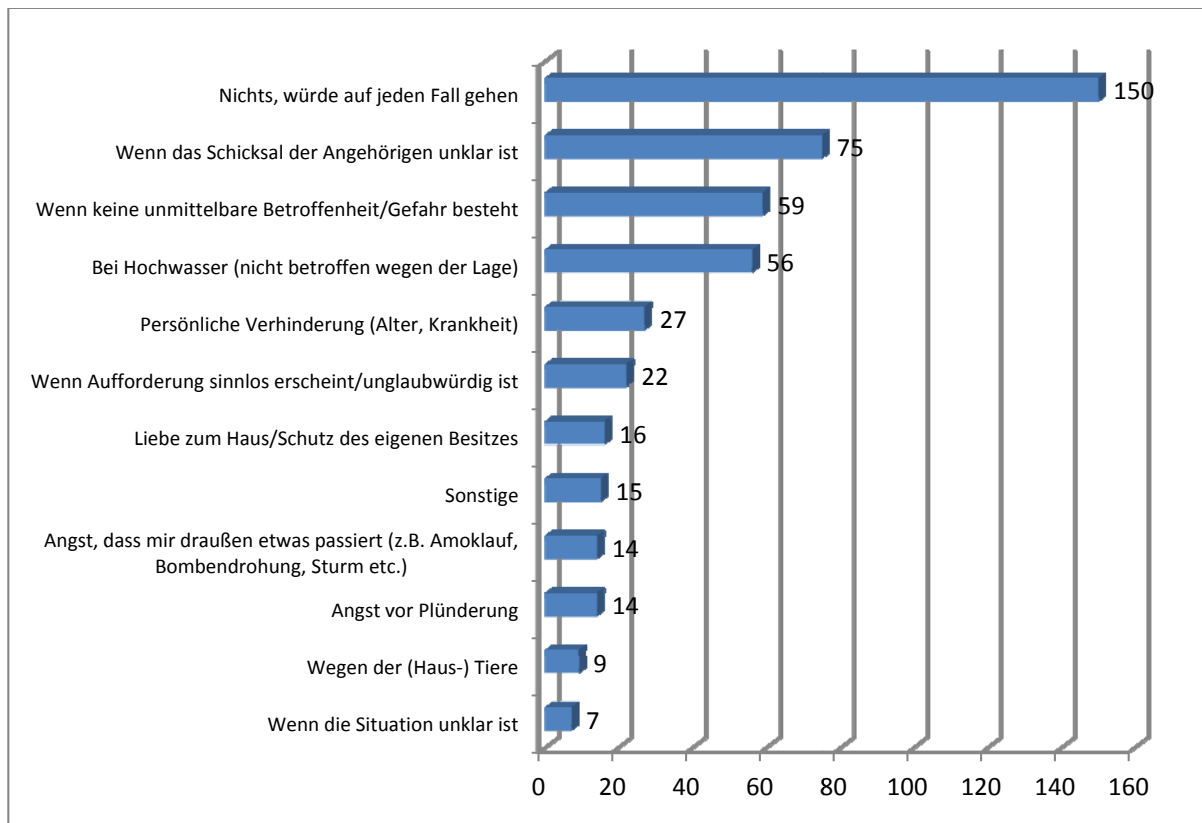


Abb. 16: Gründe gegen Evakuierung

Originalabfrage offen: Was spricht dagegen, Ihr Haus oder Ihre Wohnung zu verlassen? Aus welchen Gründen würden Sie auch dann zu Hause bleiben, wenn Sie aufgefordert würden, zu evakuieren? Antworten wurden klassifiziert, Häufigkeiten entsprechen der absoluten Anzahl der Nennungen, da einzelne Person mehrere Aspekte benannt haben. Abgebildete Antworten: > 6 Nennungen.

Insgesamt lassen diese Daten darauf schließen, dass sich mindestens die Hälfte der Befragten zuvor noch keine näheren Gedanken über ein mögliches Verhalten in einer Evakuierungssituation gemacht hat, da sie eine derartige Gefahr für relativ unwahrscheinlich halten. Dies bietet auch eine große Chance, da für diese Situationen noch keine festgeschriebenen Handlungsrountinen existieren. Wenn eine derartige Situation eintritt, wird dieser Teil der Bevölkerung höchst wahrscheinlich verunsichert sein und nach Informationen über angemessene Handlungsstrategien suchen. Zum anderen birgt das fehlende Bewusstsein einer möglichen Bedrohung jedoch die Gefahr, dass

bei einer mangelnden Krisenkommunikation im Vorfeld, die Notwendigkeit einer Evakuierung in der speziellen Situation, bzw. die Wichtigkeit Anweisungen zu befolgen, nicht erkannt wird. Es gibt keinen Hinweis auf panische Reaktionen. Die größere Gefahr geht von suboptimalen Verhaltensweisen der Personen aus, die sowohl durch Nicht-Wahrnehmen als auch durch Nicht-Wissen entstehen können.

Ablauf der Evakuierung

In Anlehnung an die Ergebnisse der Fokusgruppe wurden die Teilnehmer gefragt, auf welchem Wege bzw. mit welchem Verkehrsmittel sie am ehesten evakuieren würden. Die allermeisten (83%, vgl. Abb. 17) würden das Auto wählen. Obwohl aufgrund der topografischen Lage Altensteigs eine Evakuierung zu Fuß ebenfalls ohne weiteres möglich wäre, würden lediglich 6% der Teilnehmer diesen Weg nehmen, jeweils 2% würden das Fahrrad wählen bzw. ein Taxi und 4% den Bus. Da 82% der Befragten angeben, persönlich ein Auto zur Verfügung zu haben, sind diese Zahlen realistisch, vor allem vor dem Hintergrund, dass auch unter 18-jährige an der Befragung teilgenommen haben.

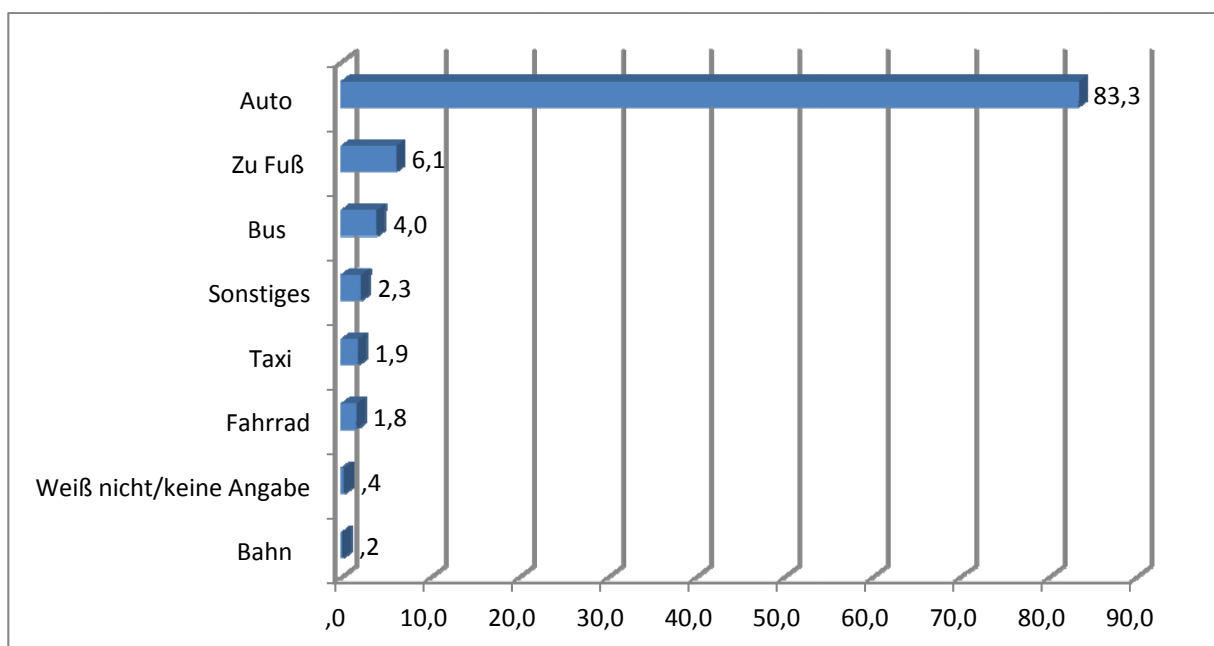


Abb. 17: Verkehrsmittelwahl

Alle Angaben in Prozent, n= 570. Fragelaut im Original: Welches der folgenden Verkehrsmittel würden Sie bei einer Evakuierung am ehesten nutzen?

Über die Frage warum die große Mehrheit mit dem Auto evakuieren würde, obwohl aufgrund der Lage auch eine Evakuierung zu Fuß möglich wäre, kann an dieser Stelle nur spekuliert werden. Aber mit Blick auf die vorherigen Ergebnisse liegt die Vermutung nahe, dass das Auto sowohl als Transportmittel für persönliche Gegenstände

dient, als auch selbst als Wertgegenstand aus der Gefahrenzone gebracht werden möchte und deshalb als Verkehrsmittel vorgezogen wird.

Als einen weiteren Grund nicht zu evakuieren, wurde persönliche Verhinderung aufgrund von Krankheit und/oder Alter genannt (vgl. Abb. 16). Von den Befragten sind ca. 5% (selbst oder ihre Angehörigen) auf Hilfe angewiesen (vgl. Abb. 18). Dabei würden über 80% passiv auf Hilfe warten, aktive Verhaltensweisen wie Verwandte/Freunde, den Rettungsdienst, oder ein Taxi rufen, erhielten weniger als 50% Zustimmung (48%, 45% bzw. 26%, vgl. Abb. 19). Die breite Streuung zwischen den Items zeigt, dass auch hier eine Unsicherheit darüber herrscht, ob man Hilfe anfordern muss und wenn ja, ob bei öffentlichen Stellen oder Privat-Personen. Diese Information müssten ebenfalls im Vorfeld kommuniziert werden.

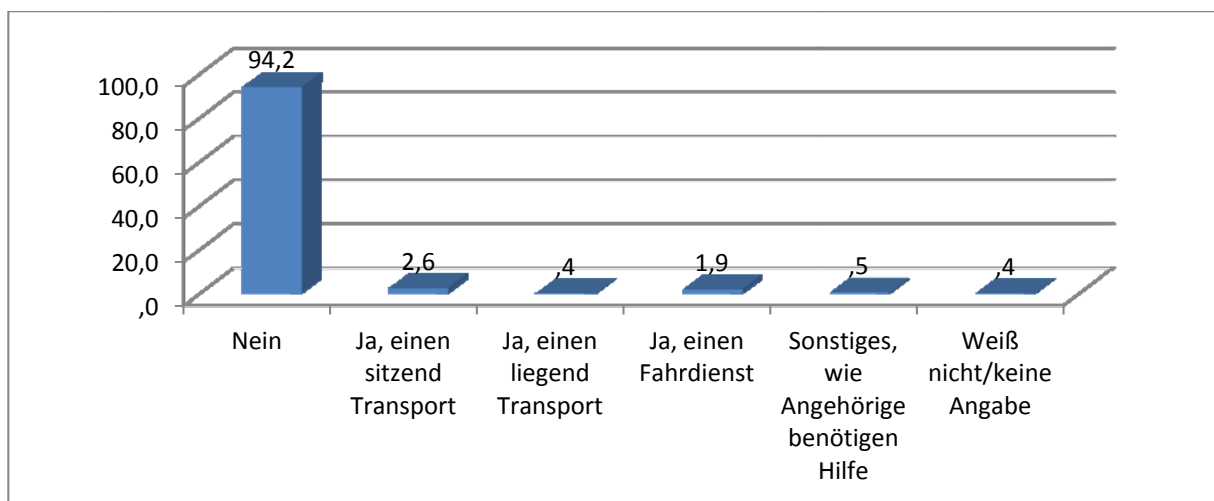


Abb. 18: Externe Hilfe

Alle Angaben in Prozent, n= 570. Fragelaut im Original: Benötigen Sie aufgrund einer Behinderung oder anderen körperlichen Einschränkungen Hilfe im Falle einer Evakuierung?

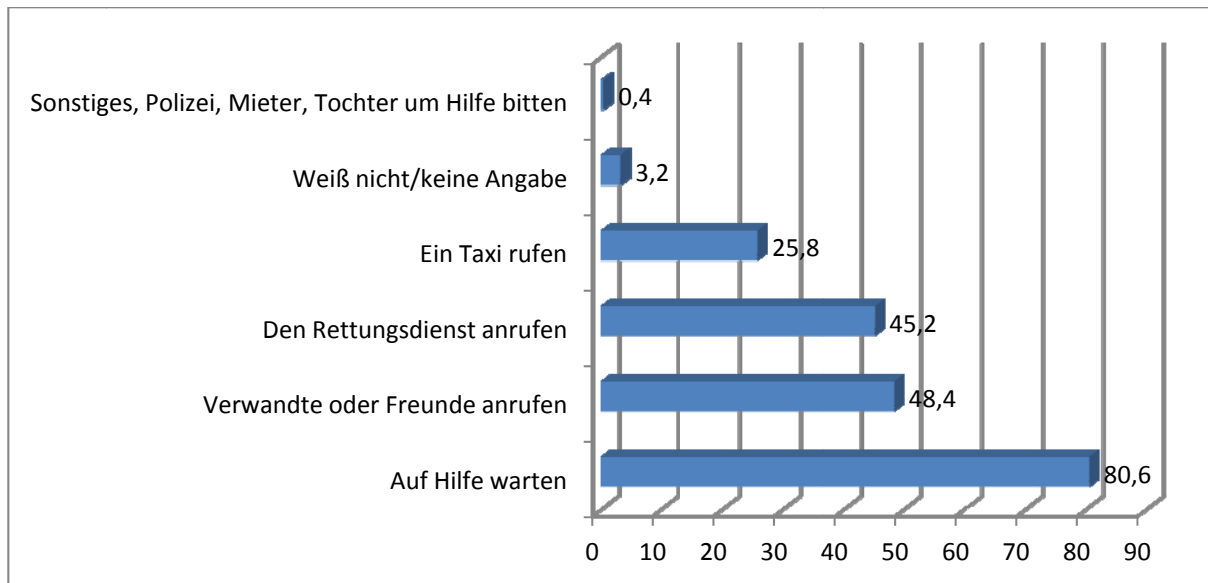


Abb. 19: Art der Hilfe

Alle Angaben in Prozent, n= 31. Fragenlaut im Original: Was würden Sie tun, um diese Hilfe zu bekommen? Würden Sie...Abfrage der jeweiligen Items, in der Tabelle abgebildet sind jeweils die Zustimmungquoten.

Insgesamt kann man damit rechnen, dass die meisten Menschen mit dem Auto evakuieren würden und sollte dementsprechende Informationen streuen. Dennoch sollte darauf geachtet werden, dass, wenn auch wenige, Fahrradfahrer und Fußgänger unterwegs sein könnten. Einen dringenden Informationsbedarf gibt es vor allem für diejenigen, die in einer solchen Situation auf Hilfe angewiesen wären.

Soziodemografische Angaben

Um zu prüfen, inwieweit die Repräsentativität in der erhobenen Stichprobe gegeben ist, werden die soziodemografischen Variablen Alter, Einkommen, Schulabschluss und Ausländerquote je nach Verfügbarkeit mit allgemeingültigen Statistiken für Altensteig, Baden-Württemberg oder Deutschland verglichen. Auf diese Weise erhält man einen Überblick darüber, inwieweit die Teilnehmenden der Telefonumfrage der Grundgesamtheit entsprechen. Ziel war es, einen möglichst repräsentativen Ausschnitt der Bevölkerung zu befragen, um dadurch plausible Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit der in Altensteig lebenden und/oder arbeitenden Bevölkerung ziehen zu können.

Alter

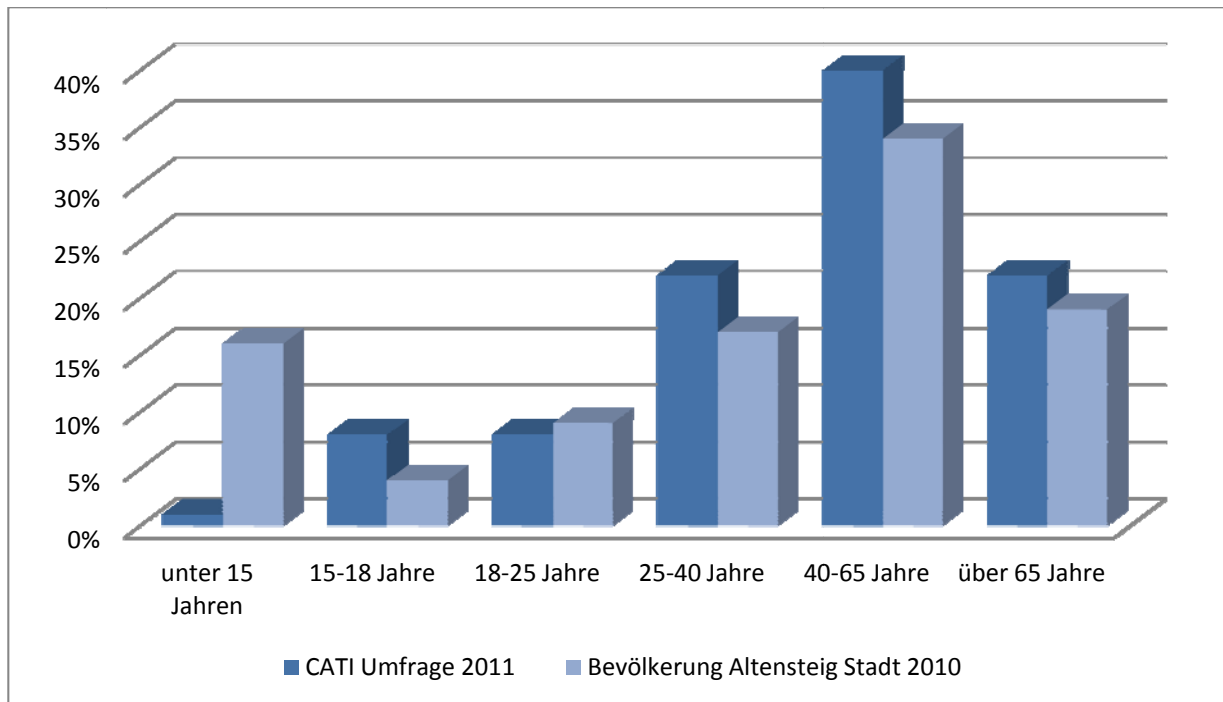


Abb. 20: Alter

Alle Angaben in Prozent; *CATI Umfrage 2011*: n= 570; Fragelaut im Original: Darf ich fragen, wie alt Sie sind? *Bevölkerung Altensteig Stadt 2010*; *Quelle*: statistisches Landesamt Baden-Württemberg <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?H=BevoelkGebiet&U=06&T=01035413&E=GE&K=235&R=GE235006>

Der Vergleich der Altersstrukturen von der CATI Umfrage mit den offiziellen Statistiken der Stadt Altensteig zeigt eine annähernd repräsentative Altersverteilung. Einzige große Ausnahme bilden die unter 15-jährigen, die in der Stadt mit 16% vertreten sind, aufgrund der Befragungsbestimmungen (Befragungsalter über 14 Jahre) jedoch in der CATI weitgehend herausfallen (1%, vgl. Abb. 20). In beinahe allen anderen Altersgruppen sind die Prozentwerte bei den Befragten höher, als in der Vergleichsstatistik, die Unterschiede sind mit maximal 6% Punkten jedoch zu vernachlässigen. Mit über 40% liegen die meisten Befragten zwischen 40 und 65 Jahren, gefolgt von jeweils 22% der jüngeren Kohorte (18 bis 25 Jahre), sowie der älteren (über 65 Jahre). Allerdings muss der Vollständigkeit wegen hinzugefügt werden, dass sich die Vergleichsstatistik nur auf die Stadt Altensteig bezieht, während bei der Befragung auch Bewohner der Teilorte mit einbezogen wurden.

Bildungsabschluss

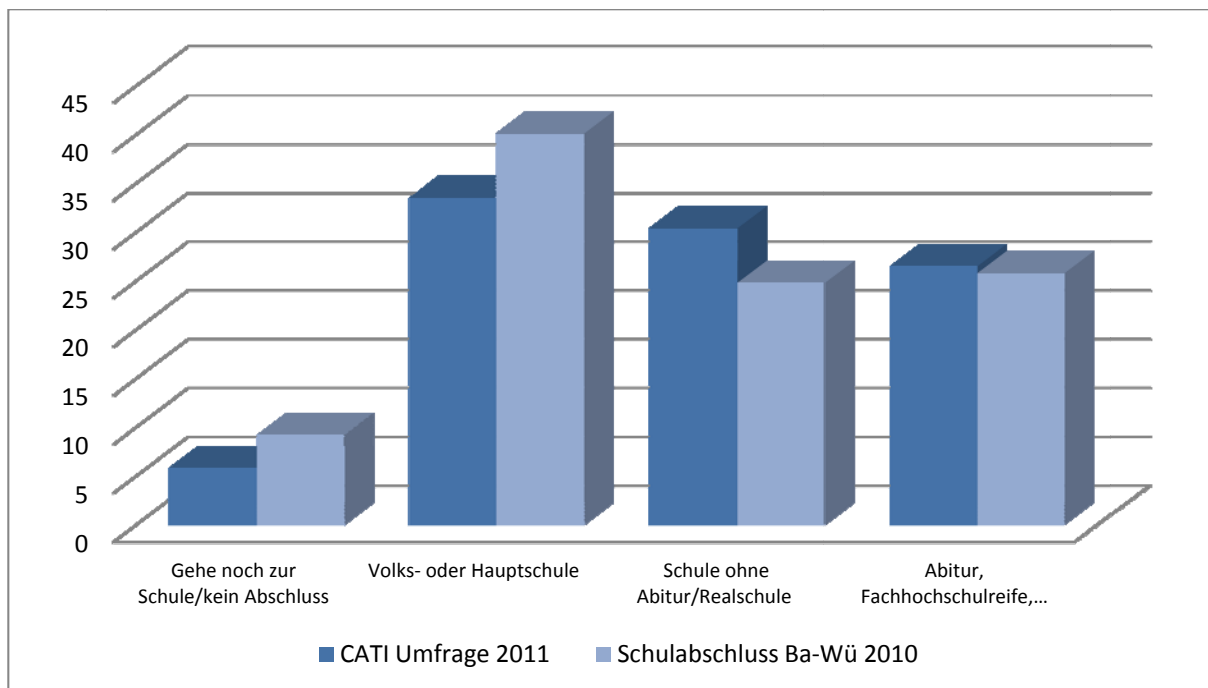


Abb. 21: Schulabschluss

Alle Angaben in Prozent; *CATI Umfrage 2011*: Fragelaut im Original: Welche Schule haben Sie zuletzt besucht bzw. welchen Schulabschluss haben Sie? *Schulabschluss Baden-Württemberg 2010*, Quelle: Ergebnisse des Mikrozensus, aufgerufen unter: <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/BevoelkGebiet/Landesdaten/MZbevSchule.asp>

Für einen Abgleich der Bildungsabschlüsse wurde die Statistik des Mikrozensus von 2010 für Baden-Württemberg herangezogen. Auch hier sieht man eine ähnliche Verteilung der Bildungsabschlüsse zwischen den CATI-Befragten und den restlichen Einwohnern Baden-Württembergs. Im Schnitt sind die Teilnehmer der Umfrage etwas höher gebildet, was jedoch mit den Kenntnissen aus der Befragungsforschung einhergeht: demnach steigt die Bereitschaft zur Partizipation an Forschungsprojekten mit dem Bildungsniveau. Die meisten der Befragten haben einen Volks- oder Hauptschulabschluss (34%, siehe Abb. 21), gefolgt von Realschule und Gymnasium. Der jeweilige Anteil ist jedoch beinahe gleich hoch. Weit abgeschlagen liegen davon lediglich diejenigen, die noch zur Schule gehen bzw. keinen Abschluss haben (6%). Im Vergleich zu gesamt Baden-Württemberg ist der Anteil hier wieder geringer, wobei dies natürlich auch wieder mit dem Alter zusammenhängt.

Haushaltsnettoeinkommen

Die Abfrage des Haushaltsnettoeinkommens ist in jeder Befragung eine heikle Angelegenheit, was auch an der hohen Prozentzahl der Verweigerer (siehe Abb. 22, keine Angabe) ersichtlich wird. Im Vergleichsdatensatz Allbus 2010 (Repräsentative deutschlandweite Erhebung) ist die Anzahl der Verweigerer mit über 30% sogar noch höher. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen die Einkommensklassen

gleich gruppiert sein. Da hierfür bei Befragungen keine einheitlichen Standards vorliegen, konnten keine entsprechenden Daten für Baden-Württemberg oder Altensteig zu Rate gezogen werden, sondern es musste auf die deutschlandweite Erhebung zurückgegriffen werden. Ein Blick auf die Abb. 22 zeigt, dass die erhobene Einkommensverteilung in Altensteig mit geringfügigen Abweichungen repräsentativ für Deutschland ist.

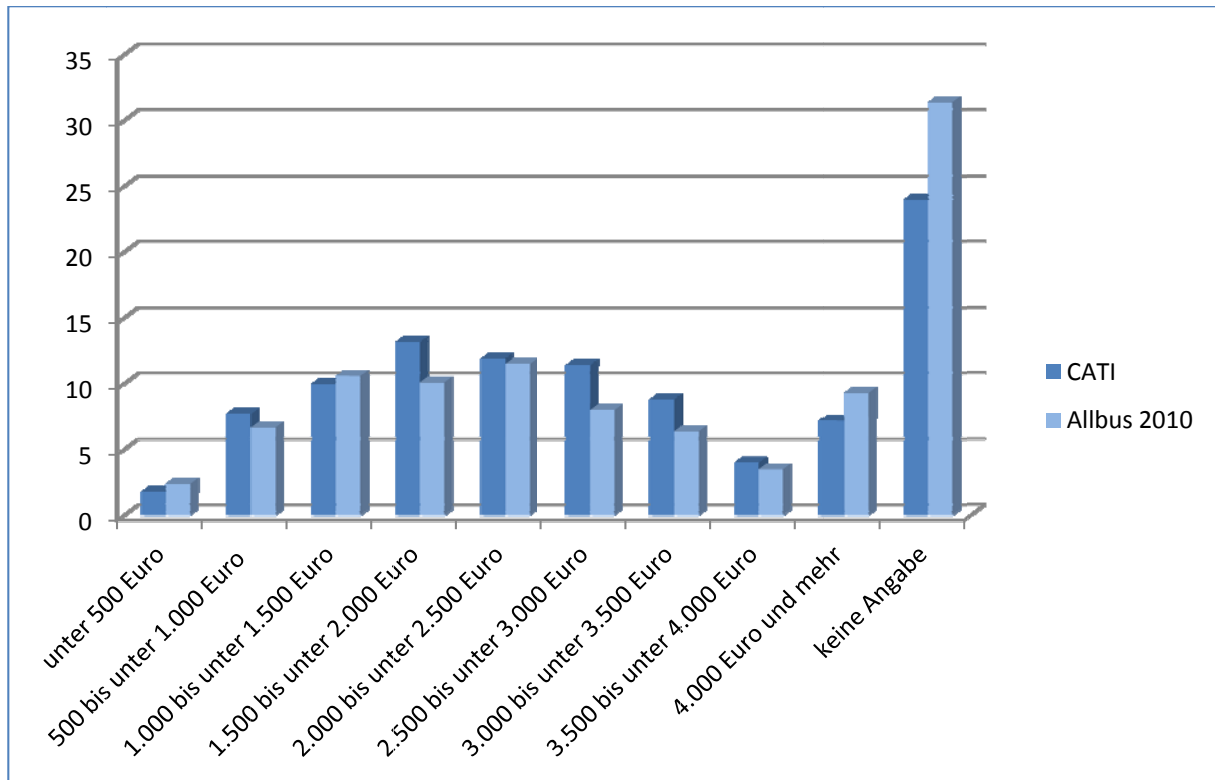


Abb. 22: Haushaltsnettoeinkommen.

Angaben in Prozent. Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der CATI-Umfrage sowie des ALLBUS (für Deutschland) 2010.

Ausländeranteil

In der CATI-Umfrage wurde auch danach gefragt, ob man selbst oder ein Elternteil nach 1955 in Deutschland eingewandert ist. Auf 14,6% der Befragten trifft das zu, was den Vergleich mit der offiziellen Statistik der Stadt Altensteig mit 12,4% Ausländeranteil durchaus vergleichbar ist (vgl. Abb. 23). Wobei an dieser Stelle angemerkt werden muss, dass die befragten Migranten alle der deutschen Sprache mächtig sind, da die Personen nur auf Deutsch interviewt wurden.

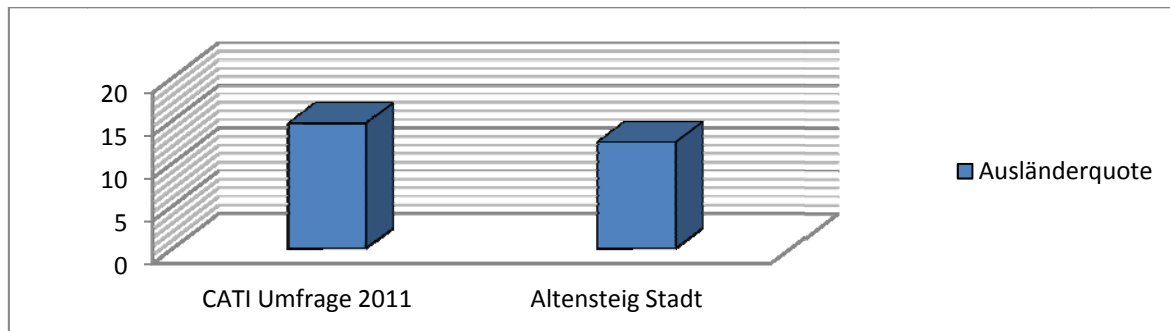


Abb. 23: Ausländeranteil

Alle Angaben in Prozent; *CATI Umfrage 2011*: n= 570, keine Angabe=8, Fragelaut im Original: Sind Sie selbst oder ein Elternteil nach 1955 nach Deutschland eingewandert? Ausländeranteil in Altensteig Stadt, Quelle:

[http://www.statistik.baden-](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?H=BevoelkGebiet&U=02&T=99045010&E=GE&K=235&R=GE235006)

[wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?H=BevoelkGebiet&U=02&T=99045010&E=GE&K=235&R=GE235006](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?H=BevoelkGebiet&U=02&T=99045010&E=GE&K=235&R=GE235006)

1.4 Agentenbasierte Simulation

Mit der agentenbasierten Simulation wurde, wie bereits erläutert eine Simulation des Fluchtverhaltens der Bevölkerung angestrebt. Basis dieser Simulation waren ein Rasterbild Altensteigs sowie die vom Projektpartner *DHI Wasy (AP3: Hydraulische Simulationen)* ermittelten Zeiträume verschiedener Hochwasserereignisse. Neben diesen Größen wurden sozio-demographische Merkmale der Bevölkerung Altensteigs, deren erhobene Aufenthaltsorte während eines Tagesverlaufs sowie eine Kombination von möglichen Verhaltenskomponenten in die agentenbasierte Simulation integriert. Die Definition des potentiellen Verhaltens der Agenten erfolgte auf Basis einer Typenbildung, die im Folgenden näher erläutert wird.

1.4.1 Typenbildung und Umsetzung der Szenarien

Neben der Tageszeit der Evakuierung wurde im Rahmen der Simulation auch der Einfluss der Informationslage auf das Verhalten der Agenten variiert. Für die Simulation ergaben sich damit vier verschiedene Szenarien:

1. Schlechte Informationslage, Tag (Vormittag/Mittag)
2. Schlechte Informationslage, Nacht (Abend/Nacht)
3. Gute Informationslage, Tag (Vormittag/Mittag)
4. Gute Informationslage, Nacht (Abend/Nacht)

Diese Aufteilung folgte aus der Literaturrecherche und den Erkenntnissen aus den Fokusgruppen, die auch bestätigten wie wichtig der Einfluss der Informiertheit vor dem Schadensereignis ist. Die Ergebnisse der Telefonischen Umfrage zeigten, dass sich die Aktionsketten am Vormittag und am Mittag kaum unterschieden, das gleiche gilt auch für abends und nachts. Aus diesen Gründen wurden die Zeiten entsprechend zusammengefasst.

Die der Simulation zugrunde liegenden Typen wurden mit Hilfe der vorhergehenden Erkenntnisse aus der Literaturrecherche, den Fokusgruppen sowie der telefonischen Befragung gebildet. Hierbei wurden sowohl quantitative Daten als auch qualitativ gewonnene Informationen zum Verhalten der Bevölkerung integriert. So wurde die prozentuale Verteilung der Typen auf die Grundgesamtheit, aus den soziodemographischen Angaben der Befragten (quantitative Erhebung) abgeleitet. Auch die Aufenthaltsorte der Befragten wurden hierbei erfasst, so dass die Agenten auf Grundlage der tatsächlichen Aufenthaltsorte über das Raster der Stadt Altensteig verteilt werden konnten.

Ebenfalls wurden die mittels verschiedener Items gemessenen Verhaltensabsichten in die Typenbildung integriert, die zuvor erfolgreich mit soziodemografischen Merkmalen verknüpft werden konnten. Auf Grundlage der qualitativen Auswertung wurden diese Verhaltensabsichten um die Hauptmotive für das jeweilige Handeln ergänzt, so dass die Typenbildung mit real geäußerten Aussagen der Altensteiger Bürger in den Fokusgruppen unterfüttert werden konnte.

Aus der Literaturrecherche sowie einiger Aussagen aus den Fokusgruppen, wurden die anzunehmenden Reaktionszeiten der Agenten für einzelne Handlungen abgeleitet. Da die Zeiten in den Fokusgruppen von einzelnen Teilnehmern unterschätzt wurden und realiter so nicht angenommen werden kann, dienten die Angaben in der Literatur als zusätzliche Kontrolle. In Folge konnten für jeden Idealtypen⁵ entsprechende Verhaltensmuster verknüpft mit spezifischen Charakteristika, Aufenthaltsorten, Motiven und Reaktionszeiten sowie dessen wahrscheinliches Verhalten prozentual aufgeschlüsselt werden. Insgesamt ergaben sich damit 6 Haupttypen sowie einen Sondertyp, den Typ Haustierbesitzer. Dieser wurde prozentual über die Haupttypen verteilt, da in diesem Fall keine speziellen soziodemografischen Merkmale nachgewiesen werden konnten. Der Besitz von Haustieren ist jedoch insofern relevant, als dass hier von einer höheren Reaktionszeit ausgegangen werden muss:

- **Typ A (15%):** Alleinstehend oder Paarbeziehung, erwerbstätig, PKW
- **Typ B (8%):** Alleinstehend oder Paarbeziehung, nicht erwerbstätig, kein PKW
- **Typ C (52%):** Familie, PKW
- **Typ D (19,5%):** Rentner, PKW

⁵ Ein Idealtyp umfasst unterschiedliche, klar voneinander abgrenzbare Merkmale, die auf realen Beobachtungen beruhen. Dabei handelt es sich um eine theoretische Konstruktion, was zur Folge hat, dass er im Gegensatz zu einem Realtypen, nicht an seiner Übereinstimmung mit der Realität gemessen wird.

- **Typ E (5%):** Pflegebedürftige
- **Typ F (0,5%):** Heldentyp
- **Sondertyp S (37% über alle Typen A-F):** Haustierbesitzer

Entlang der bereits beschriebenen Szenarien wurden in der Simulation für die verschiedenen Typen Aktivitätsketten gebildet, die diese Informationen auf einzelne Situationen und Agenten übertragen. Tab. 9 gibt einen Überblick über die einzelnen Personentypen und ihre jeweiligen Pläne.

Schlechte Info				Gute Info			
Tag	Anteil	Nacht	Anteil	Tag	Anteil	Nacht	Anteil
Kategorie							
A: Assembly	37%	H → E	60%	E → H → E	6%	H → E	10%
W → H → E	28%	H → E	40%	W → H → E	4%	HH → E	90%
E	20%			E	50%		
W → E	15%			W → E	40%		
Summe A	100%	Summe A	100%		100%		100%
Kategorie B							
H → N → A	61%	H → N → A	61%	H → N → A	21%	H → N → A	19%
H → A	39%	H → A	39%	H → A	79%	H → A	81%
Summe B	100%		100%		100%		100%
Kategorie C							
H → S → A	42%	H → R → A	12%	H → S → A	12%	H → R → A	11%
H → A	31%	H → A	31%	H → A	61%	H → A	59%
H → E → A	27%	H → E → A	57%	H → E → A	27%	H → E → A	30%
Summe C	100%		100%		100%		100%
Kategorie D							
H → E	85%	H → E	80%	H → A	98%	H → A	93%
./.	15%	./.	20%	./.	2%	./.	7%
Summe D	100%		100%		100%		100%
Kategorie E							
H → E	60%	H → E	60%	H → A	80%	H → A	80%
./.	20%	./.	20%	./.	1%	./.	1%
H → E	20%	H → E	20%	H → E	19%	H → E	19%
Summe E	100%		100%		100%		100%
Kategorie F							
E → A	100%	E → A	100%	E → A	100%	E → A	100%

Tab. 9: Personentypen und Pläne

Darstellung TraffgoHT. Legende: E = Exit; H = Home; W = Work; N = Nachbar; A = Assembly; S = Schule/KiTa; R = Verwandte

Insgesamt leiteten sich aus den Szenarien und den gebildeten Typen elf Aktivitätsketten ab, die sich für die vier Fälle „Tag“ und „Nacht“ jeweils untergliedert nach „gute Information“ und „schlechte Information“ ergaben. Ein Teil der Personen gab an,

dass sie nichts unternehmen würden. Der größte Teil plante von zu Hause aus über die Schule zur Sammelstelle zu fahren bzw. in den sicheren Bereich (E). Ein erheblicher Teil der Personen (29,2%) plante in der Nacht bei schlechter Informationslage eine Rückkehr aus dem sicheren Bereich zur Sammelstelle (A), um zusätzliche Informationen zu erhalten – in der folgenden Tabelle markiert.

Anteile der Pläne an der Bevölkerung					
		Schlechte Info		Gute Info	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
Alle Kategorien	A: Assembly	5,6%	9,0%	0,9%	1,5%
	W → H → E	4,2%	6,0%	0,6%	13,5%
	E	3,0%	0,0%	7,5%	0,0%
	W → E	2,3%	0,0%	6,0%	0,0%
	H → N → A	4,9%	4,9%	1,7%	1,5%
	H → A	19,2%	19,2%	38,0%	37,2%
	H → S → A	21,8%	6,2%	6,2%	5,7%
	H → E → A	14,0%	29,6%	14,0%	15,6%
	H → E	20,6%	19,6%	24,1%	23,1%
	./.	3,9%	4,9%	0,4%	1,4%
	E → A	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	Summe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tab. 10: Pläne und Anteil der Personen, die diese verfolgen

Darstellung TraffgoHT. Legende: E = Exit; H = Home; W = Work; N = Nachbar; A = Assembly; S = Schule/KiTa; R = Verwandte

1.4.2 Ergebnisse der Simulation

Annahmen

Es wurden vier verschiedene Fälle untersucht: Tag und Nacht jeweils bei guter und schlechter Information. Dabei wurde der Evakuierungsverkehr simuliert, anderer Verkehr, wie beispielsweise der Durchgangsverkehr, wurde nicht berücksichtigt. Aufgrund der relativ geringen Bevölkerungszahl und einer Absperrung der Durchgangstraßen im Evakuierungsfall, scheint diese Annahme gerechtfertigt⁶. Für die Fälle

⁶ Eine Berücksichtigung des Alltagsverkehrs könnte – bei Vorliegen entsprechender Daten – z.B. dadurch berücksichtigt werden, dass die Kapazitäten der entsprechenden Straßen in der Evakuierungssimulation verringert werden.

Tag und Nacht wurde bei der vorliegenden Analyse die gleiche Verteilung der synthetischen Bevölkerung angenommen⁷.

Bei schlechter Informationslage ist die Informationssuche ein wichtiges Motiv, so dass in einigen Fällen ein Zwischenziel aufgesucht wird, an dem eine Informationsstelle erwartet wird. Das kann das Rathaus sein oder ein offizieller Sammelpunkt (in dieser Simulation die Realschule). Dieser Umstand wurde in der Simulation insofern berücksichtigt, als dass ein Teil der Agenten zunächst dorthin fährt und dann zu einem späteren Zeitpunkt weiter. Die Faktoren Reaktionszeit und Zwischenziele wurden in der Simulation explizit berücksichtigt.

Insgesamt kann die Evakuierung, laut den Simulationsergebnissen, bei einer kurzen Reaktionsdauer (bis zu zwei Stunden) und einer vorausschauenden (nahezu optimalen) Routenwahl sowie dementsprechender gleichmäßiger Auslastung des Straßennetzes, abgeschlossen werden, bevor die Überflutung eintritt. Nicht berücksichtigt wurden hierbei bislang die Bedeutung des Alarmierungssystems sowie eine Warnung zu einem sehr frühen Zeitpunkt. Theoretisch ist es möglich, dass bei einer deutlichen Gefährdung die Evakuierung schon vor Eintritt des eigentlichen Schadensereignisses vorbereitet oder veranlasst wird. Damit würde der Zeitpunkt des Hochwassers als Einflussgröße für die Simulation nach hinten verschoben (Frühwarnsystem).

Einige der Agenten müssten in der Simulation das Hochwasser umfahren. Dies zu simulieren ist zwar prinzipiell möglich, war aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Das Hochwasser dient hier zur reinen Veranschaulichung der Frage, ob Agenten betroffen sind oder nicht. Sie sind es und müssten dementsprechend in der Realität (bzw. bei einer expliziten Berücksichtigung von Straßensperrungen) alternative Routen suchen.

Simulationsergebnisse

Unter der Annahme, dass die Reaktionszeitverteilung zwischen zehn Minuten (sehr schneller Aufbruch) und drei Stunden liegt, kann nicht vermieden werden, dass Personen vom Wasser erreicht werden, während sie noch evakuieren. Denn das Hochwasser erreicht Altensteig ca. 2:15 Stunden nach Eintritt des Schadensereignisses (Hochwasserentlastung oder Piping). Ein Beispiel findet sich in Abb. 23.

⁷ Auch hier sind viele weitere Untersuchungen und Varianten denkbar.

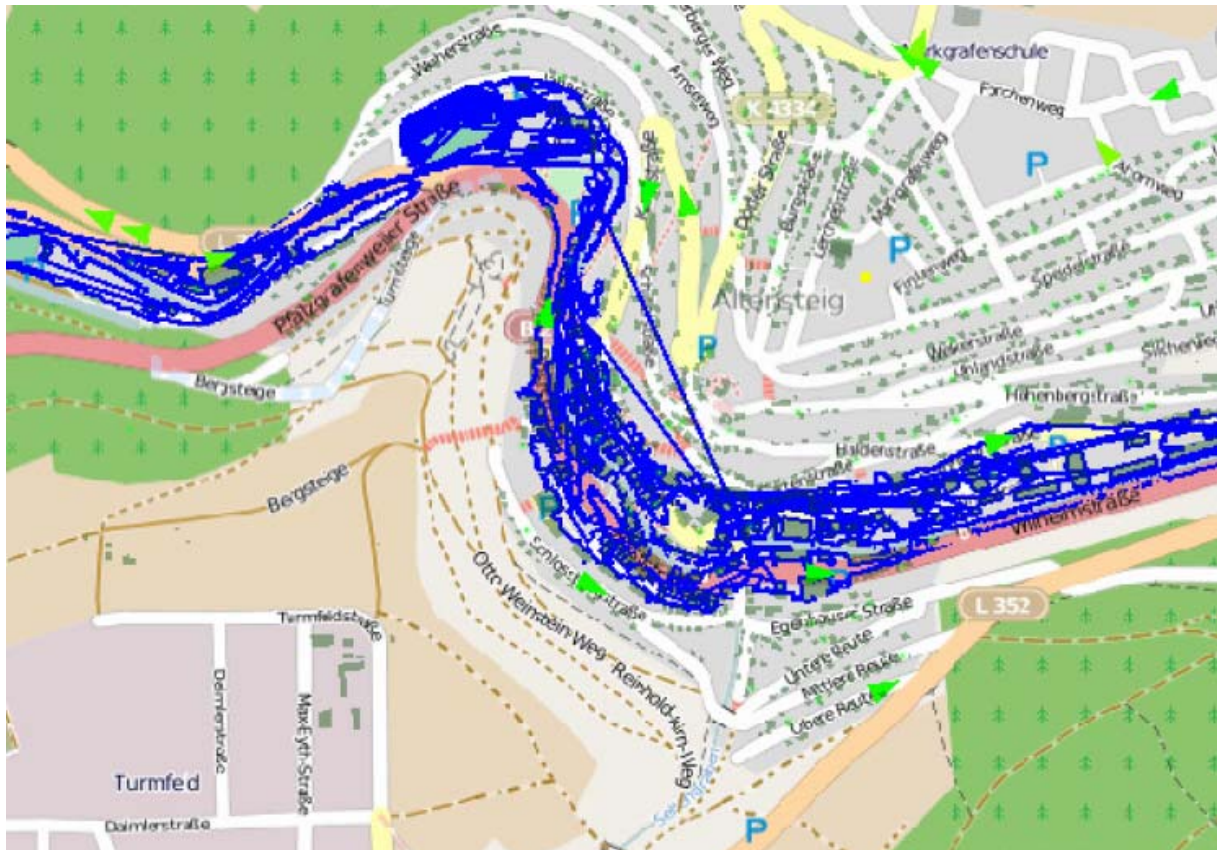


Abb. 24: Screenshot der Simulation

Darstellung: Screenshot aus der Simulation. Legende: Die grünen Pfeile im Bereich des Hochwassers (blaue Fläche) stellen den Fall dar, indem Personen vom Wasser erreicht werden. Simuliert wurde hier die Kombination aus „Tag und schlechte Information“.

Nimmt man hingegen an, dass die Reaktion schneller erfolgt (zehn Minuten bis zwei Stunden), so kann eine Gefährdung der Bevölkerung durch das Hochwasser vermieden werden. Die Abfahrt von der Sammelstelle dauert bei 1200 Personen zwischen einer und zwei Stunden. Bei 600 Personen dauert sie zwischen 45 Minuten (Nutzeroptimum) und einer Stunde (alle nehmen den kürzesten Weg). Das bedeutet, dass bei guter Information (15% = 600 Personen) für diese zweite Phase eine Zeit zwischen 45 Minuten und einer Stunde, im anderen Fall (schlechte Information, 30% = 1200 Personen) zwischen einer und zwei Stunden zu beaufschlagen ist.

	Zeit	Information	Reaktionszeit	Dauer min	Dauer max
Fall 1a	Tag	Gut	3 Stunden	3:45	4:00
Fall 1b	Tag	Schlecht	3 Stunden	4:00	5:00
Fall 2a	Nacht	Gut	2 Stunden	2:45	4:30
Fall 2b	Nacht	Schlecht	2 Stunden	3:00	5:30

Tab. 11: Gesamtdauern (einschließlich Sammelstelle und Weiterfahrt). Quelle: Eigene Darstellung

Die minimale und maximale Dauer unterscheidet sich für den Fall 1 nur geringfügig, da die Reaktionszeit von drei Stunden die erste Phase (vor der Sammelstelle) dominiert und bei guter Information für die zweite Phase zwischen 45 Minuten und einer Stunde hinzukommt. Bei schlechter Information kommen ein bis zwei Stunden hinzu (Fall 1b). Im Fall 2a hingegen ist die Spannbreite größer, da die erste Phase zwei bis dreieinhalb Stunden dauert und bei guter Information eine Stunde für die Phase zwei hinzukommt. Im Fall 2b kommen zu den zwei bis dreieinhalb Stunden für die Phase eins noch einmal ein bis zwei Stunden für die Phase 2 hinzu. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Phase 2 geordnet abläuft, d.h. die Personen befinden sich in der Obhut von Hilfs- und Rettungskräften bzw. können von diesen informiert und angeleitet werden.

Die Dauer für Phase 1 vor der Sammelstelle ist etwas geringer als die maximale Reaktionszeit (als Parameter der vorgegebenen Verteilung), da aufgrund des Mittelwerts von einer Stunde und der Standardabweichung von 30 Minuten keine Personen nach 02:45 starten. Bei der längeren Reaktionszeit (Fall 1) ist die Streuung in den Ergebnissen geringer⁸. Der Unterschied in der Dauer für Phase 1 rührt also von dem Unterschied zwischen Iteration 0 („kürzester Weg“) und Iteration 20 („nahe Nutzeroptimum“) her. Dieser ist bei hoher Verkehrsbelastung (kürzere Reaktionsspanne) größer. Sollte es zu Staus auf einigen Straßen kommen, die beispielsweise durch notwendige Straßensperrungen oder Unfall ausgelöst würden, so würde sich die Gesamtdauer nicht unterscheiden, viele Agenten würden aber aufgrund der auftretenden Staus später ankommen. Die durchschnittliche Evakuierungsdauer würde sich so verlängern, die Gesamtdauer der Evakuierung (der Zeitpunkt an dem alle Agenten das Gebiet verlassen haben) wird dadurch aber nicht verlängert.

Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind plausibel. Den entscheidenden Einfluss auf die Gesamtdauer hat die Reaktionszeitverteilung, insbesondere für die Phase 1 (vor der Sammelstelle) bzw. für die Fälle mit guter Information, bei der ein geringerer Anteil der Agenten zur Sammelstelle fährt. Der verkehrliche Ablauf wird im MATSim⁹ Modell iterativ betrachtet. Ein Teil der synthetischen Population lernt mit jeder Iteration dazu und verfolgt dementsprechend eine bessere Strategie, die zu einer geringeren individuellen Ge-

⁸ Bei einer sehr langen Spanne für die Reaktionszeit (z.B. 0 bis 12h) hätten die Kapazitäten der Straßen keinen Einfluss mehr auf die Gesamtdauer und die Strategien „kürzester Weg“ oder „Nutzeroptimum“ würden sich nicht mehr unterscheiden.

⁹ Mehr Informationen zu MATSim finden sich auf www.matsim.org.

samtdauer (für die Fahrtzeit) führt. Prinzipiell handelt es sich um eine Nutzenfunktion, die individuell optimiert wird. In unserem Fall ist diese Funktion die Gesamtdauer. Das Ergebnis der Iteration ist (bei ausreichend hoher Zahl von Iterationen) ein Nutzeroptimum, bei der eine unilaterale Verbesserung durch eine Änderung des Weges nicht möglich ist (Nash-Gleichgewicht). Es wird von der Vorbereitung, dem Informations- und Trainingsstand der Bevölkerung abhängen, inwieweit dieses Nutzeroptimum in der Realität erreicht werden kann. Das gleiche gilt für die Reaktionszeitverteilung, die sich hauptsächlich aus der Vorbereitung und Warnung der Bevölkerung ergibt. Da die angenommenen Reaktionszeiten schon relativ optimistisch sind, ist Voraussetzung dafür, dass sie erreicht werden können, eine entsprechende Vorbereitung. Allerdings ist die Frage, welcher Anteil der Bevölkerung überhaupt evakuiert werden muss, hier nur ganz oberflächlich eingeflossen. Es ist zum Beispiel denkbar, dass je nach Stärke des Hochwassers eine Evakuierung in die oberen Stockwerke für fast alle Einwohner ausreichend wäre. Hier sind allerdings wesentlich umfassendere Überprüfungen, wie beispielsweise die Überprüfung der Statik der einzelnen Gebäude, notwendig. Eine solche Option muss folglich für jedes einzelne Gebäude separat geprüft werden

1.5 Fazit und Verwertungszusammenhang

Die Anwendung unterschiedlicher Methoden ermöglichte eine umfassende Generierung von Daten und Erkenntnissen im Hinblick auf mögliche Verhaltenskomponenten während einer Evakuierung. Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sowie die qualitativen Ergebnisse und Annahmen, konnten weitgehend durch die quantitative Telefonumfrage und die agentenbasierte Simulation bestätigt werden. Aus diesem Grund können die Ergebnisse insgesamt als (für die Bevölkerung von Altensteig) weitgehend verallgemeinerbar angesehen werden.

Ob die Ergebnisse auch außerhalb von Altensteig Geltung beanspruchen können, ist nur mit Einschränkung zu beantworten. Altensteig weist beispielsweise topografische Besonderheiten auf, die andere Orte in Dammnähe nicht haben. Für die Evakuierung eines Ortes oder einzelner Teile, spielen viele ortsabhängige Faktoren eine Rolle, wie die Topographie, das Straßennetz, die Bevölkerungsdichte etc. Sie alle können sich auf das Verhalten der Bevölkerung auswirken. Deshalb sollten die Ergebnisse die für Altensteig generiert wurden, nicht ohne weitere Überprüfung auf andere Gemeinden übertragen werden. Für das Fallbeispiel Altensteig können im Hinblick auf die zentralen Leitfragen folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

Wie soll gewarnt werden?

Es hat sich gezeigt, dass eine Warnung dann als besonders vertrauenswürdig wahrgenommen wird, wenn sie von offizieller Seite ausgesprochen wird. Als besonders vertrauenswürdig wird hier eine persönliche Ansprache durch die Polizei und die Feuerwehr bzw. den Katastrophenschutz wahrgenommen. Bei nicht uniformierten Informierenden, wie beispielsweise Vertretern einer Behörde, ist es wichtig, dass diese den Bürgern persönlich bekannt sind oder, mit der Information über die Gefährdungslage, auch eine Beschreibung des Amtes der warnenden Person erfolgt. Insgesamt werden von den Bürgern Warnungsmedien präferiert, die neben der eigentlichen Warnung auch Informationen transportieren (Radio, Internet etc.). Sie schenken mehrdeutigen Warnmechanismen weniger Aufmerksamkeit, auch wenn beispielsweise Sirenen als besonders effektiv, da gut hörbar, eingeschätzt werden. Bei reinen Warnsignalen ist eine Vorabinformation wichtig, damit die Bürger wissen, welches Warnsignal was bedeutet und wie die Gefährdungslage einzuschätzen ist. Die mit der Warnung verbundene Information sollte prioritär die Fragen klären, was passiert ist und was zu tun ist.

Welche ersten Reaktionen folgen auf die Warnung?

Als erste Reaktion nach einer Warnung, ist keine überstürzte Flucht oder unkontrollierte Massenpanik zu erwarten. Wahrscheinlich erfolgen zunächst einmal eine weitere Informationssuche, die Kontaktaufnahme zu Angehörigen oder Nachbarn und die Haus- bzw. Gegenstandssicherung. Als eine der wichtigsten Erkenntnisse ist die Tatsache auszumachen, dass die Befragten es insgesamt als vergleichsweise „unwahrscheinlich“ ansehen, dass sie die offiziellen Warnungen und entsprechenden Anweisungen (Treffen am Sammelpunkt, außerhalb Altensteigs bleiben) ohne weiteres Zögern oder Hinterfragen befolgen. Gerade ältere Menschen haben das Bedürfnis, auch bei einer Evakuierungsaufforderung zu Hause zu bleiben. Auch hier ist eine Information über die Dringlichkeit der Befolgung der Warnung, bereits im Vorfeld eines Schadensereignisses zu vermitteln.

Wie wird die Bedrohung wahrgenommen?

Gerade die persönliche Gefährdungslage wird weitgehend unterschätzt. Das gilt vor allem für die körperliche Unversehrtheit. Denn die Gefahr für Leib und Leben wird von den Bürgern in der Regel als sehr unwahrscheinlich angesehen. Auch wird eine persönliche Bedrohungssituation durch Hochwasser als wesentlich unwahrscheinlicher eingestuft, als für die übrige Bevölkerung von Altensteig. Sofern die Bürgerinnen und Bürger keine Vorab-Information zur persönlichen Gefährdungslage erhalten, kann man davon ausgehen, dass die Bedrohung weitgehend unterschätzt wird.

Wie würde die Evakuierung ablaufen?

Das bevorzugte Evakuierungsmittel ist das Auto, da dieses die Möglichkeit bietet, vertraute und wichtige Gegenstände aus dem Haus mitzunehmen. In Altensteig hat zudem der größte Teil der Bevölkerung ein Automobil zur Verfügung. Den größten Einfluss auf die Gesamtdauer der Evakuierung hat die Reaktionszeit auf die Warnung. Bei der eigentlichen Evakuierungszeit, ist von einer geringen individuellen Variabilität bei der Zeitdauer für die Fahrtzeit auszugehen. Entscheidende Größen für eine schnelle Evakuierung sind die Vorbereitung auf ein mögliches Schadensereignis und der Informations- und Trainingsstand der Bevölkerung.

Generelle Annahmen

Aus der Untersuchung in *Arbeitspaket 4* lassen sich drei wesentliche Annahmen ableiten, die in allen Schritten des Methodendesigns bestätigt wurden:

- Menschen verhalten sich in Katastrophensituationen, die durch Hochwasser ausgelöst werden, selten panisch. Diese Annahme wurde bereits durch die Literaturstudie deutlich und wurde auch durch die Ergebnisse der eingesetzten Methoden bestätigt. Auch die Annahme, dass Menschen in eine Art Angststarre verfallen, kann als widerlegt angesehen werden. In den meisten Situationen verhalten sich die Menschen normal.
- Persönlichkeitsvariablen wie Selbstwertgefühl, Eigenkontrolle und Fatalismus spielen bei der Reaktion auf eine Warnung eine erhebliche Rolle. Dies führt auch zu einer verbreiteten Reaktion auf eine Warnung. Betroffene tendieren dazu, sich von der realen Bedrohung zu entfernen und die Gefahr auszublenken. Hier kann eine Verzögerung der Reaktion auf die Warnung erfolgen, die zu einer Verzögerung der Evakuierung und folglich zu einer höheren Gefährdung der betroffenen Bevölkerung führen kann.
- Informationen vor einer potentiellen Katastrophe sind entscheidend. Denn bei schlechter Informationslage ist die Informationssuche ein wichtiges Motiv, so dass sich auch hier die Reaktion auf die Warnung verzögern kann. Liegen den Betroffenen vor dem Ereignis bereits wichtige Informationen zur potentiellen Gefährdung und zu den wichtigen Schritten, die im Falle eines Schadensereignisses gemacht werden müssten, vor, so kann von einer schnelleren Reaktion auf die tatsächliche Warnung ausgegangen werden.

Aus den Erkenntnissen die im *AP4 – Verhalten der Bevölkerung* gewonnen werden konnten, lassen sich im Wesentlichen drei Schlüsse für ein erfolgreiches Katastrophenmanagement ableiten:

1. Eine eindeutige Identifizierung des Warnenden bzw. der warnenden Institution ist notwendig, um Glaubwürdigkeit und Vertrauen in den Inhalt der Warnung herzustellen. Eine Warnung wird dann als besonders vertrauenswürdig wahrgenommen, wenn sie von offizieller Seite ausgesprochen wird. Als besonders vertrauenswürdig wird hier eine persönliche Ansprache durch die Polizei und die Feuerwehr bzw. den Katastrophenschutz wahrgenommen, da diese Akteure an ihrer Uniform direkt erkennbar sind. Sollten Vertreter von Ämtern die Warnung aussprechen, ist es empfehlenswert, dass diese ihre Funktion erläutern.
2. Die gewünschten Verhaltensweisen können nur durch spezifische Informationen im Vorfeld einer potentiellen Katastrophe beeinflusst werden. Betroffene suchen häufig nach einer zweiten Quelle, wenn eine Warnung ausgesprochen wird und sie nicht im Vorfeld über eine Gefährdung informiert wurden. Dieser Bestätigungswunsch bezüglich der Warnung kann eine angemessene Reaktion auf die Warnung verzögern. Haben die Gefährdeten aber bereits im Vorfeld Informationen zur potentiellen Gefährdung erhalten, so wird diese Information durch die Warnung selbst bestätigt. Ebenso ist es so auch möglich, dass die gewünschten Verhaltensweisen eher befolgt werden, da diese nicht zeitgleich mit der Warnung vermittelt werden müssen, sondern den Betroffenen schon bekannt sind.
3. Die Bevölkerung muss über ihre individuelle Gefährdungslage aufgeklärt sein. Persönlichkeitsvariablen wie Selbstwertgefühl, Eigenkontrolle und Fatalismus spielen nicht nur bei der Reaktion auf eine Warnung eine erhebliche Rolle, sondern auch bei der Einschätzung der persönlichen Gefährdungslage, die als Folge eher unterschätzt wird. Um die verbreitete Reaktion einer Ausblendung der persönlichen Gefährdung zu vermeiden, ist es ratsam potentiell Gefährdete über ihre individuelle Gefährdung aufzuklären und Informationen zu Reaktion auf verschiedene Gefährdungsstufen bereitzustellen.

Die Erkenntnisse aus Arbeitspaket 4 wurden an den Projektpartner Aqua Soli (*AP7: Erstellung von Katastrophenschutzplänen*) übermittelt, wo sie in die konkrete Katastrophenschutzplanung einfließen. Weiterhin können die allgemeinen Erkenntnisse auf verschiedene Evakuierungssituationen übertragen werden, dies gilt vor allem für die Relevanz von Informationen der gefährdeten Gruppen vor einem potentiellen Schadensereignis. Wie diese im einzelnen Fall ausgestaltet sein müssen, sollte fall-spezifisch überprüft werden.

2. Literaturverzeichnis

- Averill, J. D.; Mileti, D.; Peacock, R.; Kuligowski, E.; Groner, N.; Proulx, G.; Reneke, P.; Nelson, H. (2005): *Federal Building And Fire Safety Inspection Of The World Trade Center Disaster, Project #7: Occupant Behavior, Egress And Emergency Communications*. Washington: National Institute of Standards and Technology.
- Aguirre, B.E. (2005): *Commentary on Understanding mass panic and other collective responses to threat and disaster: Emergency evacuations, panic, and social psychology*. *Psychiatry*, 68, 121-129.
- Badger J. E. (1996): *Human Factors Affecting Perception*. Law and Order Magazine.
- Baker, E. J. (1987): *Evacuation in response to hurricanes Elena and Kate*. Unpublished draft report. Tallahassee, FL: Florida State University.
- Baker E.J. (1991): *Hurricane evacuation behavior*. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 9(2), 287-310.
- Barrett B.; Ran B.; Pillai R. (2000): *Developing a dynamic traffic management modeling framework for hurricane evacuation*. *Transportation Research Record*, 1733, 115-121.
- Beenstock M.; Gafni D. (2000): *Globalization in Road Safety: Explaining the Downward Trend in Road Accident Rates in a Single Country*. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 32, S.71-84.
- Benighaus, C., Benighaus, L. und Renn, O. (2005a): *Ist alle Mühe umsonst? Das Elend der Frühwarnung am Beispiel der Bebauung flussnaher Gebiete*. In: *Naturgefahren und Kommunikation*. Stiftung Umwelt und Schadenvorsorge. Stuttgart, 14-15.
- Benighaus, C., Benighaus, L. und Renn, O. (2005b): *Frühwarnung - wo ist kommunikatives Handeln erforderlich?* In: *Naturgefahren und Kommunikation*. Stiftung Umwelt und Schadenvorsorge. Stuttgart.
- Blake, S.J.; Gaea, E.R.; Westeng, H.; Dixon, A. J. P. (2004): *An Analysis of Human Behavior During the World Trade Center Disaster of 11 September 2001 Based on Published Survivor Accounts*. Proceedings of Third International Symposium on Human Behavior in Fire, Belfast, September.
- Brown, R. (1965): *Social Psychology*. New York: The Free Press.
- Carter, M. (1980): *Natural Hazards Warning Systems*. Unpublished paper, Department of Sociology of Minnesota, Minneapolis.

- Cutter, S.; Barnes, K. (1982): *Evacuation Behavior and Three Mile Island*. Disasters 6 (2): 116-124.
- Dash, N.; Morrow, B.H. (2001): *Return Delays and Evacuation Order Compliance: The Case of Hurricane Georges and the Florida Keys*. Environmental Hazards, 2, 119-128.
- Delhomme P. (1991): *Comparing One's Driving with Others: Assessment of Abilities and Frequency of Offences. Evidence for a superior conformity of self-bias?* Accident Analysis and Prevention, Vol. 23, No.6, S.493-508.
- Dillman, D.; Schwalbe, M.; Short, J. (1983): *Communication behavior and social impacts following the May, 18, 1980, eruption of Mt. St. Helens*. In S.A.C.Keller (Ed.) Mt. St. Helens One Year Later (S.191-198). Cheney, WA: Eastern University Press.
- Dombrowsky, W. (2001): *Final report: Informationsbedarf bei Hochwasserlagen*. Katastrophenforschungsstelle Christian-Albrechts-Universität Kiel
- Dombrowsky, W. (2005): *Warnen und Reagieren – Ist der Mensch von technischen Systemen überfordert?* Naturgefahren und Kommunikation. Stiftung Umwelt und Schadensvorsorge. Stuttgart, 7-8.
- Donald, I.; Canter, D. (1990): *Behavioural aspects of the King's Cross Disaster*. In D. Canter (Ed.), Fires and human behaviour (S.15-30). London
- Dow, K.; Cutter, S. (2000): *Public orders and personal opinions: Household strategies for hurricane risk assessment*. Environmental Hazards, 2, 143-155.
- Drabek T.E. (1986): *Human System Responses to Disaster*. New York: Springer.
- Drabek, T. (1994): *Disaster Evacuation and the Tourist Industry*. Boulder, CO. Institute of Behavioral Science, University of Colorado.
- Drabek T.E. (1996): *Disaster Evacuation Behavior: Tourists and other Transients*. Monograph 58. Boulder CO. University of Colorado Institute of Behavioral Science Program on Environment and Behavior.
- Driscoll, P.; Salwen, M. B. (1996). *Riding out the Storm: Public Evaluations of news coverage of Hurricane Andrew*. Int. J. Ass Emerg. Disasters, 14, 293-303.
- Drury, J.;Cocking, C. (2007): *The mass psychology of disasters and emergency evacuations: A research report and implications for practice*. Department of Psychology, University of Sussex Falmer, Brighton, BN1 9QH, UK March 2007, p. 5.

- Evans, G.W.; English, K. (2002): *The Environment of Poverty: Multiple Stressor Exposure, Psychophysiological Stress, and Socioemotional Adjustment*. Child Development, 73, 1238-1248.
- Gailer, H. (2007/2008): *Management von bzw. in Katastrophen*. Qualitative Systemwissenschaften. Mag. Dr. Günther Ossimitz.
- Gladwin H.;Peacock W.G. (1997): Warning and Evacuation: A Night for Hard Houses. S.52-74 in W.G. Peacock, B.H. Morrow and H. Gladwin (eds.), *Hurricane Andrew: Gender, Ethnicity and the Sociology of Disasters*. London: Routledge.
- Goldblatt, R. (2004): *Evacuation Planning: A Key Part of Emergency Planning*. P.E. Principal KLD Associates, Inc. 47 Mall Drive Suite 8 Commack, NY 11725, For Presentation 83rd Annual Meeting Transportation Research Board January 11-15, 2004; p.10.
- Green, M.K., Carlson, L.M.; Myers, S. (2002): *Washington in the Pacific Northwest*. Gibbs Smith, Layton.
- Greene, M.; Senders, J. (1997): *Human Error in Road Accidents*. ERGO/GERO Human Factors. Viewed 4 February 2010, <http://www.visualexpert.com/Resources/roadaccidents.html>
- Hanson, S.; Vitek, J. D.; Hanson, P.O. (1979): *Natural Disaster - Long-Range Impact on Human Response to future Disaster Threats*. Environment and Behavior, Vol. 11 No. 2.
- Heath, S. E.; Kass, P. H.; Beck, A. M.;Glickman, L. T. (2001): *Risk Factors for Pet Evacuation Failure After a Slow-Onset Disaster*. Journal of the American Veterinary Association, 218, 1905-1910.
- Hobeika A.G.; Kim, C.; Beckwith R. (1994): *A Decision Support System for Developing Evacuation Plans Around Nuclear Power Stations*. Interfaces, 24(5), 22-35.
- Janis, I.L. (1951): *Air War and Emotional Stress: Psychological Studies of Bombing and Civilian Defense*. New York: McGraw-Hill.
- Johnson, N.R. (1988): *Fire in a Crowded Theatre: A Descriptive Investigation of the Emergence of Panic*. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 6, 7-26.
- Johnson, N.R.; Feinberg, W.E.; Johnson, D.M. (1994): *Microstructure and Panic: The Impact of Social Bonds on Individual Action in Collective Flight from the Beverly Hills Supper Club Fire*. In R.R. Dynes & K.J. Tierney (Eds.), *Disasters, collective behaviour and social organization* (S.168-189). Newark: University of Delaware Press.

- Kang J.E.; Lindell M.K.; Prater C.S. (2007): *Hurricane evacuation expectations and actual behavior in Hurricane Lili*. Journal of Applied Social Psychology, 37, 881-897.
- Karlaftis M.; Kotzampassakis I.; Kanellaidis G. (2003): *An Empirical Investigation of European Drivers' Self-Assessment*. Journal of Safety Research, 34 (2), 207-213.
- Keating, J.P. (1982). *The Myth of Panic*. Fire Journal, 147, 56-61.
- Klepeis, N. E.; Nelson, W. C.; Ott, W.R.; Robinson, J. P.; Tsang, A.M.; Switzer, P.; Behar, J. V.; Hern, S. C.; Englemann, W. H. (2001): *The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants*. J. Expo Anal Environ. Epidemiol., 11(3), 231-252.
- Kuhn, R. (2012): *Fokusgruppen innerhalb eines between-method-Designs zur Bestimmung der Risikowahrnehmung von potentiellen Terroranschlägen*. In: Schulz, M., Mack, B. Renn O. (Hrsg.) Fokusgruppen in der empirischen Sozialwissenschaft. Heidelberg: Springer VS, S.134-147.
- Lindell M.K.; Prater C.S.; Sanderson W.G. Jr.; Lee H.M.; Zhang Y.; Mohite A.; Hwang S.N. (2001): *Texas Gulf Coast Residents' Expectations and Intentions Regarding Hurricane Evacuation*. College Station TX: Texas A & M University Hazard Reduction & Recovery Center.
- Lindell M.K.; Prater C.S.; Wu J.Y. (2002): *Hurricane Evacuation Time Estimates for the Texas Gulf Coast*. College Station TX: Texas A & M University Hazard Reduction & Recovery Center.
- Lindell M.K.; Perry R.W. (1992): *Behavioral Foundations of Community Emergency Planning*. Washington DC: Hemisphere Press.
- Lindell, M.K.; Perry, R.W. (2004): *Communicating Environmental Risk in Multiethnic Communities*. Thousand Oaks CA: Sage.
- Lindell M.K.; Lu J.C.; Prater C.S. (2005): "Household Evacuation Decision Making in Response to Hurricane Lili." Natural Hazards Review, 6(4), 171-179.
- Lindell M.K.; Prater C.S.; Peacock W. G. (2005b): *Organizational Communication and Decision Making in Hurricane Emergencies*. Prepared for the Hurricane Forecast Socio-economic Workshop, February 16-18, Pomona, California.
- Lindell M.K.; Prater C.S. (2006a): *Evacuation from Hurricane Katrina: Jefferson and St. Charles Parishes*. National Hurricane Conference.

- Lindell M.K., Prater C.S. and Perry R.W. (2006b): *Fundamentals of Emergency Management*. Emmitsburg MD: Federal Emergency Management Agency Emergency Management Institute.
- Lindell M.K.; Prater C.S. (2007): *Critical Behavioral Assumptions in Evacuation Analysis for Private Vehicles: Examples from Hurricane Research and Planning*. Journal of Urban Planning and Development, 133, 18-29.
- Lindell, M.K.; Prater, C.S.; Perry, R.W. (2007): *Introduction to emergency management*. Hoboken, NJ: Wiley.
- McDougall, W. (1920): *The Group Mind*. New York: G.P. Putnam's Sons.
- Menker, R. E.; Floren, T. M. (1986): *White Phosphorus Ignites in the Miamisburg Derailment, Fire Command, Oct.*, 30-34, 41.
- Mileti, D.; Sorensen, J. (1990): *Communication Of Emergency Public Warnings*. ORNL-6609. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- Mileti, D., Sorensen, J.; O'Brien, P. (1992): *Towards an Explanation of Mass Care Shelter use in Evacuations*. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 10, 25-42.
- Myers, B. K.; Gregory, P. E.; Dutson, C. (2002): *Warning System Design when Early Warning is not Early Enough – Silver Creek Dam and Hosler Dam Case Studies*. Page 1.
- Nelson, C. E.; Crumley, C.; Fritzsche, B.; Adcock, B. (1989): *Lower Southwest Florida Hurricane Study*. Tampa, FL: University of South Florida.
- Perry, R. W.; Lindell, M. K. and Greene, M. (1981): *Evacuation Planning in Emergency Management*. Lexington Mass: Lexington Books.
- Perry, R. W.; Lindell, M. K., (1991): *Understanding Evacuation Research*. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 9(2), 133-136.
- Quarantelli, E.L. (1960): *Images of Withdrawal Behavior in Disasters: Some Basic Misconceptions*. Social Problems, 8, 68-79.
- Quarantelli, E. L. (1985): *Social Support Systems: Some Behavioral Patterns in the Context of Mass Evacuation Activities*. Disasters and Mental Health: Selected Contemporary Perspectives, ed. by Barbara J. Sowder (Rockville, MD: National Institute of Mental Health, 1985): 122-136. ARTICLE #178.
- Quarantelli, E.L. (1986): *Research Findings on Community and Organizational Preparations for and Responses to Acute Chemical Emergencies*. Public Management 68, 11-13.

- Quarantelli, E. L. (2001): *Panic, Sociology*. International Encyclopedia of the Social and Behavioural Sciences (p. 11020-11023). New York: Pergamon Press.
- Riad, J. K.; Norris, F. H.; Ruback, R. B. (1999): *Predicting Evacuation in Two Major Disasters: Risk Perception, Social Influence, and Access to Resources*. Journal of Applied Social Psychology 29(5): 918-934.
- Ross, E.A. (1908): *Social Psychology: An Outline and Source Book*. New York: Macmillan.
- Sabey B. E.; Taylor H. (1980): *The known risks we run: The Highway*. Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Supplementary Report 567, Crowthorn (UK).
- Schnell, Rainer; Hill, Paul B.; Esser, Elke (1999): *Methoden der empirischen Sozialforschung*. München: Oldenbourg Verlag.
- Siegrist, M.; Gutscher, H. (2008): *Natural Hazards and Motivation for Mitigation Behavior: People Cannot Predict the Affect Evoked by a Severe Flood*. Risk Analysis 28 (3), 771-778.
- Sime, J. D. (1983): *Affiliative Behaviour During Escape to Building Exits*. Journal of Environmental Psychology. (3) 21-41.
- Sims, J. H.; Baumann D. J. (1972): *The Tornado Threat; Coping Styles of the North and South*. Science 176: 1386-1392.
- Sorensen, J. H.; Vogt, B.; Mileti D. S. (1987): *Evacuation: An Assessment of Planning and Research*. Oak Ridge National Laboratory ORNL-6376: 6-7.
- Sorensen, J.H.; Vogt, B. (1992): *Evacuation Research: A Reassessment*. Oak Ridge National Laboratory, S.84.
- Sorensen J.H. (2000): *Hazard Warning Systems: Review of 20 Years of Progress*. Natural Hazards Review, 1(2), 119-125.
- Sorensen J.H.; Vogt B., (2006a): *Interactive Emergency Evacuation Guidebook 2006*. Prepared for the Protective Action IPT – Chemical Stockpile Emergency Preparedness Program.
- Sorensen, J.H.; Vogt B. (2006b): *Community Processes: Warning and Evacuation*. Handbook of Disaster Research, H. Rodríguez, E. L. Quarantelli, and R. R. Dynes, eds., Springer, New York, 183–199.
- Schulz, M. (2012): *Quick and Easy!? Fokusgruppen in der angewandten Sozialwissenschaft*. In: Schulz, M., Mack, B. Renn O. (Hrsg.) Fokusgruppen in der empirischen Sozialwissenschaft. Heidelberg: Springer VS, 9-23.

- Turner, J.C. (1991): *Social Influence*. Milton Keynes. Open University.
- Urbanik T. (2000): *Evacuation Time Estimates for Nuclear Power Plants*. Journal of Hazardous Materials, 75(2-3), 165-180.
- Wachinger, G., Renn, O., Begg, Ch. and Kuhlicke Christian (2012): *The Risk Perception Paradox – Implications for Governance and Communication of Natural Hazards*. Society for Risk Analysis. Online Version veröffentlicht am 12/2012. Auffindbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1539-6924.2012.01942.x/abstract?deniedAccessCustomisedMessage=&userIsAuthenticated=false>
- Witzig, W. F.; Shillenn, J. K. (1987): *Evaluation Of Protective Action Risks*. Washington DC: Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Wolshon, B. (2007): *Empirical Characterization of Mass Evacuation Traffic Flow*. Department of Civil and Environmental Engineering Louisiana State University, Baton Rouge, LA.
- Yuan, F., Han, L. D. (2007): *Does Noncompliance with Route and Destination Assignment Compromise Evacuation Efficiency*. Paper presented at the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., S. 25.

Teilabschlussbericht

Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen

AP 5: Fahrzeugstabilität in Strömungen



gefördert durch das BMBF
Förderkennzeichen
13N10594

April 2013

Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Dipl.-Ing. Matthias Kramer
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation/ Fragestellung/ Vorgehensweise	6
2	Parameterermittlung über analytische Verfahren	8
3	Literaturstudie	10
3.1	Stabilitätskurven/ kritische Fließgeschwindigkeiten	11
3.2	Wattiefe	17
3.3	Interaktion Reifen-Fahrbahn	19
3.4	Widerstandsbeiwert	21
3.5	Numerische Strömungssimulation	23
3.6	Zusammenfassung	23
4	Physikalische Modellversuche	25
4.1	Übertragungsfunktionen	26
4.2	Auswahl der Versuchskörper	27
4.3	Messtechnische Ausrüstung	29
4.4	Beschreibung der Versuchsstände	30
4.4.1	Stabilitätsmessungen	31
4.4.2	Druckmessungen (Einsatzfahrzeug)	38
4.4.3	Strömungskraftmessungen (Einsatzfahrzeug)	41
4.4.3.1	Bestimmung von Widerstandsbeiwerten	44
4.4.4	Auftriebskraftmessungen	45
4.4.4.1	Bestimmung des dynamischen Auftriebs im Modellmaßstab (Einsatzfahrzeug)	45
4.4.4.2	Bestimmung des statischen Auftriebs im Naturmaßstab (Personenkraftwagen)	46
4.5	Zusammenführung der Versuchsergebnisse	49
4.5.1	Berechnung der Stabilitätskurven unter veränderten Randbedingungen	50
5	Umsetzung der Versuchsergebnisse	53
5.1	Energiehöhe als Parameter	53
5.2	Festlegung der Grenzwerte, Einführung von Gefahrenklassen	54
5.3	Schnittstellengenerierung	57
6	Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen	59
7	Zusammenfassung	62
	Literatur	64
8	Anhang	66

Tabellenverzeichnis

4.1	Daten des untersuchten PKW-Modells ($L_r = 9,77$)	28
4.2	Daten des untersuchten Einsatzfahrzeug-Modells ($L_r = 13,08$)	29
4.3	Übersicht der durchgeführten Modellversuche in EvaSim	30
4.4	Experimentell bestimmte Reibungskoeffizienten verschiedener Materialkombinationen	32
8.1	Wattiefenzusammenstellung Einsatzfahrzeug	67
8.2	Wattiefenzusammenstellung Personenkraftwagen	68
8.3	Stabilitätsmessungen Personenkraftwagen Teil 1	69
8.4	Stabilitätsmessungen Personenkraftwagen Teil 2	70
8.5	Stabilitätsmessungen Einsatzfahrzeug	71
8.6	Druck- ($F_{W,P}$) und Kraftmessungen (F_W) Einsatzfahrzeug	72
8.7	Auftriebskraftmessungen Einsatzfahrzeug Teil 1	73
8.8	Auftriebskraftmessungen Einsatzfahrzeug Teil 2	74

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kraftwirkung auf ein teilumströmtes Fahrzeug nach Bonham u. a. (1967)	8
3.1	Modell des untersuchten Fahrdamms (Bonham u. a. 1967), Anströmung quer zur Fahrzeuglängsrichtung	12
3.2	Kritische Fließgeschwindigkeiten für die Fahrzeugstabilität nach Bonham u. a. (1967), Anströmung quer zur Fahrzeuglängsrichtung	12
3.3	Kritische Fließgeschwindigkeiten für die Fahrzeugstabilität nach Gordon u. a. (1973), Anströmung in Fahrzeuglängsrichtung	13
3.4	Kritische Fließgeschwindigkeiten für die Stabilität von verschiedenen Fahrzeugen nach Keller u. a. (1992)	15
3.5	Stabilitätskriterien für Fahrzeuge und Fußgänger nach Walsh u. a. (1998)	15
3.6	Stabilitätskurven als Funktion der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit (Mens u. a. 2008)	16
3.7	Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe als maßgebliche Parameter für die Fahrzeugstabilität (Xia u. a. 2012)	17
3.8	Voll- und teileingetauchtes Fahrzeugmodell in der Versuchsrinne (Xia u. a. 2012)	17
3.9	Wattiefenzusammenstellung von Personenkraftwagen	18
3.10	Wattiefenzusammenstellung von Einsatzfahrzeugen	19
3.11	Reibung: a) viskose Reibung; b) turbulente Reibung; c) Reibung zwischen zwei festen Körpern (Herrmann 2003)	20
3.12	Widerstandsbeiwert einer glatten Kugel und eines glatten umströmten Zylinders in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (Surek u. a. 2007)	22
4.1	„Gelbe“ Kipprinne in der Versuchsanstalt für Wasserbau	25
4.2	Stahlbecken in der Versuchsanstalt für Wasserbau	25
4.3	Modell des untersuchten Personenkraftwagens	28
4.4	Modell des untersuchten Einsatzfahrzeuges	28
4.5	Experimentelle Bestimmung des Reibungsbeiwertes μ_R	32
4.6	Dokumentation der Versuchsdurchführung; stabile Position	33
4.7	Dokumentation der Versuchsdurchführung; instabile Position	33
4.8	Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen; $\mu_R = 0,7$; zul. Gewicht	34
4.9	Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen; $\mu_R = 0,3$; Leergewicht	35
4.10	Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen im Vergleich	36
4.11	Stabilitätskurven für das Einsatzfahrzeug; $\mu_R = 0,3$; Leergewicht	37
4.12	Versuchskörper zur Erfassung der Druckverteilung	39
4.13	Ergebnisse der Druckmessungen in Abhängigkeit der Froude-Zahl	40
4.14	Aufhängung des Versuchskörpers in der Strömungsrinne.	41
4.15	Beispielhafter Versuchsablauf einer Strömungskraftmessung	42
4.16	Ergebnisse der Kraftmessungen für das Einsatzfahrzeug	43

4.17	Widerstandsbeiwert des Versuchskörpers bei einem Anströmwinkel von 90°	44
4.18	Aufhängung des Fahrzeuges im Stahlbecken	46
4.19	Steigender Wasserspiegel während einer Auftriebskraftmessung	46
4.20	Ultraschallsensor im Innenbereich des Fahrzeuges	47
4.21	Ultraschallsensor im Beckenbereich	47
4.22	Beispielhafte Auftriebskraftmessung im Naturmaßstab	48
4.23	Kritische Wassertiefen der Auftriebskraftmessungen	49
4.24	Iterative Bestimmung der kritischen Fließgeschwindigkeit für das Einsatzfahrzeug (Anströmwinkel = 0°) bei veränderten Randbedingungen	52
5.1	Einführung der Energiehöhe als maßgebenden Parameter	54
5.2	Ableitung der Stabilitätskriterien für den PKW	55
5.3	Ableitung der Stabilitätskriterien für das Einsatzfahrzeug	55
5.4	Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Personenkraftwagen)	56
5.5	Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Einsatzfahrzeug)	57
5.6	Verkehrsweg im hydraulischen Modell	58

1 Motivation/ Fragestellung/ Vorgehensweise

Das Ziel des Forschungsvorhabens **EvaSim** „Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen“ besteht in einer Verbesserung des Krisenmanagements im Falle von Überflutungsereignissen, die entweder als Folge von extremen Niederschlägen oder Talsperrenteilversagen auftreten. Dies wird mit Hilfe einer Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen untersucht.

Die Dauer der Evakuierung gefährdeter Bevölkerung ist im Katastrophenfall von den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln abhängig und wird, bei bereits einsetzender Überflutung, wesentlich von den hydraulischen Parametern Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit bestimmt.

Für Fußgänger, Personenkraftfahrzeuge sowie Einsatzfahrzeuge ergeben sich dabei höchst unterschiedliche Grenzwerte für die Gefährdung durch den Strömungsangriff, bei denen eine ungefährdete Fortbewegung noch möglich ist. Während für Fußgänger und Personenkraftfahrzeuge entsprechende, aus Versuchen abgeleitete, Werte vorliegen, sind derartige Daten für Einsatzfahrzeuge kaum verfügbar, jedoch notwendige Voraussetzung für die Festlegung von Evakuierungsrouten bzw. Rettungswegen.

Bei Extremereignissen können lokal signifikant erhöhte Fließgeschwindigkeiten auftreten, die beim Auftreffen auf ein Fahrzeug zu einem Aufstau und einer beschleunigten Strömung um das Fahrzeug führen. Die Aufstau- sowie die Kraftwirkung sind wesentlich von der Kontur des Fahrzeuges abhängig. Die von den Fahrzeugherstellern in aerodynamischen Untersuchungen ermittelten Widerstandsbeiwerte sind für die Berechnung der Umströmungsvorgänge nicht hilfreich, da diese für die Luftumströmung an der gesamten Karosserie (meist im Windkanal) gemessen werden.

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Fahrzeugstabilität in Strömungen“ werden Modelluntersuchungen an teileingetauchten Fahrzeugformen durchgeführt, die eine Beurteilung der Befahrbarkeit überfluteter Verkehrswege ermöglichen. Folgende Teilschritte werden innerhalb der vorliegenden Arbeiten untersucht:

Parameterermittlung und Literaturrecherche Die Parameterermittlung dient der Bestimmung von Faktoren, welche die Mobilität von Fahrzeugen bei wasserbedeckten Fahrbah-

nen beeinflussen. In einem Modellversuch werden die maßgebenden Größen und Parameter bestimmt, die für die Ermittlung der wesentlichen Aussagen zur gegebenen Aufgabenstellung erforderlich sind. Anhand der wissenschaftlichen und technischen Literatur wird der Wissensstand über die Interaktion zwischen Wasser und Fahrzeug bei Umströmung zusammengetragen und für die in dem Projekt EvaSim relevanten Fragestellungen ausgewertet. Ansatzpunkte sind dabei Kenntnisse zum Aquaplaning und die bei steigenden Wassertiefen dominierenden Faktoren für die Manövrierbarkeit von Fahrzeugen. Ein weiterer Aspekt umfasst die Darstellung der Wassertiefe bzw. die Möglichkeit, die Dynamik einer Strömung zu parametrisieren und als weiteren Faktor zu berücksichtigen, um somit Abschätzungen des dynamischen Strömungseinflusses zu ermöglichen.

Durchführung von Modell- und Naturversuchen Um Kriterien für die Beurteilung der Befahrbarkeit zu entwickeln, werden Modelluntersuchungen sowohl in einer Strömungsrinne als auch in einem Stahlbecken der Versuchsanstalt für Wasserbau durchgeführt.

Das Widerstandsverhalten verschiedener Fahrzeugtypen wird ermittelt, indem systematische Untersuchungen bei einer Vielzahl von Wassertiefen-Geschwindigkeits-Kombinationen in der Versuchsrinne vorgenommen werden. Hierfür werden geeignete Modellmaßstäbe und Modellgesetze bestimmt, die die Übertragung der physikalischen Simulation und die nachfolgende Beurteilung im natürlichen Maßstab gewährleisten. Da das reale Auftriebsverhalten für die Beurteilung der Stabilität von großer Wichtigkeit ist, wird ein Personenkraftwagen im Naturmaßstab über eine Tragkonstruktion an einem Stahlbecken montiert und das Auftriebsverhalten des PKW methodisch untersucht.

Für die beiden genannten Untersuchungsansätze werden Versuchskonzepte entwickelt sowie geeignete Versuchsanlagen in der Versuchsanstalt für Wasserbau konstruiert. Die Auswertung der Ergebnisse ermöglicht die Ableitung von standardisierten Stabilitätskriterien, die geeignet sind, in den für die Evakuierungsszenarien verwendeten Simulationsmodellen implementiert zu werden.

Umsetzung der Versuchsergebnisse Die Erkenntnisse aus den Modellversuchen finden als Grundinformation in der Verkehrssimulation Eingang und legen den Befahrbarkeitsstatus einzelner Verkehrswege in den Szenarienrechnungen für unterschiedliche Fahrzeugtypen fest. Um die Informationen in das Verkehrsmodell zu übergeben, wird eine Schnittstelle entwickelt, welche die Informationen Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe entlang eines Verkehrsweges auswertet und einen Befahrbarkeitsstatus zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Überflutungsereignisses ausgibt. Dies ermöglicht eine detaillierte Entwicklung von Katastrophenschutzplänen bzw. die Identifizierung von Schwachstellen bestehender Schutzpläne.

2 Parameterermittlung über analytische Verfahren

Die Stabilität von Fahrzeugen in einer Strömung hängt von einer Vielzahl von Kräften ab, welche auf den Fahrzeugkörper wirken. Dieser Kraftwirkung liegen verschiedene Einflussgrößen zugrunde, welche wechselseitig voneinander abhängen. In der Parameterermittlung geht es um die Bestimmung wesentlicher, die Mobilität bei nasser bzw. überströmter Fahrbahn, beeinflussender Parameter. Diese können in der Simulation zu den verschiedenen Zeitpunkten des Überflutungsereignisses aus den Berechnungen des hydraulisch-numerischen Modells ausgelesen werden. Somit wird die Grenze der Befahrbarkeit und Nutzbarkeit der Verkehrswege im Untersuchungsgebiet ermittelt.

Sobald das Wasser ein stehendes Fahrzeug umströmt, übt die Strömung verschiedene Kräfte auf den Körper aus (siehe Abb. 2.1). Dies sind insbesondere die Auftriebskraft (F_A) und der Strömungswiderstand (F_W) als die Kraft, die auf den Körper aufgrund der Bewegung des Fluids wirkt.

Die Auftriebskraft (F_A) beinhaltet einen statischen ($F_{A,s}$) sowie einen dynamischen Anteil ($F_{A,d}$). Der statische Anteil ist derjenige Anteil, den das Fluid in der Ruhelage auf den Körper ausübt, der dynamische Anteil ist von der jeweiligen Umströmung des Körpers abhängig. Für Fahrzeuge existieren hierfür keine Referenzwerte aus der Literatur oder physikalischen Versuchen.

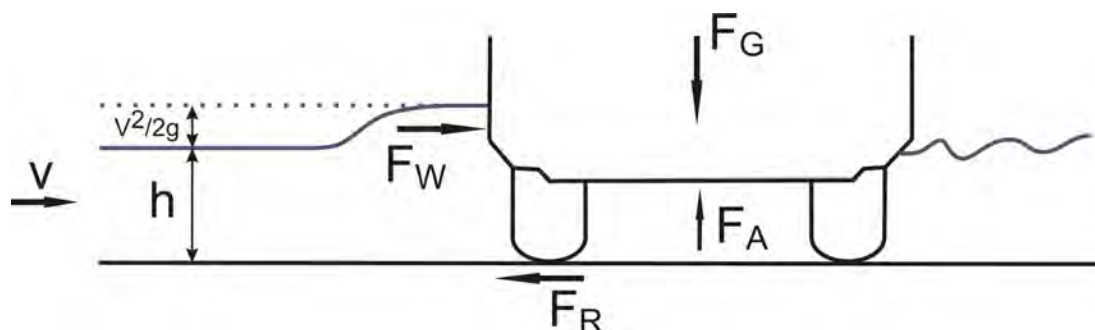


Abbildung 2.1: Kraftwirkung auf ein teilumströmtes Fahrzeug nach Bonham u. a. (1967)

Der Widerstandskraft steht die Reibungskraft (F_R) als Haltekraft entgegen, die wiederum von der Normalkraft (F_N), die sich aus der Differenz zwischen Gewichtskraft (F_G) des

Fahrzeuges und Auftriebskraft (F_A) ergibt, sowie von dem Reibungskoeffizienten μ_R abhängig ist. Setzt man ein Kräftegleichgewicht in Strömungsrichtung an, ergibt sich der Bewegungsbeginn, sobald die Größe der Widerstandskraft diejenige der Haltekraft gerade übersteigt:

$$F_W = F_R \quad (2.1)$$

Die Widerstandskraft und die Haltekraft lassen sich berechnen zu:

$$F_W = c_W \cdot A_W \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.2)$$

$$F_R = F_N \cdot \mu_R \quad (2.3)$$

$$\text{mit } F_N = F_G - F_A \quad (2.4)$$

Gleichsetzen und Umformen ergibt:

$$c_W \cdot A_W \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 = (F_G - F_A) \cdot \mu_R \quad (2.5)$$

$$v = \sqrt{\frac{(F_G - F_A) \cdot \mu_R}{c_W \cdot A_W \cdot \frac{1}{2} \rho}} \quad (2.6)$$

Mit Gleichung 2.5 kann die kritische Fließgeschwindigkeit berechnet werden, bei der die Widerstandskraft gerade der Haltekraft entspricht. Die Gewichtskraft F_G und die projizierte Anströmfläche A_W lassen sich im Regelfall leicht bestimmen. Als Unbekannte in dieser Gleichung bleiben die Auftriebskräfte F_A , der Widerstandsbeiwert c_W sowie der Reibungskoeffizient μ_R . Ebenfalls lassen sich aus der Gleichung die physikalisch maßgeblichen Parameter für die Beurteilung der Stabilität ableiten:

- Wassertiefe h (in A_W enthalten),
- Fließgeschwindigkeit v ,
- Anströmwinkel α (in c_W enthalten),
- Körperform und -gewicht (in c_W , A_W , F_A und F_G enthalten),
- Interaktion Reifen-Fahrbahn (in μ_R enthalten).

Zusätzlich spielen noch weitere Parameter für die Funktionalität eines Fahrzeugs eine Rolle, wie beispielsweise die Höhe der Luftansaugung des Motors, die Höhe der Lichtmaschine und der Zündung, usw. Diese werden im Zusammenhang mit der Wassertiefe ausführlicher dargestellt.

3 Literaturstudie

Im Rahmen der Literaturrecherche wird die wissenschaftliche und technische Literatur zusammengetragen, welche den aktuellen Wissensstand bezüglich der Fahrzeugstabilität in Strömungen wiedergibt. Hieraus ergeben sich verschiedene Themenfelder, welche die Fahrzeugstabilität beschreiben. Es sind folgende Punkte zu nennen:

- **Stabilitätskurven/ kritische Fließgeschwindigkeiten** Die Darstellung der Fahrzeugstabilität in Strömungen erfolgt in der Fachliteratur anhand sogenannter Stabilitätskurven bzw. kritischer Fließgeschwindigkeiten. In der gängigen Darstellung ist auf der Abszisse die Wassertiefe und auf der Ordinate die Fließgeschwindigkeit aufgetragen (vgl. Abb. 3.2). Die im Diagramm eingetragene kritische Fließgeschwindigkeit gibt den Zustand an, ab dem die Strömungskraft auf das Fahrzeug größer als die entgegenwirkende Haltekraft ist. Die Stabilitätskurven können entweder anhand von *physikalischen Modelluntersuchungen* oder einer *analytischen Herangehensweise* gewonnen werden.

An der Universität von New South Wales (Australien) wurden bereits Ende der 1960er Jahre experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen Fahrzeugmodellen durchgeführt. Hintergrund ist die Tatsache, dass vermehrt Unfälle an Flussquerungen, den sogenannten „Causeways“ (Fahrdamm), auftraten (siehe Abb. 3.1). Der Fahrdamm findet sich vornehmlich an Stellen, an denen der finanzielle Aufwand für eine Brückenkonstruktion für relativ wenig Querungsverkehr zu groß ist. Um einen besseren Einblick über die Unfallvorgänge zu erlangen, wurden die hydraulischen Verhältnisse sowie die Kraftwirkung auf die Fahrzeuge an diesen Stellen genauer untersucht, woraus die vorliegenden Diagramme entstanden sind.

- **Wattiefe** Bei der Wattiefe handelt es sich um die maximale Gewässertiefe, durch die ein Landfahrzeug fahren bzw. waten kann. Die Wattiefe wird im Regelfall vom Automobilhersteller genauer spezifiziert. Da sich das Fahrzeug beim Waten nur sehr langsam fortbewegt, handelt es sich bei der Wattiefe um einen annähernd statischen Parameter. Bei der Angabe einer maximalen Wattiefe werden im Vergleich zu den Stabilitätskurven jedoch auch Parameter wie die Höhe der Luftansaugung des Motors bzw. die Höhe der Lichtmaschine und der Zündung berücksichtigt.
- **Interaktion Reifen-Fahrbahn** Im umströmten Zustand ändert sich das Kontaktverhal-

ten zwischen Reifen und Fahrbahn. Dies bedeutet, dass der Kraftwirkung der Strömung ein geringerer Widerstand entgegengesetzt wird, und es somit früher zu einer Bewegung des Fahrzeuges kommen kann. Die Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahn ist bereits sehr intensiv untersucht worden und Thema vieler Facharbeiten. Grundsätzlich ist die Reibung geschwindigkeitsabhängig und zeigt ein oberflächenabhängiges Maximum.

- **Widerstandsbeiwert c_W** Der Widerstandsbeiwert c_W ist in der Strömungslehre ein von der Form eines Körpers abhängiges dimensionsloses Maß für den Strömungswiderstand eines von einem Fluid umströmten Körpers. Es wird ein kurzer Überblick über den theoretischen Hintergrund sowie die Abhängigkeiten des Widerstandsbeiwertes von weiteren strömungsmechanischen Kennzahlen gegeben.
- **Numerische Strömungssimulation** Heutzutage werden viele ingenieurtechnische Fragestellungen mit Hilfe einer numerischen Strömungssimulation bearbeitet. Eine hochaufgelöste Modellierung von freien Oberflächen und der Wellenausbreitung, wie sie bei der Umströmung eines Fahrzeugkörpers auftreten, stellt jedoch immer noch eine Herausforderung an die Leistungsfähigkeit der Datenverarbeitung dar. Im Rahmen der Recherche wird der aktuelle Stand der Wissenschaft zum Thema der numerischen Simulation von Wasserdurchfahrten vorgestellt.

3.1 Stabilitätskurven/ kritische Fließgeschwindigkeiten

Die Darstellung der Fahrzeugstabilität erfolgt in der Fachliteratur üblicherweise anhand von Stabilitätskurven bzw. kritischen Fließgeschwindigkeiten. In der gängigen Darstellung ist auf der Abszisse die Wassertiefe und auf der Ordinate die Fließgeschwindigkeit aufgetragen. Die kritische Fließgeschwindigkeit gibt den Zustand an, ab dem die Strömungskraft auf das Fahrzeug größer als die entgegenwirkende Reibungskraft ist.

Bonham und Hattersley (1967) Bereits im Jahr 1962 wurden Modellversuche an der Universität von New South Wales durchgeführt, um Sicherheitsstandards und Kriterien für den Entwurf von „Causeways“ bzw. „Floodways“ festzulegen (Bonham u. a. 1967). Darunter versteht man Flussquerungen bzw. Querungen von potentiellen Überflutungsflächen, an denen eine sichere Durchfahrt gewährleistet werden soll.

Die Notwendigkeit der Versuche ergab sich aus der vermehrten Anzahl von Unfällen, welche sich in den 1960er Jahren im australischen Bundesstaat New South Wales ereigneten. Die Untersuchungen wurden mit einem Ford Falcon Modell im Maßstab 1:25 durchgeführt, welcher mit der Längsseite zur Strömung ausgerichtet war. Die in dem Projekt untersuchten Straßen wurden in drei Klassen unterteilt: „Causeways“, „Floodways“ und

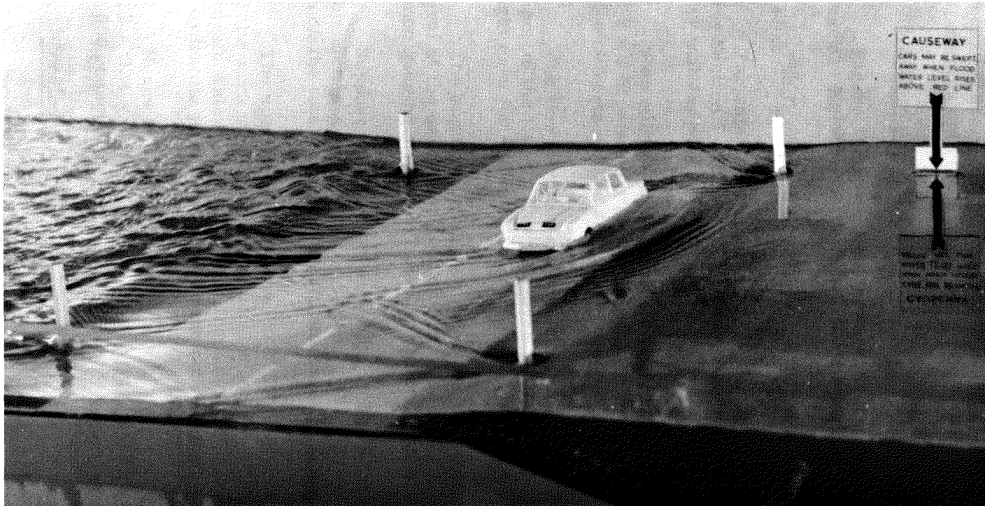


Abbildung 3.1: Modell des untersuchten Fahrdamms (Bonham u. a. 1967), Anströmung quer zur Fahrzeuglängsrichtung

„Fords“. Die Causeways beziehen sich auf Durchfahrtsbereiche einer Straße mit flachem, strömendem Wasser, die Floodways auf Durchfahrtsbereiche mit stehendem Wasser und die Fords auf kleine Untiefen innerhalb einer Straße. Die Experimente mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen wurden in einem Versuchskanal durchgeführt und daraus entsprechende Stabilitätsgrenzwerte abgeleitet.

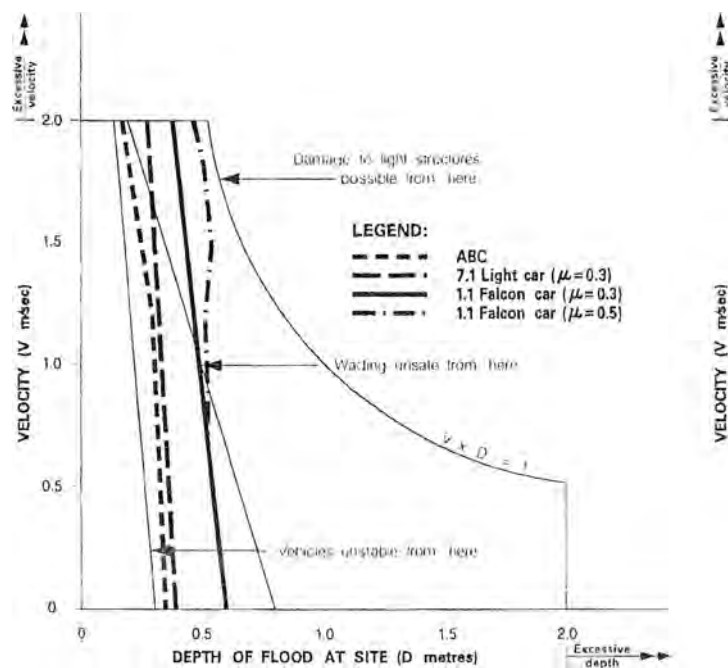


Abbildung 3.2: Kritische Fließgeschwindigkeiten für die Fahrzeugstabilität nach Bonham u. a. (1967), Anströmung quer zur Fahrzeuglängsrichtung

Aufgrund der Vielzahl von potentiell möglichen Reibungskoeffizienten je nach Straßenbelag und Reifeneigenschaften, beschränkten sich die Verfasser der Studie auf die Annahme eines möglichst repräsentativen und realistischen Mittelwertes von $\mu = 0,3$. Ein Modell des untersuchten Fahrdamms ist in Abb. 3.1 zu sehen. Die Versuchsergebnisse in Form eines Stabilitätsdiagramms sind in Abb. 3.2 dargestellt.

Weiterhin wurden im Rahmen der Untersuchungen die zum damaligen Zeitpunkt registrierten Straßenfahrzeuge in New South Wales ermittelt, um für verschiedene Fahrzeugtypen Stabilitätskriterien bei entsprechenden Abflusszuständen definieren zu können. Für die Modelle des Ford Falcon, des Volkswagen sowie des Van-Holden wurden resultierende Achslasten in Abhängigkeit der Wassertiefen berechnet. Im anschließenden Schritt folgte die Unterteilung der ermittelten Kfz in sieben Fahrzeugklassen je nach Form, Abmessungen und Gewicht. Zur Berechnung der kritischen Fließgeschwindigkeit (Stabilitätsgrenze) in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Kraftfahrzeugmodelle wurden je nach Fahrzeugklasse skalierte Maßstabsfaktoren verwendet, um die variierenden Formeigenschaften, die Abmessungen sowie das Gewicht zu berücksichtigen.

Gordon und Stone (1973) In einer zweiten Untersuchung am Water Research Laboratory wurden im Jahr 1973 Modellversuche zur Fahrzeugstabilität in Strömungen an einem Morris Mini im Maßstab 1:16 durchgeführt (Gordon u. a. 1973).

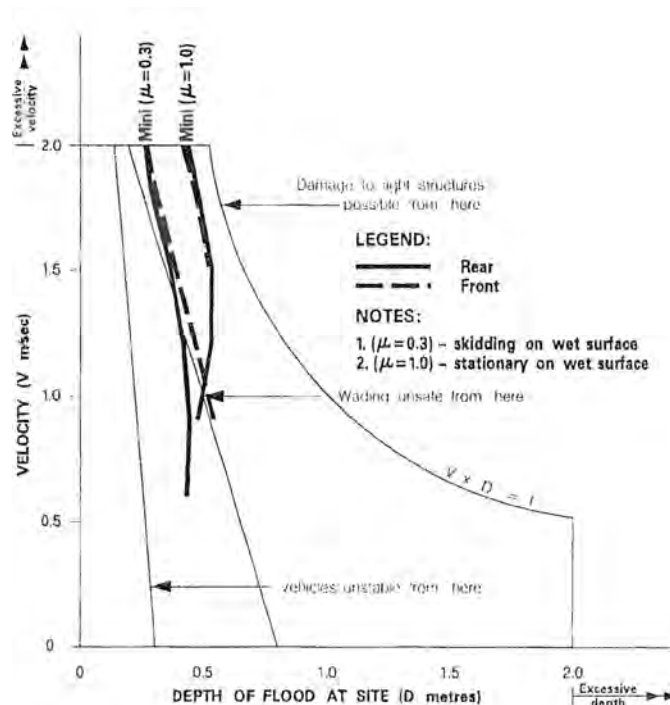


Abbildung 3.3: Kritische Fließgeschwindigkeiten für die Fahrzeugstabilität nach Gordon u. a. (1973), Anströmung in Fahrzeuginnenrichtung

Die Untersuchungen fanden in einer 9 m langen und 0,9 m breiten Rinne statt, das Auto war dabei stets mit der Frontseite zur Strömung ausgerichtet. Die Versuchsergebnisse in Form eines Stabilitätsdiagramms sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

„FDPM“ (1986) und „ARR“ (1987) Weitere Stabilitätsgrenzen finden sich im „Floodplain Development Manual“ (FPDM) und im Leitfaden „Australian Rainfall and Runoff“. Das FPDM wurde 1986 vom Department of Public Works veröffentlicht und ist an die Studien von Gordon und Stone angelehnt (FDPM 1986).

Eine weitere übliche Herangehensweise bei der Beurteilung der Wirkung einer Strömung auf Personen, Gebäude und Fahrzeuge ist die Definition eines Grenzwertes der Strömungsintensität. Diese ist definiert als Produkt aus Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit:

$$s = v * h \quad (3.1)$$

- s Strömungsintensität [m^2/s]
- v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- h Wassertiefe [m]

Innerhalb des Leitfadens „Australian Rainfall and Runoff“ wurde eine Strömungsintensität von $v * h = 0,7$ als Stabilitätsgrenze definiert (ARR 1987).

Keller und Mitsch (1992) Eine analytische Herangehensweise wurde von Keller und Mitsch gewählt. In ihrer vereinfachten Berechnungsmethode wird Instabilität prognostiziert, sobald die angreifende Strömungskraft gleich der Haltekraft entspricht. Für die Untersuchungen wurden Entwurfszeichnungen verschiedener Autohersteller ausgewertet, wobei der Haftreibungskoeffizient nach Bonham und Hattersley zu $\mu_R = 0,3$ gewählt wurde. Löst man die Gleichung für das Kräftegleichgewicht auf, ergibt sich folgender Zusammenhang für die kritische Fließgeschwindigkeit (vgl. Gleichung 2.6):

$$v = 2 \cdot \left(\frac{F_r}{\rho \cdot c_W \cdot A} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

- v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- A Anströmfläche [m^2]
- ρ Dichte [kg/m^3]
- c_W Widerstandsbeiwert [-]
- F_r Reibungskraft [N]

Die Berechnungsergebnisse sind in Abb. 3.4 dargestellt und ergaben sich unter der Annahme eines horizontalen Wasserspiegels sowie vereinfachten Annahmen für den Widerstandsbei-

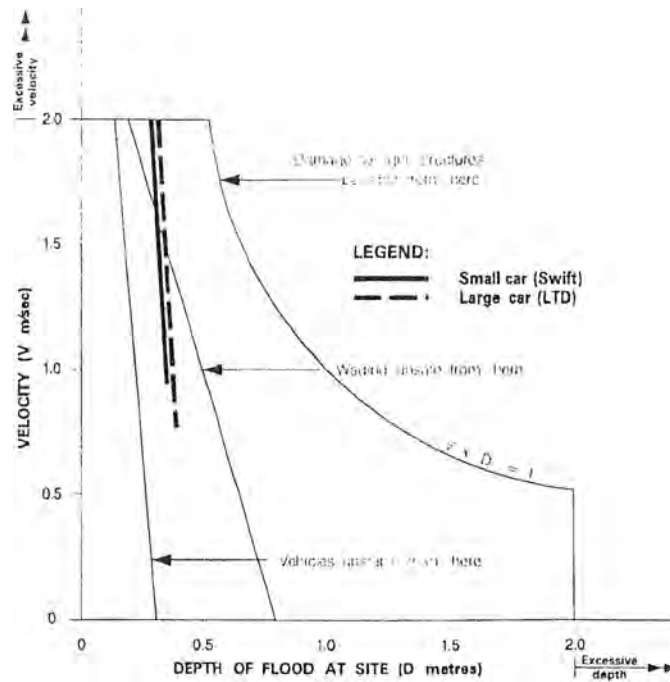


Abbildung 3.4: Kritische Fließgeschwindigkeiten für die Stabilität von verschiedenen Fahrzeugen nach Keller u. a. (1992)

wert (Räder: $c_W = 1,1$; Karosserie: $c_W = 1,15$).

Walsh und Benning (1998) Walsh und Benning stellten in ihren Untersuchungen die Ergebnisse der Forschungen bis zum Jahr 1998 zusammen. Es wird betont, dass weitere

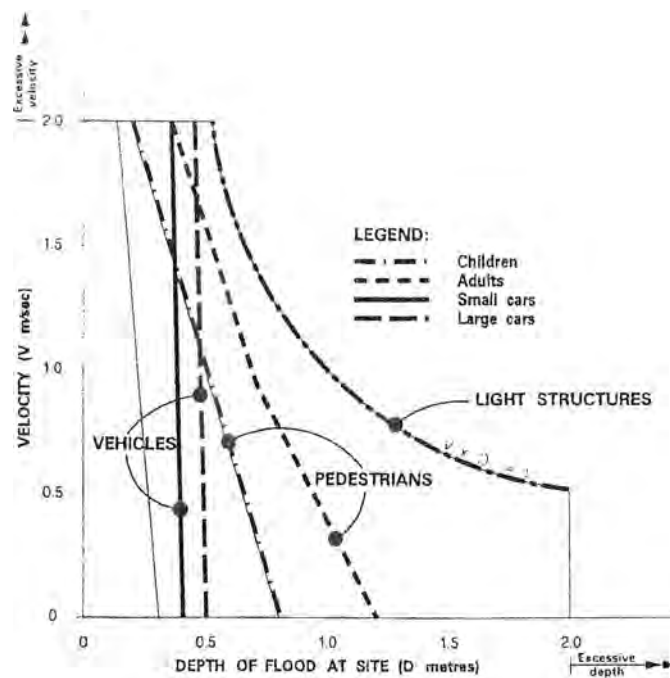


Abbildung 3.5: Stabilitätskriterien für Fahrzeuge und Fußgänger nach Walsh u. a. (1998)

Forschung im Bereich der Stabilitätskriterien notwendig ist, da die bis dato vorhandene Datenbasis sehr gering sei (Walsh u. a. 1998). Die Abbildung 3.5 zeigt die Stabilitätskurven, die anhand der bis dato vorhandenen Untersuchungen empfohlen wurden.

„Floodsite“ (2008) Im März 2008 wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Floodsite“ an der TU Delft in den Niederlanden ein Bericht unter dem Titel „Frameworks for flood event management“ veröffentlicht. Die Tatsache, dass die Stabilität von Fahrzeugen auf wasserüberfluteten Straßen häufig überschätzt wurde und in der Vergangenheit bereits zu zahlreichen Todesfällen führte, gab Anlass zu weiteren Untersuchungen und Sicherheitskalkulationen von unterschiedlichen Fahrzeugtypen bei Flutereignissen.

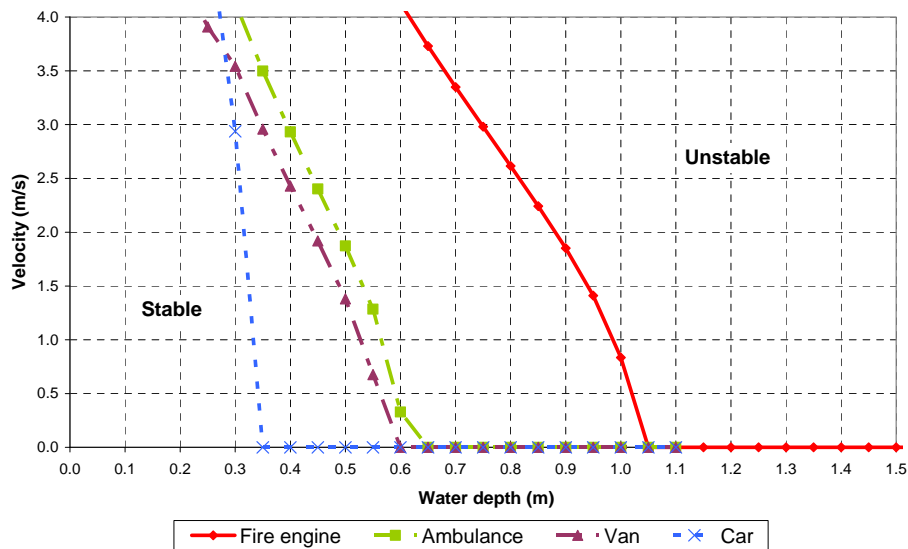


Abbildung 3.6: Stabilitätskurven als Funktion der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit (Mens u. a. 2008)

Die Stabilitätsgrenzwerte der kritischen Fließgeschwindigkeit bei zugehöriger kritischer Wassertiefe wurden analog zu dem von Keller und Mitsch gewählten Ansatz aus einem Kräftegleichgewicht zwischen Widerstandskraft und Reibungskraft entwickelt. Der Reibungskoeffizient $\mu = 0,3$ entsprach dem von Bonham und Hattersly angesetzten Wert und die Widerstandsbeiwerte wurden von Keller und Mitsch übernommen. Die Ergebnisse der Studie sind für verschiedene Fahrzeugtypen im Diagramm 3.6 dargestellt, erstmalig sind hier auch Stabilitätskurven für Krankenwagen und Feuerwehrfahrzeuge enthalten.

Xia (2010) Ergebnisse der neuesten Untersuchungen aus dem Jahr 2010 wurden vom Hydro-Environmental Research Centre der Universität Cardiff veröffentlicht. Hier wurden Untersuchungen an drei verschiedenen Modellautos (Mitsubishi Pajero, Mini Cooper, BMW M5) in den Maßstäben 1:43 und 1:18 durchgeführt.

Die Autos waren bei diesen Versuchen mit dem Heck entgegen der Strömungsrichtung

ausgerichtet. Es wurde die Kombination aus Wasserstand und Fließgeschwindigkeit bei Bewegungsbeginn der Fahrzeuge als bestimmender Parameter erfasst.

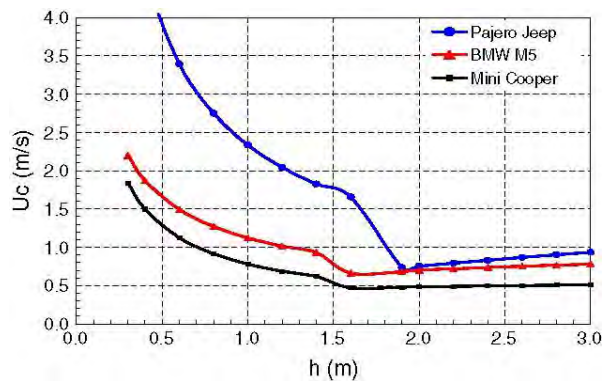


Abbildung 3.7: Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe als maßgebliche Parameter für die Fahrzeugstabilität (Xia u. a. 2012)

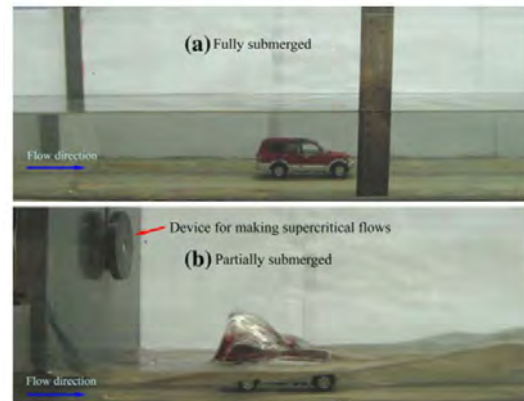


Abbildung 3.8: Voll- und teileingetauchtes Fahrzeugmodell in der Versuchsrinne (Xia u. a. 2012)

Das Gewicht der Fahrzeuge war bei den Versuchen nicht skaliert. Stattdessen wurde der Dichteunterschied bei der Umrechnung auf Naturgrößen im Rahmen eines Dichteterms berücksichtigt. Neben teileingetauchten Fahrzeugmodellen wurden auch komplett eingetauchte Fahrzeuge betrachtet. Basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Versuche wurde die Gleichung der kritischen Fließgeschwindigkeit von Keller und Mitsch, unter der Annahme größerer Fließgeschwindigkeiten auf der Oberseite des Fahrzeugmodells, um einen Term für die dynamische Auftriebskraft erweitert.

3.2 Wattiefe

Einen weiteren wichtiger Parameter für die Fahrzeugstabilität ist das sogenannte Waten bzw. die Wattiefe. Unter Waten wird das Durchfahren eines Gewässers mit Rad- oder Kettenfahrzeug ohne Benutzung einer Zusatzausstattung verstanden. Dementsprechend handelt es sich bei der Wattiefe um die maximale Gewässertiefe, durch die ein Landfahrzeug fahren bzw. waten kann. Die Wattiefe hängt von diversen Faktoren ab, darunter fallen:

- Höhe der Luftansaugung des Motors,
- Höhe der Lichtmaschine und der Zündung am Motor sowie Dichtheit der Elektrik/Elektronik,
- Höhe der Aggregat-Entlüftungen des Fahrzeugs (Achsen, Getriebe etc.),
- Abdichtung des Fahrzeugs (Innenraum).

Genauere Angaben über die Wattiefe sind teilweise in den technischen Spezifikationen der Automobilhersteller veröffentlicht. Prinzipiell können Geländewagen Gewässer mit größerer

Tiefe durchfahren, insbesondere wenn sie mit einem Schnorchel sowie einem hochgelegten Auspuff und Entlüftungsleitungen ausgerüstet sind. Durch die höher liegende Luftansaugung des Motors wird das Eindringen von Wasser vermieden.

Allgemeinere Informationen zu den Wattiefen liefert z. B. die Zentrale Dienstvorschrift 3/703 „Überwinden von Gewässern und Einschnitten“ der Bundeswehr (Widder 2001). Handelsübliche und teilmilitarisierte Radfahrzeuge dürfen bis zu einer Wassertiefe von 0,5 m waten, geländegängige Radfahrzeuge hingegen bis zu 1,20 m. Die Fließgeschwindigkeiten dürfen 2,0 m/s bei einer Wasserspiegelbreite von mehr als 40 m nicht überschreiten. Diese Situation kann mit einer flächigen Überflutung verglichen werden.

Im Rahmen der Untersuchungen im Projekt EvaSim werden Wattiefen für die Fahrzeugtypen Personenkraftwagen und Einsatzfahrzeuge der Feuerwehr zusammengestellt (siehe Abb. 3.9 und 3.10 bzw. Tab. 8.1 und 8.2 im Anhang). Die Informationen werden über Literaturangaben und Herstellerbefragungen recherchiert. Es zeigt sich, dass die durchschnittliche Wattiefe eines Personenkraftwagens knapp über 30 cm liegt, während Einsatzfahrzeuge oftmals bei Wassertiefen von 60 cm und mehr waten können.

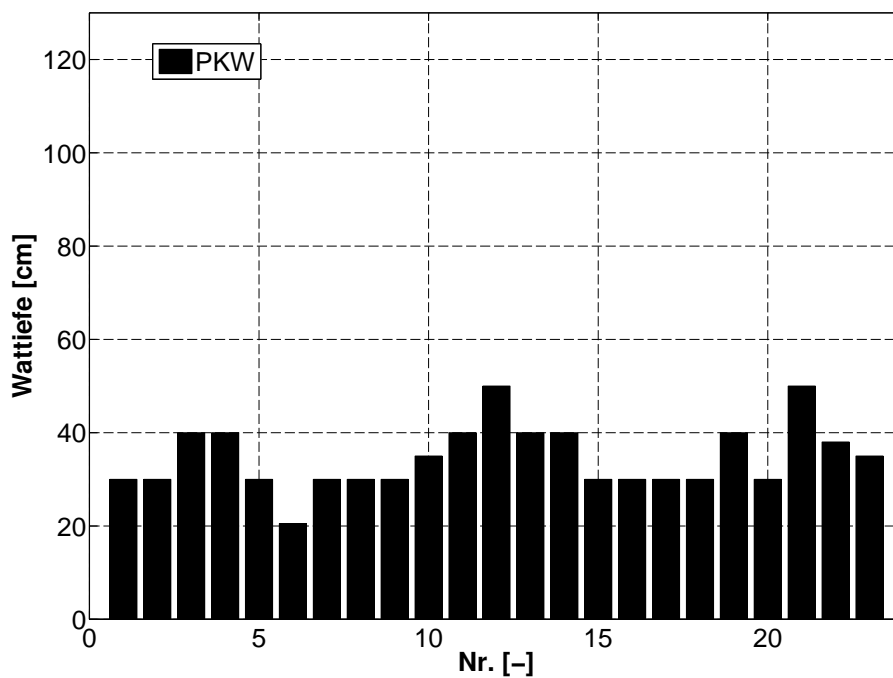


Abbildung 3.9: Wattiefenzusammenstellung von Personenkraftwagen

Da es sich bei den Herstellerangaben der maximalen Wattiefen um einen statischen Ansatz handelt, kann sie nicht für die Durchquerung von Überflutungen mit ggf. vorherrschenden größeren Fließgeschwindigkeiten ohne Korrekturfaktor herangezogen werden. Um die Mobilität bei diesen Strömungszuständen zu beurteilen, wird im vorliegenden Projekt ein Ansatz zur Umrechnung der Wattiefe auf andere Abflusszustände erarbeitet.

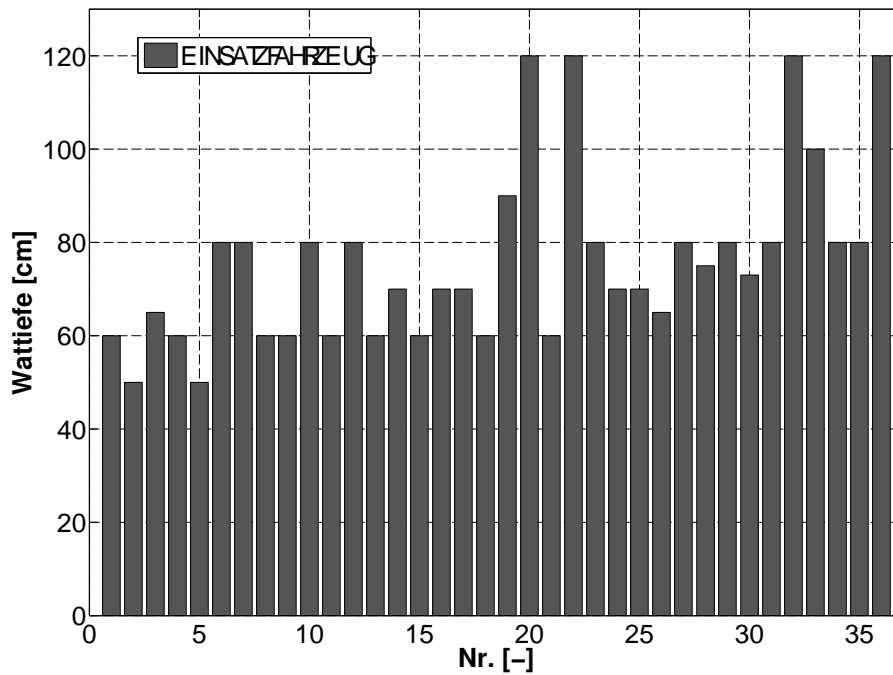


Abbildung 3.10: Wattiefenzusammenstellung von Einsatzfahrzeugen

3.3 Interaktion Reifen-Fahrbahn

Bei der Wechselwirkung zwischen Reifen und nasser Fahrbahn ist neben der Reibung insbesondere auch der Auftrieb zu berücksichtigen, den das Kraftfahrzeug im umströmten Zustand erfährt und durch den die Reibungskräfte entscheidend vermindert werden. Dies bedeutet wiederum, dass der Kraftwirkung der Strömung ein geringerer Widerstand entgegengesetzt wird, und es somit früher zu einer Instabilität des Fahrzeuges kommen kann.

In der klassischen Mechanik werden verschiedene Formen der Reibung definiert. Die nachfolgenden Ausführungen sind Herrmann (2003) entnommen. Bei jedem Reibungsvorgang, an dem zwei Körper beteiligt sind, bewegt sich der eine Körper relativ zum anderen, und die Körper üben Kräfte aufeinander aus. Ist F der Betrag dieser Kräfte und Δv die Geschwindigkeitsdifferenz, so ist die pro Zeiteinheit dissipierte Energie $P = \Delta v \cdot F$. Klassifiziert wird der Reibungsvorgang nach der Δv - F -Kennlinie (siehe Abb. 3.11).

- Ein linearer Zusammenhang liegt vor, wenn sich zwischen den beiden Körpern ein viskoses Medium, beispielsweise ein Schmiermittel, befindet.
- Wenn ein Medium einen Körper turbulent umströmt, so beschreibt die Änderung von F in Abhängigkeit von Δv eine quadratische Funktion. Ein Beispiel dafür ist die Luftreibung eines Fahrzeuges.

- c) Haft-, Gleit- und Rollreibung gehören bei dieser Einteilung zu derselben Kennlinie. Allerdings hat diese eine Singularität. Zum Wert $\Delta v = 0$ gehört kein eindeutiger Wert der Kraft, die Kraft kann alle Werte von $-F_H$ bis $+F_H$ annehmen. Anwendung ist beispielsweise das Haften und Rutschen eines Autos.

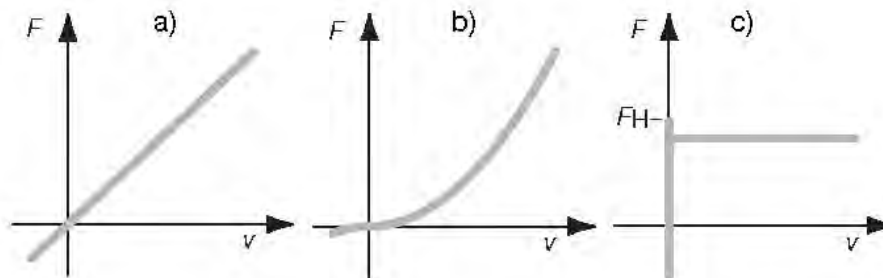


Abbildung 3.11: Reibung: a) viskose Reibung; b) turbulente Reibung; c) Reibung zwischen zwei festen Körpern (Herrmann 2003)

Die für die Modelluntersuchungen am Fahrzeug maßgebenden Vorgänge zwischen Fahrzeug und Untergrund sind der Reibung zwischen zwei festen Körpern zuzuordnen. Hierbei wird zwischen der Haft- und Rollreibung unterschieden. Ebenso muss beachtet werden, dass die Reibung durch die Flüssigkeitsschicht zwischen den Reifen und der festen Oberfläche zusätzlich reduziert wird.

Die Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahn bzw. die Rollreibung ist bereits sehr intensiv untersucht worden und Thema vieler Facharbeiten (Fach 1999, Xie 2001, Risch 2002). Grundsätzlich ist die Rollreibung geschwindigkeitsabhängig und zeigt ein oberflächenabhängiges Maximum, dessen Ursache in der Literatur unterschiedlich interpretiert wird (Schramm 2002). Allgemein wird die Gummireibung auf rauen Oberflächen aus einem Adhäsionsanteil und einem Hystereseanteil zusammengesetzt betrachtet (Kummer 1966). Unter der Adhäsionsreibung wird der Prozess der Bildung und des Wiederaufbrechens von adhäsiven Verbindungen an den Kontaktstellen von Reifen und Fahrbahn verstanden. Der Beitrag der Hysteresereibung entsteht durch die Energiedissipation infolge zyklischer Deformationen des viskoelastischen Elastomers durch die Rauheit des Untergrundes.

Viele Reibungsvorgänge werden durch einen sogenannten Reibungskoeffizienten ausgedrückt. Dieser stellt ein Maß für die Reibungskraft im Verhältnis zur Anpresskraft zwischen zwei Körpern dar:

$$F_R = \mu_R \cdot N \quad (3.3)$$

Die Untersuchungen von Bonham u. a. (1967) liefern einen Anhaltswert für die Reibungszahl μ_R bei nasser Fahrbahn:

A sideway force coefficient of 0,3 has therefore been adopted. However, the absolute reliability of this value is very questionable, having regard to the expert opinion of Mr. R. F, Jenkins of the Olympic Tyre and Rubber Company. The value of $\mu_R = 0,3$ is almost certainly adequate for most surfaces, and has the merit that it is realistic and enables design standards to be laid down which if followed would greatly reduce the danger of accidents on flooded causeways.

Für die Modelluntersuchungen in EvaSim wird entsprechend den Untersuchungen von Bonham ein Reibungskoeffizient von $\mu_R = 0,3$ angesetzt.

Ein anderer untersuchter Gesichtspunkt ist das Verhalten von Fahrzeugen bei Aquaplaning auf nasser Fahrbahn. Der Begriff ist eine Kombination aus den Worten „aqua“ (Wasser) und „to plane“ (gleiten). Unter Aquaplaning versteht man das Aufschwimmen eines Fahrzeugs auf einem Wasserkeil. Dies tritt dann auf, wenn bei sehr hoher Geschwindigkeit der hydrodynamische Druck größer ist als die Flächenpressung in der Reifenaufstandsfläche (Herrmann 2008).

Wenn im Hochwasserfall Menschen evakuiert werden, liegen die Fahrgeschwindigkeiten der Personenkraftfahrzeuge und Rettungsfahrzeuge jedoch weit unter den Aquaplaning verursachenden Fahrgeschwindigkeiten, so dass der Gefahrfall „Aquaplaning“ im ursprünglichen Sinne hier ausgeschlossen werden kann.

3.4 Widerstandsbeiwert

Die Kraftwirkung auf ein Fahrzeug wird in der Strömungslehre anhand des dimensionslosen Widerstandsbeiwertes c_W ausgedrückt. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Kraft, die die Strömung in Strömungsrichtung auf den Körper ausübt, und dem Produkt aus Staudruck und der angeströmten Fläche.

$$c_W = \frac{F_W}{\frac{1}{2}\rho v^2 \cdot A_W} \quad (3.4)$$

Da die Widerstandskraft bzw. der Widerstandsbeiwert im Allgemeinen schwer zu berechnen sind, werden sie meist experimentell bestimmt.

Die Widerstandskraft setzt sich aus einem Druckwiderstand (Formwiderstand) und einem Reibungswiderstand (Oberflächenwiderstand) zusammen. Die Widerstandskrafteinwirkung auf einen Körper lässt sich theoretisch durch die Integration der Reibungskräfte und der Druckverteilung über die Körperoberfläche bestimmen. Der Druckwiderstand wird durch die Körperform verursacht und ergibt sich aus einer unsymmetrischen Druckverteilung um den

Körper. Der Reibungswiderstand wird an der Kontaktfläche zwischen Objekt und Fluid durch Reibungseinflüsse hervorgerufen. Dementsprechend kann auch der Widerstandsbeiwert in einen Druck- (c_p) und einen Reibungsterm (c_f) aufgeteilt werden:

$$c_w = c_f + c_p \quad (3.5)$$

Der Reibungsterm ist im Allgemeinen von der Reynoldszahl (Re) der Strömung abhängig (siehe Abb. 3.12). In Analogie zu der Umströmung von glatten Kugeln oder Kreiszyllindern ist der Widerstandsbeiwert bei Reynoldszahlen $> 10^3$ konstant.

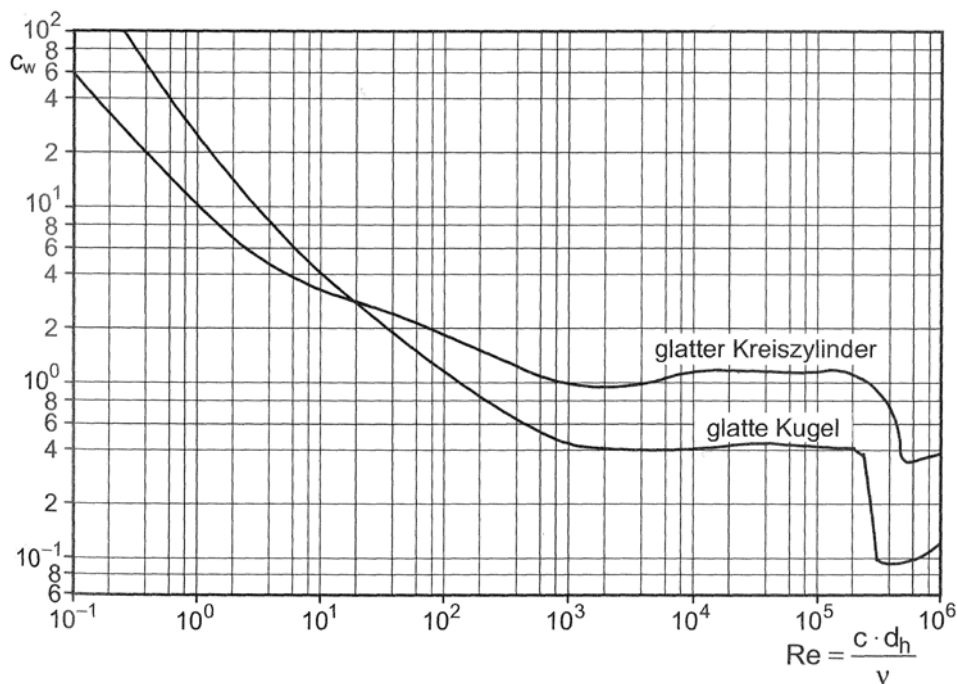


Abbildung 3.12: Widerstandsbeiwert einer glatten Kugel und eines glatten umströmten Zylinders in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (Surek u. a. 2007)

Bei voluminösen Körpern, wie sie auch bei den umströmten Fahrzeugmodellen vorliegen, ist der Druckwiderstand meist deutlich größer als der Reibungswiderstand und muss deshalb als maßgebliche Größe für die Fahrzeugstabilität betrachtet werden. Der Druckwiderstand ergibt sich vornehmlich durch die Ablösung der Grenzschichtströmung auf der Rückseite des Körpers und den daraus resultierenden, erheblichen Druckunterschieden zwischen der Vorder- und Rückseite.

3.5 Numerische Strömungssimulation

Heutzutage werden viele ingenieurtechnische Fragestellungen mit Hilfe numerischer Strömungssimulationen bearbeitet. Die Modellierung von freien Oberflächen und der Wellenausbreitung, wie sie bei der Umströmung eines Fahrzeugkörpers auftreten, stellt jedoch immer noch eine Herausforderung an die Leistungsfähigkeit der Datenverarbeitung dar.

Die Simulation der Wasserdurchfahrt eines Kraftfahrzeuges wurde von Greif u. a. (2007) mit einem Finiten-Volumen-Verfahren durchgeführt. Zielsetzung dieser Berechnungen war die Vorhersage der durch Spritzwasser verursachten Wasserbedeckung verschiedener Bereiche des Motorraums, da in gewissen sensiblen Bereichen kein Kontakt mit Wasser erfolgen darf.

Als Randbedingung wurden eine Wassertiefe von 0,15 m und eine Durchfahrtsgeschwindigkeit von 36 km/h, bei einer stark vereinfachten Struktur des Gitternetzes (keine Seitenspiegel und Unterbodendetails) zugrunde gelegt. Für eine Realzeit von zwei Sekunden wurde eine Rechenzeit von zehn Tagen benötigt. Die Durchfahrt wurde sowohl mit rotierenden Reifen als auch im Stillstand durchgeführt. Auch wenn sich die Randbedingungen der bei Greif u. a. (2007) durchgeführten Simulationen von den Randbedingungen im Projekt EvaSim deutlich unterscheiden, so ist die Erkenntnis, dass sich keine großen Unterschiede zwischen der Situation mit rotierenden oder stillstehenden Reifen ergeben, von wesentlicher Bedeutung.

3.6 Zusammenfassung

Die bisherigen Untersuchungen zeigen verschiedene Ansätze für die Beurteilung der Stabilität von Fahrzeugen in Strömung auf. Dennoch gibt es einige Bereiche, in denen weitere Forschungsarbeiten notwendig sind, um ein vertieftes Verständnis zu erlangen und fundierte Grenzwerte für die Verkehrstauglichkeit bei verschiedenen Strömungssituationen geben zu können. Folgende Punkte sind insbesondere zu nennen:

- In den bisherigen Versuchen wird das Auto entweder frontal (Gordon u. a. 1973), heckwärts (Xia u. a. 2012) oder längsseits (Bonham u. a. 1967) angeströmt. Eine Variation der Anströmrichtung innerhalb einer Versuchsreihe ist bisher nicht bekannt und wird im Forschungsvorhaben EvaSim erstmals aufgegriffen.
- Ergebnisse zur Fahrzeugstabilität liegen hauptsächlich für Personenkraftfahrzeuge sowie geländegängige Fahrzeuge vor. In EvaSim werden Stabilitätskriterien für bislang noch nicht untersuchte bzw. nur mit vereinfachten Ansätzen betrachtete Einsatzfahrzeuge entwickelt.

- Das Eindringverhalten von Wasser in das Fahrzeug ist bisher nicht Gegenstand der Untersuchungen. Dies kann von entscheidender Bedeutung sein, da hierdurch der Auftrieb und somit die Stabilität stark verändert wird. Im Rahmen von EvaSim wird das Eindringverhalten in einem Naturversuch genauer analysiert.
- Für die Berechnung der Widerstandskraft werden Widerstandsbeiwerte von Zylindern und rechteckigen Prismen abstrahiert (Keller u. a. 1992). In die Berechnung gehen bisher keine detaillierten Informationen zur Strömungsbildung um den Körper ein. In EvaSim werden anhand von Kraftmessungen von der Froude-Zahl abhängige Widerstandsbeiwerte für teilumströmte Fahrzeugkörper ermittelt.
- In vielen Untersuchungen wird der Reibungsbeiwert oftmals als statischer Wert angenommen. Nach Cox u. a. (2001) ist dies nicht ausreichend genau, da er von zu vielen Parametern abhängig ist, beispielsweise vom Reifenzustand, der Straßenoberfläche und der Wassertiefe. Im Rahmen von EvaSim wird der Ansatz eines konstanten Reibungsbeiwertes beibehalten. In den Untersuchungen zeigt sich, dass die Gewichtskraft des untersuchten Fahrzeuges maßgeblich für eine initiale Instabilität verantwortlich ist.
- Parameter wie die Höhe der Luftansaugung des Motors, die Höhe der Lichtmaschine und der Zündung am Motor und die Dichtheit der Elektrik/Elektronik sowie weitere im Abschnitt 3.2 genannte Faktoren werden für die Beurteilung der Befahrbarkeit bislang nicht berücksichtigt. Richtigerweise werden die bisher verwendeten Werte als Stabilitätskurven bezeichnet, die eine physikalische Stabilität (Kräftegleichgewicht) des Fahrzeuges ausdrücken. Für die Beurteilung der Befahrbarkeit muss jedoch zwischen der *Stabilität* und der *Verkehrstauglichkeit* unterschieden werden. Die Einführung der Energiehöhe als Stabilitätsparameter ermöglicht eine Integration der genannten Parameter und somit eine Bewertung der Verkehrstauglichkeit.

Neben der Erweiterung des bisherigen Wissensstandes zur Fahrzeugstabilität in Strömungen wird im Rahmen von EvaSim eine Schnittstelle zwischen hydraulischen Modellen (Hydro-AS, MIKE21) und einem Verkehrsmodell (VISUM) bzw. einem Hochwassermanagementsystem (FLIWAS) entwickelt, wodurch die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Stabilitätskriterien in der Praxis eingesetzt werden und einen Beitrag zur Verbesserung des Schutzes von Menschen während extremer Überflutungsereignisse leisten.

4 Physikalische Modellversuche

In der Versuchsanstalt für Wasserbau der Universität Stuttgart werden Modelluntersuchungen durchgeführt, um Stabilitätskriterien für Fahrzeuge zu entwickeln. Die Untersuchungen finden in einer Strömungsrinne („gelbe“ Kipprinne, Abb. 4.1) mit den Abmessungen von 20 m Länge, 1 m Breite und 0,6 m Höhe sowie in einem Stahlbecken (Abb. 4.2) mit den Abmessungen von 6,6 m Länge, 4,5 m Breite und 1,5 m Höhe statt.



Abbildung 4.1: „Gelbe“ Kipprinne in der Versuchsanstalt für Wasserbau



Abbildung 4.2: Stahlbecken in der Versuchsanstalt für Wasserbau

Der Durchfluss wird bei beiden Versuchsständen mit magnetisch induktiven Durchflussmessgeräten in der Zuleitung gemessen. Ebenso sind beide Versuchsstände mit Ultraschallsensoren ausgestattet, wodurch die Erfassung von Wasserspiegellagen an verschiedenen Positionen erfolgt. In der Kipprinne wird die mittlere Fließgeschwindigkeit rechnerisch ermittelt. Um die auftretenden Kräfte zu erfassen, sind wiederum an beiden Versuchsständen Kraftaufnehmer implementiert, deren Positionierung in den späteren Beschreibungen der Messtände detailliert erläutert wird.

4.1 Übertragungsfunktionen

Reale Strömungen sind im Allgemeinen hochkomplex (dreidimensional, turbulent, instationär) und lassen sich in der Ingenieurpraxis oftmals nur unter Verwendung vereinfachender Annahmen berechnen. Im Gegensatz zu mathematischen Modellen sind physikalische Modelle ein mehr oder weniger vereinfachtes, meist verkleinertes, Abbild der Natur. Möglichst alle den Naturvorgang maßgeblich beeinflussenden Phänomene sollten auch im Modell wiedergegeben sein, damit auf die Natur übertragbare Aussagen möglich sind. Mit solchen Modellen können dann entsprechende Experimente (Modellversuche) durchgeführt werden.

Physikalische Modelle sind grundsätzlich maßstabsbehaftet, d.h. die Übertragung vom Modell auf die Natur und umgekehrt muss physikalisch über so genannte Modellgesetze abgesichert sein. Die Forderung nach „Ähnlichkeit“ eines Modells mit der Natur erfordert geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit (Kobus 1978).

- Geometrische Ähnlichkeit eines Modells ist dann gegeben, wenn alle geometrischen Längen L_n in der Natur in einem konstanten Verhältnis zu den entsprechenden Längen L_m im Modell stehen. Dieses Verhältnis wird als Maßstabszahl L_r des Modells bezeichnet ($L_r = L_n/L_m$).
- Kinematische Ähnlichkeit beinhaltet, dass zeitabhängige Vorgänge im Modell stets so ablaufen, dass korrespondierende Zeitintervalle in der Natur und im Modell in einem konstanten Verhältnis stehen (Zeitmaßstab $t_r = t_n/t_m$).
- Dynamische Ähnlichkeit erfordert die Gleichheit der relevanten strömungsmechanischen Kennzahlen. Für Strömungen von Flüssigkeiten mit freien Oberflächen ist eine Gleichheit der Froude-Zahl im Modell und in der Natur einzuhalten. Dies wird auch als Froude'sches Modellgesetz bezeichnet. Die Froude-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerkraften und ist definiert als:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} \quad (4.1)$$

Fr	Froude-Zahl [-]
v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
H	Wassertiefe [m]

Die Strömungsvorgänge im Freispiegelabfluss (wie bei Hochwassersituationen) sind maßgeblich durch Schwerkraften beeinflusst. Die Übertragungsfunktionen für die Beschreibung

der Umströmung eines Fahrzeugs ergeben sich nach dem Froude'schen Modellgesetz:

$$\text{Längen: } L_r = \frac{L_m}{L_n} \quad (4.2)$$

$$\text{Flächen: } A_r = L_r^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Geschwindigkeiten: } v_r = \sqrt{L_r} \quad (4.4)$$

$$\text{Zeiten: } t_r = \frac{L_r}{v_r} = \sqrt{L_r} \quad (4.5)$$

$$\text{Durchflüsse: } Q_r = v_r * A_r = L_r^{5/2} \quad (4.6)$$

Aus diesen Formeln lassen sich die Umrechnungszahlen für den gewählten Modellmaßstab herleiten.

4.2 Auswahl der Versuchskörper

Die Untersuchungen werden für die beiden Fahrzeugtypen Einsatzfahrzeug und Personenkraftwagen durchgeführt. Für Personenkraftwagen liegen bereits Daten aus früheren Untersuchungen vor (siehe Abschnitt 3.1), dementsprechend werden die im Forschungsvorhaben erhobenen Daten mit den bereits vorhandenen verglichen, analysiert und diskutiert. Die Untersuchungen am Einsatzfahrzeug stellen eine wichtige Erweiterung des derzeitigen Wissensstandes dar.

In früheren Modelluntersuchungen wurden die Modelle teilweise abgedichtet, teilweise jedoch auch in einem unabgedichteten Zustand untersucht. Für die Übertragung der Ergebnisse auf natürliche Verhältnisse wird bei Verwendung eines unabgedichteten Modells die Annahme zugrunde gelegt, dass die eindringende Wassermenge in Modell- und Naturausführung, auf den Maßstab bezogen, von gleicher Größenordnung ist.

Bei den vorliegenden Maßstabsuntersuchungen wird für beide Versuchskörper der Ansatz eines abgedichteten Modells gewählt. Die Abdichtung bietet den Vorteil, dass die Gewichtskraft als konstant angesehen und Informationen über die Eindringmenge des Wassers nachträglich einbezogen werden können. Nachteilig ist eine mögliche Überschätzung des Auftriebsverhaltens, jedoch tendiert die Entwicklung in der Automobilindustrie immer mehr zu verbesserten Dichtungen und wasserdichteren Innenräumen.

Personenkraftfahrzeug Für die Untersuchungen wird ein Volkswagen Golf als weit verbreitetes und repräsentatives Personenkraftfahrzeug ausgewählt. Der VW Golf weist sowohl im Jahr 2009 als auch im Jahr 2010 die höchsten Zulassungszahlen im deutschen Vergleich auf. Für die Experimente wird ein Modellauto im Maßstab 1:10 nachgebildet.



Abbildung 4.3: Modell des untersuchten Personenkraftwagens

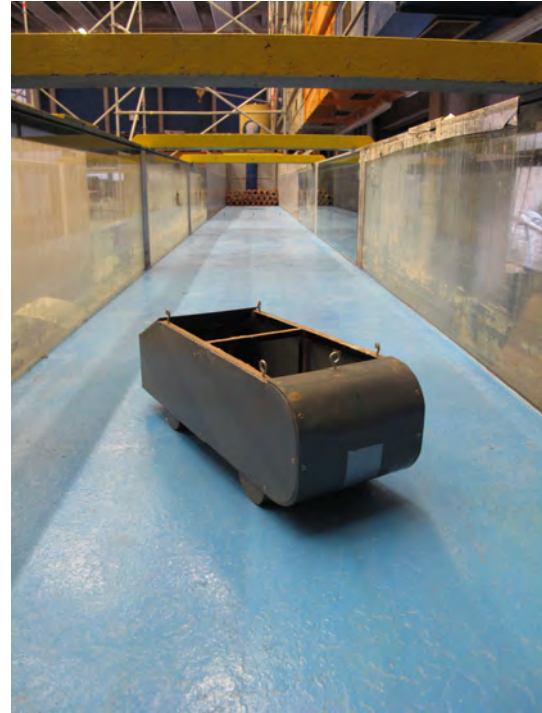


Abbildung 4.4: Modell des untersuchten Einsatzfahrzeuges

Das Modell wird mittels selektivem Lasersinterns (SLS) hergestellt, einem Verfahren mit dem räumliche Strukturen durch Sintern aus einem pulverförmigen Ausgangsstoff hergestellt werden. Das Werkstück wird hierbei Schicht für Schicht aus Polyamid aufgebaut. Bei dem Fahrzeugmodell im Maßstab 1:10 werden sowohl das Gewicht als auch die Achslastverteilung maßstabsgetreu skaliert. In der Abb. 4.3 ist der Versuchskörper des Personenkraftwagens dargestellt.

Tabelle 4.1: Daten des untersuchten PKW-Modells ($L_r = 9,77$)

	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	zul. Gewicht [kg]	Leergewicht [kg]
Naturmaßstab	4,02	1,71	1,41	1.785	1.380
Modellmaßstab	0,411	0,175	0,144	1,91	1,48

Einsatzfahrzeug Als Prototyp für den Versuchskörper eines Einsatzfahrzeuges dient das Feuerwehrfahrzeug LF 10/6 (Löschgruppenfahrzeug). Dieses Modell ist in seiner Kategorie in Deutschland am häufigsten zugelassen. Zudem handelt es sich um ein genormtes Fahrzeug mit festgelegten Vorgaben hinsichtlich Gewicht, Abmessungen und Beladung, die für alle Fahrzeughersteller verbindlich sind (Norm 14530/5 speziell für LF 10/6 und HLF 10/6).

Das Modellfahrzeug (Abb. 4.4) basiert auf der Geometrieform des Ahmed-Body. Um

ein geometrisch ähnliches Modell (Maßstab 1:13,1) zu konstruieren, werden wichtige Kenngrößen wie Leergewicht, Abmessungen (Länge, Breite, Höhe, Radstand) und die Achslastverteilung im Modell abgebildet.

Tabelle 4.2: Daten des untersuchten Einsatzfahrzeug-Modells ($L_r = 13,08$)

	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	zul. Gewicht [kg]	Leergewicht [kg]
Naturmaßstab	6,83	1,88	2,54	10.199	4.784
Modellmaßstab	0,522	0,144	0,195	4,54	2,14

4.3 Messtechnische Ausrüstung

Magnetisch induktive Durchflussmessung Für die Durchflussmessungen werden magnetisch induktive Durchflussmesser (MID) eingesetzt. Die Grundlage der magnetisch induktiven Durchflussmessung ist das Faradaysche Induktionsgesetz. Das Wasser wirkt als elektrischer Leiter, in welchem durch Schneiden der magnetischen Feldlinien eine Spannung induziert wird, die zur mittleren Fließgeschwindigkeit des Wassers proportional ist:

$$U_E = \kappa * B * D * v \quad (4.7)$$

U_E	Spannung
B	Magnetfeld
D	Rohrdurchmesser
v	Strömungsgeschwindigkeit
κ	Proportionalitätsfaktor

Diese induzierte Spannung wird an zwei in der Rohrwand gegenüberliegenden Elektroden abgegriffen. Es wird eine geringe Nutzspannung erzeugt, welche in nachgeordneten Geräten verstärkt, umgerechnet und aufgezeichnet wird.

Im Vergleich mit anderen Messverfahren bieten magnetisch induktive Durchflussmessgeräte als besondere Vorteile, dass die Messungen weitgehend unabhängig von Druck, Dichte, Temperatur, Viskosität und Strömungsprofil sind, relativ kurze An- und Ablaufstrecken benötigen, keine beweglichen Bauteile aufweisen, den Rohrquerschnitt nicht einengen und damit keinen zusätzlichen Druckverlust bewirken.

Die induktiven Durchflussmesser befinden sich in den Zuleitungen zu den beiden Messständen und messen den Gesamtzufluss, ihre Messungenauigkeit liegt im niedrigen einstelligen

Prozentbereich.

Ultraschallsensoren Für die Wasserspiegelerfassung werden Ultraschallsensoren verwendet. Ultraschall wird an Grenzflächen stark reflektiert. Aus der Laufzeit zwischen gesendetem und empfangenem Signal kann auf die Entfernung der Reflexionsstelle geschlossen werden. Der Sensor sendet die Ultraschallwellen meist keulenförmig mit einem kleinen Öffnungswinkel aus, so dass eine Mittelung für eine kleine Fläche, und keine Punktinformation, als Messsignal erhalten wird. Durch eine kurze Taktung des Messsignals lassen sich auch dynamische Prozesse erfassen. Die Messungenauigkeit der verwendeten Ultraschallsensoren beträgt ca. 1% des Messwertes .

Kraftaufnehmer Die verwendeten Kraftaufnehmer können zur Messung von Zug- und Druckkräften eingesetzt werden und sind in der Lage, sowohl statische als auch dynamische Kräfte zu erfassen. Das Messelement besteht aus einem Biegebalken aus Aluminium und Stahl. Der Biegebalken ist auf einer Seite befestigt, die andere Seite dient der Krafteinleitung, welche zu einer elastischen Verbiegung des Balkens führt. Die Kraft wird über acht Dehnungsmessstreifen gemessen, die auf dem Biegebalken so angeordnet sind, dass während des Messvorgangs jeweils vier gedehnt und vier gestaucht werden.

4.4 Beschreibung der Versuchsstände

Für die Durchführung der Modellversuche werden verschiedene methodische Untersuchungsansätze ausgewählt, welche sich hinsichtlich des Messprinzips und der erfassten Parameter voneinander unterscheiden (siehe Tab. 4.3).

Tabelle 4.3: Übersicht der durchgeführten Modellversuche in EvaSim

	Einsatzfahrzeug	Personenkraftwagen
Stabilitätsmessungen <i>Kipprinne, Modellmaßstab</i>	X	X
Druckmessungen <i>Kipprinne, Modellmaßstab</i>	X	
Widerstandsmessungen <i>Kipprinne, Modellmaßstab</i>	X	
Auftriebskraftmessungen <i>Kipprinne, Modellmaßstab</i>	X	
Auftriebskraftmessungen <i>Stahlbecken, Naturmaßstab</i>		X

Sogenannte Stabilitätsversuche bilden eine wichtige Grundlage der experimentellen Untersuchungen und erlauben die Bestimmung des Bewegungsbeginns der Versuchskörper in der Strömungsrinne bzw. die Erstellung von Stabilitätsdiagrammen.

Druck- und Strömungskraftmessungen werden zur messtechnischen Erfassung der Widerstandskraft eingesetzt und ermöglichen die Ableitung von Widerstandsbeiwerten für teilumströmte Fahrzeuge sowie die Berechnung der Stabilitätskurven unter veränderten Randbedingungen. Bei allen bisher beschriebenen Versuchsständen (Stabilitätsmessungen, Druckmessungen, Widerstandsmessungen) werden Versuche mit Variationen der Anströmwinkel durchgeführt. Um die Übertragbarkeit der Modellversuche auf die Natur zu bewerten, werden zusätzlich Auftriebskraftmessungen an einem Fahrzeugmodell im Naturmaßstab durchgeführt. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Versuchsdurchführungen erfolgt in den nächsten Abschnitten.

4.4.1 Stabilitätsmessungen

Bei den Stabilitätsmessungen werden die Versuchskörper in verschiedenen Anströmpositionen in der Rinne ausgerichtet. Der Rinnendurchfluss wird sukzessive bis zum Instabilitätspunkt gesteigert. Für diesen Instabilitätspunkt werden die Parameter Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit im stationären, ungestörten Zustand (ohne Strömungshindernis) bestimmt. Bevor diese Versuche durchgeführt werden können, ist eine Einstellung des Reibungsbeiwertes erforderlich.

Bestimmung des Reibungsbeiwertes Um den Reibungsbeiwert μ_R zu bestimmen, wird das exakte Gewicht eines Versuchskörpers erfasst und dieser anschließend in einer Stahlwanne positioniert. An der Frontseite des Modells befindet sich eine Öse, die über einen Nylonfaden und eine Umlenkrolle mit einem Behältnis verbunden ist. Durch Wasserzugabe wird die Masse des Behältnisses sehr fein bis zum Moment des Bewegungsbeginns des Versuchskörpers erhöht und der zugehörige Reibungsbeiwert bestimmt. Eine Darstellung des Aufbaus zeigt Abb. 4.5.

Für die Untersuchungen ist die Nassreibung die maßgebliche Größe. In diesem Fall ist der Wasserspiegel in der Wanne gerade so hoch, dass die Kontaktfläche zwischen Reifen und Bodenplatte vollständig benetzt ist, jedoch keine zusätzliche Auftriebskraft erzeugt wird. Die Bestimmung des Reibungsbeiwertes wird für mehrere Materialkombinationen durchgeführt, die Ergebnisse sind in Tab. 4.4 dargestellt.

Für die Stabilitätsmessungen in der Rinne wird die Materialkombination aus einem Elastomer und verzinktem Edelstahl gewählt, die einen Reibungskoeffizienten von $\mu_R = 0,7$ (Versuche 7-10) aufweist. In späteren Untersuchungen wird die Materialkombination variiert und

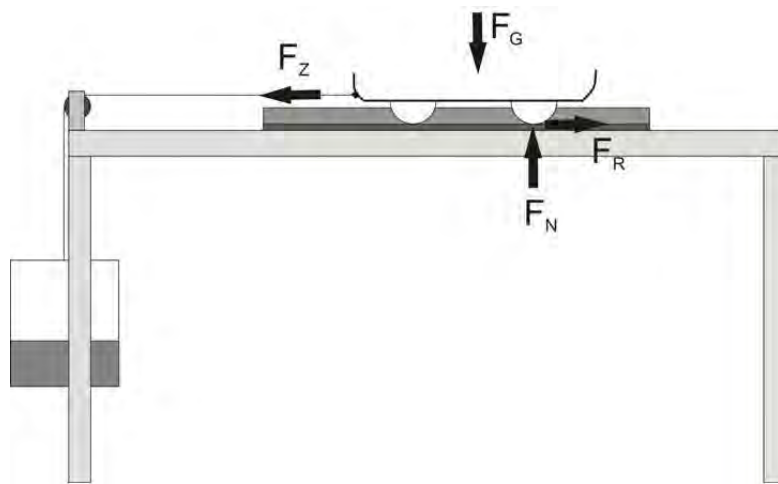


Abbildung 4.5: Experimentelle Bestimmung des Reibungsbeiwertes μ_R

Tabelle 4.4: Experimentell bestimmte Reibungskoeffizienten verschiedener Materialkombinationen

Nr.	Material 1 [-]	Material 2 [-]	G_{Fahrzeug} [N]	$G_{\text{Behälter}}$ [N]	μ_R [-]	Bedingung [-]
1	Elastomer	Schleifpapier	16,12	20,51	1,27	nass
2	Elastomer	Schleifpapier	16,12	20,86	1,29	nass
3	Elastomer	Schleifpapier	16,12	20,34	1,26	nass
4	Elastomer	Schleifpapier	16,12	20,51	1,27	nass
5	Elastomer	Edelstahl	16,12	10,22	0,63	nass
6	Elastomer	Edelstahl	16,12	10,37	0,64	nass
7	Elastomer	verzinkter Edelstahl	16,12	11,07	0,69	nass
8	Elastomer	verzinkter Edelstahl	16,12	10,11	0,63	nass
9	Elastomer	verzinkter Edelstahl	16,12	11,06	0,69	nass
10	Elastomer	verzinkter Edelstahl	16,12	10,99	0,68	nass
11	Kunststofffolie	PMMA	18,82	6,48	0,31	nass
12	Kunststofffolie	PMMA	18,82	6,42	0,30	nass
13	Kunststofffolie	PMMA	18,82	6,62	0,30	nass
14	Kunststofffolie	Kunststofffolie	18,82	9,93	0,53	nass

Versuche mit einem Reibungsbeiwert von $\mu_R = 0,3$ (Versuche 11-13) durchgeführt. Die Unterseite der Reifen des Modellautos wird mit dem entsprechenden Material ummantelt, in der Rinne wird eine Platte mit einer Höhe von 2 mm eingebracht, durch die jedoch keine nennenswerte Störung der Strömung auftritt.

Versuchsdurchführung Zur präzisen Erfassung des Instabilitätspunktes wird der Versuchskörper in der Kipp Rinne lokalisiert und in kleinen Intervallschritten mit einem kontinuierlich steigenden Durchfluss angeströmt. Unterschiedliche Strömungszustände werden durch

eine Änderung der Rinnenneigung eingestellt. Auf diese Weise werden Abflusszustände im Bereich von Froude-Zahlen zwischen 0 und 1,7 untersucht. Die Begrenzung auf eine maximale Froude-Zahl von 1,7 ergibt sich aus einer Analyse der Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation für das UG Bad Reichenhall.

Abhängig von der Rinnenneigung kommt es zu einem Bewegungsbeginn des Modellkörpers bei einer bestimmten Kombination aus Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe sowie Anströmwinkel. Der Versuchskörper wird aus der Rinne entnommen, es stellt sich ein stationärer Abflusszustand bei konstantem Wasserdurchfluss ein. Die Kenngrößen für den jeweils kritischen Durchfluss und die kritische Wassertiefe werden im stationären Zustand über einen längeren Zeitraum messtechnisch erfasst. Die mittlere kritische Fließgeschwindigkeit wird aus diesen beiden Parametern über die Massenerhaltung rechnerisch ermittelt.

Der typische Ablauf einer Stabilitätsmessung ist in den nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht. Ebenfalls ist die Bodenplatte (Festlegung des Reibungskoeffizienten) mit verschiedenen aufgetragenen Winkelpositionen zu erkennen. Zu Beginn der Messung befindet sich der Versuchskörper in einer stabilen Position, die Haltekraft ist größer als die auf den Körper wirkende Strömungskraft (vgl. Druckwiderstand und Reibungswiderstand), es tritt keine Bewegung auf (Abb. 4.6).



Abbildung 4.6: Dokumentation der Versuchsdurchführung; stabile Position

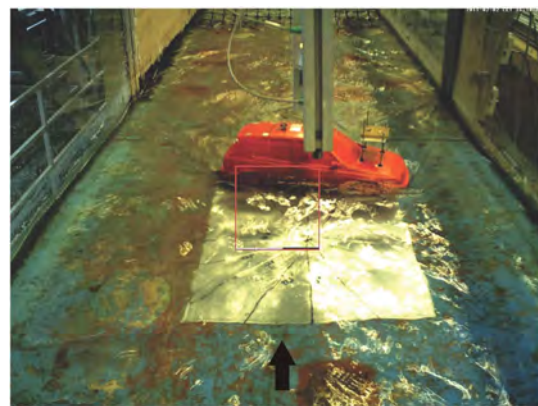


Abbildung 4.7: Dokumentation der Versuchsdurchführung; instabile Position

Wird der Durchfluss weiter gesteigert, nimmt die Strömungskraft entsprechend zu und bei Überschreitung der Haltekraft kommt es zum Abdriften des Fahrzeugmodells (Abb. 4.7). Bei der Stabilitätsmessung handelt es sich um eine sehr verlässliche Methode, da aus messtechnischer Sicht die Parameter Durchfluss und Wassertiefe mit sehr geringen Unsicherheiten erfasst werden können. Lediglich in der exakten Erfassung des Instabilitätszeitpunktes kann es zu Abweichungen kommen.

Der Reibungskoeffizient ist bereits aus den Vorversuchen festgelegt und beträgt in der ersten Versuchsreihe $\mu_R = 0,7$. Die Einhaltung des richtigen Reibungskoeffizienten wird

durch die Positionierung des Modellkörpers auf einer Grundplatte, welche in der Rinne angebracht ist, sichergestellt. Der Reibungsbeiwert zwischen Fahrzeug und Fahrbahn wird innerhalb gewisser Grenzen variiert (zweite Messreihe, $\mu_R = 0,3$) und somit eine Bandbreite für die Stabilität angegeben.

Die Versuchskörper werden in insgesamt drei Winkelpositionen gegenüber der Strömung ausgerichtet. Da die Fahrzeuglängsachse eine Symmetrieachse darstellt, ist es ausreichend eine Rotation des Körpers um 180° zu betrachten. Im Rahmen der Stabilitätsuntersuchungen wird eine frontale bis seitliche Anströmung genauer betrachtet, folgende Winkelpositionen werden untersucht:

- 0° : Versuchskörper mit der Frontseite entgegen der Strömung,
- 45° : Versuchskörper schräg zur Strömung,
- 90° : Versuchskörper mit der Längsseite quer zur Strömung.

Untersuchungsergebnisse Personenkraftfahrzeug Die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen sind in Tab. 8.3 und 8.4 (siehe Anhang) aufgelistet. In der ersten Spalte sind der Anströmwinkel sowie die Neigung der Kipprinne (in ‰) angegeben.

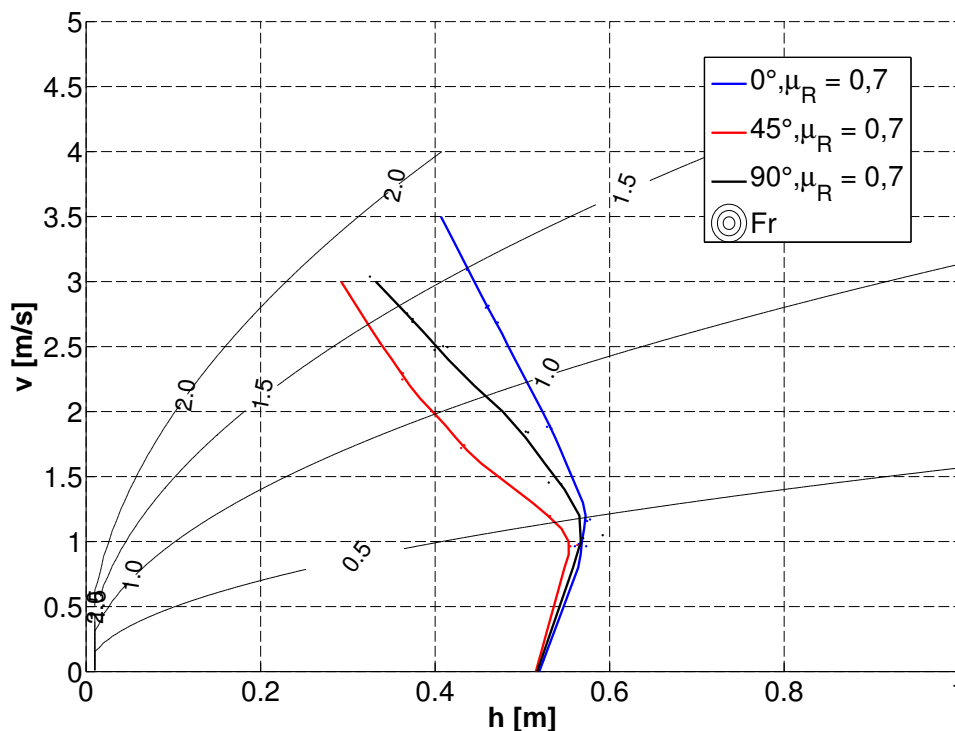


Abbildung 4.8: Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen; $\mu_R = 0,7$; zul. Gewicht

Beispielsweise bedeutet die Abkürzung „0_1,1“ der Messreihe, dass ein Anströmwinkel von 0° sowie eine Neigung der Rinne von $1,1 \text{ ‰}$ eingestellt sind. Entsprechend den verschiedenen

Neigungen werden die Messungen jeweils um die Wirkung der Hangabtriebskraftkomponente korrigiert.

In der zweiten Spalte ist der Abstand der Unterkante des Reifens zum Rinnenboden (Δz) aufgelistet. Bei den Stabilitätsmessungen entspricht dies der Dicke der Bodenplatte, auf dem das Fahrzeug steht. Bei den Kraftmessungen wird das Fahrzeug in der Rinne aufgehängt, der Abstand zwischen Unterkante Reifen und dem Rinnenboden variiert im Bereich von wenigen Millimetern. Diese Abstände werden beim Vergleich der verschiedenen Messreihen (Stabilitätsmessung, Druckmessung, Strömungskraftmessung) berücksichtigt. In den Spalten 3 bis 7 sind die hydraulischen Randbedingungen am Instabilitätspunkt im Modellmaßstab (Index m) und im Naturmaßstab (Index n) angegeben. Da das Modell als Froude-Modell betrieben wird, stimmen die Froude-Zahlen in beiden Maßstäben überein (Spalte 8). In den letzten beiden Spalten finden sich Informationen über den Reibungskoeffizient μ_R und die Masse des Versuchskörpers.

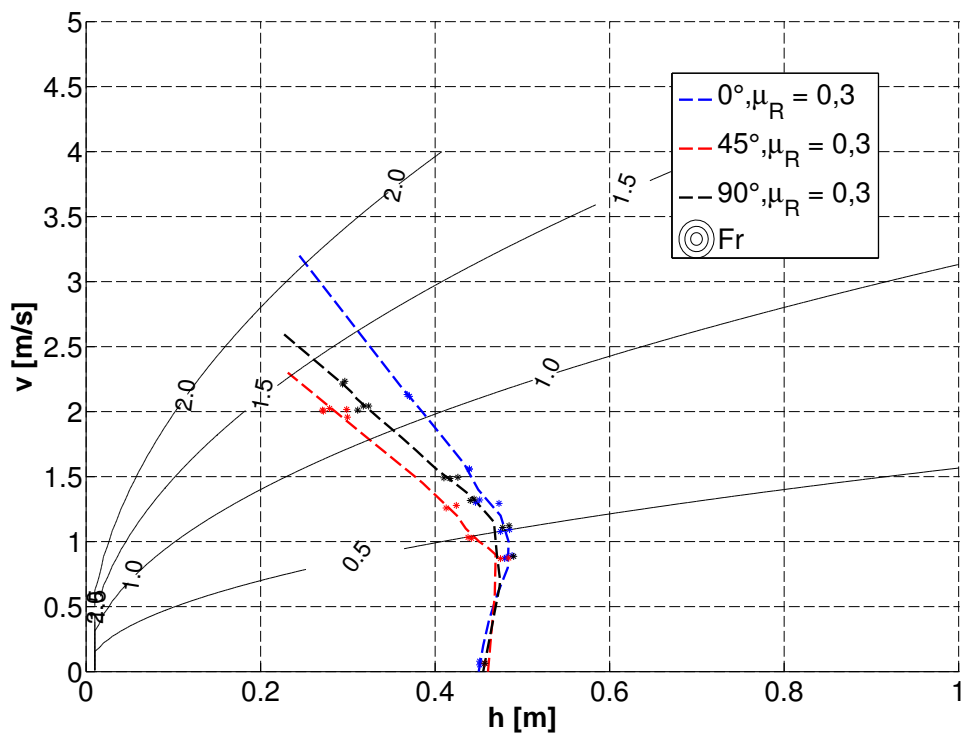


Abbildung 4.9: Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen; $\mu_R = 0,3$; Leergewicht

Die grafischen Darstellungen der Messergebnisse zeigen Abb. 4.8, 4.9 und 4.10. Die Darstellung erfolgt entsprechend den in der Literatur üblicherweise verwendeten Stabilitätskurven. Auf der Ordinate sind die kritischen Fließgeschwindigkeiten zu den entsprechenden Wassertiefen auf der Abszisse aufgetragen. Die Größen sind bereits über die Modellgesetze auf Naturgrößen umgerechnet, jeder einzelne Punkt stellt einen Instabilitätspunkt dar (Bewegung des Versuchskörpers im Modellversuch). In den Diagrammen sind die Froude-Zahlen

als durchgezogene Linien dargestellt.

Im ersten Versuchsdurchlauf (siehe Abb. 4.8) wird ein Reibungskoeffizient von 0,7 gewählt (Materialkombination Elastomer und verzinkter Edelstahl). Das Gewicht entspricht dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeuges (siehe Tab. 4.1). Bei hydrostatischen Verhältnissen wird das Modellfahrzeug bei Wassertiefen von etwa 0,52 m (Natur) instabil, da hier die Auftriebskraft der Gewichtskraft entspricht. Bei höheren Froude-Zahlen erreicht die zugehörige kritische Wassertiefe ihr Maximum, da die dynamische Absenkung des Wasserspiegels um das Auto die Auftriebskraft vermindert. Bei Froude-Zahlen größer als 0,5 nimmt der Einfluss der Strömungskraft auf die Stabilität zu.

Die Untersuchungsergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten, aufgrund des größeren Modellmaßstabs sind sie in einigen Bereichen sogar detaillierter. Die kritische Fließgeschwindigkeit zeigt eine klare Abhängigkeit vom Anströmwinkel. Das Fahrzeug ist bei einer Ausrichtung frontwärts entgegen der Strömung (0°) in seiner stabilsten Position während eine Ausrichtung von 45° die instabilste Position darstellt. Die Stabilitätskurve für einen Anströmwinkel von 90° liegt zwischen der 45° - und der 0° -Kurve.

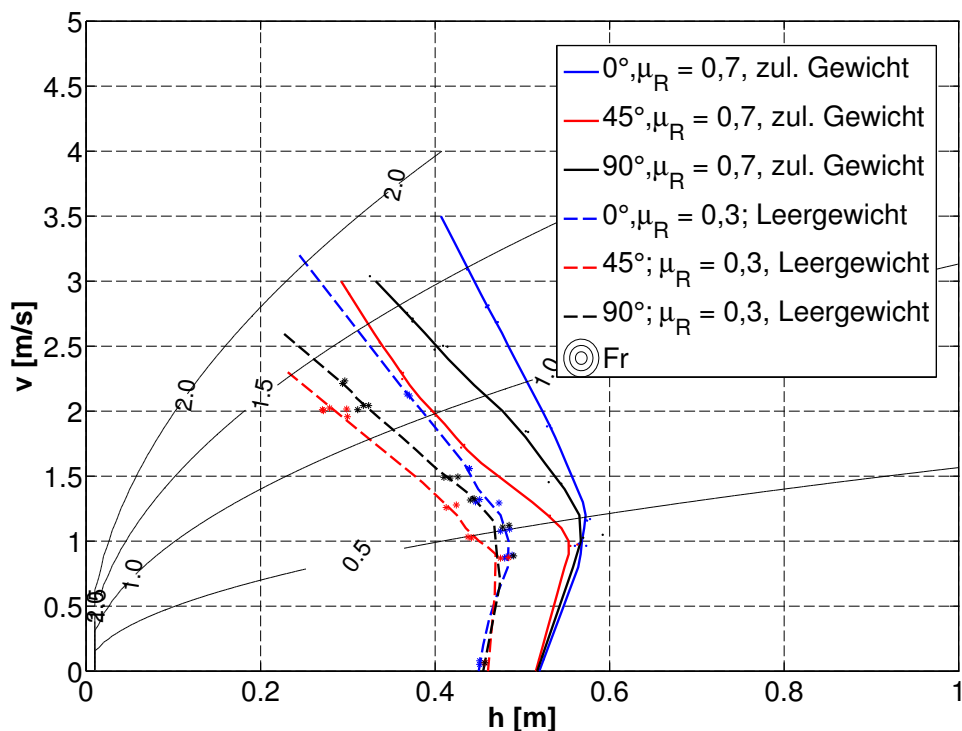


Abbildung 4.10: Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen im Vergleich

In der zweiten Versuchsreihe (siehe Abb. 4.9) werden mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu_R = 0,3$ und einem Versuchskörper, der dem Leergewicht des Kraftfahrzeugs entspricht, die pessimalen Randbedingungen gewählt. Im statischen Zustand wird der Versuchskörper bereits

bei einer Wassertiefe von 0,45 m (Natur) instabil. Der Verlauf der einzelnen Stabilitätskurven zeigt eine ähnliche Charakteristik wie die Verläufe der ersten Versuchsreihe, insgesamt sind die kritischen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für eine beginnende Instabilität entsprechend kleiner. Bei geringen Geschwindigkeiten ist die Auftriebskraft dominierend und für die Instabilität maßgebend, während sich bei höheren Fließgeschwindigkeiten der Einfluss der zunehmenden Strömungskraft bemerkbar macht. In der Abb. 4.10 ist ein Vergleich der beiden Messreihen dargestellt.

Untersuchungsergebnisse Einsatzfahrzeug Die Ergebnisse der Stabilitätsmessungen des Einsatzfahrzeuges finden sich in Tab. 8.5 (Anhang). Die Tabelle ist analog zu den Personenkraftfahrzeug-Messungen aufgebaut. Die Messungen werden mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu_R = 0,3$ und bei Leergewicht des Fahrzeuges durchgeführt.

Die Abbildung 4.11 zeigt die Versuchsergebnisse der Stabilitätsmessungen des Einsatzfahrzeuges. Die aufgetragenen Punkte stellen die kritische Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wassertiefe dar.

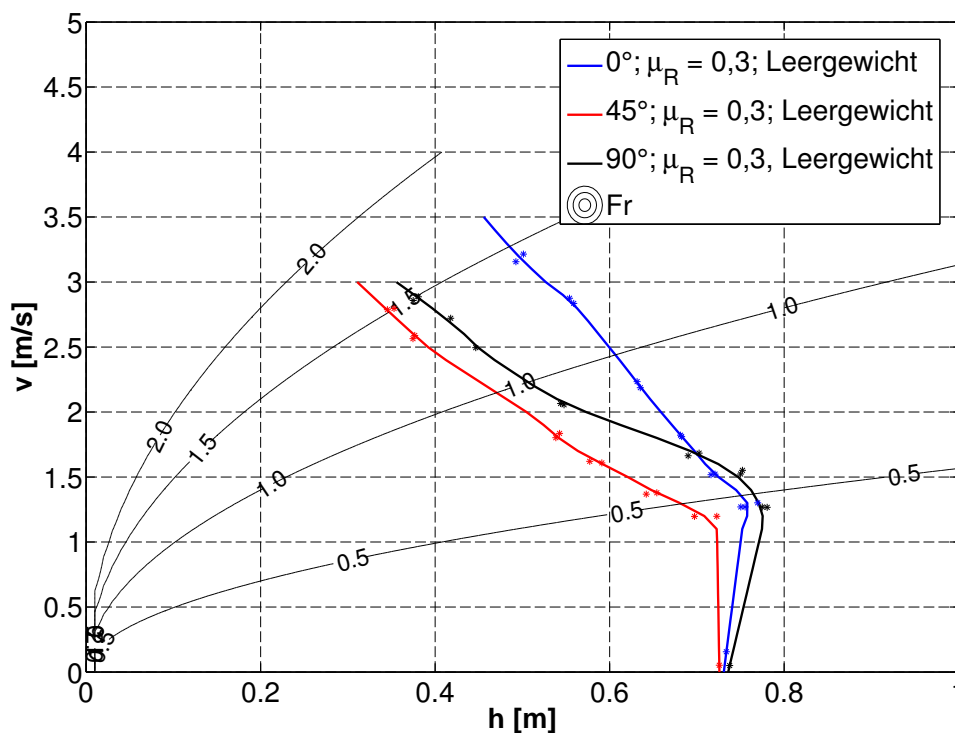


Abbildung 4.11: Stabilitätskurven für das Einsatzfahrzeug; $\mu_R = 0,3$; Leergewicht

Die Stabilitätskurven weisen, analog zu den bereits durchgeführten Personenkraftwagen-Versuchen, einen ähnlichen charakteristischen Verlauf auf. Das Einsatzfahrzeug wird im Naturmaßstab aufgrund des vergleichsweise hohen Leergewichts (in Relation zu dem Personenkraftwagen) im hydrostatischen Zustand erst bei einer Wassertiefe von 0,73 m instabil.

An diesem Punkt sind Auftriebskraft und Gewichtskraft äquivalent. Der Funktionsverlauf ergibt sich durch den bis zu einer Froude-Zahl von 0,5 überwiegenden Einfluss der Auftriebskraft und dem anschließend erhöhten Einfluss der Strömungskraft, verursacht durch deutlich größere Fließgeschwindigkeiten.

Erhöhte Fließgeschwindigkeiten führen weiterhin zu einer Absenkung des Wasserspiegels um das Modellfahrzeug und somit zu einer verringerten Auftriebskraft. In Abb. 4.11 sind die unterschiedlichen Stabilitätsgrenzwerte der drei verschiedenen Anströmwinkel zu erkennen. Bei einer 45°-Position wird das Fahrzeug im Vergleich zur 0°- und zur 90°-Position bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten instabil. Eine genauere Differenzierung zwischen der 0°- und 90°-Anströmungssituation zeigt, dass bis zu einer Froude-Zahl von 0,6 das Fahrzeug in der 90°-Position und für Froude-Zahlen $> 0,6$ in der 0°-Position stabiler ist.

4.4.2 Druckmessungen (Einsatzfahrzeug)

Ausführliche Druckmessungen zur Erfassung der durch die Strömung einwirkenden Kräfte werden nur am Einsatzfahrzeug durchgeführt.

Das Prinzip der Druckmessung beruht auf einem diskreten Messverfahren. Die Vorder- und Seitenflächen des Versuchskörpers werden hierzu in einzelne Teilflächen unterteilt, in deren Flächenschwerpunkten jeweils eine Druckmessbohrung angebracht ist. An den Messpunkten werden die anstehenden Drücke mit Pitotrohren bestimmt. Der an einem Messpunkt ermittelte Druck wird über die jeweilige Teilfläche integriert und somit die angreifende Kraft ermittelt. Aus der Summe der einzelnen Kräfte je Teilfläche ergibt sich schließlich die auf den Körper wirkende Gesamtkraft. Um das Verfahren auf wenige Messstellen zu beschränken, werden die Flächen symmetrisch eingeteilt. Der Reibungswiderstand bleibt bei der reinen Druckmessung unberücksichtigt.

Die Druckmessungen dienen der Bestätigung der Stabilitätsmessungen sowie der detaillierten Nahfelduntersuchung des umströmten Versuchskörpers.

Versuchskörper Zur Messung des Druckwiderstandes des Einsatzfahrzeuges wird ein weiterer Versuchskörper im gleichen Maßstab angefertigt. Um eine Bewegung des Versuchskörpers in der Kipprinne bei den kritischen Abflusszuständen zu verhindern, wird das Gewicht des Körpers erhöht.

An der Modellunterseite, der Seitenfläche sowie der Vorderseite werden vier, sechs bzw. weitere vier Druckmessbohrungen angebracht (siehe Abb. 4.12). Über Verbindungsschläuche sind Pitotrohre mit den Druckmessbohrungen verbunden, die vor einer Messkala auf Millimeterpapier positioniert sind. In den Pitotrohren befinden sich Schwimmer, die eine exakte

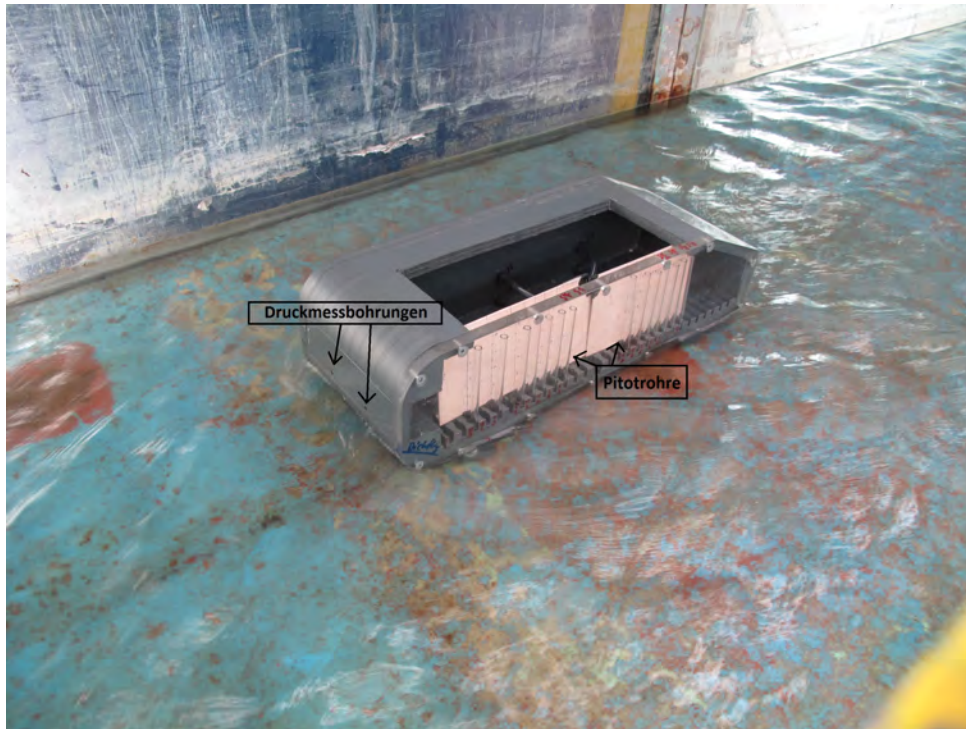


Abbildung 4.12: Versuchskörper zur Erfassung der Druckverteilung

Erfassung des statischen Drucks sicherstellen. Über eine durchsichtige Plexiglasscheibe an der Seitenfläche kann der statische Druck im Pitotrohr während der Versuchsdurchführung abgelesen werden.

Versuchsdurchführung Der Versuchskörper wird in der Strömungsrinne in einem vorgegebenen Anströmwinkel zur Strömung lokalisiert. Die hydraulischen Randbedingungen werden äquivalent zu den Randbedingungen der Stabilitätsmessungen eingestellt. Auf diese Weise wird die Druckverteilung unter Strömungsbedingungen im Bereich der Stabilitätsgrenze ermittelt.

Da die Wasserspiegellage unmittelbar vor dem Versuchskörper bei unterschiedlichen Abflusszuständen variiert, befindet sich die Druckmessbohrung je nach Fließzustand nicht mehr direkt im Flächenschwerpunkt der eingeteilten Teilfläche. Aus diesem Grund wird eine Korrektur des gemessenen Druckes um einen statischen Anteil eingeführt. Aus dem korrigierten Druck wird die jeweilige Teilkraft ermittelt, durch eine Integration der Teilkräfte über die Oberfläche des Versuchskörpers ergibt sich die auf das Fahrzeug wirkende Gesamtkraft.

Durch die Verschiebung des Schwerpunkts ändert sich auch die horizontale Geschwindigkeitskomponente und somit der dynamische Druckanteil. Hierbei handelt es sich jedoch um minimale Änderungen, die vernachlässigt werden können.

Da auf der Rückseite des Versuchskörpers keine Druckmessbohrungen vorgesehen sind,

jedoch ein gewisser Druckanteil auch von dieser Seite auf das Fahrzeug wirkt, wird die Wasserspiegellage im Nachlauf des Versuchskörpers mit einem Ultraschallsensor erfasst und der gemessene Gesamtdruck entsprechend korrigiert. Ebenfalls muss berücksichtigt werden, dass die Druckmessbohrungen auf der gekrümmten Vorderseite im Falle des frontal angeströmten Versuchskörpers nicht horizontal ausgerichtet sind und somit auch eine vertikale Kraftkomponente erfasst wird.

Die Aufnahmen von Bildern und Videos dienen der Dokumentation sowie einer präzisen Erfassung der instationären Druckhöhe. Die Videos ermöglichen zudem die gezielte Bestimmung der Druckhöhenfluktuation über einen bestimmten Zeitraum, so dass anschließend ein Mittelwert der Druckhöhe im betrachteten Bereich bestimmt werden kann.

Untersuchungsergebnisse Einsatzfahrzeug Die Ergebnisse der Druckmessungen sind in Tab. 8.6 (Anhang) in der vorletzten Spalte dargestellt. Abb. 4.13 zeigt die Veränderung der einwirkenden Druckkraft auf den Modellkörper in Abhängigkeit des Anströmwinkels und der Froude-Zahl der Strömung im ungestörten Zustand. Es wird deutlich, dass die resultierende Absolutkraft bei der 90°-Position den zwei- bis dreifachen Wert im Vergleich zur 0°-Position annimmt.

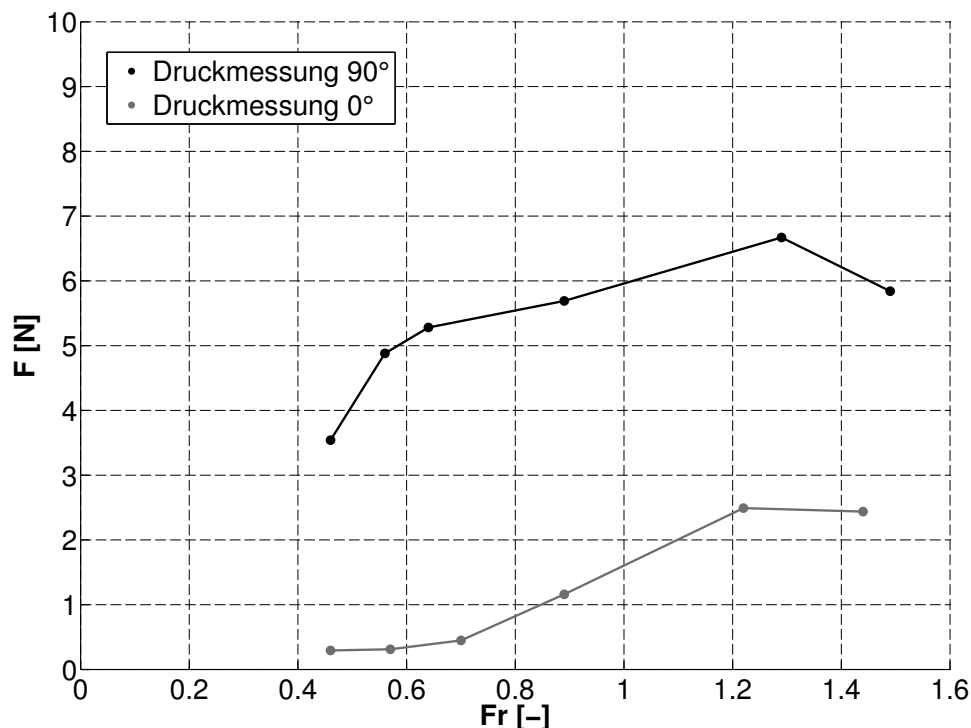


Abbildung 4.13: Ergebnisse der Druckmessungen in Abhängigkeit der Froude-Zahl

Die Zunahme der Strömungskräfte ergibt sich durch eine Vergrößerung der Querschnittsfläche des Fahrzeugs in Strömungsrichtung und durch die damit verbundene höhere Aufstauwirkung des Modells als Strömungshindernis. Für einen Anströmwinkel von 45° wird

keine Druckmessung durchgeführt, da die Druckmessbohrungen nur für kleine Winkelabweichungen zur Hauptströmungsrichtung hinreichend genaue Ergebnisse ermöglichen.

4.4.3 Strömungskraftmessungen (Einsatzfahrzeug)

Für die Strömungskraftmessung wird der Versuchskörper mit Metalldrähten an vier Befestigungspunkten in der Rinne aufgehängt. Der Abstand vom Rinnenboden zum Fahrzeug entspricht der Höhe der bei den Stabilitätsversuchen eingebrachten Bodenplatte. Bei der 0°- sowie bei der 90°-Messung wird von einem Anschlagpunkt am Modell ein dünner Metalldraht über eine Umlenkrolle mit dem Kraftaufnehmer verbunden. Der Kraftaufnehmer ist an einem Querträger in ausreichendem Abstand zur Aufhängung des Modellobjekts befestigt (siehe Abb. 4.14). Während der Versuche befindet sich die Umlenkrolle knapp über der Oberwasserspiegellage, so dass keine Beeinträchtigung der Strömung stattfindet.



Abbildung 4.14: Aufhängung des Versuchskörpers in der Strömungsrinne.

Da der Schwerpunkt des verdrängten Wasservolumens bei verschiedenen Wasserständen nicht dem Massenschwerpunkt des Modells entspricht, muss das durch die Auftriebskraft verursachte Drehmoment berücksichtigt werden. Der Einfluss der Auftriebskraft wird minimiert, indem das Modell mit Gewichten beschwert wird. Die resultierende Gewichtskraft (Gewichtskraft des Fahrzeuges abzüglich der Auftriebskraft) zeigt somit immer in Richtung des Rinnenbodens, der Einfluss der Auftriebskraft ist vernachlässigbar klein.

Die Wasserstände zu den jeweiligen Abflusszuständen werden über einen Messpegel bestimmt, der sich oberstrom und in ausreichender Entfernung zum Modell befindet. Der Pegel ist an einer Stelle lokalisiert, an dem der durch den Versuchskörper hervorgerufene Rückstau keinen Einfluss auf die Strömung im Oberwasser hat. Die Messungen der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit repräsentieren daher analog zu den Stabilitätsmessungen eine ungestörte Anströmung.

Versuchsdurchführung Zur Bestimmung der Kraftwirkung werden die aus den Stabilitätsmessungen bestimmten, kritischen hydraulischen Randbedingungen eingestellt. Die über ein Zeitintervall gemittelte Krafteinwirkung kann auf diese Weise in Bezug zum unbelasteten Ausgangszustand bestimmt werden.

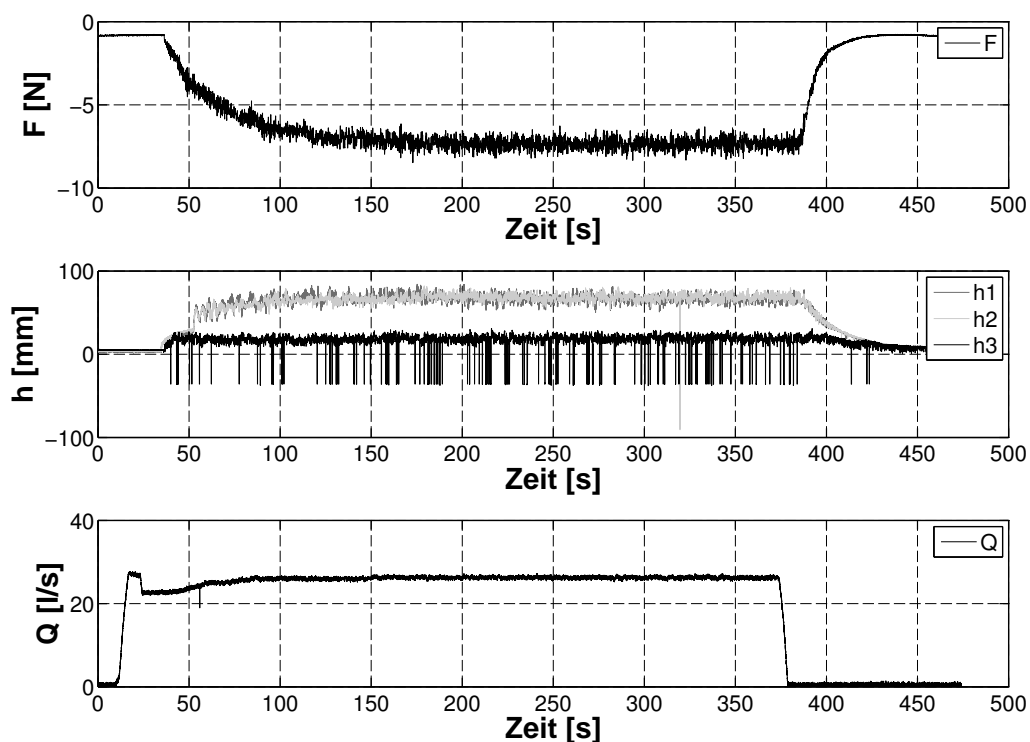


Abbildung 4.15: Beispielhafter Versuchsablauf einer Strömungskraftmessung

Ein beispielhafter Versuchsablauf einer Strömungskraftmessung ist in Abb. 4.15 dargestellt. Im ersten Teildiagramm ist die gemessene Kraft über die Zeit aufgetragen. Wird der Kraftaufnehmer auf Zug beansprucht, ist die gemessene Kraft mit einem negativen Vorzeichen versehen. Die im Diagramm sichtbaren Schwingungen während der Kraftmessung sind auf die minimale Bewegung der Modellaufhängung als Ursache der dynamischen Umströmung zurückzuführen. Im Mittel haben diese Schwingungen jedoch keinen Einfluss auf die erfasste Strömungskraft.

Im zweiten Teildiagramm sind die Wasserstände in der Strömungsrinne dargestellt. Die

Wasserstandssensoren h_1 und h_2 befinden sich oberstrom des Versuchskörpers, h_3 befindet sich unterstrom. Die in der Abbildung zu erkennenden Ausreißer in den Messungen von h_3 entstehen, wenn das vom Ultraschallsensor ausgesendete Signal auf einer gekrümmten Oberfläche so reflektiert wird, dass es beim Rücklauf außerhalb des Erfassungsbereiches des Empfängers liegt. Diese Ausreißer werden für die weitere Datenauswertung mittels eines Filters herausgenommen.

Untersuchungsergebnisse Einsatzfahrzeug Die detaillierten Ergebnisse der Kraftmessungen sind in Tab. 8.6 (Anhang) dargestellt. Die Untersuchungen werden für die Anströmwinkel 0° und 90° durchgeführt, es liegt eine gute Übereinstimmung mit den Druckmessungen vor.

Die Variable Δz bezeichnet den Freihang des aufgehängten Versuchskörpers über dem Rinnenboden. Neben der kritischen Wassertiefe und der kritischen Fließgeschwindigkeit ist die auf das Fahrzeug wirkende Widerstandskraft F_W aufgeführt.

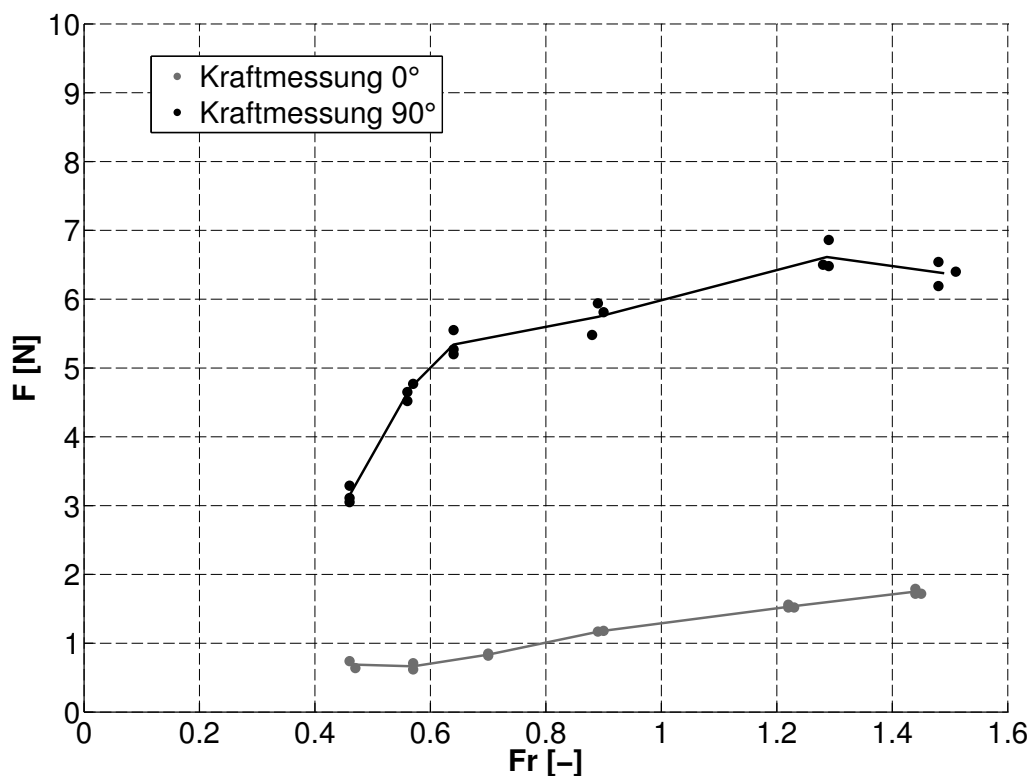


Abbildung 4.16: Ergebnisse der Kraftmessungen für das Einsatzfahrzeug

Abb. 4.16 zeigt die Ergebnisse der Kraftmessungen in Abhängigkeit des Anströmwinkels und der Froude-Zahl der Strömung im ungestörten Zustand. Bei dem mit der Längsseite quer zur Strömung ausgerichteten Versuchskörper treten aufgrund der deutlich größeren Anströmfläche absolut auch deutlich größere Kräfte auf. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Körper früher instabil wird (vgl. Ergebnisse der Stabilitätsmessungen, Abb. 4.11).

4.4.3.1 Bestimmung von Widerstandsbeiwerten

Die experimentelle Bestimmung der Strömungskräfte ermöglicht die Berechnung von Widerstandsbeiwerten für teilumströmte Fahrzeuge. Diese dimensionslose Kennzahl ergibt sich aus dem Verhältnis von messtechnisch erfasster Gesamtkraft zu berechneter Krafteinwirkung im Staupunkt des Modellkörpers und ist sowohl von der Umströmung des Modells als auch von der Froude-Zahl abhängig. Die Umströmung des Modells wird wiederum durch die Modellgeometrie und die Anströmrichtung beeinflusst.

Beispielhaft ist der Widerstandsbeiwert des teilumströmten Versuchskörpers für den Anströmwinkel von 90° in der Abb. 4.17 dargestellt. Eine Polynomfunktion zweiten Grades beschreibt die Ausgleichsfunktion des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Froude-Zahl.

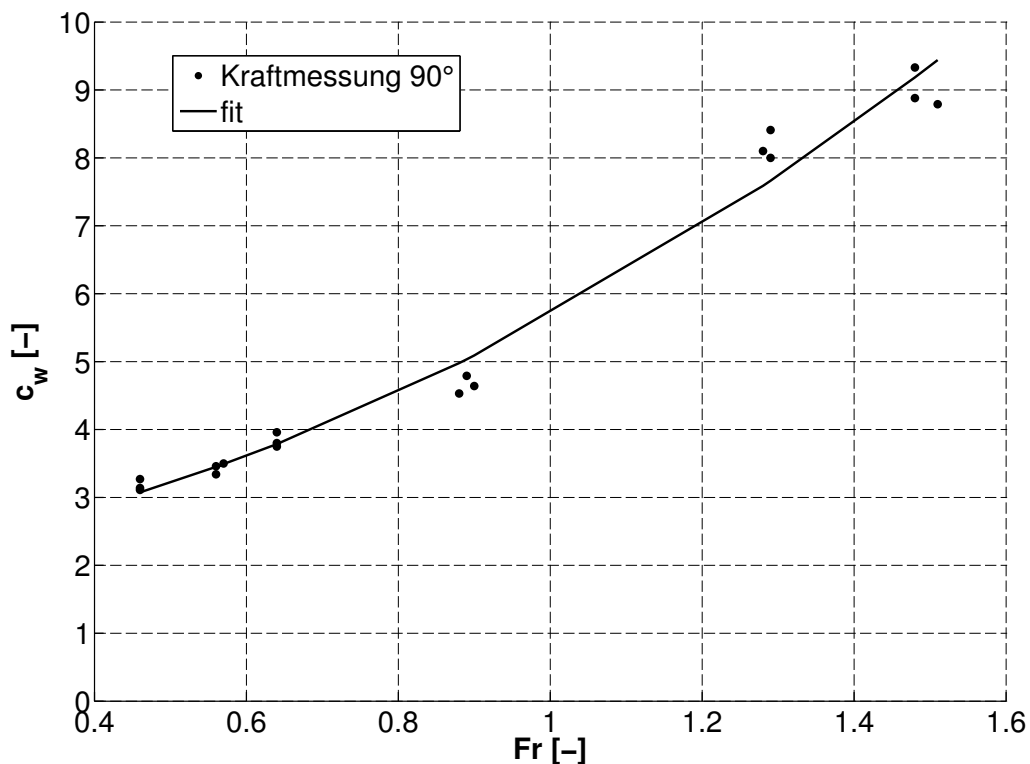


Abbildung 4.17: Widerstandsbeiwert des Versuchskörpers bei einem Anströmwinkel von 90°

Die Projektionsflächen des Modells senkrecht zur Anströmung werden einheitlich auf die kritische Wassertiefe im **ungestörten** Zustand bezogen. Aus diesem Grund nehmen die Widerstandsbeiwerte bei Teilumströmung größere Zahlenwerte als bei vollumströmten Körpern an, die Aufstauwirkung des Versuchsmodells bleibt bei der Berechnung der wasserbenetzten Projektionsfläche somit unberücksichtigt. Ebenso bedingt der Bezug auf den ungestörten Zustand deutlich größere Zahlenwerte der Widerstandsbeiwerte der 90° -Position im

Vergleich zur 0° -Position.

Die Wahl der Bezugsfläche vereinheitlicht und generalisiert die weiteren Berechnungen. Durch die Vorgabe einer Wassertiefe und einer Fließgeschwindigkeit im Zustand ohne Strömungshindernis sowie dem Anströmwinkel kann die Kraftwirkung der Strömung auf den Versuchskörper berechnet werden.

4.4.4 Auftriebskraftmessungen

Die Auftriebskraft eines umströmten Körpers beeinflusst die der Strömung entgegen wirkende Haltekraft maßgeblich und bestimmt den Punkt der Instabilität. Da das Fahrzeug bei größeren Fließgeschwindigkeiten dynamisch umströmt wird, kommt es am Körper zu Wasserspiegelfluktuationen.

In vorangegangenen Untersuchungen wurde die Auftriebskraft vereinfacht mit Hilfe einer horizontalen Wasserspiegellage berechnet (Keller u. a. 1992). Dieser statische Ansatz ist aus oben genannten Gründen in Bereichen größerer Froude-Zahlen nicht mehr anwendbar. Um die dynamische Auftriebskraft zu ermitteln, werden Auftriebskraftmessungen am Einsatzfahrzeug (Modellmaßstab) durchgeführt.

Ein weiterer Teil der Untersuchungen umfasst außerdem Auftriebskraftmessungen im Naturmaßstab. Diese werden für das Personenkraftfahrzeug durchgeführt und bieten die Möglichkeit, die Ergebnisse der Modellversuche mit denen der Messungen im Maßstab 1:1 (Naturversuch) zu vergleichen. Im Naturversuch wird die statische Auftriebskraft erfasst, wodurch Rückschlüsse auf das Eindringverhalten des Wassers in das Fahrzeug gezogen werden können. Ebenso kann das Auftriebsverhalten mit dem des komplett abgedichteten Versuchskörpers verglichen werden.

4.4.4.1 Bestimmung des dynamischen Auftriebs im Modellmaßstab (Einsatzfahrzeug)

Für die Messung des dynamischen Auftriebs des Einsatzfahrzeuges wird eine Rampe in der Strömungsrinne aufgebaut. In die Rampe wird ein mit drei wasserdichten Kraftsensoren ausgerüsteter, versenkbarer Rahmen implementiert. Der Modellkörper wird auf einer drehbaren Bodenplatte positioniert, die sich innerhalb des Rahmens befindet und auf den drei Kraftsensoren gelagert ist.

Um den gesamten Durchfluss über die Rampe abzuleiten, werden einzelne Teilbereiche der Konstruktion abgedichtet und vor der Messung mit Wasser befüllt. Durch diese Maßnahmen wird eine Unterströmung der Rampe vermieden. Da die Bodenplatte ebenfalls eine

Auftriebskraft erfährt, wird der mit den Kraftsensoren erfasste Wert korrigiert:

$$F_{A,Fahrzeug} = F_{G,Platte} - F_{A,Platte} + F_{G,Fahrzeug} - F_{gem} \quad (4.8)$$

Tab. 8.7 und 8.8 (Anhang) zeigen die Messergebnisse. Die Randbedingungen im Zulauf werden entsprechend den Stabilitätsmessungen gewählt. Um Messunsicherheiten zu minimieren, werden für jeden Zustand mehrere Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse gemittelt werden. Die gemessenen Auftriebskräfte (Modellmaßstab) sind in der vorletzten Spalte der Tabellen eingetragen.

4.4.4.2 Bestimmung des statischen Auftriebs im Naturmaßstab (Personenkraftwagen)

Für die Bestimmung des statischen Auftriebs im Naturmaßstab wird ein Personenkraftwagen (VW Golf 3) an vier Kraftaufnehmern in einem Stahlbecken in der Versuchsanstalt (VA) für Wasserbau aufgehängt. Die Befüllung des Stahlbeckens mit Wasser erfolgt über den internen Hallenkreislauf. Das Wasser wird über zwei außenstehende Hochbehälter zugeführt und kann in den Tiefbehälter wieder entleert werden.



Abbildung 4.18: Aufhängung des Fahrzeuges im Stahlbecken



Abbildung 4.19: Steigender Wasserspiegel während einer Auftriebskraftmessung

Die Körperform des Fahrzeuges ist mit der Form des getesteten Modells (Stabilitätsmessungen) identisch. Für die Untersuchungen in der Versuchsanstalt werden die Betriebsflüssigkeiten entleert. Das Fahrzeug selbst ist nicht mehr fahrtüchtig, jedoch sind alle wichtigen technischen Bestandteile enthalten. Die Kraftaufnehmer sind über Verschraubungen an den Radnaben sowie an einem dem Becken aufgelagerten Rahmen befestigt (siehe Abb. 4.18).



Abbildung 4.20: Ultraschallsensor im Innenbereich des Fahrzeuges



Abbildung 4.21: Ultraschallsensor im Beckenbereich

Im Beckenbereich sowie im Innenraum des Fahrzeuges befinden sich zwei Ultraschallsensoren zur Erfassung der Wasserstände (siehe Abb. 4.20 und 4.21).

Der Ultraschallsensor im Innenraum ist hinter dem Beifahrersitz montiert und misst den Wasserstand über dem Boden des Innenraumes. Der zweite Ultraschallsensor ist an einem Querträger der Stahlwanne montiert und auf den Boden des Beckens gerichtet. Er erfasst den Wasserstand im Becken. Der Zulauf wird über einen Kugelhahn reguliert und mit einem magnetisch induktiven Durchflussmesser erfasst.

In Abb. 4.22 ist der typische Verlauf einer Auftriebskraftmessung dargestellt. Die Messdaten der Ultraschallsensoren im Becken und im Auto sind in der ersten Teilabbildung zu sehen. Zu Beginn der Messung ist das Becken leer, der Beckenwasserstand ist auf den Nullwert referenziert. Der Ultraschallsensor im Fahrzeug erfasst zu diesem Zeitpunkt die Höhenlage des Bodens in der Fahrgastzelle.

Nach ca. 115 s wird der Schieber geöffnet und ein kontinuierlicher Volumenstrom von ca. 50 l/s strömt in das Becken. Dies ist in der dritten Teilabbildung ersichtlich. Insgesamt stellt sich im Becken keine nennenswerte Strömungsgeschwindigkeit und somit keine Strömungskraftwirkung auf das Fahrzeug ein.

Mit anhaltendem Zustrom steigt der Wasserstand im Becken, während im Innenraum noch kein Wasser vorhanden ist. Zum Zeitpunkt $t = 370$ s steigt der Beckenwasserstand über den Boden des Innenraumes an. Wasser dringt ein und mit einer zeitlichen Verzögerung erhöht sich auch der Wasserstand im Fahrzeug. Nach Schließen des Schiebers strömt Wasser in das Fahrzeug nach, der Beckenwasserstand nimmt bis zum Ausgleich der Wasserspiegellagen

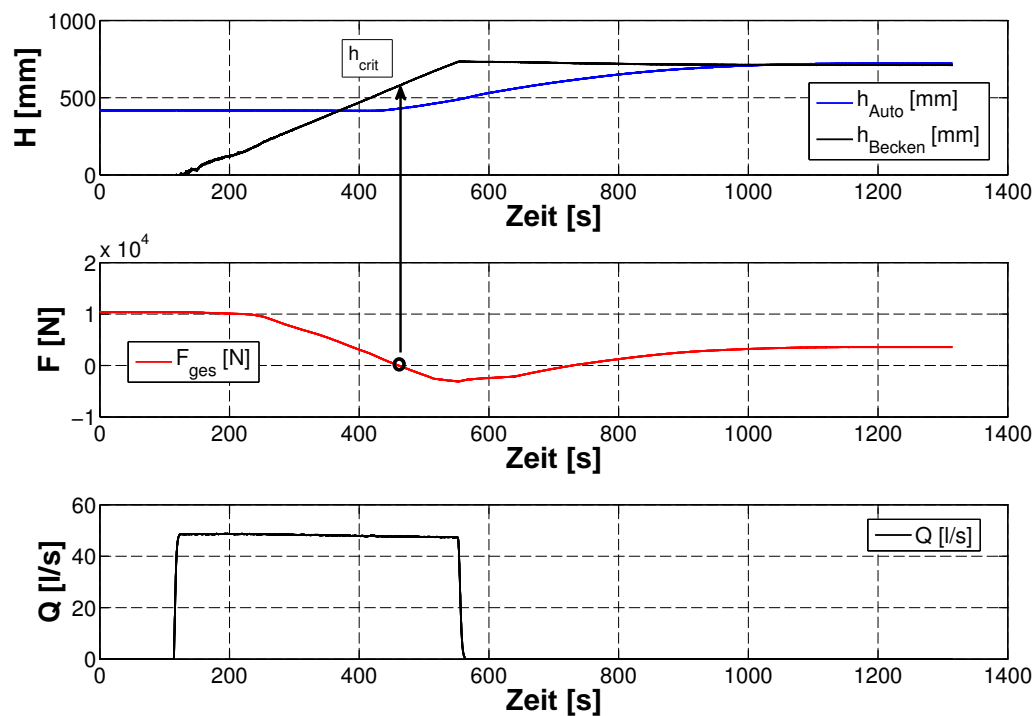


Abbildung 4.22: Beispielhafte Auftriebskraftmessung im Naturmaßstab

ab, der Wasserstand im Fahrzeug zu.

Die gemessene Gesamtkraft der vier Kraftaufnehmer ist in der zweiten Teilabbildung dargestellt. Das im Naturversuch verwendete Fahrzeug ist mit einem Ausgangsgewicht von 1056 kg etwas leichter als das umgerechnete Gewicht des Modellfahrzeuges (Stabilitätsmessungen). Im Laufe der Messung nimmt die Auftriebskraft stetig zu, erst mit zunehmender Wassermenge im Fahrzeug kommt es zu einer Verringerung. Der Zeitpunkt, an dem sich die Auftriebskraft im Gleichgewicht mit der Gewichtskraft befindet, ist in der zweiten Teilabbildung mit einem schwarzen Kreis markiert. Die resultierende Kraft ist null und die entsprechende Wassertiefe stellt die kritische Wassertiefe für den statischen Zustand dar.

Die kritische Wassertiefe ist neben der Körperform des Fahrzeuges auch vom zuströmenden Volumenstrom abhängig. Bei einem langsamen Füllvorgang des Beckens dringt im Vergleich zum umgebenden Wasserspiegel schneller Wasser in das Fahrzeug ein, woraus ein geringerer Auftrieb resultiert. Dies ist in Abb. 4.23 zu sehen. Auf der Ordinate sind die kritischen Wassertiefen über verschiedene Volumenströme auf der Abszisse aufgetragen.

Die kritischen Wassertiefen der Naturversuche nehmen Werte in einem Bereich zwischen 0,57 und 0,63 m an. Im Vergleich zu den Modellversuchen, bei denen die gemittelte kritische Wassertiefe im statischen Zustand bei 0,47 m liegt, ergeben sich Differenzen in der Größenordnung von 10 bis 16 cm. Diese Unterschiede sind erwartet und begründen

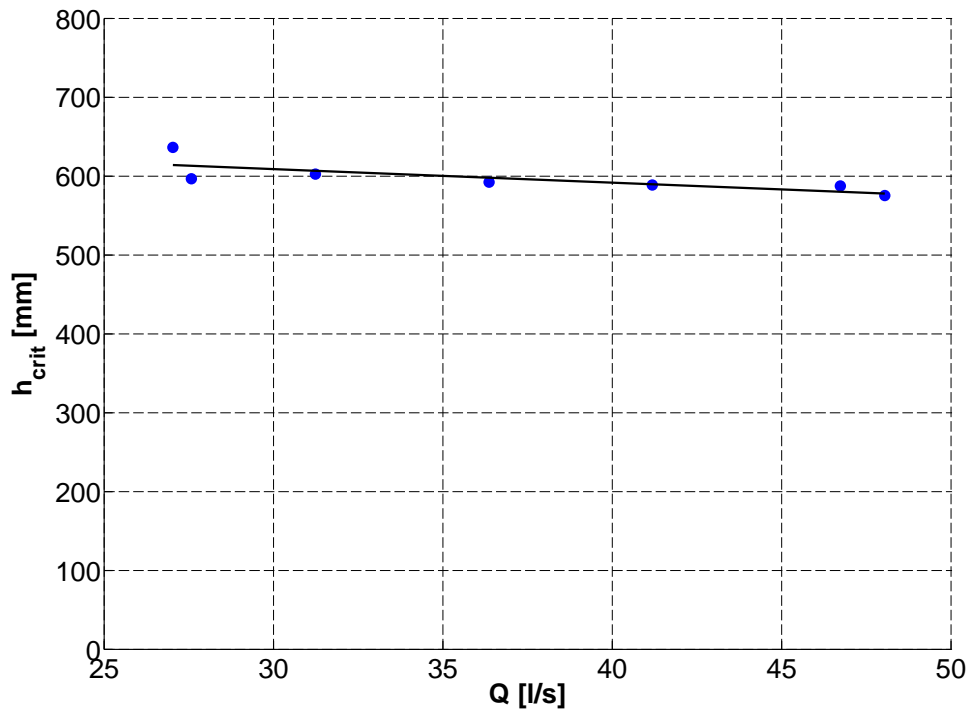


Abbildung 4.23: Kritische Wassertiefen der Auftriebskraftmessungen

sich durch das Eindringen von Wasser in das im Naturversuch verwendete Fahrzeug. Dies bedeutet, dass durch das Eindringen von Wasser in den Fahrzeuginnenraum eine zusätzliche Sicherheit von ca. 10 cm in der umgebenden Wasserspiegelhöhe bzgl. des Fahrzeugauftriebs gegeben ist.

4.5 Zusammenführung der Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen zusammengeführt und daraus ein Verfahren zur Berechnung der kritischen Fließgeschwindigkeit bei veränderten Randbedingungen (F_G und μ_R) abgeleitet.

Mit den vorhandenen Messungen stehen Funktionen zur Bestimmung der Strömungskraft und des Auftriebs zur Verfügung. Diese beiden Parameter sind von der Körperform, jedoch nicht von der Gewichtskraft und dem Reibungsbeiwert abhängig. Daher ist es möglich, die Stabilitätskurven unter Veränderung dieser Parameter zu berechnen.

Legt man die Bedingung $F_R = F_W$ zugrunde, die gerade an den Stützstellen der Stabilitätskurven erfüllt wird, so lassen sich die Auftriebskräfte oder die Strömungskräfte durch Anwendung des Kräftegleichgewichtes bestimmen. Beispielhaft wird dies anhand der Auftriebskräfte dargestellt. Die Auftriebskraft lässt sich als Differenz von Gewichtskraft

und Normalkraft darstellen:

$$F_A = F_G - F_N = F_G - \frac{F_R}{\mu_R} \quad (4.9)$$

An den Stabilitätspunkten gilt $F_R = F_W$. Daraus folgt:

$$F_A = F_G - \frac{F_W}{\mu_R} \quad (4.10)$$

Mit den Strömungskräften an den Stützpunkten der Stabilitätskurven werden die Auftriebskräfte berechnet. Der Vergleich der gemessenen ($F_{A, gem}$) mit den berechneten Auftriebskräften ($F_{A, ber}$) in Tab. 8.7 und 8.8 (siehe Anhang) zeigt, dass für beide Winkelpositionen (0° und 90°) bei kleinen Rinnenneigungen gute Übereinstimmungen vorliegen. Lediglich bei der 0° -Position treten bei größeren Neigungen Abweichungen auf.

Diesen Abweichungen liegen mehrere Ursachen zugrunde. Bei den Rinnenmessungen werden Rampen aus Holz eingesetzt, die eine andere Rauheit als der Rinnenboden aufweisen. Hierdurch wird das Geschwindigkeitsprofil lokal beeinflusst. Um diesen Fehler zu korrigieren, wird die Rinnenabsenkung leicht verändert, so dass die Randbedingungen denen der Stabilitätsmessungen entsprechen. Eine ganz exakte Einstellung der Randbedingungen ist jedoch meist nicht möglich, so dass sich Unterschiede zwischen Messung und Berechnung ergeben (vgl. z. B. Messung Nr. 00_4,6 und 00_5,7).

Andererseits werden bei der vergleichenden Berechnung der Auftriebskräfte drei verschiedene Messprinzipien (Stabilitätsmessungen, Strömungskraftmessungen und Auftriebsmessungen) miteinander kombiniert. Bei jeder dieser Messreihen ist von einem gewissen Messfehler auszugehen (Messtechnik, Bestimmung des Instabilitätszustandes, usw.), so dass eine genaue Übereinstimmung nicht erwartet werden kann. Im Rahmen dieser Messgenauigkeit werden die Stabilitätsmessungen durch die Auftriebs- und die Strömungskraftmessungen bestätigt. Mit den zusätzlich gewonnenen Daten wird ein Verfahren zur Berechnung der kritischen Fließgeschwindigkeit bei veränderten Randbedingungen abgeleitet.

4.5.1 Berechnung der Stabilitätskurven unter veränderten Randbedingungen

Bei Variation des Reibungskoeffizienten sowie des Fahrzeuggewichtes ändert sich der Kurvenverlauf der Stabilitätsfunktionen. Um den Einfluss des Reibungskoeffizienten und der Gewichtskraft zu quantifizieren, werden die Stabilitätskurven des Einsatzfahrzeuges (Anströmwinkel = 0°) für die Reibungskoeffizienten $\mu_R = 0,2, 0,3$ und $0,5$ berechnet. Ebenso

wird das Gewicht des Fahrzeuges zwischen Leergewicht und zulässigem Gesamtgewicht variiert.

Die Berechnung der kritischen Fließgeschwindigkeit im Naturmaßstab beruht auf einem iterativen Verfahrensablauf mit den folgenden Teilschritten:

1. Vorgabe eines kritischen Wasserspiegels h_{crit} ,
2. Annahme einer kritischen Fließgeschwindigkeit $v_{crit,1}$,
 - Berechnung der Froude-Zahl aus h_{crit} und $v_{crit,1}$,
 - Berechnung der Auftriebskraft F_A ,
 - Bestimmung der resultierenden Gewichtskraft ($F_N = F_G - F_A$),
 - Ermittlung der Reibungskraft als Reaktionskraft $F_R = \mu_R \cdot F_N$,
 - Berechnung des c_W -Wertes,
 - Berechnung der projizierten Querschnittsfläche A_W senkrecht zur Strömung,
3. Berechnung der kritischen Fließgeschwindigkeit ($v_{crit,2}$) durch Lösen des Kräftegleichgewichts.

Diese Iterationsschritte werden so lange wiederholt, bis der Wert der kritischen Fließgeschwindigkeit konvergiert ($v_{crit,1} = v_{crit,2}$). Das iterative Verfahren ist auf einen begrenzten Definitionsbereich beschränkt (kritische Wassertiefen und Froude-Zahlen aus der Auftriebskraftmessung).

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der Abbildung 4.24 dargestellt. Die durchgezogene blaue Linie ($\mu_R = 0,3$; Leergewicht) entspricht der ersten Messreihe der Stabilitätsmessungen des Einsatzfahrzeuges. Die Messwerte sind ebenfalls im Diagramm eingetragen. Der Verlauf wird gut angenähert, allerdings wird die Zunahme der kritischen Wassertiefe im Bereich der Froude-Zahlen von 0 bis 0,5 nicht wiedergegeben. Die Iterationsergebnisse sind stark von der Qualität der interpolierten Auftriebskraftfunktion abhängig.

Eine Veränderung des Reibungskoeffizienten macht sich erst ab Froude-Zahlen im Bereich von 0,5 bemerkbar, hier erfolgt eine Auffächerung der Stabilitätskurven. Insgesamt weisen die Kurven die größte Sensibilität im Bezug auf die Gewichtskraft des Fahrzeuges auf. So ist der Nullpunkt der schwarzen Kurven (zul. Gesamtgewicht = 11 t) im Vergleich zu den blauen Kurven (Leergewicht = 5 t) um 0,4 m versetzt. Dies wird bei der Umsetzung der Versuchsergebnisse durch Einbeziehung der Wattiefen berücksichtigt.

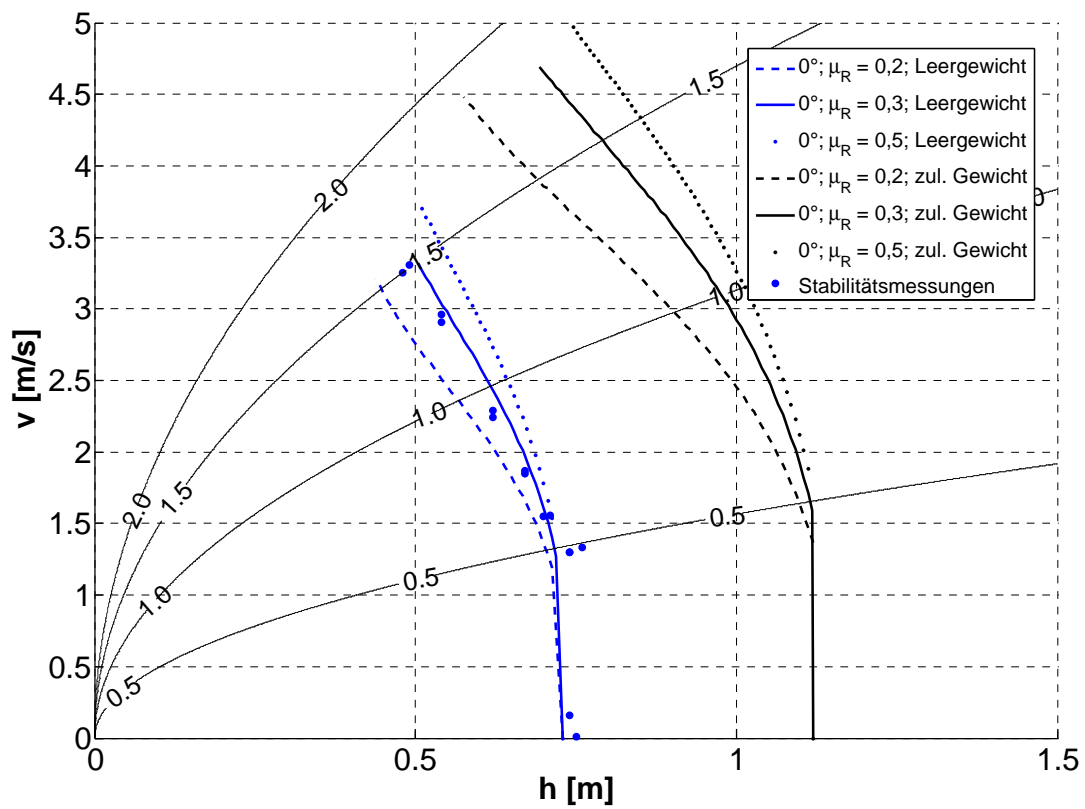


Abbildung 4.24: Iterative Bestimmung der kritischen Fließgeschwindigkeit für das Einsatzfahrzeug (Anströmwinkel = 0°) bei veränderten Randbedingungen

5 Umsetzung der Versuchsergebnisse

Für die Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Praxis ist vor allem die Handhabbarkeit in der Erstellung von Gefahrenkarten sowie der Notfall- und Einsatzplanung ein wichtiges Kriterium. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Erkenntnis der Richtungsabhängigkeit der Fahrzeugstabilität zwar von Interesse, für die praktische Umsetzung kann dies jedoch kein anzusetzendes Kriterium sein, da z. B. der Rettungsverkehr im Katastrophenfall in der Lage sein muss, etwaige Wendemanöver durchzuführen. Es wird deshalb ein Ansatz gewählt, der den Anströmwinkel zur Beurteilung der Stabilität nicht benötigt.

5.1 Energiehöhe als Parameter

Für die Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Praxis wird die Energiehöhe als Parameter zur Beurteilung der *Verkehrstauglichkeit* in Strömungen eingeführt. Die Ableitung der Energiehöhe für Gerinne erfolgt anhand der eindimensionalen Energiebilanz für einen beliebigen Querschnitt:

$$h_E = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} \quad (5.1)$$

Bei Strömungen mit freier Wasseroberfläche entspricht die Druckhöhe dem Atmosphärendruck, womit sich folgende Gleichung für die Energiehöhe ergibt:

$$h_E = h + \frac{v^2}{2g} \quad (5.2)$$

Die Gründe, die für die Einführung der Energiehöhe als Parameter zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen bzw. der Verkehrstauglichkeit von Fahrzeugen sprechen, sind folgende:

- Der Kurvenverlauf der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wassertiefe bei einer konstanten Energiehöhe ist dem der Stabilitätskurven sehr ähnlich. In der Abbildung 8.5 sind die Stabilitätskurven für den Personenkraftwagen sowie der Kurvenverlauf für eine konstante Energiehöhe dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Stabilitätskurven im Prinzip sehr gut angenähert werden.

- Die Energiehöhe entspricht im statischen Zustand der Wattiefe. Auf diese Weise wird die Wattiefe in die Beurteilung einbezogen und somit auch die grundsätzliche Verkehrstauglichkeit berücksichtigt, d. h. Parameter wie Höhe der Luftansaugung, Höhe der Lichtmaschine und Zündung, usw. sind in die Beurteilung per se aufgenommen.
- Die Energiehöhe ist ein physikalisch sinnvoller und gleichzeitig einfach zu ermittelnder Parameter, der in der Praxis relativ problemlos zum Einsatz kommen kann.

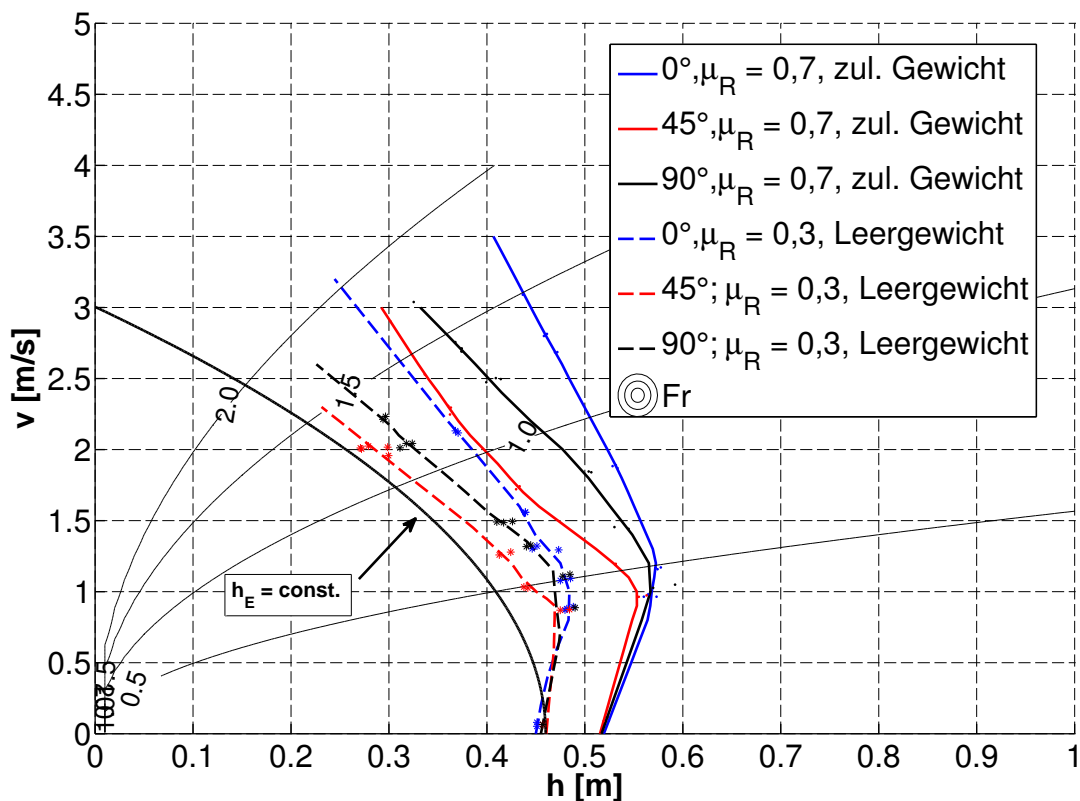


Abbildung 5.1: Einführung der Energiehöhe als maßgebenden Parameter

5.2 Festlegung der Grenzwerte, Einführung von Gefahrenklassen

Bei Überflutungssituationen ist nicht vorgesehen, die Befahrung der Verkehrswege mit privaten Personenkraftwagen zuzulassen. Vielmehr wird ein Sicherheitsabstand zwischen dem Wasserspiegel von ggf. umgebenden überfluteten Bereichen zu befahrbaren Verkehrswegen h_{S_i} für den zivilen Personenverkehr von 0,5 m eingeführt. Dies wird als minimal tolerierbarer vertikaler Abstand zwischen dem Wasserstands-niveau von überfluteten Flächen und nicht überflutetem Verkehrsweg definiert. Die Forderung des Sicherheitsabstands ergibt sich aus dem Diskurs mit den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden. Der Wert von

einem halben Meter ist an den in Baden-Württemberg empfohlenen Sicherheitszuschlag der Freibordbemessung angelehnt.

Die Empfehlungen für den Rettungsverkehr ergeben sich aus den experimentellen Untersuchungen sowie aus Überlegungen bezüglich der Wattiefenzusammenstellungen. Bei der Festlegung der maßgebenden Grenzwerte wird das 5. Perzentil der Verteilung der Wattiefen als Maßstab angesetzt. Bei einer Wattiefe von 0,3 m sind 95% der in Abb. 5.2 aufgeführten Personenkraftwagen in der Lage zu waten (rote Linie). Auch kann davon ausgegangen werden, dass in den von den Fahrzeugherstellern angegebenen Werten ein Sicherheitsfaktor enthalten ist. Die Grenzwertfunktion für ($h_E = 0,3$ m konst.) für Personenkraftwagen ist in Abb. 5.4 veranschaulicht.

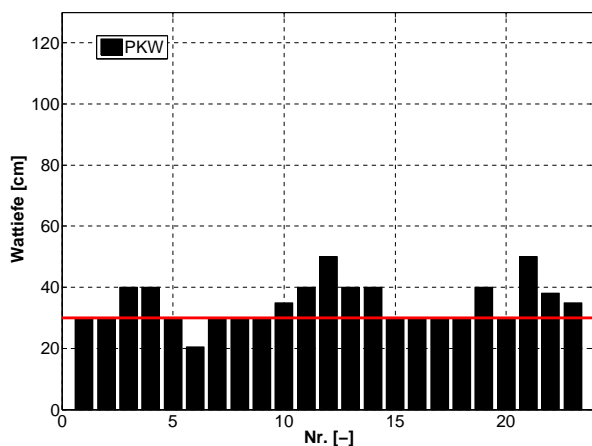


Abbildung 5.2: Ableitung der Stabilitätskriterien für den PKW

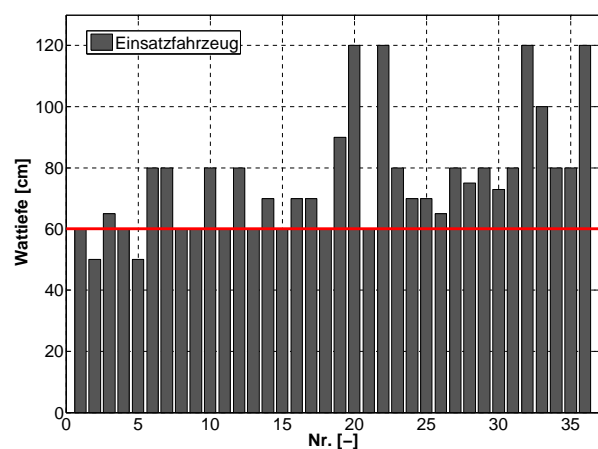


Abbildung 5.3: Ableitung der Stabilitätskriterien für das Einsatzfahrzeug

In Abb. 5.4 sind außerdem die Stabilitätskurven aus den experimentellen Untersuchungen sowie zwei Gefahrenklassen (niedrige Gefährdung: grün, hohe Gefährdung: rot) und ein Übergangsbereich dargestellt. Die Differenzierung zwischen „niedriger Gefährdung“ und dem Übergangsbereich erfolgt anhand des bereits beschriebenen Grenzwertes der Wattiefe für Personenkraftwagen. Der Übergangsbereich wird durch einen Aufschlag von 10 cm auf diesen Grenzwert definiert. Sobald Strömungszustände erreicht werden, die eine hohe Gefährdung von Personenkraftwagen verursachen, sind die Verkehrswege keinesfalls mehr befahrbar.

Eine analoge Vorgehensweise wird bei der Empfehlung des Grenzwertes für die Beurteilung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen für Einsatzfahrzeuge gewählt. Bei einer Wattiefe von 0,6 m sind ca. 95% der in der Wattiefenzusammenstellung (Abb. 5.3) aufgeführten Einsatzfahrzeuge im Hochwasserfall noch verkehrstauglich (rote Linie). Im Bereich zwischen $h = 0,6$ m und $h = 0,7$ m liegt wiederum der Übergangsbereich (siehe Abb. 5.5).

Für die beiden getesteten Fahrzeugtypen Personenkraftwagen im Rettungsverkehr und

Einsatzfahrzeug werden somit folgende maximale Grenzwerte für die Festlegung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen empfohlen:

- Personenkraftwagen (Rettungsverkehr): $h_E = 0,3 \text{ m} = \text{konst.}$
- Einsatzfahrzeug: $h_E = 0,6 \text{ m} = \text{konst.}$

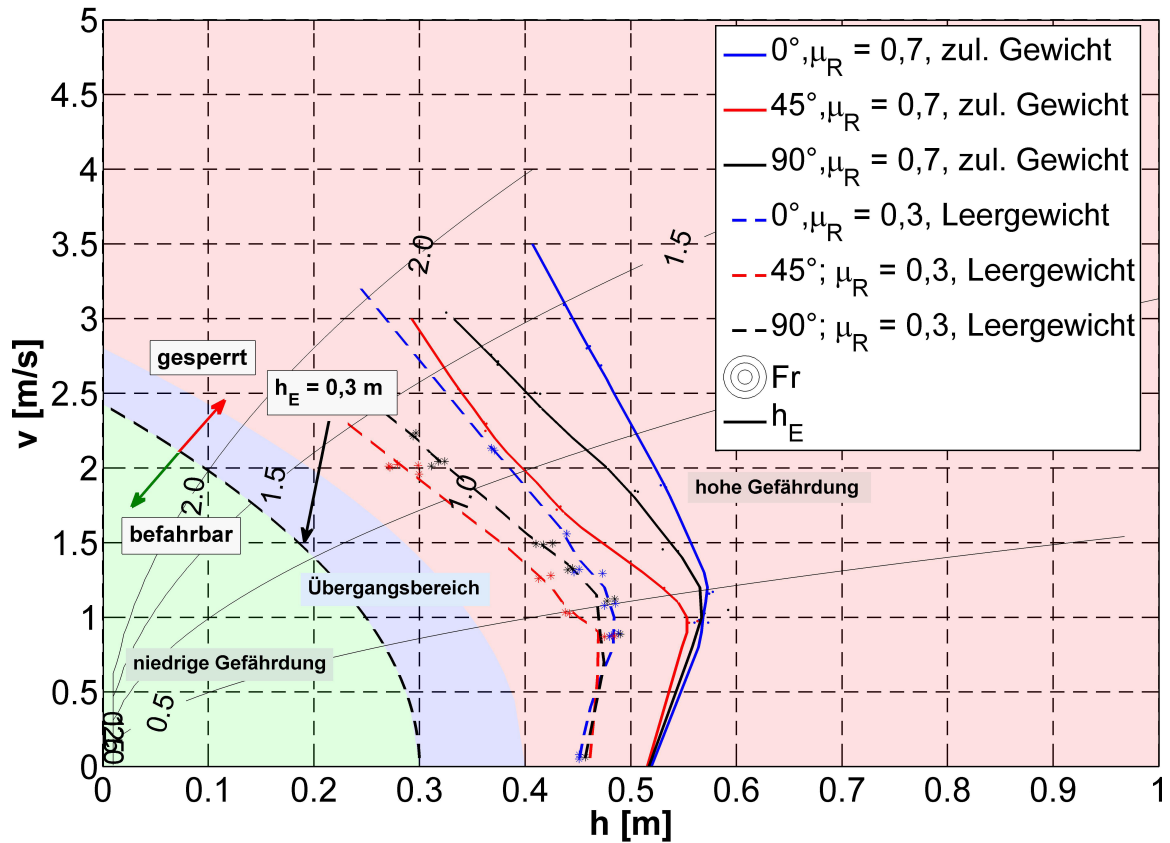


Abbildung 5.4: Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Personenkraftwagen)

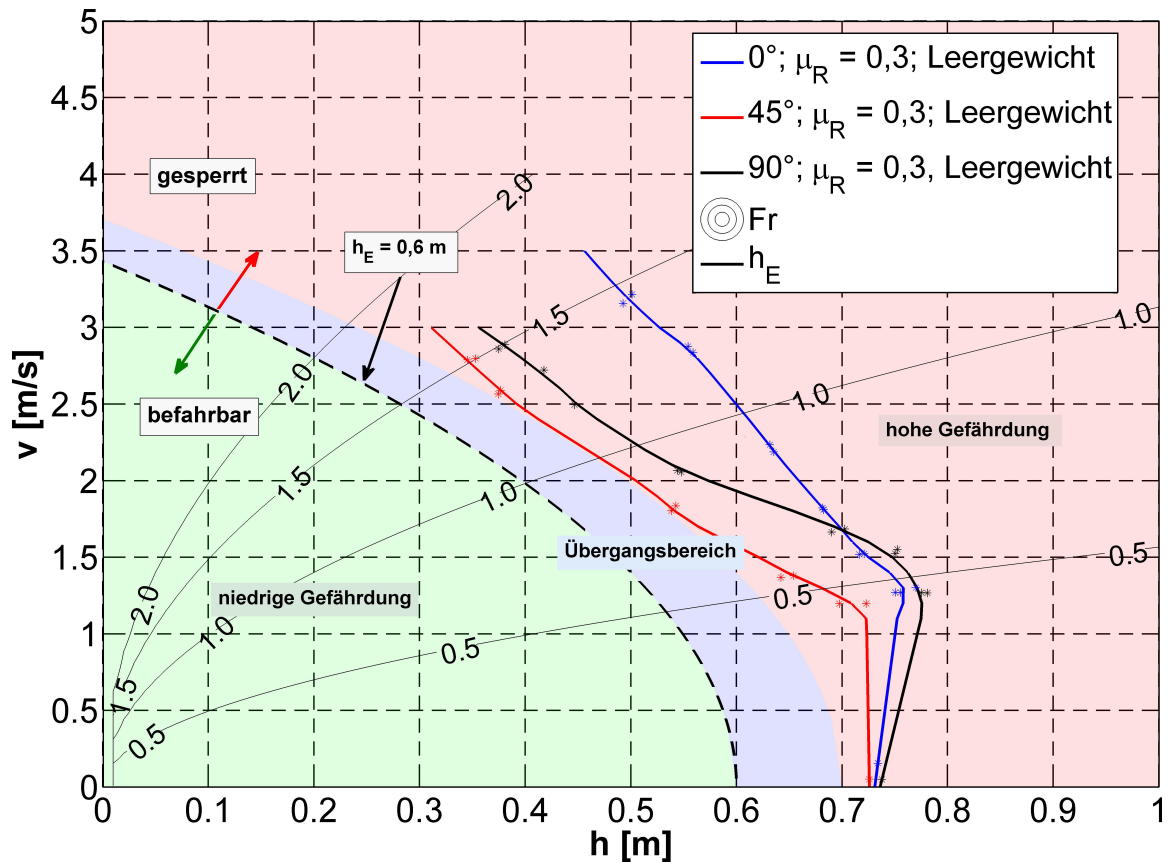


Abbildung 5.5: Darstellung der Verkehrstauglichkeit (Einsatzfahrzeug)

5.3 Schnittstellengenerierung

Die Ergebnisse aus den physikalischen Modellversuchen finden Eingang bei der Definition der Schnittstelle zwischen der hydrodynamischen Überflutungsmodellierung (Hydro-AS, MIKE 21), der Verkehrsmodellierung (VISUM) und einem Hochwassermanagementsystem (FLIWAS). Dafür wird eine Matlab-Anwendung programmiert, welche die aus dem hydraulischen Modell stammenden Informationen (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit) zu jedem modellierten Zeitschritt mit den Informationen aus den physikalischen Modellversuchen koppelt und damit in der Lage ist einen zeitabhängigen Befahrbarkeitsstatus auszugeben.

Einen Ausschnitt aus dem hydraulischen Modell von Bad Reichenhall zeigt Abb. 5.6. Dargestellt sind das der Modellierung zugrunde liegende Polygonnetz sowie die überlagerten Verkehrswege (rote Linien bzw. Punkte). Größe und Richtung der Strömung an den einzelnen Knoten der Verkehrswege werden aus den Eckpunkten des umgebenden Dreiecks mittels baryzentrischer Interpolation zu jedem Zeitschritt ermittelt.

Darauf basierend wird die Befahrbarkeit für einzelne Streckenabschnitte beurteilt. Jeder Streckenabschnitt entspricht einer Verbindung zwischen zwei Straßenkreuzungen, dem

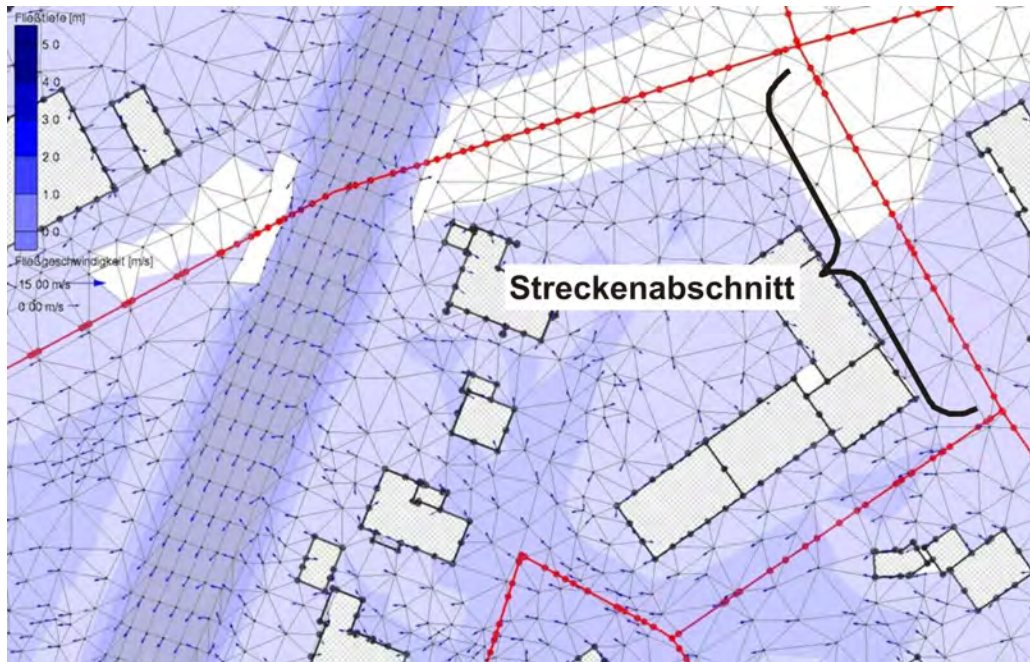


Abbildung 5.6: Verkehrsweg im hydraulischen Modell

mehrere Knoten zugeordnet sind. Zu jedem Zeitschritt der Modellierung werden die Energiehöhen an den einzelnen Knoten berechnet und mit den Grenzwerten 0,3 m und 0,6 m für den Rettungsverkehr verglichen. Für den zivilen Verkehr wird der bereits erwähnte Sicherheitsabstand von 0,5 m betrachtet. Sobald die zulässige Energiehöhe an einem Knoten überschritten bzw. der Sicherheitsabstand unterschritten wird, ist dieser Abschnitt für den entsprechenden Verkehr gesperrt. Diese Informationen werden in das Verkehrsmodell übergeben. Die Übergabedatei enthält für alle Streckenabschnitte sowie für jeden Zeitschritt den Befahrbarkeitsstatus sowohl für den Rettungsverkehr als auch für den Zivilverkehr.

6 Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse des AP5 - „Verhalten von Fahrzeugen unter Strömungseinfluss“ mit den im Forschungsantrag vorgegebenen Zielen verglichen. Als vorrangiges Ziel wird die Definition von Grenzwerten für die Befahrbarkeit von Straßen für den Individualverkehr und den Katastrophenschutz genannt. Diese Grenzwerte werden durch Versuche im Modellmaßstab ermittelt, die eine Erfassung der fehlenden Grenzwerte für die Immobilisierung von Fahrzeugen ermöglichen. Dabei wird untersucht, ab wann welche Art von Verkehrsmittel aufgrund der vorherrschenden Fließgeschwindigkeiten oder Wassertiefen nicht mehr benutzt werden kann.

Folgende Untersuchungsschwerpunkte werden im Forschungsantrag definiert:

- **Stand der Forschung**

Sammlung von Erfahrungen hinsichtlich der Mobilität von Fahrzeugen bei übermäßiger Straßennässe, Überflutung bzw. Strömung für unterschiedliche Fahrzeugtypen aus Literaturstellen und durch Befragung von Herstellern. Auswertung der Forschungs- und Sekundärliteratur zu den Themen Mobilität bei wasserbedeckten Fahrbahnen und fahrzeugtechnische Restriktionen bei Wasserdurchfahrten.

Der Stand der Forschung wird im Rahmen der Literaturrecherche bearbeitet. Es wird Literatur aus den 1960er Jahren der Universität von New South Wales bis hin zu aktuellen Forschungsergebnissen der Universität Cardiff vorgestellt. Des Weiteren liefern die Wassertiefen verschiedener Fahrzeugtypen, die aus Literaturstellen und durch Herstellerbefragungen ermittelt werden, einen wichtigen Beitrag zur Definition der Energiehöhe als Parameter zur Beurteilung der Befahrbarkeit.

- **Parameterermittlung über analytische Verfahren und Modellversuche**

Bestimmung der Parameter (u.a. hydraulisch, fahrzeugtechnisch), die die Mobilität von Fahrzeugen bei wasserbedeckten Fahrbahnen beeinflussen; Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Parameter, um die maßgebenden Größen für die gegebene Aufgabenstellung ermitteln zu können, da die Anzahl der zu untersuchenden Parameter in einem Modellversuch stark begrenzt ist. Bestimmung geeigneter Modellmaßstäbe und Modellgesetze/

Übertragungsfunktionen für die physikalische Simulation und die nachfolgende Beurteilung im natürlichen Maßstab.

Dieser Untersuchungsschwerpunkt wird im Rahmen der Parameterermittlung bearbeitet. Die maßgeblichen Parameter, die die Mobilität von Fahrzeugen beeinflussen sind die Wassertiefe h , die Fließgeschwindigkeit v , der Anströmwinkel α , Körperform- und Gewicht sowie die Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn. Da bei Strömungen mit freien Oberflächen die Schwerkraft dominieren, wird für den Transfer der Ergebnisse aus den Modellversuchen in Naturgrößen das Froude'sche Modellgesetz als Übertragungsfunktion angewendet. Bei sog. Froude-Modellen werden die Abflusszustände „Schießen“ und „Strömen“ im Modell- und Naturmaßstab gleichermaßen abgebildet.

- **Durchführung von Modell- und Naturversuchen, Definition der Übergabeparameter**

Ermittlung von hydraulischen Grenzwerten, bis zu denen eine Mobilität unterschiedlicher Verkehrsmittel noch gegeben ist, um deren Einsatzfähigkeit bei den Evakuierungsmaßnahmen beurteilen zu können; Entwicklung eines Untersuchungskonzepts in der Versuchsanstalt für Wasserbau; Konstruktion und Aufbau einer geeigneten Versuchsanlage inklusive Instrumentierung; Konzeption und Durchführung des Versuchsprogramms hinsichtlich Anzahl und Formgebung unterschiedlicher Verkehrsmittel sowie hydraulischer Beaufschlagung; Auswertung der Ergebnisse und Ableitung standardisierter Parameter, die geeignet sind, in den Simulationsmodellen implementiert werden zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen werden im Modellmaßstab verschiedene Messstände zur Erfassung der maßgeblichen Parameter an einem Personenkraftwagen und einem Einsatzfahrzeug konzipiert, gebaut und mit entsprechender Messtechnik instrumentiert. Weiterhin werden Messungen im Naturmaßstab mit einem Personenkraftwagen vorgenommen. Die Analyse der erhaltenen Ergebnisse zeigt, dass die Einführung einer kritischen maximalen Energiehöhe im überströmten Bereich der maßgebende Parameter zur Beurteilung der Verkehrstauglichkeit von Einsatzfahrzeugen ist. Für den zivilen Verkehr wird dagegen ein Sicherheitsabstand definiert. Die erarbeiteten Parameter werden über eine Schnittstelle an die weiteren Simulationsmodelle übergeben.

- **Dokumentation und Publikation**

Bereitstellung der Ergebnisse in wissenschaftlichen Fachbeiträgen und auf Messen, Kongressen, etc; Verfassen wissenschaftlicher Publikationen für Fachzeitschriften in Deutsch und Englisch; Teilnahme an Workshops, Konferenzen und Messen.

Die Forschungsergebnisse wurden bereits in verschiedenen Fachzeitschriften sowie auf diversen Konferenzen veröffentlicht. Eine detaillierte Publikationsliste findet sich im

Abschlussbericht des Vorhabens. Weitere Veröffentlichungen sind geplant, der Abschlussbericht steht auf der BMBF-Homepage zum Download zur Verfügung.

7 Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchungen des Arbeitspaketes 5 „Verhalten von Fahrzeugen unter Strömungseinfluss“ besteht in der Definition von Grenzwerten für die Befahrbarkeit von Straßen für den Zivilverkehr und den Rettungsverkehr. Die zur Definition von Grenzwerten benötigten Parameter werden anhand von Modellversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau mit verschiedenen Fahrzeugtypen unter der Realität nachempfundenen hydraulischen Belastungen ermittelt.

Um den aktuellen Wissensstand bezüglich der Fahrzeugstabilität auf Überflutungsflächen zusammenzufassen und weiteren Forschungsbedarf zu identifizieren, wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. In den 1960er Jahren wurden an der Universität von New South Wales (Australien) die ersten Modellversuche bezüglich dieser Thematik durchgeführt. Außerdem wird aktuell an der Universität Cardiff zu der Thematik geforscht. Eine gängige Darstellung der Untersuchungsergebnisse erfolgt über sogenannte Stabilitätskurven, auf der Ordinate ist die kritische Fließgeschwindigkeit über die kritischen Wassertiefe aufgetragen. Ein Wissensdefizit besteht insbesondere bezüglich der Stabilität von Einsatzfahrzeugen sowie der Kraftwirkung der Strömung auf Fahrzeugkörper bei unterschiedlichen Anströmpositionen.

Als Modellfahrzeuge werden der Volkswagen Golf sowie das Feuerwehrfahrzeug LF 10/6 als repräsentative Fahrzeugtypen ausgewählt und im Modell maßstäblich geometrisch ähnlich abgebildet. Bei der Erstellung der Versuchskörper wird die Achslastverteilung ebenfalls berücksichtigt. In den Untersuchungen werden Stabilitätsmessungen, Druckmessungen, Widerstandsmessungen und Auftriebskraftmessungen durchgeführt. Die Vielzahl der Untersuchungen ermöglicht eine Verifikation vorhandener Messergebnisse sowie die Berechnung von Stabilitätskurven unter veränderten Randbedingungen. Es zeigt sich, dass die größte Sensibilität hinsichtlich der Variation der Gewichtskraft des Fahrzeugs besteht, ein veränderter Reibungskoeffizient spielt nur bei größeren Froude-Zahlen eine Rolle.

Die ermittelten Stabilitätskurven beschreiben die Stabilität eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der Parameter Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Anströmwinkel, Körperform und -gewicht sowie der Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn. Als generalisierter Parameter wird die Energiehöhe als Kriterium zur Beurteilung der Befahrbarkeit eingeführt. Hierdurch wird

sowohl die Strömungssituation berücksichtigt als auch bautechnische Parameter (Höhe der Luftansaugung, Höhe der Lichtmaschine und Zündung, usw.) in die Beurteilung der Verkehrstauglichkeit einbezogen. Da die Energiehöhe im statischen Zustand der Wassertiefe entspricht, können die Werte aus der Wassertiefenzusammenstellung direkt übernommen werden. Somit wird ein für die Praxis sehr einfach handhabbarer Parameter zur Verfügung gestellt.

Für den zivilen Personenverkehr wird ein Sicherheitsabstand zwischen dem Wasserspiegel von ggf. umgebenden überfluteten Bereichen zu befahrbaren Verkehrswegen eingeführt. Dies wird als minimal tolerierbarer vertikaler Abstand zwischen dem Wasserstands-niveau von überfluteten Flächen und dem nicht überfluteten Verkehrsweg definiert. Die Forderung des Sicherheitsabstands ergibt sich aus dem Diskurs mit den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden.

Somit werden folgende Grenzwerte für die Beurteilung der Befahrbarkeit von Verkehrswegen für den Rettungsverkehr und Zivilverkehr empfohlen:

- Zivilverkehr:
 - Sicherheitsabstand: $h_{Sj} = 0,5 \text{ m}$
- Rettungsverkehr
 - Personenkraftwagen: $h_E = 0,3 \text{ m} = \text{konst.}$
 - Einsatzfahrzeug: $h_E = 0,6 \text{ m} = \text{konst.}$

Für die Anwendung der Untersuchungsergebnisse in den Projektgebieten wird eine Schnittstelle zwischen den hydraulischen Modellen (Hydro-AS, MIKE 21) und einem Verkehrsmodell (VISUM) bzw. einem Hochwassermanagementsystem (FLIWAS) entwickelt, die die Informationen aus dem hydraulischen Modell (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Sicherheitsabstand) zu jedem modellierten Zeitschritt mit den Informationen aus den physikalischen Modellversuchen koppelt und daraus einen zeitabhängigen Befahrbarkeitsstatus ermittelt und ausgibt. Anhand dieser zeitabhängigen Information wird die Entwicklung von Katastrophenschutzplänen verbessert bzw. die Identifizierung von eventuellen Schwachstellen in bestehenden Katastrophenschutzplänen ermöglicht. In Zusammenarbeit mit den anderen Arbeitspaketen wird durch die getätigten Untersuchungen bzw. die erarbeiteten Parameter eine Übertragbarkeit der Methodik auf andere Projektgebiete sichergestellt und ein Beitrag zum Schutz der Bevölkerung vor extremen Überflutungsereignissen geleistet.

Literatur

- ARR (1987). *Australian Rainfall and Runoff, A Guide to Flood Estimations*. Institution of Engineers Australia.
- Bonham, A. J. und R. T. Hattersley (1967). *Low Level Causeways*. The University of New South Wales, Water Research Laboratory.
- Cox, R. J. und E. J. Ball, Hrsg. (2001). *Stability and Safety in Flooded Streets*. The Institution of Engineers.
- FDPM (1986). *Floodplain Development Manual*. Dept. of Environment and Planning, New South Wales.
- Fach, Markus (1999). „Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn“. Diss. Technische Universität Darmstadt.
- Gordon, A. D. und P. B. Stone (1973). *Car stability on road Floodways*. , The University of New South Wales.
- Greif, D., B. Krajnc, D. M. Wang und M. Schrefl (2007). „Multi-phase simulation of a vehicle driving through a water-passage“. In: *JUMV International Automotive Conference with Exhibition*.
- Herrmann, Friedrich (2003). „Altlasten der Physik (65) Haftreibung“. In: *PdN-PhiS 2/52*, S. 46.
- Herrmann, Steffen R. (2008). „Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen“. Diss. Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen.
- Keller, R. J. und B. Mitsch (1992). *Safety aspects of design roadways as floodways*. Research Report No. 69, Urban Water Research Association of Australia.
- Kobus, H. (1978). „Wasserbauliches Versuchswesen“. In: *Mitteilungsheft des Deutschen Verbands für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK)*.
- Kummer, H. W. (1966). *Unified Theory of Rubber and Tire Friction*. Pennsylvania State University, Engineering Research Bulletin B-94.

- Mens, M.J.P. u. a. (2008). *Frameworks for flood event management*. Techn. Ber.
- Risch, M. R. (2002). „Der Kamm'sche Kreis - Wie stark kann man beim Kurvenfahren bremsen“. In: *PdN-PH* 5, S. 7–12.
- Schramm, Ernst Joachim (2002). „Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung von Nassbremseigenschaften von Pkw-Reifen“. Diss. DIK - Deutsches Institut für Kautschuktechnologie, Hannover.
- Surek, Dominik und Silke Stempin (2007). *Angewandte Strömungsmechanik*. Teubner.
- Walsh, M., N. Benning und D. Bewsher (1998). *Defining flood hazard in urban environments*. Proceedings of the second Stormwater Industry Association Regional Conference on Stormwater.
- Widder (2001). *Zentrale Dienstvorschrift ZDv 3/307*.
- Xia, J., F. Y. Teo und R. Falconer (2012). „Formula of incipient velocity for flooded vehicles“. In: *Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*.
- Xie, Chunyang (2001). „Experimentelle Untersuchungen zur Interaktion zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn beim Bremsen“. Diss. Technischen Universität Darmstadt.

8 Anhang

Tabelle 8.1: Wattiefenzusammenstellung Einsatzfahrzeug

Nr. [-]	Fahrzeugtyp [-]	Abkürzung [-]	Fahrgestell [-]	Wattiefe [cm]
1	Berglandlöschfahrzeug	BLF	Landrover Defender 130 DCPU	60
2	Flughafentanklöschfahrzeug	FLF	Rosenbauer ÖAF/26.604 DFA	50
3	Gerätekraftwagen	GKW	Mercedes-Benz Axor 1829	65
4	Gerätekraftwagen	GKW	IVECO 120-23 AW	60
5	Gerätekraftwagen	GKW	Daimler Benz LA 911 B	50
6	Löschfahrzeug	HLF 10/6	Iveco MAGIRUS 100 E 25 4x4	80
7	Löschgruppenfahrzeug	HLF 20/16	Mercedes-Benz Atego 1629 AF	80
8	Kleinlöschfahrzeug	KLF	Steyr Pinzgauer 712K / 6x6	60
9	Kleinlöschfahrzeug	KLF	Mercedes Sprinter 718 CDI 6x6	60
10	Löschgruppenfahrzeug	LF	Mercedes-Benz Axor 1833	80
11	Löschgruppenfahrzeug	LF	MAN TGM 13.250 4x4 BL FW	60
12	Löschfahrzeug	LF	Mercedes-Benz Atego 1629 AF	80
13	Löschgruppenfahrzeug	LF 10/6	MB Atego 818F 4x2 (Straße)	60
14	Löschgruppenfahrzeug	LF 10/6	MAN TGL L2000	70
15	Löschgruppenfahrzeug	LF 10/6	MAN TGM 18290 Allrad	60
16	Löschgruppenfahrzeug	LF 10/6	MAN TGM 18280 Allrad	70
17	Löschgruppenfahrzeug	LF 10/6	MAN TGM 18290 Allrad	70
18	Löschgruppenfahrzeug	LF 20/16	1226F-Atego (Straße)	60
19	Löschgruppenfahrzeug	LF 8/6	Mercedes-Benz Atego Allrad	90
20	Löschgruppenfahrzeug	LFA-S	Mercedes-Benz OM 924 LA,	120
21	Löschgruppenfahrzeug	LF-KatS	MAN TGM 13.250 4x4 BL FW	60
22	Mannschaftslastwagen	MLW II	Mercedes-Benz Unimog 435	120
23	Mehrzweckkraftwagen	MzKW	MAN TGM 18.290 4x4 BB	80
24	Mehrzweckkraftwagen	MzKW	MAN TGM 18.290 4X4 BB	70
25	Mehrzweckkraftwagen	MzKW	MAN TGM 18.280 4x4 BB	70
26	Mehrzweckkraftwagen	MzKW	MAN TGM 18.280	65
27	Mehrzweckkraftwagen	MZKW	MAN LE 18.280 4x4 BB	80
28	Mehrzweckkraftwagen	MZKW B2B	MAN - LE 18.280 4x4	75
29	Rüstwagen	RW 1	Mercedes-Benz Unimog U 1300 L	80
30	Tauchgerätekraftwagen	Tauch-GKW	MB Sprinter 312 D;	73
31	Tanklöschfahrzeug	TLF	Tatra 148-PP 5	80
32	Tanklöschfahrzeug	TLF	Tatra T815-7	120
33	Tanklöschfahrzeug	TLF 16	IFA W 50 LA/TLF	100
34	Tanklöschfahrzeug	TLF 16/25	Iveco-Magirus EuroFire 140 E 24	80
35	Tanklöschfahrzeug	TLF 16/25	Iveco-Magirus EuroFire 140 E 24	80
36	Tragkraftspritzenfahrzeug	TSF-W	Star 266; 6x6; Osiny	120

Tabelle 8.2: Wattiefenzusammenstellung Personenkraftwagen

Nr. [-]	Fahrzeugtyp [-]	Wattiefe [cm]
1	Citroen C-Crosser	30
2	Daihatsu Terios	30
3	Fiat Panda	40
4	Fiat Panda Cross	40
5	Fiat Sedici	30
6	Hyundai ix 55	20
7	Hyundai Santa Fe	30
8	Hyundai Tucson	30
9	Kia Sorento	30
10	Nissan Quashqai	35
11	PKW	40
12	PKW	50
13	PKW	40
14	PKW	40
15	Renault Kangoo	30
16	Toyota RAV4	30
17	Volvo XC 60	30
18	Volvo XC 70	30
19	Volvo XC 90	40
20	VW California	30
21	VW Golf	50
22	VW Synchro	38
23	VW T4	35

Tabelle 8.3: Stabilitätsmessungen Personenkraftwagen Teil 1

Messung [-]	Δz [mm]	Q_m [l/s]	$h_{krit,m}$ [mm]	$h_{krit,n}$ [m]	$v_{krit,m}$ [m/s]	$v_{krit,n}$ [m/s]	Fr [-]	μ_R [-]	G_m [kg]
0_0,0	3,5	18,62	55,84	0,55	0,31	0,98	0,41	0,7	1,91
0_0,0	3,5	19,07	56,28	0,55	0,32	1,00	0,42	0,7	1,91
0_0,0	3,5	19,02	57,17	0,56	0,31	0,98	0,41	0,7	1,91
0_0,0	3,5	1,66	52,18	0,51	0,03	0,09	0,04	0,7	1,91
0_1,1	3,5	23,26	57,62	0,56	0,38	1,19	0,49	0,7	1,91
0_1,1	3,5	22,89	57,27	0,56	0,38	1,18	0,49	0,7	1,91
0_1,1	3,5	23,00	57,08	0,56	0,38	1,19	0,49	0,7	1,91
0_3,4	3,5	34,46	53,09	0,52	0,61	1,90	0,82	0,7	1,91
0_3,4	3,5	34,73	52,91	0,52	0,62	1,92	0,83	0,7	1,91
0_3,4	3,5	34,40	52,58	0,51	0,61	1,92	0,83	0,7	1,91
0_4,6	3,5	44,10	46,80	0,46	0,88	2,74	1,25	0,7	1,91
0_4,6	3,5	43,88	46,56	0,45	0,88	2,74	1,25	0,7	1,91
0_5,7	3,5	44,72	45,40	0,44	0,91	2,86	1,32	0,7	1,91
0_5,7	3,5	45,23	45,71	0,45	0,92	2,87	1,32	0,7	1,91
0_6,9	3,5	47,18	43,19	0,42	1,01	3,16	1,49	0,7	1,91
0_0,0	3,5	15,14	48,47	0,47	0,29	0,91	0,41	0,3	1,48
0_0,0	3,5	14,72	47,79	0,47	0,29	0,90	0,40	0,3	1,48
0_0,0	3,5	14,52	47,61	0,47	0,28	0,89	0,40	0,3	1,48
0_0,0	3,5	0,82	44,67	0,44	0,02	0,05	0,02	0,3	1,48
0_0,0	3,5	1,25	44,67	0,44	0,03	0,08	0,04	0,3	1,48
0_1,1	3,5	18,43	48,18	0,47	0,36	1,11	0,50	0,3	1,48
0_1,1	3,5	3,50	50,62	0,49	0,07	0,35	1,10	0,3	1,48
0_2,3	3,5	3,50	48,17	0,47	0,07	0,43	1,35	0,3	1,48
0_2,3	3,5	20,30	44,18	0,43	0,43	1,33	0,62	0,3	1,48
0_2,3	3,5	21,30	46,94	0,46	0,42	1,32	0,60	0,3	1,48
0_2,3	3,5	21,15	45,07	0,44	0,44	1,36	0,63	0,3	1,48
0_3,4	3,5	23,92	43,45	0,42	0,51	1,59	0,75	0,3	1,48
0_3,4	3,5	23,93	43,47	0,42	0,51	1,59	0,75	0,3	1,48
0_4,6	3,5	27,76	36,44	0,36	0,69	2,17	1,11	0,3	1,48
0_4,6	3,5	27,76	36,16	0,35	0,70	2,19	1,12	0,3	1,48
0_5,7	3,5	31,19	31,14	0,30	0,90	2,81	1,54	0,3	1,48
0_5,7	3,5	31,96	32,00	0,31	0,90	2,81	1,53	0,3	1,48
0_5,7	3,5	30,71	30,74	0,30	0,90	2,80	1,55	0,3	1,48
45_0,0	3,5	18,89	56,13	0,55	0,32	0,99	0,41	0,7	1,91
45_0,0	3,5	18,44	55,32	0,54	0,31	0,98	0,41	0,7	1,91
45_1,1	3,5	21,98	52,91	0,52	0,39	1,22	0,52	0,7	1,91
45_1,1	3,5	21,86	52,86	0,52	0,39	1,21	0,52	0,7	1,91
45_3,4	3,5	25,88	42,50	0,42	0,56	1,76	0,84	0,7	1,91
45_3,4	3,5	26,40	42,86	0,42	0,57	1,78	0,84	0,7	1,91
45_4,6	3,5	29,48	35,41	0,35	0,76	2,37	1,23	0,7	1,91
45_4,6	3,5	29,54	35,68	0,35	0,75	2,36	1,22	0,7	1,91
45_4,6	3,5	28,84	35,59	0,35	0,74	2,31	1,19	0,7	1,91
45_5,7	3,5	30,33	32,95	0,32	0,83	2,60	1,39	0,7	1,91
45_5,7	3,5	30,76	33,27	0,33	0,84	2,61	1,39	0,7	1,91
45_9,1	3,5	31,48	29,36	0,29	0,96	3,00	1,69	0,7	1,91

Tabelle 8.4: Stabilitätsmessungen Personenkraftwagen Teil 2

Messung [-]	Δz [mm]	Q_m [l/s]	$h_{krit,m}$ [mm]	$h_{krit,n}$ [m]	$v_{krit,m}$ [m/s]	$v_{krit,n}$ [m/s]	Fr [-]	μ_R [-]	G_m [kg]
45_0,0	3,5	1,03	45,27	0,44	0,02	0,07	0,03	0,3	1,48
45_0,0	3,5	14,36	47,11	0,46	0,28	0,89	0,40	0,3	1,48
45_0,0	3,5	14,71	48,07	0,47	0,29	0,89	0,40	0,3	1,48
45_1,1	3,5	15,82	43,72	0,43	0,34	1,05	0,49	0,3	1,48
45_1,1	3,5	15,81	43,31	0,42	0,34	1,06	0,50	0,3	1,48
45_2,3	3,5	19,00	41,93	0,41	0,42	1,31	0,63	0,3	1,48
45_2,3	3,5	18,23	40,74	0,40	0,41	1,29	0,63	0,3	1,48
45_3,4	3,5	20,68	37,06	0,36	0,51	1,59	0,81	0,3	1,48
45_3,4	3,5	20,12	36,96	0,36	0,50	1,55	0,79	0,3	1,48
45_4,6	3,5	22,03	26,05	0,25	0,75	2,33	1,38	0,3	1,48
45_4,6	3,5	22,22	26,23	0,26	0,75	2,34	1,38	0,3	1,48
45_5,7	3,5	19,81	26,34	0,26	0,66	2,07	1,23	0,3	1,48
45_5,7	3,5	20,48	27,07	0,26	0,67	2,09	1,22	0,3	1,48
45_5,7	3,5	19,81	26,23	0,26	0,67	2,08	1,23	0,3	1,48
90_0,0	3,5	21,35	59,10	0,58	0,34	1,07	0,44	0,7	1,91
90_0,0	3,5	20,14	56,81	0,56	0,33	1,04	0,43	0,7	1,91
90_0,0	3,5	2,06	52,01	0,51	0,04	0,12	0,05	0,7	1,91
90_1,1	3,5	26,29	59,22	0,58	0,42	1,31	0,53	0,7	1,91
90_1,1	3,5	26,78	59,83	0,58	0,42	1,32	0,54	0,7	1,91
90_2,3	3,5	26,66	52,77	0,52	0,47	1,48	0,64	0,7	1,91
90_2,3	3,5	27,11	54,25	0,53	0,47	1,47	0,62	0,7	1,91
90_3,4	3,5	32,24	50,07	0,49	0,60	1,88	0,83	0,7	1,91
90_3,4	3,5	32,31	50,35	0,49	0,60	1,88	0,83	0,7	1,91
90_4,6	3,5	35,95	40,37	0,39	0,82	2,56	1,25	0,7	1,91
90_4,6	3,5	34,74	39,37	0,38	0,81	2,53	1,25	0,7	1,91
90_4,6	3,5	36,27	40,89	0,40	0,82	2,55	1,24	0,7	1,91
90_5,7	3,5	35,88	36,82	0,36	0,89	2,78	1,42	0,7	1,91
90_5,7	3,5	35,64	36,84	0,36	0,88	2,76	1,40	0,7	1,91
90_5,7	3,5	35,56	36,77	0,36	0,88	2,76	1,40	0,7	1,91
90_6,9	3,5	35,87	36,14	0,35	0,90	2,83	1,45	0,7	1,91
90_9,1	3,5	35,32	31,79	0,31	1,00	3,13	1,70	0,7	1,91
90_0,0	3,5	1,03	45,27	0,44	0,02	0,07	0,03	0,3	1,48
90_0,0	3,5	15,09	48,65	0,48	0,29	0,90	0,40	0,3	1,48
90_0,0	3,5	15,99	49,60	0,48	0,30	0,94	0,42	0,3	1,48
90_0,0	3,5	15,16	48,75	0,48	0,29	0,91	0,41	0,3	1,48
90_1,1	3,5	18,41	47,38	0,46	0,36	1,13	0,51	0,3	1,48
90_1,1	3,5	18,89	48,12	0,47	0,37	1,14	0,51	0,3	1,48
90_2,3	3,5	20,62	44,02	0,43	0,43	1,36	0,64	0,3	1,48
90_2,3	3,5	21,25	38,98	0,38	0,50	1,56	0,78	0,3	1,48
90_3,4	3,5	21,47	40,48	0,40	0,49	1,53	0,74	0,3	1,48
90_3,4	3,5	22,30	42,11	0,41	0,49	1,53	0,73	0,3	1,48
90_3,4	3,5	21,73	41,19	0,40	0,49	1,52	0,73	0,3	1,48
90_4,6	3,5	22,46	30,36	0,30	0,66	2,07	1,15	0,3	1,48
90_4,6	3,5	23,65	31,65	0,31	0,67	2,10	1,15	0,3	1,48
90_4,6	3,5	23,25	31,03	0,30	0,67	2,10	1,16	0,3	1,48
90_5,7	3,5	23,66	26,43	0,26	0,79	2,47	1,46	0,3	1,48
90_5,7	3,5	24,92	27,44	0,27	0,81	2,52	1,46	0,3	1,48
90_5,7	3,5	24,12	26,87	0,26	0,79	2,48	1,45	0,3	1,48
90_5,7	3,5	24,05	26,82	0,26	0,79	2,48	1,45	0,3	1,48

Tabelle 8.5: Stabilitätsmessungen Einsatzfahrzeug

Messung [-]	Δz [mm]	Q_m [l/s]	$h_{krit,m}$ [mm]	$h_{krit,n}$ [m]	$v_{krit,m}$ [m/s]	$v_{krit,n}$ [m/s]	Fr [-]	μ_R [-]	G_m [kg]
00_0,0	3,5	0,10	56,64	0,75	0,00	0,01	0,00	0,3	2,14
00_0,0	3,5	2,55	56,39	0,74	0,04	0,15	0,06	0,3	2,14
00_0,0	3,5	22,27	57,35	0,76	0,37	1,33	0,47	0,3	2,14
00_0,0	3,5	21,34	56,25	0,74	0,36	1,30	0,47	0,3	2,14
00_0,0	3,5	21,21	55,86	0,74	0,36	1,30	0,47	0,3	2,14
00_1,1	3,5	24,25	53,26	0,70	0,43	1,55	0,57	0,3	2,14
00_1,1	3,5	24,47	53,61	0,71	0,43	1,56	0,57	0,3	2,14
00_2,3	3,5	27,64	50,68	0,67	0,51	1,85	0,70	0,3	2,14
00_2,3	3,5	27,77	50,59	0,67	0,51	1,87	0,70	0,3	2,14
00_3,4	3,5	31,69	46,78	0,62	0,63	2,29	0,90	0,3	2,14
00_3,4	3,5	31,20	47,06	0,62	0,62	2,24	0,88	0,3	2,14
00_4,6	3,5	35,88	41,23	0,54	0,80	2,91	1,21	0,3	2,14
00_4,6	3,5	35,88	40,86	0,54	0,81	2,96	1,23	0,3	2,14
00_5,7	3,5	35,88	36,16	0,48	0,90	3,25	1,44	0,3	2,14
00_5,7	3,5	35,88	36,82	0,49	0,91	3,31	1,45	0,3	2,14
45_0,0	3,5	0,85	54,45	0,72	0,01	0,05	0,02	0,3	2,14
45_0,0	3,5	18,65	51,62	0,68	0,34	1,23	0,46	0,3	2,14
45_0,0	3,5	19,30	53,76	0,71	0,34	1,22	0,45	0,3	2,14
45_1,1	3,5	20,22	48,51	0,64	0,39	1,41	0,54	0,3	2,14
45_1,1	3,5	19,71	47,59	0,63	0,39	1,40	0,55	0,3	2,14
45_2,3	3,5	21,45	43,69	0,58	0,45	1,65	0,67	0,3	2,14
45_2,3	3,5	21,14	42,63	0,56	0,46	1,66	0,68	0,3	2,14
45_3,4	3,5	22,59	39,98	0,53	0,52	1,89	0,80	0,3	2,14
45_3,4	3,5	22,03	39,66	0,52	0,51	1,85	0,78	0,3	2,14
45_4,6	3,5	22,47	27,14	0,36	0,73	2,66	1,34	0,3	2,14
45_4,6	3,5	22,80	27,29	0,36	0,74	2,69	1,35	0,3	2,14
45_5,7	3,5	23,22	25,48	0,34	0,80	2,91	1,50	0,3	2,14
45_5,7	3,5	22,70	24,90	0,33	0,80	2,90	1,51	0,3	2,14
90_0,0	3,5	0,82	54,99	0,73	0,01	0,05	0,02	0,3	2,14
90_0,0	3,5	21,96	58,18	0,77	0,36	1,29	0,46	0,3	2,14
90_0,0	3,5	21,85	57,75	0,76	0,36	1,30	0,46	0,3	2,14
90_1,1	3,5	25,97	56,01	0,74	0,44	1,59	0,57	0,3	2,14
90_1,1	3,5	25,43	55,85	0,74	0,43	1,56	0,56	0,3	2,14
90_2,3	3,5	26,42	52,21	0,69	0,47	1,72	0,64	0,3	2,14
90_2,3	3,5	25,66	51,26	0,68	0,47	1,70	0,64	0,3	2,14
90_3,4	3,5	25,48	40,08	0,53	0,58	2,12	0,89	0,3	2,14
90_3,4	3,5	25,53	40,38	0,53	0,58	2,11	0,89	0,3	2,14
90_4,6	3,5	26,32	30,44	0,40	0,78	2,82	1,34	0,3	2,14
90_4,6	3,5	25,65	32,65	0,43	0,71	2,58	1,19	0,3	2,14
90_5,7	3,5	25,67	27,61	0,36	0,83	3,00	1,49	0,3	2,14
90_5,7	3,5	25,06	27,16	0,36	0,82	2,97	1,49	0,3	2,14

Tabelle 8.6: Druck- ($F_{W,P}$) und Kraftmessungen (F_W) Einsatzfahrzeug

Messung [-]	Δz [mm]	Q_m [l/s]	$h_{crit,m}$ [mm]	$h_{crit,n}$ [m]	$v_{crit,m}$ [m/s]	$v_{crit,n}$ [m/s]	Fr [-]	F_W [N]	$F_{W,P}$ [N]	c_w [-]
0_0,0	4	21,55	55,99	0,74	0,36	1,31	0,47	0,24	0,29	0,64
0_0,0	4	21,23	55,99	0,74	0,35	1,29	0,46	0,27		0,74
0_1,1	4	24,43	52,93	0,70	0,43	1,56	0,57	0,30	0,32	0,62
0_1,1	4	24,33	52,93	0,70	0,43	1,55	0,57	0,34		0,71
0_2,3	4	27,74	50,14	0,66	0,51	1,86	0,70	0,52	0,45	0,82
0_2,3	4	27,76	50,14	0,66	0,51	1,86	0,70	0,53		0,85
0_3,4	4	31,42	46,42	0,61	0,62	2,26	0,89	0,94	1,16	1,17
0_3,4	4	31,80	46,42	0,61	0,63	2,29	0,90	0,97		1,18
0_4,6	4	36,05	40,55	0,54	0,81	2,94	1,22	1,53	2,49	1,52
0_4,6	4	36,04	40,55	0,54	0,81	2,94	1,22	1,57		1,56
0_4,6	4	36,12	40,55	0,54	0,81	2,95	1,23	1,54		1,52
0_5,7	4	36,26	35,99	0,48	0,91	3,29	1,45	1,59	2,44	1,72
0_5,7	4	36,13	35,99	0,48	0,90	3,28	1,44	1,65		1,79
0_5,7	4	36,03	35,99	0,48	0,90	3,27	1,44	1,57		1,72
90_0,0	5	21,86	56,46	0,75	0,36	1,29	0,46	3,11	3,54	3,14
90_0,0	5	22,06	56,46	0,75	0,36	1,30	0,46	3,29		3,27
90_0,0	5	21,76	56,46	0,75	0,35	1,29	0,46	3,05		3,11
90_1,1	5	25,57	54,43	0,72	0,43	1,56	0,56	4,52	4,88	3,34
90_1,1	5	25,68	54,43	0,72	0,43	1,57	0,57	4,77		3,50
90_1,1	5	25,47	54,43	0,72	0,43	1,56	0,56	4,65		3,46
90_2,3	5	25,88	50,23	0,66	0,47	1,70	0,64	5,20	5,28	3,75
90_2,3	5	26,04	50,23	0,66	0,47	1,71	0,64	5,55		3,96
90_2,3	5	25,89	50,23	0,66	0,47	1,70	0,64	5,27		3,80
90_3,4	5	25,28	38,73	0,51	0,58	2,10	0,88	5,48	5,69	4,53
90_3,4	5	25,60	38,73	0,51	0,59	2,13	0,89	5,94		4,79
90_3,4	5	25,71	38,73	0,51	0,59	2,14	0,90	5,81		4,64
90_4,6	5	26,37	30,04	0,40	0,75	2,73	1,28	6,50	6,67	8,10
90_4,6	5	26,59	30,04	0,40	0,76	2,76	1,29	6,86		8,41
90_4,6	5	26,50	30,04	0,40	0,76	2,75	1,29	6,48		8,00
90_5,7	5	25,13	25,89	0,34	0,81	2,96	1,48	6,19	5,84	8,88
90_5,7	5	25,20	25,89	0,34	0,82	2,96	1,48	6,54		9,33
90_5,7	5	25,70	25,89	0,34	0,83	3,02	1,51	6,40		8,79

Tabelle 8.7: Auftriebskraftmessungen Einsatzfahrzeug Teil 1

Messung [-]	Q_m [l/s]	$h_{WSP,m}$ [mm]	$h_{WSP,m}$ [mm]	v_{crit} [m/s]	Fr [-]	$F_{A,gem}$ [N]	$F_{A,gem}$ [N]	$F_{A,ber}$ [N]
00_0,0	21,23	52,68		0,40	0,56	20,33		
00_0,0	21,81	52,55	52,74	0,42	0,58	21,44	20,93	21,32
00_0,0	21,84	52,86		0,41	0,57	20,74		
00_0,0	21,84	52,86		0,41	0,57	21,19		
00_1,1	24,30	50,48		0,48	0,68	20,97		
00_1,1	24,29	50,63	50,57	0,48	0,68	20,86	20,62	21,18
00_1,1	24,25	50,60		0,48	0,68	20,02		
00_2,3	27,60	54,00		0,51	0,70	19,56		
00_2,3	27,62	53,97	54,00	0,51	0,70	19,87	19,80	20,66
00_2,3	27,63	54,03		0,51	0,70	19,96		
00_3,4	31,47	40,55		0,78	1,23	17,67		
00_3,4	31,52	40,59	40,60	0,78	1,23	17,64	17,88	19,4
00_3,4	31,48	40,64		0,77	1,23	18,32		
00_4,6	36,13	43,45		0,83	1,27	13,11		
00_4,6	36,17	43,48	43,48	0,83	1,27	13,18	13,33	17,54
00_4,6	36,23	43,50		0,83	1,27	13,68		
00_5,7	36,26	39,20		0,92	1,49	12,41		
00_5,7	36,33	39,34	39,32	0,92	1,49	12,56	12,82	17,27
00_5,7	36,35	39,41		0,92	1,48	13,51		
45_0,0	19,19	51,87		0,37	0,52	19,01		
45_0,0	19,20	52,07		0,37	0,52	19,15		
45_0,0	19,19	52,02	52,07	0,37	0,52	20,68	19,35	-
45_0,0	19,22	52,18		0,37	0,51	18,81		
45_0,0	19,21	52,19		0,37	0,51	19,77		
45_0,0	19,20	52,11		0,37	0,52	18,71		
45_1,1	20,10	50,10		0,40	0,57	18,19		
45_1,1	20,08	50,56	50,40	0,40	0,56	17,67	18,29	-
45_1,1	20,08	50,56		0,40	0,56	19,01		
45_2,3	20,82	41,99		0,50	0,77	14,23		
45_2,3	20,86	41,67	41,81	0,50	0,78	15,24	14,76	-
45_2,3	20,87	41,77		0,50	0,78	14,81		
45_3,4	22,31	39,71		0,55	0,88	14,66		
45_3,4	22,26	41,69	40,59	0,53	0,84	14,68	14,74	-
45_3,4	22,27	40,37		0,55	0,88	14,88		
45_4,6	22,70	32,20		0,71	1,25	10,89		
45_4,6	22,68	32,55	32,45	0,70	1,23	11,81	11,54	-
45_4,6	22,69	32,54		0,70	1,23	10,78		
45_4,6	22,70	32,49		0,70	1,24	12,67		
45_5,7	23,25	32,24		0,72	1,28	9,91		
45_5,7	23,23	32,22	32,26	0,72	1,28	9,92	9,83	-
45_5,7	23,26	32,33		0,72	1,28	9,66		

Tabelle 8.8: Auftriebskraftmessungen Einsatzfahrzeug Teil 2

Messung [-]	Q_m [l/s]	$h_{WSP,m}$ [mm]	$h_{WSP,m}$ [mm]	v_{crit} [m/s]	Fr [-]	$F_{A,gem}$ [N]	$F_{A,gem}$ [N]	$F_{A,ber}$ [N]
90_0,0	22,03	57,48		0,38	0,51	12,55		
90_0,0	22,05	57,64	57,60	0,38	0,51	13,33	12,98	12,32
90_0,0	22,06	57,69		0,38	0,51	12,00		
90_0,0	22,05	57,64		0,38	0,51	14,03		
90_1,1	25,60	55,66		0,46	0,62	9,08		
90_1,1	25,63	55,62	55,79	0,46	0,62	7,91	9,01	8,03
90_1,1	25,59	55,77		0,46	0,62	9,43		
90_1,1	25,58	55,89		0,46	0,62	8,47		
90_1,1	25,60	55,86		0,46	0,62	8,71		
90_1,1	25,58	55,91		0,46	0,62	10,49		
90_2,3	26,15	52,81		0,50	0,69	7,84		
90_2,3	26,18	52,71	52,52	0,50	0,69	5,53	7,18	6,06
90_2,3	26,16	52,48		0,50	0,69	6,98		
90_2,3	26,15	52,37		0,50	0,70	8,94		
90_2,3	26,19	52,22		0,50	0,70	6,61		
90_3,4	25,33	47,10		0,54	0,79	7,85		
90_3,4	25,06	46,24	47,32	0,54	0,80	6,11	6,07	4,92
90_3,4	25,38	47,30		0,53	0,79	5,51		
90_3,4	25,40	47,74		0,50	0,78	8,94		
90_3,4	25,37	47,91		0,50	0,77	5,52		
90_4,6	26,28	35,66		0,74	1,25	5,10		
90_4,6	26,24	35,58	35,41	0,74	1,25	2,16	3,05	2,43
90_4,6	26,25	35,46		0,74	1,25	1,82		
90_4,6	26,27	34,95		0,75	1,28	3,12		
90_5,7	25,24	32,22		0,78	1,39	5,50		
90_5,7	25,27	32,92	32,70	0,77	1,35	3,96	4,44	3,09
90_5,7	25,27	32,85		0,77	1,35	3,23		
90_5,7	25,24	32,79		0,77	1,36	5,09		

Teilabschlussbericht

Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen

AP 6: Modellierung und Optimierung verkehrlicher Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen



gefördert durch das BMBF
Förderkennzeichen
13N10594

April 2013

Universität Stuttgart
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (VuV)

Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich
Dipl.-Ing. Katrin Immisch

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes ist es, durch eine Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen einen Beitrag zum besseren Krisenmanagement im Extremfall zu liefern. Am Beispiel realer Standorte werden durch die Anwendung der Simulation und Optimierung Evakuierungsszenarien für den Notfall entwickelt.

In dem Teilvorhaben „Modellierung und Optimierung verkehrlicher Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen“ am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik geht es dabei um die verkehrliche Simulation. Zur Abbildung der Evakuierungsverkehrsströme wird ein Simulationstool entwickelt, das den Evakuierungsprozess durch folgende Bestandteile realistisch abbildet:

- In Arbeitspaket „Verhaltensforschung“ identifizierte Verhaltensweisen der betroffenen Bevölkerung während Evakuierungen werden in der Verkehrsmodellierung nachgebildet.
- Aus den Daten eines in Arbeitspaket 2 erstellten Hydraulikmodells werden Informationen zur Lage des Evakuierungsgebietes und der sicheren Orte abgeleitet.
- Mit Hilfe von Erkenntnissen aus dem Arbeitspaket „Fahrzeugstabilität“ wird der Zeitpunkt der Sperrung von Straßen aufgrund von Überflutungen abgeschätzt. Die Straßensperrungen werden in die Verkehrsmodellierung übernommen.
- Der Aufenthaltsort der Personen zu Beginn der Überflutung wird durch ein Alltagsverkehrsmodell realitätsnah abgeschätzt.
- Mittels einer aktivitätenkettenbasierten Mikrosimulation werden die Aktivitäten der Betroffenen im Evakuierungsfall in einer definierten Reihenfolge im Modell abgebildet. Aufenthaltsort und Aktivität eines Agenten können für jede Tageszeit ermittelt werden.

Das entwickelte Tool bietet die Möglichkeit, durch Änderung der Eingangsparameter unterschiedliche Evakuierungsszenarien zu simulieren. Veränderbare Variablen sind dabei beispielsweise die Tageszeit, zu der die Evakuierung stattfindet, der Befolgungsgrad der Betroffenen sowie die Verkehrsmittelwahl.

Durch Verwendung einer Verkehrssimulationssoftware zur Übertragung der berechneten Ortsveränderung auf das Verkehrsnetz werden Engpässe im Netz aufgezeigt. Auch der Einfluss von Straßensperrungen sowie verkehrliche Steuerungsmaßnahmen auf den Evakuierungsablauf kann mittels einer Verkehrsmodellierungssoftware berechnet werden. Daneben wird der Verkehrsablauf für den zivilen Evakuierungsverkehr und den Einsatzverkehr differenziert nachgestellt. Erkenntnisse bezüglich der Evakuierungsdauer und Engpässen im Netz fließen in die Ausarbeitung von Evakuierungsplänen im AP „Katastrophenschutzplanung“ ein.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Glossar	9
1 Ausgangslage und Zielsetzung	11
1.1 Ausgangslage	11
1.2 Vorhabensziele	11
2 Grundlagen und Stand der Technik	13
2.1 Evakuierung und Evakuierungsplanung	13
2.2 Verkehrliche Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen	15
2.3 Verkehrsmodellierungsgrundlagen	17
2.3.1 Aufbau von Verkehrsplanungsmodellen	18
2.3.2 Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen	20
2.4 Evakuierungsmodellierung	26
3 Komplexmodell Niederschlag und Evakuierung	32
3.1 Hydraulikmodell	33
3.2 Fahrzeugstabilität	35
3.3 Verhaltensmodell	37
3.4 Alltagsmodell	40
3.5 Evakuierungskettenmodell	40
3.6 Routenwahlmodell	41
3.7 Katastrophenschutzplanung	42
4 Evakuierungsverkehrsmodellierung	43
4.1 Modellansätze	43
4.2 Modellaufbau Alltagsmodell	45
4.2.1 Eingangsdaten	45
4.2.2 Modellaufbau	50
4.2.3 Modellvalidierung und -kalibrierung	54
4.3 Modellaufbau Evakuierungskettenmodell	56
4.3.1 Modellierung für evakuierende Personen	57
4.3.2 Modellierung für nicht evakuierende Personen	67
4.4 Modellierung weiterer Verkehrsnachfragegruppen	70
4.5 Modellaufbau Routenwahlmodell	73
4.6 Modellierung evakuierungsspezifischer Besonderheiten	77

4.6.1	Optimierung der Routensuche	77
4.6.2	Helikopternetz	77
4.6.3	Sperrungen	79
4.7	Kenngößen zur Bewertung des Evakuierungsablaufs.....	81
5	Maßnahmenplanung und Szenarienberechnung für das Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall	83
5.1	Analyse bestehender Katastrophenschutzpläne.....	83
5.2	Szenarientwicklung.....	84
5.2.1	Einflussfaktoren auf den Evakuierungsablauf	86
5.2.2	Maßnahmenentwicklung	89
5.2.3	Kombination von Szenarien	90
5.3	Szenarienauswertung.....	93
5.3.1	Auswertungen der Verkehrsnachfrage.....	93
5.3.2	Auswertungen des Verkehrsablaufs	98
5.3.3	Auswertungen für den Einsatzverkehrs.....	104
6	Fazit und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis.....	109
I	Anhang: Parametersammlung Evakuierungsmodell.....	113
I.1	Modellierung für im Evakuierungsgebiet wohnende Personen	113
I.2	Modellierung für nicht evakuierende Personen.....	126
II	Anhang: Auslastungen	128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Nachfragemodelle als Teil von Verkehrsplanungsmodellen (Friedrich, 2011)	19
Abb. 3.2:	Polare und bipolare Einzugsgebiete mit Heimatstandorten (Quelle: Lohse, 2011)	23
Abb. 3.3:	Bipolares Einzugsgebiet in einem schematisch gerasterten Gebiet (Quelle: Lohse, 2011)	23
Abb. 3.4:	Verlauf der BPR-Funktion mit $a=0,5$	26
Abb. 4.1:	Komponenten und Aufbau des Komplexmodell Niederschlag und Evakuierung	32
Abb. 4.2:	Intensitätsklassen in Bad Reichenhall bei einem Extremhochwasserereignis	35
Abb. 5.1:	Vom Verkehrsmodell erfasstes Gebiet (Quelle: GoogleMaps)	46
Abb. 5.2:	Vergleich der mittleren Reiseweiten zur Aktivität Freizeit im Modell und laut Erhebung MiD für Agenten mit (oben) und ohne (unten) Pkw-Verfügbarkeit	55
Abb. 5.3:	Modal Split für alle Personengruppen und Aktivitäten in MiD (links) und im Modell (rechts)	56
Abb. 5.4:	Modal Split für die Personengruppe Rentner in MiD (links) und im Modell (rechts)	56
Abb. 5.5:	Vorbereitungsdauerverteilung der Personengruppe "Erwerbstätige mit Kindern" bei Evakuierungen mit kurzen Vorwarnzeiten	63
Abb. 5.6:	Übersicht über bei der Modellierung dargestellte Zeitabschnitte während Evakuierungen	65
Abb. 5.7:	Aktivitätendauerverschiebungen bei Fahrzeitverlängerungen	67
Abb. 5.8:	Beispiel für die Modifizierung des Aktivitätenplans bei einer Zusatzaktivität im Evakuierungsfall	69
Abb. 5.9:	Modellierte Verkehrsnachfragegruppen im Verkehrsmodell Bad Reichenhall	73

Abb. 5.10:	Hilfsstrecken des "Helikopternetz" zur Abbildung von Ortsveränderungen bei starken Überflutungen und großräumigen Streckensperrungen	79
Abb. 5.11:	Beispiel für die zeitdynamische Sperrung von Strecken aufgrund von Überflutung	81
Abb. 6.1:	Laut Katastrophenschutzplan gesperrte Straßen bei Meldestufe 4 sowie Evakuierungsunterkünfte	84
Abb. 6.2:	Lage von sicheren Orten außerhalb von Bad Reichenhall	87
Abb. 6.3:	Lage von sicheren Orten innerhalb von Bad Reichenhall	88
Abb. 6.4:	Lage von Sperrungen im Stadtgebiet von Bad Reichenhall	89
Abb. 6.5:	Lage von Durchfahrtssperren für den Durchgangsverkehr in Bad Reichenhall	90
Abb. 6.6:	Maßnahmen im Kombinationsszenario 1 - Straßensperrung und Sperrung für Durchgangsverkehr	91
Abb. 6.7:	Maßnahmen im Kombinationsszenario 2 – Streckensperrungen	92
Abb. 6.8:	Befolgungsgrad differenziert nach Personengruppen in Bad Reichenhall	93
Abb. 6.9:	Verkehrsmittelwahl der Evakuierenden zu verschiedenen Tageszeiten	94
Abb. 6.10:	Aktivitäten der Bewohner Reichenhalls, die sich zu Beginn der Evakuierung vormittags im Evakuierungsgebiet aufhalten	95
Abb. 6.11:	kumulierte Verteilung der Vorbereitungsdauern von Evakuierenden zu verschiedenen Tageszeiten	96
Abb. 6.12:	Anzahl Zwischenaktivitäten nach Evakuierungsbeginn vor der Fahrt zum sicheren Ort zu unterschiedlichen Tageszeiten	97
Abb. 6.13:	Verhalten nicht im Evakuierungsgebiet lebender Bad Reichenhaller vormittags (oben) und nachts (unten)	98
Abb. 6.14:	Auslastungen für Szenario "Sicherer Ort, innerorts + außerorts" und Szenario "Sperrung B21" zwischen 10:15 - 10:30 Uhr	100
Abb. 6.15:	Länge des überlasteten Straßennetzes nach dem Evakuierungsaufruf	101
Abb. 6.16:	Länge überlasteter Straßen zwischen Überflutungsbeginn und 90 min nach Überflutungsbeginn	102

Abb. 6.17: Vergleich der durchschnittlichen Geschwindigkeiten für unterschiedliche Evakuierungsszenarien	103
Abb. 6.18: durchschnittliche Evakuierungsdauern je Szenario.....	104
Abb. 6.19: Änderung der Fahrzeit für Rettungskräfte in das Überflutungsgebiet während einer Evakuierung.....	105
Abb. 6.20: Beispiel für die Ausgabe der schnellsten Einsatzroute in das Überflutungsgebiet vor der Überflutung (oben) und 30 Minuten nach Beginn der Überflutung (unten)	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Evakuierungssimulationstools und deren Eigenschaften	31
Tabelle 2: Grenzwerte für die Klassifizierung der Gefährdung von Gebäuden - Einteilung nach Schweizer Modell (H. Kreibich et al., 2007)	34
Tabelle 3: Abstufung des Befahrbarkeitsstatus im Evakuierungsverkehrsmodell	36
Tabelle 4: Übersicht über Befolgungsraten bei Orkanevakuierungen in den USA	38
Tabelle 5: Vorgehensweise zur Berechnung des Anteils einer Personengruppe an der Gesamtbevölkerung Bad Reichenhalls	49
Tabelle 6: Pflichtaktivitäten der im Evakuierungskettenmodell verwendeten Personengruppen mit Angabe der Prioritätsstufe	51
Tabelle 7: Aktivitätenketten im Evakuierungsfall mit Auswahlwahrscheinlichkeiten für Personengruppe Erwerbstätige mit Kind (Ew_m_Ki) und Arbeit als Startaktivität	59
Tabelle 8: Beispiel für in der Modellierung verwendete Vorbereitungsdauern bei Evakuierungen für die Personengruppe „Erwerbstätiger mit Kind (Ew_m_Ki)“	62
Tabelle 9: Aktivitäten und Aktivitätendauern während einer Evakuierung (Quelle: Lindell et al., 2005a)	64
Tabelle 10: Übersicht über verwendete Parameter bei der Umlegung des Evakuierungsverkehrs	77
Tabelle 11: Übersicht über Szenarien und Maßnahmen	85
Tabelle 12: Übersicht über Aufenthaltsorte der Einwohner Bad Reichenhalls zu Beginn der Evakuierung	94

Glossar

Agent	Begriff aus der mikroskopischen Modellierung. Beschreibt im Modell eine Person mit ihren Eigenschaften (z. B. Personengruppe) und ihren Aktivitäten und Aktivitätenorten (z.B. Arbeitsort).
Entscheidungsdauer	Zeit zwischen Evakuierungsaufwurf und dem Fahrtbeginn zur ersten Evakuierungsaktivität.
Evakuierung	In EvaSim verwendet als Bezeichnung für das geordnete und angewiesene Verlassen eines definierten Gebietes aufgrund einer Überflutung.
Evakuierungsbeginn	Zeitpunkt, zu dem alle sich im → Evakuierungsgebiet aufhaltenden Personen zur Evakuierung aufgerufen worden sind.
Evakuierungsdauer	Zeitspanne zwischen Evakuierungsbeginn und Ankunft des letzten Evakuierenden an seinem Ziel/sicheren Ort.
Evakuierungsgebiet	Räumliches Gebiet, das aufgrund einer Überflutung evakuiert wird.
Evakuierungskettenmodell	Teil des → Evakuierungsverkehrsmodells, mit dem die Aktivitäten, die Ziele und die für Ortsveränderungen genutzten Verkehrsmittel während einer Evakuierung modelliert werden.
Evakuierungsverkehrsmodell	Dreistufiges Modell zur Modellierung von Evakuierungsverkehrsströmen, bestehend aus dem → Alltagsmodell, dem → Evakuierungskettenmodell und dem → Routenwahlmodell.
Routenwahlmodell	Teil des → Evakuierungsverkehrsmodells, mit dem die Routenwahl der Menschen nachgebildet wird, so dass die Verkehrsnachfrage während der Evakuierung auf das Verkehrsnetz verteilt werden kann.
sicherer Ort	Ort außerhalb des Evakuierungsgebietes, an den sich die Evakuierenden begeben, wenn sie evakuieren.
Überflutungsbeginn	Zeitpunkt zu dem die ersten Straßenabschnitte überflutet werden.

Überflutungsgebiet	Räumliches Gebiet, das von einer Überflutung betroffen ist.
Vorbereitungsdauer	Zeit, die Agenten im Modell für die Vorbereitung der Evakuierung benötigen. Die V. beginnt mit dem Zeitpunkt des Evakuierungsaufrufes und endet mit dem Start der Fahrt zu einem sicheren Ort.
Vorwarnzeit	Zeit zwischen Evakuierungsaufruf und Beginn der Überflutung.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Im Zuge des Klimawandels und der damit verbundenen Temperaturerhöhung kommt es weltweit immer häufiger zu extremen Wetterereignissen. Dazu gehören beispielsweise Starkregenfälle, die zu Überflutungen von zum Teil großer Gebiete führen. Von den 21 teuersten und tödlichsten Wetterkatastrophen in Mittel- und Westeuropa zwischen 1997 und 2008 wurden acht durch ein Hochwasser verursacht. Analysen auf Basis von Daten der Münchner Rück Versicherung zeigen, dass sich in Europa die Anzahl wetterbedingter Naturkatastrophen seit 1980 verdoppelt hat (Kron et al., 2008). Diese Entwicklung wird sich aufgrund des andauernden Klimawandels zukünftig fortsetzen.

Die Auswirkungen von potenziellen Überflutungsereignissen unterhalb von Talsperrenstandorten oder in Folge von extremen Niederschlägen auf Siedlungen und Verkehrswege können aus verkehrstechnischer Sicht im Wesentlichen durch drei Maßnahmen minimiert werden:

- angepasste Planung zukünftiger Siedlungsflächen und Verkehrswege.
- Zusätzliche Verkehrswege in geeigneter Lage können alternative Fluchtwege für existierende Siedlungen schaffen.
- Entwicklung eines auf Evakuierungsszenarien basierenden Krisenmanagements, wodurch die Bewohner und die Einsatzkräfte besser auf eine Notfallsituation vorbereitet werden können.

Im vorliegenden Forschungsprojekt EvaSim werden durch Kopplung von hydraulischer und verkehrlicher Simulation Verkehrsabläufe während Evakuierungen modelliert und berechnet. Durch die Darstellung typischer Verhaltensweisen der Betroffenen im Modell erhält die Modellierung einen starken Realitätsbezug. Auf Basis der Modellierungsergebnisse verschiedener Evakuierungsszenarien werden Katastrophenschutzpläne entwickelt, wodurch den Behörden und Einsatzkräfte eine bessere Vorbereitung auf den Ernstfall möglich ist.

1.2 Vorhabensziele

Ziel des Forschungsprojektes ist es, durch eine Kopplung der Simulation von Hochwasser- bzw. Flutwellenausbreitung mit der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen einen Beitrag zum besseren Krisenmanagement im Extremfall zu liefern. Am Beispiel realer Standorte sollen durch die Anwendung der Simulation und Optimierung Evakuierungsszenarien für den Notfall entwickelt werden.

In dem Teilvorhaben „Modellierung und Optimierung verkehrlicher Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen“ am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und

Verkehrslleittechnik geht es dabei um die verkehrliche Simulation. Ausgangspunkt der Simulation ist eine hydraulische Belastung wie Bemessungshochwasserabfluss, Deichbruch oder Talsperren(teil)versagen, wie sie z. B. bei den katastrophalen Hochwasserereignissen an Elbe, Oder und Donau aufgetreten sind.

Gesamtziel des Teilvorhabens ist die Schaffung einer Verkehrssimulationsumgebung, die die Besonderheiten des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen berücksichtigt und die notwendigen Schnittstellen zu den Ergebnissen der Verbundpartner enthält. Durch eine Schnittstelle zum Bereich Hydraulik können die zeitlichen und räumlichen Ausdehnungen einer Überflutung von Straßen durch dynamische Straßensperren berücksichtigt werden.

Als Ergebnis der Simulation erhält man Werte für den Zeitbedarf einer Evakuierung, über eventuelle Engstellen im Verkehrsnetz und über die Lage von Gebieten, die aufgrund der Überflutung nicht mehr an das Straßennetz angebunden sind. Aufgrund dieser Ergebnisse kann das Routenwahlverhalten so optimiert werden, dass sich ein angepasster Fluchtwegeplan ergibt, der unter den gegebenen Randbedingungen (Lage der Gebäude, Struktur der Verkehrswege, Zeit bis zur Überflutung) eine Evakuierung optimiert. In der Terminologie der Förderausschreibung handelt es sich daher unter anderem um ein:

- Simulationssystem zur Optimierung der Krisenkommunikation unter Berücksichtigung der sozialen Dynamik,
- Konzept zur Vermittlung von Handlungsperspektiven für Gefährdungs- und Katastrophenlagen,
- Risikobewertungs- und Simulationswerkzeug zur Gefahrenidentifikation.

Durch Bereitstellung der zu entwickelnden Simulationssoftware werden den Behörden Informationen zur Verfügung stehen, die eine sinnvolle Verkehrslenkung im Katastrophenfall ermöglichen. Durch die Simulation mittels gekoppelter Hydraulik- und Verkehrsmodelle sind nicht nur qualitative sondern zuverlässige quantitative Aussagen möglich, aus der die Erstellung erheblich leistungsfähigerer Katastrophenpläne resultiert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden zwei für die das Projekt EvaSim wesentliche Bereiche näher betrachtet. Zum einen erfolgt eine Definition evakuierungsrelevanter Begriffe. Die Vorgehensweise bei Evakuierungsplanungen in der Praxis mit besonderem Augenmerk auf verkehrliche Maßnahmen bei Evakuierungen wird dargestellt. Zum anderen werden der theoretische Überbau und der grundsätzliche Aufbau von Verkehrsmodellen beschrieben.

Bei der Verkehrsmodellierung im Evakuierungsfall werden die beiden Themengebiete kombiniert. Es wird ein kurzer Überblick über bisher verwendete Evakuierungsverkehrsmodelle gegeben. Die Softwarepakete werden hinsichtlich benötigter Eingangsdaten, Berechnungsmethoden und Ausgabedaten miteinander verglichen.

2.1 Evakuierung und Evakuierungsplanung

In der Literatur wird Evakuierung definiert als „...die organisierte Verlegung von Menschen aus einem akut gefährdeten in ein sicheres Gebiet, wo sie vorübergehend untergebracht, gepflegt und betreut werden.“ (Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz, 2003). Die Planungen für eine Evakuierung umfassen nicht nur das Insicherheitbringen der betroffenen Personen sondern auch deren Unterbringung und Verpflegung bis zum Ende des Bedrohungszustandes. Evakuierungen gehen damit weit über eine Rettung, dem „Abwenden eines lebensbedrohlichen Zustandes durch lebensrettende Maßnahmen und/oder durch Befreien aus einer lebensbedrohlichen Zwangslage“ hinaus (Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz, 2003).

Zur Vorbereitung der komplexen Abläufe während einer Evakuierung werden im Vorfeld Evakuierungspläne erarbeitet. In der Literatur versteht man unter einem Evakuierungsplan „...spezielle Verhaltensregeln für den Gefahrenfall beim konzentrierten Vorhandensein von Menschen, Tieren und Sachwerten.“ (Müller, 2009).

Evakuierungspläne beinhalten sämtliche Teilaufgaben während der Evakuierung und benennen Verantwortliche für die Durchführung. Beim Erstellen eines Evakuierungsplanes sollten alle Beteiligten wie Verwaltung, Polizei, Feuerwehr, THW, Hilfsorganisationen und anderen Stellen beteiligt sein. Bestandteile von Evakuierungsplänen sind (nach Mohn, 2006):

1. Festlegung des Evakuierungsgebietes
2. Warnung und Information der Einwohner
Diese Maßnahmen betreffen nicht nur diejenigen, die evakuiert werden müssen, sondern alle Bewohner eines Ortes.

3. Transport der zu evakuierenden Bevölkerung
Besondere Transportmittel für Alte und Kranke sind zu berücksichtigen.
4. Versorgung der Evakuierten
Aufnahme, Unterbringung, Betreuung sowie Rückführung der Evakuierten.
Hierbei werden die Aufnahmegebiete und -objekte bestimmt und ggf. Notunterkünfte eingerichtet. Sowohl die kurzfristige Betreuung im Rahmen der Soforthilfe als auch die längerfristige Versorgung müssen festgelegt werden. Darüber hinaus müssen Maßnahmen für die Rückführung der Evakuierten geplant werden.
5. Organisation der eigenen Verwaltung
Die Evakuierungsmaßnahmen binden Personal. Die Verwaltung ist organisatorisch lagebezogen umzustellen.
6. Sonstiges
Neben den genannten Punkten sind weitere Aufgabenbereiche:
 - Sicherungs- und Kontrollmaßnahmen für die Zeit der Evakuierung
 - Versorgung und Evakuierung von Tieren
 - Öffentlichkeitsarbeit

Die Schwierigkeit bei einer Evakuierung besteht darin, den richtigen Zeitpunkt für die Evakuierung sowie das zu evakuierende Gebiet festzulegen. Je näher das katastrophale Ereignis bevor steht, desto genauer kann das Ausmaß der zu erwartenden Katastrophe und damit die Ausdehnung des zu evakuierenden Gebietes bestimmt werden. Allerdings muss zwischen dem Zeitpunkt der Entscheidung zur Evakuierung und dem Eintritt der Katastrophe noch genügend Zeit zum Evakuieren bleiben. Damit sinkt jedoch die Prognosegenauigkeit über die betroffenen, zu evakuierenden Gebiete. Eine irrtümlich durchgeführte Evakuierung kostet zum einen viel Aufwand und Geld. Zum anderen werden bei falscher Abschätzung der betroffenen Gebiete eventuell Menschen in einem Gebiet gefährdet, für das zu Beginn der Evakuierung keine Betroffenheit prognostiziert wurde, das jedoch von der Katastrophe betroffen ist. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass Personen die mehrere Male irrtümlich evakuieren mussten, die Warnungen zukünftig nicht mehr ernst nehmen und auch im Ernstfall ihrer Häuser nicht verlassen. Über die Bedeutung dieses sogenannten Cry-Wolf – Verhaltens gibt es mehrere Untersuchungen mit unterschiedlichen Ergebnissen (Wolshon et al., 2005b).

Eine Evakuierungsentscheidung ist daher immer eine Abwägung zwischen der Gefährdung der Bevölkerung durch die Katastrophe einerseits und andererseits durch die Folgen einer Fehleвакуierung. Um die Prognosegenauigkeit für den Verlauf einer Katastrophe zu erhöhen, werden Modelle eingesetzt, um beispielsweise den Verlauf eines Hurrikans, den von einem Tsunami betroffenen Küstenabschnitt oder die überflutete Fläche bei Überschwemmungen vorherzusagen. Außerdem

werden Modelle verwendet, um die Zeit bis zum Beginn der Katastrophe zu berechnen.

Auch für den verkehrlichen Ablauf von Evakuierungen ist der Einsatz von Modellen sinnvoll. In vielen Großstädten ist das Straßennetz bereits durch den Alltagsverkehr überlastet oder an der Kapazitätsgrenze (Abdelgawad et al., 2009). Bei Evakuierungen kann die Verkehrsnachfrage drastisch ansteigen. Außerdem ändern sich die Quellen, Orte, an denen die Fahrten beginnen, und die Ziele, die aufgesucht werden (Abdelgawad et al., 2009). Wegen dieser Änderung und dem Anstieg der Verkehrsnachfrage besteht die Gefahr von Straßenüberlastungen und Staus in Evakuierungssituationen. Dies führt zu einer Verlängerung der Evakuierungsdauer und damit zu einer Gefährdung der Personen, die sich im Evakuierungsgebiet aufhalten und dieses gegebenenfalls nicht rechtzeitig verlassen können. Auch die Rettungs- und Einsatzkräfte sind eingeschränkt und können ihre Ziele nicht erreichen. Durch die Verwendung von Verkehrsmodellen zur Simulation des Evakuierungsverkehrs können bereits im Vorfeld der Katastrophe zu erwartende Engstellen im Netz lokalisiert und verkehrliche Maßnahmen zur Steuerung und Optimierung des Verkehrsablaufs getestet werden. Die wirkungsvollsten Maßnahmen werden in Katastrophenschutzpläne übernommen, wodurch deren Leistungsfähigkeit und Effektivität erhöht wird.

2.2 Verkehrliche Steuerungsmaßnahmen in Evakuierungssituationen

Die Evakuierungsdauer kann durch verschiedene verkehrliche Maßnahmen reduziert werden. Dabei werden meist eine Beschleunigung des Verkehrsflusses und die Beseitigung von Engstellen im Netz angestrebt. Im Folgenden wird ein Überblick über verschiedene Evakuierungsmaßnahmen gegeben. Außerdem werden Ergebnisse von Forschungsarbeiten vorgestellt, die die Wirksamkeit der Maßnahmen quantifizieren.

Bessere Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur

- „Contra Flow“: Freigabe der Gegenfahrbahn einer Straße für den Evakuierungsverkehr.

Bei einer Evakuierung haben die meisten Fahrten das gleiche Ziel, den sicheren Ort, und damit die gleiche Richtung. Diese Tatsache wird bei der Maßnahme „Contra Flow“ genutzt. Sämtliche Fahrspuren einer Straße werden in Richtung sicherer Ort freigegeben. Dadurch verdoppelt sich die Kapazität in der Regel, wodurch die Auslastung sinkt, die Reisezeit ansteigt und Engpässe durch erhöhtes Verkehrsaufkommen vermieden oder zumindest entlastet werden können. Bei der Planung der Maßnahme ist zu beachten, dass keine für Einsatzkräfte wichtigen

Wege gesperrt werden. Auch der zu evakuierenden Bevölkerung darf der Evakuierungsweg durch die Maßnahme nicht abgeschnitten werden.

Boden et al. (2008) untersuchten am Beispiel zweier Dresdner Stadtteile die Wirkung der Öffnung der Gegenfahrbahn auf den Evakuierungsverkehr. Dabei nutzten sie einen Optimierungsalgorithmus, der die Maßnahme so auf Straßen im Netz verteilt, dass die Fahrzeit aller Evakuierungsfahrten minimiert wird. Als weitere Maßnahme wurden die Straßen im Evakuierungsgebiet nur für den Evakuierungsverkehr frei gegeben. Im Ergebnis erzielten sie Rückgänge der Gesamtfahrzeiten aller Fahrzeuge um 40%.

Beeinflussung der Verkehrsnachfrage

- Schichtung der Nachfrage durch gestaffelte Evakuierung:

Die Bevölkerung wird angewiesen, nicht gleichzeitig zu evakuieren, sondern abhängig vom Grad der Gefährdung zu unterschiedlichen Zeiten. (Abdelgawad et al., 2009). Dafür wird das Evakuierungsgebiet in Abschnitte unterschiedlicher Gefährdungsstufen eingeteilt. Die Bewohner der Gebiete einer Gefährdungsstufe starten erst dann die Evakuierung, wenn die Bewohner der Gebiete der nächst höheren Gefährdungsstufe das Evakuierungsgebiet bereits verlassen haben oder zumindest soweit entfernen sind, dass sie nicht aufeinander treffen. Durch die Teilung der Nachfrage teilt sich auch die Belastung im vorhandenen Verkehrsnetz, was zu einer Erhöhung der Fahrzeiten und damit zu einer Reduktion der Evakuierungszeit führt. Die Herausforderung bei dieser Maßnahme besteht zum einen in der Abgrenzung der unterschiedlichen Gefährdungszonen und zum anderen in der Bestimmung der Dauer zwischen den Evakuierungsstartzeitpunkten aufeinanderfolgender Schichten.

Aboelata et al. (2004) haben anhand einer kleinen Gemeinde mit 3.500 Einwohnern den Evakuierungsablauf simuliert. In einem weiteren Szenario erhöhten sie die Nachfrage um den Faktor fünf. Der Vergleich zwischen diesen beiden Szenarien entspricht der Wirkung einer Schichtung der Nachfrage in fünf gleichgroße Schichten. Bei der Berechnung der Szenarien wird die Vorwarnzeit zwischen drei Stunden vor dem Dammbbruch bis zwei Stunden nach dem Dammbbruch in 30-Minuten Schritten geändert. Das verwendete Simulationstool berechnet die Anzahl Personen, die die Überflutung überleben. Bei sehr kurzen und sehr langen Vorwarnzeiten ist diese Anzahl bei beiden Szenarien am niedrigsten. Bei langen Vorwarnzeiten ist die vorhandene Straßenkapazität für die Evakuierung aller Bewohner ausreichend. Bei kurzen Vorwarnzeiten nach dem Dammbbruch genügt die Zeit nicht mehr, um die Evakuierung zu starten. Bewohner bleiben im Gebäude, wo sie geschützt sind. Die größten Unterschiede ergeben sich bei einer Vorwarnzeit von etwa 30 Minuten. Hier liegt die Überlebensrate ohne Schichtung bei ca. 55%, während bei einer Schichtung der Nachfrage mehr als 70% der Einwohner noch rechtzeitig evakuieren können.

Diese Werte liefern einen Anhaltspunkt zu der Wirksamkeit der geschichteten Evakuierung. Sie sind abhängig von der Art der Überflutung, dem Straßennetz und dem betrachteten Evakuierungsgebiet, so dass sie quantitativ nicht auf andere Evakuierungen übertragen werden können.

- Verkehrsvermeidung:
Falls es der Gefährdungsgrad zulässt, wird die Bevölkerung angewiesen, das Haus nicht zu verlassen und sich in die oberen Etagen eines Gebäudes zu begeben. Dadurch steht die vorhandene Straßenkapazität den Bewohnern zur Verfügung, die aufgrund hoher Wasserstände ihr Haus verlassen müssen. Welche Gebäude für die sogenannte vertikale Evakuierung geeignet sind, kann im Vorfeld der Evakuierung anhand der Standsicherheit berechnet werden. Auch bei hohen Gefährdungsgraden kann die Evakuierung innerhalb des Hauses sinnvoll sein, wenn die Vorwarnzeiten sehr kurz sind. Aboelata et al. (2004) zeigen in ihrem oben beschriebenen Beispielszenario, dass je nach Lage der Notunterkünfte oder anderer sicherer Orte bis zu 10% der Bevölkerung weniger getötet werden, wenn sie nach dem Dammbbruch das Haus nicht verlassen.

Verkehrslenkung

Abdelgawad et al. (2009) benennen Verkehrslenkungsmaßnahmen als wichtigen Faktor, von dem die erfolgreiche Umsetzung einer Evakuierung abhängt. Jedoch weisen sie darauf hin, dass es nur wenige Studien gibt, in denen die Wirkung von Verkehrslenkungsmaßnahmen auf den Evakuierungsablauf untersucht und quantifiziert wird. Als für die Verkehrslenkung während Evakuierungen geeignete Maßnahmen nennen sie:

- Dynamische Wechselwegweisung
- Anpassung von Signalsteuerungen an Knotenpunkten auf die Evakuierungssituation

2.3 Verkehrsmodellierungsgrundlagen

Verkehrsmodelle dienen der abstrahierten Darstellung des Verkehrsgeschehens in der Realität. Sie werden verwendet, um im Rahmen von Prognoseberechnungen aus der zukünftigen Siedlungsstruktur und den zukünftigen Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer die Belastungen auf Straßen im Verkehrsnetz für das Prognosejahr zu berechnen. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Berechnung der Auswirkungen des heutigen Verkehrs auf das gegenwärtige Straßennetz oder auf die Umwelt.

2.3.1 Aufbau von Verkehrsplanungsmodellen

Verkehrsmodelle bestehen aus mehreren Teilmodellen, die in Abb. 2.1 abgebildet sind. Datenmodelle enthalten Eingangsdaten für die Berechnung des Verkehrsaufkommens. Das Mobilitätsverhalten wird über Kenngrößen zum Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmer beschrieben, wie z. B. die Anzahl Wege pro Tag, die Wahl des Verkehrsmittels oder die Wegezwecke. Diese Kenngrößen werden aus Befragungen zum Mobilitätsverhalten der Bewohner des betrachteten Untersuchungsgebietes abgeleitet. Können diese Erhebungen vor Ort nicht durchgeführt werden, muss auf repräsentative Erhebungen anderer Regionen zurück gegriffen werden. Eine geeignete Erhebung ist die deutschlandweit durchgeführte Verkehrsumfrage MiD („Mobilität in Deutschland“), bei der letztmalig im Jahr 2008 25.000 Haushalte zu ihrem Mobilitätsverhalten befragt wurden.

Das Datenmodell Verkehrsangebot enthält Informationen über das Straßen- und ÖV-Netz mit sämtlichen Attributen wie Kapazitäten (in Anzahl Fahrzeuge/Zeiteinheit oder Anzahl Passagiere/Zeiteinheit), Geschwindigkeiten, ÖV-Haltstellen oder ÖV-Linienrouten. Außerdem sind die ÖV-Fahrpläne hinterlegt. Das Verkehrsaufkommen wird in Verkehrssysteme unterteilt, die sich hinsichtlich des Verkehrsmittels und der Betriebsform (individuell oder öffentlich) unterscheiden. Straßen bzw. Schienenwege und Knotenpunkte werden als Kanten bzw. Strecken und Knoten dargestellt. Verkehrsströme beginnen und enden in der Modellabbildung in Verkehrszellen, die mittels Anbindungen mit dem Verkehrsnetz verbunden sind.

Für jede Verkehrszelle sind im Datenmodell Siedlungsstruktur quantitative Angaben über Wohnungen, Arbeits- und Schulplätzen, sowie öffentlichen Einrichtungen wie Einkaufsmöglichkeiten oder Freizeiteinrichtungen im untersuchten Gebiet hinterlegt. Außerdem enthält das Datenmodell Siedlungsstruktur demografische Informationen auf Verkehrszellenebene zu den im Untersuchungsgebiet lebenden Personen.

Aus diesen Eingangsdaten können je nach Fragestellung unterschiedliche Wirkungsmodelle berechnet werden (siehe Abb. 2.1). Eines der Wirkungsmodelle ist das Verkehrsnachfragemodell. Unter Verkehrsnachfrage wird die Nachfrage nach Ortsveränderungen verstanden, die sich aus der örtlichen Trennung von unterschiedlichen Aktivitätenbedürfnissen ergibt (Schiller, 2004). Aufgrund dieser Trennung müssen zur Erfüllung der Bedürfnisse Ortsveränderungen durchgeführt werden, was zu einer Verkehrsnachfrage führt. Dementsprechend werden mit Verkehrsnachfragemodellen die Zahl der Ortsveränderungen zwischen dem im Netz vorhandenen Quellen und Zielen sowie die für diese Ortsveränderungen genutzten Verkehrsmittel berechnet. Dafür werden mit Entscheidungsmodellen die Wahl eines Ziels oder eines Verkehrsmittels nachgebildet. Mit Routenwahlmodellen werden die berechneten Fahrten auf eine Route im Verkehrsnetz umgelegt, so dass im Ergebnis den Straßen im Modell Verkehrsbelastungen zugeordnet werden können.

Bewertungsmodelle enthalten Zielfunktionen, mit denen die modellierte Verkehrssituation bewertet wird. Dabei kann es sich beispielsweise um eine zu erreichende Durchschnittsgeschwindigkeit im gesamten Netz handeln oder um Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs.

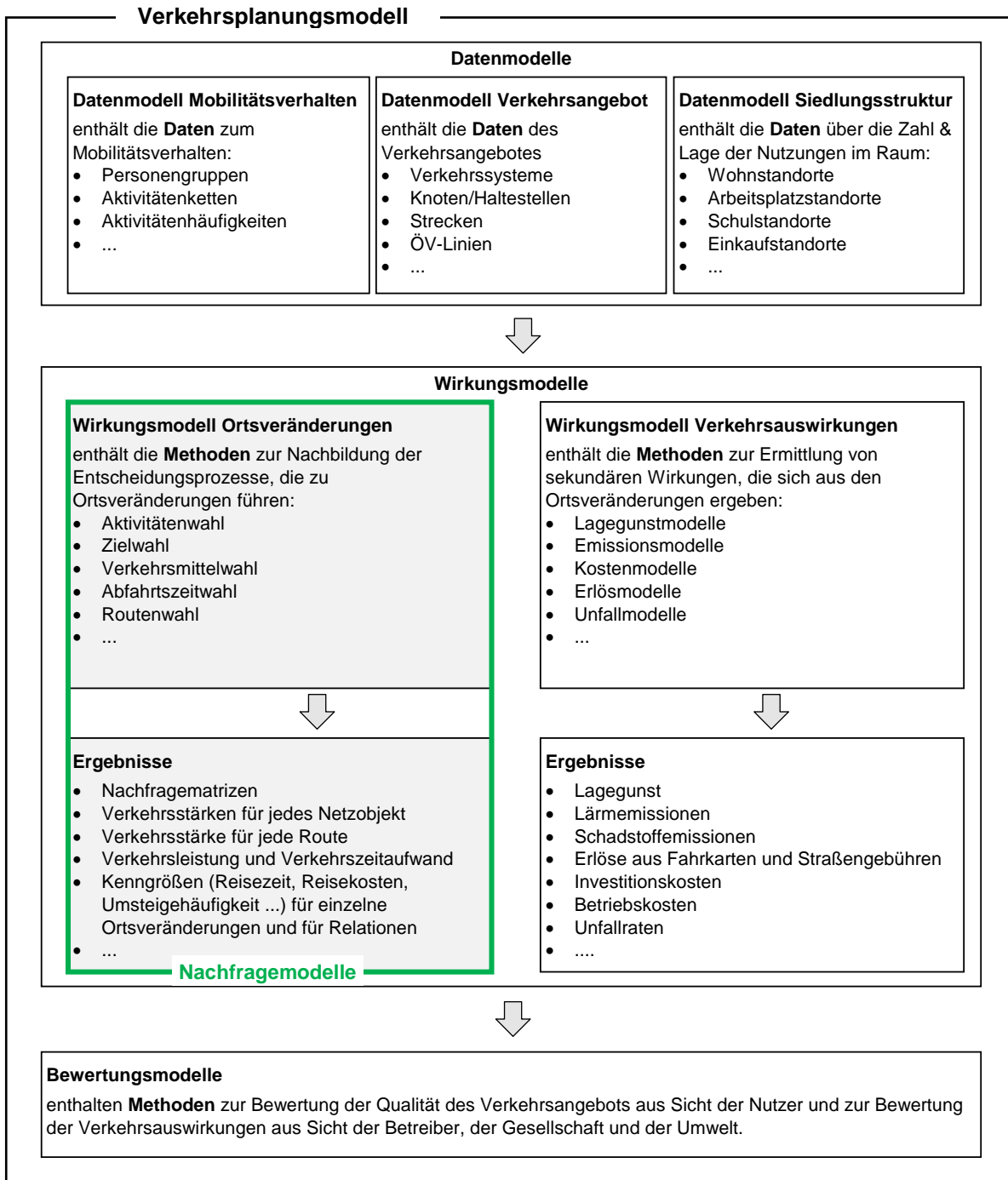


Abb. 2.1: Nachfragemodelle als Teil von Verkehrsplanungsmodellen (Friedrich, 2011)

Der Detaillierungsgrad der Ergebnisse eines Verkehrsnachfragemodells ist abhängig vom Aggregationsgrad, der für die Berechnung verwendet wird. Dabei wird in der Regel zwischen drei Modelltypen unterschieden:

Makroskopische Modelle sind gekennzeichnet durch die Zusammenfassung der zu modellierenden Objekte. Dies betrifft zum einen die Verkehrsteilnehmer, die in Abhängigkeit sozioökonomischer Faktoren wie Berufstätigkeit oder Familienstand zu verhaltenshomogenen Personengruppen zusammengefasst werden. Über Wahrscheinlichkeitsaussagen zum Verkehrsverhalten der Mitglieder aller Personengruppen wird das zu erwartende mittlere Verkehrsgeschehen berechnet (Lohse, 2011). Im Ergebnis der Berechnung werden den Netzelementen Belastungen und daraus abgeleitet aktuelle Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten zugeordnet (Lohse, 2011).

Bei **mikroskopischen Modellen** werden alle Objekte der Realität detailliert und ohne Aggregation im Modell abgebildet. Für jeden Verkehrsteilnehmer wird im Modell ein Agent erzeugt, dem entsprechend den Erkenntnissen aus Erhebungen über stochastische Simulationsalgorithmen ein Verkehrsverhalten für den betrachteten Modellierungszeitraum zugeordnet wird. Teil der verwendeten Berechnungsalgorithmen wie z.B. der Monte-Carlo-Simulation ist dabei die Ziehung von Zufallszahlen. Im Ergebnis erhält man die Ortsveränderungen jeder einzelnen, virtuellen Person. Durch die Simulation mehrerer dieser Einzelereignisse werden die zu erwartenden mittleren Verkehrszustände im Verkehrsnetz abgebildet (Lohse, 2011).

Neben mikroskopischen Nachfragemodellen gibt es auch mikroskopische Verkehrsflussmodelle. Hier wird jedes einzelne Fahrzeug, dessen Geschwindigkeit und Beschleunigung abgebildet.

Bei **mesoskopischen Modellen** handelt es sich um eine Mischform aus makroskopischen und mikroskopischen Modellen. Meist wird die Nachfrage makroskopisch berechnet. Im letzten Schritt, der Umlegung, wird dann ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell verwendet, um die Interaktion zwischen Fahrzeugen und Straße, sowie zwischen den Fahrzeugen untereinander abzubilden. Bei einer anderen Vorgehensweise werden Elemente der mikroskopischen Nachfragemodellierung in den Stufen Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung verwendet. Die Umlegung erfolgt dann nach makroskopischen Methoden.

2.3.2 Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen

Nachfragemodelle in Verkehrsplanungsmodellen sind meist in vier Stufen aufgebaut und werden mit dem Vier-Stufen-Algorithmus berechnet:

Verkehrserzeugung

Im ersten Schritt wird das Quell- und Zielverkehrsaufkommen für jede Verkehrszelle im Netz im betrachteten Untersuchungsgebiet während des Modellierungszeitraums berechnet. Eingangsgrößen sind die Daten aus dem Datenmodell Siedlungsstruktur. Anhand von spezifischen Mobilitätsraten, den Eingangsdaten aus dem Datenmodell Mobilitätsverhalten, wird die Anzahl Ortsveränderungen ermittelt, die eine Einheit einer Strukturgröße im betrachteten Modellierungszeitraum erzeugt bzw. anzieht. Ergebnis der Verkehrserzeugung ist die Anzahl der startenden (=Quellverkehr) und ankommenden (=Zielverkehr) Ortsveränderungen der Verkehrszellen im betrachteten Untersuchungsgebiet.

Bei Verkehrserzeugungsmodellen unterscheidet man zwischen wegebasierten und tourbasierten Modellen. Bei wegebasierten Modellen wird zwei aufeinanderfolgenden Aktivitäten eine bestimmte Auftretenswahrscheinlichkeit zugeordnet, die sich aus den Daten zum Mobilitätsverhalten ergibt. Bei dieser Vorgehensweise sind die vorherigen und nachfolgenden Aktivitäten unbekannt.

Bei tourbasierten Modellen wird eine Folge von Aktivitäten einer Person über einen definierten Zeitraum erzeugt. Die Eintretenswahrscheinlichkeiten für bestimmte Aktivitätenfolgen werden ebenfalls aus Erhebungsdaten berechnet, die als Datenmodell des Mobilitätsverhaltens Eingangsgrößen der Nachfrageberechnung sind.

Verkehrsverteilung

Jeder im Schritt Verkehrserzeugung erzeugten Ortsveränderung des Quellverkehrs wird im zweiten Schritt ein Ziel zugewiesen. Jeder erzeugten Ortsveränderung des Zielverkehrs wird eine Quelle zugeordnet. Die Auswahl einer Quelle-Ziel-Relation aus allen Alternativen hängt vom Widerstand der Alternative und von der Bewertung dieses Widerstandes ab. Die verwendete Widerstandsfunktion besteht meist aus den Kenngrößen Reisezeit oder Reiseweite. Je nach Modell können außerdem beispielsweise die Kosten oder die Entfernung der Ortsveränderung Teil der Widerstandsfunktion sein. Diese Kenngrößen werden anhand des Verkehrsnetzes berechnet, das durch das Datenmodell Verkehrsangebot als Eingangsgröße in die Nachfrageberechnung eingeht. Ergebnis der Verkehrsverteilung ist die Anzahl Ortsveränderungen auf jeder Relation zwischen den Verkehrszellen im Untersuchungsgebiet.

Die Bewertung des Widerstandes erfolgt über Entscheidungsmodelle, mit denen die Empfindlichkeit der Verkehrsteilnehmer gegenüber Widerstandsänderungen abgebildet werden kann. Im vorliegenden Projekt wird das Entscheidungsmodell LOGIT bei der Verkehrsverteilung angewendet:

$$f(w_{ij}) = e^{\beta \cdot w_{ij}}$$

Die Bewertungswahrscheinlichkeit einer Relation ij für eine Personengruppe und eine Aktivitätenart ergibt sich aus:

$$p(w_{ij}) = \frac{e^{\beta \cdot w_{ij}}}{\sum_n^N e^{\beta \cdot w_{ij}}}$$

mit i	Quellverkehrszelle i
j	Zielverkehrszelle j
w_{ij}	Widerstand w zwischen der Quellzelle i und der Zielzelle j
$p(w_{ij})$	Bewertungswahrscheinlichkeit der Relation ij
β	Skalierungsparameter
N	Anzahl aller Quelle-Ziel-Alternativen der betrachteten Relation

Als Widerstand w_{ij} wird in EvaSim die Entfernung zwischen Quell- und Zielverkehrszelle verwendet. Dieser Widerstand wird mit einem Bewertungsparameter β skaliert, der die Empfindlichkeit des Verkehrsteilnehmers gegenüber einer Ortsveränderung mit dem Widerstand w_{ij} angibt. Der Bewertungsparameter ist abhängig von der Personengruppe, zu der der Verkehrsteilnehmer gehört und von der Art der Aktivität, die durchgeführt wird. Die Bewertungswahrscheinlichkeit $p(w_{ij})$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Ortsveränderung zwischen einer Quelle i und einem Ziel j vom Verkehrsteilnehmer durchgeführt wird. $P(w_{ij})$ wird für alle möglichen Relationen berechnet.

Zusätzlich zum Widerstand zwischen Quelle und Ziel kann bei der Berechnung der Verkehrsverteilung auch die Lage der Heimatstandorte berücksichtigt werden. Durch diesen von Lohse entwickelten Ansatz wird das Verhalten der Verkehrsteilnehmer realistischer abgebildet (Lohse, 2011). Als Heimatstandort wird die Wohnung bzw. der Wohnort bezeichnet. Hier beginnen und enden viele Ortsveränderungen. Andere Ziele werden daher im Einzugsbereich des Heimatstandortes gewählt. Dieser Einzugsbereich wird aufgrund der Abhängigkeit zum Wohnstandort als polar bezeichnet. Die linke Skizze in Abb. 2.3 zeigt das Einzugsgebiet.

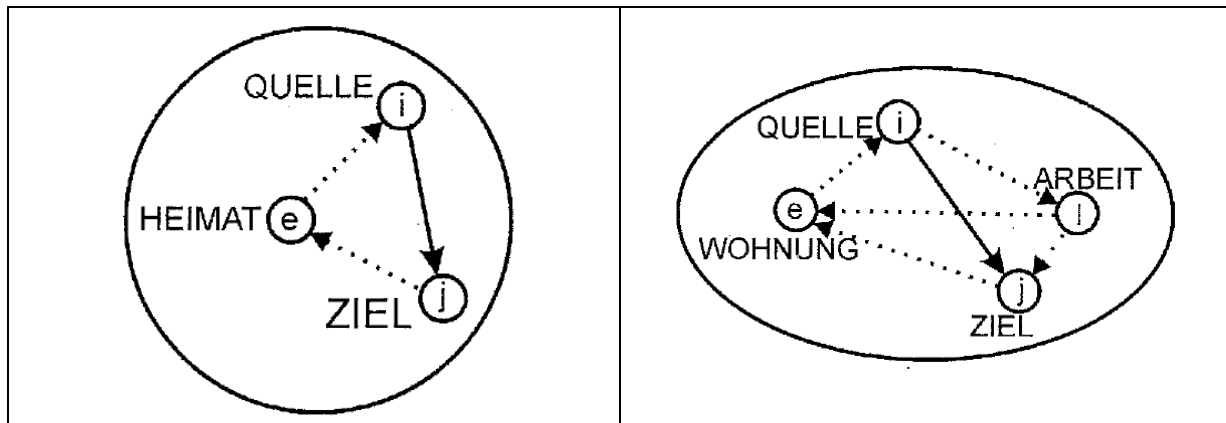


Abb. 2.2: Polare und bipolare Einzugsgebiete mit Heimatstandorten (Quelle: Lohse, 2011)

Neben der Wohnung haben viele Personen noch einen weiteren Ort als festen Anlaufpunkt, der regelmäßig aufgesucht wird und damit als weiterer Heimatstandort aufgefasst werden kann. Meist handelt es sich dabei um Orte, an denen Pflichtaktivitäten durchgeführt werden, die sowohl lokal als auch zeitlich nicht flexibel sind. Für berufstätige Personen ist dies beispielsweise die Arbeitsstelle. Die meisten Ziele werden im Einzugsbereich dieser beiden Orte gewählt, wie Abb. 2.3 verdeutlicht. Damit bewegt sich der Verkehrsteilnehmer in einem bipolaren Einzugsgebiet.

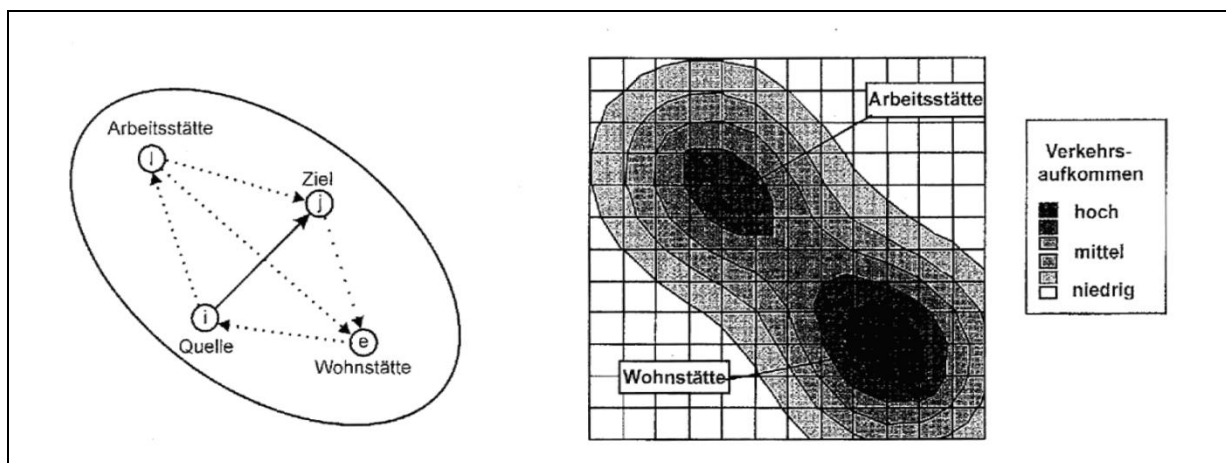


Abb. 2.3: Bipolares Einzugsgebiet in einem schematisch gerasterten Gebiet (Quelle: Lohse, 2011)

Zur Darstellung dieses Verhaltens entwickelte Lohse einen Berechnungsansatz für makroskopische Modelle (Lohse, 2011). Der Einfluss der Heimatstandorte wird bei der Zielwahlberechnung von Ortsveränderungen, die weder Quelle noch Ziel an einem der Heimatstandorte haben, berücksichtigt. Dafür gehen neben dem Widerstand zwischen der betrachteten Quelle und den möglichen Zielen die Widerstände zu den Heimatstandorten in die Gesamtwiderstandsfunktion ein. Die Auswahlwahrscheinlichkeit erhöht sich bei Zielen, die nicht weit von den

Heimatstandorten entfernt sind. Die Widerstände zwischen den betrachteten Relationen werden additiv verknüpft und als Gesamtwiderstand mit dem Skalierungsparameter β bewertet:

$$f(w_{eij}) = e^{\beta \cdot (w_{ei} + w_{ij} + w_{ej})} \quad \text{für einen Heimatstandort (unipolares Einzugsgebiet) (3)}$$

$$f(w_{eijl}) = e^{\beta \cdot (w_{ei} + w_{ij} + w_{ej} + w_{il} + w_{jl})} \quad \text{für zwei Heimatstandorte (bipolares Einzugsgebiet) (2)}$$

mit e Heimatzelle Wohnung

l Heimatzelle Arbeiten

Verkehrsmoduswahl

Das Verfahren der Verkehrsmoduswahl ordnet jeder in der Verkehrsverteilung berechneten Ortsveränderung ein Verkehrsmittel zu, mit dem diese Ortsveränderung durchgeführt wird. Analog zur Verkehrsverteilung wird mit Entscheidungsmodellen jedem Verkehrsmittel mittels einer Nutzenfunktion ein Nutzen für die betrachtete Ortsveränderung zugeordnet. In den zu bewertenden Widerstand gehen bei den meisten Modellen die Reisezeit mit dem jeweiligen Verkehrsmittel, sowie weitere Kenngrößen wie beispielsweise der Komfort und die Sicherheit des Verkehrsmittels, die Kosten oder die Zuverlässigkeit ein. Die Nachfrage der betrachteten Relation wird entsprechend dem berechneten Nutzen auf die Verkehrsmittelalternativen aufgeteilt. In den meisten Verkehrsmodellen werden die Verkehrsmittel des öffentlichen Verkehrs zusammengefasst. In diesen Fällen spricht man nicht mehr vom Verkehrsmittel, sondern vom Modus. Häufig in Verkehrsmodellen verwendete Modi sind Fuß, Rad, Pkw und ÖV.

Verkehrsumlegung und Routenwahl

Bei der Verkehrsumlegung wird jeder Ortsveränderung eine Route im Verkehrsnetz zugewiesen. Mit Routensuchalgorithmen werden mögliche Routenalternativen zwischen der Quelle und dem Ziel der Ortsveränderung gesucht. Auf diese Routenalternativen wird mit einem Umlegungsverfahren die Nachfrage der betrachteten Relation aufgeteilt. Mit Entscheidungsmodellen wird das Wahlverhalten der Verkehrsteilnehmer nachgebildet, dass neben anderen Einflussfaktoren stark von der Reisezeit im belasteten Netz abhängt. Dieses Vorgehen wird für sämtliche Relationen wiederholt, so dass sich im Ergebnis Belastungen auf den Straßen des Verkehrsnetzes ergeben. Mit Verkehrsflussmodellen werden die Fortbewegungen der einzelnen Verkehrsteilnehmer auf den Modellstrecken abgebildet. Im Ergebnis erhält man Angaben über Reisezeiten und je nach Modell auch Informationen über Staulängen im belasteten Netz.

Für die im vierten Schritt durchgeführte Verkehrsumlegung stehen dem Verkehrsplaner unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, mit denen die Verkehrsnachfrage dem Straßennetz zugeordnet wird.

Mit dem Gleichgewichtsumlegungsverfahren wird das 1. Wardrop'sche Prinzip abgebildet. Danach teilen sich die Fahrten der Verkehrsteilnehmer so auf die zur Verfügung stehenden Routen auf, dass der Widerstand auf allen Alternativrouten gleich ist. Wechselt ein Verkehrsteilnehmer die Route, erhöht sich der Widerstand (Wardrop, 1952). Dieses Nutzergleichgewicht stellt sich in der Realität annähernd ein, wenn Verkehrsteilnehmer durch Erfahrungswerte die Widerstände der zur Auswahl stehenden Routen im Normalbetrieb realistisch abschätzen können und ihr Verhalten entsprechend anpassen. Ändert sich der Verkehrsablauf z.B. durch Unfälle oder Veranstaltungen kurzfristig, haben die Verkehrsteilnehmer über den neuen, unbekanntem Zustand keine oder unvollständige Informationen mehr. Das Gleichgewicht bleibt nicht länger bestehen.

Da die Verkehrsteilnehmer die Widerstände der einzelnen Routen nur abschätzen und nicht exakt messen können, verschätzen sie sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Diese Ungenauigkeit kann durch ein stochastisches Nutzergleichgewicht abgebildet werden.

Eine andere Art von Gleichgewicht (2. Wardrop'sches Prinzip) stellt sich ein, wenn sich die Verkehrsteilnehmer so im Verkehrsnetz verteilen, dass der Gesamtwiderstand aller von den Verkehrsteilnehmern genutzter Routen minimiert wird. Dies bedingt, dass einzelne Verkehrsteilnehmer zugunsten Anderer nicht die Route mit dem kleinsten Widerstand wählen. Außerdem setzt es voraus, dass der Verkehrsteilnehmer zu Beginn seiner Fahrt über die Routenwahl aller anderen Verkehrsteilnehmer informiert ist und seine Route entsprechend wählt (Wardrop, 1952). Dieser Zustand tritt in der Realität nicht ein. Annäherungen können durch umfangreiche Verkehrssteuerungsmaßnahmen erreicht werden (Lohse, 2011).

Verkehrsflussmodelle in makroskopischen Modellen nutzen zur Berechnung der belastungsabhängigen Reisezeit meist den Zusammenhang zwischen Kapazität und Verkehrsbelastung eines Straßenabschnittes. Daher werden die verwendeten Funktionen abgeleitet aus dem Englischen capacity-restraint-Funktionen (kurz CR-Funktionen) genannt. Eine gebräuchliche CR-Funktion ist die BPR-Funktion aus dem Traffic Assignment Manual des Bureau of Public Roads in den USA (Bureau of Public Roads, 1964):

$$t_{akt} = t_0 * \left(1 + a * \left(\frac{q}{q_{max}} \right)^b \right)$$

mit t_0 ... Fahrzeit im unbelasteten Netz

t_{akt} ... Fahrzeit im belasteten Netz

$a, b \dots$ Parameter der BPR-Funktion

Im Verlauf steigt die BPR-Funktion je nach Auswahl der Parameter bis zum Erreichen der Auslastung leicht an (siehe Abb. 2.4). Nach Erreichen der Kapazitätsgrenze verstärkt sich dieser Anstieg stark, was bei bestimmten Parameterkombinationen zu unrealistisch hohen Reisezeiten im Überlastungsbereich führt. Nimmt der Auslastungsgrad noch weiter zu, nähern sich die meisten Funktionen einem linearen Verlauf an, wobei der Anstieg abhängig ist vom Anstieg der Funktion im Bereich der Kapazitätsgrenze.

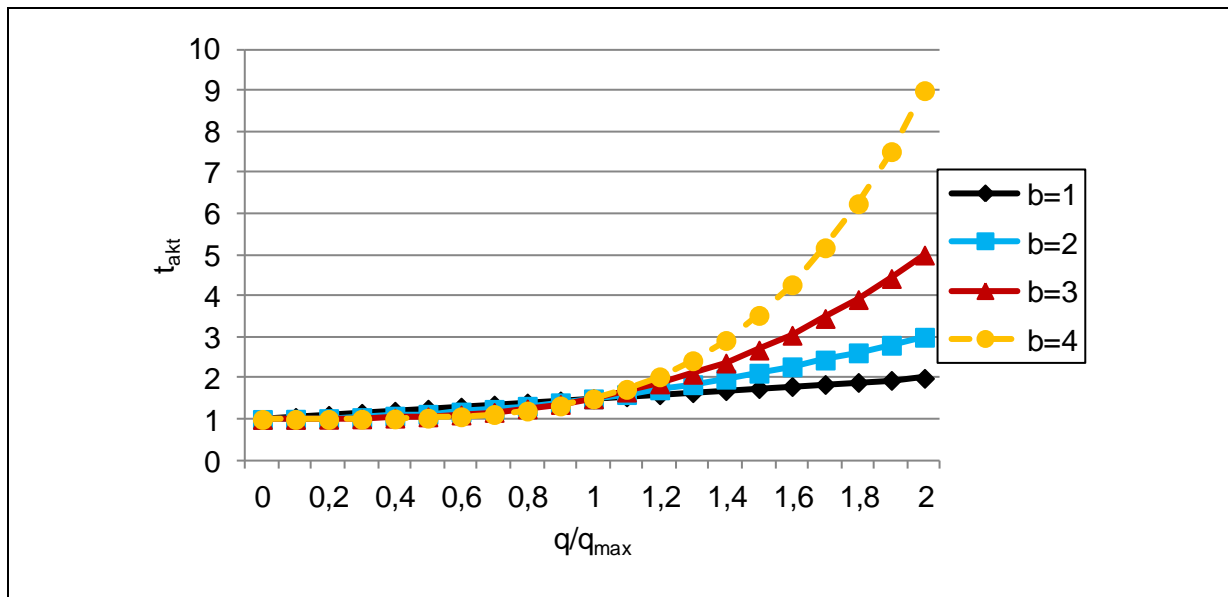


Abb. 2.4: Verlauf der BPR-Funktion mit $a=0,5$

2.4 Evakuierungsmodellierung

Erste rechnergestützte Evakuierungsmodelle entstanden in den 70er Jahren. In den folgenden Jahren wurden die Schwerpunkte in der Evakuierungsmodellierung stark von vorherigen Ereignissen bestimmt. Die Evakuierungsforschung und -modellierung ist dabei besonders stark in Gegenden verbreitet, die von Katastrophen betroffen waren oder gefährdet sind. So wurden in den 80er Jahren vor allem Evakuierungen aufgrund von Atomunfällen modelliert, nachdem sich im Jahr 1979 eine partielle Kernschmelze in einem us-amerikanischen Atomkraftwerk ereignete (Three Mile Island reactor) (Pel et al., 2010). Nach mehreren schweren Hurrikanen, die die US-Küste in den 90er Jahren trafen, beschäftigte man sich in der Folge besonders in den USA mit der Evakuierungsmodellierung aufgrund von Hurrikanen. Diese Modelle wurden nach den starken Zerstörungen in New Orleans durch Hurrikan Katrina im Jahr 2005 weiter entwickelt und verbessert. Nach dem Tsunami im indischen Ozean im Jahr 2004 werden auch solche Szenarien in Evakuierungsmodellen häufiger untersucht und abgebildet. In den Niederlanden, die durch steigende Wasserpegel

der Weltmeere gefährdet werden, wurde ein staatliches Programm zur Erforschung von Evakuierungen aufgrund von Überflutungen und deren Abbildung initiiert (Pel et al., 2010).

Bei der Evakuierungsmodellierung werden sowohl makroskopische als auch mikroskopische und mesoskopische Modelle verwendet. Welcher Modelltyp zum Einsatz kommt, hängt vom Modellierungszweck und von der Größe und der Ausdehnung des zu evakuierenden Gebietes ab. Vor allem bei Gebäuden, Verkehrsmitteln oder anderen abgegrenzten, kleinen Räumen, die bei einer Evakuierung zu Fuß verlassen werden, werden mikroskopische Modelle verwendet. Dadurch können die Bewegungen einzelner Personen und deren Interaktion untereinander abgebildet werden.

Bei der Evakuierung von größeren Gebieten werden alle drei Modelltypen verwendet. In der Vergangenheit wurden vor allem Evakuierungen sehr großer Evakuierungsgebiete mit makroskopischen Verkehrsmodellen gerechnet. Mit der technischen Entwicklung können inzwischen auch mikroskopische Modelle großer Gebiete in relativ kurzer Zeit berechnet werden. So simulierten Lämmel et al. (2010) die Evakuierung von 320.000 Einwohnern der indonesischen Millionenstadt Padang aufgrund eines Tsunami mit dem mikroskopischen Simulationsprogramm MatSim.

Zur Modellierung bestimmter, lokal wirkender Maßnahmen zur Beschleunigung der Evakuierung eignen sich mikroskopische Verkehrsflussmodelle. Wolshon et al. (2005a) untersuchten beispielsweise die Auswirkungen der Freigabe der Gegenfahrbahn einer Straße auf die Evakuierungszeit.

Übersicht über Evakuierungsmodelle

In der Literatur finden sich unterschiedlichste Evakuierungsszenarien, die mit Hilfe von Modellen nachgebildet werden. Im Folgenden wird ein Überblick über wichtige evakuierungsspezifische Software gegeben und hinsichtlich der verwendeten Eingangsdaten, Modellierungsmethoden und ausgegebenen Ergebnisse verglichen.

Bei den meisten Evakuierungsmodellen handelt es sich um aggregierte makroskopische Verkehrsmodelle. Lediglich die Modellierungssoftware MATSIM bietet die Möglichkeit, Evakuierungen auf mikroskopischer Ebene abzubilden (vgl. Lämmel et al., 2010).

Mit den betrachteten Modellen werden Evakuierungsverkehrsströme in Katastrophen mit unterschiedlichen Ursachen modelliert. Die Software MASSVAC eignet sich beispielsweise für die Modellierung von Evakuierungen aufgrund von Atomunfällen, Überflutungen oder Hurrikanen (Hobeika et al., 1998). Andere Softwarepakete sind hingegen speziell auf die Evakuierungsmodellierung im Überflutungsfall ausgelegt und können daher überflutungsspezifische Besonderheiten abbilden. Die Verkehrsmodellierung in LIFESIM ist beispielsweise mit einem Hydraulikmodell

gekoppelt, so dass die Information über überflutete Straßen direkt in das Verkehrsmodell übernommen werden kann. Die überfluteten Straßen werden während der Simulation zeitdynamisch für den Verkehr gesperrt (Aboelata et al., 2004).

Nicht nur bezüglich Straßensperrungen sondern auch hinsichtlich der Routenwahl und der Berechnung von Kenngrößen sind sowohl statische als auch dynamische Lösungen verfügbar. Bei statischen Modellen wie in ETIS (Evacuation Traffic Information System) wird angenommen, dass Einflussgrößen für die Routenwahl wie die Fahrzeit oder die Verkehrsnachfrage über den gesamten modellierten Zeitraum konstant groß sind (PBS&J, 2003). Dies entspricht nicht der Realität, da sich die Nachfrage und damit auch die Reisezeiten während der Evakuierung ändern. Daher stellen dynamische Verkehrsmodelle wie MASSVAC, OREMS, VISMOD oder LifeSim eine Weiterentwicklung dar. Hier wird die Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit der Verkehrssituation zum Abfahrtszeitpunkt auf das Verkehrsnetz umgelegt. Damit können in einem Verkehrsmodell Effekte durch zeitliche Änderungen der Verkehrsnachfrage wie z.B. Stau durch ein Spitzenverkehrsaufkommen und eine folgende Entlastung in Zeiten geringerer Nachfrage modelliert werden.

In allen untersuchten Modellen wird die Verkehrserzeugung vom Benutzer vorgegeben. Die Befolgungsraten werden aus Befragungen für unterschiedlich stark gefährdete Gebiete abgeschätzt. Für die dynamischen Modelle wird die Abfahrtszeit aus mobilization curves abgeschätzt, die ebenfalls aus Befragungen abgeleitet werden (LIFESIM, MASSVAC). Es wird davon ausgegangen, dass die Bewohner eines zu evakuierenden Gebietes ihre Evakuierung von der Wohnung aus starten. Einzelne Modelle wie ETIS berücksichtigen, dass sich im Evakuierungsgebiet Touristen aufhalten (Wilmot et al., 2004).

Belastungen im Straßennetz durch Durchgangsverkehr werden nicht berücksichtigt. Die Evakuierungsfahrten finden im leeren Netz statt. Lediglich im Softwaretool VISMOD/ISEP, ein Aufsatz für die Modellierungssoftware VISUM, wird ein Alltagsverkehrsmodell als Basis für die Evakuierungsverkehrsmodellierung verwendet. Alle Alltagsfahrten, die nicht im Überflutungsgebiet beginnen oder enden, werden in das Evakuierungsmodell übernommen (Boden et al., 2008).

In den meisten Modellen erfolgt die Evakuierung mit dem Pkw. Lediglich in VISMOD/ISEP werden auch Bussfahrten modelliert, mit denen Evakuierende von Sammelpunkten abgeholt und aus dem Evakuierungsgebiet gebracht werden (Boden et al., 2008).

Die Umlegungsmodelle unterscheiden sich stark. LIFESIM nutzt eine einfache Bestwegumlegung. In vielen Modellen (OREMS, MASSVAC) wird für die Umlegung ein Gleichgewichtsverfahren gewählt. In EVAQ hingegen wird bewusst ein anderes Umlegungsverfahren verwendet. Die Begründung dafür ist, dass sich ein Nutzergleichgewicht nur einstellt, wenn die Fahrer Informationen über den

Netzzustand haben. Im Alltag haben sie diese aus ihren Erfahrungen über die Zustände einzelner Routen, wodurch sich ein Gleichgewicht einstellt. In einer Evakuierungssituation können die Nutzer auf solche Erfahrungen nicht zurückgreifen. Daher ist die Modellierung eines Nutzergleichgewichtes während einer Evakuierung nicht realistisch. Außerdem werden in EVAQ Umwege modelliert. Auch hier gehen die Planer davon aus, dass ein Evakuierender zu Beginn seiner Fahrt nicht vollständig über die aktuelle Netzsituation informiert ist. Erreicht er eine Straße, die zu diesem Zeitpunkt bereits gesperrt ist (z.B. aufgrund von Überflutung), wendet er und führt eine neue Routenwahl zu seinem Ziel durch (Pel et al., 2010).

In einigen Modellen (z.B. MASSVAC, OREMS) sind Ziel- und Routenwahl kombiniert. Dafür werden die sicheren Orte im Umkreis der zu evakuierenden Zone über Dummie-Strecken mit einer hohen Kapazität und einer niedrigen Reisezeit am Rande der Evakuierungszone an das Straßennetz angeschlossen. Damit wählen die Evakuierenden im Modell den nächstgelegenen sicheren Ort.

Im Ergebnis werden bei allen Modellen die Belastungen auf den Straßen ausgegeben. Außerdem werden die Ergebnisse fast aller Modelle für die Berechnung der Evakuierungsdauer genutzt. Auch Engstellen im Verkehrsnetz können lokalisiert werden. Darüber hinaus bieten die Modelle unterschiedliche Möglichkeiten der Auswertung. LIFESIM beispielsweise übergibt die Daten aus dem Evakuierungsmodell an ein anderes Teilmodell, das die Anzahl getöteter bzw. verletzter Personen abschätzt (Aboelata et al., 2004).

Mit fast allen Modellen können bestimmte Verkehrssteuerungsmaßnahmen, wie die Freigabe des Seitenstreifens, die Freigabe der entgegengesetzten Fahrbahn oder die Sperrung bestimmter Straßen dargestellt werden. Eine Besonderheit ist die Software VISMODO/VISEP, mit der ein optimierter Evakuierungsplan errechnet werden kann. Dafür werden verschiedene Maßnahmen wie Freigabe der Gegenfahrbahn oder Ausschluss des Durchgangsverkehrs im Modell getestet und über Optimierungsalgorithmen so im Verkehrsnetz angewendet, dass die Evakuierungsdauer minimiert wird (Boden et al., 2008). Einige Modelle wie MASSVAQ oder OREMS bieten dem Nutzer außerdem die Möglichkeit, über ein gekoppeltes Mikrosimulationstool die Steuerung von Lichtsignalanlagen an die Evakuierungssituation anzupassen.

Eine Gemeinsamkeit der Modelle ist, dass sie kaum das evakuierungsspezifische Verhalten der betroffenen Personen abbilden. Es werden meist nur die Fahrten zum sicheren Ort modelliert. Zuvor stattfindende Ortsveränderungen werden nicht berücksichtigt. Als Aufenthaltsort der Personen zu Beginn der Evakuierung wird meist die Wohnung angenommen. Das Evakuierungsgebiet sowie die Lage der sicheren Orte werden bei fast allen Modellen vom Benutzer festgelegt. Lediglich in LIFESIM ergeben sich Überflutungsflächen sowie überflutete Straßenabschnitte und

daraus das zu evakuierende Gebiet aus einem mit dem Verkehrsmodell gekoppelten Hydraulikmodell (Aboelata et al., 2004).

Tabelle 1: Übersicht über Evakuierungssimulationstools und deren Eigenschaften

	MASSVAC	OREMS	ETIS	EVAQ	VISMOD/ VISEP	LIFESIM	Evak.-modellierung m. Matsim
Evakuierungsursachen	unterschiedlich	unterschiedlich	Hurrikane	unterschiedlich	Überflutung	Überflutung	unterschiedlich
Aggregierungsgrad	makroskopisch	makroskopisch	makroskopisch	makroskopisch	makroskopisch	makroskopisch	mikroskopisch
Dynamisierung	dynamisch	dynamisch	Statisch	dynamisch	dynamisch	dynamisch	dynamisch
Eingangsdaten	zeitabhängige Verkehrsnachfrage	zeitabhängige Verkehrsnachfrage	Bevölkerungsdaten, Touristen	Anzahl registrierter Pkw	Evakuierungsfläche, Alltagsverkehrsmodell	Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten	-
Abfahrtszeitbestimmung	benutzerdefinierte Abfahrtszeitverteilung	-	-	mobilization curve	-	mobilization curve	agentenbasiert anhand von Erhebungen
Optimierung	kombinierte Ziel- u. Routensuche	kombinierte Ziel- u. Routensuche	-	-	Optimierung v. Infrastrukturmaßnahmen	-	Optimierung Routenwahl + Abfahrtszeit
Umlegungsverfahren	Nutzergleichgewicht, Bestweg	Gleichgewichtsumlegung	-	„One Shot“	-	-	-
dynamische Infrastruktur	nein	nein	nein	ja	nein	ja	ja
Ergebnisausgabe	Evakuierungsdauer, Evak-zeit / Zeitintervall, Netzengpässe	Evakuierungsdauer, Netzengpässe	Verkehrslastungen, Netzengpässe	Verkehrslastungen, Netzengpässe, Evakuierungszeit	optimale Maßnahmenkombination, Evakuierungsroutenplan	Verkehrsdichte, Anz.Evakuierte/ Straßenabschnitt, Netzengpässe	Evakuierungsdauer, optimale Routenwahl u. Abfahrtszeit
Evakuierungsmaßnahmen	LSA-Koordinierung, Freigabe der Gegenfahrbahn	Verkehrssteuerungsmaßnahmen	Freigabe Gegenfahrbahn, gestaffelte Evakuierung	Änderung in Verkehrsnachfrage u. -angebot	Freigabe Gegenfahrbahn, veränderte Abbiegerregelungen	Freigabe Gegenfahrbahn	
Quelle	Hobeika et al, 1998	Hardy et al., 2007	PBS&J, 2003	Pel et al., 2010	Boden et al., 2008	Aboelata et al., 2004	Lämmel et al., 2010

3 Komplexmodell Niederschlag und Evakuierung

In diesem Kapitel wird der Gesamtaufbau des Komplexmodells Niederschlag und Evakuierung dargestellt. Dabei wird vor allem auf die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Teilmodelle der einzelnen Arbeitspakete untereinander eingegangen. Abb. 3.1 zeigt den Aufbau des Komplexmodells. Ergebnisse aus der Hydrologischen Modellierung (AP 2 und 3), der Verhaltensforschung (AP4) und den Untersuchungen zur Stabilität von Fahrzeugen (AP5) gehen als Eingangsdaten in die Modellierung des Evakuierungsverkehrs ein. Zeitlich variable Größen, wie beispielsweise die Überflutungsdaten werden dabei zeitdynamisch in 15-Minuten-Intervallen übergeben. Anhand der Ergebnisse der Verkehrsmodellierung können im Rahmen der Katastrophenschutzplanung geeignete Maßnahmen zur Beschleunigung des Evakuierungsablaufs entwickelt werden. Die Wirksamkeit der Maßnahmen kann mit Hilfe des Verkehrsmodells getestet und quantifiziert werden.

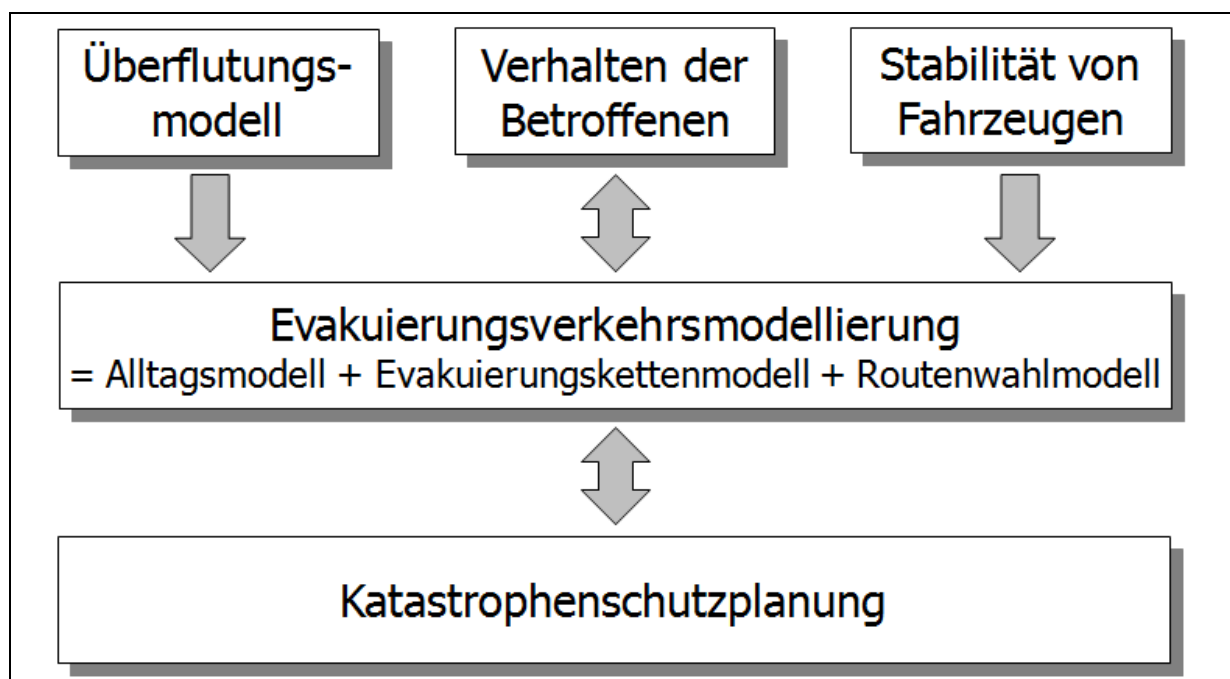


Abb. 3.1: Komponenten und Aufbau des Komplexmodell Niederschlag und Evakuierung

Im Folgenden werden die relevanten Komponenten des Modells, sowie deren Ein- und Ausgabedaten kurz beschrieben. Außerdem wird gezeigt, wie diese Daten in das Evakuierungsverkehrsmodell integriert werden. Das Komplexmodell wird im Rahmen von EvaSim am Beispiel der Stadt Bad Reichenhall im Projektgebiet Rupertiwinkel angewendet und getestet. Daher beziehen sich die in den folgenden Kapiteln präsentierten Berechnungen und Auswertungen auf diese Stadt. Grundsätzlich lassen sich die verwendeten Methoden und Tools auf jede Region Deutschlands und Europas anwenden und übertragen.

3.1 Hydraulikmodell

Als hydraulisches Belastungsszenario für die Evakuierungsverkehrsmodellierung wird von einem Extremhochwasser (HQ 1.000) ausgegangen. Dieses entsteht im Projektgebiet Rupertiwinkel aufgrund von Gewittern und Starkregenereignissen. Mittels eines Hydraulikmodells wird im AP 2 die räumliche Ausbreitung des Wassers nachgebildet. Aus den modellierten Daten werden für die Evakuierungsverkehrsmodellierung zwei Informationen berechnet:

1. Befahrbarkeitsstatus von Modellstrecken

Für jeden 15-Minuten-Zeitschritt wird bestimmt, ob eine Strecke im Modell noch befahrbar ist, oder ob die Überflutung bereits so stark ist, dass die Strecke für den Verkehr gesperrt werden muss. Die Bestimmung des Befahrbarkeitsstatus erfolgt durch einen Abgleich der Überflutungskenngrößen aus dem Hydraulikmodell mit Grenzwerten, die im Rahmen der Stabilitätsuntersuchung von Fahrzeugen ermittelt werden (siehe Kapitel 3.2).

2. Überflutungsintensität einer Verkehrszelle

Im Verkehrsmodell wird jeder Verkehrszelle im Überflutungsgebiet eine Intensitätsklasse zugeordnet, die den höchsten während der Katastrophe zu erwartenden Grad der Überflutung angibt. Daraus kann die Gefährdung der sich in dem betreffenden Gebiet aufhaltenden Personen abgeleitet werden. In Abhängigkeit der Intensitätsklasse erfolgt die Entscheidung über eine Evakuierung der Bewohner der betrachteten Zelle.

Für die Ermittlung der für das Evakuierungsverkehrsmodell relevanten Eingangsgrößen werden drei Ausgabegrößen aus dem Hydraulikmodell genutzt:

- Fließgeschwindigkeit je Zeiteinheit
- Anströmwinkel je Zeiteinheit
- Wassertiefe je Zeiteinheit

Für die Berechnung der Intensitätsklasse einer Verkehrszelle werden die Ausgabegrößen für jedes Gebäude und jeden Zeitschritt mit den in Tabelle 2 aufgeführten Grenzwerten des Schweizer Modells verglichen. Die sich daraus ergebenden Intensitätsklassen für die einzelnen Gebäude werden für die Übergabe in das Verkehrsmodell zu Intensitätsklassen auf Ebene von Verkehrszellen zusammengefasst. Für jedes Gebäude einer Zelle werden die höchsten während der Überflutung erreichten Intensitätsklassen erfasst. Die dabei am häufigsten auftretende Intensitätsklasse wird der Verkehrszelle zugeordnet. Zusätzlich zu dieser Regel werden folgende Sicherheitsprüfungen durchgeführt, um alle gefährdeten Zellen identifizieren zu können:

1. Ist für eine Zelle der Anteil Gebäude mit Intensitätsklasse=0 am höchsten, liegt jedoch unter 50%, wird die Intensitätsklasse der Zelle von 0 auf 1 erhöht.

2. Ist für eine Zelle der Anteil Gebäude mit Intensitätsklasse=2 größer als 40%, wird die Intensitätsklasse der Zelle von 0 oder 1 auf Stufe 2 erhöht, auch wenn diese nicht anteilig am häufigsten in der Verkehrszelle auftritt.
3. Ist für eine Zelle der Anteil Gebäude mit Intensitätsklasse=3 größer als 30%, wird die Intensitätsklasse der Zelle von ≤ 2 auf Stufe 3 erhöht, auch wenn diese nicht anteilig am häufigsten in der Verkehrszelle auftritt.

Tabelle 2: Grenzwerte für die Klassifizierung der Gefährdung von Gebäuden - Einteilung nach Schweizer Modell (H. Kreibich et al., 2007)

Intensitätsklasse	Grenzen	Gefahrenmerkmale
3 (stark)	$hw \geq 2m$ oder $q = v \cdot hw \geq 2m^2/s$	<ul style="list-style-type: none"> • Menschen u. Tiere auch innerhalb von Gebäuden stark gefährdet • erhebliche Schäden an Gebäuden • plötzliche Gebäudezerstörung
2 (mittel)	$0,2 > hw > 0,5m$ oder $q = v \cdot hw \geq 2m^2/s$	<ul style="list-style-type: none"> • Menschen u. Tiere außerhalb von Gebäuden stark, innerhalb von Gebäuden kaum gefährdet • Sachschäden an Gebäuden
1 (schwach)	$hw \leq 0,5m$ oder $q = v \cdot hw \leq 0,5m^2/s$	<ul style="list-style-type: none"> • Menschen u. Tiere außerhalb von Gebäuden kaum gefährdet, • Sachschäden an Gebäuden (v.a. Kellerräume)
0	keine Überflutung	keine Gefährdung

Abb. 3.2 zeigt die höchsten eintretenden Intensitätsklassen der Verkehrszellen in Bad Reichenhall während eines Extremhochwassers (HQ 1.000). Für die Evakuierungsverkehrsmodellierung wird festgelegt, dass für Personen, die sich in Zellen mit Intensitätsklasse 2 und 3 aufhalten, eine Evakuierung angeordnet wird, da bei diesen Überflutungsstufen Menschen gefährdet sind. Alle Evakuierungen führen aus dem Überflutungsgebiet heraus. Vertikale Evakuierungen innerhalb eines Gebäudes sind nicht eingeplant und werden nicht angeordnet. Durch diese Annahmen wird das maximal in dieser Überflutungssituation zu erwartende Verkehrsaufkommen erzeugt. Damit lassen sich Engpässe im Verkehrsnetz deutlich erkennen.

Eine Evakuierungsanordnung ab Intensitätsklasse 3 ist ebenso vertretbar und wird in Arbeitspaket 7 – Katastrophenschutzplanung angenommen, da Personen bei niedrigeren Gefährdungsstufen zumindest in Gebäuden noch sicher sind. Diese Vorgehensweise zielt auf die Reduktion von Evakuierungsfahrten und auf eine Entlastung des Verkehrsnetzes ab. Eventuelle Schwierigkeiten im Verkehrsablauf und Engstellen im Verkehrsnetz könnten so jedoch übersehen werden.

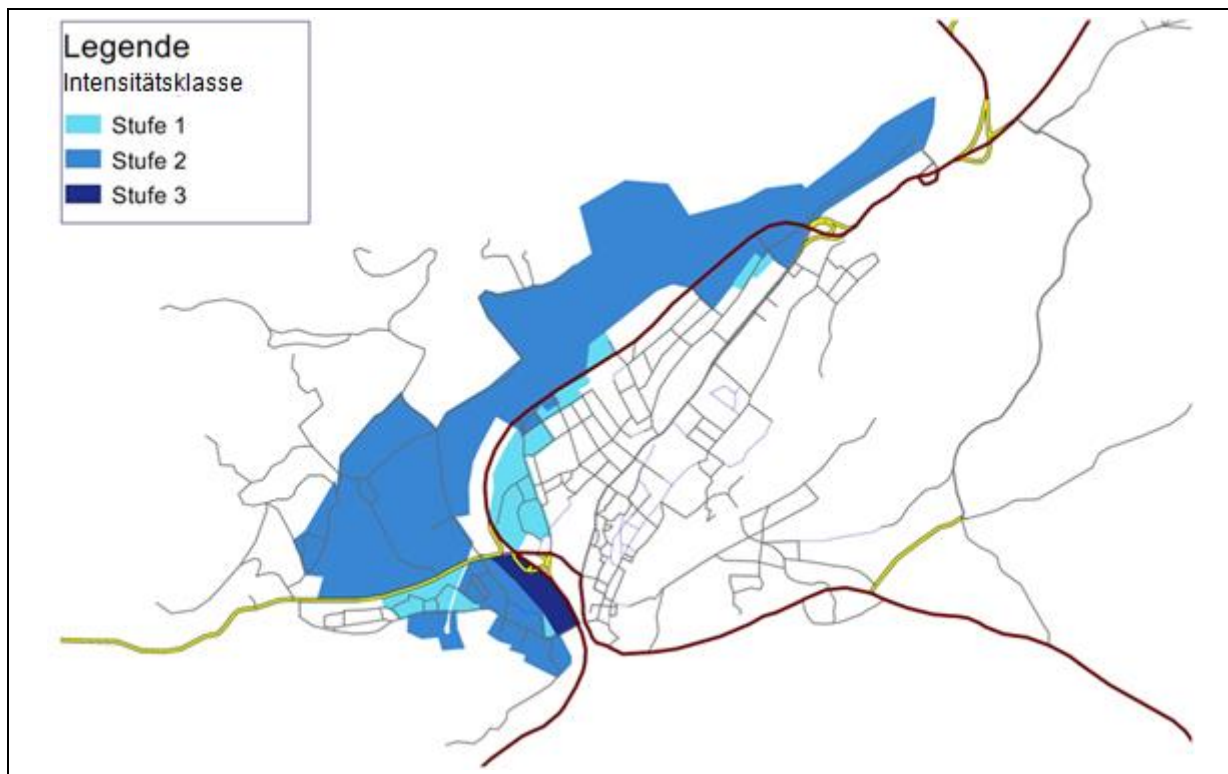


Abb. 3.2: Intensitätsklassen in Bad Reichenhall bei einem Extremhochwasserereignis

Das vorliegende Evakuierungsverkehrsmodell für Bad Reichenhall erfasst die höchste während der Evakuierung erreichte Intensitätsklasse einer Zelle als zeitlich statische Größe. Alternativ kann die aktuelle Intensitätsklasse je Zeitintervall als zeitdynamische Größe aus dem Hydraulikmodell übernommen werden. Dadurch werden der Anstieg der Überflutung und damit die Änderung der Gefährdung im Laufe des Ereignisses sichtbar. Aus den Informationen über den Zeitpunkt, zu dem eine für Menschen gefährliche Situation eintritt, ergeben sich verschiedene Rückschlüsse für die Evakuierung. Beispielsweise sind eine genauere Zeitplanung und eine wie in Kapitel 2.2 beschriebene Staffelung der Verkehrsnachfrage mit Priorisierung einzelner Gebiete möglich. Dies ist vor allem bei größeren zu evakuierenden Gebieten notwendig, wo weder die Kapazität des Straßennetzes noch die der Rettungsmannschaften ausreicht, um das gesamte gefährdete Gebiet gleichzeitig zu evakuieren.

3.2 Fahrzeugstabilität

Anhand von Modellversuchen werden in AP 5 Parameter bestimmt, mit denen der Einfluss von Strömungen auf das Mobilitätsverhalten von Fahrzeugen beschrieben werden kann. Für unterschiedliche Fahrzeugtypen wie Pkw oder Rettungsfahrzeuge werden Grenzwerte der Fahrzeugstabilität ermittelt. Aus dem Vergleich zwischen diesen Grenzwerten und den hydraulischen Belastungsdaten für jede Strecke im

Verkehrsmodell, wird der Befahrbarkeitsstatus bestimmt. Dies erfolgt zeitdynamisch für jeden Zeitschritt und für jede Strecke im Verkehrsmodell.

Die Übergabe an das Verkehrsmodell wird mittels Textdateien realisiert, die den Überflutungsstatus der Modellstrecken als Ziffer codiert für jeden Zeitschritt enthalten. Für die Entscheidung über die Befahrbarkeit für den Einsatzverkehr werden die im Rahmen von EvaSim erforschten Stabilitätsgrenzen angesetzt. Diese sind für die beiden betrachteten Fahrzeugtypen Pkw und Lkw unterschiedlich hoch.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die Abstufung des Befahrbarkeitsstatus. Die Zuordnung einer Befahrbarkeitsstufe erfolgt in drei Schritten:

1. Prüfung der Überflutungssituation

Es wird geprüft, ob die Straße bereits überflutet ist.

2. Prüfung der Befahrbarkeit für den zivilen Verkehr

Die Befahrbarkeit für zivilen Verkehr entscheidet sich nicht in Abhängigkeit von Stabilitätsgrenzen der Fahrzeuge, sondern in Abhängigkeit vom ersten Kriterium, der Überflutungssituation. Straßen, die beinahe oder bereits überflutete sind, werden aus Sicherheitsgründen grundsätzlich für den zivilen Verkehr gesperrt.

3. Prüfung der Befahrbarkeit für Einsatzverkehr

Für die Entscheidung über die Befahrbarkeit für den Einsatzverkehr werden die im Rahmen von EvaSim erforschten Stabilitätsgrenzen angesetzt. Diese sind für die beiden betrachteten Fahrzeugtypen Pkw und Lkw unterschiedlich hoch.

Tabelle 3: Abstufung des Befahrbarkeitsstatus im Evakuierungsverkehrsmodell

Befahrbarkeitsstatus	Befahrbarkeitsstatus
1	<ul style="list-style-type: none"> • Überflutung • nicht befahrbar
2	<ul style="list-style-type: none"> • Überflutung • für Lkw der Einsatzkräfte freigegeben
3	<ul style="list-style-type: none"> • Überflutung • für Pkw und Lkw der Einsatzkräfte freigegeben
4	<ul style="list-style-type: none"> • keine Überflutung, • für zivilen Verkehr gesperrt
5	<ul style="list-style-type: none"> • keine Überflutung • befahrbar

Im Evakuierungsverkehrsmodell werden während der Modellierung die Strecken für die Verkehrssysteme freigegeben, die bei der aktuellen Überflutungslage laut Befahrbarkeitsstatus die Strecke befahren dürfen. Für alle anderen Verkehrssysteme

ist die Strecke gesperrt. Die Umsetzung der Sperrung im Verkehrsmodell wird in Kapitel 4.6.3 beschrieben.

3.3 Verhaltensmodell

Im Rahmen der soziologischen Untersuchungen werden in AP4 Informationen über Verhaltensweisen betroffener Personen in Evakuierungssituationen untersucht. Diese Verhaltensweisen werden im Evakuierungsverkehrsmodell nachgebildet. Folgende Erkenntnisse aus der Literaturanalyse sowie aus den durchgeführten Befragungen sind dabei von Bedeutung.

1. Menschen möchten sich in der Evakuierungssituation nicht von Familie oder Freunden trennen (Drury et al., 2007).
2. Haushaltsmitglieder kommen oft zusammen, um gemeinsam das gefährdete Gebiet zu verlassen. Zuvor unternehmen sie jedoch getrennt, in verschiedenen Fahrzeugen Fahrten von außen in das Gefahrengebiet hinein oder innerhalb des Gebietes, um Kinder, andere Familienmitglieder oder Sachgüter abzuholen (Drabek et al. 1996).

3. Die meisten Schulen haben Evakuierungspläne. Es gibt zwei typische Strategien:
 - Frühzeitiges Entlassen der Kinder, bei dem sie entweder nach Hause geschickt werden oder in ein Schutzzentrum gebracht werden (oft ist das die Schule selbst).
 - Die Kinder werden sofort alle in das Schutzzentrum gebracht (z.B. mit Bussen), wenn sich die Schule dafür nicht eignet.

Bei beiden Situationen kann es passieren, dass Eltern ihre Kinder abholen kommen. Dies stört in der Regel den Evakuierungsprozess nicht, kann ihn jedoch leicht verzögern (Sorenson et al., 2006).

4. In den USA evakuieren 65-75% der Fahrzeuge. Im Durchschnitt benutzt ein Haushalt 1,3 Fahrzeuge um zu evakuieren. Während Orkan Floyd evakuierten zwischen 1,18 und 1,48 der Fahrzeuge pro Haushalt. Diese Varianz ist in der Regel auf die Nähe zur Gefahr zurückzuführen. Im Gefahrengebiet werden meist mehr Fahrzeuge benutzt als in Gebieten, die weiter entfernt liegen (Sorenson et al., 2006).
5. Der Evakuierungswille ergibt sich wahrscheinlich aus der Nähe zur Gefahr, der Baubeschaffenheit des Hauses, der Quelle der Informationen und aufgrund von Evakuierungshindernissen (Lindell et al., 2005a).
6. Über 90% der Bevölkerung sind zwischen 22 Uhr und 6 Uhr zu Hause. Aber nur ca. ein Drittel ist zwischen 10 und 15 Uhr zu Hause (Klepeis et al., 2001).

7. Bei Evakuierungen am Tag fahren Erwachsene von der Arbeit, Kinder von der Schule nach Hause, bevor der Haushalt evakuiert. Die dadurch entstehende Verzögerung der Evakuierung ist vor allem bei Ereignissen mit kurzen Vorwarnzeiten wichtig z.B. Dammbürche oder Nuklearunfälle (Hobeika et al., 1994; Urbanik, 2000).
8. Bei langen Vorwarnzeiten über 24 Stunden tendieren die Betroffenen dazu, nicht zur Arbeit oder in die Schule zu gehen, sondern morgens direkt das gefährdete Gebiet zu verlassen (Lindell et al., 2006; Lindell et al., 2005a).“
9. Als bei einer Evakuierung benötigte Vorbereitungsdauer schätzen Personen zwischen 60 und 450 Minuten mit einem Durchschnitt von 229 Minuten und einer Standardabweichung von 85,2 Minuten (Lindell et al., 2001). In dieser Zeit werden folgende Arbeiten verrichtet:
- Verlassen der Arbeit vorbereiten,
 - Fahrt von der Arbeit nach Hause,
 - Versammeln aller Familienmitglieder,
 - Packen der notwendigsten Sachen,
 - Haussicherung.
- Vergleiche mit tatsächlichen Evakuierungszeiten ergeben, dass diese Einschätzungen mit der tatsächlichen Vorbereitungsdauer übereinstimmen (Kang et al., 2007).
10. Evakuierungsraten für schleichende Gefahren (Hochwasser) sind meist gering. Hoch (90%) dagegen sind sie bei Unfällen mit Gefahrenstoffen oder in Hochrisikogebieten wie Küstenstreifen, wenn ein Unwetter oder hoher Wellengang droht. Tabelle 4 zeigt Befolungsraten bei verschiedenen Evakuierungen aufgrund von Orkanen in den USA.

Tabelle 4: Übersicht über Befolungsraten bei Orkanevakuierungen in den USA

Orkan	Quelle	Befolungsrate
Orkan Floyd, South Carolina	Dow et al. (2000)	65%
Orkan Hugo und Andrew	Riad et al. (1999)	42%
n.n.	Lindell et. al (2005b)	11,7-86,8% (abhängig von Distanz zum Sturm)
in Gavelston (USA) bei 3 verschiedenen Orkanereignissen	Baker (1991)	47-68%
Orkan Frederic	Baker (1991)	33-97% (an verschiedenen Orten)

11. Es wird angenommen, dass Mieter eher evakuieren als Hauseigentümer und Familien eher evakuieren als Singles. Dies wurde jedoch bislang nicht empirisch nachgewiesen (Lindell et al., 2006).
12. Betroffene, die von der Gefahr weiter entfernt wohnen, weisen einen längeren Entscheidungsprozess zur Evakuierung auf, brauchen jedoch wenig Zeit ihre Häuser auf die Gefahr vorzubereiten. Diejenigen, die im direkten Gefahrengebiet wohnen, entscheiden sich zwar in der Regel schneller zu evakuieren, benötigen aber im Schnitt länger ihre Häuser zu sichern und wichtige Besitztümer zusammen zu packen. Daher fällt die Gesamtzeit von der Warnung bis hin zur Evakuierung für diejenigen, die der Gefahr näher sind, und denen, die weiter weg sind, ungefähr gleich aus (Lindell et al., 2007).
13. Häufig evakuieren Menschen, bevor überhaupt eine Warnung ausgesprochen wird (Lindell et al., 2005a).
14. Es gibt die sogenannte Schattenevakuierung, bei der Betroffene ein Gebiet verlassen, das außerhalb der Gefahrenzone liegt und die Warnung eigentlich nicht für sie gegolten hat.
15. Gründe um einem Evakuierungsaufwurf nicht Folge zu leisten, können sein:
 - kein Zugang zu einem Fahrzeug,
 - geistige oder körperliche Behinderung,
 - Pflege einer anderen Person,
 - ungenügende finanzielle Möglichkeiten,
 - die Annahme dass der Ort, an dem man sich befindet, sicher ist.
16. Oft wohnen Menschen, die besondere Hilfe brauchen, nicht in einem Heim, sondern in ihrer privaten Wohnung. Diese Personen können auf Hilfe bei der Evakuierung angewiesen sein, weil sie eine Warnung nicht wahrgenommen haben oder kein Auto besitzen bzw. nicht in der Lage sind Auto zu fahren. Während der Evakuierung von Orkan Floyd waren 3 -11% der Bevölkerung auf externe Hilfe angewiesen, abhängig von der Nähe zum Gefahrengebiet. In der Regel erhielten diese Personen Hilfe von Familien und Freunden. Ein bis zwei Prozent benötigten Hilfe von Behörden (Sorenson et al., 2006).

Aus diesen Erkenntnissen und den Ergebnissen der Haushaltsbefragung werden verhaltensspezifische Personengruppentypen gebildet, die hinsichtlich Vorbereitungsdauer und Reaktion auf einen Evakuierungsaufwurf ähnliche Verhaltensweisen zeigen. Die so gebildeten Personengruppen entsprechen der Personengruppeneinteilung im Verkehrsmodell weitestgehend, so dass die identifizierten Verhaltensweisen in die Verkehrsmodellierung übertragen werden können. Anhang I zeigt die aus den soziologischen Untersuchungen für das Verkehrsmodell abgeleiteten Parametersätze.

3.4 Alltagsmodell

Mit dem Alltagsmodell werden die alltäglichen Aktivitäten der Personen des betrachteten Untersuchungsgebietes nachgebildet. Die Modellierung erfolgt auf mikroskopischer Ebene. Für jede in Bad Reichenhall lebende Person wird ein Agent mit einer ID im Modell erzeugt, dem entsprechend des Familienstandes und der Erwerbstätigkeit der Person eine Personengruppe zugeordnet wird. Für jeden Agenten wird ein Wohnort sowie die Pkw- und Rad-Verfügbarkeit festgelegt. Für einen Tag erhalten die Agenten Aktivitätsketten, die Informationen über Art, Ort, Reihenfolge und Aktivitätendauern enthalten. Außerdem wird berechnet, mit welchem Verkehrsmittel die einzelnen Aktivitäten aufgesucht werden.

Als Eingangsdaten liegen folgende Daten vor:

- Verkehrsnetz
- Verkehrsnachfrage des überörtlichen Verkehrs
- einwohnerbezogene Daten
- Strukturdaten des betrachteten Untersuchungsgebietes Bad Reichenhall
- verkehrliche Verhaltensdaten für den Alltag

Auf die Quelle dieser Daten und die genaue Verwendung im Modell wird in Kapitel 4.2 eingegangen. Die Umsetzung der Berechnung erfolgt in der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) und wird mittels eines excelbasierten Makros durchgeführt.

Die Berechnungen erfolgen zeitdynamisch minutengenau, so dass im Ergebnis für jeden definierten Zeitpunkt der Aufenthaltsort und die Aktivität jedes Agenten ermittelt werden kann. Diese Information wird für den Zeitpunkt des Evakuierungsbeginns an das Evakuierungskettenmodell übergeben, da vom Aufenthaltsort und der Aktivität zu Beginn der Evakuierung die Reaktion der Betroffenen auf den Evakuierungsaufwurf abhängt. Ferner kann die Moduswahl mit dem Alltagsmodell berechnet werden. Dies ist jedoch für die Evakuierungsverkehrsmodellierung von untergeordneter Bedeutung.

3.5 Evakuierungskettenmodell

Wie im Alltagsmodell erfolgt die Modellierung im Evakuierungskettenmodell auf mikroskopischer Ebene. Die mit einer ID gekennzeichneten Agenten werden mit all ihren Eigenschaften und Alltagsaktivitäten aus dem Alltagsmodell an das Evakuierungskettenmodell übergeben. Die einzelnen Berechnungsschritte sowie die Eingangsdaten sind dem veränderten Verkehrsablauf und Verkehrsverhalten während einer Evakuierung angepasst.

Wie im Alltag werden auch im Evakuierungsfall die Aktivitäten der betroffenen Agenten in Abhängigkeit ihrer Personengruppenzugehörigkeit ermittelt. Der Ort der Aktivitäten und das verwendete Verkehrsmittel für die Fahrt zwischen den Aktivitätenorten werden berechnet. Auch die Zeiten, zu denen die Aktivitäten durchgeführt werden, werden minutengenau bestimmt.

Mittels der Überflutungsintensitäten aus dem Hydraulikmodell können das Evakuierungsgebiet abgegrenzt und betroffene, dort lebende Agenten, identifiziert werden. Auf Basis von Erkenntnissen aus den soziologischen Untersuchungen werden Verhaltensparameter für die Personengruppen in Evakuierungssituationen abgeleitet und im Modell bei der Wahl der Aktivitäten oder der Verkehrsmittelwahl im Evakuierungsfall angewendet.

Ausgabegröße des Evakuierungskettenmodells sind Nachfragematrizen, die die Anzahl aller Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen während der Evakuierung enthalten. Die Matrizen beziehen sich dabei auf vom Nutzer definierte Zeiteinheiten. Im Fall von Bad Reichenhall werden die Ortsveränderungen in 15-Minuten Intervallen übergeben.

Die Umsetzung erfolgt wie beim Alltagsmodell ebenfalls in der Programmiersprache visual basic in einem excelbasierten Makro. Das Alltagsmodell und das Evakuierungskettenmodell sind rechentechnisch nicht miteinander gekoppelt und daher einzeln ausführbar. Die Verkehrsnachfragematrizen werden als mtx-Dateien gespeichert, die sich für die Modellierung der Routenwahl in die verwendete Modellierungssoftware VISUM einlesen lassen.

3.6 Routenwahlmodell

Das Routenwahlmodell schließt sich an das Evakuierungskettenmodell an. Es handelt sich um ein zeitdynamisches, makroskopisches Verfahren.

Die mit dem Evakuierungskettenmodell berechneten Verkehrsmatrizen, die alle Ortsveränderungen während der Evakuierung, in Zeitschritten unterteilt, enthalten, werden in die Verkehrsmodellierungssoftware VISUM eingelesen. Mittels eines in Kapitel 4.5 vorgestellten Umlegungsverfahrens werden die Ortsveränderungen nach bestimmten Kriterien auf das Verkehrsnetz übertragen. Dabei werden nur die Straßen berücksichtigt, die zum betrachteten Zeitpunkt noch nicht überflutet sind. Die Informationen über das verfügbare Straßennetz werden mittels des Befahrbarkeitsstatus übergeben (siehe Kapitel 3.2).

Die Umlegung liefert im Ergebnis für jede Straße im Modell eine Belastung. Aus dem Verhältnis von Belastung und Kapazität einer Modellstrecke, der Auslastung, können Aussagen über den Verkehrsfluss oder ggf. Überlastungen der Straße abgeleitet

werden. Darüber hinaus kann die Routenwahl aller Verkehrsteilnehmer während der Evakuierung nachvollzogen werden.

3.7 Katastrophenschutzplanung

Erkenntnisse bezüglich der Dauer der Evakuierung und Engpässen im Netz werden aus dem Evakuierungsverkehrsmodell an die Katastrophenschutzplanung übergeben. Auf Basis dieser Daten werden in AP7 Maßnahmen zur Beschleunigung der Evakuierung entwickelt und Evakuierungspläne ausgearbeitet.

4 Evakuierungsverkehrsmodellierung

Nach der Einordnung der Verkehrsmodellierung in das Komplexmodell Niederschlag und Evakuierung im vorangegangenen Kapitel wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise bei der Modellierung des Evakuierungsverkehrs beschrieben. Das für die Darstellung benötigte Verkehrsmodell umfasst drei Teilmodelle:

1. Alltagsverkehrsmodell

modelliert zeitdynamisch Aktivitäten und Aktivitätenorte der Einwohner des betrachteten Untersuchungsgebietes während eines gewöhnlichen Tages.

2. Evakuierungskettenmodell

berechnet zeitdynamisch Aktivitätenfolgen, Aktivitätenorte und Verkehrsmittelwahl während einer Evakuierung.

3. Routenwahlmodell

berechnet zeitdynamisch die für die Evakuierungsfahrten verwendeten Routen im Verkehrsnetz.

Der Evakuierungsverkehrsablauf wird dabei mit den beiden letztgenannten Modellen berechnet. Das Alltagsverkehrsmodell dient zur Berechnung von Eingangsdaten für das Evakuierungskettenmodell. Nach einer Abwägung verschiedener möglicher Modellansätze in Kapitel 4.1 werden die drei Teilmodelle ausführlich in den Kapiteln 4.2 bis 4.5 beschrieben. In Kapitel 4.6 wird auf einige Besonderheiten bei der Darstellung des Evakuierungsablaufs im Modell eingegangen. In Kapitel 4.7 werden Kenngrößen vorgestellt, mit dem das Ergebnis der Berechnungen quantifiziert und bewertet werden kann.

4.1 Modellansätze

Für die Verkehrsnachfragemodellierung stehen verschiedene Modellansätze zur Verfügung, die sich hinsichtlich Aggregierungsgrad der betrachteten Verkehrsnachfrage und der Art der Modellierung der Aktivitätenketten unterscheiden. Im Folgenden wird untersucht, inwiefern diese Modelle die sich aus der Evakuierungssituation ergebenden spezifischen Anforderungen an die Modellierung erfüllen. Dabei wird auf folgende vier Ansätze eingegangen:

Makroskopischer wegebasierter Ansatz (Klassischer Vier-Stufen-Algorithmus)

Bei diesem wegebasierten Modellansatz erfolgt die Berechnung des Verkehrsaufkommens über Wahrscheinlichkeiten. Im Ergebnis werden mittlere zu erwartende Zustände berechnet. Die Verkehrsnachfrage wird als über alle Verkehrsteilnehmer aggregierte Nachfragematrix ausgegeben.

Die während der Evakuierung durchgeführten Aktivitäten bauen kausal aufeinander auf und werden daher in einer festen Reihenfolge durchgeführt. Diese feste Reihenfolge kann von einem wegebasierten Ansatz nicht umgesetzt werden. Daher ist der makroskopische, aggregierte Ansatz für die Modellierung des Evakuierungsablaufs nicht geeignet.

Makroskopischer aktivitätenkettenbasierter Ansatz (VISEM)

Der makroskopische aktivitätenkettenbasierte Ansatz ist in der Software VISUM als Nachfrageberechnungstool VISEM hinterlegt. Für die den Personengruppen zugeordneten Agenten werden Aktivitätsketten, die Zielwahl sowie die Moduswahl berechnet. Dieser Ansatz erfüllt die evakuierungsspezifische Anforderung der sequentiellen Abbildung von Aktivitäten in einer bestimmten Reihenfolge. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt jedoch nicht einzeln für jeden Agenten sondern aggregiert nach Personengruppe, Modus und Aktivitätskette. Auf diese Weise ist die zeitliche Nachverfolgung der Aktivitäten und Aufenthaltsorte der Agenten im Modell nicht möglich. Dies ist jedoch für die Evakuierungsmodellierung notwendig, um beispielsweise Aufenthaltsort und Aktivität der betroffenen Personen zu Beginn der Evakuierung zu bestimmen.

Agentenbasiertes Mikrosimulation (MATSIM)

Die agentenbasierte Mikrosimulation ist in der Modellierungssoftware MATSIM umgesetzt. Agenten werden mehrere Aktivitätenpläne für einen Tag zugeordnet, die Informationen über Aktivitätenfolgen, -art und -dauer sowie dem Aktivitätenort enthalten. Zusätzlich wird die Verkehrsmittelwahl auf den Wegen zwischen den Aktivitäten, die Fahrzeit sowie Start- und Endzeit der Fahrten berechnet. Damit erfüllt die agentenbasierte Mikrosimulation die in den vorangegangenen beiden Ansätzen nicht erfüllten Kriterien für die Darstellung des Evakuierungsverkehrsablaufs. Der Mangel bei MATSIM betrifft das hinterlegte Optimierungsverfahren bei Routenwahl und Planung des Aktivitätenplans, die so lange variiert werden, bis ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist. In der Realität kann eine Optimierung von den Verkehrsteilnehmern nur vorgenommen werden, wenn sie Erfahrungen und Wissen über die aktuelle Verkehrssituation haben. In der Sondersituation Evakuierung fehlt diese Erfahrung jedoch. Daher ist eine Optimierung durch Anpassung von Aktivitätenplänen für die Evakuierungsmodellierung nicht erwünscht.

Einfaches aktivitätenkettenbasiertes Agentenmodell

Wie bei der agentenbasierten Mikrosimulation werden Aktivitätenpläne mit Dauer und Ort der jeweiligen Aktivität für jeden Agenten berechnet. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt sowohl disaggregiert für jeden einzelnen Agenten als auch aggregiert als Matrizen. Diese Matrizen können mit Verkehrsplanungssoftware auf das

Verkehrsnetz mit einem durch den Verkehrsplaner zu wählenden Umlegungsverfahren übertragen werden.

Damit erfüllt dieser Ansatz als einziger alle für die Evakuierungsmodellierung notwendigen Anforderungen. Als Evakuierungsverkehrsmodell für EvaSim wird daher ein einfaches aktivitätenkettenbasiertes Agentenmodell gewählt.

4.2 Modellaufbau Alltagsmodell

Ziel des Alltagsmodells ist die Berechnung von Aufenthaltsorten und Aktivitäten der Agenten zu Beginn der Evakuierung. Diese Informationen werden im Evakuierungskettenmodell als Eingangsdaten genutzt. Daher ist eine Übertragbarkeit zwischen den beiden Modellteilen zu gewährleisten. Diese wird durch die Auswahl der Personengruppen realisiert, die für Alltags- und Evakuierungskettenmodell identisch sind. Auch das den beiden Modellen zu Grunde liegende Verkehrsnetz ist identisch.

Die verwendeten Methoden zur Berechnung der Ziel- und Moduswahl sind bewusst wenig komplex gewählt. Insbesondere die Anzahl der Parameter zur Beschreibung des Verhaltens im Alltag soll im Sinne der Übertragbarkeit und Benutzerfreundlichkeit niedrig gehalten werden. Dies ermöglicht dem Benutzer eine schnelle Anpassung und Kalibrierung des Modells an das Verkehrsgeschehen des betrachteten Untersuchungsgebietes.

4.2.1 Eingangsdaten

Das im Verkehrsmodell hinterlegte Verkehrsangebot besteht aus dem Hauptstraßennetz zwischen Prien am Chiemsee im Westen und Salzburg im Osten sowie der deutsch-österreichischen Staatsgrenze im Süden und den Städten Burgkirchen a. d. Alz und Kraiburg am Inn im Norden. Abb. 4.1 zeigt das Untersuchungsgebiet. Das Netzmodell umfasst das Hauptstraßennetz dieser Region. Im Stadtgebiet von Bad Reichenhall ist das gesamte Straßennetz einschließlich Fuß- und Radwege modelliert. Für jede Modellstrecke sind Geschwindigkeit, Länge und Kapazität hinterlegt.

Im ÖV sind alle Fahrten der Buslinien erfasst, die in Bad Reichenhall beginnen bzw. enden oder die Stadt durchqueren. Auch wichtige Anschlusslinien wie beispielsweise die Buslinien zwischen Reit im Winkel und Inzell sowie Reit im Winkel und Prien sind Teil des Verkehrsangebotes. Darüber hinaus enthält das Angebotsmodell die Bahnfahrten der Berchtesgadener Land Bahn zwischen Berchtesgaden und Freilassing, sowie die Fahrten der Deutschen Bahn zwischen Freilassing und Mühldorf und von Freilassing Richtung München bis zum Bahnhof Übersee.

Aus dem Verkehrsmodell Validate (Haupt et al, 2012), einem deutschlandweiten Nachfragemodell auf regionaler Ebene, werden Verkehrsbelastungen für das betrachtete Untersuchungsgebiet übernommen. Die Daten liegen differenziert nach Pkw und Lkw für den gesamten Tag und unterteilt in stundenfeine Nachfragematrizen vor. Die Fahrten mit Quelle und Ziel in Bad Reichenhall werden aus den Matrizen gelöscht. Sie werden im Rahmen der im Folgenden beschriebenen Nachfrageberechnungen modelliert.

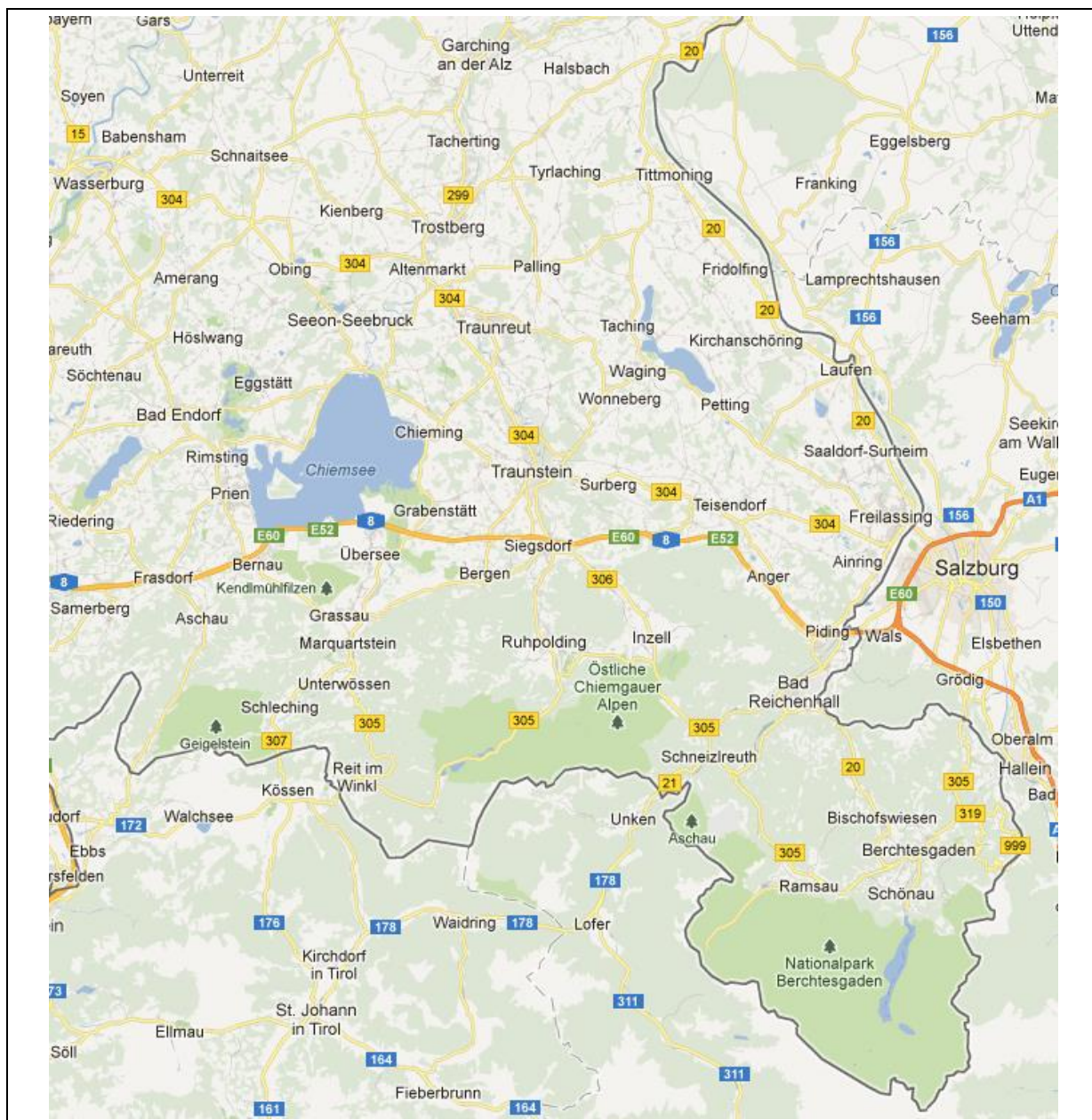


Abb. 4.1: Vom Verkehrsmodell erfasstes Gebiet (Quelle: GoogleMaps)

Das Untersuchungsgebiet wird in Verkehrszellen aufgeteilt, für die verkehrserzeugende und verkehrsanziehende Potentiale quantifiziert werden. Dazu gehören beispielsweise die Anzahl Einwohner, die aus der Einwohnerstatistik (Stand 30.12.09) auf Wahlbezirksebene vorliegt. Für die Zuordnung auf die Verkehrszellen

wird die Anzahl Einwohner des Wahlbezirkes gleichmäßig auf die in diesem Wahlbezirk liegenden Verkehrszellen aufgeteilt.

Neben den Einwohnern werden weitere Siedlungsstrukturdaten für jede Verkehrszelle im Stadtgebiet von Bad Reichenhall im Modell hinterlegt. Dazu gehören beispielsweise die Arbeitsplätze, die der Beschäftigtenstatistik der Bundesagentur für Arbeit (BfA) für die Stadt Bad Reichenhall entnommen werden und mangels fehlender Angaben gleichmäßig auf die Verkehrszellen in Bad Reichenhall übertragen werden. Ausnahmen bilden Verkehrszellen mit Standorten großer Arbeitgeber wie beispielsweise dem Kreiskrankenhaus oder der Bundeswehrkaserne Hochstaufen. Für diese Einrichtungen wird die Zahl der Beschäftigten separat ermittelt und als Anzahl Arbeitsplätze der entsprechenden Verkehrszelle zugeordnet. Darüber hinaus enthält das Datenmodell die Anzahl betreuter Kinder in Schulen und Kindertagesstätten je Verkehrszellen.

Die durchschnittliche Belegung der größten Hotels und Pensionen (durchschnittliche Belegung ≥ 10 Personen) ist ebenfalls im Modell hinterlegt. Die entsprechenden Daten werden von der Stadtverwaltung Bad Reichenhalls zur Verfügung gestellt. Auch Anziehungspotentiale zu Freizeitaktivitäten und sonstigen Aktivitäten müssen abgeschätzt werden, da diese Art von Aktivitäten im Alltagsmodell modelliert wird. Da keine Angaben über die Lage und Größe von Freizeiteinrichtungen sowie öffentlichen Einrichtungen wie beispielsweise Ämtern oder Arztpraxen verfügbar sind, werden die Potentiale nach einer sehr überschläglichen Methode abgeschätzt. Anhand der Anzahl Arbeits- und Schulplätze sowie der Anzahl Einwohner einer Verkehrszelle werden die Potentiale für die Aktivität Sonstiges berechnet. Die der Wahl dieser Strukturgrößen zugrundeliegenden Annahmen sind:

- Öffentliche Einrichtungen oder Einkaufseinrichtungen, die im Rahmen der Aktivität Sonstiges aufgesucht werden, sind auch immer Ort von Arbeitsplätzen.
- Besuche von Verwandten oder Bekannten, die ebenfalls zur Aktivität Sonstiges gezählt werden, finden verstärkt an Orten statt, an denen viele Personen wohnen.

Die Potentiale für Freizeitaktivitäten entsprechen denen für sonstige Aktivitäten. Eine Verbesserung des Modells kann durch eine genauere Ermittlung der Potentiale für die beiden Aktivitätenarten erreicht werden.

Für die Abbildung des Mobilitätsverhaltens wird jeder Einwohner entsprechend seines Familienstandes und seiner Erwerbstätigkeit einer Personengruppe zugeordnet. Mitglieder einer Personengruppe zeichnen sich durch ein ähnliches verkehrliches Verhalten aus. Um die Übertragbarkeit zwischen Alltags- und Evakuierungskettenmodell zu gewährleisten, sollten in beiden Modellteilen die gleichen Personengruppen verwendet werden. Daher ist die Personengruppeneinteilung so vorzunehmen, dass die einer Personengruppe zugeordneten Personen sowohl im Alltag als auch während der Evakuierung ein ähnliches Verhalten zeigen. Dabei sollte die Bevölkerung nicht zu fein unterteilt werden, da die

Anzahl Parameter zur Beschreibung des Mobilitätsverhaltens mit der Anzahl Personengruppen ansteigt. Bei der Personengruppeneinteilung in EvaSim wird daher auf die in anderen Verkehrsmodellen übliche Unterscheidung anhand der Pkw-Verfügbarkeit verzichtet. Dafür wird berücksichtigt, ob eine Person Kinder hat, da dies das Verhalten im Evakuierungsfall maßgeblich beeinflusst. Dieses Kriterium wird bei der Personengruppeneinteilung in anderen Verkehrsmodellen nicht herangezogen. Tabelle 5 zeigt die Personengruppeneinteilung für EvaSim.

Die Anzahl Personen je Personengruppe und Verkehrszelle wird anhand des Anteils einer Personengruppe an der Gesamtbevölkerung berechnet. Dieser Anteil ergibt sich für die Personengruppen Rentner, Schüler und Kinder anhand des Geburtsjahres aus der Alterspyramide für Bad Reichenhall (Stand 30.12.2009). Um die verbleibende Gruppe von Personen zwischen 18 und 65 Jahren den im Modell verwendeten Personengruppen zuzuordnen, wird zunächst der Anteil Erwerbstätiger abgezogen. Dieser wird aus der Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit für den 30.06.2009 entnommen und -da hier nur sozialversicherungspflichtige Beschäftigte erfasst werden- um den Anteil der nichtsozialversicherungspflichtigen Arbeitnehmer erhöht. Die so ermittelten Anteile für Erwerbstätige und Nichterwerbstätige werden abschließend nach Elternschaft unterschieden. Hierfür wird aus den MiD-Daten des Jahres 2008 die durchschnittliche Anzahl Kinder je Familie ermittelt, woraus die durchschnittliche Anzahl Kinder je Erwachsenen abgeleitet wird. Damit wird aus der bekannten Anzahl Kinder in Bad Reichenhall die Anzahl Eltern berechnet. Aus der Anzahl Eltern und dem Anteil berufstätiger Eltern ergeben sich die Anteile für die Personengruppen Erwerbstätige mit Kind und Nichterwerbstätige mit Kind und in Abhängigkeit davon die Personengruppen Erwerbstätige ohne Kind und Andere. Tabelle 5 verdeutlicht die Vorgehensweise. Aus den Anteilen jeder Personengruppe an der Gesamtbevölkerung und der Zahl der Einwohner je Verkehrszelle wird die Anzahl Personen je Personengruppe verkehrszellenfein berechnet.

Tabelle 5: Vorgehensweise zur Berechnung des Anteils einer Personengruppe an der Gesamtbevölkerung Bad Reichenhalls

Personengruppe	Berechnung und Quelle	Anteil an Gesamtbevölkerung
Gesamt_EW	Gesamtbevölkerung Bad Reichenhall, Alterspyramide ¹	100%
Anzahl PG Kinder (PGK)	Alterspyramide: Anzahl Personen < 7 Jahre	4,3%
Anzahl PG Schüler (PGS)	Alterspyramide: Anzahl Personen 7 ≥ Jahre und <18 Jahre	7,9%
Anzahl PG Rentner (PGR)	Alterspyramide: Anzahl Personen > 65 Jahre	31%
Anzahl Rest (R)	Personen ≥ 18 Jahre und < 65 Jahre R = Gesamt_EW – PGK – PGS – PGR	56,8%
Anteil Erwerbstätige (EW)	EW= Anteil sozialversicherungspfl. Beschäftigte (BfA) ² + Anteil nichtsozialversicherungspfl. Beschäftigte (BPB) ³	39%
Anteil Eltern (EI)	$EI = \frac{\text{Anz. Kinder} \cdot 2 \text{ Erwachsene/Familie}}{1,68 \text{ Kinder/Familie}} / \text{Gesamt_EW}$	14,5%
Anzahl PG Erwerbstätige mit Kind (PG EW_m_Ki)	$\text{Ew_m_Ki} = \text{Anz. Eltern} \cdot \text{Anteil erwerbstätiger Eltern}^4$	10%
Anzahl PG Erwerbstätige ohne Kind (PG EW_o_Ki)	$\text{EW_o_Ki} = \text{Anz. Erwerbstätige} - \text{PG Ew_m_Ki}$	28,6%
Anzahl PG nicht Erwerbstätige mit Kind (PG NEw_m_Ki)	$\text{NEw_m_Ki} = (\text{Anteil Eltern} - \text{Anteil PG Ew_o_Ki}) \cdot \text{Gesamt_EW}$	4,5%
Anzahl PG Andere (PG Andere)	$\text{Andere} = \text{Gesamt_EW} - \text{Summe aller anderen Personengruppen}$	13,7%

Typische verkehrliche Verhaltensweisen im Alltag für die Personen einer Personengruppe können Verkehrsumfragen entnommen werden, die in größeren Abständen deutschlandweit durchgeführten werden. Aus den MiD-Daten des Jahres

¹ Quelle: Stadt Bad Reichenhall

² Quelle: Statistisches Landesamt Bayern, Datenbank Destatis, Regionalstatistik Beschäftigte Pendler mit Stichtag 30.06.2009, aufgerufen am 24.11.2010

³ Quelle: Veröffentlichung auf Homepage der Bundeszentrale für Politische Bildung (BPB) - <http://www.bpb.de/files/75U7V7.pdf>, aufgerufen am 24.11.2010

⁴ Quelle: Veröffentlichung auf Homepage der Bundeszentrale für Politische Bildung (BPB) - <http://www.bpb.de/files/2HLA66.pdf>, aufgerufen am 24.11.2010

2008 werden typische Aktivitätenketten mit der jeweiligen Dauer der Aktivität während eines Tages erfasst. Da es sich bei Bad Reichenhall um eine Kleinstadt handelt, werden nur Wegetagebücher von Personen ausgewertet, die entsprechend der differenzierten Regionstypeneinteilung vom BBSR des Jahres 2009 in Gemeinden der Regionstypen 4 bis 6 („Ländliche Räume höherer Dichte“ und „Verstädterter Räume mittlerer Dichte ohne“ bzw. „mit großen Oberzentren“) wohnen. Dabei wird nach den folgenden Aktivitäten unterschieden:

- Wohnen (W)
- Arbeiten (A)
- Ausbildung, z.B. Schule (B)
- Kindertagesstätte (K)
- Bringen zur bzw. Holen von Kita (X)
- Freizeit (F)
- Sonstige Aktivitäten beispielsweise Arztbesuche, Ämterbesuche, Einkäufe, etc. (S)

Für die Modellkalibrierung werden außerdem die Reiseweiten sowie die Verkehrsmittelwahl in Kleinstädten für alle Aktivitäten und Personengruppen aus den MiD-Daten herausgeschrieben. Auch die Verkehrsmittelverfügbarkeit der einzelnen Personengruppen für Kleinstädte wird in die Modellierung übernommen.

4.2.2 Modellaufbau

Verkehrserzeugung

Die Simulation des Alltagsverkehrs erfolgt in den in Kapitel 2.2 beschriebenen vier Stufen. In Stufe 1, der Erzeugung, wird für jeden im Untersuchungsgebiet lebenden Einwohner ein Agent mit einer Erkennungsnummer (ID) im Modell erzeugt. Aus einem Pool von für die Personengruppe des Agenten typischen Aktivitätenketten, die den MiD-Daten entnommen werden, wird dem aktuellen Agenten eine zufällig gezogene Aktivitätenkette zugewiesen. Diese Aktivitätenkette enthält Informationen über die während eines Tages durchgeführten Aktivitäten und Aktivitätendauern.

Für jeden Agenten wird außerdem festgelegt, ob er über einen Pkw und ein Fahrrad verfügt. Die Anteile an Verfügbarkeiten der jeweiligen Verkehrsmittel für die gewählten Personengruppen sind wiederum aus den MID-Daten bekannt. Über eine Monte-Carlo-Simulation wird die Verkehrsmittelverfügbarkeit des aktuellen Agenten bestimmt.

Verkehrsverteilung

Für jede Personengruppe werden im Vorfeld der Berechnung Pflichtaktivitäten definiert. Dies sind Aktivitäten, die immer am gleichen Ort durchgeführt werden und

durch die die Ziel- und Moduswahl anderer Aktivitäten beeinflusst wird. Je Personengruppe können zwei Pflichtaktivitäten mit unterschiedlichen Prioritäten bestimmt werden. Die Zielwahl für die niedriger priorisierte Pflichtaktivität zwei erfolgt in Abhängigkeit der höher priorisierten Pflichtaktivität eins. Tabelle 6 enthält eine Übersicht der Pflichtaktivitäten für die Personengruppen im Evakuierungskettenmodell.

Tabelle 6: Pflichtaktivitäten der im Evakuierungskettenmodell verwendeten Personengruppen mit Angabe der Prioritätsstufe

Name	Ew_m_Ki	Ew_o_Ki	NEw_m_Ki	Rentner	Kinder	Schüler	Andere
Wohnen							
Arbeiten	1	1	2	1		2	1
Ausbildung		2				1	
KITA					1		
Bringen/Holen	2		1				
Sonstiges							
Freizeit							

Im zweiten Schritt des 4-Stufen-Algorithmus, der Zielwahl, wird berechnet, an welchen Orten die Aktivitäten der Aktivitätenkette durchgeführt werden. Dabei werden zunächst unflexible Orte bestimmt, die für die Pflichtaktivitäten regelmäßig aufgesucht werden und daher als Heimatstandort bei der Zielwahl aufgefasst werden können. Der Wohnort gilt als erster Heimatstandort. Die Orte der beiden Pflichtaktivitäten, die als weitere Heimatstandorte in die Berechnung eingehen, werden über den in Kapitel 2.3.2 vorgestellten bipolaren Ansatz errechnet. Die Zielwahl für den zweiten Heimatstandort bzw. der Pflichtaktivität erster Priorität erfolgt in Abhängigkeit des Widerstandes zum Wohnort:

$$f(w_{he}) = e^{\beta \cdot (w_{he})} \text{ für die Zielwahl der Pflichtaktivität erster Priorität}$$

- mit h Quellverkehrszelle der Wohnung
 e Zielverkehrszelle der ersten Pflichtaktivität
 w_{he} Widerstand zwischen der Startzelle w und der Zielzelle e
 β Skalierungsparameter

Im Anschluss wird der dritte Heimatstandort bestimmt, an dem die Pflichtaktivität zweiten Ranges durchgeführt wird. Hierfür wird ebenfalls das modifizierte Konzept der polaren Einzugsgebiete nach Lohse verwendet (siehe Kapitel 2.3.2). Dementsprechend erfolgt die Zielwahl in Abhängigkeit des Widerstandes zwischen Quelle und Ziel der Ortsveränderung. Als Quelle wird auch hier die Wohnung

angenommen. Darüber hinaus wird bei dem Konzept der polaren Einzugsgebiete noch ein zweiter fester Standort bei der Zielwahl berücksichtigt. Dieser zweite Pol ist hier der zuvor berechnete Standort der ersten Pflichtaktivität. Damit ergibt sich für die Berechnung des Widerstandes der zweiten Pflichtaktivität die Formel

$$f(w_{ehz}) = e^{\beta \cdot (0,5 \cdot (w_{ez} + w_{hz}))} \text{ für Zielwahl der zweiten Pflichtaktivität}$$

mit e Zelle der ersten Pflichtaktivität
 h Zelle der Wohnung
 z Zelle der zweiten Pflichtaktivität

Der Zielwahlansatz mit Berücksichtigung der Heimatstandorte ist ursprünglich von Lohse für wegebasierte Modelle entwickelt worden. Er wird für die Zielwahlberechnung für Aktivitätenpaare angewendet, die weder an einem Heimatstandort beginnen noch enden. Die zugrundeliegende Annahme, dass Verkehrsteilnehmer bei der Zielwahl die Entfernung zum Heimatstandort berücksichtigen, wird auf die Zielwahl für Wahlaktivitäten im Alltagsmodell übertragen. Anders als im wegebasierten Modell ist bekannt, welcher Heimatstandort in der Aktivitätenkette als nächstes aufgesucht wird. Daher muss bei der Zielwahl für Wahlaktivitäten nur der Widerstand zu dem als nächstes aufgesuchten Heimatstandort berücksichtigt werden. Die Zielwahl aller Wahlaktivitäten kann daher als polares Problem betrachtet werden. Die Berechnung erfolgt demnach über die Formel:

$$f(w_{ijh}) = e^{\beta \cdot (0,5 \cdot (w_{ij} + w_{jp}))} \text{ für Zielwahl von Wahlaktivitäten}$$

mit i aktuelle Quellzelle
 j aktuelle Zielzelle
 p Zelle der nächsten in Aktivitätenkette vorgesehenen Pflichtaktivität (Heimatstandort)

Die Vorgehensweise soll durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden. Ein Schüler wählt den Standort seiner ersten Pflichtaktivität, die Schule, in Abhängigkeit seiner Wohnung. Einen Nebenjob, der im Modell seine zweite Pflichtaktivität ist, sucht er sich in der Nähe der Schule und nicht allzuweit entfernt von der Wohnung. Für die Zielwahl wird der polare Ansatz von Lohse verwendet. Nach der Schule kauft er sich auf dem Weg zur Arbeit einen Mittagsimbiss. Dabei hat er die Wahl zwischen drei Verkaufsstellen. Er berücksichtigt bei der Zielwahl dieser Wahlaktivität neben dem Widerstand zu seinem aktuellen Standort auch den Umweg bzw. die Entfernung der Imbissstände vom Ort seiner danach geplanten Pflichtaktivität, dem Arbeiten.

Die Berechnungsformel im tourbasierten Modell kann gegenüber dem bipolaren Berechnungsansatz für wegebasierte Modelle von Lohse verkürzt werden. In einem wegebasierten Modell ist nicht bekannt, welchen Heimatstandort ein Agent als nächstes aufsucht. Daher muss bei jeder Zielwahlberechnung eines

Aktivitätenpaares mit Start und Ziel an keinen der Heimatstandorte der Widerstand zu allen Heimatstandorten berücksichtigt werden. Im tourbasierten Modell hingegen liegt die Information über den nächsten in der Aktivitätenkette folgenden Heimatstandort vor. Daher wird bei der Zielwahl -neben dem Widerstand zwischen Quelle und Ziel- nur der Widerstand zu diesem nächsten Heimatstandort berücksichtigt. Der Ansatz wird dadurch kürzer und realistischer.

Die Bewertungswahrscheinlichkeiten für jede mögliche Relation werden normiert und aufsummiert. Über eine Zufallszahl wird der gewählte Zielort gezogen. Die festen Heimatstandorte, an denen die Pflichtaktivitäten stattfinden, werden als persönliches Attribut des Agenten gespeichert.

Moduswahl

Im Anschluss an die Zielwahl erfolgt die Moduswahl. Hier wird für jede Ortsveränderung berechnet, welches Verkehrsmittel genutzt wird. Dabei wird zwischen austauschbaren und nicht austauschbaren Verkehrsmitteln unterschieden. Austauschbare Verkehrsmittel sind Verkehrsmittel, die der Verkehrsteilnehmer persönlich besitzt, wie z.B. Fahrrad oder Auto. Wählt er zu Beginn der Aktivitätenkette dieses Verkehrsmittel, wird er es auch am Ende der Aktivitätenkette mit zurückbringen. Die Verkehrsmittelwahl auf dem Rückweg ist damit abhängig von der Verkehrsmittelwahl auf dem Hinweg. Anders verhält es sich mit austauschbaren Verkehrsmitteln wie ÖV oder zu Fuß gehen. Diese können während einer Aktivitätenkette kombiniert werden.

Es werden alle möglichen Verkehrsmittelkombinationen für die Teilwege einer Aktivitätenkette erzeugt. Anschließend werden die Verkehrsmittelkombinationen gelöscht, die nicht zulässig sind, weil sie die Nichtaustauschbarkeit der Verkehrsmittel Rad und Pkw nicht berücksichtigen. Sobald auf einem Weg der Aktivitätenkette Fahrrad bzw. Pkw gewählt wird, muss auf allen vorherigen und nachfolgenden Wegen das gleiche Verkehrsmittel genutzt werden. Ausnahmen bilden dabei Teilwegketten innerhalb der betrachteten Wegekette, bei denen am Anfang und am Ende der gleiche Ort aufgesucht wird. Für sämtliche Wege dieser Teilwegkette können andere, austauschbare Verkehrsmittel gewählt werden.

Allen zulässigen Verkehrsmittelkombinationen wird ein Nutzen zugeordnet, der mit einem LOGIT-Modell der Form

$$f(w_{ijm}) = e^{V_{ijm}} \text{ mit}$$

$$V_{ijm} = p1_m + p2_m \cdot t_{ijm}$$

mit w_{ijm}	Widerstand zwischen der Quellezelle i und der Zielzelle j bei Benutzung des Modus m
V_{ijm}	objektiver Nutzenbetrag von Modus m
pI_m	konstanter Nutzen des Modus m
t_{ijm}	Fahrzeit zwischen Quellzelle i und Zielzelle j mit Modus m
$p2_m$	Grenznutzen einer Minute Fahrzeit mit Modus m

berechnet wird. Die Verkehrsmittelkombination mit dem höchsten Nutzen wird ausgewählt. Als Widerstandsgröße w_{ijm} wird nicht wie in der Zielwahl die Entfernung verwendet, sondern die Reisezeit mit dem jeweiligen Verkehrsmittel m . Der Empfindlichkeitsparameter drückt differenziert nach Personengruppe und Fahrtzweck die Empfindlichkeit der Agenten gegenüber Fahrzeitunterschieden zwischen den jeweiligen Verkehrsmitteln aus.

Aus den vom gewählten Verkehrsmittel abhängigen Reisezeiten und den Dauern der einzelnen Aktivitäten der Aktivitätenkette kann nach der Moduswahl für jede Aktivität die Startzeit und die Endzeit berechnet werden. Die Dauer der letzten Aktivität des Tages, meist dem Wohnen, wird nicht aus den MiD-Daten entnommen sondern aus der Differenz zwischen Tagesende und der Gesamtdauer aller Aktivitäten und Ortsveränderungen des Tages gebildet.

4.2.3 Modellvalidierung und -kalibrierung

Für die Validierung und Kalibrierung der bei der Berechnung verwendeten Parameter werden Kenngrößen aus der MiD-Erhebung gefiltert und mit den Modellkenngrößen verglichen. Entsprechend der Größe von Bad Reichenhall werden für die Ermittlung der Kenngrößen nur Wegetagebücher von Personen ausgewertet, die ebenfalls in Kleinstädten oder in ländlichen Räumen leben (BBSR-Regionstyp 4-6).

Die Kalibrierung der Empfindlichkeitsparameter bei der Verkehrsverteilung erfolgt anhand der Reiseweiten aus den MiD-Daten, differenziert nach Personengruppen und Aktivitätenzweck. Dabei wird unterschieden zwischen Agenten ohne und Agenten mit Pkw-Verfügbarkeit, da anzunehmen ist, dass Letztere längere Wege zurücklegen. Abb. 4.3 zeigt den Vergleich zwischen MiD- und Modelldaten für Reiseweiten zur Aktivität Freizeit. Kleinere Abweichungen zu den erhobenen Werten entstehen zum einem aufgrund von Ungenauigkeiten in den Modelleingangsdaten. Die räumliche Verteilung von Arbeitsplätzen, Freizeitmöglichkeiten oder Zielen sonstiger Aktivitäten beruht auf den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Schätzungen, da keine genaueren Informationen hierzu vorliegen. Eine andere Fehlerquelle liegt in den Vergleichsdaten aus den MiD-Erhebungen, die nicht speziell für Bad Reichenhall sondern für mehrere unterschiedliche Städte zusammengefasst sind.

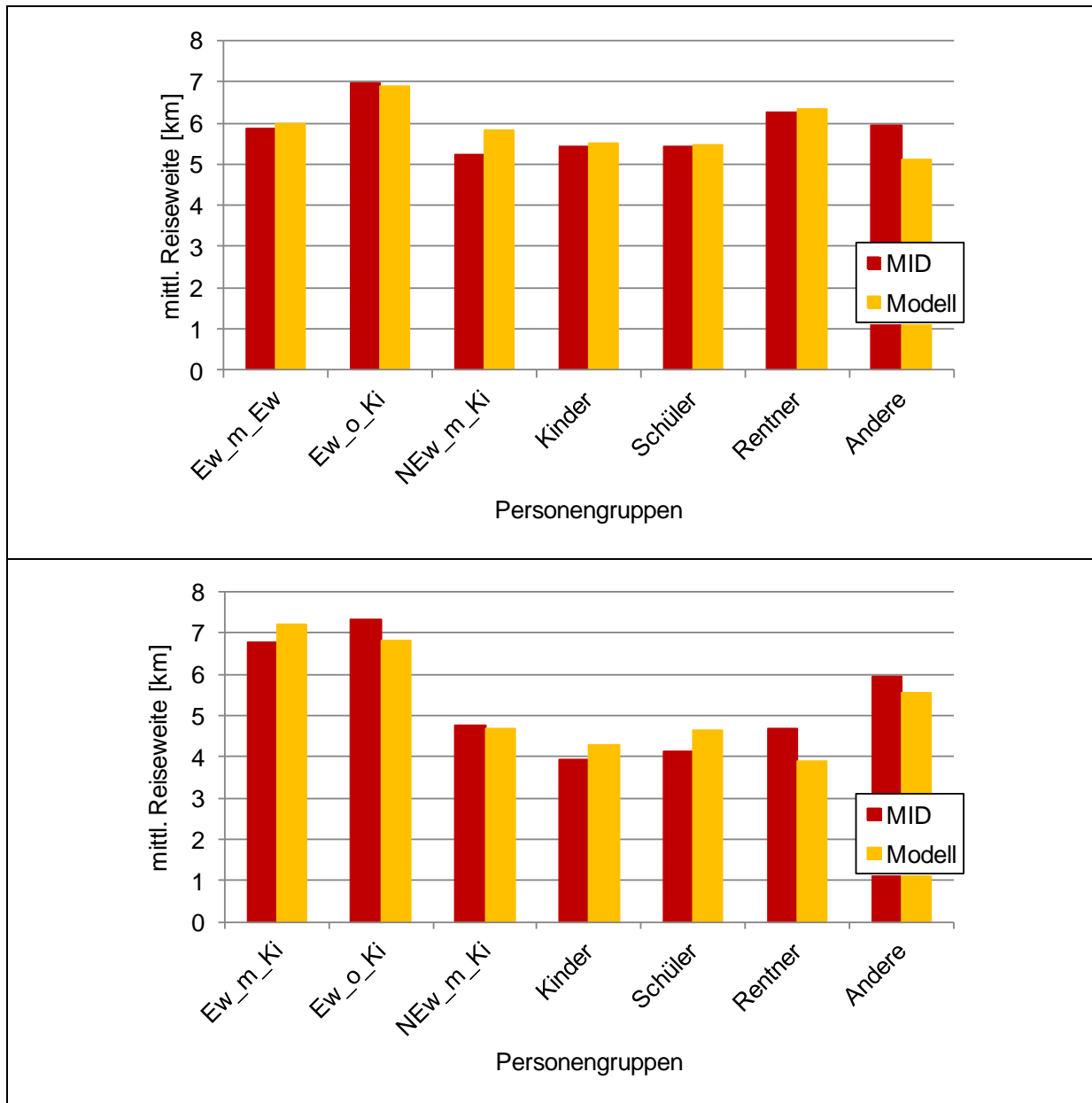


Abb. 4.2: Vergleich der mittleren Reiseweiten zur Aktivität Freizeit im Modell und laut Erhebung MiD für Agenten mit (oben) und ohne (unten) Pkw-Verfügbarkeit

Auch für die Kalibrierung des Modal Split werden MiD-Daten verwendet, die die Verkehrsmittelwahl für die einzelnen Personengruppen und Wegezwecke angeben. Abb. 4.3 zeigt den Vergleich zwischen MiD- und Modelldaten über alle Personengruppen und Aktivitäten. In Abb. 4.4 werden die Modal Split-Werte aus dem Modell und der MiD-Erhebung beispielhaft für die Personengruppe „Rentner“ gegenüber gestellt.

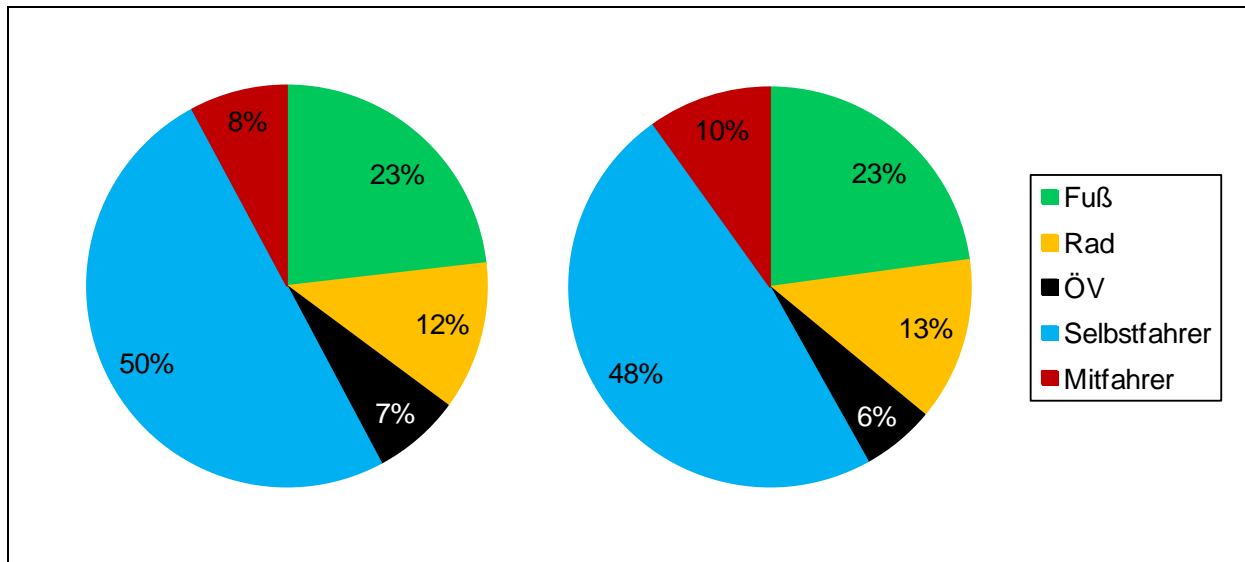


Abb. 4.3: Modal Split für alle Personengruppen und Aktivitäten in MiD (links) und im Modell (rechts)

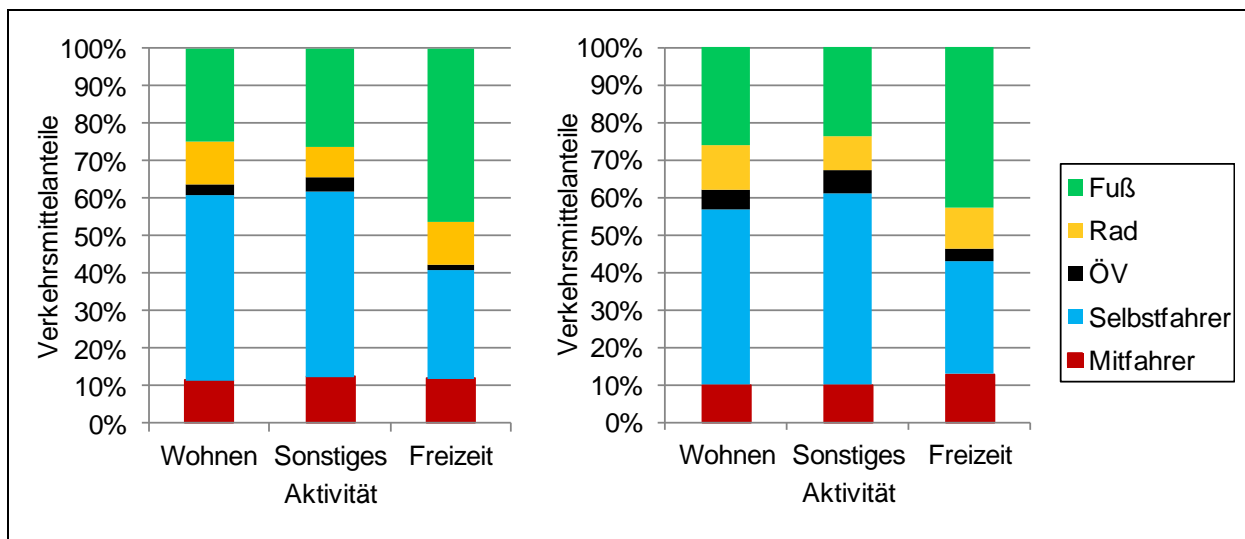


Abb. 4.4: Modal Split für die Personengruppe Rentner in MiD (links) und im Modell (rechts)

4.3 Modellaufbau Evakuierungskettenmodell

Mit dem Evakuierungskettenmodell wird das verkehrliche Verhalten sowohl der evakuierenden als auch der nicht evakuierenden Einwohner Bad Reichenhalls während der Evakuierung modelliert.

Um eine realistische Darstellung des Evakuierungsprozesses zu erreichen, wird im Rahmen von EvaSim das bei gewöhnlichen Verkehrssimulationen verwendete Berechnungsmodell erweitert und angepasst. Aus dem Alltagsmodell werden die Agenten und deren Eigenschaften wie Personengruppenzugehörigkeit, Verkehrs-

mittelbesitz, Wohnort und Lage der Orte von Pflichtaktivitäten übergeben. Auch die im Alltagsmodell berechneten Aktivitätenketten mit den Aktivitätenarten und -zeiten während eines Tages werden übergeben. Daraus können für jeden Agenten der Aufenthaltsort und die Aktivität zu Beginn der Evakuierung abgeleitet werden.

4.3.1 Modellierung für evakuierende Personen

4.3.1.1 Befolungsraten und Beteiligung

Für die Evakuierungsmodellierung werden drei Zeiträume definiert, für die unterschiedliche Verhaltensweisen angenommen werden. Die Zeiträume werden in Abhängigkeit der Alltagsaktivitätenmuster der Betroffenen festgelegt.

1. später Abend und Nacht (19:01 Uhr – 7:00 Uhr)
Die meisten Menschen halten sich zu Hause auf. In der Umfrage in Altensteig im Rahmen von Arbeitspaket 5 traf dies auf 82% der Befragten zu.
2. vormittags und mittags (7:01 Uhr – 14:00 Uhr)
Erwerbstätige sind auf Arbeit, Kinder und Schüler in Schule und Kindergarten.
3. nachmittags und früher Abend (14:01 Uhr – 19:00)
Weniger Kinder sind in der Schule bzw. Kindergarten. Einige sind zu Hause, andere sind für Freizeitbeschäftigungen außer Haus. Erwerbstätige sind meist auf der Arbeit.

Zu Beginn der Modellierung wird bestimmt, welche Agenten im überfluteten Gebiet leben. Durch Abgleich der mit dem Hydraulikmodell berechneten Überflutungsintensitäten der Verkehrszellen und der aus dem Alltagsmodell gespeicherten Zellnummer des Wohnorts eines Agenten wird ermittelt, in welchem Gefährdungsbereich sich dessen Wohnung befindet.

Im ersten Schritt werden unter den in gefährdeten Gebieten lebenden Agenten, diejenigen identifiziert, die dem Evakuierungsauftrag folgen. Die Befolungsraten sind abhängig von der Personengruppe und der Nähe zur Katastrophe bzw. der Gefährdungsstufe am Wohnort (Kapitel 3.3, Punkt 5). In der Nähe des Flusses sind die Gefährdungsstufen für gewöhnlich höher als in größerer Entfernung. Je höher die Gefährdungsstufe am Wohnort ist, desto mehr Personen beteiligen sich an der Evakuierung (Kapitel 3.3, Punkt 5).

Außerdem ist bekannt, dass bei einer Evakuierung nicht nur Personen evakuieren, die im gefährdeten Gebiet wohnen sondern auch einige, die außerhalb des Evakuierungsgebietes leben (Kapitel 3.3, Punkt 14). Daher wird im Modell ein personengruppenspezifischer Anteil an Agenten festgelegt, die dieses Verhalten aufweisen. Für alle Agenten wird in Abhängigkeit der für sie geltenden Befolungsraten über eine Monte-Carlo-Simulation die Teilnahme an der

Evakuierung zufällig festgelegt und als agentenbezogenes Attribut abgespeichert. Kapitel I.1.1 enthält eine Übersicht über die Werte für Befolungsraten der einzelnen Personengruppen.

4.3.1.2 Aktivitätenketten

Die Zuordnung von Aktivitätenketten während der Evakuierung erfolgt in Abhängigkeit der Personengruppe und der durchgeführten Aktivität zum Zeitpunkt des Evakuierungsaufwurfes. Für die nach diesen beiden Kriterien gebildeten Teilgruppen werden analog dem Alltagsmodell Evakuierungsaktivitätenketten definiert (siehe Kapitel I.1.2). Die Aktivitätenart Freizeit steht im Evakuierungskettenmodell nicht zur Auswahl, da nicht anzunehmen ist, dass ein Betroffener dieser Aktivität im Evakuierungsfall nachgeht. Die evakuierungsspezifische Aktivität Aufenthalt an einem sicheren Ort wird als Aktivität „Sicherer Ort“ ergänzt. Unter dem Begriff Sicherer Ort werden alle Ziele außerhalb des Evakuierungsgebietes zusammengefasst, an die sich die Evakuierenden begeben.

Jede Aktivitätenkette beginnt mit der Alltagsaktivität, der der Evakuierende zu Beginn der Evakuierung nachgeht und endet mit der Aktivität „Sicherer Ort“. Bei der Art und Reihenfolge der Zwischenaktivitäten werden Erkenntnisse aus der Verhaltensforschung berücksichtigt. Bestandteil der meisten Evakuierungsaktivitätenketten ist eine Fahrt zur Wohnung, wenn der Agent zu Evakuierungsbeginn nicht zu Hause ist (siehe Kapitel 3.3, Punkt 2). Zu den Evakuierungsaktivitäten von Agenten der Personengruppen mit Kindern gehört auch häufig eine Fahrt zu Kita oder Schule (siehe Kapitel 3.3, Punkt 3). Generell sind für Erwachsene mehr Aktivitäten im Evakuierungsfall vorgesehen, als für Kinder und Schüler. Daneben sind auch Aktivitätenketten vorgesehen, bei denen der Betroffene sich, ohne eine Zwischenaktivität durchzuführen, direkt an den sicheren Ort begibt.

Jeder Aktivitätenkette ist eine Auswahlwahrscheinlichkeit zugeordnet, wie Tabelle 7 beispielhaft für die Personengruppe Erwerbstätige mit Kind (Ew_m_Ki) zeigt. Die Gesamtwahrscheinlichkeit aller Aktivitätenketten einer Personengruppe mit einer bestimmten Ausgangsaktivität zu Beginn der Evakuierung beträgt eins. Die Höhe der Einzelwahrscheinlichkeiten der Aktivitätenketten hängt wiederum von den Erkenntnissen der Verhaltensforschung ab. Beschreibt eine Aktivitätenkette ein im Evakuierungsfall typisches Verhalten, wird ihr eine höhere Wahrscheinlichkeit zugeordnet als einer Aktivitätenkette, die eine eher untypische, seltenere Verhaltensweise beschreibt. Darüber hinaus sind die Auswahlwahrscheinlichkeiten von der Tageszeit abhängig. Ketten mit bestimmten für den Tag typischen Aktivitäten werden beispielsweise nicht nachts ausgewählt.

Tabelle 7: Aktivitätenketten im Evakuierungsfall mit Auswahlwahrscheinlichkeiten für Personengruppe Erwerbstätige mit Kind (Ew_m_Ki) und Arbeit als Startaktivität

Ew_m_Ki	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	0,90	0,35	0,40
A-S/K-SO	0,00	0,50	0,35
A-SO	0,10	0,05	0,05
A-S-W-SO	0,00	0,10	0,20
Summe	1,00	1,00	1,00

W Aktivität am Wohnort
 A Aktivität am Arbeitsort
 S Aktivität Kinder holen von der Schule
 K Aktivität Kinder holen von der Kita
 SO Aufenthalt an einem sicheren Ort

4.3.1.3 Zielwahl

Die Zielwahl ist für viele Aktivitäten bereits aus dem Alltagsmodell vorbestimmt. Für jeden Agenten ist der Wohnort bekannt. Auch Orte, an denen Agenten Pflichtaktivitäten unternehmen, sind im Alltagsmodell als Heimatstandorte bestimmt worden und werden in das Evakuierungsmodell übernommen. Die Wahl von sonstigen Zielen im Evakuierungsfall erfolgt nicht nach den gleichen Regeln wie im Alltag, da anzunehmen ist, dass im Evakuierungsfall spezielle Ziele aufgesucht werden, für die es keine Alternativen gibt, wie beispielsweise die Wohnung eines Verwandten/Bekanntes oder der Aufenthaltsort eines Familienmitgliedes (siehe Kapitel 3.3, Punkt 1). Daher ist der Widerstand bei der Zielwahl weniger entscheidend als im Alltagsmodell. Ortsveränderungen mit sehr großen Widerständen werden jedoch in Anbetracht der wenigen zur Verfügung stehenden Zeit wahrscheinlich seltener angetreten. Daher wird im LOGIT-Modell ein relativ niedriger Wert für den Skalierungsparameter β gewählt, der auf eine niedrige Widerstandsempfindlichkeit schließen lässt und dennoch mit steigender Entfernung eine allmählich abnehmende Akzeptanz abbildet.

Bei der Wahl eines sicheren Ortes ist anzunehmen, dass die Evakuierenden keine Präferenzen haben und die Attraktivität jedes sicheren Ortes gleich groß ist. Daher wird die Zielwahl zu einem der verfügbaren sicheren Orte nicht über ein LOGIT-Modell berechnet, sondern bei der Umlegung mit der Routenwahl kombiniert. Nähere Erläuterungen zu der verwendeten Methode enthält Kapitel 4.6.1.

4.3.1.4 Moduswahl

Die Moduswahl wird nach der Zielwahl durchgeführt. Wie im Alltagsmodell gelten die Regeln für austauschbare und nicht austauschbare Verkehrsmittel. Nicht austauschbare Modi können nur an der Wohnung ausgetauscht werden. Es wird ebenfalls ein LOGIT-Modell verwendet. Eventuelle Einschränkungen im ÖV müssen ggf. durch Ausschluss des Modus ÖV bei den verfügbaren Verkehrsmitteln berücksichtigt werden. Ein bestimmter Anteil Personen, die im Alltag nicht über den Modus Mitfahrer verfügen, können diesen im Evakuierungsfall wählen, da ein Teil dieser Personen bei einer Evakuierung von Angehörigen mit dem Pkw abgeholt wird (siehe Kapitel 3.3, Punkt 1 und 16). Ebenfalls ist anzunehmen, dass eine Person, die auf einen Weg als Mitfahrer mitgenommen wird, auch auf den folgenden Wegen in der Evakuierungsaktivitätenkette mitgenommen wird. Damit ist Mitfahrer im Evakuierungsfall kein austauschbares Verkehrsmittel mehr.

Die Erhöhung der Auswahlwahrscheinlichkeit für den Modus Mitfahrer passiert zum Einen automatisch, weil die Empfindlichkeit gegenüber anderen, langsameren Modi ansteigt. Zusätzlich wird der Empfindlichkeitsparameter für den Modi Mitfahrer reduziert, damit der höhere Besetzungsgrad während einer Evakuierung im Modell abgebildet werden kann. Dieser ergibt sich aus der Tatsache, dass Familien meist gemeinsam evakuieren (siehe Kapitel 3.3, Punkte 1 und 2).

4.3.1.5 Berechnung der Gesamtvorbereitungsdauer

Für jeden Agenten im Modell wird eine Vorbereitungsdauer festgelegt, die der Zeit zwischen Evakuierungsaufwurf und -beginn entspricht (siehe Abb. 4.6). Hierfür gibt es Erfahrungswerte und Angaben aus der Literatur.

Lindell et al. (2001) berichten von einem Hurrikanszenario, bei dem zwischen Evakuierungsaufwurf und Evakuierungsbeginn ca. 60-450 Minuten und im Mittel 227 Minuten vergingen (siehe Kapitel 3.3, Punkt 9). Aus Befragungen ist bekannt, dass für die Vorbereitung auf eine Evakuierung Zeiten unter 60 Minuten schwer zu erreichen sind. Nur bei sehr kurzfristigen Evakuierungen und zu Zeiten, in denen die meisten Personen zu Hause sind, können kürzere Vorbereitungsdauern beobachtet werden. Bei nächtlichen Evakuierungen sind die Vorbereitungsdauern generell etwas kürzer als am Tag, da alle Personen die Evakuierung direkt von zu Hause aus antreten und das Abholen bzw. Sammeln am Wohnort wegfällt. Auch Absprachen über die geplante Vorgehensweise können schneller durchgeführt werden.

Es ist anzunehmen, dass die Dauer zwischen Evakuierungsaufwurf und -beginn stark von der Art der Katastrophe und von der Vorwarnzeit abhängt. So haben Befragungen in Arbeitspaket 5, Verhaltensforschung, ergeben, dass bei langen Vorwarnzeiten zwischen 6 und 12 Stunden die für die Evakuierungsvorbereitung zur

Verfügung stehende Zeit genutzt wird. Vorbereitungen dauern länger als bei kurzen Vorwarnzeiten, dehnen sich jedoch nicht über den Beginn der Überflutung aus, was hingegen bei kurzen Vorwarnzeiten passieren kann.

Bekannt ist, dass die Dauer bis zum Beginn der Evakuierung bei Personen in stark gefährdeten Gebieten etwa ähnlich hoch ist wie bei Personen in weniger gefährdeten Gebieten. Personen in gefährdeten Gebieten entschließen sich nach kürzerer Zeit zur Evakuierung, benötigen jedoch für die Vorbereitung länger, während Personen in weniger gefährdeten Gebieten erst später die Entscheidung zur Evakuierung treffen und die Vorbereitungen dann schneller verrichten (siehe Kapitel 3.3, Punkt 12).

Die beschriebenen Erkenntnisse werden für die Umsetzung in der Evakuierungsverkehrsmodellierung genutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass mit ansteigender Vorwarnzeit auch die Dauer der Vorbereitung auf die Evakuierung ansteigt, da mehr Zeit zur Verfügung steht. Daher werden in Abhängigkeit der Vorwarnzeit und der Personengruppen Grenzen für die maximale und minimale Vorbereitungsdauer abgeleitet bzw. aus dem Arbeitspaket Verhaltensforschung übernommen. Dabei wird berücksichtigt, ob der Agent zu Evakuierungsbeginn zu Hause oder unterwegs ist. Tabelle 8 zeigt diese Einteilung beispielhaft für die Personengruppe „Erwerbstätige mit Kind“. Ist die Vorwarnzeit niedriger, als die für die aktuelle Situation angenommene Höchstgrenze der Vorbereitungsdauer, wird für die weiteren Berechnungen die Vorwarnzeit des zu berechnenden Szenarios verwendet.

Der Verlauf der Abfahrtszeitenverteilung im Evakuierungsfall wird häufig mit S-förmigen Kurven beschrieben. So eine Kurve erhält man beispielsweise durch Anwendung der Rayleigh-Verteilung:

$$F(t) = 1 - e^{-0,5 \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^x}$$

mit t Zeitraum zwischen Evakuierungsentscheidung und Abfahrtszeit

β Parameter zur Anpassung an unterschiedliche Vorwarnzeiten und Personengruppen

x Exponent der Funktion

Der Parameter β und der Exponent x der Rayleigh-Verteilung werden aus der Mindest- und Höchstdauer für Evakuierungsvorbereitungen berechnet. Die Bestimmung der Vorbereitungsdauer eines einzelnen Agenten erfolgt über die Ziehung einer Zufallszahl zwischen 0 und 1. Die dieser Zufallszahl laut Verteilung zugeordnete Vorbereitungsdauer wird dem Agenten als Attribut zugeordnet. In Abb. 4.5 wird die Vorgehensweise anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Die berechnete Vorbereitungsdauer beginnt zum Zeitpunkt des Evakuierungsauftrages. Nach Ablauf der Vorbereitungsdauer tritt der Agent die Fahrt zum sicheren

Ort an. In Abb. 4.6 ist die Lage der Vorbereitungsdauer sowie weiterer Zeitabschnitte während einer Evakuierung graphisch dargestellt. Erreicht der Evakuierungsauftrag einen Agenten, der sich gerade auf dem Weg zwischen zwei Aktivitäten befindet, beendet er seinen Weg. Die Vorbereitungsdauer beginnt dann mit dem Beginn der Aktivität, zu der der Agent unterwegs ist.

Tabelle 8: Beispiel für in der Modellierung verwendete Vorbereitungsauern bei Evakuierungen für die Personengruppe „Erwerbstätiger mit Kind (Ew_m_Ki)“

Vorwarnzeit (Vwz)	Vorbereitungsauern					
	nachts		vormittags		nachmittags	
	zu Hause	außerhalb	zu Hause	außerhalb	zu Hause	außerhalb
kurz (1-2h)	15-90/Vwz	30-110/Vwz	25-90/Vwz	40-110/Vwz	25-90/Vwz	40-110/Vwz
moderat – lang (2-12h)	60-90/Vwz	75-90/Vwz	60-90/Vwz	75-90/Vwz	60-90/Vwz	75-90/Vwz

Je kleiner die Differenz zwischen Ober- und Untergrenze der Vorbereitungsdauer ist, desto steiler steigt die Verteilungsfunktion an. Der Anteil Personen, die erst kurz vor Beginn der Überflutung den Evakuierungsweg antreten, ist damit bei kurzen Vorwarnzeiten höher. Bei Evakuierungen mit langen Vorwarnzeiten ist die Zeitdifferenz zwischen gewählter Vorbereitungsdauer und Beginn der Überflutung bei den meisten Agenten länger. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich Agenten aufgrund von verkehrlichen Beeinträchtigungen zu Beginn der Überflutung noch im Überflutungsgebiet aufhalten, ist daher mit der gewählten Modellierungsmethode bei Evakuierungen mit langen Vorwarnzeiten geringer als bei Evakuierungen mit kurzen Vorwarnzeiten.

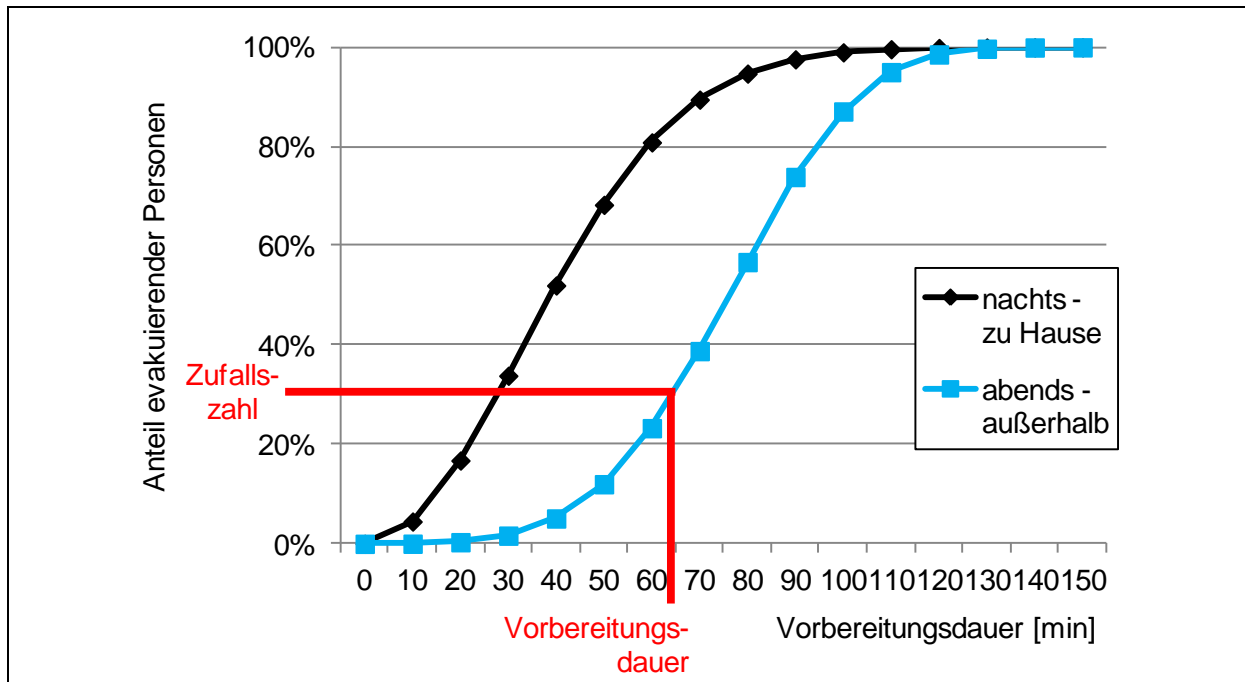


Abb. 4.5: Vorbereitungsduerverteilung der Personengruppe "Erwerbstätige mit Kindern" bei Evakuierungen mit kurzen Vorwarnzeiten

4.3.1.6 Berechnung der Dauer der Teilaktivitäten

Aus der Gesamtvorbereitungsdauer wird die Dauer der Teilaktivitäten der Evakuierungsaktivitätenkette abgeleitet. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Aktivitätenfolgen im Evakuierungsfall nicht in Abhängigkeit der Vorwarnzeit ändern.

Zunächst werden für die einzelnen Aktivitäten im Evakuierungsfall Mindest- und Höchstdauern definiert. Damit wird berücksichtigt, dass bestimmte Aktivitäten auch bei hohem Zeitdruck immer eine gewisse Dauer in Anspruch nehmen. Die Dauer anderer Aktivitäten hingegen ist begrenzt und wird auch bei langen Vorwarnzeiten nicht stärker ausgeweitet als nötig.

Vor den weiteren Berechnungen wird eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Sollte die Summe der Fahrzeiten zwischen den Aktivitätenorten und die Summe der Mindestaktivitätendauern in der geplanten Evakuierungsaktivitätenkette eines Agenten die gezogene Vorbereitungsdauer übersteigen, ist der Aktivitätenplan nicht durchführbar. In diesem Fall muss für diesen Agenten eine neue Aktivitätenkette gezogen werden und die Ziel- und Moduswahl sowie die Bestimmung der Gesamtvorbereitungsdauer ein weiteres Mal durchgeführt werden. Nimmt dieser neue Plan ebenfalls zu viel Zeit in Anspruch und ist daher nicht in der vorhandenen Vorwarnzeit umsetzbar, begibt sich die Person direkt an einen sicheren Ort ohne vorher andere Aktivitäten durchzuführen.

Zur Berechnung der Dauer der Teilaktivitäten wird von der festgelegten Vorbereitungsdauer die Fahrzeit zwischen den Aktivitäten abgezogen. Aus der Moduswahl ist der gewählte Modus bekannt. Als Fahrzeit wird die Zeit angenommen, die im Alltag für die Ortsveränderung mit dem entsprechenden Modus benötigt wird. Aus der um die Fahrzeiten reduzierte Gesamtdauer aller Aktivitäten wird die Dauer der Einzelaktivitäten berechnet. Dazu werden im Vorfeld der Berechnung für die Einzelaktivitäten jeder Aktivitätenkette die Anteile der Aktivitätendauer an der Gesamtaktivitätendauer festgelegt. Aus diesen Anteilen, bezogen auf die Vorbereitungsdauer jedes einzelnen Agenten, wird die Dauer der Teilaktivitäten berechnet.

Tabelle 9 zeigt beispielhaft Aufenthaltsdauern bestimmter Aktivitäten während einer Evakuierung, die im Rahmen von Haushaltsbefragungen nach einem Hurrikan ermittelt wurden (Lindell et al., 2005a)).

Tabelle 9: Aktivitäten und Aktivitätendauern während einer Evakuierung (Quelle: Lindell et al., 2005a)

Aktivität	Dauer [min]	Anteil [%]
Vorbereitung zum Verlassen der Arbeit	15,0	8,7
Fahrt von der Arbeit zur Wohnung	7,9	4,6
Sammeln der Familienmitglieder	30,2	17,6
persönliche Sachen packen	46,1	26,9
Windschutz errichten	38,8	22,6
Haus sichern	33,6	19,6
Gesamt	171,6	100,0

Die Aktivitäten bei einer Evakuierung aufgrund von Hochwasser und aufgrund eines Hurrikans ähneln sich. Zwar wird bei Überflutungen kein Windschutz errichtet, aber es werden dennoch Schutzmaßnahmen wie das Ausräumen von Kellern und unteren Etagen getroffen. Tabelle 9 zeigt, dass die Zeit zwischen Evakuierungsaufwurf und Aufbruch von der in dem Moment durchgeführten Aktivität relativ kurz ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass der größte Anteil der Vorbereitungszeit für Aktivitäten in oder an der Wohnung verbracht wird. Diese beiden Erkenntnisse sind auf die Überflutungssituation übertragbar. Beispielsweise ist zu vermuten, dass die Aktivität Wohnen deutlich länger dauern wird, als das Abholen eines Kindes im Kindergarten oder in der Schule. Wie bereits erwähnt, ist es dabei sinnvoll, für die einzelnen Aktivitäten Höchst- oder Mindestdauern festzulegen, die in Anhang I aufgelistet sind. Beispielsweise nimmt das Abholen im Kindergarten oder Schule auch bei kurzen Vorwarnzeiten eine gewisse Zeit in Anspruch und wird bei langen Vorwarnzeiten eine bestimmte Zeitdauer nicht überschreiten.

Zwischen Evakuierungsaufruf und Beginn der Vorbereitung zur Evakuierung benötigen die meisten Personen Zeit, um sich auf die Evakuierungssituation einzustellen. Es müssen Vorgehensweisen überlegt und mit Angehörigen abgesprochen werden. Diese Phase wird in der Literatur Entscheidungsphase genannt. Die Entscheidungsphase ist in dieser Arbeit Teil der Vorbereitungszeit (siehe Abb. 4.6). Ihr wird wie den anderen Aktivitäten eine Aktivitätendauer zugeordnet, wobei als Aktivität die Aktivität angenommen wird, die zum Zeitpunkt des Evakuierungsaufrufes durchgeführt wird. Nach Ablauf der Entscheidungsphase wird die Aktivität abgebrochen. Ist die Aktivität laut Alltagsplan bereits vor Ablauf der Entscheidungsphase beendet, endet die Entscheidungsphase mit dem Ende der Aktivität. Die Aktivitätendauern der anderen Aktivitäten werden entsprechend anteilig verlängert, so dass die Vorbereitungsdauer dennoch eingehalten wird.

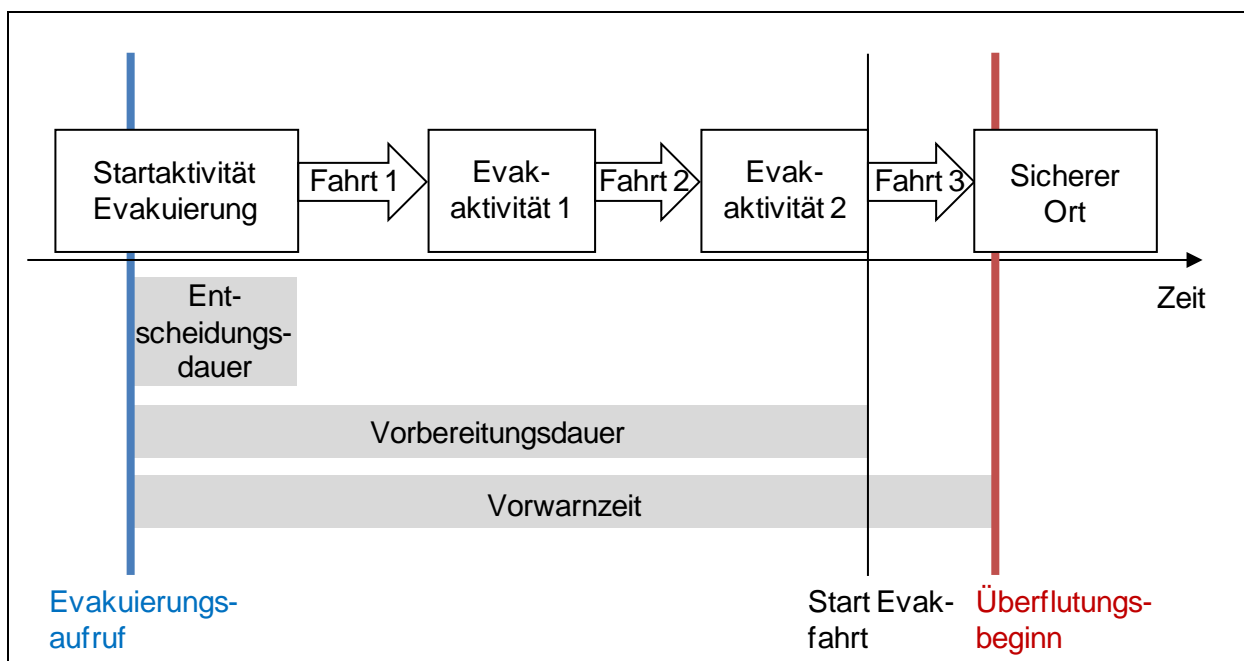


Abb. 4.6: Übersicht über bei der Modellierung dargestellte Zeitabschnitte während Evakuierungen

Der Vorteil der vorgeschlagenen Methode besteht darin, dass die Dauern der Teilaktivitäten an unterschiedliche Vorwarnzeiten angepasst werden können, ohne Parameter im Modell verändern zu müssen. Bei langen Vorwarnzeiten beispielsweise ist mit dieser Methode die Zeit zur Vorbereitung der Evakuierung in der Wohnung sehr lang. Auch die Zeit, die vergeht, bevor ein Agent von der ersten Aktivität aufbricht, variiert in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit. Bei langen Vorwarnzeiten erfolgt ein weniger hektischer Aufbruch von der aktuellen Aktivität, als bei kurzen Vorwarnzeiten.

Im Ergebnis der bisherigen Schritte sind sämtliche während der Evakuierung unternommene Fahrten mit den Attributen Quelle und Ziel, Verkehrsmittel sowie Abfahrtszeiten bekannt. Diese Fahrten lassen sich zu Fahrtenmatrizen

zeitscheibenfein zusammenfassen. Für EvaSim erfolgt die Ergebnisausgabe in 15-Minuten-Zeitintervallen.

Durch Einlesen dieser Fahrtenmatrizen und Umlegung im Modell werden der Verkehrsfluss und die Fahrzeiten während der Evakuierung ermittelt. Bei Überlastungen im Verkehrsnetz und damit gegenüber dem Normalzustand erhöhten Fahrzeiten im Evakuierungsfall verkürzt sich automatisch die Aktivitätendauer der nachfolgenden Aktivität. Der Grund dafür ist, dass das Ende einer Aktivität durch den Beginn der nachfolgenden Fahrt markiert wird, die in der Matrix der entsprechenden Zeitscheibe gespeichert ist und nicht verschoben wird. Abb. 4.7 zeigt dies im mittleren Beispiel für einen beispielhaften Evakuierungsfall 1. Problematisch ist im Evakuierungsmodell, dass sich der Beginn der folgenden Fahrt und damit das Ende einer Aktivität auch dann nicht verschiebt, wenn diese Aktivität zum vorhergesehenen Aktivitätendenende noch gar nicht begonnen werden konnte, weil die Fahrt dorthin sehr lang gedauert hat. Dies ist in Abb. 4.7 im unteren Beispiel für einen Evakuierungsfall 2 dargestellt. Zum Lösen dieses Problems müsste es einen Rückkopplungsprozess vom Routenwahlmodell zum Evakuierungskettenmodell geben, bei dem die Aktivitätendauern an die für die Evakuierungssituation errechneten Reisezeiten angepasst werden. Die sich daraus ergebenden veränderten Fahrtenmatrizen müssten wieder im Verkehrsmodell umgelegt werden. Dieser Ablauf wird durchgeführt, bis keine Verschiebungen und Anpassungen der Aktivitätendauern mehr notwendig sind. Die Implementierung dieses aufwändigen Rückkopplungsprozesses kann in Rahmen von EvaSim nicht durchgeführt werden.

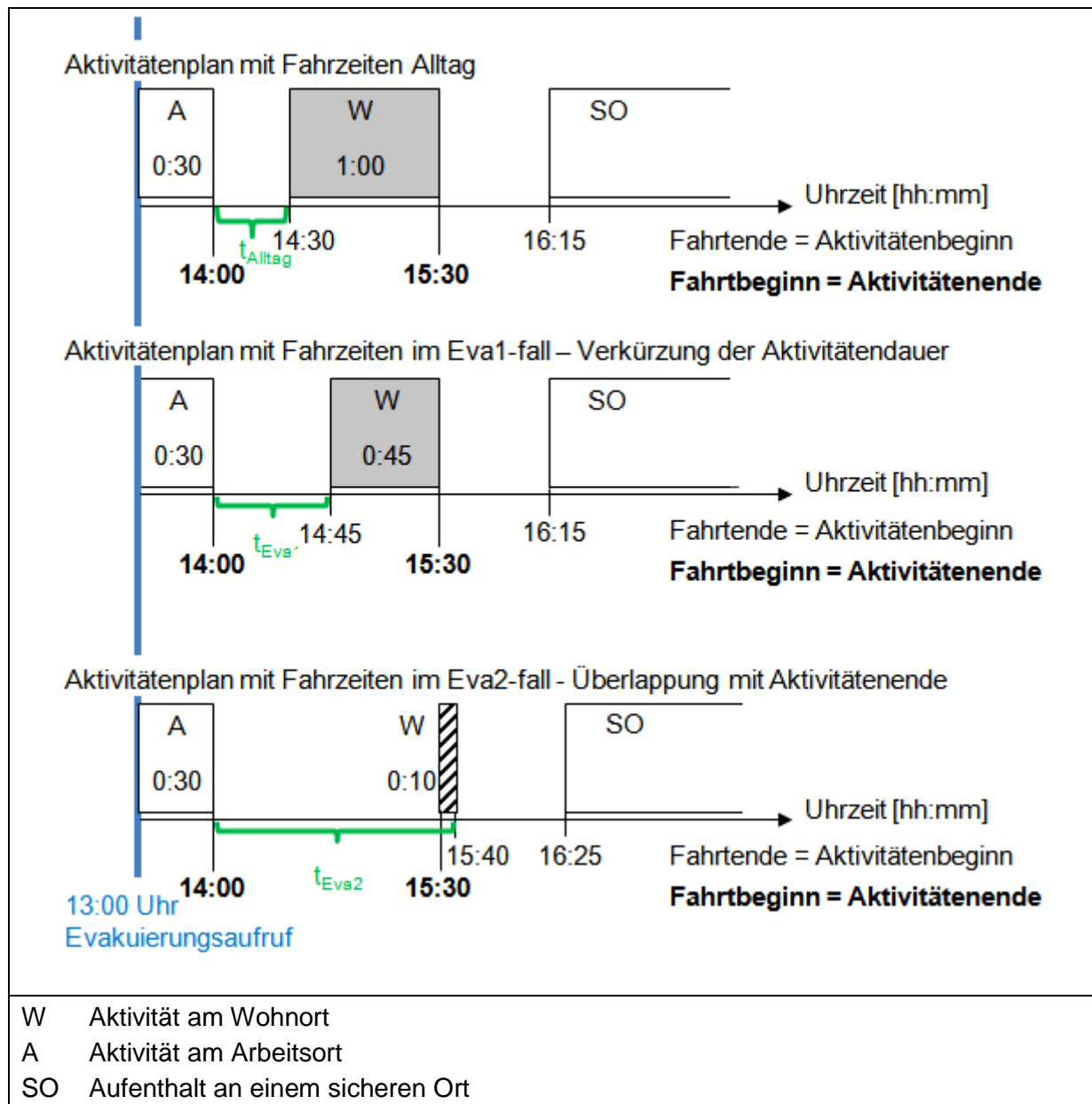


Abb. 4.7: Aktivitätendauerverschiebungen bei Fahrzeitverlängerungen

4.3.2 Modellierung für nicht evakuierende Personen

Bei nicht evakuierenden Personen kann zwischen zwei Gruppen unterscheiden werden:

1. Personen, die im Evakuierungsgebiet leben und den Evakuierungsaufruf nicht befolgen (Verweigerer).
2. Personen, die außerhalb des Evakuierungsgebietes leben.

In den ersten Schritten des Algorithmus werden die Agenten bestimmt, die die Evakuierungsaufforderung verweigern (Beschreibung siehe Kapitel 4.3.1.1). Ihnen werden keine Aktivitäten zugeordnet, wenn sie sich zum Zeitpunkt des

Evakuierungsaufwurfes zu Hause aufhalten. Anderenfalls werden sie nach dem Evakuierungsaufwurf nach einer vorgegebenen Entscheidungsdauer zum Wohnort zurückfahren. Ist der Agent zum Zeitpunkt des Evakuierungsaufwurfes unterwegs, beginnt die Entscheidungsphase erst zu Beginn der neuen Aktivität. Weitere Aktivitäten werden ihnen nicht zugeordnet, da anzunehmen ist, dass die Agenten mit der Vorbereitung auf die Überflutung beschäftigt sind.

Für Agenten, die nicht evakuieren, weil sie nicht im Evakuierungsgebiet wohnen, sind die Abweichungen vom ursprünglich geplanten Aktivitätenablauf weniger stark, als bei Evakuierenden. Dennoch sind auch sie von den Ereignissen beeinflusst. Es wird angenommen, dass Eltern ihre Kinder abholen, wenn diese im Evakuierungsgebiet in Kindergarten oder Schule gehen (siehe Kapitel 3.3, Punkt 2). Außerdem ist bekannt, dass Betroffene von außerhalb des Überflutungsgebiets lebenden Bekannten oder Verwandten abgeholt werden (siehe Kapitel 3.3, Punkte 16 und 1). Quantitative Untersuchungen zum Verhalten dieser Personen liegen nicht vor. Folgende Verhaltensregeln werden für die Modellierung angewendet:

1. Für Agenten, die vor dem Evakuierungsaufwurf **eine ungerade Anzahl der** Aktivität Bringen/Holen im Evakuierungsgebiet hatten, ist anzunehmen, dass sie das Kind zur Kindereinrichtung gebracht haben, jedoch noch nicht abgeholt haben. Diese Agenten holen kurze Zeit nach dem Evakuierungsaufwurf ihre Kinder wieder ab. Die Entscheidungsdauer bis zum Aufbruch wird auf 5% der Vorwarnzeit abgeschätzt. Befindet sich der Agent zum Zeitpunkt des Evakuierungsaufwurfes noch auf einer Fahrt, beginnt die Entscheidungsdauer erst zum Ende der Fahrt bzw. zum Beginn der neuen Aktivität. Sämtliche Alltagsaktivitäten während der Entscheidungsphase werden noch wie geplant durchgeführt. Zum Ende der Entscheidungsphase wird die aktuelle Aktivität für die Fahrt zur Kindereinrichtung unterbrochen. Dies ist beispielhaft in Abb. 4.8 dargestellt. Ist der Agent zu dieser Zeit laut Alltagsplan ohnehin unterwegs, wird der Startzeitpunkt dieser Fahrt beibehalten. Das neue Ziel ist die Kindereinrichtung. Die in der Zeit des Abholens ursprünglich geplanten Aktivitäten werden gestrichen oder wie im Beispiel in Abb. 4.8 verkürzt. Im Anschluss setzen die Agenten ihre Alltagsaktivitätenkette wie geplant fort. Ist für die Zeit zwischen Evakuierungsaufwurf und Aufbruch die an diesem Tag zweite Fahrt zum Kindergarten (zum Abholen) ohnehin geplant, wird diese durchgeführt und es gibt keine weiteren Änderungen im Aktivitätenplan. Ist in der Zeit nach dem Evakuierungsaufwurf die an diesem Tag erste Fahrt zum Kindergarten geplant (Bringen), wird diese nicht ausgeführt. Die weiteren Aktivitäten werden beibehalten.
2. Personen holen Angehörige aus dem Evakuierungsgebiet. In diesem Fall wird die Aktivitätenkette eines Anteils der Agenten außerhalb des Evakuierungsgebietes um eine Aktivität „Sonstiges“ im Evakuierungsgebiet ergänzt. Die während dieser Zusatzaktivität ursprünglich geplanten Aktivitäten werden gestrichen oder

verkürzt (siehe Beispiel Abb. 4.8). Die Entscheidungsdauer bis zum Aufbruch der abholenden Personen wird auf 30% der Vorwarnzeit abgeschätzt. In dieser relativ langen Zeit werden Absprachen zwischen den Evakuierenden und Abholenden getroffen. Außerdem benötigt der Evakuierende Zeit für die Vorbereitung zur Evakuierung. Für die Dauer der Zusatzaktivität „Sonstiges“ gelten die gleichen Mindest- und Höchstgrenzen, wie bei Evakuierenden. Die Aktivitätendauer wird auf 15%-20% der Vorwarnzeit abgeschätzt. Die Zielwahl wird auf die gleiche Weise berechnet, wie bei Evakuierenden der gleichen Personengruppe. Im Anschluss an die Zusatzaktivität Sonstiges setzen die Agenten ihre Alltagsaktivitätenkette mit der zu dieser Zeit aktuellen Aktivität fort.

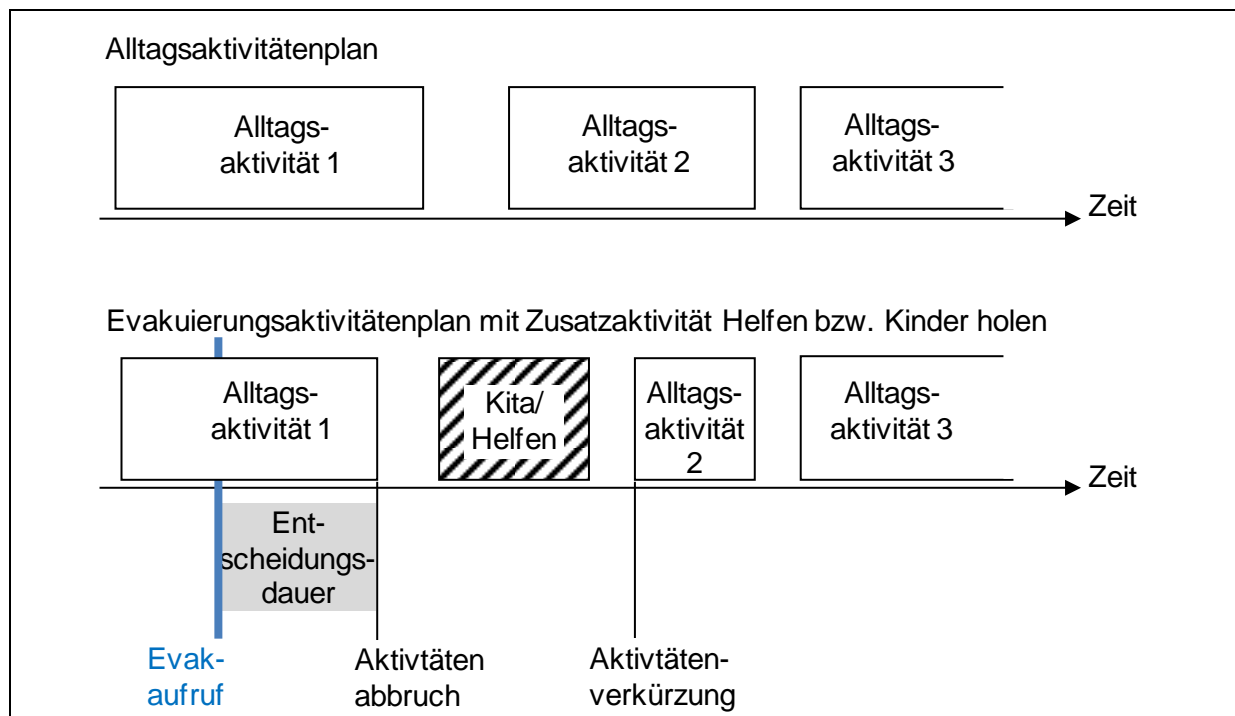


Abb. 4.8: Beispiel für die Modifizierung des Aktivitätsplans bei einer Zusatzaktivität im Evakuierungsfall

3. Agenten, die zum Evakuierungszeitpunkt einer anderen Aktivität außer Wohnen im Evakuierungsgebiet nachgehen, sind ebenfalls von der Evakuierung betroffen. Endet die Aktivität innerhalb eines Toleranzzeitraums von 25% der Vorwarnzeit, ändert sich der Aktivitätsplan nicht. Ist das Aktivitätende erst zu einem späteren Zeitpunkt geplant, brechen die Agenten die Aktivität ab und beginnen die folgende Aktivität früher. Findet diese ebenfalls im Evakuierungsgebiet statt, kommen Verhaltensregeln vier und fünf zur Anwendung.
4. Agenten, die eine Pflichtaktivität für die Zeit nach dem Evakuierungsaufwurf im Evakuierungsgebiet planen, lassen diese ausfallen und begeben sich stattdessen in ihre Wohnung. Dort halten sie sich für die Dauer der geplanten Aktivität im Evakuierungsgebiet auf. Da Pflichtaktivitäten meist an einem festen Ort stattfinden, ist eine räumliche Verlagerung der Aktivität an einen anderen Ort

außerhalb des Evakuierungsgebietes nicht im Modell vorgesehen. Die anschließenden Aktivitäten werden wie geplant durchgeführt, solange sie nicht im Evakuierungsgebiet stattfinden.

5. Agenten, die eine Wahlaktivität nach dem Evakuierungsaufwurf im Evakuierungsgebiet planen, verlagern diese Aktivität an einen anderen Ort außerhalb des Evakuierungsgebietes. Da die Zielwahl der Wahlaktivitäten zwischen zwei Pflichtaktivitäten voneinander abhängig ist, wird eine neue Zielwahl nicht nur für die verlagerte sondern auch für alle danach folgenden Wahlaktivitäten bis zur nächsten Pflichtaktivität durchgeführt.

Aus der Alltagsaktivitätenkette ergibt sich, bei welchen Agenten die Verhaltensregeln angewendet und die Aktivitätenketten der Evakuierungssituation angepasst werden. Für Verhaltensregel zwei kann vom Benutzer ein Anteil Agenten angegeben werden, die das in dieser Regel beschriebene Verhalten zeigen und zum Helfen in das Evakuierungsgebiet fahren. Eine Übersicht über weitere Eingangsparameter zur Darstellung der Verhaltensregeln im Modell enthält Kapitel I.2.

Für die formulierten Regeln gelten folgende Abhängigkeiten:

- Die Regel 1 und 2 treffen nicht gleichzeitig auf einen Agenten zu:
Ein Agent holt im Modell nicht Kinder und Angehörige aus dem Überflutungsgebiet.
- Regel 3 wird nicht berücksichtigt, wenn Regel 1 oder 2 zutrifft:
Für Agenten, die Kinder oder Angehörige aus dem Überflutungsgebiet holen, ist das Verlassen des aktuellen Aufenthaltsortes ohnehin mit den Regeln 1 bzw. 2 sicher gestellt.
- Für alle Agenten, einschl. derer mit Regel 1 – 3, müssen die Regeln 4 und 5 überprüft werden.
Auch wenn Agenten zum Abholen in das Überflutungsgebiet fahren, dürfen sie danach keine Ziele aufsuchen, die im Überflutungsgebiet liegen.
- Regel 4 muss vor Regel 5 geprüft werden:
Falls eine Pflichtaktivität aufgrund der Überflutung ausfällt und die Zeit stattdessen in der Wohnung verbracht wird (Regel 4), werden für die vorherigen Wahlaktivitäten neue Ziele ausgewählt. Diese Ziele dürfen nicht im Evakuierungsgebiet liegen. In diesem Fall würde die Zielwahl der Wahlaktivitäten bereits in Regel 4 korrigiert. Regel 5 muss nicht zur Anwendung kommen.

4.4 Modellierung weiterer Verkehrsnachfragegruppen

Neben dem Verkehrsaufkommen, das durch die Einwohner Bad Reichenhalls erzeugt wird, wird die Verkehrsnachfrage weiterer in Abb. 4.9 dargestellter Verkehrsteilnehmer in der Modellierung berücksichtigt. Anders als bei den

Nachfrageberechnungen für die Einwohner von Bad Reichenhall, wird diese Verkehrsnachfrage jedoch nicht als aktivitätenkettenbasierte Agentensimulation sondern als wegebasierte, makroskopische Modellierung berechnet. Im Ergebnis sind zwar die Wege mit den Start- und Zielpunkten bekannt. Allerdings können diese Wege nicht den Agenten im Modell zugeordnet werden. Auch der Aufenthaltsort der Agenten zu einer bestimmten Zeit ist nicht bekannt. Daher müssen für den Evakuierungsfall folgende vereinfachte Annahmen getroffen werden:

Außen-/Durchgangsverkehr

Bei Durchgangsverkehr handelt es sich um überregionale Fahrten, die nicht von Bewohnern Bad Reichenhalls unternommen werden und weder in der Stadt beginnen noch enden (siehe Abb. 4.9). Dieses Verkehrsaufkommen wird aus dem Validate-Modell für Pkw- und Lkw-Verkehr in Form von Verkehrsnachfragematrizen sowohl für einen gesamten Tag (24h) als auch für stundenfeine Zeitabschnitte übernommen. Der Teil des Außenverkehrs, dessen Fahrtroute durch das Stadtgebiet Bad Reichenhalls führt, wird als Durchgangsverkehr bezeichnet. Die Fahrten werden durch die Sperrungen aufgrund der Überflutung und durch das erhöhte Verkehrsaufkommen aufgrund der Evakuierung beeinträchtigt. Eine Änderung der Routen kann die Folge sein.

Touristen

Die Verkehrsnachfrage der in Bad Reichenhall wohnenden Touristen wird makroskopisch mit einem einfachen wegebasierten Vier-Stufen-Modell berechnet. Als relevante Potentiale werden zum einen die Hotelbelegungen und zum anderen die Freizeitmöglichkeiten angenommen. Für die Berechnung der Verkehrsnachfrage werden nur die Pkw-Fahrten betrachtet. Für die Nachfragemodellierung wird angenommen, dass durchschnittlich zwei Pkw-Fahrten je Tourist und Tag unternommen werden. Die Zielwahl wird mit einem LOGIT-Modell berechnet.

Alle während der Evakuierung von Touristen ursprünglich geplanten Fahrten von außen nach Bad Reichenhall werden im Modell an einen sicheren Ort umgeleitet. Außerdem werden alle eine Stunde nach Beginn der Überflutung geplanten Fahrten auf die erste Stunde nach dem Evakuierungsaufwurf verschoben. Befindet sich das Ziel dieser Fahrten im Überflutungsgebiet, wird die Fahrt an einen sicheren Ort umgeleitet. Auf diese Weise wird eine verstärkte Fluchtbewegung aus der Stadt heraus simuliert. Bei allen später geplanten Fahrten aus der Stadt heraus kann aufgrund der makroskopischen, wegebasierten Modellierung nicht nachvollzogen werden, ob sie noch stattfinden. Sie können einerseits von Agenten unternommen werden, die sich bis zum Zeitpunkt des Evakuierungsaufwurfes in der Stadt aufgehalten haben und im Rahmen der Evakuierung den Weg zum sicheren Ort antreten. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass sich Agenten, die laut Alltagsplan die jeweilige Fahrt unternehmen wollen, im Evakuierungsfall nicht in Bad

Reichenhall aufhalten, da ihre Einfahrt in die Stadt aufgrund der oben beschriebenen Vorgehensweise an einen sicheren Ort umgelenkt wurde. Eine realitätsnahe Abbildung im Modell ist aufgrund der fehlenden Informationen nicht möglich. Daher wird eine einfache Lösung gewählt. Die Fahrten werden gelöscht.

Pendler

Die Vorgehensweise bei der Modellierung des Pendlerverkehrs ist analog dem Ablauf bei der Simulation der Touristenfahrten. Pendlerfahrten werden von Personen unternommen, die außerhalb von Bad Reichenhall wohnen und in der Stadt arbeiten (siehe Abb. 4.9). Die Anzahl dieser Personen sowie die räumliche Aufteilung auf das Umland von Bad Reichenhall werden der Pendlerstatistik der Bundesagentur für Arbeit entnommen. Jeder Pendler unternimmt an einem Werktag zwei Arbeitswege, den Hin- und Rückweg. Die Auswahl eines Arbeitsplatzes in Bad Reichenhall wird über ein LOGIT-Modell simuliert. Analog zu der Modellierung des Touristenverkehrsaufkommens wird von einem festen Modal Split-Anteil ausgegangen.

Auch Agenten, die nicht zum Arbeiten sondern für andere Aktivitäten wie beispielsweise Freizeitunternehmungen nach Bad Reichenhall kommen, werden in der Gruppe Pendler erfasst. Dadurch wird der Rest des in Bad Reichenhall beginnenden und endenden überregionalen Verkehrs modelliert, der nicht durch Berufspendler und Touristen abgedeckt wird. Kalibriert wird dieser Teil des Verkehrsaufkommens anhand der Eingangsdaten aus dem ursprünglichen Modell, in dem der gesamte überregionale Verkehr enthalten war.

Für beide Pendlergruppen gelten im Evakuierungsfall ähnliche Regeln, wie für Touristen. Alle während der Evakuierung geplanten Einfahrten nach Bad Reichenhall werden an einen sicheren Ort umgeleitet. Die bis eine Stunde nach Überflutungsbeginn geplanten Ausfahrten aus der Stadt werden auf die erste Stunde nach dem Evakuierungsaufruf verschoben. Die Pendler begeben sich zeitiger zu ihrer Wohnung außerhalb von Bad Reichenhall, als ursprünglich geplant. Alle Fahrten, die später als eine Stunde nach Überflutungsbeginn geplant sind, werden gelöscht. Wie bei den Touristen kann aufgrund der makroskopischen Modellierung nicht nachvollzogen werden, ob die Agenten, die die geplanten Ausfahrten unternehmen wollen, überhaupt in das Evakuierungsgebiet einfahren konnten oder bereits zu einem sicheren Ort umgeleitet wurden.

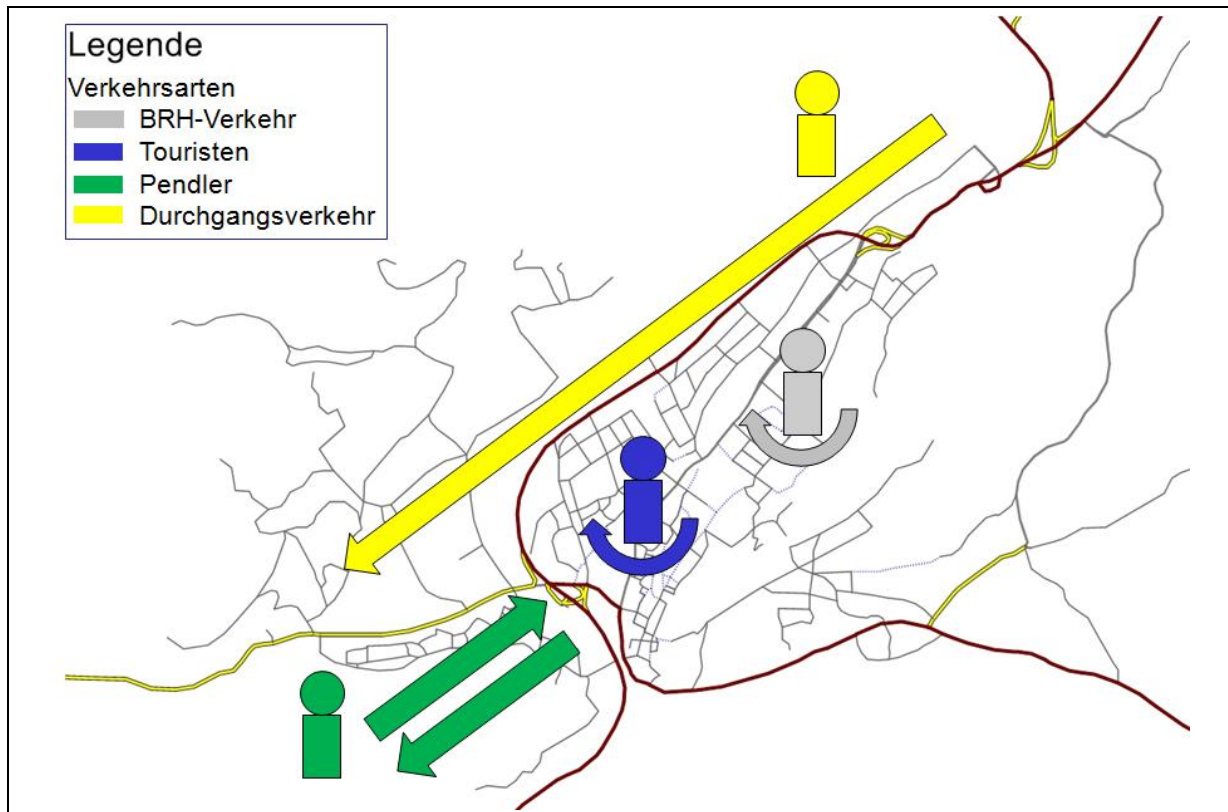


Abb. 4.9: Modellerte Verkehrsnachfragegruppen im Verkehrsmodell Bad Reichenhall

4.5 Modellaufbau Routenwahlmodell

Nach der Berechnung der im Evakuierungsfall durchgeführten Fahrten wird für jede Fahrt im Netzmodell eine Route ermittelt. Grundsätzlich bieten sich für die Modellierung einer unsicheren, nicht alltäglichen Situation stochastische Umlegungsverfahren an. Bei diesen Verfahren wird simuliert, dass Agenten aufgrund fehlender Informationen Fahrzeiten und Widerstände im Netz falsch einschätzen. Für die Modellierung der Evakuierung ist aufgrund der Besonderheit der Situation von relativ starken Fehleinschätzungen der Agenten bezüglich der Verkehrslage auszugehen.

Darüber hinaus ist ein zeitlich dynamisches Verfahren zu wählen, das die Nachfrage zeitlich gestaffelt auf das Verkehrsnetz umlegt. Dadurch können Belastungsschwankungen und Verkehrsspitzen während der Evakuierung modelliert werden. Die Modellierung des Evakuierungsverkehrsablaufs erfolgt in 15-Minuten-Schritten.

Die genannten Anforderungen stochastischer Widerstandsschätzung und zeitlich dynamischer Umlegung werden in dem dynamisch-stochastischen Umlegungsverfahren zusammengeführt. Im Folgenden werden die für dieses Umlegungs-

verfahren notwendigen Parametereinstellungen vorgestellt, mit denen eine Evakuierungssituation realistisch abgebildet wird.

Routensuche

Die Routensuche wird für zwei Zeitpunkte durchgeführt. Zum einem wird ein Choice Set mit Routenalternativen für einen Zeitpunkt vor Beginn der Evakuierung gebildet. Hier steht das gesamte Straßennetz zur Verfügung. Ein weiteres Choice Set wird für den Zeitpunkt des höchsten Hochwasserstandes, ca. zwei Stunden nach Beginn der Überflutung gebildet. Hier werden die Streckensperrungen aufgrund von Überflutungen und anderen Störungen bei der Routensuche berücksichtigt.

In beide Choice Sets werden alle Routenalternativen aufgenommen,

1. deren Widerstand weniger als 25% über dem der widerstandskleinsten Route auf dieser Relation liegt
und
2. deren Reisezeit im unbelasteten Netz weniger als das 1,25-fache der Reisezeit auf der kürzesten Route beträgt.

Mit diesen Einstellungen gehören auch relativ unattraktive Routen zum Choice Set, da im Evakuierungsfall die Bereitschaft zum Befahren einer umwegigen, jedoch gegenüber Überlastungen, Überflutungen oder Sperrungen weniger anfälligen Route als recht hoch einzuschätzen ist.

Die für die Auswahl der Routen benötigten Routenwiderstände setzen sich aus den Einzelwiderständen der zur Route gehörenden Netzelemente zusammen. Diese Einzelwiderstände bestehen aus einem deterministischen Teil und einem stochastischen Störterm, durch den der Gesamtwiderstand variiert wird. Die Abweichung der Schätzwerte vom tatsächlichen Widerstand entspricht dabei einer Normalverteilung. Auf diese Weise werden die Fehleinschätzungen der Verkehrsteilnehmer abgebildet. Die Anzahl gefundener Routen erhöht sich. Die Streuung der Normalverteilung wird für den Fall der Evakuierung relativ hoch gewählt. Damit wird abgebildet, dass sich Verkehrsteilnehmer aufgrund der ihnen unbekanntem Evakuierungssituation stärker hinsichtlich des zu erwartenden Widerstandes auf einer Route verschätzen werden als im Alltag.

Bestandteile und Gewichtung des deterministischen Teils sind vom Verkehrssystem abhängig. Für den Evakuierungsverkehr setzt sich der geschätzte Widerstand W^* einer Route r auf der Relation ij wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} \text{Routenwiderstand } W_{ijr}^* = & \\ & \sum_S \text{Streckenwiderstand } SW_S \quad \text{aller Strecken } S \text{ der Route } r \\ & + \sum_C \text{Anbindungswiderstand } AnW_C \quad \text{aller Anbindungen } C \text{ der Route } r \end{aligned}$$

+ \sum_T Abbiegewiderstand AbW_t aller Abbieger T der Route r

mit

$SW_s = t_{akt,s} + I_s + \text{Störterm}$

- $t_{akt,s}$ belastungsabhängige Reisezeit auf der Strecke s [s]
- I_s Länge der Strecke s [m]

und $AnW_c = t_{akt,c} + 1.000 \cdot \text{HelinetzAn} + \text{Störterm}$

- $t_{akt,c}$ aktuelle Reisezeit auf Anbindung C
- HelinetzAn Faktor zur Erhöhung des Widerstandes für Benutzung des in Kapitel 4.6.2 beschriebenen Helikopternetzes über Anbindung c

und $AbW_t = t_{akt,t} + \text{Störterm}$

- $t_{akt,t}$ aktuelle Reisezeit auf Abbiegebeziehung t

Routenwahlmodell

Bei der Routenwahl werden für jede in der Verkehrsnachfragematrix aufgeführte Ortsveränderung alle möglichen Verbindungen miteinander verglichen. Dafür werden jeder Ortsveränderung eine mögliche Abfahrtszeit und eine der für die betrachtete Relation gefundenen Routen zugeordnet. Für alle auf diese Weise erstellten Verbindungen wird der Widerstand berechnet, der sich aus drei gewichteten Bestandteilen zusammensetzt:

- geschätzter Widerstand W^* der Netzobjekte der Route
- ΔT früh Differenz zwischen Wunschabfahrtszeit und tatsächlicher, verfrühter Abfahrtszeit
- ΔT spät Differenz zwischen Wunschabfahrtszeit und tatsächlicher, verspäteter Abfahrtszeit

Für die Abweichung der Abfahrtszeit von der Wunschabfahrtszeit kann eine Zeitspanne als Obergrenze definiert werden, die nicht überschritten werden darf. Im Evakuierungsfall sollten die berechneten Abfahrtszeiten aus folgenden Gründen eingehalten werden:

- Aus der Dinglichkeit der Evakuierungssituation heraus sind keine großen Zeitpuffer zu erwarten, die eine Verschiebung der Abfahrtszeiten erlauben würden.
- Die Verkehrsverhältnisse in der Sondersituation Evakuierung sind nicht bekannt, so dass Verkehrsteilnehmer die Fahrt nicht wie im Alltag auf Zeiten schwächerer Verkehrsnachfrage verschieben werden.

- Die Aufenthaltsdauern für die einzelnen Aktivitäten sind auf Basis von beobachteten Verhaltensweisen abgeschätzt und sollten daher eingehalten werden.

Aus den aufgeführten Gründen werden Abweichungen von der Wunschabfahrtszeit sehr stark gewichtet. Die Widerstandfunktion für Verbindungen VW sieht dann wie folgt aus:

$$VW=1 \cdot W^* + 60 \cdot \text{deltaT}(\text{früh}) + 60 \cdot \text{deltaT}(\text{spät})$$

Als höchste erlaubte Abweichung von der Wunschabfahrtszeit wird eine Dauer von 0s festgelegt.

Auf Basis der berechneten Widerstände für die Verbindungsalternativen und unter Berücksichtigung der Eigenständigkeit der Route wird die Verkehrsnachfrage auf die Verbindungen einer Relation aufgeteilt. Dies erfolgt mit einem Aufteilungsmodell. Für die Evakuierungsmodellierung wird das Kirchhoff-Modell verwendet.

Bei der Wahl des beta-Faktors im Kirchhoff-Modell wird davon ausgegangen, dass speziell von den direkt vom Hochwasser betroffenen Personen, wie Einwohnern und Touristen ein relativ hoher Umweg akzeptiert wird. Auch von den übrigen Verkehrsteilnehmern müssen Umwege aufgrund von Streckensperrungen hingenommen werden. Um diese höhere Akzeptanz gegenüber Umwegen abzubilden, wird der Faktor beta bei der Routenwahl im Kirchhoff-Modell relativ niedrig gewählt (Tabelle 10). Dabei ist er bei den direkt von der Evakuierung betroffenen Personengruppen wie Einwohnern und Touristen etwas niedriger als bei den indirekt betroffenen Personengruppen Pendler und Durchgangsverkehr.

Im Ergebnis der Aufteilung auf die Verbindungen werden die Verkehrsbelastungen sowie die Auslastungen und die sich daraus ergebenden Reisezeiten für jedes Netzelement berechnet. Für die sich aus diesen neuen Reisezeiten ergebenden Widerstandswerte der Netzelemente wird im nächsten Iterationsschritt erneut eine Routenwahl durchgeführt. Diese Rückkopplungen werden wiederholt bis

1. die Anzahl definierter innerer Iterationen erreicht ist
oder
2. ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist.

Dabei werden die im aktuellen Iterationsschritt berechneten Verkehrsbelastungen auf den einzelnen Verbindungen und Netzelementen mit den mittleren Verkehrsbelastungen der vorherigen Iterationen verglichen. Das Abbruchkriterium ist erfüllt, wenn die Abweichungen unterhalb eines definierten Grenzwertes liegen. Wird das Abbruchkriterium für die innere Iteration erfüllt, beginnt ein neuer Iterationsschritt der äußeren Iterationsschleife. Tabelle 10 gibt einen Überblick über bei EvaSim verwendete Parametereinstellungen für die Umlegung.

Tabelle 10: Übersicht über verwendete Parameter bei der Umlegung des Evakuierungsverkehrs

Kalibrierungsgröße	Wert
maximale Anzahl äußere Iterationen	2
maximale Anzahl innere Iterationen	6
Anzahl Routensuche	6
Kirchhoff-Modell – beta-Parameter direkt Betroffene	2
Kirchhoff-Modell – beta-Parameter indirekt Betroffene	3

4.6 Modellierung evakuierungsspezifischer Besonderheiten

4.6.1 Optimierung der Routensuche

Die Zielwahl erfolgt anhand von Strukturgrößen, die als Potential für eine bestimmte Aktivität dienen. Von der Höhe dieses Potentials ist abhängig, wie viele Fahrten in einer Zelle enden. Für Zellen an denen sich sichere Orte befinden, würde bei dieser Vorgehensweise ein Evakuierungspotential definiert werden, beispielsweise die Kapazität von Notunterkünften. Bei der Zielwahl würden die Agenten die Zelle mit dem höchsten Evakuierungspotential bevorzugen.

Während einer Evakuierung ist es jedoch weniger von Bedeutung, an welchen sicheren Ort sich die Evakuierenden begeben. Wichtiger ist, dass sie sich schnellstmöglich in Sicherheit bringen, indem sie den nächstgelegenen sicheren Ort aufsuchen. Um dies abzubilden, werden die Standorte Sicherer Orte nicht wie üblich als Verkehrszellen sondern als Verkehrsanbindungen einer Zelle abgebildet. Jede Anbindung verbindet die Stelle im Straßennetz, an der sich ein sicherer Ort befindet, mit einer Verkehrszelle „Sicherer Ort“. Alle während der Evakuierung unternommenen Fahrten zu einem sicheren Ort enden in dieser Zelle. Für den Weg zu dieser Zelle wird die widerstandsärmste Route während der Umlegung ermittelt. Von der gewählten Route hängt damit die gewählte Anbindung zum sicheren Ort ab. Zu welchem sicheren Ort sich ein Agent während der Evakuierung daher bewegt, hängt von der aktuellen Netzsituation ab und wird im Rahmen der Umlegung optimiert. Damit kann eine Routenwahl abgebildet werden, bei der der schnellste Weg zum sicheren Ort gewählt wird, unabhängig davon, wo sich der sichere Ort befindet.

4.6.2 Helikopternetz

Im Laufe der Umlegung werden überflutete Straßen für den Verkehr gesperrt. Dadurch können mit fortschreitender Überflutung vor allem in tiefer gelegenen Gebieten alle Routen zu einem sicheren Ort unbefahrbar werden. Wird für eine mit

einer Nachfrage belegte Relation im Modell keine Route gefunden, wird die Modellberechnung jedoch abgebrochen. Um dies zu vermeiden wird das Netzmodell um ein separates Streckennetz ergänzt, das alle Verkehrszellen miteinander und mit dem sicheren Ort verbindet. Die Strecken dieses Hilfsnetzes sind mit einem sehr hohen Widerstand belegt, so dass sie nur genutzt werden, wenn es keine andere Alternative im Straßennetz gibt. Vergleichbar ist die Benutzung des Hilfsnetzes mit einem Helikopterflug, durch den die Evakuierenden aus einem überfluteten Gebiet evakuiert werden, wenn kein landseitiger Zugang mehr möglich ist. Jedoch werden in der Realität Helikopterflüge nur durchgeführt, wenn die Überflutung für einen sehr langen Zeitraum anhält oder Personen aus persönlichen Gründen für die Zeit der Überflutung nicht in den oberen Stockwerken von Gebäuden im Überflutungsgebiet verbleiben können. Nicht jede Fahrt auf dem Helikopternetz im Modell entspricht daher einem Helikoptereinsatz in der Realität.

Ziel bei der Erstellung des Hilfsnetzes ist es, alle Verkehrszellen miteinander zu verbinden. Dabei ist die Anzahl Hilfsstrecken klein zu halten, damit sich die Rechenzeit durch das vergrößerte Netz nur wenig erhöht. Eine Methode mit der beide Anforderungen erfüllt werden, ist die in der Geodäsie angewendete Triangulation. Dabei werden im Verkehrsmodell die Schwerpunkte benachbarter Verkehrszellen über ein Dreiecksnetz miteinander verbunden. Abb. 4.10 zeigt das Helikopternetz.

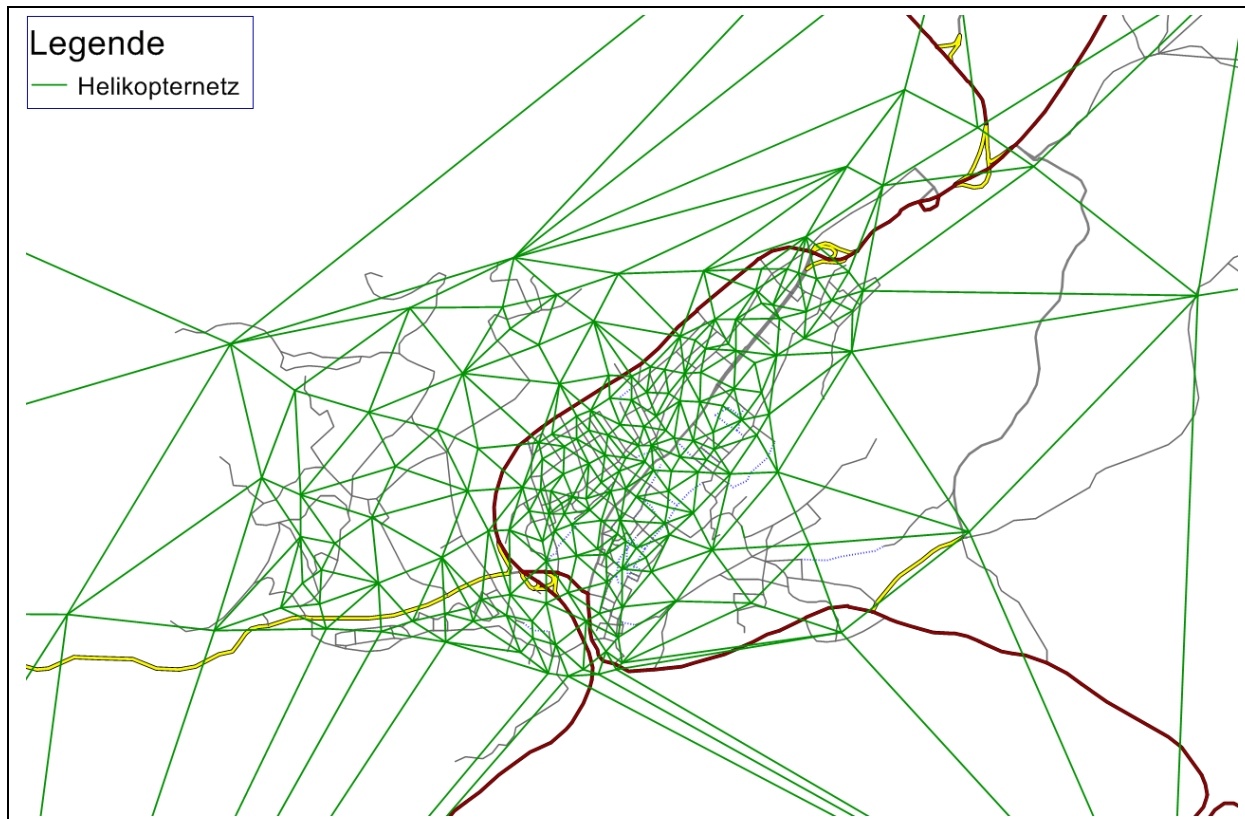


Abb. 4.10: Hilfsstrecken des "Helikopternetz" zur Abbildung von Ortsveränderungen bei starken Überflutungen und großräumigen Streckensperrungen

4.6.3 Sperrungen

Für die Darstellung der Straßensperrungen aufgrund von Überflutungen, Verkehrsunfällen oder im Rahmen von Verkehrssteuerungsmaßnahmen gibt es in VISUM drei Möglichkeiten, die im Folgenden näher vorgestellt werden:

- Sperrung der Straße für entsprechendes Verkehrssystem
- Reduktion der Streckenkapazität
- Widerstandszuschlag für Sperrstrecken

Bei einer Sperrung der Straße für das entsprechende Verkehrssystem ist die Straße ab dem Zeitintervall, in dem die Sperrung beginnt, für das jeweilige Verkehrssystem im Modell nicht mehr freigegeben. Vorteil dieser Methode ist, dass man so gezielt für bestimmte Gruppen von Verkehrsteilnehmern die Sperrung vornehmen kann. Außerdem ist sichergestellt, dass nach Beginn der Sperrung kein Verkehrsteilnehmer die Straße befährt. Nachteilig ist hingegen, dass bestimmte Fahrten der Matrix zu bestimmten Zeitschritten nicht umgelegt werden können, wenn im Netz keine freigegebene Route gefunden werden kann. Dies führt zu einem Abbruch der Umlegung in VISUM und wird im vorliegenden Projekt durch das Helikopternetz verhindert.

Bei einer Verringerung der Kapazität wird die Kapazität der Straße auf einen niedrigen Wert gesetzt. Dadurch ist die Straße bereits durch wenige Fahrzeuge überlastet, wodurch die Fahrzeit stark ansteigt und die Benutzung der Straße unattraktiv wird. Die Kapazitätsbegrenzung wirkt für alle Verkehrssysteme gleich stark.

Bei der dritten Methode werden im aktuellen Zeitschritt überflutete Strecken in einem benutzerdefinierten Attribut mit dem Wert 1 belegt. Für alle anderen Strecken beträgt der Attributswert 0. Die Widerstandsfunktion wird so angepasst, dass dieses Attribut mit einem sehr hohen Wert multipliziert und zum Widerstand der Strecke hinzuaddiert wird. Durch den hohen Widerstand werden die über die Strecke verlaufenden Routen unattraktiv. Alternativrouten werden bevorzugt.

Vorteil der beiden letztgenannten Methoden ist, dass die Strecken nicht vollständig gesperrt sind und für jede Relation eine Route gefunden werden kann. Falls nicht anders möglich, werden dabei auch gesperrte Strecken benutzt. Das Berechnungsverfahren in VISUM wird nicht vorzeitig abgebrochen.

Bei allen Methoden sind zeitdynamische Änderungen der Sperrungen möglich. Dadurch lassen sich vorübergehende Sperrungen im Modell abbilden. Mit Methode eins und drei können Sperrungen gezielt für bestimmte Verkehrssysteme umgesetzt werden. Dies ist für die Evakuierungsmodellierung von Bedeutung, da bestimmte Straßen für den Zivilverkehr gesperrt, jedoch vom Einsatzverkehr noch befahren werden können.

Damit erfüllen Methode eins und drei alle Bedingungen an die Modellierung von Straßensperrungen im Evakuierungsfall. Für die Berechnungen in EvaSim wird Methode eins gewählt. Die Vorgehensweise wird anhand der Änderung des Befahrbarkeitsstatus in Abb. 4.11 beispielhaft veranschaulicht. Für jede Strecke wird eine Zeitspanne angegeben, in der sie für eine veränderte, von der Normalsituation abweichende Kombination von Verkehrssystemen freigegeben wird. Die Zeitspanne beginnt und endet jeweils mit der Änderung des Befahrbarkeitsstatus. Ändert sich der Befahrbarkeitsstatus bis zum Ende der Simulation nicht, endet die Zeitspanne mit dem Ende der Simulation. Während der Modellierung ist die Straße nur für die zu dieser Zeit gültige Verkehrssystemkombination freigegeben.

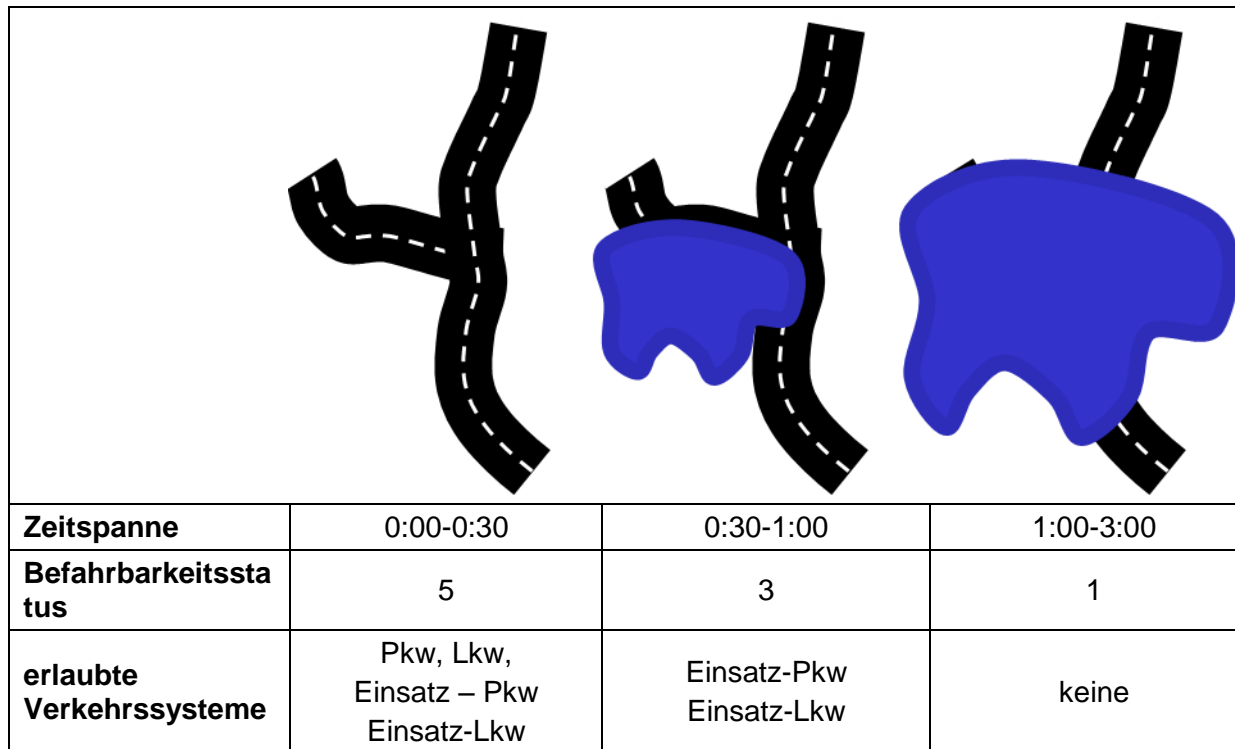


Abb. 4.11: Beispiel für die zeitdynamische Sperrung von Strecken aufgrund von Überflutung

4.7 Kenngrößen zur Bewertung des Evakuierungsablaufs

Mit dem kalibrierten Evakuierungsmodell werden verschiedene Evakuierungsszenarien getestet, verglichen und bewertet. Auf diese Weise kann der Einfluss bestimmter Faktoren auf den Evakuierungsablauf quantifiziert werden. Evakuierungsstrategien können getestet und optimiert werden. Kenngrößen, anhand derer die getesteten Szenarien bewertet werden, sind:

- **Evakuierungsdauer:** Die Evakuierungsdauer ist die Differenz aus dem Zeitpunkt an dem die Bevölkerung zur Evakuierung aufgefordert wird und dem Zeitpunkt, an dem die Evakuierenden einen definierten, sicheren Ort erreicht haben. Ziel ist es, die Evakuierungsdauer zu minimieren, um auch bei kurzen Vorwarnzeiten alle Personen rechtzeitig evakuieren zu können.
- **Evakuierungsgeschwindigkeit:** Die Evakuierungsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der Betroffene vom Evakuierungsgebiet zu einem sicheren Ort fahren. Ist die Evakuierungsgeschwindigkeit hoch, reduziert sich die Evakuierungsdauer.
- **Engstellen im Netz:** Überlastungen aufgrund hohen Verkehrsaufkommens behindern und verzögern die Evakuierung. Je größer Anzahl und Länge von Engstellen sind, desto niedriger wird die Evakuierungsgeschwindigkeit. Die

Evakuierungsdauer steigt an. Als überlastet gilt ein Streckenabschnitt, wenn die Belastung die Kapazität auf diesem Abschnitt übersteigt.

$$A = \frac{q}{q_{max}} [\%]$$

mit q Belastung auf einer Modellstrecke [Fz/Zeiteinheit]

q_{max} Kapazität einer Modellstrecke [Fz/Zeiteinheit]

Zur Beschleunigung von Evakuierungsabläufen gilt es, die Länge überlasteter Streckenabschnitte zu minimieren.

- Anzahl Agenten, die nicht evakuiert werden können:

Hier werden Agenten erfasst, die die Evakuierung antreten möchten, denen jedoch aufgrund der Überflutung alle Wege zu einem sicheren Ort abgeschnitten sind. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Vorwarnzeit zu kurz ist und das Hochwasser vor Beendigung der Evakuierungsvorbereitungen eintritt. Ein weiterer möglicher Grund sind Verzögerungen bei der Fahrt zu einem sicheren Ort durch Engstellen im Verkehrsnetz, so dass die Evakuierung nicht rechtzeitig möglich ist. Ein dritte Personengruppe, die hier gezählt wird, sind Personen, die sich nicht aus eigener Kraft evakuieren können, und die beispielsweise aufgrund von Überlastung der Rettungskräfte nicht rechtzeitig durch Dritte aus dem Überflutungsgebiet gebracht werden. Nicht gezählt werden Evakuierungsverweigerer, die in höheren Etagen von Gebäuden Schutz finden und daher bewusst das Überflutungsgebiet nicht verlassen. Die aufgezählten Personen, die keinen sicheren Ort aufsuchen können, sind durch das Hochwasser potentiell gefährdet. Zwar handelt es sich hier nicht zwangsläufig um Opfer, die gesundheitlichen Schaden nehmen. Für diese Personen ist eine Rettung vor dem Wasser an höher gelegenen Punkten im Überflutungsgebiet oder in höheren Stockwerken von Gebäuden möglich. Jedoch müssen sich die Betroffenen in dieser Gefahrensituation selbst helfen, was das Risiko für Verletzungen oder Unfälle erhöht. Daher ist im Rahmen der Optimierung des Evakuierungsprozesses die Anzahl der Personen, die das Überflutungsgebiet nicht verlassen können, zu minimieren.

5 Maßnahmenplanung und Szenarienberechnung für das Untersuchungsgebiet Bad Reichenhall

5.1 Analyse bestehender Katastrophenschutzpläne

Für Bad Reichenhall liegen Katastrophenschutz-Sonderpläne zur Vermeidung und Bewältigung von Hochwasserereignissen vor. Danach wird je nach Pegelstand zwischen vier Meldestufen unterschieden. Je nach Meldestufen werden verschiedene verkehrliche Maßnahmen ergriffen. Ab Meldestufe 1 wird die Unterführung auf der B21 gesperrt. Ab Meldestufe zwei werden vereinzelt Rad- und Gehwege am Saalachsee und entlang der Saalach sowie Unterführungen gesperrt, die jedoch überwiegend im Verkehrsmodell nicht modelliert sind. Ab Meldestufe 3 wird das Nonner Unterland sowie mehrere Brücken über die Saalach gesperrt. Diese Sperrungen werden bei der Evakuierungsmodellierung berücksichtigt und bei entsprechendem Wasserstand im Verkehrsmodell übernommen. Abb. 5.1 zeigt die Straßensituation bei einer Meldestufe 4 für ein Testszenario in Bad Reichenhall. Eine Evakuierung ausgewählter Gebiete in Bad Reichenhall ist in keiner der vier Meldestufen vorgesehen.

Neben den Katastrophenschutz-Sonderplänen liegt eine Auflistung von öffentlichen Gebäuden vor, die bei Evakuierungen als Notunterkünfte genutzt werden. Diese Gebäude werden in das Verkehrsmodell aufgenommen und dienen bei der Modellierung als Ziele von Evakuierenden.

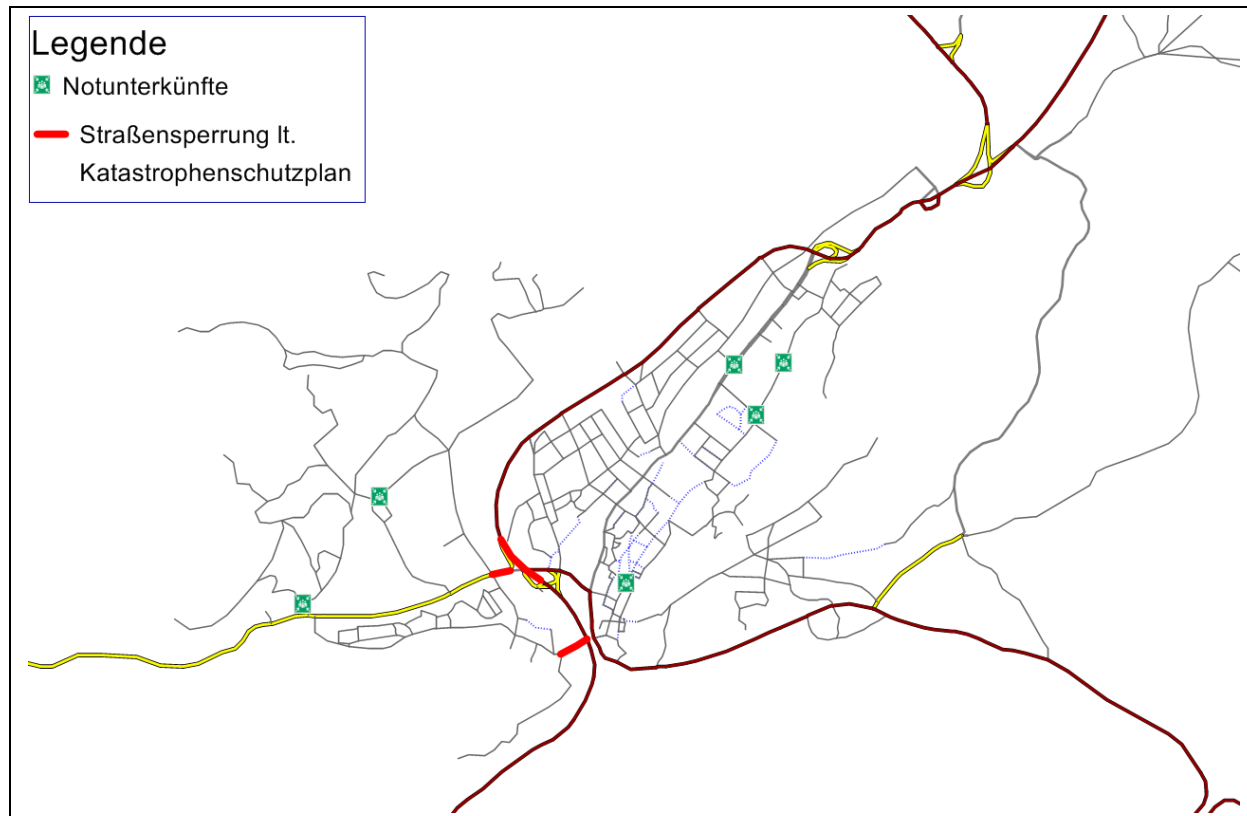


Abb. 5.1: Laut Katastrophenschutzplan gesperrte Straßen bei Meldestufe 4 sowie Evakuierungsunterkünfte

5.2 Szenarientwicklung

Das in Kapitel 4 beschriebene Evakuierungsverkehrsmodell wird für die Berechnung verschiedener verkehrlicher Szenarien angewendet. Dabei werden unterschiedliche, die Evakuierung beeinflussende Faktoren variiert. Außerdem werden Maßnahmen zur Beschleunigung der Evakuierung im Modell getestet. Im Ergebnis kann die Veränderung im Evakuierungsablauf aufgrund von variierenden Einflussfaktoren und verkehrlichen Maßnahmen quantifiziert werden. Für alle Szenarien wird von einem Extremhochwasser ($HQ=1.000\text{m}^3/\text{s}$) ausgegangen. Um im Modell das stärkste zu erwartende Verkehrsaufkommen zu erzielen, werden die Abfahrtszeiten der Evakuierenden stark gebündelt. Dies ist durch kurze Vorwarnzeiten zu erreichen. Für die in EvaSim zu berechnenden Szenarien wird daher eine Vorwarnzeit von 60 Minuten gewählt.

Im Folgenden werden die getesteten Einflussfaktoren und die daraus entwickelten Szenarien vorgestellt. Tabelle 11 enthält eine Übersicht über die Szenarien und Maßnahmen.

Tabelle 11: Übersicht über Szenarien und Maßnahmen

Maßnahme		Tageszeit		Lage sicherer Orte			Sperrungen			Verkehrs- steuerung
		vormit- tags	nachts	außerhalb	innerhalb	außerhalb + innerhalb	B21	Wittels- bacher Str.	BGL4	Umleitung
sichere Orte außerorts	ao	x	-	x	-	-	-	-	-	-
sichere Orte innerorts	io	x	-	-	x	-	-	-	-	-
sichere Orte außerorts + innerorts	ao+io	x	-	x	-	x	-	-	-	-
Sperrung B21	B21	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Sperrung Wittels- bacher Str.	WiBa	x	-	-	-	-	-	x	-	-
Sperrung BGL 4	BGL4	x	-	-	-	-	-	-	x	-
Verkehrs- steuerung	Umlei- tung	x	-	x	-	-	-	-	-	x
nachts	nachts	-	x	x	-	-	-	-	-	-
Kombi1	Kombi1	x	-	x	-	-	-	x	-	x
Kombi2	Kombi2	x	-	x	-	-	x	-	x	-
x Merkmal in Szenario vorhanden - Merkmal in Szenario nicht vorhanden										

5.2.1 Einflussfaktoren auf den Evakuierungsablauf

Tageszeit

Je nach Tageszeit zu der die Evakuierung beginnt, variieren der Aufenthaltsort und die Aktivität der Einwohner im betroffenen Gebiet. Dies wirkt sich auf den Ablauf und die Dauer einer Evakuierung aus. Außerdem ist das Verkehrsaufkommen durch nicht betroffene Anwohner der Stadt sowie durch Durchgangsverkehr zu unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedlich hoch. Zwei Szenarien werden getestet:

1. Evakuierungsaufruf um 2 Uhr, Überflutungsbeginn um 3 Uhr nachts

Die meisten Menschen befinden sich zu dieser Zeit zu Hause. Daher ist eine gesonderte Fahrt zur Wohnung zum Packen der persönlichen Gegenstände nach dem Evakuierungsaufruf nicht notwendig. Das Verkehrsaufkommen nachts ist niedrig.

2. Evakuierungsaufruf um 10 Uhr, Überflutungsbeginn um 11 Uhr vormittags

Zu dieser Zeit halten sich sehr viele Personen außerhalb ihrer Wohnung auf und sind auf der Arbeit oder in Schule und Kindergarten. Nichterwerbstätige unternehmen vormittags häufig Erledigungen wie beispielsweise Einkäufe. Das Verkehrsaufkommen auf den Straßen ist moderat hoch.

Bei allen Szenarien, bei denen nicht die Verkehrsnachfrage sondern eine andere Einflussgröße variiert wird, erfolgt die Berechnung anhand der Verkehrsnachfrage am vormittag.

Lage von sicheren Orten

Als sichere Orte werden im Evakuierungsverkehrsmodell Orte im Verkehrsnetz bezeichnet, die das Ziel von Evakuierungsfahrten sind. Mögliche Ziele sind beispielsweise Wohnungen von Angehörigen, Hotels oder Notunterkünfte. Diese Ziele sind unterschiedlich weit vom Evakuierungsort entfernt und in der Fläche stark verstreut. Im Verkehrsmodell werden die Zielorte räumlich zu Zielpunkten zusammengefasst. Diese Zielpunkte werden als Verkehrsknoten im Netz dargestellt und mit der Verkehrszelle „Sicherer Ort“ verbunden. In einem der berechneten Szenarien liegen die Zielpunkte auf den Ausfallstraßen außerhalb der Stadt Bad Reichenhall (Abb. 5.2). Evakuierungsfahrten im Modell enden an diesen Knoten. Dadurch werden die Ziele von Evakuierungsfahrten zusammengefasst, die aus der Stadt heraus führen. Die weitere Verteilung der Personen in der Fläche ist für die Planung der Evakuierung in Bad Reichenhall und für den Evakuierungsablauf nicht mehr von Bedeutung und wird daher im Modell nicht mit abgebildet.



Abb. 5.2: Lage von sicheren Orten außerhalb von Bad Reichenhall

In einem anderen Szenario wird angenommen, dass alle Evakuierungsfahrten in Bad Reichenhall an den großen im Evakuierungsplan der Stadt ausgewiesenen Notunterkünften enden (siehe Abb. 5.3). Zielpunkte liegen dementsprechend in der Nähe dieser Notunterkünfte.

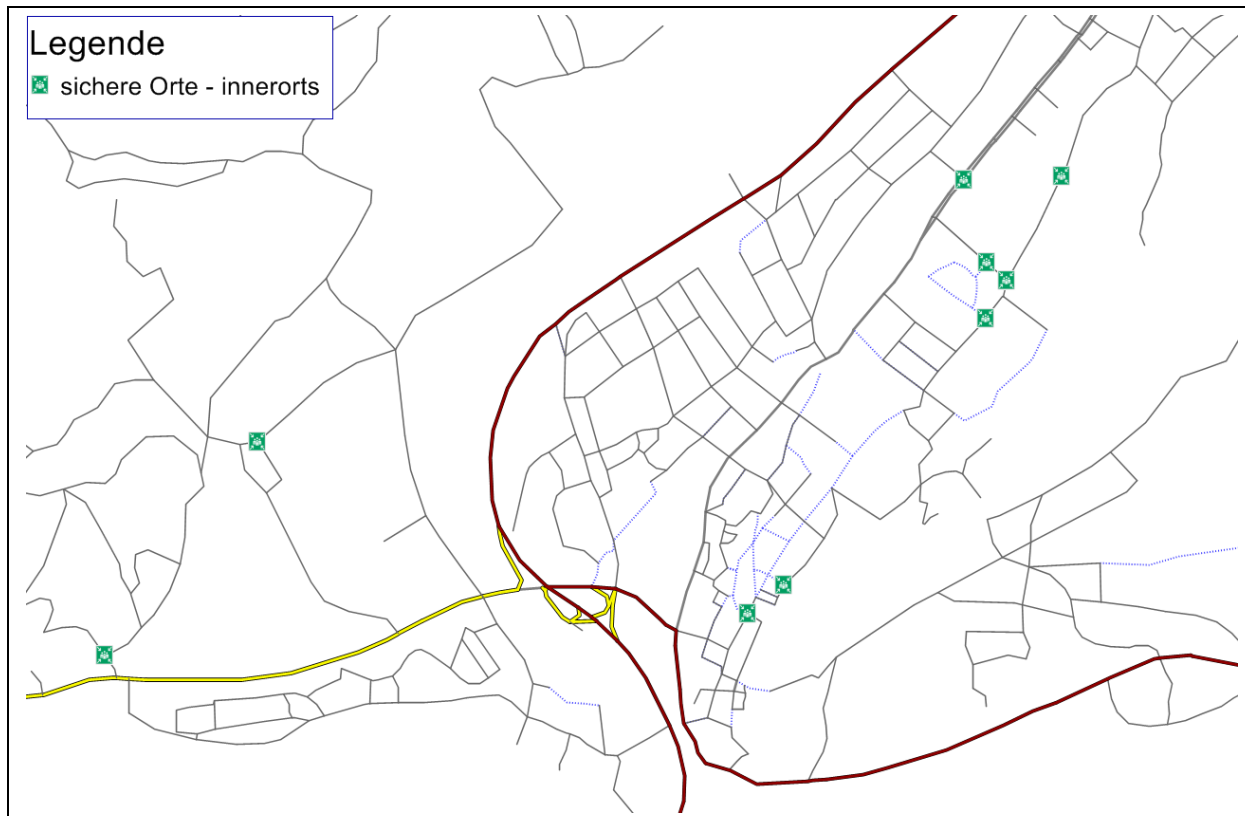


Abb. 5.3: Lage von sicheren Orten innerhalb von Bad Reichenhall

In einem dritten Szenario werden alle modellierten sicheren Orte berücksichtigt. Die Evakuierungsfahrten enden sowohl außerhalb der Stadt Bad Reichenhall als auch in den Notunterkünften im Stadtgebiet.

Für alle Szenarien, bei denen nicht die Lage der sicheren Orte sondern andere Einflussgrößen variiert werden, wird davon ausgegangen, dass die Evakuierungsfahrten außerhalb von Bad Reichenhall enden.

Straßensperrungen

Neben den durch Hochwasser bedingten Straßensperrungen gibt es noch weitere Gründe, Straßen während Evakuierungen zu sperren. Dazu gehören beispielsweise Verkehrsunfälle oder speziell bei Starkregenereignissen verschüttete Straßen durch Erdbeben oder Murenabgänge in Gebirgsregionen.

Um diesen Effekt im Modell zu berücksichtigen, werden Straßensperrungen an verschiedenen Stellen im Straßennetz eingerichtet. Dafür werden die Straßen ausgewählt, deren Sperrung den größten Einfluss auf das Verkehrsgeschehen hat. Dieser Einfluss auf das Verkehrsgeschehen kann durch die Änderung der Verkehrsleistung gemessen in Fahrzeugkilometer und Fahrzeugstunden quantifiziert werden. Diese Kenngrößen steigen aufgrund von Verkehrsbehinderungen und

Umleitungen zum Umfahren der Sperrung an. Je größer der Anstieg aufgrund der Sperrung einer Strecke ist, desto höher ist die Empfindlichkeit dieser Strecke.

Als Straßenabschnitte mit der höchsten Empfindlichkeit wird der Teil der B21 nördlich von Bad Reichenhall ermittelt (Abb. 5.4). Hier gibt es keine kleinräumige Umfahrungsmöglichkeit. Die einzige Möglichkeit zur großräumigen Umfahrung bietet die Kreisstraße BGL4 im Osten der Stadt. Der zweite, sehr empfindliche Straßenabschnitt befindet sich im Zentrum Bad Reichenhalls auf der Wittelsbacherstraße (Abb. 5.4). Für einen kurzen Abschnitt zwischen der Luitpold- und der Kurstraße gibt es im Netz keine Parallelstraße, auf der der Verkehr bei einer Sperrung ausweichen kann. Großräumige Umfahrungsmöglichkeiten bieten die Bundesstraße B21 sowie die Kreisstraße BGL4. Diese Kreisstraße wird ebenfalls in einem Szenario gesperrt. Damit wird die Auswirkung der Sperrung einer wichtigen Umfahrungsmöglichkeit um Bad Reichenhall untersucht.

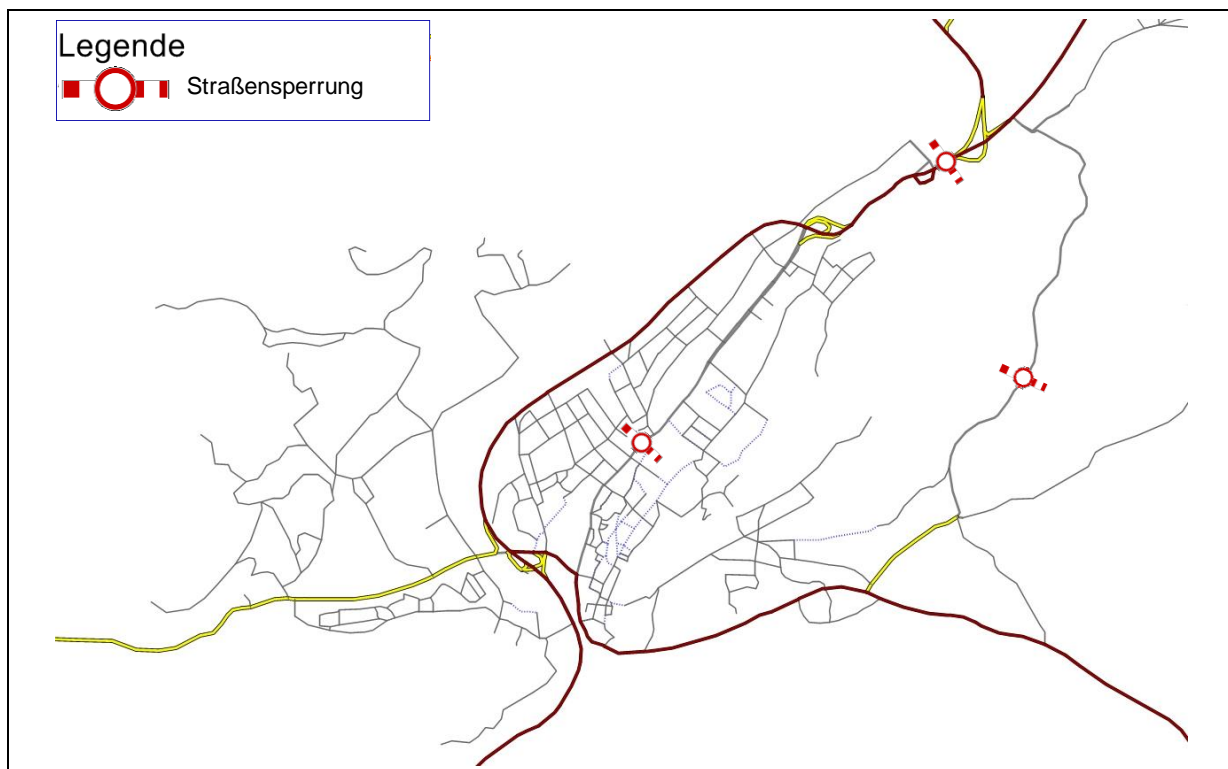


Abb. 5.4: Lage von Sperrungen im Stadtgebiet von Bad Reichenhall

5.2.2 Maßnahmenentwicklung

Häufig werden bei Evakuierungen die betroffenen und angrenzenden Gebiete für den Durchgangsverkehr gesperrt, damit dieser die Evakuierung nicht behindert. Diese Maßnahme wird auch für Bad Reichenhall in einem Szenario getestet. Ab dem Beginn der Evakuierung sind alle Zufahrtsstraßen nach Bad Reichenhall für Verkehr gesperrt, dessen Ziel nicht innerhalb der Stadt liegt.

Die Umsetzung der Sperrung im Modell erfolgt über einen Widerstandszuschlag für in Abb. 5.5 gekennzeichnete Strecken, die für die Einfahrt in die Stadt genutzt werden. Durch diesen Zuschlag erhöht sich der Widerstand aller Routen, die über diese Strecke verlaufen. Andere Routenalternativen werden bevorzugt.

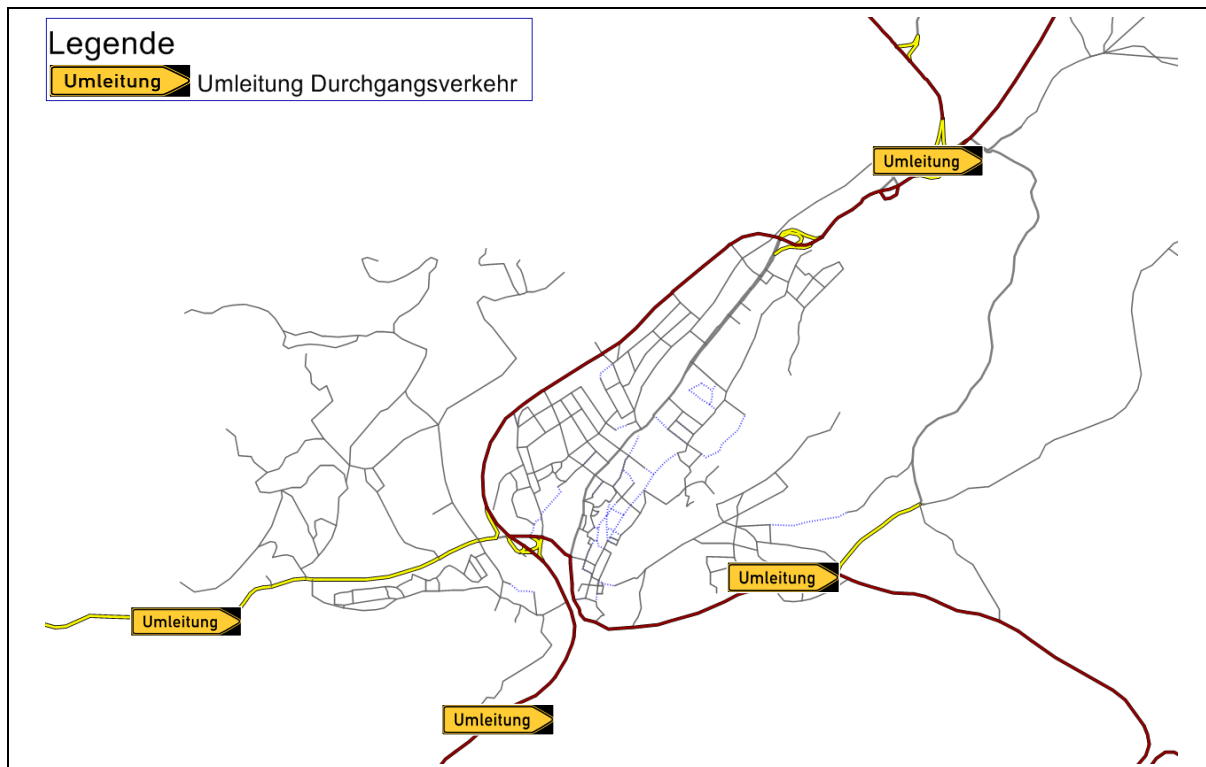


Abb. 5.5: Lage von Durchfahrtssperren für den Durchgangsverkehr in Bad Reichenhall

5.2.3 Kombination von Szenarien

In der Realität können während einer Evakuierung mehrere Einflussfaktoren gemeinsam auftreten. Um dies abzubilden, werden Szenarien berechnet, bei denen einige der beschriebenen Szenarien kombiniert werden. Auf diese Weise wird die Evakuierungsmodellierung realistischer.

In einem ersten Kombinationsszenario (siehe Abb. 5.6) ist die Wittelsbacherstraße im Stadtzentrum gesperrt. Außerdem wird die Stadt für den Durchgangsverkehr gesperrt.

In einem zweiten Kombinationsszenario werden zwei Straßenabschnitte gesperrt (Abb. 5.7), die B21 und die Kreisstraße BGL 4, die bei Sperrungen der Ortsdurchfahrt als Umfahrung genutzt wird. Damit muss in diesem Szenario die Umfahrung um die Stadt großräumig erfolgen.

Für die Kombinationsszenarien wird die Nachfrage am Vormittag verwendet. Die sicheren Orte befinden sich außerhalb Bad Reichenhalls.

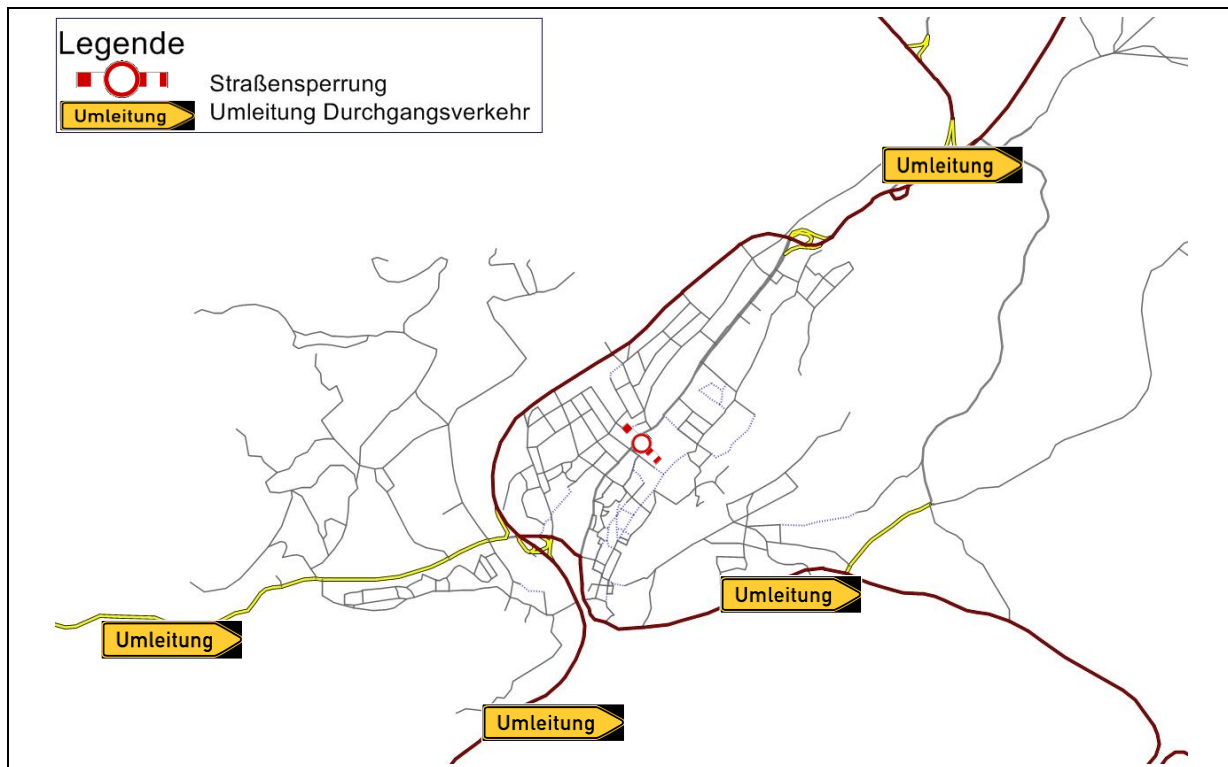


Abb. 5.6: Maßnahmen im Kombinationsszenario 1 - Straßensperrung und Sperrung für Durchgangsverkehr

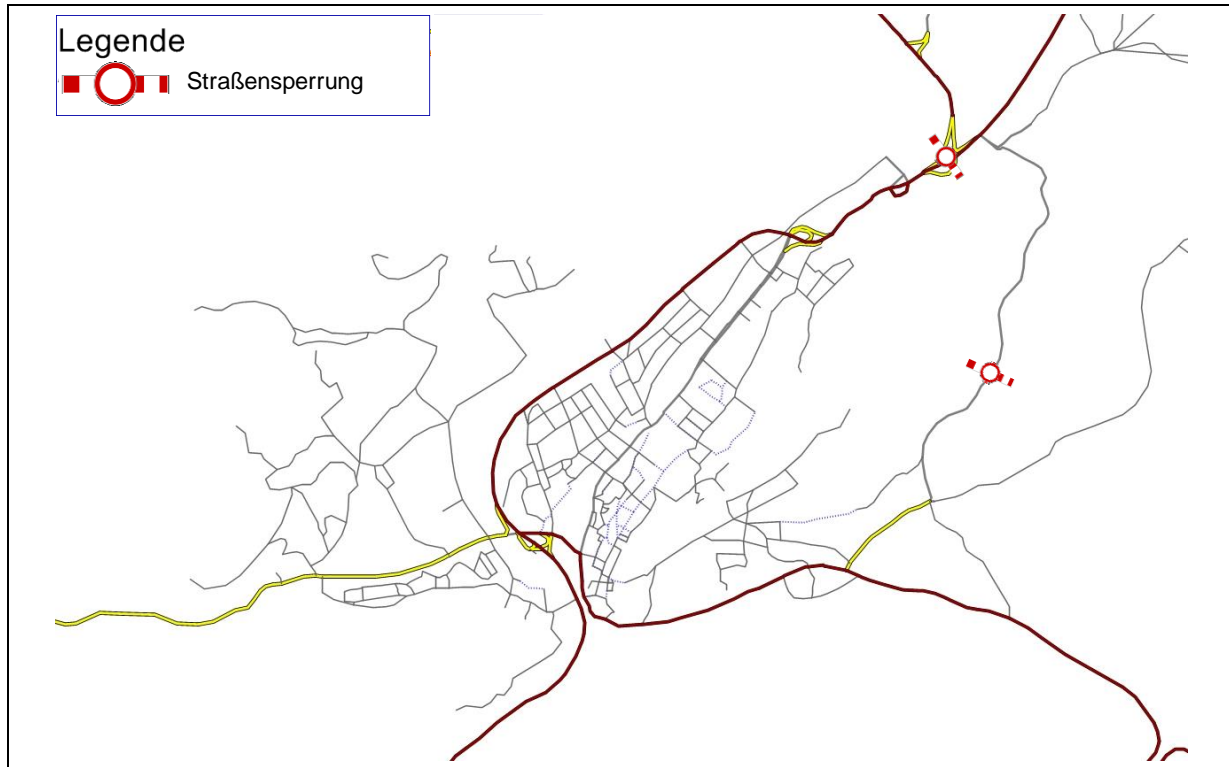


Abb. 5.7: Maßnahmen im Kombinationsszenario 2 – Streckensperrungen

5.3 Szenarienauswertung

5.3.1 Auswertungen der Verkehrsnachfrage

Die Ergebnisse der Berechnungen unterschieden sich je nach Szenario im Ablauf der Evakuierung sowie in der Nachfrage. Einige Gemeinsamkeiten haben jedoch alle Szenarien. Dazu gehört beispielsweise der Befolgungsgrad der Evakuierenden, der als Eingangsgröße des Modells für jede Personengruppe bestimmt wird.

Für Bad Reichenhall errechnet sich der Befolgungsgrad in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Bevölkerung im Evakuierungsgebiet. Demnach evakuieren insgesamt 45% der Betroffenen. Fast alle Kinder und viele Schüler nehmen an der Evakuierung teil (siehe Abb. 5.8). Rentner oder Personengruppen ohne Kinder kommen dem Evakuierungsauftrag mit einer niedrigeren Wahrscheinlichkeit nach.

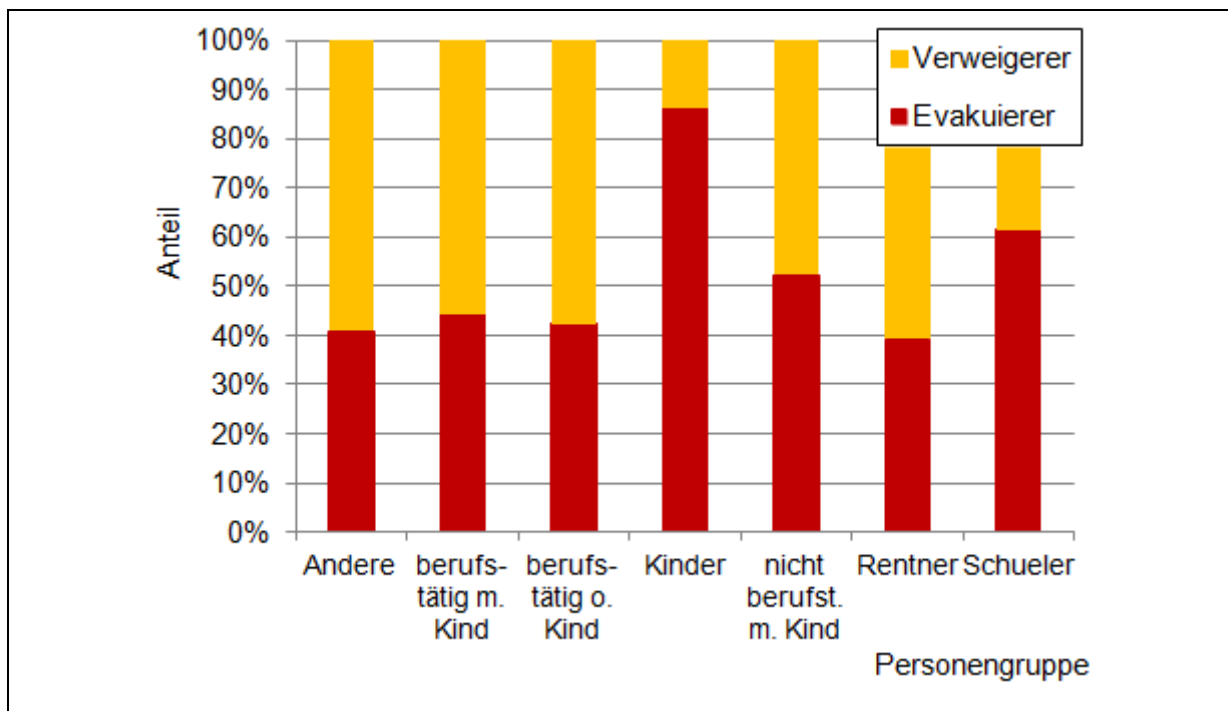


Abb. 5.8: Befolgungsgrad differenziert nach Personengruppen in Bad Reichenhall

Auch die Wahl des Verkehrsmittels ist für alle Szenarien nahezu gleich. Abb. 5.9 zeigt, dass sowohl tags als auch nachts hauptsächlich der Pkw für die Evakuierung genutzt wird. Fußverkehr, Rad und der öffentliche Verkehr spielen bei der Evakuierung in Bad Reichenhall nur eine untergeordnete Rolle.

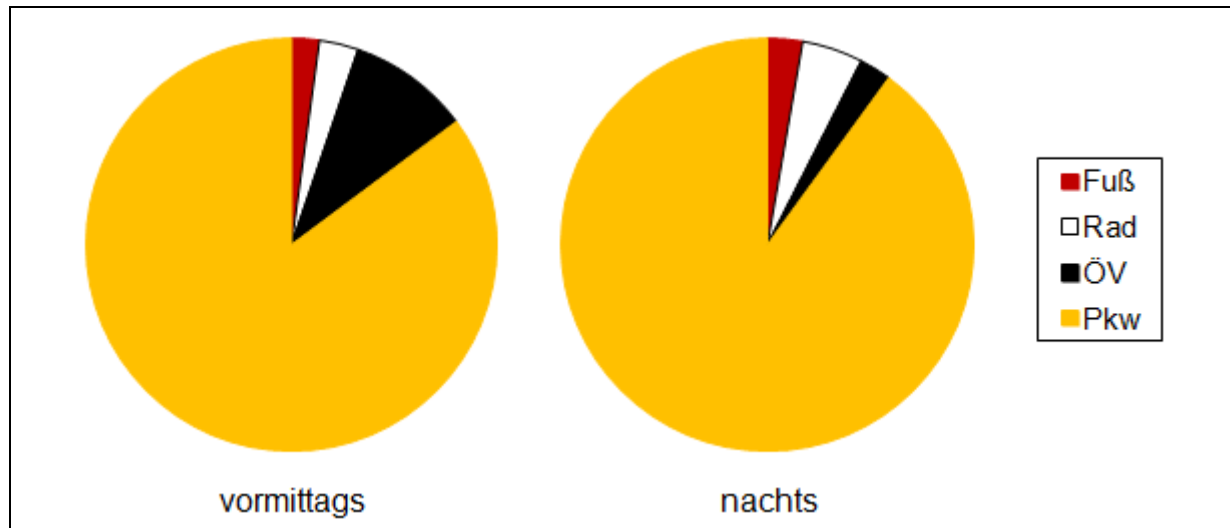


Abb. 5.9: Verkehrsmittelwahl der Evakuierenden zu verschiedenen Tageszeiten

Neben diesen Gemeinsamkeiten sind viele Szenarien-spezifische Auswertungen möglich. Dabei soll zunächst der Unterschied aufgrund der verschiedenen Tageszeiten, an denen die Evakuierung stattfindet, betrachtet werden. Der Aufenthaltsort zu Beginn der Evakuierung ist abhängig von der Tageszeit, wie Tabelle 12 zeigt. Beginnt die Evakuierung vormittags, halten sich nur 45% der 2.500 Betroffenen in ihren Wohnungen im Evakuierungsgebiet auf. Die restlichen Bewohner unternehmen eine Aktivität außerhalb des Evakuierungsgebietes. Nachts beträgt der Anteil Bewohner, die zu Hause sind, hingegen 100%. Vom aktuellen Aufenthaltsort hängt die Reaktion auf den Evakuierungsauftrag ab. Müssen viele Bewohner zu Beginn der Evakuierung erst nach Hause fahren, verzögert dies den Evakuierungsprozess.

Tabelle 12: Übersicht über Aufenthaltsorte der Einwohner Bad Reichenhalls zu Beginn der Evakuierung

Wohnort	Einwohner	Aufenthalt zu Evakuierungsbeginn			
		vormittags		nachts	
		in EG	außerhalb	in EG	außerhalb
in EG	2.500	1.100	1.400	2.500	0
außerhalb EG	14.500	600	13.900	0	14.500
Gesamt	17.000	1.700	15.300	2.500	14.500

Neben den Bewohnern müssen auch Personen evakuieren, die sich zu Evakuierungsbeginn im Evakuierungsgebiet aufhalten, dort jedoch nicht wohnen. Für Bad Reichenhall besteht dieses Problem nachts nicht. Kein außerhalb des Evakuierungsgebietes lebender Bad Reichenhaller hält sich zu dieser Zeit dort auf. Vormittag hingegen müssen neben den Einwohnern auch 600 Bürger Bad

Reichenhalls evakuieren, die außerhalb des Evakuierungsgebietes leben, dort jedoch zu Evakuierungsbeginn einer Aktivität nachgehen (Tabelle 12). Meist handelt es sich dabei um die Aktivität Arbeiten. Aber auch Freizeit- und sonstige Aktivitäten werden zu Beginn der Evakuierung im Evakuierungsgebiet unternommen, wie Abb. 5.10 zeigt.

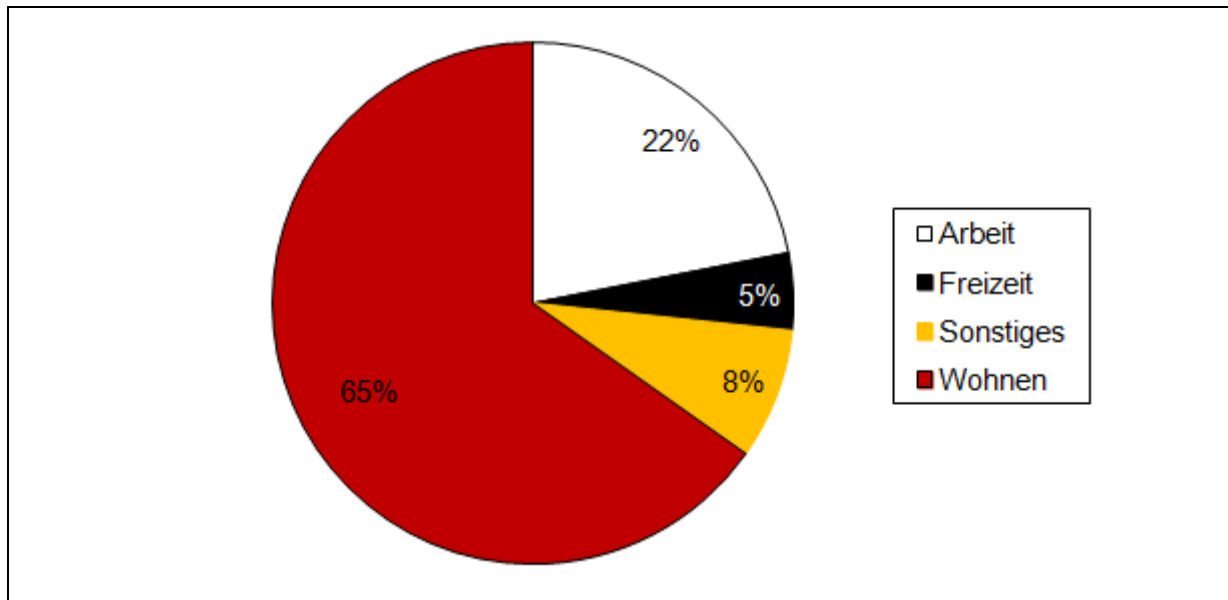


Abb. 5.10: Aktivitäten der Bewohner Reichenhalls, die sich zu Beginn der Evakuierung vormittags im Evakuierungsgebiet aufhalten

Die unterschiedlichen Aktivitäten und Aufenthaltsorte zu Evakuierungsbeginn in den beiden Szenarien spiegeln sich in der Vorbereitungsdauer wider. In Abb. 5.11 sind die benötigten Vorbereitungsauern für die beiden untersuchten Zeiträume aufgetragen. Nachts haben ein Fünftel der Bewohner, die den Evakuierungsaufwurf befolgen, ihre Vorbereitung bereits nach 10 Minuten abgeschlossen. Vormittags hingegen beginnen die Ersten erst nach ca. 15 Minuten zu evakuieren. Die mittlere Vorbereitungsdauer beträgt vormittags 38 Minuten, während es nachts nur 28 Minuten sind. Zu Beginn der Überflutung 60 Minuten nach dem Evakuierungsaufwurf haben nachts bereits 97% der Evakuierenden den Weg zum sicheren Ort angetreten. Vormittags beträgt dieser Anteil 89%. 136 evakuierungswillige Einwohner haben zu Beginn der Überflutung die Evakuierungsfahrt noch nicht angetreten.

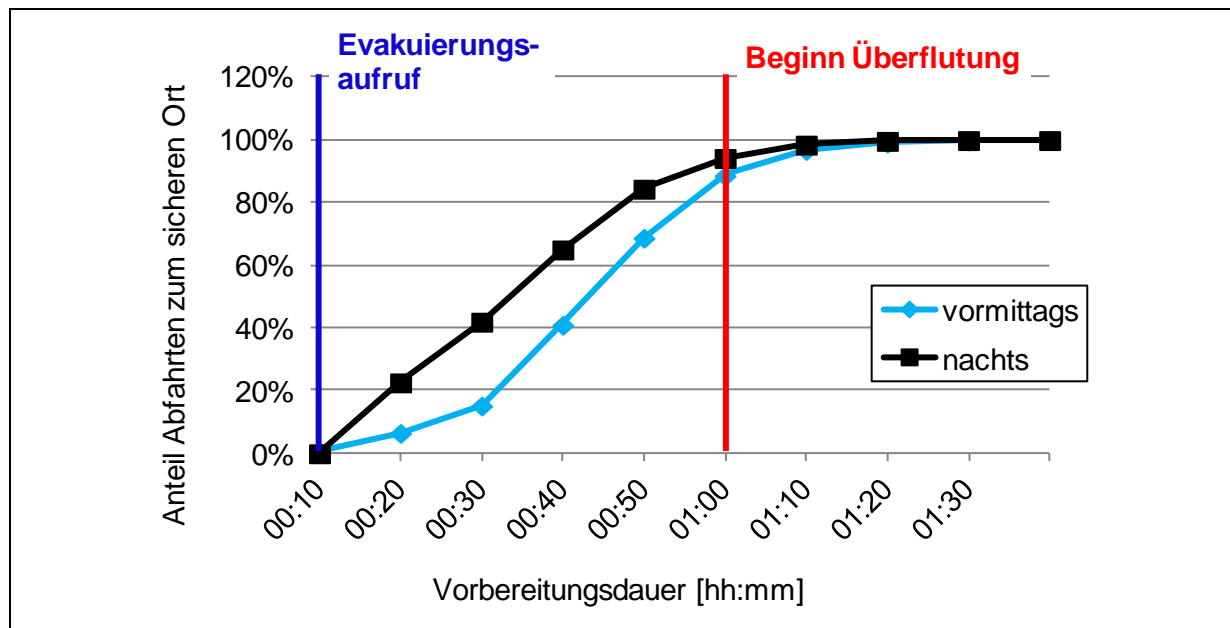


Abb. 5.11: kumulierte Verteilung der Vorbereitungsdauern von Evakuierenden zu verschiedenen Tageszeiten

Abb. 5.12 zeigt, dass über die Hälfte der Evakuierenden in Bad Reichenhall vormittags eine oder mehrere Zwischenaktivitäten unternimmt, bevor sie die Evakuierung antreten. Dazu gehören beispielsweise Fahrten zum Abholen von Angehörigen. Viele der sich vormittags außerhalb ihrer Wohnung aufhaltenden Bewohner des Evakuierungsgebietes fahren nach dem Evakuierungsaufwurf nach Hause, bevor sie evakuieren. Diese zusätzlichen Aktivitäten sind bei Evakuierungen nachts nicht notwendig, da sich die Betroffenen ohnehin bereits in der Wohnung aufhalten. Dadurch sind die Vorbereitungsdauern in der Nacht kürzer als am Vormittag.

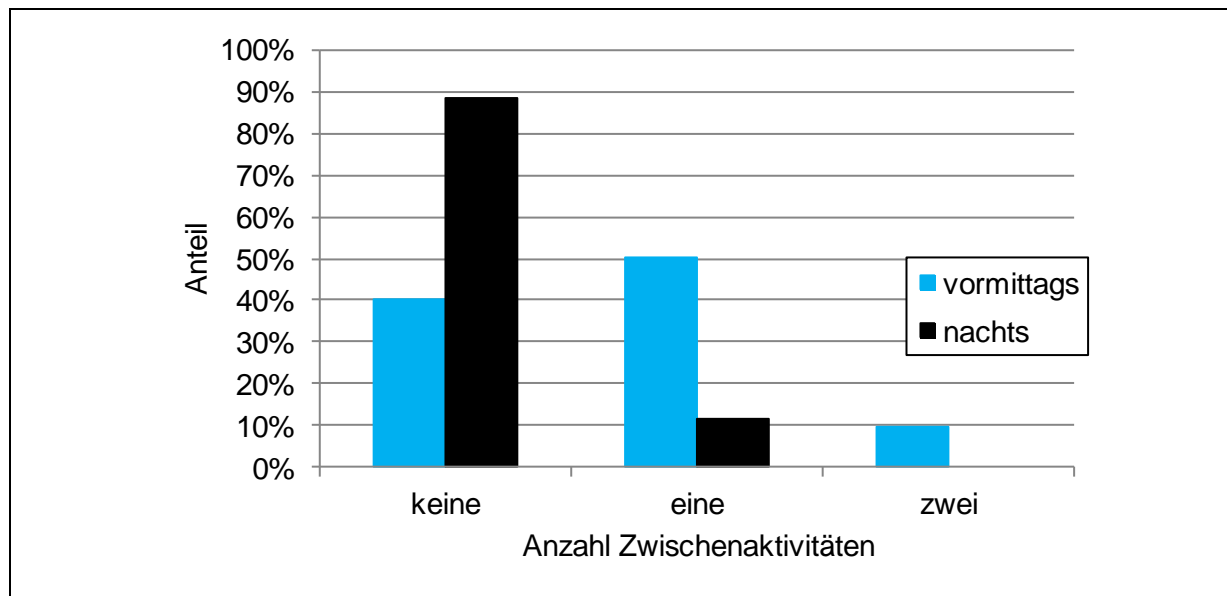


Abb. 5.12: Anzahl Zwischenaktivitäten nach Evakuierungsbeginn vor der Fahrt zum sicheren Ort zu unterschiedlichen Tageszeiten

Nicht nur die Bewohner des Evakuierungsgebietes sondern auch einige der anderen 14.500 Einwohner Bad Reichenhalls sind indirekt von der Überflutung und Evakuierung betroffen. Durch das Abholen von Angehörigen aus dem Evakuierungsgebiet oder durch Verschieben einer im Überflutungsgebiet geplanten Aktivität ändern sich geplante Tagesabläufe. Dies betrifft vormittags wie nachts etwas mehr als 20% der Einwohner. Abb. 5.13. zeigt die Art der Beeinträchtigung durch die Evakuierung. Sowohl nachts als auch vormittags müssen viele Einwohner ihre im Evakuierungsgebiet geplanten Aktivitäten an einen anderen Ort verlagern. Dabei sind auch Aktivitäten erfasst, die erst einige Stunden nach dem Evakuierungsaufruf geplant sind, was den hohen Anteil nachts erklärt. Ein Viertel bis ein Drittel der Einwohner fahren in das Gebiet hinein, um beispielsweise Angehörigen zu helfen. Ein gewisser Anteil der Bad Reichenhaller wird sich der Evakuierung anschließen, obwohl der Evakuierungsaufruf nicht ihnen gilt. Knapp ein Fünftel der Beeinträchtigten muss tagsüber eine Aktivität abbrechen, der sie zum Zeitpunkt des Evakuierungsaufrufes im Evakuierungsgebiet nachgeht. Nachts betrifft dies niemanden, da sich, wie oben gezeigt, zu dieser Zeit ausschließlich Einwohner im Evakuierungsgebiet aufhalten. In beiden Evakuierungszeiträumen muss ein kleiner Anteil der Bad Reichenhaller eine geplante Pflichtaktivität, wie beispielsweise die Arbeit ausfallen lassen. Auch hier wird ein Zeitraum von mehreren Stunden nach dem Evakuierungsbeginn betrachtet. Daher beinhaltet die Anzahl ausgefallener Pflichtaktivitäten im Nachtszenario auch Aktivitäten, die erst am nächsten Morgen geplant sind.

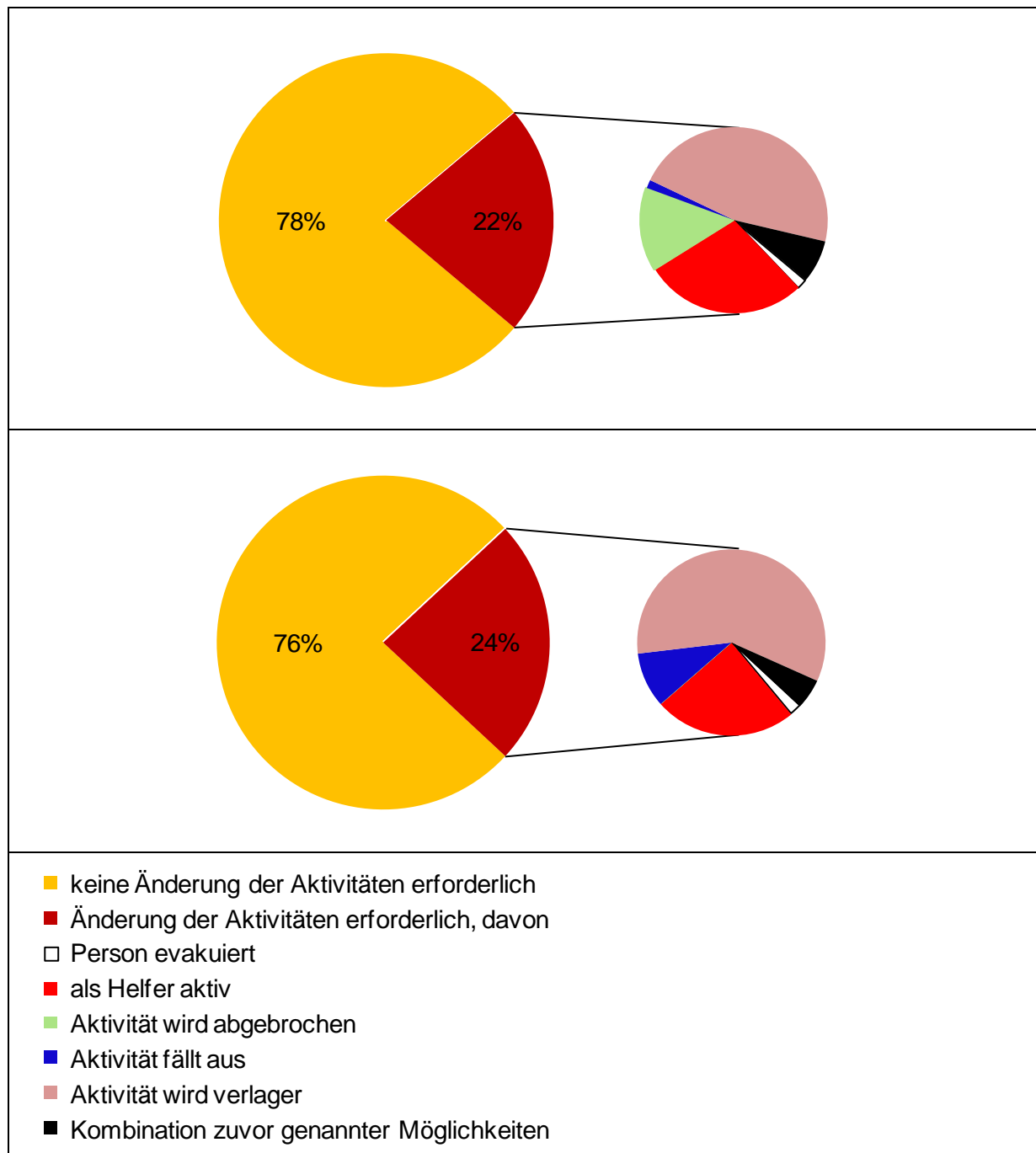


Abb. 5.13: Verhalten nicht im Evakuierungsgebiet lebender Bad Reichenhaller vormittags (oben) und nachts (unten)

5.3.2 Auswertungen des Verkehrsablaufs

Die Änderungen des Verkehrsangebotes in den in Kapitel 5.2 beschriebenen Szenarien bewirken eine Veränderung der Verkehrsbelastungen im Straßennetz und damit eine Veränderung von potentiellen Engpässen. Vor allem bei Sperrungen der Ortsdurchfahrten entstehen Engpässe auf der östlich von Bad Reichenhall

verlaufenden Kreisstraße BGL4. In Szenarien ohne Sperrungen sind vor allem die B21, sowie der südliche Teil der Wittelsbacherstraße überlastet, die als Ortsdurchfahrten genutzt werden. Überlastungen gibt es auch auf der Reichenbachstraße, dem Abschnitt der B21 zwischen Kretabrücke und dem Abzweig Innsbrucker Straße. Abb. 5.14 zeigt für die beiden beschriebenen Zustände jeweils ein Auslastungsbild. Die Auslastungsbilder aller Szenarien und Zeitschritte sind in Anhang I zusammengestellt.



Abb. 5.14: Auslastungen für Szenario "Sicherer Ort, innerorts + außerorts" und Szenario "Sperrung B21" zwischen 10:15 - 10:30 Uhr

In Abb. 5.15 ist die Länge des überlasteten Straßennetzes je Zeitintervall für den in Abb. 5.14 gezeigten Netzausschnitt aufgetragen. Betrachtet wird ein Zeitraum von 75 Minuten nach dem Evakuierungsaufwurf. In allen Szenarien treten ca. 15-45 Minuten nach dem Evakuierungsaufwurf die stärksten Behinderungen auf. Dies ist der Zeitpunkt, an dem die meisten Fahrten der Evakuierenden stattfinden. Einige von ihnen treten zu dieser Zeit den Weg zum sicheren Ort an. Andere holen Angehörige ab. Auch Fahrten von Helfern in das Evakuierungsgebiet hinein tragen zum erhöhten Verkehrsaufkommen in dieser Zeit bei. Nach Beginn der Überflutung sind trotz überflutungsbedingte Straßensperrungen weniger Engstellen im Netz zu verzeichnen, da zu dieser Zeit weniger Fahrten stattfinden.

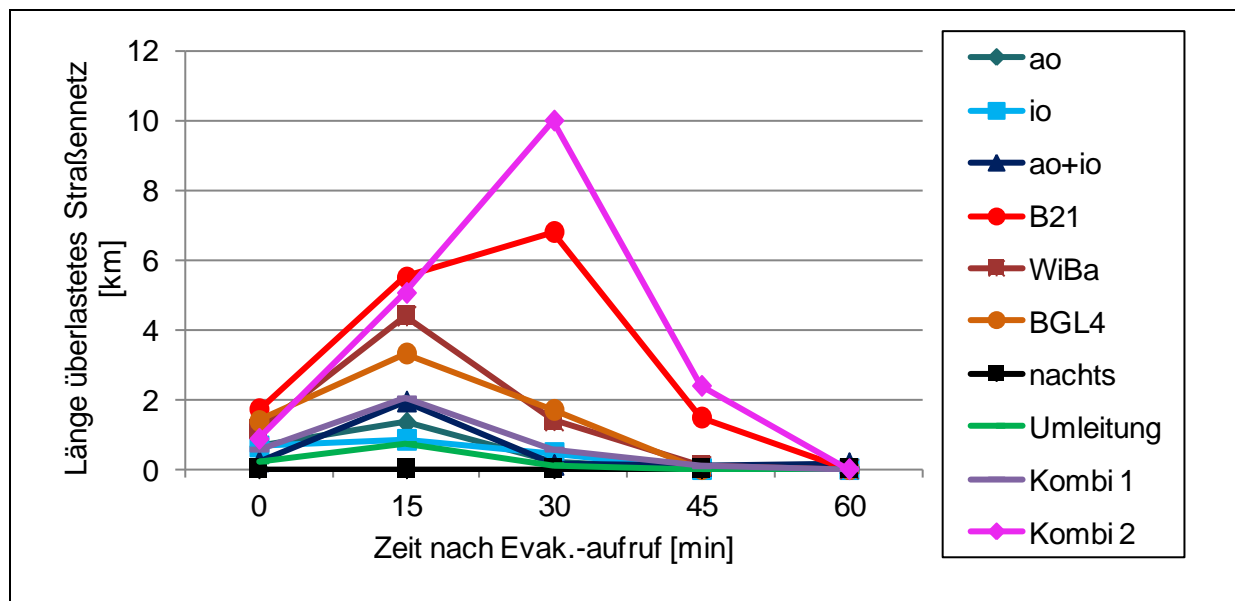


Abb. 5.15: Länge des überlasteten Straßennetzes nach dem Evakuierungsaufwurf

Aus dem Diagramm in Abb. 5.15 wird ersichtlich, dass die längsten Engpässe in den Szenarien mit Straßensperrungen auftreten. Noch deutlicher wird dies in Abb. 5.16, in der alle überlasteten Straßennetzlängen je 15-Minuten-Zeitintervall für einen Zeitraum von 75 min nach dem Evakuierungsaufwurf aufaddiert sind. Vor allem die Sperrung der B21 in den Szenarien „Sperrung B21“ und „Kombi 2“ verursacht lange Engpässe im Straßennetz Bad Reichenhalls. Befinden sich die Sperrungen an anderen Stellen im Netz, kommt es ebenfalls zu Engpässen, die jedoch kürzer sind. Die Umleitung des Durchgangsverkehrs kann den negativen Effekt der Sperrung der Wittelsbacherstraße im Szenario „Kombi1“ etwas kompensieren. Generell wird an den Szenarien „nachts“ und „Umleitung“ deutlich, dass bei niedrigem Durchgangsverkehrsaufkommen die Evakuierenden weniger stark beeinträchtigt sind. In diesen Szenarien kommt es kaum zu Überlastungen im Straßennetz. Die Lage der sicheren Orte beeinflusst die Länge von Überlastungen im Straßennetz wenig.

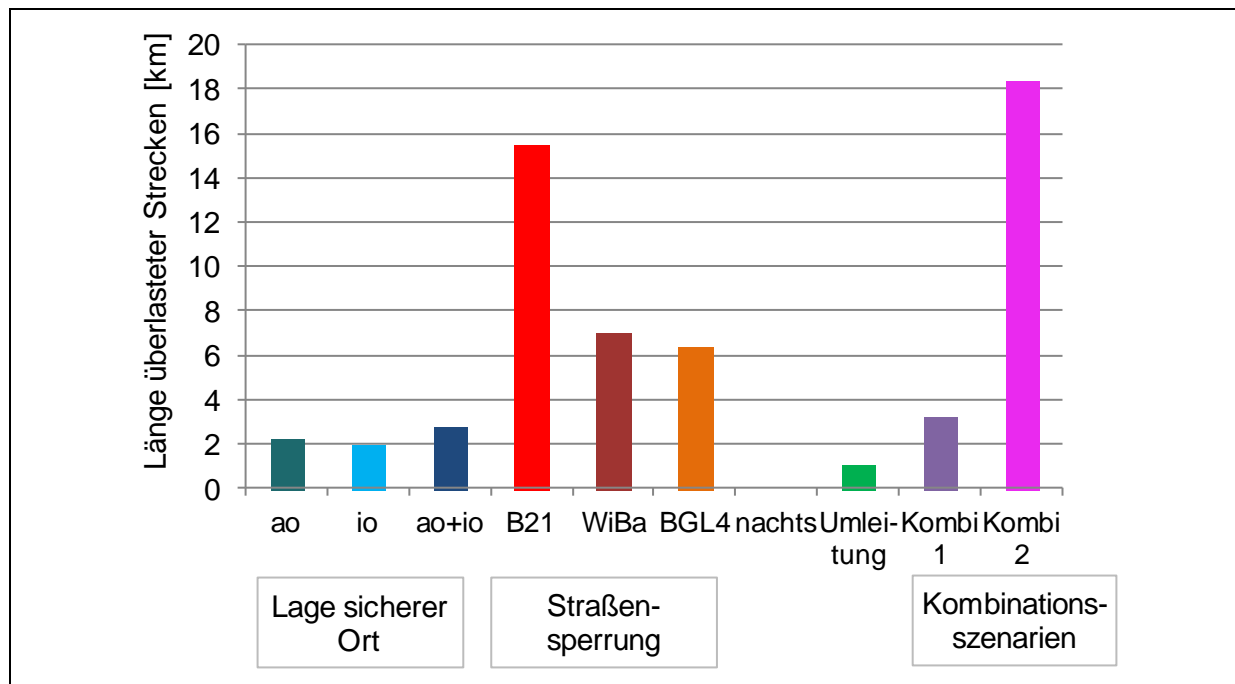


Abb. 5.16: Länge überlasteter Straßen zwischen Überflutungsbeginn und 90 min nach Überflutungsbeginn

Auf überlasteten Strecken bewegen sich Fahrzeuge nur mit niedrigen Geschwindigkeiten fort. Abb. 5.17 zeigt in einem Szenarienvergleich wie stark sich die durchschnittliche Geschwindigkeit einer Evakuierungsfahrt zu einem sicheren Ort bei den einzelnen Szenarien im Evakuierungsfall ändert. Vor allem verkehrlich bedingte Sperrungen und die dadurch hervorgerufenen Überlastungen im Straßennetz behindern den Verkehrsfluss und reduzieren die Geschwindigkeit der Evakuierenden.

Die Lage von sicheren Orten hat in Bad Reichenhall wenig Einfluss auf die Evakuierungsgeschwindigkeit. Durch eine stärkere räumlich Verteilung der Fahrtziele im Szenario „Sicherer Ort – außerorts“ bündelt sich der Verkehr weniger stark auf den städtischen Straßen. Dies führt zu höheren Geschwindigkeiten gegenüber den Szenarien mit sicheren Orten im Stadtzentrum. Darüber hinaus führt ein großer Teil des Weges über Außerortsstraßen, wenn die sicheren Orte nicht in der Innenstadt liegen. Durch die auf diesen Straßen höheren erlaubten Geschwindigkeiten erhöht sich ebenfalls die durchschnittliche Geschwindigkeit im Szenario „Sicherer Ort – außerorts“.

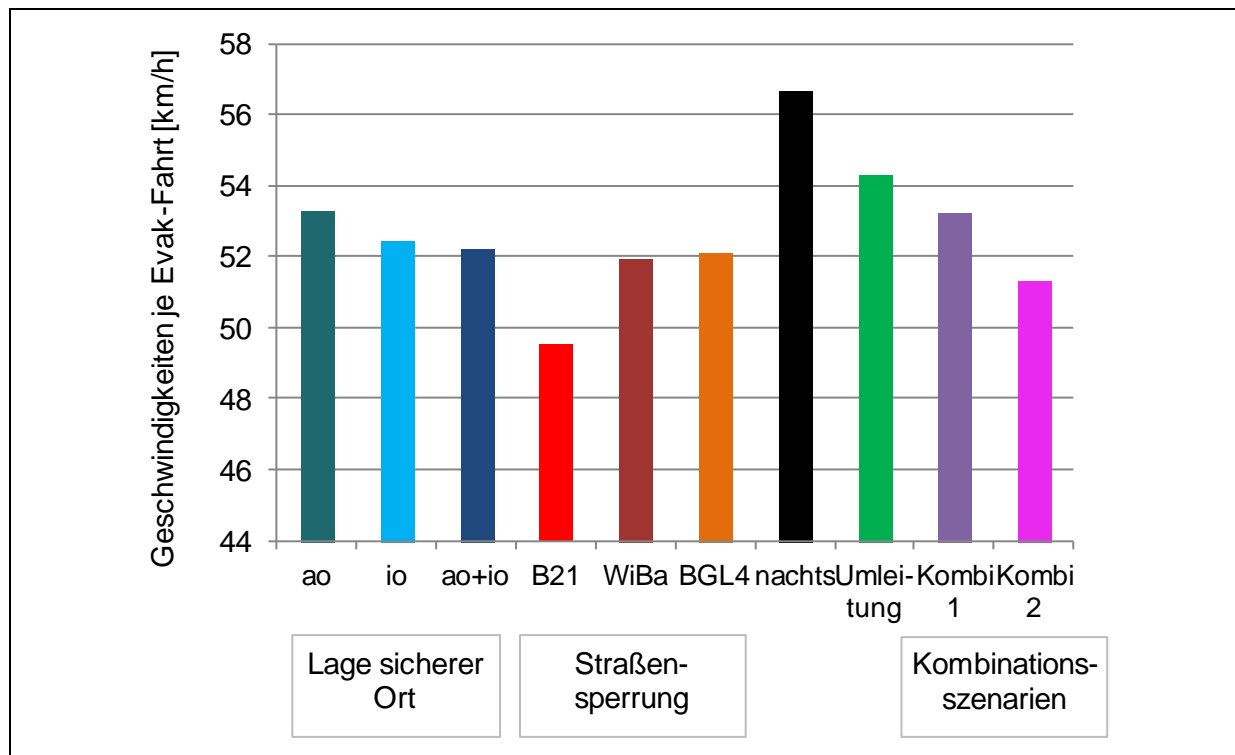


Abb. 5.17: Vergleich der durchschnittlichen Geschwindigkeiten für unterschiedliche Evakuierungsszenarien

Geringere Verkehrsbelastung durch den Außenverkehr und weniger Überlastungen führen zu einer höheren Geschwindigkeit des Evakuierungsverkehrs. Dies wird im Szenario „nachts“ deutlich, in dem das Verkehrsaufkommen des Durchgangsverkehrs niedrig ist. Ein ähnlicher Effekt wird durch das Szenario „Umleitung“ erreicht, in dem die Ortsdurchfahrt Bad Reichenhalls für den Durchgangsverkehr gesperrt ist und daher der Evakuierungsverkehr weniger stark beeinträchtigt wird als in anderen Szenarien. Das Kombinationsszenario 1 zeigt, dass die Zeitverzögerung durch Sperrungen in einem gewissen Maß kompensiert wird, wenn der Durchgangsverkehr durch eine Sperrung der Ortsdurchfahrt den Evakuierungsverkehr nicht beeinträchtigt.

Aus der Vorbereitungszeit der Betroffenen einerseits und dem Verkehrsablauf andererseits ergibt sich die Dauer, die vergeht, bis die zu Evakuierenden das Evakuierungsgebiet verlassen und einen sicheren Ort erreicht haben. Abb. 5.18 zeigt die durchschnittliche Evakuierungsdauer für alle Szenarien. Nachts ist diese Evakuierungsdauer am kürzesten. Zum einen benötigen die Evakuierenden weniger Vorbereitungszeit als am Tag. Zum anderen ist auch die Geschwindigkeit höher, da der Evakuierungsverkehr nicht durch den Durchgangsverkehr behindert wird.

Trotz ähnlicher Evakuierungsgeschwindigkeit beeinflusst die Lage der sicheren Orte die Evakuierungsdauer in Bad Reichenhall. Da die Evakuierungsfahrten in der Stadt beginnen, ist die Entfernung und damit die Fahrzeit zu den sicheren Orten im

Stadtgebiet Bad Reichenhall (Szenario „Sichere Orte – io“) geringer als im Szenario „Sichere Orte – außerorts“. Noch kürzer wird die Fahrzeit und damit die Evakuierungsdauer im Szenario „Sichere Orte – innerorts und außerorts“. Bad Reichenhaller, die ihre Evakuierungsfahrt nicht im Stadtzentrum beginnen, können die sicheren Orte außerhalb der Stadt aufsuchen, wenn der Weg dorthin kürzer ist als zu den innerstädtischen sicheren Orten.

Im Szenario „Umleitung“ hat die Umleitung des Durchgangsverkehrs auf die Evakuierungsdauer hingegen keinen Einfluss. Die Evakuierenden können zwar schneller das Stadtgebiet von Bad Reichenhall verlassen. Diese Zeitersparnisse werden jedoch außerhalb der Stadt durch Behinderungen durch den umgeleiteten Durchgangsverkehr wieder kompensiert.

Die Straßensperrungen haben wenig Einfluss auf die Evakuierungsdauer. Aufgrund der in Kapitel 4.6.1 beschriebenen Flexibilität bei der Wahl des sicheren Ortes suchen die Evakuierenden bei Straßensperrungen den sicheren Ort auf, den sie in dieser Situation am schnellsten erreichen. Durch die relativ hohe Anzahl sicherer Orte im Modell unterscheiden sich die Fahrzeiten zu dem alternativen sicheren Ort und zu dem ohne Sperrung gewählten sicheren Ort nicht wesentlich.

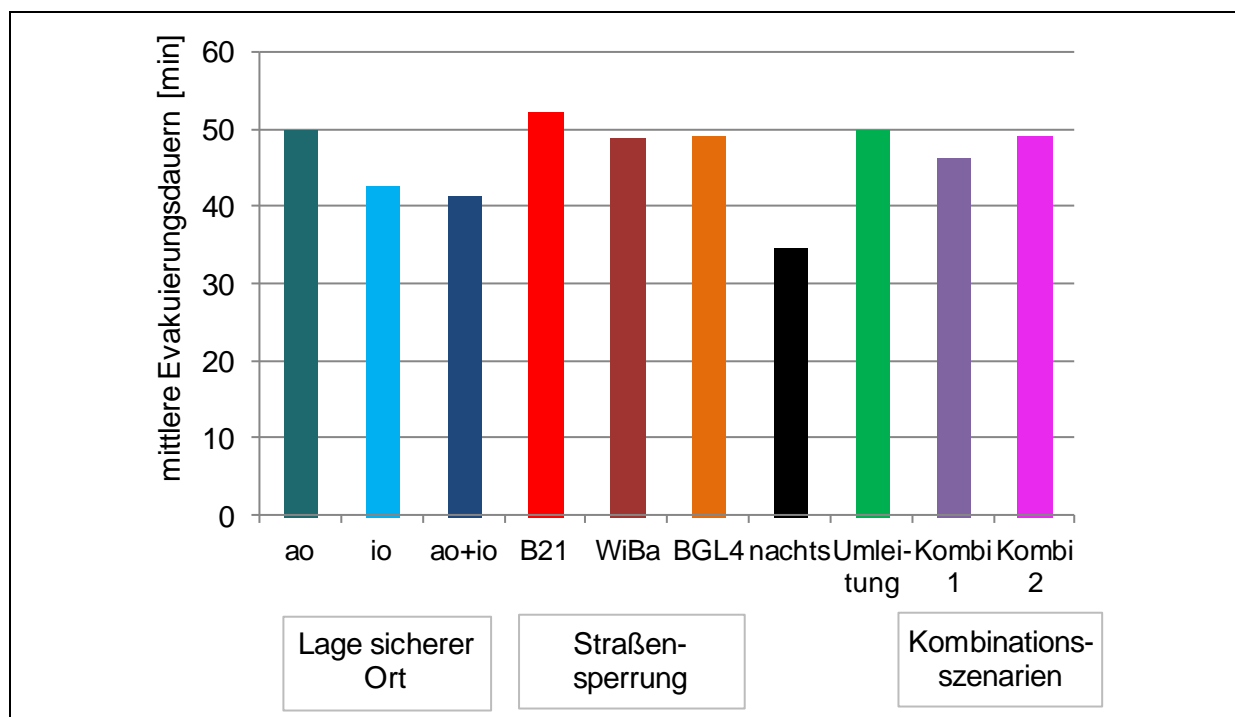


Abb. 5.18: durchschnittliche Evakuierungsdauern je Szenario

5.3.3 Auswertungen für den Einsatzverkehrs

Die Engpässe im Verkehrsnetz wirken sich auch auf den Rettungsverkehr aus. Mit ansteigender Belastung steigt die Fahrzeit, die benötigt wird, um das Überflutungs-

gebiet zu erreichen. Abb. 5.19 zeigt dies für die Szenarien und einen Zeitraum von 30 Minuten vor Evakuierungsbeginn bis 15 Minuten nach Überflutungsbeginn. Bezugszeit ist die Reisezeit eine Stunde vor Evakuierungsbeginn. Die höchsten Reisezeitzuwächse von etwa 25% sind in den Szenarien mit verkehrlich bedingten Sperrungen und hohen Staulängen zu verzeichnen. In Szenarien mit variabler Lage der sicheren Orte oder verkehrlichen Maßnahmen benötigen die Rettungskräfte bis zu 15% mehr Zeit für die Fahrt in das Überflutungsgebiet.

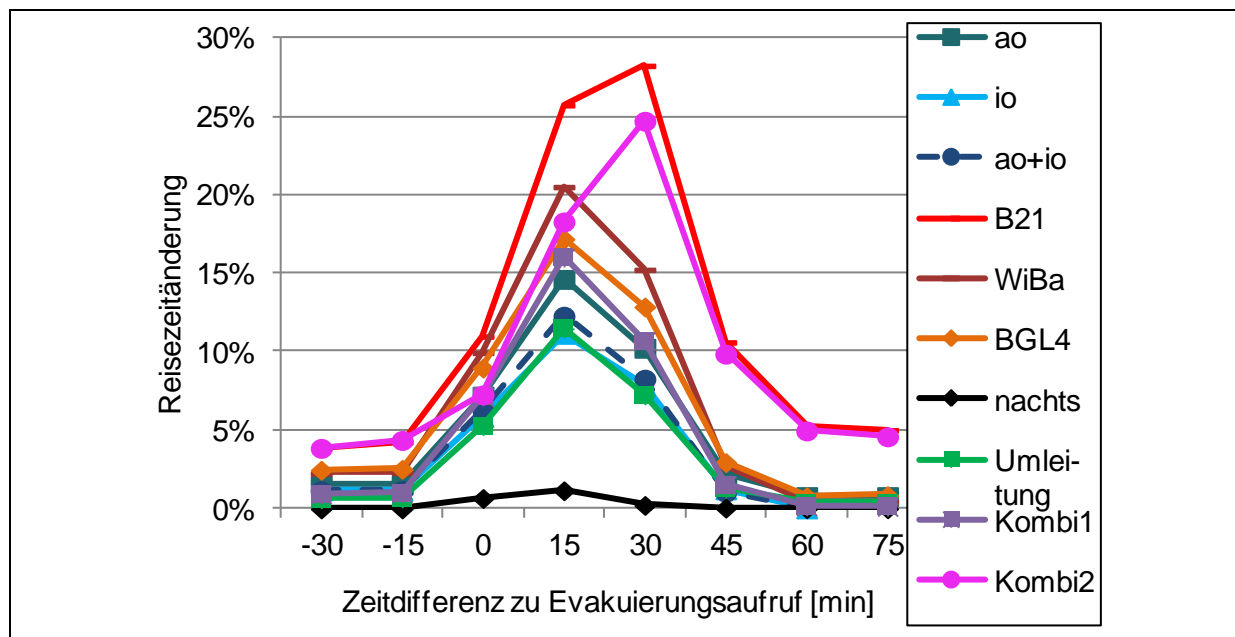


Abb. 5.19: Änderung der Fahrzeit für Rettungskräfte in das Überflutungsgebiet während einer Evakuierung

Die Ergebnisse der Berechnungen können für die Erstellung von Einsatzplänen der Rettungskräfte genutzt werden. Für jedes Szenario und jeden Zeitschritt kann die Fahrzeit der Rettungskräfte in das Einsatzgebiet bestimmt werden. Außerdem können die kürzesten für den Rettungsverkehr noch befahrbaren Routen ausgewiesen und als Karte angezeigt werden. Abb. 5.20 zeigt dies beispielhaft für Szenario „Sicherer Ort – innerorts“.

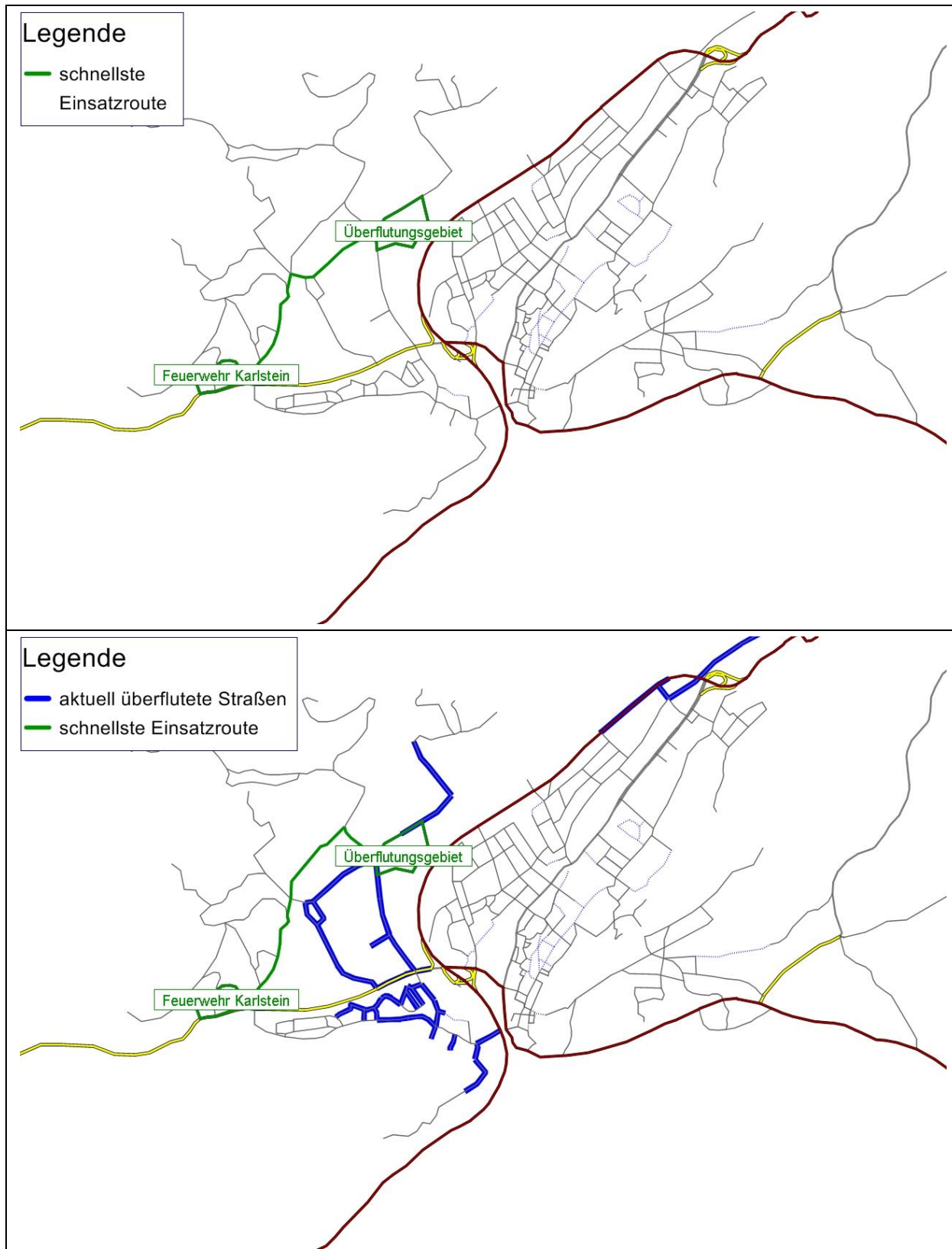


Abb. 5.20: Beispiel für die Ausgabe der schnellsten Einsatzroute in das Überflutungsgebiet vor der Überflutung (oben) und 30 Minuten nach Beginn der Überflutung (unten)

6 Fazit und Ausblick

Im Projekt EvaSim ist ein Simulationstool entwickelt worden, das den Evakuierungsprozess durch folgende Bestandteile realistisch abbildet:

- Verhaltensweisen der betroffenen Bevölkerung werden bei der Modellierung nachgebildet.
- Aus den Daten eines gekoppelten Hydraulikmodells können Informationen zur Lage des Evakuierungsgebietes, der sicheren Orte sowie zum Zeitpunkt der Sperrung von Straßen aufgrund von Überflutungen abgeleitet werden.
- Der Aufenthaltsort der Personen zu Beginn der Überflutung wird durch ein Alltagsverkehrsmodell realitätsnah abgeschätzt.
- Mittels einer aktivitätenkettenbasierten Mikrosimulation werden die Aktivitäten der Betroffenen im Evakuierungsfall in einer definierten Reihenfolge im Modell abgebildet. Aufenthaltsort und Aktivität eines Agenten können für jede Tageszeit ermittelt werden.

Das entwickelte Tool bietet die Möglichkeit, durch Änderung der Eingangsparameter unterschiedliche Evakuierungsszenarien zu simulieren. Veränderbare Variablen sind dabei beispielsweise die Tageszeit, zu der die Evakuierung stattfindet sowie die Verkehrsmittelwahl. Auch eine Darstellung der Evakuierung mit Bussen ist auf diese Weise möglich. Weiterhin kann der Befolgungsgrad im Modell variiert werden, um beispielsweise eine genauere Information der Bevölkerung oder spezielle Anweisung an die Betroffenen und den verbundenen Einfluss auf die Anzahl Evakuierender abzubilden.

Durch Verwendung einer Verkehrssimulationssoftware zur Übertragung der berechneten Ortsveränderung auf das Verkehrsnetz werden Engpässe im Netz aufgezeigt. Auch der Einfluss von Straßensperrungen sowie verkehrliche Steuerungsmaßnahmen auf den Evakuierungsablauf kann mittels einer Verkehrsmodellierungssoftware berechnet werden. Daneben wird der Verkehrsablauf für den zivilen Evakuierungsverkehr und den Einsatzverkehr differenziert nachgestellt.

Für EvaSim sind Ein- und Ausgabegrößen des Evakuierungstools auf die Software VISUM abgestimmt. Die Ergebnisausgabe kann so modifiziert werden, dass auch andere Verkehrsmodellierungssoftware angewendet werden kann.

Für das Simulationstool liegt ein Benutzerhandbuch vor, sodass es Dritten zur Verfügung gestellt werden kann. Verbesserungen zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit sind dafür noch wünschenswert. Dies betrifft vor allem den Teil der Benutzeroberfläche über den die Strukturdaten des zu evakuierenden Gebietes und Verhaltensparameter eingegeben werden können.

Angewendet auf das Testgebiet Bad Reichenhall wird deutlich, dass es auch bei einer großzügigen Ausdehnung des Evakuierungsgebietes mit einer hohen Anzahl

an Evakuierenden sowie einer kurzen Vorwarnzeit und dadurch bedingt einer Bündelung der Evakuierungsfahrten nur wenige Engpässe im Stadtgebiet von Bad Reichenhall entstehen. Betroffen davon sind die B21 nördlich von Bad Reichenhall sowie nach Beginn der Überflutung und der Sperrung der Ortsdurchfahrt die Berchtesgadener Landstraße BGL4. Durch eine Reduzierung des Durchgangsverkehrs mittels geeigneter Maßnahmen können die Engpässe im Stadtgebiet reduziert und eine Erhöhung der Geschwindigkeit auf den Straßen in Bad Reichenhall erreicht werden. Dies ist vor allem für den Rettungsverkehr von Bedeutung, damit dieser zügig den Einsatzort erreicht.

Eine Änderung der Lage von sicheren Orten wirkt sich in Bad Reichenhall kaum auf den Evakuierungsablauf und die Evakuierungsgeschwindigkeit aus. Die Evakuierungsdauer kann jedoch maßgeblich verkürzt werden, wenn die Entfernung zu den sicheren Orten kurz gehalten werden.

Die Evakuierungsdauer kann ebenfalls durch eine Verkürzung der Vorbereitungs-dauer erreicht werden. Dafür müssen sich die Agenten nach dem Evakuierungsaufwurf direkt an einen sicheren Ort begeben ohne zuvor andere Aktivitäten zu unternehmen. Um dies zu erreichen, ist die Information und Schulung der Bevölkerung im Vorfeld der Evakuierung notwendig.

Eine Validierung der verwendeten Parameter zur Modellierung des Verhaltens Betroffener ist aufgrund einer fehlenden Datenbasis im Rahmen des Projektes EvaSim nicht möglich. Bei Anwendungen in der Praxis für die Evakuierungsplanung ist daher ein Abgleich der Modellierungsergebnisse mit Erfahrungen oder falls vorhanden Erhebungen während einer Evakuierung und eine entsprechende Kalibrierung der Modellparameter notwendig.

Verbesserungsmöglichkeiten für die Evakuierungsverkehrsmodellierung bestehen in der dynamischen Abbildung von Entscheidungsprozessen. Mit dem vorliegenden Evakuierungstool können getroffene Entscheidungen beispielsweise über die Ziel- oder Routenwahl nicht der aktuellen Situation angepasst werden. Für eine realistischere Darstellung sind weitere Untersuchungen über Art und Auftreten dieser Verhaltensanpassungen in Evakuierungssituationen notwendig.

Literaturverzeichnis

- Abdelgawad, H., Abdulhai, B. (2009). *Emergency Evacuation Planning as a Network Design Problem: A Critical Review*. Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research, Volume 1, Issue 1 / January 2009 , 41-58.
- Aboelata, M., Bowles, D., Anthony, C. (2004). *Transportation model for evacuation in estimating dam failure life loss*. Proceedings of the Australian Committee on Large Dam Conference, Australia .
- Baker E. (1991). *Hurricane evacuation behavior*. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 9(2), 287-310.
- Boden, M., Weger, H. (2008). *Simulation von Verkehrsstörungen und Optimierung von Evakuierungsströmen am Beispiel der Jahrhundertflut 2002*. 4. KatNet-Tagung - Netzwerk zur Katastrophenforschung, Lutherstadt-Wittenberg .
- Bureau of Public Roads (ed.), U.S. Department of Commerce (1964). *Traffic Assignment Manual*. Washington, D.C.
- Dow, K., Cutter, S. (2000). *Public orders and personal opinions: Household strategies for hurricane risk assessment*. Environmental Hazards, 2, 143-155.
- Drabek T.E. (1996). *Disaster Evacuation Behavior: Tourists and other Transients*. Monograph 58. Boulder CO. University of Colorado Institute of Behavioral Science Program on Environment and Behavior.
- Drury, J., Cocking, C. (2007). *The mass psychology of disasters and emergency evacuations: A research report and implications for practice*. Department of Psychology, University of Sussex Falmer, Brighton, BN1 9QH, UK March 2007, p. 5.
- Friedrich, M. (2011). *Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen?* Tagungsbeitrag HEUREKA 11 - Optimierung in Verkehr und Transport .
- Hardy, M., Wunderlich, K. (2007). *Evacuation Management Operations (EMO) modeling assessment*. Transportation modeling inventory.
- Haupt, T. Friderich, T., Heidl, U. (2012). *Validate: A New Method To Generate Nationwide Traffic*, veröffentlicht im Web unter http://www.ptvamerica.com/fileadmin/files_ptvamerica.com/library/PTV_Validate_paper_040727.pdf (abgerufen am 31.12.2012).

- Heath, S. E., Kass, P. H., Beck, A. M., Glickman, L. T. (2001). *Risk Factors for Pet Evacuation Failure After a Slow-Onset Disaster*. Journal of the American Veterinary Association, 218, 1905-1910.
- Hobeika A.G., Kim C., Beckwith R. (1994). *A Decision Support System for Developing Evacuation Plans Around Nuclear Power Stations*. Interfaces, 24(5), 22-35.
- Hobeika, A.G., Kim, C. (1998). *Comparison of traffic assignments in evacuation modelling*. IEEE Transactions on engineering management, Vol. 45 , 192-198.
- Kang J.E., Lindell M.K., Prater C.S. (2007). *Hurricane evacuation expectations and actual behavior in Hurricane Lili*. Journal of Applied Social Psychology, 37, 881-897.
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W.R., Robinson, J. P. , Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., Englemann, W. H. (2001). *The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants*. J. Expo Anal Environ. Epidemiol., 11(3), 231-252.
- Kreibich, H., Thielen, A. (2007). *Risikokarten für Deutschland*. Geographie und Schule 165
- Kron,W., Ellenrieder, T. (2008). *Zunehmende Wetterschäden: Was kostet das die Versicherungswirtschaft?* Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 24
- Lämmel, G., Grether, D., Nagel, K. (2010). *The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations*. Transportation Research Part C 18 , Seite 84-98.
- Lindell M.K, Prater C.S., Sanderson W.G., Jr., Lee H.M., Zhang Y., Mohite A., Hwang S.N. (2001). *Texas Gulf Coast Residents' Expectations and Intentions Regarding Hurricane Evacuation*. College Station TX: Texas A & M University Hazard Reduction & Recovery Center.
- Lindell M.K., Lu J.C., Prater C.S. (2005a). *"Household Evacuation Decision Making in Response to Hurricane Lili."* Natural Hazards Review, 6(4), 171-179.
- Lindell M.K., Prater C.S., Peacock W. G. (2005b). *Organizational Communication and Decision Making in Hurricane Emergencies*. Prepared for the Hurricane Forecast Socioeconomic Workshop, February 16-18, Pomona, California.
- Lindell M.K., Prater C.S. (2006). *Evacuation from Hurricane Katrina: Jefferson and St. Charles Parishes*. National Hurricane Conference.

- Lindell M.K., Prater C.S. (2007). *Critical Behavioral Assumptions in Evacuation Analysis for Private Vehicles: Examples from Hurricane Research and Planning*. Journal of Urban Planning and Development, 133, 18-29.
- Lohse, D. (2011). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2. Verkehrsplanung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Kirschbaum Verlag GmbH.
- Mohn,U. (2006). *Sichere Städte und Gemeinden Unterstützungs- und Dienstleistungsangebote des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe für Kommunen*. DStGB Dokumentation No. 60. Deutscher Städte- und Gemeindebund. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
- Müller, K. (2009). *Handbuch Evakuierung: Maßnahmen im Brand- und Katastrophenfall*. Schmidt Erich Verlag.
- Pel, A., Hoogendoorn, S., Bliemer, M. (2010). *Impacts of variations in travel demand and network supply factors for evacuation studies*. Tagungsbeitrag TRB 2010 Annual Meeting .
- Planung Transport Verkehr AG. (PTV, 2010). *Benutzerhandbuch VISUM 11.5 - Grundlagen*. Karlsruhe: Planung Transport Verkehr AG.
- Post, Buckley, Schuh & Jernigan, Inc. (PBS&J, 2003). *Evacuation Traffic Information System (ETIS), Training Document*. Tallahassee, Florida: Post, Buckley, Schuh & Jernigan, Inc.
- Riad, J. K., Norris, F. H., Ruback, R. B. (1999). *Predicting Evacuation in Two Major Disasters: Risk Perception, Social Influence, and Access to Resources*. Journal of Applied Social Psychology 29(5): 918-934.
- Schiller, F. (2004). *Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung*. TU Dresden, Schriftenreihe des Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Heft 8.
- Sorenson J., Vogt B., (2006). *Interactive Emergency Evacuation Guidebook 2006*. Prepared for the Protective Action IPT – Chemical Stockpile Emergency Preparedness Program.
- Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz (2003). *Wörterbuch des Zivil- und Katastrophenschutzes*
- Urbanik T. (2000). *Evacuation Time Estimates for Nuclear Power Plants*. Journal of Hazardous Materials, 75(2-3), 165-180.

- Wardrop, J. (1952). *Some theoretical aspects of road traffic research*. Proceedings of the Inst. of Civil Engineering, London.
- Wilmot, C. G., Mei, B. (2004). *Comparison of alternative trip generation models for Hurricane Evacuation*. Natural hazards review, ASCE, 170 - 178.
- Wolshon, B., Lim, E. (2005a). *Modeling and Performance Assessment of Contraflow Evacuation Termination Points*. Journal of the Transportation Research Board, No. 1922. 118–128.
- Wolshon, B., Urbina, E., Wilmot, C., Levitan, M. (2005b). *Review of Policies and Practices for Hurricane Evacuation. I: Transportation Planning, Preparedness, and Response*. Natural hazards review, ASCE, 129 - 142
- ZIRN – Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung (2010). *Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen. Anlage 2. Teilbericht AP 4. Verbundzwischenbericht zum Projekt EvaSim*

I Anhang: Parametersammlung Evakuierungsmodell

Im folgenden Anhang sind für alle im Kapitel 4 beschriebenen Modellschritte die benötigten Parameter aufgelistet.

I.1 Modellierung für im Evakuierungsgebiet wohnende Personen

I.1.1 Befolungsraten und Beteiligung

Tabelle 13: Befolungsraten für Personengruppen in Abhängigkeit der Nähe zur Gefahr

Personen- gruppe	Befolungsrate je Gefährdungsstufe		
	hohe Gefahr – Intensitätsklasse 2+3	niedrige Gefahr - Intensitätsklasse 1	keine Gefahr - Intensitätsklasse 0
Ew_m_Ki	0,7	0,5	0,1
Ew_o_Ki	0,6	0,4	0,05
NEw_m_Ki	0,7	0,5	0,1
Kinder	1,0	0,8	0,1
Schüler	0,9	0,7	0,1
Rentner	0,6	0,4	0,05
Andere	0,6	0,4	0,05

Generell sind die Befolungsraten bei schleichenden Gefahren wie Hochwasser nicht so hoch, wie bei plötzlich auftretenden Schadensereignissen (Kapitel 3.3, Quelle 10). Am häufigsten evakuieren Familien mit Kindern. Menschen ohne Kinder evakuieren nicht so häufig und versuchen lieber vor Ort ihren Besitz zu sichern (Kapitel 3.3, Quelle 11). Für Rentner ist die Evakuierung aufgrund ihrer gesundheitlichen Verfassung beschwerlicher als für andere Personen, daher ist anzunehmen, dass sie ebenfalls seltener evakuieren (Kapitel 3.3, Quelle 15).

Die Evakuierungsbereitschaft nimmt mit größerer Nähe des Wohnorts zur Gefahrenquelle, dem Fluss, und damit mit höherer Gefährdungsstufe zu. Auch in Bereichen die außerhalb des Gefahrenbereiches leben, evakuiert ein geringer Anteil an Personen.

I.1.2 Aktivitätenketten und Zielwahl

Folgende Ziele, die während einer Evakuierung aufgesucht werden, werden in der Literatur aufgeführt:

- die Wohnung (W), um sich mit den Familienmitgliedern vor Antritt der Evakuierung zu treffen (Kapitel 3.3, Quelle 1) bzw. um die benötigten Sachen einzupacken und Sicherungsmaßnahmen gegen das Hochwasser zu treffen.
- der Kindergarten/Schule (K,B), um Kinder abzuholen (Kapitel 3.3, Quelle 1 und 2).
- die Wohnung von Verwandten/Angehörigen, um diese bei der Evakuierung zu unterstützen (Kapitel 3.3, Quelle 1 und 16). Dies ist als sonstige Aktivität erfasst (S).
- der sichere Ort (SO), das Ziel der Evakuierung.

Aus diesen Erkenntnissen der Literaturanalyse werden die in Tabelle 14 aufgeführten Aktivitätenketten im Evakuierungsfall gebildet.

Tabelle 14: Aktivitätenketten für die einzelnen Personengruppen im Evakuierungsfall

Aktivitätenkette	Personengruppe
A-W-SO	Ew_m_Ki, Ew_o_Ki
A-S/K-SO	Ew_m_Ki
A-SO	Ew_m_Ki, Ew_o_Ki
A-S-W-SO	Ew_m_Ki, Ew_o_Ki
K-W-SO	Kinder
B-W-SO	Schüler
S-S/K-W-SO	Ew_m_Ki, NEw_m_Ki
S-W-SO	Alle
S-SO	Alle
W-S/K-W-SO	Ew_m_Ki, NEw_m_Ki
W-S-SO	Alle
W-SO	Alle

Im Folgenden werden den Aktivitätenketten aller Personengruppen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Dies erfolgt in Abhängigkeit der Startaktivität und der Tageszeit, zu der die Evakuierung beginnt.

Personengruppe Erwerbstätige mit Kindern

Tabelle 15: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Erwerbstätigen mit Kindern

Ew_m_Ki	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	0,90	0,35	0,40
A-S/K-SO	-	0,50	0,35
A-SO	0,10	0,05	0,05
A-S-W-SO		0,10	0,20
K-W-SO	-	-	-
B-W-SO	-	-	-
S-S/K-W-SO	0,00	0,50	0,45
S-W-SO	0,62	0,45	0,50
S-SO	0,05	0,05	0,05
W-S/K-W-SO	0,00	0,50	0,35
W-S-SO	0,15	0,15	0,20
W-SO	0,85	0,35	0,45

Grundannahmen:

- Eltern versuchen, vor der Evakuierung ihre Kinder abzuholen (Kapitel 3.3, Quelle 1)
- Familien evakuieren gemeinsam → Treffpunkt Wohnung (Kapitel 3.3, Quelle 1)

Es wird angenommen, dass nur etwa reichlich die Hälfte der Eltern bei einer Evakuierung am Vormittag zur Schule/KITA fährt, um die Kinder abzuholen, da nicht beide Elternteile fahren müssen, um ein Kind zu holen. Außerdem werden vor allem ältere Kinder evtl. selbständig nach Hause kommen (Kapitel 3.3, Quelle 2). Hinzu kommt, dass nicht alle Kinder < 6 Jahre in den Kindergarten gehen.

Am Nachmittag sind jüngere Schulkinder und Kindergartenkinder bereits wieder zu Hause, so dass viele nicht mehr abgeholt werden müssen. Allerdings sind Kinder zu dieser Zeit evtl. außerschulisch unterwegs, was sich in den höheren Anteil der Aktivitätenketten mit der Zwischenaktivität Sonstiges niederschlägt.

Es wird außerdem davon ausgegangen, dass Kinder grundsätzlich nach Hause gehen, bevor sie evakuieren.

Nachts sind laut Annahme alle Personen zu Hause, außer Nachtarbeiter.

Personengruppe Erwerbstätige ohne Kinder

Tabelle 16: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Erwerbstätige ohne Kinder

Ew_o_Ki	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	0,75	0,65	0,65
A-B/K-SO	0,00	0,00	0,00
A-SO	0,15	0,15	0,15
A-S-W-SO	0,10	0,20	0,20
K-W-SO	-	-	-
B-W-SO	-	-	-
S-B/K-W-SO	-	-	-
S-W-SO	0,90	0,90	0,90
S-SO	0,10	0,10	0,10
W-B/K-W-SO	-	-	-
W-S-SO	0,15	0,15	0,15
W-SO	0,85	0,85	0,85

Personen dieser Personengruppe gehen wie Erwerbstätige mit Kindern nach dem Evakuierungsaufruf meist zur Wohnung, um mit der Familie zu evakuieren (Kapitel 3.3, Quelle 1). Generell sind sie jedoch unabhängiger als Ew_m_Ki und können daher auch eher allein und direkt evakuieren, ohne die Wohnung zuvor aufzusuchen.

Personengruppe Nichterwerbstätige mit Kindern

Tabelle 17: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Nichterwerbstätige mit Kindern

NEw_m_Ki	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	-	-	-
A-B/K-SO	-	-	-
A-SO	-	-	-
A-S-W-SO	-	-	-
K-W-SO	-	-	-
B-W-SO	-	-	-
S-B/K-W-SO	0,00	0,55	0,35
S-W-SO	0,95	0,45	0,60
S-SO	0,05	0,05	0,05
W-B/K-W-SO	0,00	0,60	0,40
W-S-SO	0,15	0,15	0,30
W-SO	0,85	0,25	0,30

Nichterwerbstätige sind im Evakuierungsfall eher für das Erledigen von anfallenden Wegen zuständig, da sie sich zu Evakuierungsbeginn häufiger bereits in der Wohnung aufhalten und daher im Gegensatz zum Ew_m_Ki den Extra-Weg dorthin nicht unternehmen müssen. Wie bei Ew_m_Ki ist der Treffpunkt die Wohnung, bevor die Evakuierung angetreten wird (Kapitel 3.3, Quelle 1).

Personengruppe Rentner

Tabelle 18: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Rentner

Rentner	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	-	-	-
A-B/K-SO	-	-	-
A-SO	-	-	-
A-S-W-SO	-	-	-
K-W-SO	-	-	-
B-W-SO	-	-	-
S-B/K-W-SO	-	-	-
S-W-SO	0,95	0,95	0,95
S-SO	0,05	0,05	0,05
W-B/K-W-SO	-	-	-
W-S-SO	0,10	0,10	0,10
W-SO	0,90	0,90	0,90

Es wird angenommen, dass bei Rentnern ein kleinerer Anteil vor der Evakuierung noch einen Weg erledigt, als bei jüngeren Personen. Dies ist mit der geringeren Mobilität aufgrund körperlicher Gebrechen zu begründen. Außerdem ist zu vermuten, dass Rentner sehr häufig vor der Evakuierung die Wohnung aufsuchen, um persönliche Gegenstände wie beispielsweise Medikamente zu holen.

Personengruppe Kinder

Tabelle 19: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Kinder

Kinder	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	-	-	-
A-B/K-SO	-	-	-
A-SO	-	-	-
A-S-W-SO	-	-	-
K-W-SO	0,00	1,00	1,00
B-W-SO	-	-	-
S-B/K-W-SO	-	-	-
S-W-SO	0,95	0,95	0,95
S-SO	0,05	0,05	0,05
W-B/K-W-SO	-	-	-
W-S-SO	0,05	0,05	0,05
W-SO	0,95	0,95	0,95

Kinder evakuieren bis auf wenige Ausnahmen zusammen mit der Familie und gehen vor der Evakuierung zur Wohnung (Kapitel 3.3, Quelle 1, 2). Außerdem wird angenommen, dass Kinder während der Evakuierung für sonstige Wege von den Eltern weniger mitgenommen werden.

Personengruppe Schüler

Tabelle 20: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Schüler

Schüler	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	-	-	-
A-B/K-SO	-	-	-
A-SO	-	-	-
A-S-W-SO	-	-	-
K-W-SO	-	-	-
B-W-SO	-	1,00	1,00
S-B/K-W-SO	-	-	-
S-W-SO	0,95	0,95	0,95
S-SO	0,05	0,05	0,05
W-B/K-W-SO	-	-	-
W-S-SO	0,05	0,05	0,10
W-SO	0,90	0,90	0,90

Ähnliche Annahmen wie bei Kindern gelten für Schüler, daher sind die Werte hier identisch.

Personengruppe Andere

Tabelle 21: Auswahlwahrscheinlichkeiten der Evakuierungsaktivitätenketten für die Personengruppe Andere

Andere	Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Aktivitätenkette		
	nachts	vormittags	nachmittags
A-W-SO	-	-	-
A-B/K-SO	-	-	-
A-SO	-	-	-
A-S-W-SO	-	-	-
K-W-SO	-	-	-
B-W-SO	-	-	-
S-B/K-W-SO	-	-	-
S-W-SO	0,90	0,90	0,90
S-SO	0,10	0,10	0,10
W-B/K-W-SO	-	-	-
W-S-SO	0,15	0,15	0,15
W-SO	0,85	0,85	0,85

Zur Gruppe der Anderen gehören nicht erwerbstätige Kinderlose, die in ihrer Unabhängigkeit mit den Ew_o_Ki zu vergleichensind. Daher suchen sie vor der Evakuierung weniger häufig die Wohnung auf als beispielsweise Personengruppen mit Kindern.

I.1.3 Moduswahl

Für die Moduswahl im Evakuierungsfall gelten andere Parametersätze als im Alltag. Die Modi ÖV, Rad und Fuss sind weniger von Bedeutung. Dafür werden mehr Wege mit dem Pkw als Fahrer oder Mitfahrer zurückgelegt. Tabelle 22 zeigt die Parametersätze für die Moduswahl im Evakuierungsfall.

Tabelle 22: Parameter des LOGIT-Modells für die Moduswahl im Evakuierungsfall

Personen- gruppe	Parameter für das LOGIT-Modell nach Aktivitäten							
	Wohnen		Arbeiten/KiTa/ Schule		Holen/Bringen		Sonstiges	
	p1	p2	p1	p2	p1	p2	p1	p2
Ew_m_Ki Fuss	0,770	0,110	1,020	0,210	0,860	0,240	0,600	0,170
Ew_m_Ki Rad	1,740	0,140	2,290	0,180	2,860	0,300	2,990	0,180
Ew_m_Ki ÖV	4,840	0,020	6,350	0,040	8,580	0,540	5,380	0,150
Ew_m_Ki Pkw_MF	-	0,040	-	0,060	-	0,150	-	0,000
Ew_m_Ki Pkw_SF	-1,930	0,080	-0,640	0,010	-2,570	0,140	-1,790	0,070
Ew_o_Ki Fuss	0,371	0,222	1,230	0,209			1,480	0,111
Ew_o_Ki Rad	1,235	0,259	2,460	0,234			2,664	0,252
Ew_o_Ki ÖV	4,940	0,161	4,305	0,111			5,920	0,019
Ew_o_Ki Pkw_MF	-	-	-	0,09			-1,48	0,010
Ew_o_Ki Pkw_SF	-2,223	0,014	-2,214	0,123			-2,664	0,016
NEw_o_Ki Fuss	1,245	0,423			-1,345	2,084	1,622	0,365
NEw_o_Ki Rad	3,320	1,411			-	1,076	2,433	1,378
NEw_o_Ki ÖV	6,640	1,411			8,068	0,963	8,108	1,818
NEw_o_Ki Pkw_MF	0,830	1,743			-0,672	0,081	1,460	1,784
NEw_o_Ki Pkw_SF	0,830	1,693			-4,034	0,003	0,405	1,500
Kinder Fuss	-0,405	0,097	-	0,062			-	1,740
Kinder Rad	0,810	0,243	0,260	0,156			1,740	0,348
Kinder ÖV	4,860	0,186	3,640	0,119			4,640	1,044

Kinder Pkw_MF	-1,620	0,081	-1,560	0,135			-2,320	-0,267
Kinder Pkw_SF	8,100	4,050	5,200	2,600			11,600	5,220
Schüler Fuss	-0,860	0,172	0,374	0,172			-0,742	0,101
Schüler Rad	0,645	0,260	1,494	0,232			-	0,304
Schüler ÖV	1,720	0,129	1,494	0,048			2,597	0,105
Schüler Pkw_MF	-0,645	0,172	1,494	0,075			-0,185	0,134
Schüler Pkw_SF	2,150	2,150	1,868	1,868			-	1,855
Rentner Fuss	-	0,181					-	0,157
Rentner Rad	1,205	0,202					1,655	0,165
Rentner ÖV	4,819	0,042					3,474	0,033
Rentner Pkw_MF	-0,602	0,072					-0,414	0,095
Rentner Pkw_SF	-1,205	0,036					-0,827	0,001
Andere Fuss	1,180	0,165					0,630	0,202
Andere Rad	1,770	0,330					1,260	0,441
Andere ÖV	5,310	0,059					6,300	0,044
Andere Pkw_MF	-1,180	0,059					-0,630	0,063
Andere Pkw_SF	-2,360	0,024					-2,142	0,013

Für die Aktivitäten Arbeiten und Freizeit werden keine Moduswahl-Parameter benötigt, da davon ausgegangen wird, dass während der Evakuierung diese Aktivitäten nicht durchgeführt werden.

Die Pkw-Verfügbarkeit steigt in einer Evakuierungssituation an, da Personen ohne Pkw als Mitfahrer von Angehörigen abgeholt werden. Die Radverfügbarkeit ändert sich nicht im Vergleich zum Alltag.

Tabelle 23: Pkw-Verfügbarkeit in Evakuierungssituationen

Personengruppe	Pkw- Verfügbarkeit
Ew_m_Ki	95%
Ew_o_Ki Rad	92%
NEw_m_Ki ÖV	90%
Kinder	85%
Schüler	100%
Rentner	100%
Andere	90%

I.1.4 Aktivitätendauern und Korrektur

Die im Folgenden aufgeführten Werte dienen zur Berechnung der Dauer der Aktivitäten während der Evakuierung. Dafür werden Anteile der Dauer einer Einzelaktivität an der gesamten Vorbereitungsdauer abgeschätzt. Für den Wert der absoluten Dauer werden diese Anteile mit der für den Agenten gezogenen Vorbereitungsdauer multipliziert.

Die Zeitanteile der einzelnen Aktivitäten sind frei abgeschätzt und unabhängig von der Tageszeit. Aufgrund fehlender Informationen sind sie auch unabhängig von der Personengruppe festgelegt. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass eine gewisse Reaktionszeit nach dem Evakuierungsaufruf benötigt wird, in der die Relevanz der Information für die eigene Person festgestellt wird und eventuelle Absprachen mit Angehörigen erfolgen. Diese Reaktionszeit ist bei Kindern in der Schule oder KITA höher, da diese abgeholt werden oder die betreuenden Personen erst eine Vorgehensweise festlegen müssen. Für sonstige Aktivitäten ist eine nicht allzu kurze Dauer eingeplant. Gerade wenn andere Personen abgeholt werden müssen, kann dies eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen.

Tabelle 24: Anteile der Dauer von Einzelaktivitäten an der Gesamtvorbereitungsdauer in Evakuierungen

Aktivitätenketten	Anteile je Aktivität [%]
A-W-SO	10-90
A-B/K-W-SO	10-10-80
A-SO	100
A-B/K-SO	10-15
A-S-W-SO	10-20-70
K-W-SO	20-80
B-W-SO	20-80
S-B/K-W-SO	10-10-80
S-W-SO	15-85
S-SO	100
W-B/K-W-SO	20-10-70
W-S-W-SO	30-20-50
W-S-SO	70-30
W-SO	100

Daneben werden für alle Aktivitäten in Tabelle 25 Mindest- und Höchstdauern festgelegt. Damit wird berücksichtigt, dass bestimmte Aktivitäten auch bei hohem Zeitdruck immer eine gewisse Dauer in Anspruch nehmen. Die Dauer andere Aktivitäten hingegen ist begrenzt und wird auch bei langen Vorwarnzeiten nicht stärker ausgeweitet als nötig.

Tabelle 25: Mindest- und Höchstdauern für Aktivitäten während der Evakuierung

	Minimale Dauer [min]	Maximale Dauer [min]
erste Aktivität in Kette	10	
Bildung (B)/ Kindergarten(K)	10	45
Wohnen (W)	20	
Sonstiges (S)	20	240

I.2 Modellierung für nicht evakuierende Personen

In der Literatur finden sich wenige quantitative Angaben über das Verhalten von Personen, die nicht im Evakuierungsgebiet leben, jedoch von der Evakuierung betroffen sind. Daher sind folgende Annahmen frei abgeschätzt und basieren nicht

auf Angaben aus der Literatur oder Erhebungen. Anders als bei evakuierenden Personen ist hier nichts über eine Evakuierungsdauer bekannt, so dass als Bezugsgröße die Vorwarnzeit gewählt wird.

Personen, die im Evakuierungsgebiet wohnen und nicht evakuieren (Verweigerer)

- Dauer bis zur Rückkehr zur Wohnung: 20% der Vorwarnzeit

Personen, die außerhalb des Evakuierungsgebietes wohnen

Für die in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Verhaltensregeln im Evakuierungsfall werden im folgenden Parameter für die Entscheidungsdauer und die Aktivitätendauer festgelegt. Für Regel 1 wird geschätzt, dass Eltern kurze Zeit nach dem Evakuierungsaufruf ihre Kinder abholen. Wird eine andere Person abgeholt (Regel2), ist die Dauer bis zum Aufbruch länger, da die betreffende Person erst Zeit benötigt, um die persönlichen Sachen zusammen zu packen. Auch Absprachen im Vorfeld benötigen eine gewisse Zeit. Die Dauer des Abholens wird auch als eher lang angenommen, da die abzuholende Person eventuell Hilfe bei der Vorbereitung zur Evakuierung benötigt. Handelt es sich bei der Aktivität in Regel 2 nicht um das Abholen von Angehörigen, sondern um das Helfen im Evakuierungsgebiet sind sowohl die lange Entscheidungsdauer zur Vorbereitung der Hilfsmaßnahmen als auch die lange Aktivitätendauer ebenfalls gerechtfertigt.

Regel 1:

- Dauer bis zur Abholung der Kinder: 10% der Vorwarnzeit
- Aufenthaltsdauer in KITA: Mindestdauer Holen/Bringen

Regel 2:

- Aus der Literatur ist bekannt, dass zwischen 1 und 9% der Personen im Evakuierungsgebiet Hilfe von Angehörigen bekommen (Kapitel 3.3, Quelle 16).

$$\text{Anteil Abholer} = \frac{0,09 \cdot \text{Anzahl Personen im Evak.-gebiet}}{\text{Anzahl Personen außerhalb Evak.-gebiet}}$$

- Dauer bis zum Aufbruch: 30% der Vorwarnzeit
- Aktivitätendauer: 15% der Vorwarnzeit

Regel 3:

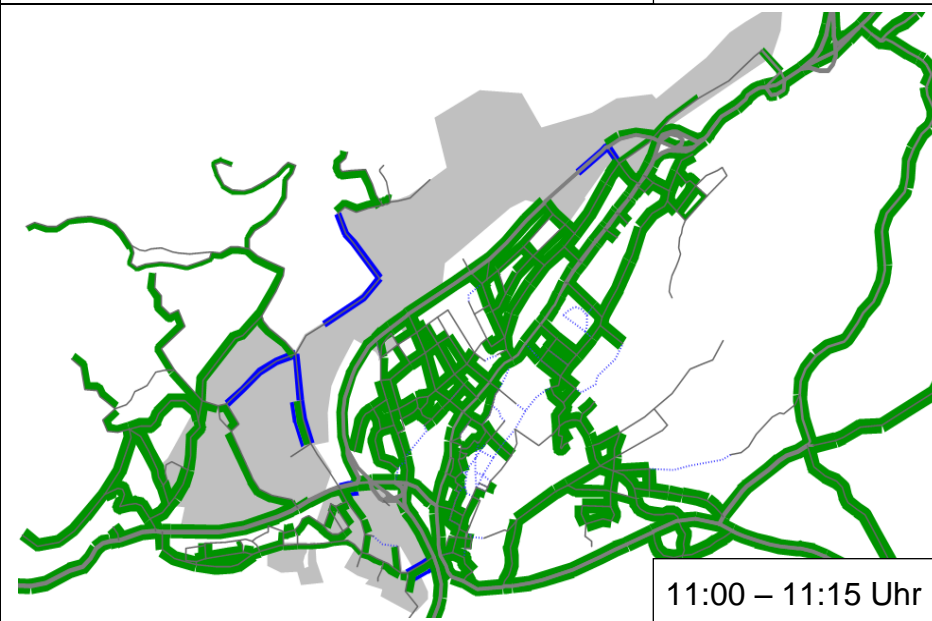
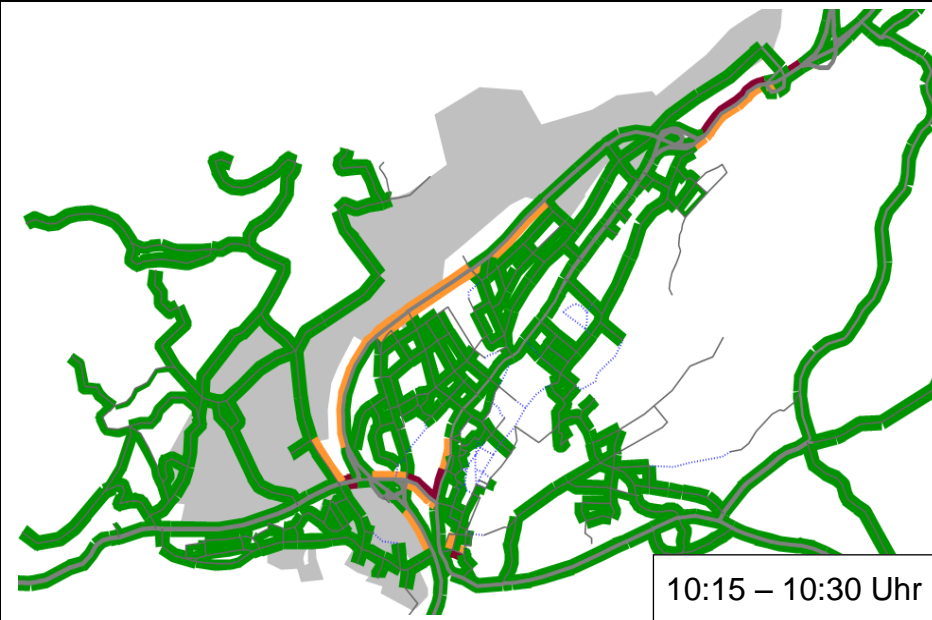
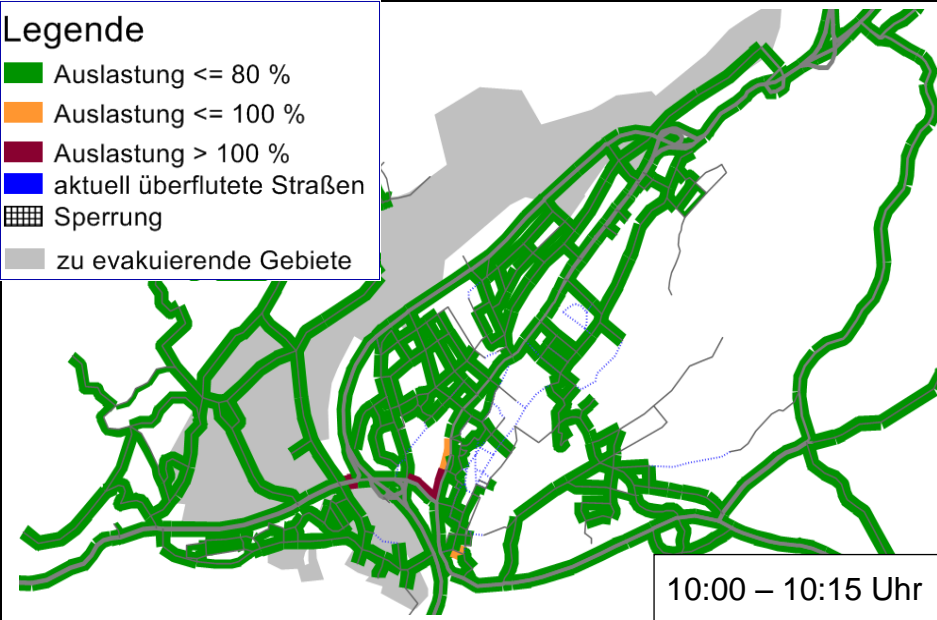
- Dauer bis zum Aufbruch aus dem Evakuierungsgebiet: 25% der Vorwarnzeit
- Anhang: Auslastungen

II Anhang: Auslastungen

Auslastungen Szenario Sicherer Ort – außerorts

Legende

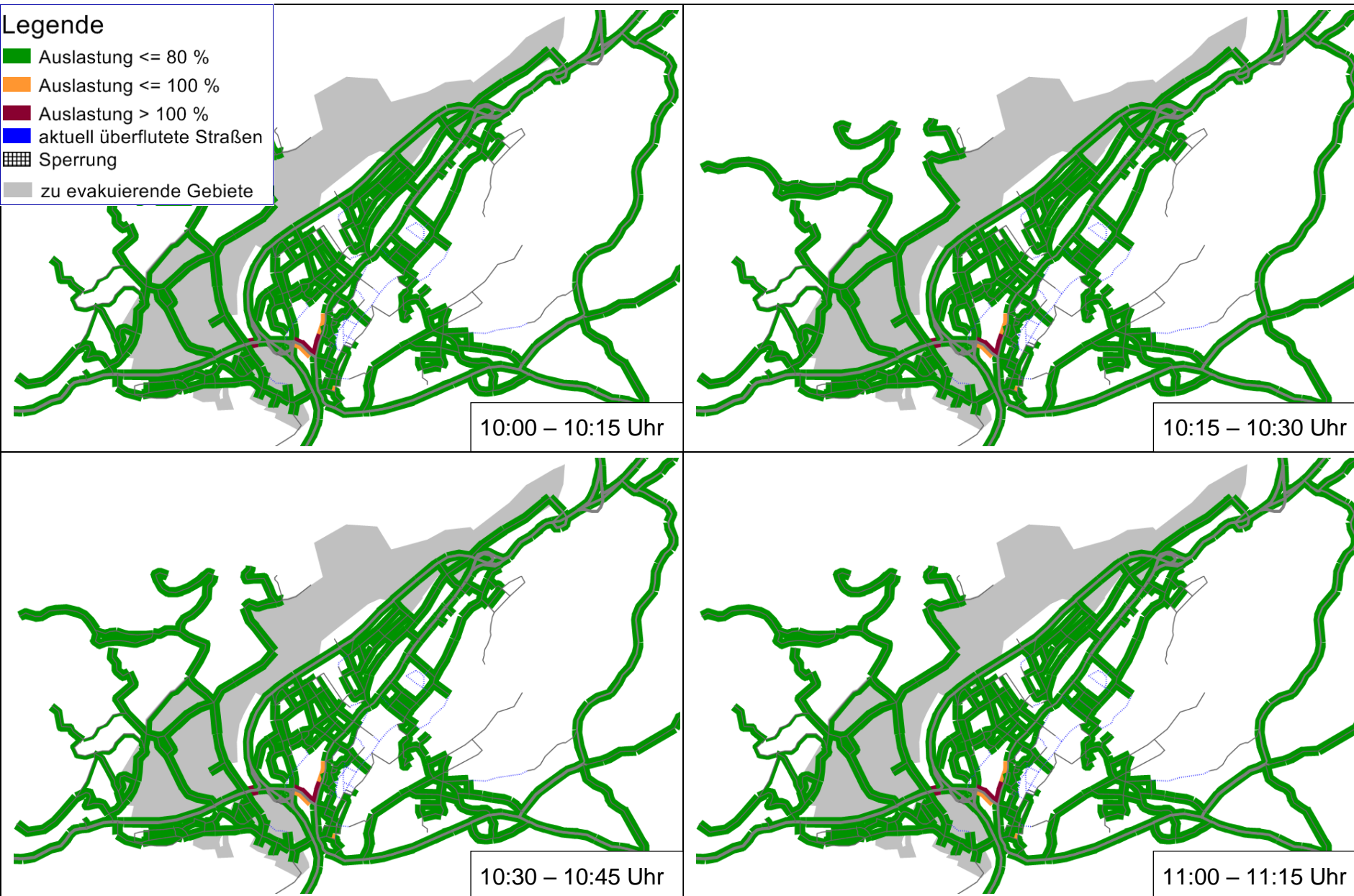
- Auslastung <= 80 %
- Auslastung <= 100 %
- Auslastung > 100 %
- aktuell überflutete Straßen
- Sperrung
- zu evakuierende Gebiete



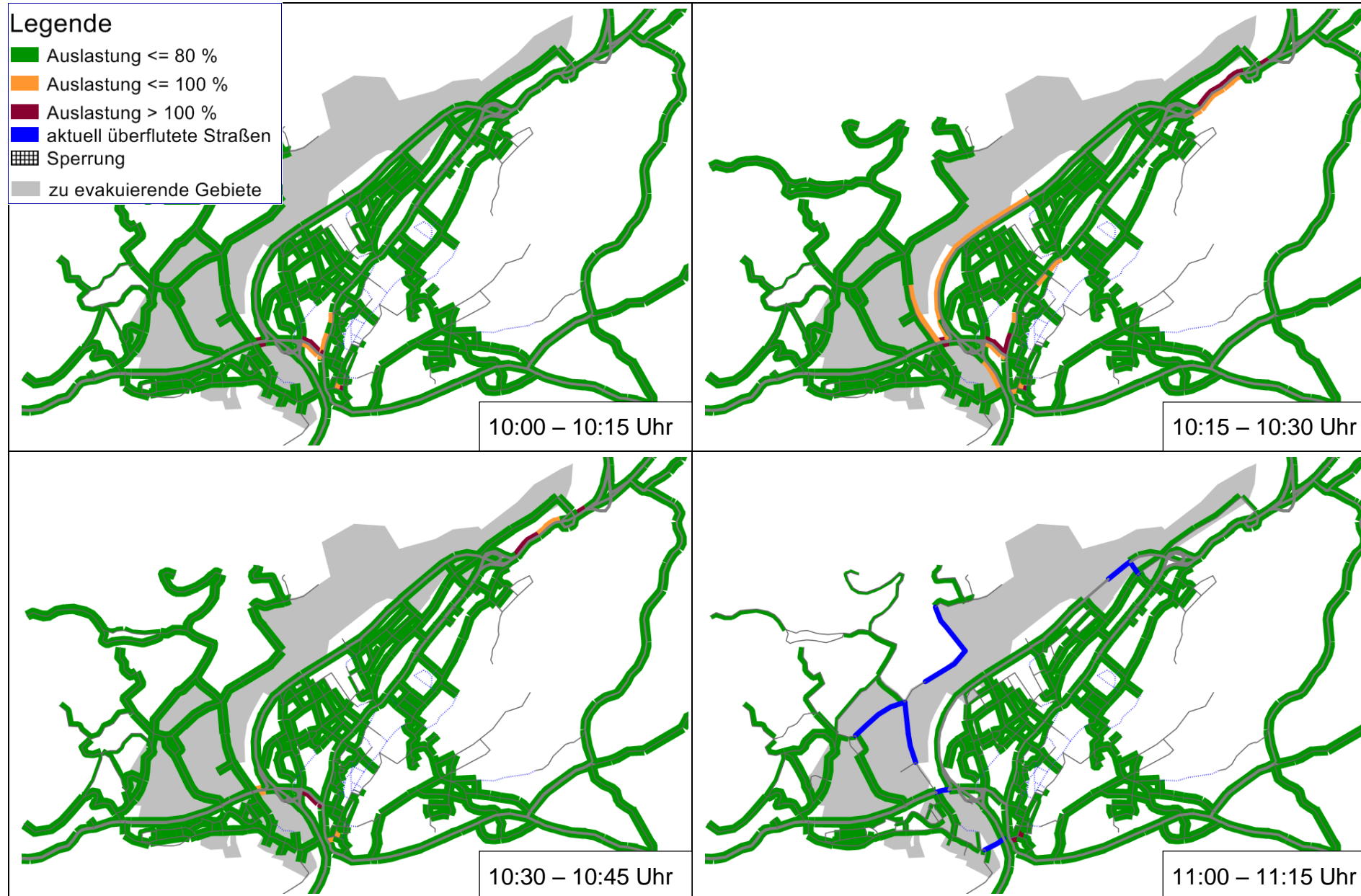
Auslastungen Szenario Sicherer Ort – innerorts

Legende

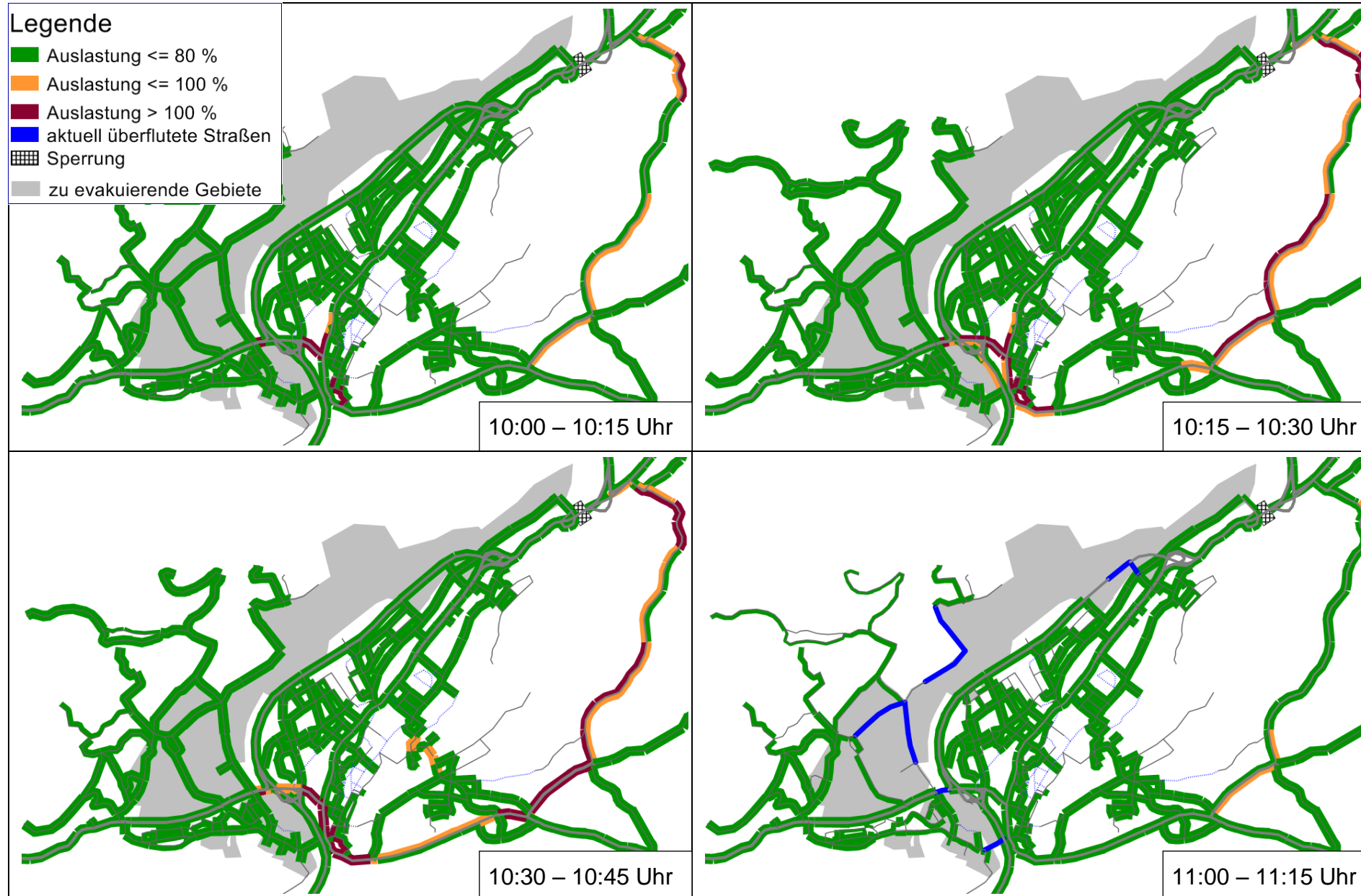
- Auslastung <= 80 %
- Auslastung <= 100 %
- Auslastung > 100 %
- aktuell überflutete Straßen
- Sperrung
- zu evakuierende Gebiete



Auslastungen Szenario Sicherer Ort – innerorts und außerorts

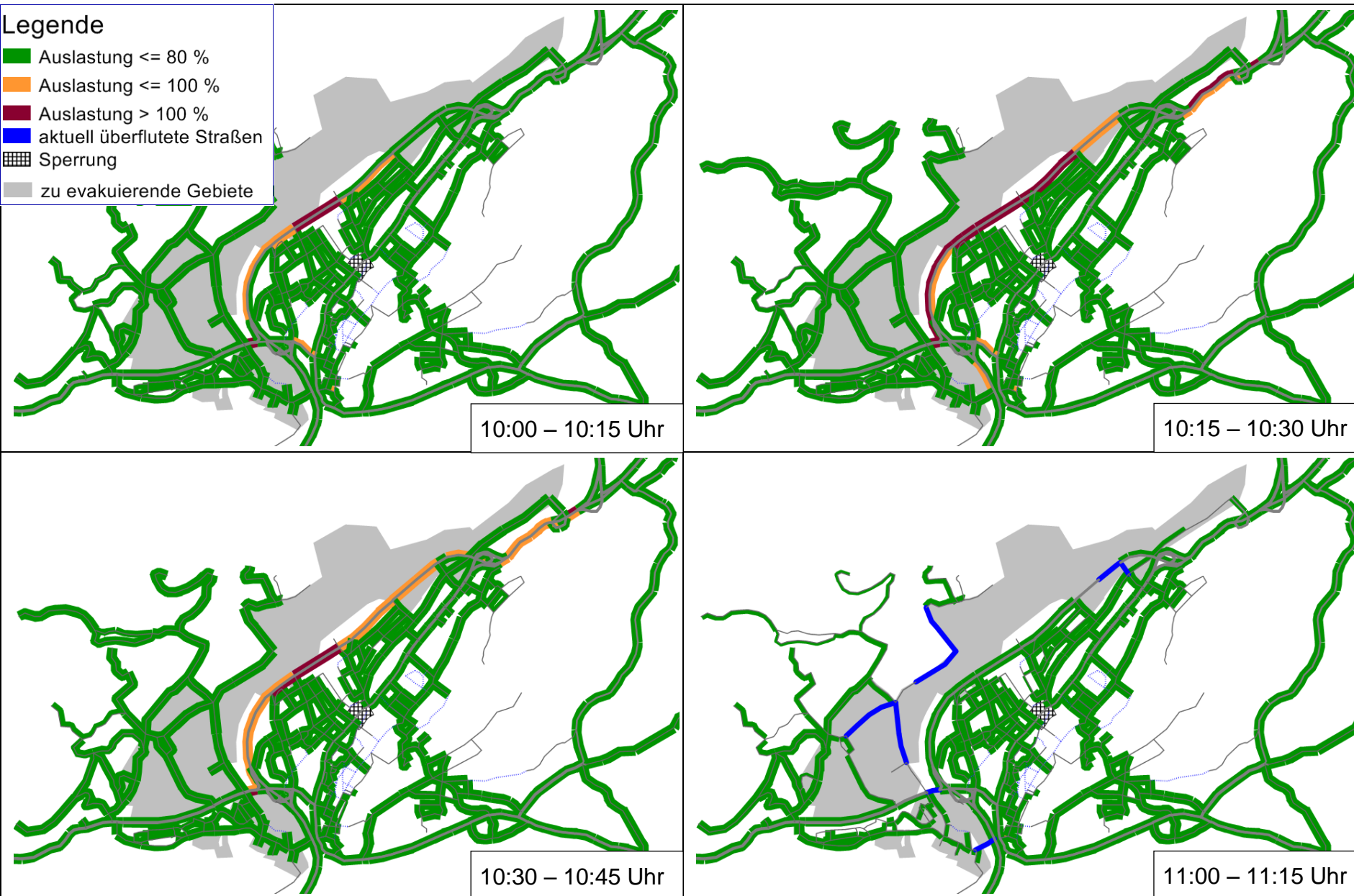


Auslastungen Szenario Sperrung – B21



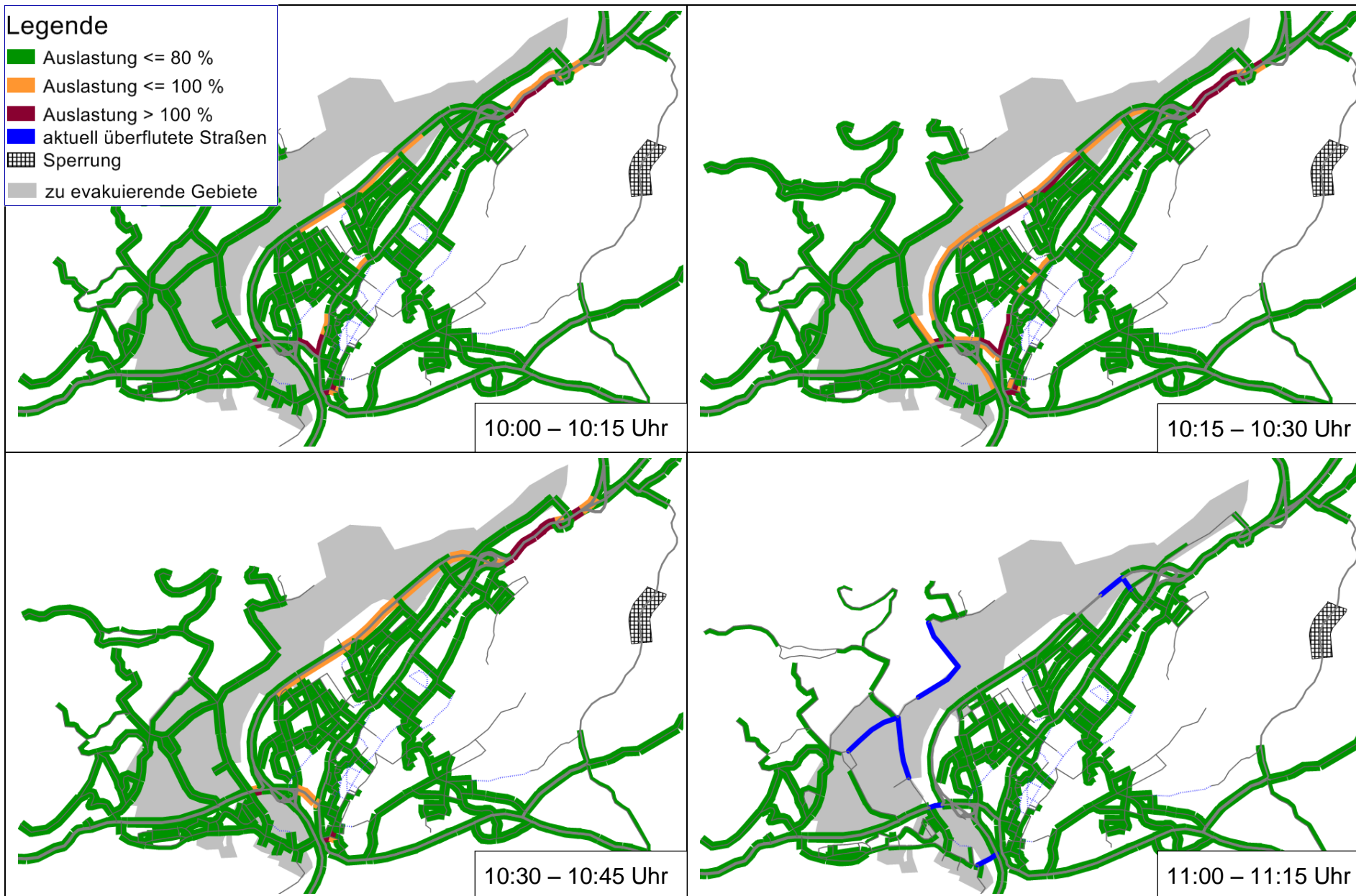
Auslastungen Szenario Sperrung – Wittelsbacherstraße

- Legende**
- Auslastung $\leq 80\%$
 - Auslastung $\leq 100\%$
 - Auslastung $> 100\%$
 - aktuell überflutete Straßen
 - Sperrung
 - zu evakuierende Gebiete



Auslastungen Szenario Sperrung – BGL4

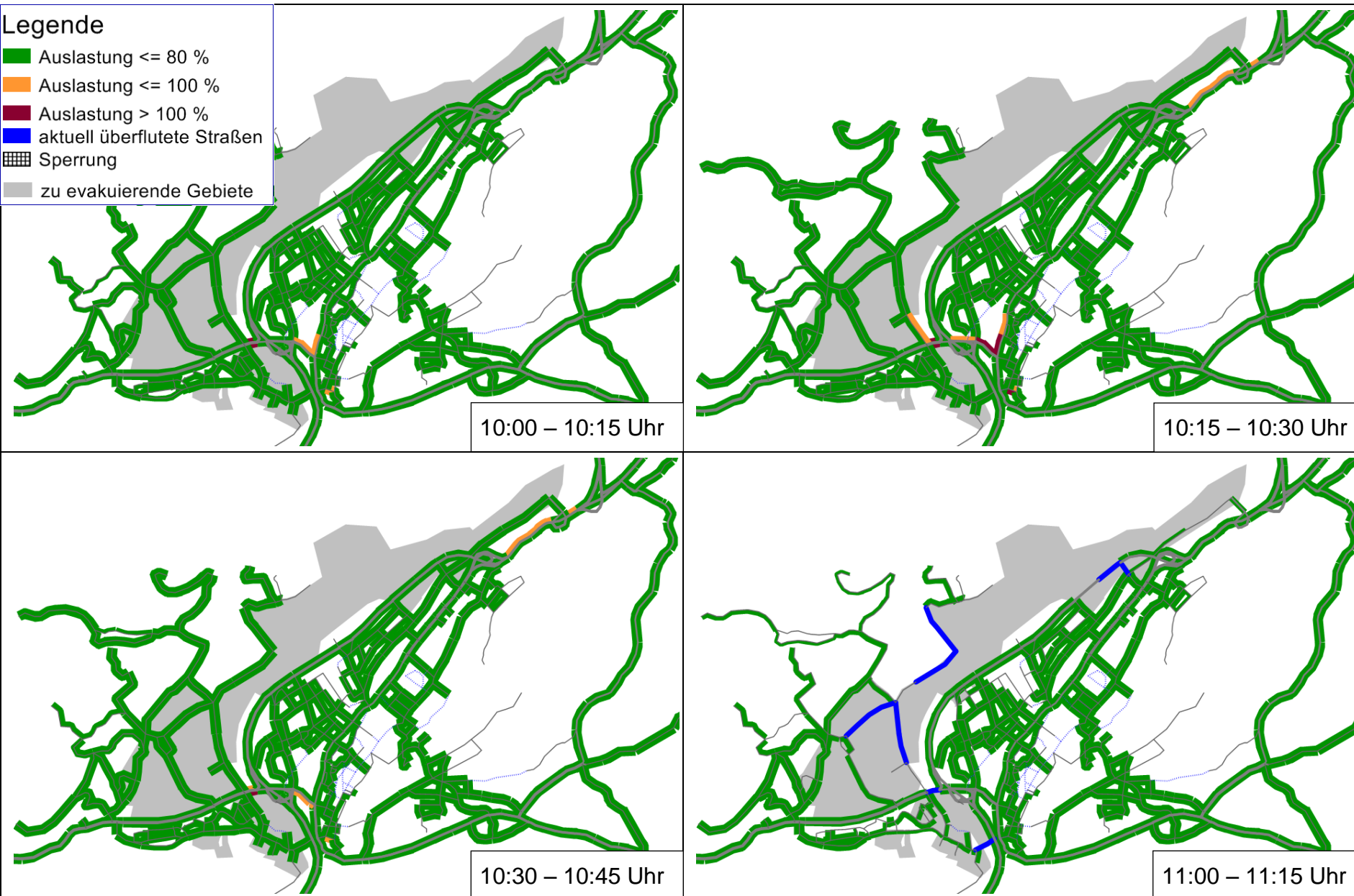
- Legende**
- Auslastung <= 80 %
 - Auslastung <= 100 %
 - Auslastung > 100 %
 - aktuell überflutete Straßen
 - Sperrung
 - zu evakuierende Gebiete



Auslastungen Szenario Umleitung

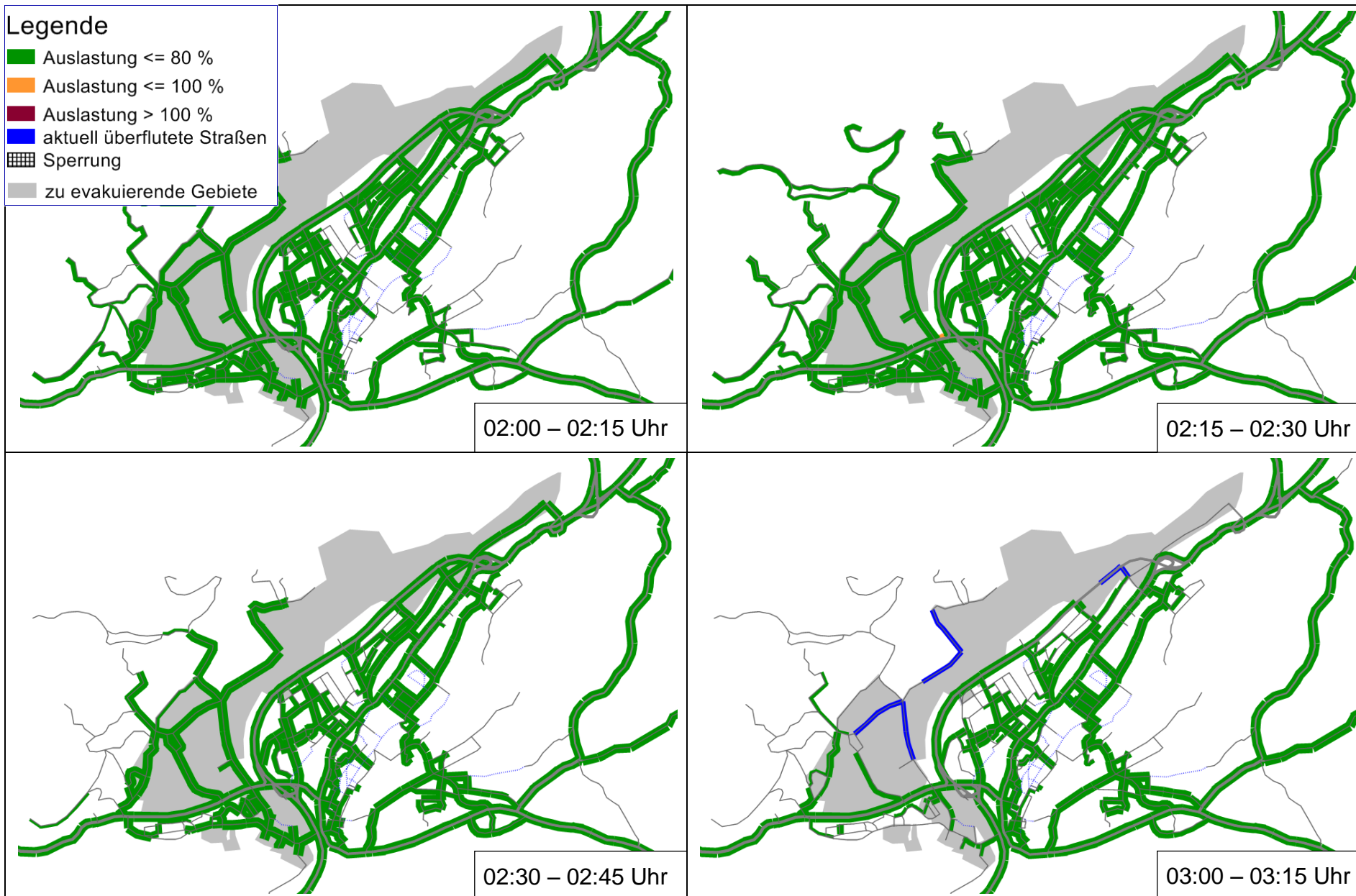
Legende

- Auslastung <= 80 %
- Auslastung <= 100 %
- Auslastung > 100 %
- aktuell überflutete Straßen
- Sperrung
- zu evakuierende Gebiete

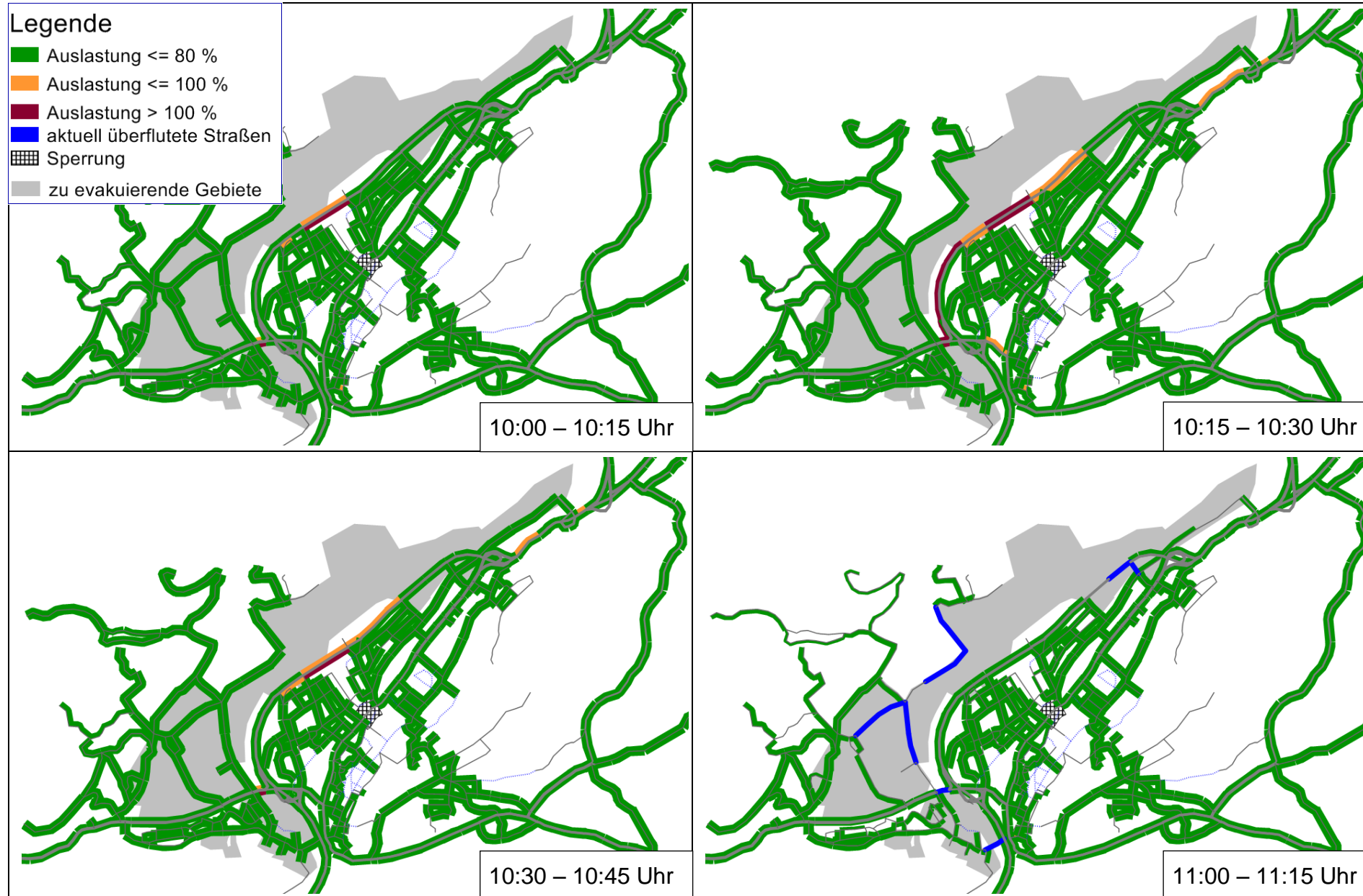


Auslastungen Szenario Nacht

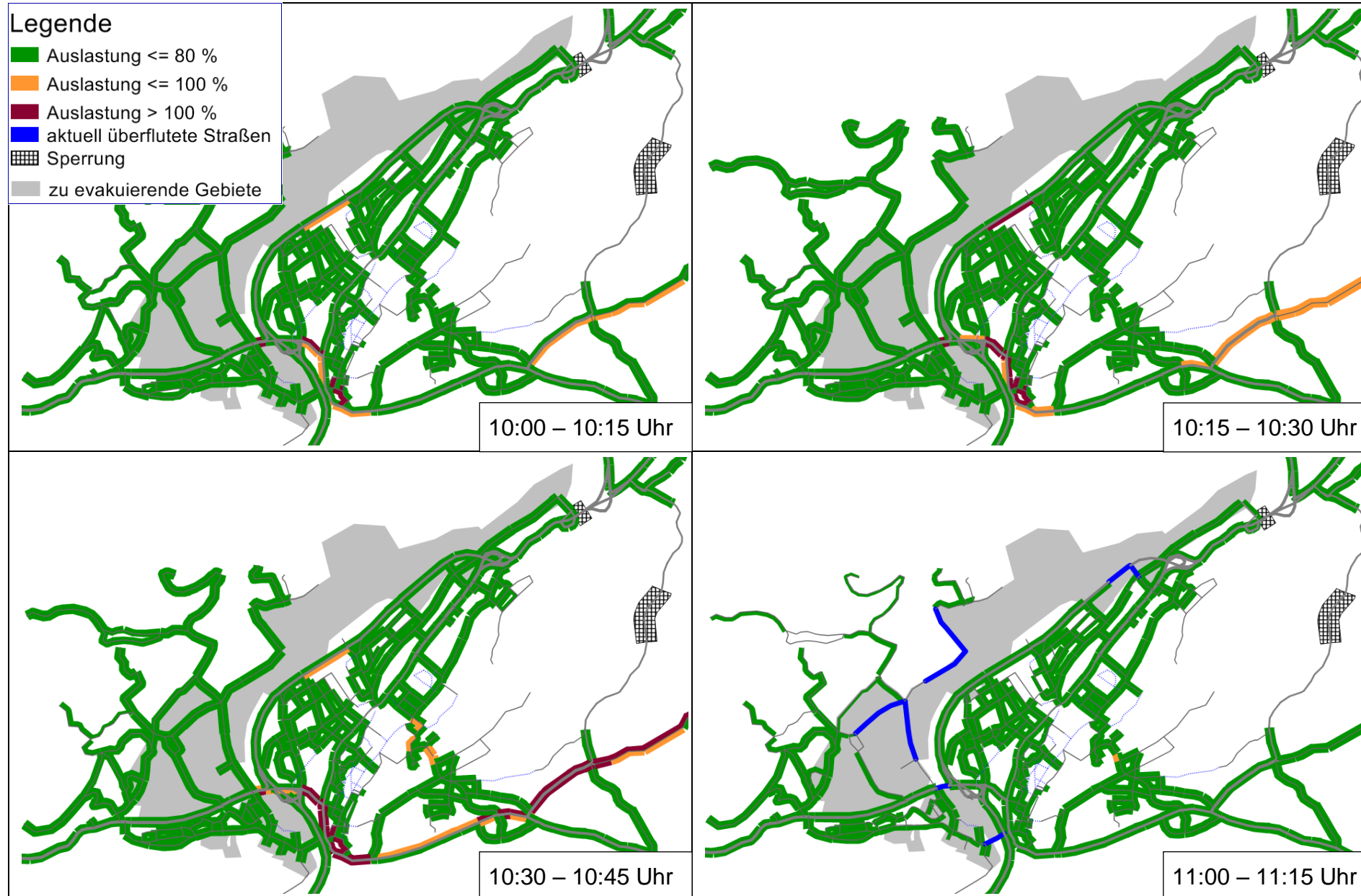
- Legende**
- Auslastung $\leq 80\%$
 - Auslastung $\leq 100\%$
 - Auslastung $> 100\%$
 - aktuell überflutete Straßen
 - Sperrung
 - zu evakuierende Gebiete



Auslastungen Szenario Kombi 1



Auslastungen Szenario Kombi 2



Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel EvaSim – Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Herma, Felix; Seidel, Jochen; Bárdossy, András (LHG) Wieprecht, Silke; Kramer, Matthias (LWW) Friedrich, Markus; Immisch, Katrin (VuV) Kuhn, Rainer; Alcántara, Sophia; Renn, Silvia; Sellke, Piet (ZIRIUS)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2012
	6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2013
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft (LWW) Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie (LHG) Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (VuV) Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS); Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 13N10594
	11. Seitenzahl 116
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 25
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 33
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, 30.04.2013	
18. Kurzfassung Das Vorhaben EvaSim – „Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen“ ist ein Beitrag im Rahmen des Sicherheitsforschungsprogramms der Bundesregierung, in dem innovative Lösungen entwickelt werden, um die Sicherheit der Bürgerinnen und Bürger im Falle von Hochwasserereignissen zu erhöhen. Durch die Kopplung der Simulation von Hochwasser- und Flutwellenausbreitung mit der Simulation von Verkehrsabläufen wird eine optimierte Evakuierung der Bevölkerung gewährleistet. Der interdisziplinäre Ansatz, der von der Hydrologie des Einzugsgebietes bis hin zum operationellen Einsatz im Hochwasserfall reicht, ist eine konsequente und durchgängige Methodik zur Verbesserung bestehender Katastrophenschutzpläne und wurde im Rahmen des Verbundprojektes an zwei beispielhaften Projektgebieten verwirklicht. Dieses Gebrauchsmuster steht nun für andere Projekte zur Verfügung.	
19. Schlagwörter EvaSim, Hydrologie, N-A-Modellierung, Hydraulische Simulation, Katastrophensoziologie, Fahrzeugstabilität, Verkehrsmodellierung, Katastrophenschutz	
20. Verlag	21. Preis