

Verbundprojekt U-THREAT

Resilienz unterirdischer ÖPNV-Systeme zur Gewährleistung der Verfügbarkeit

Schlussbericht zum Teilvorhaben „Verkehrliche Aspekte der betrieblichen Resilienz“

PTV AG



Zuwendungsempfänger: PTV Planung Transport Verkehr AG
Haid-und-Neu-Straße 15
76131 Karlsruhe

Förderkennzeichen: 13N14448

Laufzeit: 01.08.2017 – 30.10.2020

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14448 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin

Projektträger:
VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Alexander Dahl, PTV AG

Dr. Charlotte Fléchon, PTV AG

Dr.-Ing. Andreas Stadler, PTV AG

Katharina Wu, PTV AG

Änderungshistorie:

Version	Datum	Änderung	Autor	Status
0.1	01.11.20		Charlotte Fléchon	Entwurf
0.2	03.11.20	Maßnahmen hinzugefügt	Andreas Stadler	Entwurf
0.4	07.11.20	Beispiel 1 hinzugefügt	Andreas Stadler	Entwurf
0.7	07.11.20	Überarbeitung Abbildungen und Tabellen	Andreas Stadler	Entwurf
0.8	13.11.20	Beispiel 2 hinzugefügt	Andreas Stadler	Entwurf
0.9	10.12.20	Review		
10	11.12.20	Korrekturen	Charlotte Fléchon	Entwurf

Inhalt

Kurze Darstellung	4
1 Aufgabenstellung	4
1.1 Allgemeines	4
1.2 Das Verbundprojekt U-THREAT	4
1.3 Teilvorhaben „Verkehrliche Aspekte der betrieblichen Resilienz“	4
2 Voraussetzung des Vorhabens	6
3 Planung und Ablauf	7
3.1 Gesamtprojekt	7
3.2 Teilvorhaben	9
4 Wissenschaftlich-technischer Stand	12
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
Eingehende Darstellung	14
1 Erzielte Ergebnisse	14
1.1 Methodik zur Ermittlung der Vulnerabilität unterirdischer Verkehrssysteme auf Stations-, Tunnel-, Linien- und Verkehrsnetzebene	14
1.1.1 Szenarien der Bauwerksbedrohung	15
1.1.2 Qualitative Bewertungssysteme	15
1.1.3 Der U-THREAT-Ansatz: Semi- und vollständig quantitative Bewertungssysteme	16
1.2 Methodik zur Ermittlung der betrieblichen Vulnerabilität von Stationen	17
1.2.1 Aufgabe	17
1.2.2 Betriebliche Vorfilterkriterien für die Ableitung kritischer unterirdischer Stationen	18
1.2.3 Bewertung der Vulnerabilität von U-Bahn-Stationen aus betrieblicher Sicht	20
1.2.4 Quantifizierung von Bewertungsindikatoren	24
1.2.5 Geltungsbereich und Einschränkungen	41
1.2.6 Zusammenfassung	42
1.3 Exemplarische Vulnerabilitätsanalyse	42
1.3.1 Ableitung kritischer U-Bahn-Stationen durch Anwendung betrieblicher Vorfilterkriterien	42
1.3.2 Bewertung der Vulnerabilität von U-Bahn-Stationen aus betrieblicher Sicht	45
1.3.3 Zusammenfassung	85
1.4 Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs zur Gewährleistung eines temporären Verkehrsangebots	85
1.4.1 Bereitstellung von Word und Excel-Vorlagen	86
1.4.2 Beiträge zum Maßnahmenkatalog	90
2 Relevante Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	91
3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	92
3.1 Nutzen	92
3.2 Verwertbarkeit	92
4 Bekannt gewordener Fortschritt	93
5 Veröffentlichung der Ergebnisse	94
5.1 Vorträge	94
5.2 Publikationen	94

6 **Literaturverzeichnis**

95

Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

1.1 Allgemeines

Das Forschungsprogramm „Forschung für die zivile Sicherheit“ und die Förderbekanntmachung des BMBF vom 04. Januar 2016 zum Themenfeld „Zukünftige Sicherheit in urbanen Räumen“ adressieren die Ziele der Bekanntmachung zur Sicherung der Mobilität in urbanen Räumen und zum Schutz bei einem Ausfall kritischer Infrastrukturen, indem kritische Infrastrukturen identifiziert werden und somit ein zielgerichteter Schutz ermöglicht wird.

In diesem Rahmen wurde auch das Verbundvorhaben U-THREAT gefördert, das einen wesentlichen Beitrag zum oben genannten Themenfeld leisten soll, indem die betriebliche, die bauliche und die nutzerbezogene Resilienz von U-Bahn-Stationen untersucht und konkrete Maßnahmen abgeleitet und beschrieben werden.

Der vorliegende Schlussbericht behandelt das Teilvorhaben „Verkehrliche Aspekte der betrieblichen Resilienz“ der PTV zum Verbundprojekt U-THREAT. Der Bericht enthält Erläuterungen zur Aufgabenstellung, den Voraussetzungen, dem wissenschaftlich-technischen Stand und den inhaltlichen Ergebnissen. Grundlage der Forschungsarbeiten war die für den Projektantrag eingereichte Vorhabenbeschreibung.

1.2 Das Verbundprojekt U-THREAT

Das vorrangige Ziel des Verbundprojektes U-THREAT besteht in der signifikanten Erhöhung der Resilienz von unterirdischen öffentlichen Personennahverkehrs-(ÖPNV-)Systemen und ihren Nutzern.

Dieses Ziel sollte durch die Entwicklung einer umfassenden Methodik, mit der auch individuelle Randbedingungen solcher Systeme berücksichtigt werden können, erreicht werden. Anschließend sollten die entwickelten Ansätze an realen ÖPNV-Systemen in Deutschland und Frankreich exemplarisch erprobt und evaluiert werden.

Im Rahmen des Projekts wurden Konzepte und technische Lösungen erarbeitet, mit denen nach einem Vorfall rasch zunächst in einem eingeschränkten Modus weitergefahren und anschließend zum Normalbetrieb zurückgekehrt werden kann. Die Grundlage bildet ein Bewertungsschema, mit dem die Kritikalität von Abschnitten des U-Bahn-Netzes und einzelner Stationen ermittelt werden kann. Im Anschluss wurden Maßnahmen ausgearbeitet, mit denen die Resilienz in den maßgeblichen Bereichen Betrieb, Bauwerke und Nutzer erhöht werden kann.

1.3 Teilvorhaben „Verkehrliche Aspekte der betrieblichen Resilienz“

Im Rahmen des von der PTV bearbeiteten Teilvorhabens „Verkehrliche Aspekte der betrieblichen Resilienz“ standen die Ermittlung der bei Eintritt eines möglichen Schadensereignisses zu erwartenden verkehrlichen Wirkungen und die Erarbeitung entsprechender Schutzmaßnahmen im Vordergrund. Dabei sollte vom Antragsteller eine Methodik zur Identifizierung der betrieblichen Vulnerabilität bzw. verkehrlichen Kritikalität von U-Bahn-Stationen entwickelt werden, die Methodik als Software-Demonstrator umgesetzt und für zwei Städte angewendet sowie ein Maßnahmenkatalog zur Gewährleistung eines temporären Verkehrsangebots erstellt werden.

Als kritisch gelten dabei jene U-Bahn-Stationen, deren möglicher (Teil-)Ausfall mit erheblichen negativen Auswirkungen, z. B. hinsichtlich der Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer, verbunden ist. Sofern kritische Stationen identifiziert worden sind, können geeignete Maßnahmen zu ihrem Schutz ergriffen oder redundante Verkehrsangebote vorgehalten werden, um den Ausfall der Stationen zu verhindern bzw. die Ausfallwirkungen möglichst gering zu halten und so die Resilienz des Gesamtsystems gegenüber größeren Schadensszenarien zu erhöhen.

Das im Teilvorhaben entwickelte und zur Anwendung gebrachte Verfahren beinhaltet modellgestützte Berechnungen zu den Ausfallwirkungen. Dazu kommen makroskopische Verkehrsmodelle für den ÖPNV zum Einsatz. Insgesamt sollte so ein grundsätzlich übertragbares Instrumentarium geschaffen werden, mit dem ÖPNV-Unternehmen eine bessere Beurteilung ihres Netzes hinsichtlich kritischer Stationen ermöglicht wird. Das Verfahren wird in das übergeordnete Gesamtverfahren zur Bewertung der Vulnerabilität von

ÖPNV-Stationen eingebracht bzw. entsprechend den Vorgaben hinsichtlich des Gesamtverfahrens ausgerichtet.

Darüber hinaus war die Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs zur Gewährleistung eines temporären Verkehrsangebots während des Zeitraums zwischen dem Eintritt eines Schadensereignisses und der Rückkehr des ÖPNV zum Normalbetrieb Bestandteil des Teilvorhabens. Damit soll ÖPNV-Unternehmen und Kommunen eine Zusammenstellung generell geeigneter Maßnahmen zur Verfügung gestellt werden, auf deren Basis konkrete Maßnahmen für einzelne Städte erarbeitet werden können.

2 Voraussetzung des Vorhabens

Mit dem oben skizzierten Teilvorhaben „Verkehrliche Aspekte der betrieblichen Resilienz“ beteiligte sich die PTV am Verbundprojekt „Resilienz unterirdischer ÖPNV-Systeme zur Gewährleistung der Verfügbarkeit“, das im Rahmen der Bekanntmachung „Zukünftige Sicherheit in urbanen Räumen“ seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert wurde.

Das Teilvorhaben ist damit in ein Gesamtkonzept eingebettet und besitzt eine Vielzahl von Verknüpfungen zu Teilvorhaben anderer Projektpartner, deren Arbeitsschwerpunkte in anderen Themengebieten liegen. Es existieren vielfach Bereiche, in denen sich inhaltliche Schnittmengen zwischen dem Arbeitsgebiet der PTV und anderen Partnern ergaben und sich die Expertisen der einzelnen Partner ergänzten. Damit konnte sichergestellt werden, dass im Verbundprojekt insgesamt ein ganzheitlicher Untersuchungsansatz verfolgt wurde.

3 Planung und Ablauf

3.1 Gesamtprojekt

Im Gesamtprojekt U-THREAT waren die in untenstehender Tabelle 1 aufgelisteten Verbundpartner involviert.

Tabelle 1: Verbundpartner des Projektes U-THREAT

	<p>Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) Mathias-Brüggen-Straße 41 50827 Köln Deutschland</p>
	<p>Centre d'Études des Tunnels (CETU) 25 Avenue François Mitterrand 69500 Bron Frankreich</p>
	<p>Ruhr-Universität Bochum (RUB) Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb (TLB) Universitätsstraße 150 – Gbe. IA 5/26 44780 Bochum Deutschland</p>
	<p>IFSTTAR (jetzt Université Gustave Eiffel) 25 Avenue François Mitterrand 69500 Bron Frankreich</p>
	<p>PTV Planung Transport Verkehr AG (PTV) Haid-und-Neu-Straße 15 76131 Karlsruhe Deutschland</p>
	<p>ARCADIS France (ARC) 127 Boulevard de Stalingrad 69100 Villeurbanne Frankreich</p>

	<p>init innovation in traffic systems GmbH (INIT) Käppelestraße 4-10 76131 Karlsruhe Deutschland</p>
	<p>Keolis (KL) 19 Boulevard Marius Vivier Merle 69003 Lyon Frankreich</p>
	<p>Hamburger Hochbahn Wache (HHW) Hühnerposten 1 20097 Hamburg Deutschland</p>
	<p>SYTRAL 21 Boulevard Marius Vivier Merle 69003 Lyon Frankreich</p>
	<p>Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés (STRMTG) Domaine Universitaire, 1461 Rue de la Piscine 38400 Saint-Martin-d'Hères Frankreich</p>
	<p>Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) Kamekestraße 37 50672 Köln Deutschland</p>

Die Gesamtprojektleitung des Verbundprojektes U-THREAT wurde der Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) übertragen. In diesem Zusammenhang übernahm Herr Dr. Christian Thierert die Rolle des Projektkoordinators. Die Projektkoordination beinhaltete die sachliche und zeitliche Koordinierung der Arbeiten der einzelnen Verbundpartner, das Herbeiführen von Abstimmungen sowie die Durchführung des Qualitätsmanagements. Dies schließt die Eigenevaluierung im Hinblick auf die Erreichung der Projektziele ein.

Bei diesen Aufgaben wurde der Projektkoordinator von den Leitern der einzelnen Arbeitspakete unterstützt. Entsprechend ihrer Expertise wurde die AP-Koordinierung wie folgt auf die Verbundpartner aufgeteilt:

- AP 1 – Bedrohungs- und Ereignisidentifikation: RUB
- AP 2 – Sicherheitsanfälligkeit und Statusanalyse: ARC
- AP 3 – Betriebliche Aspekte: INIT

- AP 4 – Strukturelle Fragen: CETU
- AP 5 – Benutzerbezogene Aufgaben: IFFSTAR
- AP 6 – Strategisches Konzept und Leitlinie: KL
- AP 7 – Verbreitung und Standardisierung: STUVA
- AP 8 – Projektmanagement: STUVA

Das U-THREAT-Projekt gliederte sich in acht Arbeitspakete (AP) mit jeweils mehreren Aufgaben (T). Die Zuordnung zum Gesamtkonzept ist in Abbildung 1 dargestellt. AP 1 und 2 zielten auf die Identifikation möglicher Bedrohungsszenarien und Ereignisse sowie auf eine Vulnerabilitäts- und Statusanalyse ab. Dies beinhaltete insbesondere auch die Beschreibung von derzeitigen Praktiken in Frankreich und Deutschland. Die drei nachfolgenden AP 3, 4 und 5 befassten sich mit der Entwicklung von Innovationen zur Verbesserung der Resilienz unter Berücksichtigung betrieblicher, baulicher und nutzerbezogener Aspekte. Dabei wurden jeweils die folgenden vier Punkte betrachtet: Bewertung der Lage nach einem Ereignis, eingeschränkter Betrieb, Rückkehr zum Normalbetrieb und Verbesserung der Resilienz. AP 6 behandelte die Ausarbeitung eines strategischen Konzepts, in welchem effektive Maßnahmen mit hohem Nutzen-Kosten-Verhältnis herausgestellt werden. Wesentliche Ergebnisse wurden alsdann im Rahmen ausgedehnter Demonstrationsaktivitäten, insbesondere die Durchführung einer Evakuierungsübung, auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht. AP 7 befasste sich mit einschlägigen Verbreitungs- und Normungsaktivitäten und das abschließende AP 8 mit dem Projektmanagement zwecks Einhaltung des zeitlichen und qualitativen Leistungsumfangs.

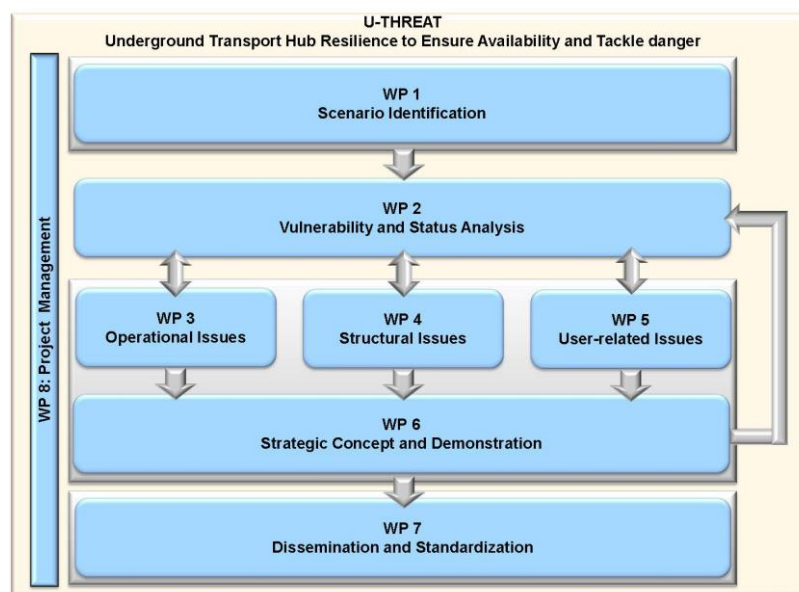


Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitspakete (AP) im Projekt U-THREAT (Quelle: U-THREAT Gesamtvorhaben)

3.2 Teilvorhaben

Innerhalb des von der PTV bearbeiteten Teilvorhabens lag die Projektkoordination bei Herrn Dr. A. Dahl. Der Projektkoordinator war innerhalb der PTV dafür verantwortlich, die einzelnen Belange auch projektübergreifend zu koordinieren und abgestimmte Entscheidungen herbeizuführen. Die Entwicklung des Verfahrens zur Ermittlung der betrieblichen Vulnerabilität bzw. verkehrlichen Kritikalität von U-Bahn-Stationen (Kritikalitätsverfahren) wurde von Herrn Dr. A. Dahl, Herrn Dr. A. Stadler und Frau Dr. C. Fléchon entwickelt. Die Umsetzung des Verfahrens erfolgte durch Herrn Dr. A. Stadler, Frau K. Wu und Frau Dr. C. Fléchon. Der Maßnahmenkatalog wurde von Herrn Dr. A. Stadler, Frau E. Niemeier und Frau Dr. C. Fléchon erarbeitet.

Die Beiträge der PTV in den Arbeitspaketen AP 2, 3 und 6 können wie folgt zusammengefasst werden:

Im Arbeitspaket 2 wurde das Gesamtverfahren zur Ermittlung der Vulnerabilität von ÖPNV-Stationen aus betrieblicher, baulicher und nutzerbezogener Sicht erarbeitet. Außerdem wurde ein Verfahren zur Klassifizierung von ÖPNV-Stationen hinsichtlich ihrer Kritikalität erstellt. Bei beiden Verfahren war die PTV schwerpunktmäßig für betriebliche Aspekte verantwortlich.

Im Rahmen der Verfahrenserarbeitung wurde zunächst der Frage nachgegangen, welche Parameter geeignet sind, um den Grad der Vulnerabilität von ÖPNV-Stationen bezüglich der in Aufgabe 1.3 als maßgeblich definierten Szenarien zu ermitteln. Dabei übernahm die PTV hauptverantwortlich die Ermittlung geeigneter Parameter aus betrieblicher Sicht, wobei bereits berücksichtigt wurde, dass diese Parameter als Ergebnis der in Aufgabe 3.1 zu erarbeitenden Methodik zur Ableitung kritischer Stationen vorliegen müssen. Als geeignete Kenngrößen haben sich die aus den Schadensszenarien resultierenden zusätzlichen Reisezeiten, die zusätzlichen Betriebskosten und die Dauer bis zur Aufnahme des Normalbetriebs erwiesen. Mittels dieser möglichen Parameter kann ausgedrückt werden, wie anfällig die ÖPNV-Station gegenüber einzelnen Schadensszenarien ist. Je höher die jeweiligen Werte sind, desto anfälliger ist die Station aus betrieblicher Sicht.

Darüber hinaus stimmte sich die PTV mit den übrigen im Teilarbeitspaket beteiligten Partnern (insbesondere RUB, aber auch INIT und ARCADIS) zu Parametern in den Bereichen Bauwerk und Nutzer ab, um bereits bei der Auswahl zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Parameter im Rahmen des Verfahrens miteinander zu einer Gesamtaussage hinsichtlich der Vulnerabilität kombinierbar sind. Im Anschluss wurde die Methodik zur Ermittlung dieser Gesamtaussage unter Mitwirkung der PTV zusammen mit den Partnern RUB, INIT und ARCADIS erarbeitet. Dabei konnte auf Erfahrungen aus zurückliegenden Projekten im Bereich der zivilen Sicherheit (SKRIBT und SKRIBT^{Plus}) zurückgegriffen werden, in denen Verfahren zur gesamthaften Ermittlung der Kritikalität von Brücken und Tunneln erarbeitet wurden.

Das in AP 2 entstandene Verfahren wird in den Deliverables [UT20-1], [UT20-2] und [UT20-3] ausführlich beschrieben.

Im AP 3 wurde ein Verfahren zur Identifizierung kritischer ÖPNV-Stationen erarbeitet und softwareseitig als Demonstrator implementiert. Die Arbeiten der PTV setzten direkt auf den Ergebnissen von AP 2 auf bzw. unterfüttern diese, um die Vulnerabilität von Stationen beurteilen zu können. Insbesondere wurden die Festlegungen aus AP 2 hinsichtlich der betrieblichen Parameter, die im Gesamtverfahren zur Bewertung der Vulnerabilität von ÖPNV-Stationen verwendet werden, berücksichtigt.

Um die kritischen Stationen zu identifizieren, wurde zunächst ein Vorfilter entwickelt. Der Vorfilter ermöglicht anhand einfach zugänglicher Indikatoren eine erste Einstufung der Kritikalität von Stationen, so dass anschließend nur die am kritischsten eingestufteten Stationen einer aufwendigen ausführlichen Vulnerabilitätsanalyse unterzogen werden müssen. Als Indikatoren wurden die Anzahl der Passagiere (Aussteiger, Einsteiger, Durchfahrende) zur Berücksichtigung der Nachfrage und die Anzahl der Sitz- und Stehplätze zur Berücksichtigung des Verkehrsangebots (Kapazität) ausgewählt.

Zur Ermittlung der betrieblichen Parameter wurden für die in AP 2 entwickelte sektorenübergreifende Vulnerabilitätsanalyse zwei Verfahren entwickelt: ein umfassender, modellbasierter Ansatz und ein vereinfachter Ansatz, der kein Verkehrsmodell benötigt.

Im modellbasierten Ansatz wird ein makroskopisches Verkehrsmodell dazu verwendet, für ein definiertes Gebiet (z. B. Stadt) die Verkehrsnachfrage zu ermitteln und diese Nachfrage im Rahmen der sogenannten Umlegung auf das Verkehrsangebot abzubilden. Als Ergebnis einer Umlegung liegen beispielsweise Verkehrsbelastungen pro Strecken- bzw. Linienabschnitt vor. Die dazu im Projekt verwendete Software, PTV Visum, erlaubt auf der Basis der Umlegungsergebnisse zahlreiche weitere Auswertungen, wie z. B. die Ermittlung von Fahrleistung und Verkehrsbeteiligungsdauer im Netz oder die Berechnung der Auslastung einzelner Netzelemente.

Im Modell können insbesondere auch die Wirkungen eines als Folge des Ausfalls von Stationen oder Tunneln veränderten Verkehrsangebotes (z. B. Wegfall von Linien, Fahrplanänderungen oder wegfallende Umsteigemöglichkeiten) auf das Verhalten der Nutzer prognostiziert werden. Diese Eigenschaft wird im Rahmen des Kritikalitätsverfahrens dazu genutzt, die Verkehrssituation im Normalfall (Bezugsfall) mit der im Falle eines Ausfalls der jeweils untersuchten ÖPNV-Station (Planfall) zu erwartenden Situation anhand von Indikatoren zu vergleichen.

Das vereinfachte Verfahren stützt sich auf Abschätzungen durch frei verfügbare Geoinformationen in Verbindung mit vereinfachenden Annahmen zu Nutzerverhalten und geändertem Verkehrsangebot. Bei beiden Ansätzen werden dieselben Bewertungsindikatoren – zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Betriebskosten und Dauer des Ausfalls der Station(steile) – berücksichtigt.

Zusätzlich hat die PTV im Rahmen des Teilarbeitspaketes zu dem im Projekt zu erarbeitenden Maßnahmenkatalog beigetragen, der Lösungsansätze zur Bereitstellung eines temporären Verkehrsangebots während der Wiederherstellung der Betriebsfähigkeit einer ÖPNV-Station enthält. Dabei wurden insbesondere

auch Möglichkeiten im Bereich der Neuen Mobilitätsformen berücksichtigt und deren Kapazitäten beleuchtet.

Im AP 6 wurden sowohl der Vorfilter zur Identifizierung kritischer ÖPNV-Stationen als auch beide im Rahmen von AP 3 entwickelte und softwareseitig zu Demonstrationszwecken umgesetzte Kritikalitätsverfahren auf die Stationen zweier ÖPNV-Netze exemplarisch angewendet.

Im Rahmen der Verfahrensanwendungen wurden entsprechende Rechenläufe ausgeführt und deren Ergebnisse ausgewertet und geprüft sowie mit den Partnern diskutiert. Über Vergleiche der Ergebnisse mit durchschnittlichen Kenngrößen und Erfahrungswissen wurde eruiert, ob sie hinsichtlich der Größenordnungen plausibel erscheinen. Neben der allgemeinen Prüfung der Plausibilität der Einzelergebnisse wurden insbesondere auch die Ergebnisse des modellbasierten und des vereinfachten Ansatzes miteinander verglichen.

4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Es existieren weiterhin nur wenige spezifische Ansätze zur Identifizierung kritischer Verkehrsanlagen. Generell beziehen sich diese auf die Ermittlung der betrieblichen Vulnerabilität bzw. verkehrlichen Kritikalität von Streckenabschnitten und Bauwerken der Straßeninfrastruktur. Dabei wird modellbasiert ein netzweiter Vergleich der Situation bei Voll- oder Teilsperre des Streckenabschnitts bzw. Bauwerks mit derjenigen Situation bei voller Nutzbarkeit des Streckenabschnitts bzw. Bauwerks vorgenommen. Je nach Ansatz werden eine oder mehrere verkehrliche Wirkungen bzw. ihnen zugeordnete Indikatoren (z. B. Reisezeiten, Emissionen) miteinander verglichen. Im Falle des Vergleichs mehrerer Wirkungen werden die in ihren originären Einheiten vorliegenden Indikatoren monetarisiert und zusammengefasst, d. h. ihre Ausprägungen werden basierend auf Erkenntnissen bzgl. der gesamtwirtschaftlichen Bedeutung des jeweiligen Indikators über entsprechende Wertansätze in Geldwerte transformiert und zu einer aussagekräftigen monetären Kennzahl zusammengefasst. Über einen Vergleich der resultierenden Kennzahlen sind abschließend Reihungen der Bauwerke hinsichtlich ihrer Kritikalität möglich.

Neben der im Rahmen der Verbundprojekte SKRIBT [SK13] und SKRIBT^{Plus} [SK14] maßgeblich von der PTV AG entwickelten Methode ist ein weiterer Ansatz der ETH Zürich [ER10] bekannt. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei der behandelten Problematik um ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet handelt, wurden viele Fragestellungen erst während der Entwicklung dieser beiden vorhandenen Verfahren identifiziert. Einige Aspekte, insbesondere die Ermittlung kritischer Infrastrukturen des ÖPNV, mussten aufgrund des Pilotcharakters der Verfahren bislang unbeantwortet bleiben.

Weiterhin wurden im Zusammenhang mit dem schweizerischen Forschungsprojekt „Ermittlung des Netzrisikos“ und dem EU-Projekt „SeRoN – Security of Road Transport Networks“ des 7. Forschungsrahmenprogramms (in dem die PTV die Rolle des Projektkoordinators inne hatte) Methoden entwickelt, mit deren Hilfe das Netzrisiko einzelner Streckenabschnitte des Straßennetzes bzw. die Wichtigkeit definierter Brücken und Tunnel für das Straßennetz abgeschätzt werden können [SE12]. Beide Projekte betrachten aber ausschließlich den Straßenverkehr.

Die vorliegenden Verfahren zum Straßenverkehr sind nicht direkt auf die Analyse der Kritikalität von ÖPNV-Stationen übertragbar. Dieser Umstand liegt in der unterschiedlichen Organisationsform des Straßenverkehrs und des ÖPNV begründet: Während beim schienengebundenen ÖPNV das Bedienungsangebot, bestehend aus den Linien des ÖPNV mit den Fahrplänen und Fahrzeugkapazitäten, die Verkehrsnachfrage der Verkehrsteilnehmer und das infrastrukturelle Angebot, bestehend aus dem Gleisnetz und seinen Kapazitäten, zusammenbringt, entfällt diese Mittlerrolle beim Straßenverkehr. Im Straßenverkehr entscheidet der Verkehrsteilnehmer selbst, welche Route er im Straßennetz zu welcher Zeit wählt, im ÖPNV ist er in seinen diesbezüglichen Wahlentscheidungen an das Bedienungsangebot gebunden. Dieser fundamentale Unterschied spiegelt sich auch in den Verkehrsmodellen des Straßenverkehrs und des ÖPNV wider, deren wesentliche Aufgabe neben der Ermittlung der Verkehrsnachfrage selbst das Umlegen dieser Nachfrage auf das Verkehrsangebot und damit die Ermittlung von Belastungen einzelner Strecken- und Linienabschnitte ist. Hier werden entsprechend unterschiedliche Verfahren im Straßenverkehr und im ÖPNV zur Anwendung gebracht. Obwohl also die bestehenden Kritikalitätsverfahren für den Straßenverkehr genau wie das im Rahmen dieses Teilvorhabens entwickelte Kritikalitätsverfahren für den ÖPNV derartige Verkehrsmodelle zur Wirkungsermittlung verwenden, konnten die Verfahren des Straßenverkehrs deshalb nicht direkt auf den ÖPNV übertragen werden. Vielmehr war eine weitgehende Neuentwicklung des Verfahrens erforderlich.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund des interdisziplinären Ansatzes von U-THREAT, mit dem eine ganzheitliche Betrachtung der Vulnerabilität von U-Bahn-Stationen ermöglicht wurde, war eine Kooperation verschiedenster Partner aus Industrie, Praxis und Wissenschaft erforderlich. Daher wurde U-THREAT als Verbundprojekt geplant und durchgeführt. Im Rahmen aller Arbeitspakete fanden intensive Kooperationen zwischen den Verbundpartnern statt. Die Projektpartner bildeten ein Konsortium, deren Rechte und Pflichten untereinander in einem Konsortialvertrag festgelegt wurden.

Die Kooperationen beeinflussten auch die im Rahmen des Teilvorhabens der PTV ausgeführten Arbeiten positiv.

Im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung des Kritikalitätsverfahrens fand ein intensiver Austausch mit den Partnern RUB, ARC und INIT statt. Dieser Austausch ermöglichte es maßgebend, anschließend das erweiterte Identifizierungsverfahren zur Ermittlung der Vulnerabilität zu erstellen, dass die jeweils sektoralen Betrachtungsweisen zusammenführte.

Auch im Zusammenhang mit der Erarbeitung des betrieblichen Maßnahmenkatalogs fand ein intensiver Austausch mit den Partnern INIT, STUVA und RUB statt. Wichtig war außerdem die Rückkopplung und Diskussion der (Zwischen-) Ergebnisse mit den beteiligten Praxispartnern HHW und Keolis. Die spezialisierten Kenntnisse aller Partner wurden benötigt.

Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse

1.1 Methodik zur Ermittlung der Vulnerabilität unterirdischer Verkehrssysteme auf Stations-, Tunnel-, Linien- und Verkehrsnetzebene

Für den Begriff der Vulnerabilität existiert eine Vielzahl von Definitionen. Im Kontext des Projekts U-THREAT verständigten sich die Partner früh darauf, dass im Hinblick auf U-Bahn-Systeme deren Vulnerabilität als Maß der Verletzlichkeit der Station und der möglichen Rückkoppelung auf das Netz im Falle eines Ereignisses zu verstehen ist. Dies bedarf einer genaueren Erläuterung:

Geschieht innerhalb einer Station ein Ereignis, beispielsweise ein Anschlag oder ein Brand, so hat dies verschiedene Auswirkungen auf die Station, deren Nutzer sowie das sie umgebende infrastrukturelle Netz. Beispielsweise schädigt ein Brand unter Umständen die Station selbst, zieht deren Nutzer in Mitleidenschaft und erzeugt so Schäden, die zunächst eine sofortige Reaktion durch Betreiber und Rettungsdienste auslösen, um später dann einer Instandsetzung und Reparatur zu bedürfen. So entstehende Schäden münden für den Betreiber zum einen in finanzielle Aufwendungen und zum anderen in eine substantielle Dauer der hierfür notwendigen baulichen und betrieblichen Maßnahmen. Innerhalb dieser Dauer ist anzunehmen, dass zumindest ein partieller Verlust der Verfügbarkeit bzw. eine reduzierte Kapazität der Station zu erwarten ist, was sich wiederum in Mehrreisezeiten der Passagiere und der Notwendigkeit von Schienenersatzverkehren äußert. Maßnahmen der baulichen Aufwertung führen im Gegensatz hierzu präventiv zu einer erhöhten Resilienz – also Widerstandsfähigkeit – des Bauwerks und somit einerseits zu einer Reduktion des Kapazitätsverlustes und andererseits zu einer Verkürzung der Ausfalldauern. Dieser Zusammenhang lässt sich grafisch wie in Abbildung 2 dargestellt zusammenfassen.

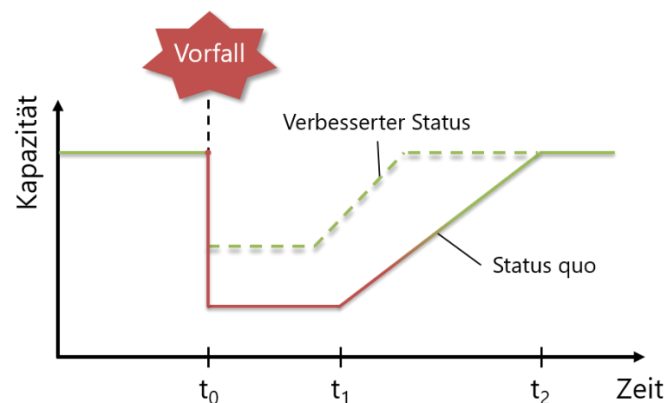


Abbildung 2: Kapazitätsverlust nach einem Zwischenfall und Dauer der Wiederherstellung; Quelle: Ruhr-Universität Bochum

Die Vulnerabilität der Station drückt sich also zum einen in der Höhe des Abfalls der Kapazität nach einem Zwischenfall (Zeitpunkt t_0) aus, zum anderen in der Dauer, bis eine Wiederherstellung beginnen kann (t_1), sowie der Dauer, die für eine Wiederherstellung der ursprünglichen Kapazität selbst aufgewendet werden muss (t_2). Vereinfacht lassen sich zusätzliche Faktoren wie etwa geschädigte Nutzer oder Kosten der Wiederherstellung als Funktionen dieser Parameter verstehen, obgleich sie für jede Station und deren Randbedingungen gesondert zu evaluieren sind.

Vor diesem Hintergrund wurden von den Projektpartnern die folgenden Kriterien der Vulnerabilitätsbewertung definiert, welche jeweils mit spezifischen Indikatoren hinterlegt sind:

Tabelle 2: Kriterien der Vulnerabilitätsbewertung bei U-Bahn-Systemen

Bauwerk	Nutzer	Betrieb
Schaden	Evakuierungsdauer	Zusätzliche Betriebskosten des Verkehrsunternehmens
Kosten	Fatalitäten	Dauer (bis zur vollständigen Kapazitätsherstellung)
Dauer (bis vollständige Wiederherstellung)	Zusätzliche Reisezeiten der Nutzer	

Neben offensichtlichen Indikatoren wie „Schaden“ und „Kosten“ werden beim in U-THREAT entwickelten System auch Reisezeitverluste im Gesamtnetz durch Rückkopplung eines Schadens auf das umliegende Netz berücksichtigt (vgl. Kapitel 1.2). Zudem wird zwischen der Dauer bis zu einer vollständigen Wiederherstellung und bis zur (Teil-)Wiederherstellung mit voller Kapazität differenziert. Diese Unterscheidung erfolgt, da es denkbar ist, dass die Station nach einem Vorfall bereits relativ frühzeitig verkehrlich wieder vollständig genutzt wird, obgleich noch weitere Maßnahmen der baulichen Instandsetzung notwendig sind.

Mit Hilfe dieser Kriterien lässt sich im Rahmen einer Vulnerabilitätsbewertung dann ermitteln, welche Station des jeweiligen Systems im Hinblick auf diese Parameter den größten Bedarf an Maßnahmen der Resilienzverbesserung aufweist.

1.1.1 Szenarien der Bauwerksbedrohung

Grundlage für jede Bewertung ist ein Set von typischen Szenarien, mit denen Bauwerksbetreiber zu rechnen haben. Dabei sind sowohl hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch im Hinblick auf das korrespondierende Schadensausmaß keine generellen Aussagen möglich, da die Situation von Station zu Station und von Stadt zu Stadt variieren kann, mit nachhaltigem Einfluss auf die beiden vorbenannten Parameter. Im Zuge des Projektes U-THREAT wurden durch die Projektpartner zum einen verschiedene Datenbanken mit in der Vergangenheit eingetretenen Ereignissen gesichtet und zusätzlich eine Reihe umfangreicher Experteninterviews mit Betreibervertretern durchgeführt. Im Ergebnis entstand so eine Datenbank möglicher Ereignisse, die für die weitere Bearbeitung generalisiert und adaptiert wurden. Diese sind theoretisch auf alle drei Kriterien anzuwenden, wobei naturgemäß nicht alle Szenarien für alle Kriterien relevant sind. Beispielsweise besitzt ein technisches Versagen, das zu einem Stromausfall im Bahnsteigbereich führt, keine Relevanz im Rahmen der Bauwerksbewertung. Die Szenarien sind dabei sowohl im Hinblick auf die Art der Einwirkung als auch auf eine theoretische Einwirkungshöhe genauer beschrieben.

1.1.2 Qualitative Bewertungssysteme

Für die zuvor erläuterte Bewertung stehen verschiedene methodische Ansätze zur Verfügung, die zumeist auf mathematischen oder ingenieurmäßigen Verfahren basieren. Der Projektpartner ARCADIS verwendet im Zuge bereits heute durchgeführter Analysen regelmäßig einige dieser Verfahren und Vorgehensweisen. Im Zuge der Analyse der Amsterdamer „Noord-Zuid-Lijn“ wurde so beispielsweise ein methodischer Ansatz gewählt, der sich auf die klassische qualitative Risikoanalyse zurückführen lässt. Hierbei wird das Risiko stets als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und dem zu erwartenden Schadensausmaß definiert, wobei für jedes denkbare Gefährdungsszenario auf Basis einer Experteneinschätzung eine Verortung des jeweiligen Risikos in einer hierfür entwickelten Risk-Map erfolgt (Abbildung 3).

Damage →

		A	B	C	D	E
		Negligible	Minor	Moderate	Significant	Severe
Probability	E	Very Likely	Low Med	Medium	Med Hi	High
	D	Likely	Low	Low Med	Medium	Med Hi
	C	Possible	Low	Low Med	Medium	Med Hi
	B	Unlikely	Low	Low Med	Low Med	Medium
	A	Very Unlikely	Low	Low	Low Med	Medium

Abbildung 3: ARCADIS-Risk-Map zur Bewertung von Szenarien

Vorteilhaft an diesem Vorgehen ist, dass Ergebnisse einer Vulnerabilitätsanalyse so relativ leicht und vergleichsweise rasch generierbar sind: Vor dem Hintergrund eines spezifischen Szenarios (bspw. „Brand im Bahnsteigbereich“ oder „Bombenanschlag am Bahnsteigbereich“) werden im Hinblick auf die ausgewählten Kriterien und Indikatoren Einschätzungen getroffen und so jedes Szenario als Risiko in der hinterlegten Risk-Map verortet. Exemplarisch wird so beispielweise bezüglich der Bewertung eines Bauwerksschadens in Abhängigkeit vom Bauwerk selbst, seiner statischen Struktur, seines baulichen Zustandes und der jeweiligen Einwirkung eine Einschätzung hinsichtlich des zu erwartenden Schadens und der Häufigkeit seines Eintritts vorgenommen.

Je nach Einfärbung der so entstehenden Kategorie ergibt sich bei Zuordnung eines Szenarios zu einer solchen eine im Vorfeld frei festgelegte Bewertungszahl. Dies kann dann als qualitative Bauwerksreaktion im Hinblick auf ein bestimmtes Kriterium bei einem spezifischen Szenario festgehalten werden. Ein vergleichbares Vorgehen wird für die anderen zuvor vorgestellten Bewertungsparameter durchgeführt. Abschließend folgt zumeist eine Gesamtbewertung als Aggregation aller Einzelwerte, entweder rein summarisch oder mit zusätzlichen Wirkfaktoren. Am Ende entsteht so eine „Vulnerabilitätszahl“ der bewerteten Station.

Als Nachteil dieser Vorgehensweise lassen sich methodische Probleme identifizieren:

- Die Abgrenzung der verschiedenen Kategorien innerhalb des Bewertungssystems (bspw. von „Minor“ zu „Moderate“ in Abbildung 3) folgt gemäß obiger Darstellung in der Regel einer subjektiven Einschätzung des Bewertenden, ebenso wie die Verortung eines betrachteten Elements innerhalb dieser Kategorien. Grundlage für diese subjektive Einschätzung ist dabei zumeist die eigene Erfahrung oder der Vergleich mit Daten anderer Projekte. Übersteigen nun Daten eines neu zu bewertenden Projekts die Grenzen dieser Einschätzung, so wird der gewählte Maßstab im Prinzip obsolet und die Bewertung mitunter falsch.
- Vulnerabilität als Zielgröße ist dimensionslos und hat a priori keinen Maßstab. Daher muss bei dieser Art des Vorgehens im Vorfeld definiert werden, ab welchem Wert eine hohe Vulnerabilität vorliegt und daher unter Umständen Maßnahmen angezeigt sind. Dies kann jedoch nur reflexiv in Bezug auf eine Grundgesamtheit von Daten oder Erfahrungen geschehen und ist damit ebenfalls hinsichtlich der Übertragbarkeit fraglich. Eine beispielsweise für Lyon entwickelte Vulnerabilitätskala wird für Paris voraussichtlich keine brauchbaren Ergebnisse liefern. Dies gilt, da eine aggregierte Vulnerabilitätszahl in ihrer Übertragbarkeit begrenzt ist. Beispielsweise kann ein monetär großer Schaden an der U-Bahn einer Stadt wie Dortmund ein vergleichsweise kleiner Schaden bei einer Stadt wie Berlin oder Paris sein und umgekehrt.

Diese Nachteile sind zum einen bei der Betrachtung und der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen und können zum anderen zu erheblichen Problemen hinsichtlich der Belastbarkeit der Ergebnisse führen.

1.1.3 Der U-THREAT-Ansatz: Semi- und vollständig quantitative Bewertungssysteme

Um die benannten Problemstellungen qualitativer Analysen zu vermeiden, können die Bewertungen beispielsweise geeignet quantifiziert und kombiniert werden. Grundlage dafür ist die Überlegung, nicht ein-

zelne isolierte Stationen zu betrachten, sondern jeweils das System als Ganzes zu bewerten, wobei allerdings nicht jede Station detailliert untersucht werden kann. So lässt sich durch einen Vulnerabilitätsvergleich innerhalb des Systems ein Ranking der Stationen erarbeiten, ohne a priori eine Skala für die Vulnerabilität einzelner Stationen definieren zu müssen. Durch die Verwendung eines geeigneten Vorfilters wird dabei der Umfang der zu untersuchenden Stationen auf ein handhabbares Maß reduziert. Hiernach müssen selbige dann hinsichtlich der bauwerklichen, der nutzerbezogenen und der betrieblichen Einflüsse untersucht werden, wobei dem Anwender freigestellt ist, ob er sich auf ein spezifisches Szenario begrenzt oder ein frei wählbares Set von Szenarien betrachtet.

Im Rahmen der Evaluierung unterscheidet der U-THREAT-Ansatz zwischen einer „vereinfachten“ bzw. „überschlägigen“ Methode und einer modellgestützten und damit exakteren Bestimmung der Indikatoren (vgl. Kapitel 1.2).

Die Aggregation der Ergebnisse erfolgt über einen mathematischen Algorithmus, den sogenannten Analytical Hierarchy Process (AHP), der hilfsweise zur Bildung eines Rankings herangezogen wird. Die Anwendung dieses Algorithmus kann gleichermaßen für die überschlägige wie die exakte Bewertungsmethode erfolgen. Diese hat verschiedene Vorteile:

- Mit Hilfe des AHP kann einzelnen Kriterien eine spezifische Wichtung innerhalb der Bewertung zugeordnet werden. So gelingt es, beispielsweise den Parameter „Bauwerksschaden“ mit einem höheren Einfluss auf das Gesamtergebnis zu versehen als die Reisezeitverluste durch temporären Ausfall einer Station. Der Anwender ist dabei frei in der Wahl der Priorisierungen.
- Aufgrund des direkten Vergleichs der Stationen miteinander lässt sich das entwickelte System auf beliebige Netze anwenden, ohne dass eine Anpassung der Maßstäbe und Skalen notwendig wird.
- Durch die rechner- und datenbankgestützte Analyse lassen sich die Bewertungen nachverfolgen und auch Einschätzungen mehrerer Anwender direkt miteinander vergleichen.

Die Ergebnisse werden dem Anwender anschließend in Form gewichteter Diagramme zur Verfügung gestellt, sodass er erkennen kann, welches seiner Bauwerke am ehesten als vulnerabel einzustufen ist und alsdann Maßnahmen vorgesehen werden sollten. Ein erneuter Durchlauf der Bewertung unter Einbeziehung der applizierten Maßnahmenwirkung zeigt dann die Erhöhung der Resilienz durch den Einsatz konkreter Maßnahmen.

1.2 Methodik zur Ermittlung der betrieblichen Vulnerabilität von Stationen

1.2.1 Aufgabe

Die in U-THREAT entwickelte Gesamtmethodik zur Bewertung der Vulnerabilität von U-Bahn-Stationen berücksichtigt betriebliche, bauliche, und nutzerbezogene Aspekte. Für jede der drei Säulen - Betrieb, Bauwerke und Nutzer – werden sektorielle Bewertungen durchgeführt. Die Ergebnisse der sektoriellen Bewertungen, die in Form von Indikatoren vorliegen, werden zu einem endgültigen Vulnerabilitätsindikator zusammengeführt, wie in Abbildung 4 dargestellt (vgl. Kapitel 1.1).

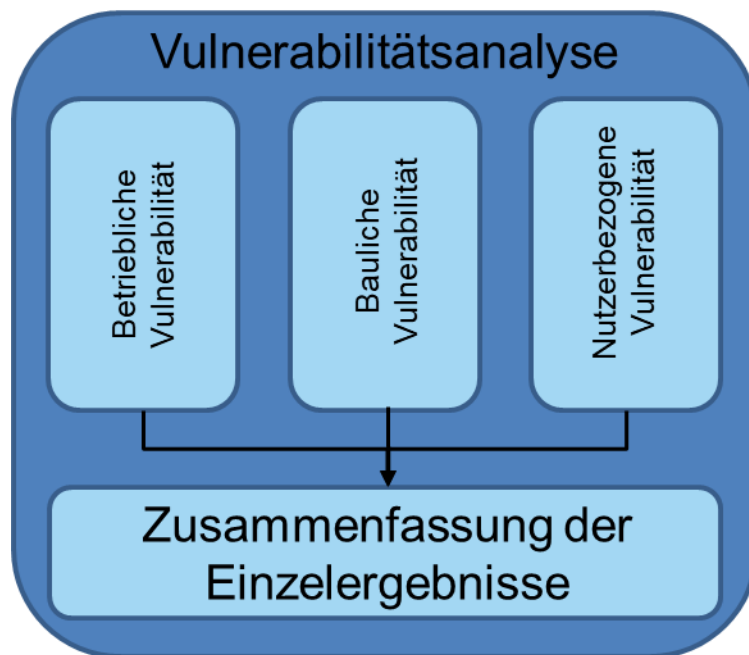


Abbildung 4: Verfahren der Vulnerabilitätsanalyse

Im Folgenden wird das Verfahren zur Bewertung der betrieblichen Vulnerabilität, das im Rahmen von AP 3 entwickelt wurde, beschrieben. Dazu gehört insbesondere die Beschreibung von Bewertungsindikatoren, die eine Quantifizierung der betrieblichen Vulnerabilität ermöglichen. Diese Indikatoren sind in Tabelle 2 des Kapitels 1.1 dargestellt. Das von der PTV erarbeitete und nachfolgend erläuterte Verfahren erlaubt darüber hinaus die Ermittlung des Indikators „Zusätzliche Reisezeiten der Nutzer“. Dieser Indikator fällt entsprechend der Erläuterungen des Kapitels 1.1 in den Bereich der nutzerseitigen Vulnerabilität. Obschon also das von der PTV entwickelte Verfahren auch Aspekte der Nutzer beinhaltet, wird im Folgenden vereinfachend vom Verfahren zur Quantifizierung der betrieblichen Vulnerabilität von Stationen gesprochen.

Die Bewertung der Kritikalität erfordert detaillierte bauliche, betriebliche und nutzerbezogene Analysen und kann daher nicht systematisch für eine hohe Anzahl von Stationen durchgeführt werden. Aufgrund dieser Einschränkungen wird ein Vorfilter eingesetzt, mit dessen Hilfe potenziell kritische Stationen identifiziert werden können. Die betrieblichen Aspekte des Vorfilters, insbesondere die jeweiligen Vorfilterkriterien, werden in Abschnitt 1.2.2 vor dem eigentlichen Bewertungsverfahren dargestellt.

Dieses Teil des Berichtes gliedert sich in die folgenden Teile:

- Betriebliche Vorfilterkriterien für die Ableitung kritischer unterirdischer Stationen
- Verfahren zur Bewertung betrieblicher Aspekte der Vulnerabilität von unterirdischen Stationen
- Quantifizierung der Bewertungsindikatoren
- Geltungsbereich und Anwendungsgrenzen des Verfahrens
- Zusammenfassung.

1.2.2 Betriebliche Vorfilterkriterien für die Ableitung kritischer unterirdischer Stationen

1.2.2.1 Zielstellung

Wie schon erwähnt, ist es aufgrund des damit verbundenen Aufwands normalerweise nicht möglich, für alle unterirdischen Stationen eines Netzes anspruchsvolle Schwachstellenbewertungen durchzuführen. Daher wurde ein Vorfilter entwickelt, der es erlaubt, die kritischsten Stationen eines Netzes zu identifizieren. Als Teil von Arbeitspaket 3 wurden deshalb Kriterien festgelegt, mit denen die aus betrieblicher Sicht kritischsten Stationen identifiziert werden können.

1.2.2.2 Verfahren

Aus betrieblicher Sicht sind kritische Stationen durch hohe negative (netzweite) Ausfallwirkungen gekennzeichnet. Dies steht im Einklang mit der von der Europäischen Kommission veröffentlichten Definition kritischer Infrastrukturen. Kritische Infrastrukturen sind laut der europäischen Kommission „Anlagen oder Systeme, die von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen, der Gesundheit, der Sicherheit und des wirtschaftlichen oder sozialen Wohlergehens der Bevölkerung

sind.“ [EC08]

Um die kritischsten Stationen zu identifizieren, mussten Kriterien definiert werden, die die relevanten negativen Auswirkungen eines Ausfalls beschreiben. In Bezug auf die betrieblichen Aspekte bedeutete das, dass Kriterien ausgewählt werden sollten, die zum einen das Angebot des öffentlichen Verkehrs und zum anderen die Verkehrsnachfrage erfassen, da sich die Bedeutung einer Station für das Verkehrsnetz und die Gesellschaft in beiden Bereichen widerspiegelt.

Abgesehen von ihrer Eignung zur Unterscheidung zwischen eher unkritischen und kritischen Stationen sollten diese Vorfilterkriterien sowohl messbar als auch leicht und schnell quantifizierbar auf der Grundlage bereits vorhandener Quellen sein. Durch die Berücksichtigung dieser zusätzlichen Anforderungen konnte sichergestellt werden, dass der Vorfilter auch von Betreibern öffentlicher Verkehrsnetze ohne Expertenwissen einfach angewendet werden kann.

1.2.2.3 Kriterien

Ausgehend von oben dargestellten Anforderungen wurden verschiedene mögliche Vorfilterkriterien untersucht. Die Analyse zeigte jedoch, dass keines der Kriterien alle Anforderungen erfüllt (siehe

Tabelle 3).

Tabelle 3: Bewertung möglicher Vorfilterkriterien

	Entfernung zu benachbarten Stationen	Möglichkeiten der Einrichtung von Ersatzverkehren	Anzahl der Fahrgäste (Aussteiger, Einsteiger, Durchfahrende)	Fahrgastkapazität (Anzahl der Sitz- und Stehplätze)	Wirtschaftliche Verluste durch zusätzliche Reisezeiten etc.
Auswirkungen auf die erbrachte Dienstleistung	Beschränkt	Beschränkt	Beschränkt	Ja	Ja
Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage	Nein	Nein	Ja	Beschränkt	Ja
Messbarkeit	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Einfach und schnell quantifizierbar	Ja	Beschränkt	Ja	Ja	Nein

In einem ersten Schritt wurden die Kriterien, die entweder nicht messbar oder nicht leicht und schnell quantifizierbar sind, verworfen. Damit verblieben die folgenden Kriterien:

- Entfernung zu benachbarten Stationen
- Anzahl der Fahrgäste (aller in der Station verkehrenden Linien pro Tag)
- Fahrgastkapazität (Sitzplätze und Stehplätze aller in der Station verkehrenden Linien pro Tag).

Die "Anzahl der Fahrgäste" war damit das einzige verbleibende Kriterium, das es erlaubt, die Auswirkungen eines Ausfalls auf die Verkehrsnachfrage zu beurteilen. Daher wurde beschlossen, diesen Indikator als Vorfilterkriterium für die Verkehrsnachfrage auszuwählen. Er lässt sich leicht quantifizieren, entweder auf der Grundlage von Fahrgasterhebungen, die von den Verkehrsunternehmen regelmäßig durchgeführt werden, oder mit Hilfe der Verkehrsmodelle der Unternehmen.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die erbrachte Dienstleistung wurde das Kriterium "Fahrgastkapazität" gewählt, da die Aussagekraft des Entfernungskriteriums nur sehr begrenzt ist. Die Kapazität kann aus den Fahrplänen in Verbindung mit den eingesetzten Fahrzeugen bzw. Fahrzeugkombinationen abgeleitet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, diese Daten aus Verkehrsmodellen der Betreiber zu entnehmen.

Da die Fahrgastkapazität im Allgemeinen nachfragegerecht dimensioniert ist, besteht natürlich eine gewisse Korrelation zwischen beiden Kriterien. Dennoch können sie sich nicht gegenseitig ersetzen, da die Kapazität in großen Teilen einer Strecke konstant ist, da die Züge nur an einer sehr begrenzten Anzahl von Haltestellen wenden bzw. enden. So können aus betrieblichen Gründen ggf. sogar alle Züge einer Linie auf der gesamten Länge verkehren, was einer konstanten Kapazität auf der gesamten Strecke entspräche,

obwohl die Nachfrage in der Nähe der Endhaltestellen der Linie geringer ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Größe der öffentlichen Verkehrsnetze unterscheiden sich die Stationsbezogene Kapazität und die Anzahl der Fahrgäste stark. Daher müssen Grenzwerte für die Unterscheidung zwischen kritischen und unkritischen Stationen von Fall zu Fall festgelegt werden. Im Allgemeinen kann es sinnvoll sein, unkritische Stationen als Stationen zu definieren, bei denen alle Vorfilterkriterien zum 95. Perzentil gehören.

1.2.3 Bewertung der Vulnerabilität von U-Bahn-Stationen aus betrieblicher Sicht

1.2.3.1 Ziel der Teilaufgabe

Stationen, die nach den im vorigen Kapitel beschriebenen Vorfilterkriterien als kritisch identifiziert wurden, sollten auf ihre Vulnerabilität analysiert werden.

Die in AP 2 entwickelte Gesamtbewertungsmethodik berücksichtigt bauliche, betriebliche und nutzerbezogene Aspekte der Vulnerabilität, indem sie Bewertungsindikatoren dieser drei Säulen integriert.

Im Rahmen von WP 3 wurde ein Verfahren zur Bewertung der betrieblichen Kritikalität einschließlich relevanter Bewertungsindikatoren entwickelt. In den folgenden Kapiteln wird das Verfahren im Detail beschrieben.

1.2.3.2 Verfahren

Das Verfahren und seine Hauptschritte sind in Abbildung 5 dargestellt.

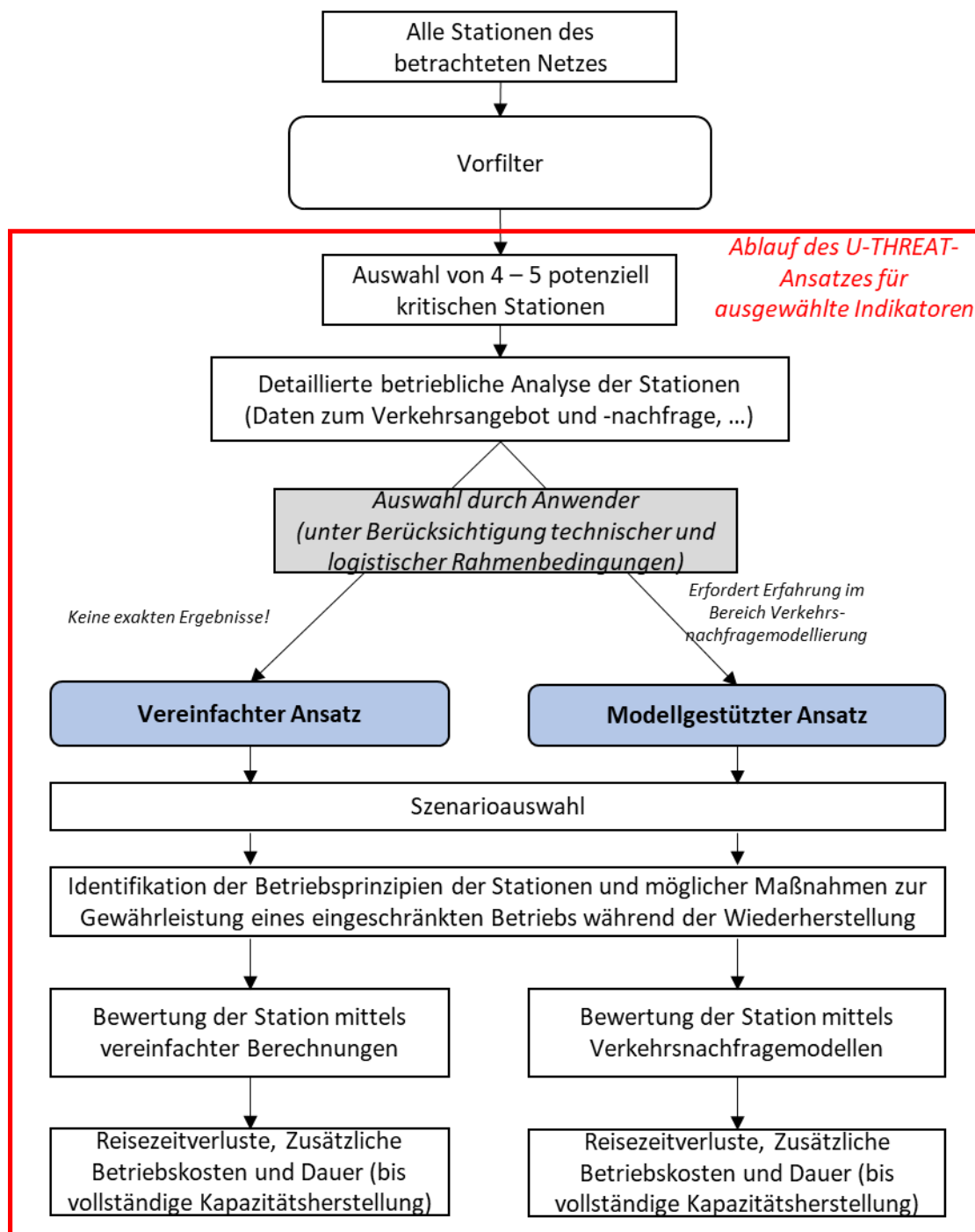


Abbildung 5: Verfahren zur Bewertung der operationellen Vulnerabilität

1.2.3.2.1 Erforderliche Informationen über Stationen

Nach der Identifizierung der kritischen Stationen eines Netzwerks müssen detaillierte Informationen über diese Stationen gesammelt werden. Diese Informationen umfassen Daten über die angebotenen Dienste (Anzahl der Linien, Taktzeiten oder Fahrpläne, Lagepläne aller Ebenen, Planung der Ersatzverkehre usw.) und Informationen über die von der Station bediente Verkehrsnachfrage. In den meisten Fällen sollten diese Daten von den Verkehrsbetrieben leicht zugänglich sein.

1.2.3.2.2 Wahl des Bewertungsansatzes

In einem nächsten Schritt muss entschieden werden, ob eine vereinfachte oder eine umfassende, modellgestützte Bewertung durchgeführt werden soll. Die folgende Tabelle (Tabelle 4) gibt einen Überblick über

die Vor- und Nachteile beider Ansätze.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der vereinfachten und der modellgestützten Bewertung

	Vereinfachter Ansatz	Modellgestützter Ansatz
Vorteile	Kein Verkehrsmodell erforderlich	Ergebnisse sind präziser
Nachteile	Ergebnisse sind grobe Einschätzungen	Verkehrsmodell erforderlich

Bei der Entwicklung der Gesamtmethodik zur Bewertung der Vulnerabilität von unterirdischen Stationen wurde deutlich, dass sowohl ein umfassendes als auch ein vereinfachtes Bewertungsverfahren benötigt wurde. Der Anwender des Verfahrens muss entscheiden, welchen Detaillierungsgrad er wählt.

Es wird empfohlen, den modellgestützten Ansatz zu wählen, insbesondere, wenn ein Verkehrsmodell verfügbar oder im Besitz des Verkehrsunternehmens ist, da in diesem Fall die erforderlichen Ressourcen für die Anwendung der Ansätze ähnlich sind. Der vereinfachte Ansatz erfordert zwar kein Verkehrsmodell, erlaubt aber auch nur eine grobe Abschätzung der betrieblichen Vulnerabilität der Stationen. Er könnte angewendet werden, wenn Verkehrsbetreiber keinen Zugang zu einem Verkehrsmodell haben oder keine ausreichenden Ressourcen zu seiner Anwendung vorhanden sind.

Die Ergebnisse der Ansätze sind sehr unterschiedlich, da der vereinfachte Ansatz keine kaskadierenden Effekte innerhalb des Verkehrsnetzes berücksichtigt. Daher sollten Kritikalitätsbewertungen für alle Stationen eines Netzes immer mit dem gleichen Ansatz durchgeführt werden. Ein Wechsel des Ansatzes von einer Station zu einer anderen führt nicht zu vergleichbaren Werten und daher nicht zu einem vernünftigen Gesamtergebnis.

1.2.3.2.3 Definition von Bedrohung und Wirkung

Die Gesamteinschätzung der Vulnerabilität bietet die Möglichkeit, die Kritikalität einer Station gegenüber allen Bedrohungen zu analysieren, die als relevant für U-THREAT [UT18] identifiziert wurden. Diese Bedrohungen sind:

1. Bombenangriff
2. NRBC-Angriff (nuklear, radiologisch, biologisch, chemisch)
3. Massenerschießung
4. Brand
5. Kollision
6. Technisches Versagen
7. Hoax
8. Naturkatastrophen

Es ist auch möglich, die Vulnerabilitätsanalyse unter Berücksichtigung einer begrenzten Anzahl dieser Bedrohungen anzuwenden. Der Benutzer muss die relevanten Bedrohungen auf der Grundlage seines Wissens über die jeweilige Station auswählen.

Nach der Auswahl der relevanten Bedrohungen muss der Benutzer die betrieblichen Auswirkungen jeder Bedrohung auf die jeweilige Station abschätzen. Dies erfordert detaillierte Kenntnisse über die Station und ihre Lage im Verkehrsnetz. Tabelle 5 zeigt die möglichen Auswirkungen der einzelnen Bedrohungen auf der Grundlage von Erfahrungen des Betreibers, Experteninterviews sowie Literatur- und Desktop-Recherchen.

Tabelle 5: Bedrohungs-Wirkungs-Matrix

BEDROHUNG	Id	BETRIEBLICHE AUSWIRKUNGEN												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Durchfahrende Züge					keine durchfahrenden Züge			Absper- rung Tunnel zwischen Stationen	Schließung von 1 oder mehreren benachbart en Stationen	Stilllegung einer kompletten Linie (kein Zugverkehr)	Stilllegung des gesamten U- Bahn- Netzes	Stilllegung des gesamten Netzes (kein U- Bahn/Bus/St raßenbahnv erkehr)
Bombenangriff	EXP.													
Kleine Sprengkraft (beweglich)	EXP-01	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	x	x	x
Kleine Sprengkraft (kontakt)	EXP-02	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
NRBC-Angriff BC (toxische Freisetzen aus der Industrie)	NRBC-10	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x
Mass Shooting (Amoklauf / Schießerei) im Zug	MS													
MS-01	MS-01	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	x
in Station	MS-03	x	x	x	x	x	-	x	x	-	-	x	x	x
Brand	Fl.													
Kleiner Brand in Station	FI-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Brand in Station	FI-02	x	-	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
Großer Brand in station	FI-03	x	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
Kleiner Brand im Zug in Station	FI-04	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Brand im Zug in Station	FI-05	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Großer Brand im Zug in Station	FI-06	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Kleiner Brand im Zug im Tunnel	FI-07	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Mittlerer Brand im Zug im Tunnel	FI-08	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Großer Brand im Zug im Tunnel	FI-09	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Brand in einem technischen Teil der Station	FI-10	-	-	x	x	x	-	x	x	-	-	-	-	-
Brand in einem strategischen Raum (Operationszentrum)	FI-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-
Kabelbrand im Tunnel	FI-12	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	-
Kollision	DM.													
Kollision mit Hindernissen	DM-01	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-
Kollision mit anderen Zügen/Fahrzeugen	DM-02	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-
Technisches Versagen	TF.													
Tunnelausfall	TF-05	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-
Stromausfall	TF-08	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
CBTC Versagen	TF-09	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
Hoax	HX.													
Explosion	HX-01	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
Naturkatastrophen	ND.													
Überflutung	ND-01	x	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-

1.2.3.2.4 Modellierung des eingeschränkten Betriebs

Für die Bewertung der Vulnerabilität einer ausgewählten Station muss jede der in Tabelle 5 aufgeführten relevanten betrieblichen Auswirkungen im Detail ausgearbeitet werden.

Wenn z. B. eine Bedrohung die Unterbrechung einer Linie verursachen kann (betriebliche Auswirkung Nr. 6 der Tabelle 5, "keine durchfahrenden Züge"), muss der verbleibende Betrieb der Linie in Form von Linienrouten, Fahrzeitprofilen, Abfahrtszeiten usw. modelliert werden. Die Art des eingeschränkten Betriebs kann beispielsweise von der Lage der Weichen, die es den Zügen ermöglichen, vor oder hinter dem bewerteten Bahnhof zu wenden, oder anderen Merkmalen des Netzes abhängen. Darüber hinaus müssen mögliche Ausgleichsmaßnahmen wie etwa ein Schienenersatzverkehr mit dem Bus in Betracht gezogen werden.

Im einfachsten Fall kann eine Bedrohung nur eine einzige Auswirkung haben (z. B. die Sperrung des Zugangs zu einem Bahnhof für eine bestimmte Zeitspanne). Insbesondere bei schwerwiegenden Ereignissen (wie z. B. Bombenexplosionen oder Großbränden) ist von einer Abfolge unterschiedlicher und sich möglicherweise überlappender Effekte auszugehen (siehe auch Kapitel 1.2.4.1). So könnte beispielsweise die erste betriebliche Wirkung in der Stilllegung des gesamten U-Bahn-Netzes bestehen. Daran könnte sich eine Phase mit eingeschränktem Betrieb anschließen, in der die Station geschlossen und die entsprechende Linie in zwei Teile getrennt wird. Nach ersten Reparaturen würden die Züge den Bahnhof ohne Halt durchfahren, bis der Normalbetrieb wiederaufgenommen werden kann. Dies bedeutet, dass Bewertungsindikatoren für verschiedene Zeiträume mit unterschiedlichen Kombinationen von betrieblichen Wirkungen getrennt berechnet werden müssen.

1.2.4 Quantifizierung von Bewertungsindikatoren

Hinsichtlich der betrieblichen Aspekte wurden die folgenden Bewertungsindikatoren festgelegt:

1. *Dauer* der betrieblichen Auswirkungen (beginnend mit dem Vorfall bei t_0 und endend mit dem vollständig wiederhergestellten Betrieb bei t_2),
2. *zusätzliche Reisezeiten* der Nutzer und
3. *zusätzliche Betriebskosten* des Verkehrsunternehmens.

Diese Indikatoren wurden gewählt, weil sie geeignet sind, die betriebliche Kritikalität von Seiten des Betreibers und der Nutzer zu quantifizieren. Die Anwender der Methodik müssen diese Bewertungsindikatoren für jede zu bewertende Station quantifizieren bzw. berechnen.

1.2.4.1 Berechnung der Dauer

Die Dauer der betrieblichen Auswirkungen wird auf der Grundlage der Erfahrung des Transportunternehmens und der detaillierten Kenntnisse über die Stationen ermittelt. Als Ausgangspunkt für diese Berechnungen entwickelten die Projektpartner von U-THREAT die Tabelle 6, die die Spannbreite der Dauer in Abhängigkeit von bestimmten Bedrohungs-Wirkungskombinationen zeigt. Die Werte wurden sowohl aus Experteninterviews als auch aus Literatur- und Desktop-Recherchen abgeleitet. Obwohl Tabelle 6 für einige Kombinationen große Spannweiten aufweist, deckt sie möglicherweise nicht alle denkbaren Situationen ab. Daher können Abweichungen von dem vorgeschlagenen Wertebereich in Betracht gezogen werden.

Die Dauer kann in zwei Perioden unterteilt werden:

- Die erste Periode beginnt mit den Vorfällen zum Zeitpunkt t_0 und endet mit dem Abschluss des Einsatzes von Polizeikräften, Rettungsdiensten und Räumungspersonal am Ereignisort zum Zeitpunkt t_1 .
- Die zweite Periode ist die Zeitspanne mit eingeschränktem Betrieb. Sie beginnt zum Zeitpunkt t_1 und endet zum Zeitpunkt t_2 , wenn der Normalbetrieb wieder aufgenommen wird.

Insbesondere bei schwerwiegenden Zwischenfällen (wie Bombenanschlägen, Großbränden, Massenerschießungen usw.) kann es vorkommen, dass der ÖPNV-Dienst vollständig eingestellt wird, bis Polizeikräfte, Rettungsdienste und Räumungsdienste ihre Arbeit um t_1 beendet haben. Während dieser Zeitspanne ist nicht vorhersehbar, wie die Benutzer ihr Reiseverhalten anpassen werden. Daher können Bewertungen der betrieblichen Auswirkungen für diesen Zeitraum nicht sinnvoll durchgeführt werden.

Die Bewertung sollte sich deshalb hauptsächlich auf den Zeitraum von t_1 bis t_2 konzentrieren. Wenn das Verkehrsunternehmen beschließt, den eingeschränkten Betrieb erheblich zu verändern, bevor es den Normalbetrieb wieder aufnimmt, kann es sinnvoll sein, diesen Zeitraum erneut in Teilzeiträume zu unterteilen. In diesem Fall müssen zusätzliche Fahrzeiten für die Benutzer und zusätzliche Betriebskosten für den Verkehrsunternehmer für jeden Teilzeitraum getrennt berechnet werden.

Tabelle 6: Spannbreite der Dauer in Abhängigkeit von Bedrohungs-Wirkungs-Kombinationen

BEDROHUNG	Id	BETRIEBLICHE AUSWIRKUNGEN												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Schließung eines oder mehrerer Zugänge der Station	Schließung eines Teils des Bahnsteigs	Schließung eines Seitenbahnsteigs (eine Richtung)	Schließung eines Mittelbahnsteigs oder zweier Seitenbahnsteige (beide Richtungen)	Schließung aller Bahnsteige	Unterbrechung einer Linie in eine Richtung	Unterbrechung einer Linie in beide Richtungen	Unterbrechung aller Linien (Station ist geschlossen)	Absperrung Tunnel zwischen Stationen	Schließung von 1 oder mehreren benachbarten Stationen	Stilllegung einer kompletten Linie (kein Zugverkehr)	Stilllegung des gesamten U-Bahn-Netzes	Stilllegung des gesamten Netzes (kein U-Bahn/Bus/Straßenbahnverkehr)
Bombenangriff	EXP.													
Kleine Sprengkraft (beweglich)	EXP-01	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	x	x	x
Kleine Sprengkraft (kontakt)	EXP-02	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
NRBC-Angriff	NRBC													
BC (toxische Freisetzen aus der Industrie)	NRBC-10	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x
Mass Shooting (Amoklauf / Schieberei)	MS													
im Zug	MS-01	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	x
in Station	MS-03	x	x	x	x	x	-	x	x	-	-	x	x	x
Brand	FI.													
Kleiner Brand in Station	FI-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Brand in Station	FI-02	x	-	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
Großer Brand in station	FI-03	x	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
Kleiner Brand im Zug in Station	FI-04	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Brand im Zug in Station	FI-05	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Großer Brand im Zug in Station	FI-06	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Kleiner Brand im Zug im Tunnel	FI-07	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Mittlerer Brand im Zug im Tunnel	FI-08	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Großer Brand im Zug im Tunnel	FI-09	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Brand in einem technischen Teil der Station	FI-10	-	-	x	x	x	-	x	x	-	-	-	-	-
Brand in einem strategischen Raum (Operationszentrum)	FI-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-
Kabelbrand im Tunnel	FI-12	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	-
Kollision	DM.													
Kollision mit Hindernissen	DM-01	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-
Kollision mit anderen Zügen/Fahrzeugen	DM-02	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-
Technisches Versagen	TF.													
Tunnelfall	TF-05	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-
Stromausfall	TF-08	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
CBTC Versagen	TF-09	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
Hoax	HX.													
Explosion	HX-01	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
Naturkatastrophen	ND.													
Überflutung	ND-01	x	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-

1.2.4.2 Berechnung der zusätzlichen Reisezeiten und Betriebskosten

Die Art der Berechnung der Bewertungsindikatoren *zusätzliche Reisezeiten* und *zusätzliche Betriebskosten* hängt vom gewählten Bewertungsansatz ab (siehe Kapitel 1.2.3.2.2). Diese Berechnungsregeln werden in den folgenden Unterkapiteln 1.2.4.3 und 1.2.4.4 beschrieben.

Beide Ansätze basieren auf dem Vergleich der Situation ohne Bedrohung (Ohne-Fall oder Bezugsfall) und der Situation, in der die definierte Bedrohungs-Wirkungskombination an der analysierten Station eintritt (Mit-Fall oder Planfall). Wie bereits erläutert, kann der Mit-Fall zwei oder mehr verschiedene Zustände bzw. Phasen umfassen, wenn das Verkehrsangebot vor der Wiederherstellung des Normalbetriebs wesentlich verändert wird.

Die Ansätze unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf die Berechnung der verkehrsbezogenen Auswirkungen eines Vorfalles.

1.2.4.3 Modellgestützter Ansatz

1.2.4.3.1 Berechnung der Indikatoren

Indikator: Zusätzliche Reisezeit der Passagiere
Beschreibung des Indikators
Bedeutung des Indikators
Die Erreichbarkeit der Standorte für Wohnen, Erholung, Einkaufen und andere Aktivitäten gewährleistet die Teilnahme am gesellschaftlichen Leben. Je besser die Erreichbarkeit der Standorte ist, desto geringer ist die Reisezeit, um dorthin zu gelangen. Aufgrund von (teilweisen) Schließungen von Stationen können sich die Reisezeiten verlängern.
Erläuterung
Unter der Quelle-Ziel-Reisezeit versteht man die gesamte Reisezeit zwischen einem Startpunkt A und einem Endpunkt B.
Verfahren
Messgröße _{Planfall} – Messgröße _{Bezugsfall}
Messgröße
P-Std / Wirkungsdauer
Berechnungsvorschrift
Bewertete Verkehrsträger
Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Straßenbahn, U-Bahn)
Berechnungsregeln
Die Reisezeit der Passagiere für die Wirkungsdauer wird im Verkehrsmodell sowohl für den Bezugsfall als auch für den Planfall für das gesamte Netz berechnet. Die zusätzliche Reisezeit ist die Differenz zwischen diesen Reisezeiten:
$RZ_{zus,pass,t} = RZ_{planfall,pass,t} - RZ_{bezugsfall,pass,t}$
Mit:
$RZ_{zus,pass,t}$ = Zusätzliche Reisezeit der Passagiere für die Wirkungsdauer [P-Std]
$RZ_{planfall, pass,t}$ = Reisezeit der Passagiere für den Planfall (Bedrohung tritt ein) für die Wirkungsdauer [P-Std]
$RZ_{bezugsfall, pass, t}$ = Reisezeit der Passagiere für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) für die Wirkungsdauer [P-std]
Datengrundlage
<ul style="list-style-type: none"> • Reisezeiten der Passagiere im Netz –makroskopisches Verkehrsmodell (siehe auch allgemeine Anmerkungen zu makroskopischen Verkehrsmodellen am Ende dieses Kapitels) • Dauer der Wirkung – siehe Kapitel 1.2.4.1

Weitere Anmerkungen

Indikator: Zusätzliche Betriebskosten
Beschreibung des Indikators
Bedeutung des Indikators
Ersatzdienste in Folge der (teilweisen) Stilllegung von Stationen führen zu zusätzlichen Fahrzeugkilometern und erhöhten Betriebszeiten und verursachen damit zusätzliche Betriebskosten für die Transportunternehmen. Andererseits können Stilllegungen die Betriebskosten verringern.
Erläuterung
Die Fahrzeugbetriebskosten setzen sich aus den zeitabhängigen Stand- und Vorhaltekosten und den entfernungsabhängigen Betriebskosten zusammen (HEATCO 2005).
Verfahren
Messgröße _{Planfall} – Messgröße _{Bezugsfall}
Messgröße
EUR/Wirkungsdauer
Berechnungsvorschrift
Bewertete Transportart
Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Straßenbahn, U-Bahn)
Berechnungsregeln einschließlich des Ansatzes für die Monetarisierung
Die Fahrzeugbetriebskosten setzen sich in der Regel aus den folgenden fünf Kostenkomponenten zusammen (siehe Intraplan 2017): <ul style="list-style-type: none"> • Abschreibungskosten (einschließlich Zinskosten), • zeitbasierte Instandhaltungskosten, • kilometerabhängige Instandhaltungskosten, • Personalkosten und • Energiekosten. <p>Die zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten werden als Summe der verkehrsträgerspezifischen zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten berechnet:</p> $FBK_{zus,t} = \sum_k FBK_{zus,k,t}$ <p>Mit:</p> <p>$FBK_{zus,t}$ = Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten über alle Verkehrsträger für die Wirkungsdauer t [EUR/Wirkungsdauer]</p>

$FBK_{zus,k,t}$ = Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten für den Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [EUR/Wirkungsdauer]

Die **zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten je Verkehrsträger** für den Wirkungsdauer $FBK_{zus,k,t}$ werden wie folgt berechnet:

$$FBK_{zus,k,t} = FZ_{zus,fzg,k,t} \cdot (c_{abs,k} + c_{ki,z,k} + c_{pers,k}) + FK_{zus,fzg,k,t} \cdot (c_{ki,d,k} + c_{energie,k,f} \cdot ec_{k,f})$$

Mit:

$FZ_{zus,fzg,k,t}$ = Zusätzliche Fahrzeugzeit pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t [Fz-Std/Wirkungsdauer]

$FK_{zus,fzg,k,t}$ = Zusätzliche Fahrleistung pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t [Fz-km/Wirkungsdauer]

$c_{abs,k}$ = Abschreibungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

$c_{ki,z,k}$ = zeitabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

$c_{pers,k}$ = Personalkostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]. Standardwerte sind in Tabelle 12 angegeben.

$c_{ki,d,k}$ = entfernungsabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-km]

$c_{energie,k,f}$ = Energiekostensatz für den Verkehrsträger k und die Energieart f [EUR/kWh] oder [EUR/l Diesel]. Standardwerte sind in Tabelle 12 angegeben.

$ec_{k,f}$ = Energieverbrauch für den Verkehrsträger k und die Energieart f [kWh/Fz-km] oder [l Diesel/Fz-km]

Die **zusätzliche Fahrzeugzeit** pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t wird wie folgt berechnet:

$$FZ_{zus,Fzg,k,t} = FZ_{Planfall,Fzg,k,t} - FZ_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$$

Mit:

$FZ_{zus,fzg,k,t}$ = zusätzliche Fahrzeugzeit pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-Std]

$FZ_{Planfall,Fzg,k,t}$ = Fahrzeugzeit für den Planfall (Bedrohung tritt ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-Std]

$FZ_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$ = Fahrzeugzeit für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-Std]

Die **zusätzliche Fahrleistung** pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t wird wie folgt berechnet:

$$FK_{zus,Fzg,k,t} = FK_{Planfall,Fzg,k,t} - FK_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$$

Mit:

$FK_{zus,Fzg,k,t}$ = zusätzliche Fahrleistung für den Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-km]

$FK_{Planfall,Fzg,k,t}$ = Fahrleistung für den Planfall (Bedrohung tritt ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-km]

$FK_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$ = Fahrleistung für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-km]

Die **Abschreibungskostensätze** werden wie folgt berechnet:

$$c_{abs,k} = \frac{[(1+i)^n \cdot i]}{[(1+i)^n - 1]} \cdot \frac{ik_k}{bh_{Jahr}}$$

Mit:

$c_{abs,k}$ = Abschreibungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

i = Zinssatz [-]

n = Abschreibungszeitraum [Jahr]

ik_k = Investitionskosten [EUR]

bh_{Jahr} = Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden von Fahrzeugen des Verkehrsträgers k [Std/Jahr]. Standardwert: 3.980 Std/Jahr.

Die **zeitabhängigen Instandhaltungskostensätze** $C_{ki,z,k}$ für den Verkehrsträger k werden wie folgt berechnet:

- $c_{ki,z,k} = \frac{c_{ki,z,w,k} \cdot w_k}{d_{Jahr}}$, wenn die Instandhaltungskosten pro t Gewicht und $Jahr$ bereitgestellt werden [EUR/Fz-Jahr]
- $c_{ki,z,k} = \frac{c_{ki,z,v,k}}{d_{Jahr}}$, wenn die Instandhaltungskosten pro Fahrzeug und Jahr bereitgestellt werden [EUR/Fz-Jahr]

Mit:

$c_{ki,z,k}$ = zeitabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

$c_{ki,z,w,k}$ = zeit- und gewichtsabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/t-Jahr]. Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger sind in Tabelle 10 angegeben.

$c_{ki,z,v,k}$ = zeitabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Jahr]. Standardwerte für Busse sind in Tabelle 11 angegeben.

w_k = Gewicht der Fahrzeuge des Verkehrsträgers k [t/Fz]

d_{Jahr} = Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden von Fahrzeugen des Verkehrsträgers k [Std/Jahr]. Standardwert: 3.980 Std/Jahr.

Für Busse sind die Standardwerte für **entfernungsabhängige Instandhaltungskostensätze** $c_{ki,d,k}$ in Tabelle 11 angegeben.

Wenn entfernungs- und gewichtsabhängige Instandhaltungskostensätze angegeben werden, können die entfernungsabhängigen Instandhaltungskostensätze $c_{ki,d,k}$ wie folgt berechnet werden:

$$c_{ki,d,k} = \frac{c_{ki,d,w,k} \cdot w_k}{1,000}$$

Mit:

$c_{ki,d,w,k}$ = entfernungs- und gewichtsabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/1,000 t-km]. Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger sind in Tabelle 10 angegeben.

w_k = Gewicht der Fahrzeuge des Verkehrsträgers k [t/Fz]

Für Busse sind Standardwerte für den **Energieverbrauch** $ec_{k,f}$ in Tabelle 11 angegeben.

Wenn der entfernungs- und gewichtsabhängige Energieverbrauch angegeben wird, kann der entfernungsabhängige Energieverbrauch $ec_{k,f}$ wie folgt berechnet werden:

$$ec_{k,f} = \frac{c_{w,k,f} \cdot w_k}{1,000}$$

Mit:

$ec_{w,k,f}$ = entfernungs- und gewichtsabhängiger Energieverbrauch für Verkehrsmittel k und Energieart f [kWh/Fzg-km] oder [l Diesel/Fzg-km]. Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger sind in Tabelle 10 angegeben.

w_k = Gewicht der Fahrzeuge des Verkehrsträgers k [t/Fz]
Datengrundlagen:
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrleistung pro Verkehrsträger im Wirkungszeitraum [Fz-km]: Makroskopisches Verkehrsmodell (siehe auch allgemeine Anmerkungen zu makroskopischen Verkehrsmodellen am Ende dieses Kapitels) • Fahrzeugstunden pro Verkehrsträger im Wirkungszeitraum [Fz-Std]: Makroskopisches Verkehrsmodell (siehe auch allgemeine Anmerkungen zu makroskopischen Verkehrsmodellen am Ende dieses Kapitels) • Dauer der Wirkung: Siehe Kapitel 1.2.4.1 • Fahrzeuggestandkosten [EUR/Fzkm; EUR/Fzg-Std; EUR/kWh; EUR/l Diesel] und Energieverbrauch [kWh/Fz-km; l Diesel/Fz-km] pro Fahrzeug: <ul style="list-style-type: none"> ○ Investitionskosten, Abschreibungsdauer, Gewicht der Fahrzeuge und Zinssatz: eigene Werte müssen vom Benutzer angewendet werden ○ Zeitabhängige Instandhaltungskosten, Instandhaltungskosten, laufleistungsabhängige Instandhaltungskosten, laufleistungs- und gewichtsabhängige Instandhaltungskosten, Personalkosten, Energiekosten und Energieverbrauch aus der Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr, siehe [BU16]

1.2.4.3.2 Modellbasierte Berechnung von Eingabedaten

Das anspruchsvolle Verfahren kann angewendet werden, wenn Reisezeit, Fahrzeit und Fahrleistung für alle Nutzer und Fahrzeuge in einem Verkehrsnetz berechnet werden können. Die Berechnung der Bewertungsindikatoren muss für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) und den Planfall (Bedrohung tritt ein) für jeden Verkehrsträger k und den gesamten Wirkungszeitraum durchgeführt werden. Im Allgemeinen erfordert dies die Anwendung eines Verkehrsmodells.

Je nach dem erforderlichen Detaillierungsgrad gibt es mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Verkehrsmodelle. Während mikroskopische Modelle besonders für die Modellierung und Optimierung einzelner Infrastrukturelemente, wie z. B. Kreuzungen, geeignet sind, werden makroskopische Modelle zur Modellierung großer Gebiete, wie z. B. Städte oder Länder, verwendet.

Klassische makroskopische Verkehrsmodelle folgen dem üblichen 4-Stufen-Algorithmus der Verkehrsplanung:

1. Die **Verkehrserzeugung** bestimmt die Anzahl der Fahrten, die in verschiedenen Zonen des Modells beginnen und/oder enden. Die Fahrten werden nach Fahrtzielen differenziert und auf der Grundlage von Informationen über Landnutzung, Demographie und andere sozioökonomische Faktoren generiert.
2. Bei der **Verkehrsverteilung** werden die Ursprünge der Reisen den Reisezielen zugeordnet. Zielwahlmodelle berücksichtigen sowohl die Attraktivität der Zonen als auch den Widerstand (Impedanz) zwischen ihnen.
3. Im Schritt der **Verkehrsaufteilung** werden die Reisen den Verkehrsmitteln zugeordnet. Dazu gehört die Modellierung oder Berechnung der Aufteilung zwischen öffentlichem und privatem Verkehr (Modal Split).
4. In der **Verkehrsumlegung** schließlich werden die Fahrten den Routen im Netz zugeordnet.

Eine andere Klasse von Modellen sind aktivitätsbasierte Modelle (ABM). Während in klassischen makroskopischen Nachfragemodellen die Bevölkerung zu verhaltenshomogenen Personengruppen aggregiert wird, liegt bei aktivitätsbasierten Modellen der Fokus auf einzelnen Personen und ihren spezifischen Aktivitäten. Das Mobilitätsverhalten jeder Person wird im Modell individuell als Folge aufeinanderfolgender diskreter Wahlmöglichkeiten simuliert, und die Verkehrsnachfrage in einer Region wird als Ergebnis der individuellen Reiseentscheidungen aller Personen dargestellt.

Insgesamt umfassen die Verkehrsmodelle nicht nur ein Netzmodell (Straßen, Kreuzungen, Linien, Bahnhöfe usw.), sondern auch Modelle des Verkehrsangebots (z. B. Straßenkapazität, Linien, Fahrpläne, Umläufe), der Verkehrsnachfrage (Fahrtwünsche bzw. Fahrten) und des Nutzerverhaltens (z. B. Kriterien für die Verkehrsmittel- oder Routenwahl). Damit ist es möglich, nicht nur den Ist-Zustand eines Verkehrsnetzes zu simulieren, sondern auch die Auswirkungen von Veränderungen z. B. im Verkehrsangebot zu prognostizieren. Übertragen auf die Vulnerabilitätsbewertung bedeutet dies, dass das Basisszenario, das die normale Situation (Bezugsfall) darstellt, mit Szenarien verglichen werden kann, die die betrieblichen Auswirkungen verschiedener Bedrohungen (Planfälle) repräsentieren.

Bezugsfall (Basisszenario)

Unter der Annahme, dass ein klassisches Transportmodell vorliegt, das für die aktuelle Situation kalibriert wurde, können nach der Ausführung des Schrittes der Verkehrsumlegung die Werte für die Reisezeit $RZ_{\text{Bezugsfall, Pass, } t}$, die Fahrzeit $FZ_{\text{Bezugsfall, Fzg, } k, t}$ und die Fahrleistung $FK_{\text{Bezugsfall, Fzg, } k, t}$ für die Wirkungsdauer wie folgt berechnet werden:

Eine Möglichkeit zur Berechnung der **Reisezeit** besteht darin, die auf einer Verbindung verbrachte Zeit der Fahrgäste über alle Verbindungen eines Netzes zu summieren. Dies geschieht für alle Verkehrsträger. Da bei den Verkehrsträgern des öffentlichen Verkehrs (ÖV) das Fahrgastaufkommen für jede Verbindung in der Verkehrsumlegung berechnet wird, bedeutet dies, dass für jede Verbindung das Fahrgastaufkommen mit der Fahrzeit auf der Verbindung multipliziert werden muss, die dem Quotient aus der Länge der Verbindung und der Geschwindigkeit des jeweiligen Verkehrsträgers auf der Verbindung entspricht. Da für den Individualverkehr (IV) in der Verkehrsumlegung nicht das Fahrgastaufkommen, sondern das Fahrzeugvolumen berechnet wird, muss hier zusätzlich der Besetzungsgrad berücksichtigt werden, um das Fahrgastaufkommen aus dem Fahrzeugvolumen zu berechnen. Je nach Modell müssen die Ergebnisse gegebenenfalls um die Einstiegszeit und die Ausstiegszeit korrigiert werden.

Ein alternativer Ansatz zur Berechnung der Reisezeiten besteht darin, die Reisezeiten über alle Wege der Passagiere im Netz aufzusummieren, sofern diese verfügbar sind.

Für die Berechnung der **Fahrzeit** und der **Fahrleistung** für ÖV-Modi werden nicht nur Informationen über das ÖV-Angebot wie Linienwege und Zeitprofile benötigt, sondern es sollten auch Informationen über Umläufe berücksichtigt werden. Diese zusätzlichen Informationen ermöglichen die Berechnung von Betriebskilometern und Betriebszeit für Leerfahrten und nicht nur für Servicefahrten mit Fahrgästen, die allein aus Fahrplaninformationen berechnet werden könnten. Es ist auch sinnvoll, Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen zu modellieren, da diese für die Auswahl der richtigen Kostenparameter (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11) im Bewertungsverfahren benötigt werden. In vielen ÖV-Modellen sind Werte für Fahrzeugzeiten und Fahrzeugkilometer leicht zugänglich, da sie auch für Rentabilitätsberechnungen benötigt werden.

Für den Individualverkehr lassen sich Fahrzeiten und Fahrleistung aus Streckenbelastungen analog zu den Fahrzeiten berechnen.

Zur Berechnung der Indikatorwerte für die gesamte Wirkungsdauer kann es ausreichen, einen "durchschnittlichen" Tag zu modellieren und die Tageswerte mit der Länge der Wirkungsdauer zu multiplizieren. Wenn es aus Gründen der Genauigkeit notwendig ist, zwischen Wirkungen an verschiedenen Tagestypen, z. B. Werktag, Samstag oder Sonntag, zu unterscheiden, muss die Modellierung und Berechnung für jeden Tagestyp durchgeführt werden, und am Ende müssen die spezifischen Tageswerte über die Wirkungsperiode aufsummiert werden.

Planfall

Ein guter Ansatz zur Berechnung der Indikatorwerte des Planfall, besteht darin, zunächst alle isolierten betrieblichen Wirkungen als Modifikationen des Bezugsfall zu modellieren. Das betrifft in erster Linie die Anpassung des Verkehrsangebots in Bezug auf Linienwege, Fahrzeitprofile (entsprechend den Fahrplänen) und Fahrzeuge der betroffenen Linien sowie den Ersatz ganzer Linien durch Schienenersatzverkehr mit Bussen. Es kann aber auch sinnvoll sein, erwartende Veränderungen der Nachfrage, etwa des Modal Splits¹, zu modellieren. Dann kann für jede Kombination von Effekten ein Szenario definiert werden, das

¹ Der Bewertungsansatz und die Formeln zur Berechnung der Bewertungsindikatoren konzentrieren sich auf intramodale Verlagerungen (Nutzung alternativer Linien oder Routen). Falls modale Verlagerungen in Betracht gezogen werden sollen, müssen die Bewertungsindikatoren unter Einbeziehung aller Verkehrsträger berechnet werden.

diese Effekte repräsentiert. Anschließend müssen für jedes der Szenarien alle notwendigen Schritte einschließlich der Umlegung durchgeführt werden, um die Berechnung von Reisezeit $RZ_{Planfall,pass,t}$, Fahrzeit $FZ_{Planfall,Fzg,k,t}$ und Fahrleistung $FK_{Planfall,Fzg,k,t}$ analog zum Bezugsfall zu ermöglichen.

Auch im Planfall müssen zur Berechnung der Indikatorwerte die Tageswerte über die gesamte Wirkungs-
dauer aufsummiert werden, wobei es sinnvoll sein kann, bei der Berechnung der Auswirkungen zwischen
verschiedenen Tagestypen zu unterscheiden.

1.2.4.4 Vereinfachter Ansatz

1.2.4.4.1 Berechnung der Indikatoren

Indikator: Zusätzliche Reisezeit der Passagiere
Beschreibung des Indikators
Bedeutung des Indikators
Die Erreichbarkeit der Standorte für Wohnen, Erholung, Einkaufen und andere Aktivitäten gewährleistet die Teilnahme am gesellschaftlichen Leben. Je besser die Erreichbarkeit der Standorte, desto geringer ist die Reisezeit, um dorthin zu gelangen. Aufgrund von (teilweisen) Schließungen von Stationen können sich die Reisezeiten verlängern.
Erläuterung
Unter Quelle-Ziel-Reisezeit versteht man die gesamte Reisezeit zwischen einem Startpunkt A und einem Endpunkt B. Wenn der vereinfachte Ansatz gewählt wird, wird nur die Fahrzeit innerhalb des Teils des Netzes berücksichtigt, der von der Bedrohung betroffen ist und in dem Schienenersatzverkehre durchgeführt werden.
Verfahren
Messgröße _{Planfall} – Messgröße _{Bezugsfall}
Messgröße
P-Std/Wirkungsdauer
Berechnungsvorschrift
Bewertete Verkehrsträger
Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Straßenbahn, U-Bahn)
Berechnungsregeln
Die zusätzliche Reisezeit der Passagiere für den Zeitraum der Auswirkungen wird auf der Grundlage des spezifischen Vorfalls und der zu analysierenden Station berechnet. Für den spezifischen Vorfall und die Station muss analysiert werden, welcher Teil des Netzes betroffen sein wird und wie der Schienenersatzverkehr implementiert wird (kurzfristig und langfristig - unter Berücksichtigung der Möglichkeit, den Zeitraum mit eingeschränktem Betrieb in zwei oder mehr Teilperioden zu unterteilen). Für den Bezugsfall können die Fahrzeiten für diesen Teil des Netzes aus Fahrplänen und Verkehrszähl- daten der betroffenen ÖPNV-Linien abgeleitet werden. Die Fahrzeiten für den Planfall müssen unter Berücksichtigung des angenommenen Schienenersatzverkehrs berechnet werden. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass alle Fahrgäste der regulären Linien auf den Schienenersatzverkehr umsteigen. Die zusätzliche Reisezeit für den Wirkungszeitraum ist die Differenz zwischen diesen Reisezeiten:
$RZ_{zus,pass,t} = RZ_{Planfall,pass,t} - RZ_{Bezugsfall,pass,t}$

<p>Mit:</p> <p>$RZ_{zus,pass,t}$ = Zusätzliche Reisezeit der Passagiere für die Wirkungsdauer [P-Std]</p> <p>$RZ_{Planfall,pass,t}$ = Reisezeit der Passagiere für den Planfall (Bedrohung tritt ein) für die Wirkungsdauer [P-Std]</p> <p>$RZ_{Bezugsfall,pass,t}$ = Reisezeit der Passagiere für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) für die Wirkungsdauer [P-std]</p>
Sources for required input data
<ul style="list-style-type: none"> • Reisezeiten der Passagiere im Netz – Werte müssen vom Benutzer abgeleitet werden (siehe auch allgemeine Anmerkungen am Ende dieses Kapitels) • Dauer der Wirkung – siehe Kapitel 1.2.4.1
Weitere Anmerkungen

Indikator: Zusätzliche Betriebskosten
Beschreibung des Indikators
Bedeutung des Indikators
Ersatzdienste in Folge der (teilweisen) Stilllegung von Stationen führen zu zusätzlichen Fahrzeugkilometern und erhöhten Betriebszeiten und verursachen damit zusätzliche Betriebskosten für die Transportunternehmen. Andererseits können Stilllegungen die Betriebskosten verringern.
Erläuterung
Die Fahrzeugbetriebskosten setzen sich aus den zeitabhängigen Stand- und Vorhaltekosten und den entfernungsabhängigen Betriebskosten zusammen (HEATCO 2005).
Verfahren
Messgröße _{Planfall} – Messgröße _{Bezugsfall}
Messgröße
EUR/Wirkungsdauer
Berechnungsvorschrift
Bewertete Transportart
Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Straßenbahn, U-Bahn)
Berechnungsregeln einschließlich des Ansatzes für die Monetarisierung

Die Fahrzeugbetriebskosten setzen sich in der Regel aus den folgenden fünf Kostenkomponenten zusammen (siehe Intraplan 2017):

- Abschreibungskosten (einschließlich Zinskosten),
- zeitbasierte Instandhaltungskosten,
- kilometerabhängige Instandhaltungskosten,
- Personalkosten und
- Energiekosten.

Die **zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten** werden als Summe der verkehrsträgerspezifischen zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten berechnet:

$$FBK_{zus,t} = \sum_k FBK_{zus,k,t}$$

Mit:

$FBK_{zus,t}$ = Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten über alle Verkehrsträger für die Wirkungsdauer t [EUR/Wirkungsdauer]

$FBK_{zus,k,t}$ = Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [EUR/Wirkungsdauer]

Die **zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten pro Verkehrsträger** für die Wirkungsdauer $FBK_{zus,k,t}$ werden wie folgt berechnet:

$$FBK_{zus,k,t} = FZ_{zus,fzg,k,t} \cdot (c_{abs,k} + c_{ki,z,k} + c_{pers,k}) + FK_{zus,fzg,k,t} \cdot (c_{ki,d,k} + c_{energie,k,f} \cdot ec_{k,f})$$

Mit:

$FZ_{zus,fzg,k,t}$ = Zusätzliche Fahrzeugzeit pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t [Fz-Std/Wirkungsdauer]

$FK_{zus, fzg, k, t}$ = Zusätzliche Fahrleistung pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t [Fz-km/Wirkungsdauer]

$c_{abs,k}$ = Abschreibungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

$c_{ki,z,k}$ = zeitabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

$c_{pers,k}$ = Personalkostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]. Standardwerte sind in Tabelle 12 angegeben.

$c_{ki,d,k}$ = entfernungsabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-km]

$c_{energie,k,f}$ = Energiekostensatz für den Verkehrsträger k und die Energieart f [EUR/kWh] or [EUR/l Diesel]. Standardwerte sind in Tabelle 12 angegeben.

$ec_{k,f}$ = Energieverbrauch für den Verkehrsträger k und die Energieart f [kWh/Fz-km] or [l Diesel/Fz-km]

Die **zusätzlichen Fahrzeugzeiten** für die Wirkungsdauer t werden auf der Grundlage des spezifischen Vorfalles und der zu analysierenden Station berechnet. Für den spezifischen Vorfall und die spezifische Station muss analysiert werden, welcher Teil des Netzes betroffen sein wird und wie Schienenersatzverkehre implementiert werden (kurzfristig und langfristig - unter Einbeziehung der Möglichkeit, den Zeitraum mit eingeschränktem Betrieb in zwei oder mehr Teilperioden zu unterteilen). Für den Bezugsfall können die Fahrzeugzeiten für diesen Teil des Netzes aus den Fahrplänen der betroffenen Linien des öffentlichen Verkehrs abgeleitet werden. Die Fahrzeugzeiten für den Planfall sind unter Berücksichtigung der angenommenen Ersatzleistungen zu berechnen.

Die zusätzliche Fahrzeugzeit pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer ist die Differenz zwischen diesen Fahrzeugzeiten:

$$FZ_{zus,Fzg,k,t} = FZ_{Planfall,Fzg,k,t} - FZ_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$$

Mit:

$FZ_{zus,Fzg,k,t}$ = zusätzliche Fahrzeugzeit pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-Std]

$FZ_{Planfall,Fzg,k,t}$ = Fahrzeugzeit für den Planfall (Bedrohung tritt ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-Std]

$FZ_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$ = Fahrzeugzeit für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-Std]

Die **zusätzliche Fahrleistung** pro Verkehrsträger k im Netz für die Wirkungsdauer t wird entsprechend auf der Grundlage des spezifischen Vorfalles und der zu analysierenden Station berechnet. Für den spezifischen Vorfall und die Station muss analysiert werden, welcher Teil des Netzes betroffen sein wird und wie Schienenersatzverkehre umgesetzt werden (kurzfristig und langfristig - unter Berücksichtigung der Möglichkeit, den Zeitraum mit eingeschränktem Betrieb in zwei oder mehr Teilzeiträume zu unterteilen). Für den Bezugsfall kann die Fahrleistung für diesen Teil des Netzes aus den vorhandenen Daten der betroffenen ÖPNV-Linien abgeleitet werden. Die Fahrleistung für den Planfall muss unter Berücksichtigung des angenommenen Schienenersatzverkehrs berechnet werden. Die zusätzliche Fahrleistung pro Verkehrsmittel k für die Wirkungsdauer t ist die Differenz zwischen diesen Fahrleistungen:

$$FK_{zus,Fzg,k,t} = FK_{Planfall,Fzg,k,t} - FK_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$$

Mit:

$FK_{zus,Fzg,k,t}$ = zusätzliche Fahrleistung für den Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-km]

$FK_{Planfall,Fzg,k,t}$ = zusätzliche Fahrleistung für den Planfall (Bedrohung tritt ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-km]

$FK_{Bezugsfall,Fzg,k,t}$ = zusätzliche Fahrleistung für den Bezugsfall (Bedrohung tritt nicht ein) pro Verkehrsträger k für die Wirkungsdauer t [Fz-km]

Die **Abschreibungskostensätze** werden wie folgt berechnet:

$$c_{abs,k} = \frac{[(1+i)^n \cdot i]}{[(1+i)^n - 1]} \cdot \frac{ik_k}{bh_{Jahr}}$$

Wo:

$c_{abs,k}$ = Abschreibungskostensatz pro Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

i = Zinssatz [-]

n = Abschreibungszeitraum [Jahr]

ik_k = Investitionskosten [EUR]

bh_{Jahr} = Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden von Fahrzeugen des Verkehrsträgers k [Std/Jahr]. Standardwert: 3.980 Std/Jahr.

Die **zeitabhängigen Instandhaltungskostensätze** $C_{ki,z,k}$ für den Verkehrsträger k werden wie folgt berechnet:

- $C_{ki,z,k} = \frac{c_{ki,z,w,k} \cdot w_k}{d_{Jahr}}$, wenn die Instandhaltungskosten pro t Gewicht und $Jahr$ bereitgestellt werden [EUR/Fz-Jahr]
- $C_{ki,z,k} = \frac{c_{ki,z,v,k}}{d_{Jahr}}$, wenn die Instandhaltungskosten pro Fahrzeug und Jahr bereitgestellt werden [EUR/Fz-Jahr]

Mit:

$c_{ki,z,v,k}$ = zeitabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Std]

$c_{ki,z,w,k}$ = zeit- und gewichtsabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/t-Jahr]. Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger sind in Tabelle 10 angegeben.

$c_{ki,z,v,k}$ = zeitabhängiger Instandhaltungskostensatz für den Verkehrsträger k [EUR/Fz-Jahr]. Standardwerte für Busse sind in Tabelle 11 angegeben.

w_k = Gewicht der Fahrzeuge des Verkehrsträgers k [t/Fz]

d_{Jahr} = durchschnittliche jährliche Betriebsstunden von Fahrzeugen des Verkehrsträgers k [Std/Jahr], Standardwert: 3.980 Std/Jahr

Für Busse sind die Standardwerte für **entfernungsabhängige Instandhaltungskostensätze** $c_{ki,d,k}$ in Tabelle 11 angegeben.

Wenn entfernungs- und gewichtsabhängige Instandhaltungskosten angegeben werden, können die entfernungsabhängigen Instandhaltungskostensätze $c_{ki,d,k}$ wie folgt berechnet werden:

$$c_{ki,d,k} = \frac{c_{ki,d,w,k} \cdot w_k}{1.000}$$

Mit:

$c_{ki,d,w,k}$ = entfernungs- und gewichtsabhängige Instandhaltungskosten für den Verkehrsträger k [EUR/1,000 t-km]. Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger sind in Tabelle 10 angegeben.

w_k = Gewicht der Fahrzeuge des Verkehrsträgers k [t/Fz]

Für Busse sind Standardwerte für den **Energieverbrauch** $ec_{k,f}$ in Tabelle 11 angegeben.

Wenn der entfernungs- und gewichtsabhängige Energieverbrauch angegeben wird, kann der entfernungsabhängige Energieverbrauch $ec_{k,f}$ wie folgt berechnet werden:

$$ec_{k,f} = \frac{c_{w,k,f} \cdot w_k}{1.000}$$

Mit:

$ec_{w,k,f}$ = entfernungs- und gewichtsabhängiger Energieverbrauch für Verkehrsmittel k und Energieart f [kWh/Fz-km] oder [l Diesel/Fz-km]. Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger sind in Tabelle 10 angegeben.

w_k = Gewicht der Fahrzeuge des Verkehrsträgers k [t/Fz]

Datengrundlagen:

- **Fahrleistung pro Verkehrsträger im Wirkungszeitraum [Fz-km]:** Die Werte müssen vom Benutzer abgeleitet werden (siehe auch allgemeine Anmerkungen zum Anwendungsbereich am Ende dieses Kapitels).
- **Fahrzeugstunden pro Verkehrsträger im Wirkungszeitraum [Fz-Std]:** Die Werte müssen vom Benutzer abgeleitet werden (siehe auch allgemeine Anmerkungen zum Anwendungsbereich am Ende dieses Kapitels).
- **Dauer der Wirkung:** Siehe Kapitel 1.2.4.1
- **Fahrzeuggesteuerungskosten [EUR/Fz-km; EUR/Fz-Std; EUR/kWh; EUR/l Diesel] und Energieverbrauch [kWh/Fz-km; l Diesel/Fz-km] pro Fahrzeug:**
 - Investitionskosten, Abschreibungsdauer, Gewicht der Fahrzeuge und Zinssatz: eigene Werte müssen vom Benutzer angewendet werden

- o Zeitabhängige Instandhaltungskosten, Instandhaltungskosten, lauleistungsabhängige Instandhaltungskosten, lauleistungs- und gewichtsabhängige Instandhaltungskosten, Personalkosten, Energiekosten und Energieverbrauch aus der Standardisierten Bewertung von Verkehrsweeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr, siehe [BU16]

1.2.4.4.2 Beispiel für die Quantifizierung von zusätzlichen Reisezeiten und zusätzlichen Fahrleistungen mit dem vereinfachten Verfahren

Im Folgenden wird die Berechnung der Indikatoren mit dem vereinfachten Ansatz an einem Beispiel illustriert (vgl. Abbildung 6).

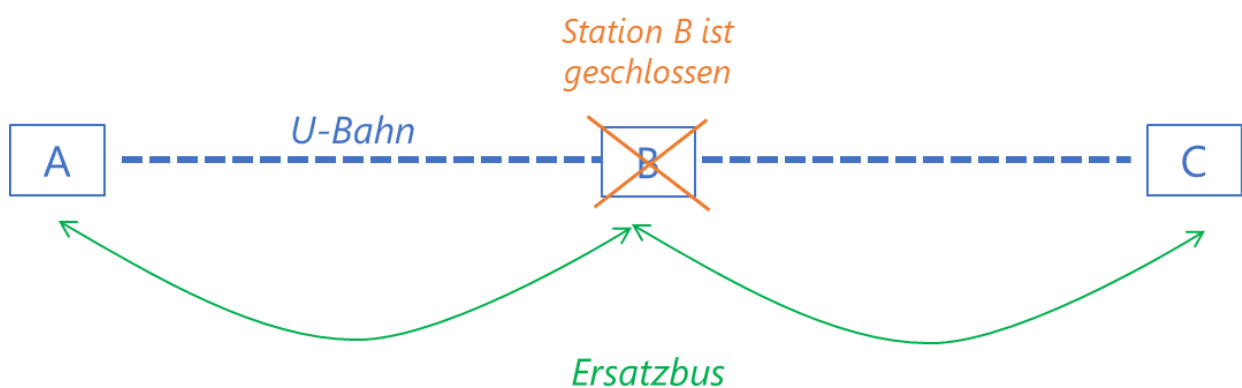


Abbildung 6: Berechnungsbeispiel für den vereinfachten Ansatz

Dazu wird angenommen, dass in der U-Bahn-Station B ein (mittlerer) Brand ausgebrochen ist. Station B ist geschlossen und die U-Bahn-Linie zwischen Station A und Station C ebenfalls. Ein Ersatzbus, der in B hält, verkehrt zwischen Station A und Station C in beiden Richtungen. Der Ersatzbus verkehrt mit derselben Frequenz wie die U-Bahn-Linie. Der Zeitraum, in dem die Station geschlossen bleibt, kann anhand von Tabelle 6 geschätzt werden. Im Falle eines mittleren Brandes in einer Station ist eine Stillstandszeit von 2 Tagen realistisch.

Zusätzliche Reisezeit der Passagiere

Tabelle 7: Beispiel für die Berechnung der zusätzlichen Reisezeit der Passagiere (P-Std)

Strecke	Von A bis B	Von B bis C	Von A bis C
Mit der U-Bahn (vom Anbieter bekannt oder aus der vom Anbieter angegebenen zurückgelegten Entfernung und einer durchschnittlichen Geschwindigkeit abgeleitet)	3 Min	3 Min	7 Min ²
Mit Ersatzbus (geschätzt von einem Web-Mapping-Dienst)	9 Min	9 Min	19 Min ²
Dauer der Wirkung	2 Tage	2 Tage	2 Tage

² Eine 1-minütige Wartezeit an Station B wird in Betracht gezogen

Zusätzliche Reisezeit (berechnet)	$9 - 3 = 6 \text{ Min}$	$9 - 3 = 6 \text{ Min}$	$19 - 7 = 12 \text{ Min}$
Anzahl der betroffenen Passagiere (vom Anbieter bekannt)	1000 P/Tag	500 P/Tag	2000 P/Tag
Zusätzliche Reisezeit der Passagiere (berechnet)	$6/60 \times 1000 \times 2 = 200 \text{ P-Std}$	$6/60 \times 500 \times 2 = 100 \text{ P-Std}$	$12/60 \times 2000 \times 2 = 800 \text{ P-Std}$

Für die Berechnung der zusätzlichen Reisezeit der Passagiere werden zunächst die Fahrzeitunterschiede zwischen U-Bahn und Bus auf den Relationen A–B, B–C und A–C berechnet (im Beispiel 6, 6 und 12 min). Durch Multiplikation mit der jeweils betroffenen Anzahl an Passagieren ergibt sich die zusätzliche Reisezeit je Relation. Die zusätzliche Reisezeit ist die Summe der relationsbezogenen Reisezeiten (im Beispiel $200 + 100 + 800 = 1.100 \text{ P-Std}$).

Wartezeiten für Fahrgäste, deren Fahrten vor der Station A beginnen und nach der Station C enden, werden im vereinfachten Ansatz nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie die Möglichkeit, dass Fahrgäste auch zu Fuß von der Station A zur Station B oder C laufen könnten.

Zusätzliche Fahrleistung je Verkehrsträger

Tabelle 8: Beispiel für die Berechnung der zusätzlichen Fahrleistung je Verkehrsträger (Fz-km)

Strecke	Von A bis B	Von B bis C	Von A bis C
Dauer der Wirkung	2 Tage	2 Tage	2 Tage
Mit der U-Bahn zurückgelegte Entfernung (vom Anbieter bekannt oder aus Fahrzeit und Durchschnittsgeschwindigkeit geschätzt)	$3 \text{ Min} \times 30 \text{ km/Std}$ $= 3/60 \times 30 \text{ km}$ $= 1,5 \text{ km}$	$3 \text{ Min} \times 30 \text{ km/Std}$ $= 3/60 \times 30 \text{ km}$ $= 1,5 \text{ km}$	$6 \text{ Min} \times 30 \text{ km/Std}$ $= 6/60 \times 30 \text{ km}$ $= 3 \text{ km}$
Anzahl der Züge pro Tag für beide Richtungen (vom Dienstanbieter bekannt)	216	216	216
Zusätzliche Fahrleistung für die Schiene während der Wirkungsdauer	Nicht relevant (enthalten in A–C)	Nicht relevant (enthalten in A–C)	$0 - 216 \text{ Züge} \times 3 \text{ km} \times 2 \text{ Tage}$ $= -1.296 \text{ Fz-km}$
Mit dem Ersatzbus zurückgelegte Entfernung (geschätzt von einem Web-Mapping-Dienst)	$9 \text{ Min} \times 15 \text{ km/Std}$ $= 9/60 \times 15 \text{ km}$ $= 2,25 \text{ km}$	$9 \text{ Min} \times 15 \text{ km/Std}$ $= 9/60 \times 15 \text{ km}$ $= 2,25 \text{ km}$	$18 \text{ Min} \times 15 \text{ km/Std}$ $= 18/60 \times 15 \text{ km}$ $= 4,5 \text{ km}$
Anzahl der Busse	432	432	432
Zusätzliche Fahrleistung für Busse während der Wirkungsdauer	Nicht relevant (enthalten in A–C)	Nicht relevant (enthalten in A–C)	$432 \text{ Busse} \times 4,5 \text{ km} \times 2 \text{ Tage}$ $= 3.888 \text{ Fz-km}$

Da im vorliegenden Beispiel alle U-Bahn-Fahrten auf der Strecke A–C entfallen und der Ersatzverkehr immer die gesamte Strecke A–C bedient, genügt es für die Berechnung der zusätzlichen Verkehrsleistung allein die Relation A–C zu betrachten. Durch das Entfallen von 216 Fahrten für eine Strecke von jeweils 3 km an insgesamt 2 Tagen ergibt sich für die U-Bahn negativer Wert von -1.296 Fz-km .

Demgegenüber ergibt sich für den Bus eine zusätzliche Fahrleistung von 3.888 Fz-km , wobei angenommen wurde, dass der Ersatzbus jeweils eine längere Strecke als der Zug zurückzulegen hat und für die Beförderung der gleichen Anzahl von Fahrgästen die doppelte Anzahl von Bussen benötigt wird. Wie oben erwähnt, arbeitet der angenommene Ersatzdienst mit der gleichen Frequenz wie die U-Bahn-Linie, so dass immer zwei Busse gleichzeitig die Stationen verlassen.

Die Entfernungen zwischen den Stationen können als bekannt vorausgesetzt oder mit Hilfe eines Web-Mapping-Dienstes geschätzt werden.

Zusätzliche Fahrzeugstunden pro Verkehrsträger

Zusätzliche Fahrzeugstunden pro Verkehrsträger werden auf die gleiche Weise berechnet wie zusätzliche Fahrzeugkilometer pro Verkehrsträger, jedoch unter Berücksichtigung der Betriebszeit anstelle der Entfernung (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Beispiel für die Berechnung der zusätzlichen Fahrzeugstunden pro Verkehrsträger

Strecke	Von A bis B	Von B bis C	Von A bis C
Dauer der Wirkung	2 Tage	2 Tage	2 Tage
Zusätzlich mit der Bahn gefahrene Zeit	-3 Min	-3 Min	-7 Min
Anzahl der Züge pro Tag für beide Richtungen (vom Dienstanbieter bekannt)	216	216	216
Zusätzliche Fahrzeugstunden für die Schiene während der Wirkungs-dauer	Nicht relevant (enthalten in A–C)	Nicht relevant (enthalten in A–C)	0 - 216 Züge x 7 Min x 2 Tage = 0- 216*7/60*2 Fz-Std = - 50,4 Fz-Std
Mit dem Ersatzbus gefahrene Zeit (geschätzt)	9 Min	9 Min	19 Min
Anzahl der Busse	432	432	432
Zusätzliche Fahrzeugstunden für Busse während der Wirkungs-dauer	Nicht relevant (enthalten in A–C)	Nicht relevant (enthalten in A–C)	432 Busse x 19 Min x 2 Tage - 0 = 432 x 19/60 x 2 Fz-Std = 273,6 Fz-Std

1.2.4.4.3 Standardwerte

Um die Berechnungen zu vereinfachen, wurden Standardwerte für die wichtigsten Verfahrensparameter zusammengestellt. Diese werden in den folgenden Tabellen wiedergegeben. Die Werte können sowohl im modellgestützten als auch im vereinfachten Ansatz verwendet werden. Die Werte sind der deutschen Richtlinie für die standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr [BU16] entnommen.

Tabelle 10: Betriebskosten und Energieverbrauch der Fahrzeuge für den aufnehmenden Verkehrsträger Schiene

	Zeit- und gewichtsabhängige Instandhaltungskosten $C_{ki,z,w,k}$ [EUR/t-Jahr]	Entfernungs- und gewichtsabhängige Instandhaltungskosten $C_{ki,d,w,k}$ [EUR/1.000 t-km]	Entfernungs- und gewichtsabhängiger Energieverbrauch $e_{C_{w,k,elektrifiziert}}$ [kWh/1.000 t-km]	Entfernungs- und gewichtsabhängiger Energieverbrauch $e_{C_{w,k,Diesel}}$ [l Diesel/1.000 t-km]
U-Bahn	610	12,2	80	--
Straßenbahn/Straßenbahn	650	19,0	91,4	--
Zwei-System-Stadtbahn (elektrifiziert/elektrifiziert)	690	20,0	91,4	--
Zwei-System-Stadtbahn (elektrifiziert/Diesel)	720	20,9	91,4	10,1

Tabelle 11: Fahrzeugbetriebskosten und Energieverbrauch für Busse

	Zeitbasierte Instandhaltungskosten $C_{ki,z,v,k}$ [EUR/Fz-Jahr]	Entfernungsabhängige Instandhaltungskosten $C_{ki,d,k}$ [EUR/Fz-km]	Entfernungsabhängiger Energieverbrauch $e_{C_{k,Diesel}}$ [l Diesel/Fz-km]
Midibus	6.600	0,31	0,24
Standard-Bus	8.400	0,39	0,32
Großraumbus	9.300	0,43	0,40
Gelenkbus	9.600	0,45	0,44
Doppelgelenkbus	10.800	0,50	0,56
Buszug	13.400	0,62	0,56

Tabelle 10 und Tabelle 11 enthalten Standardwerte für Fahrzeugbetriebskosten und Energieverbrauch von schienenengebundenem Verkehr und Bussen. Es ist wichtig zu beachten, dass sich die Standardwerte für schienengebundene Verkehrsträger auf das Gewicht der Fahrzeuge pro Tonne und Jahr oder auf jeweils 1.000 Tonnenkilometer beziehen (Einheiten [EUR/t-Jahr], [EUR/1.000 t-km], [kWh/1.000 t-km] und [l Diesel/1.000 t-km]), während die Werte für Busse pro Fahrzeugjahr oder Fahrzeugkilometer angegeben werden (Einheiten [EUR/Fz-Jahr], [EUR/Fz-km] und [l Diesel/Fz-km]).

Tabelle 12: Energie- und Personalkosten

	Einheit	Wert
Energiekosten (Nettowert, ohne Steuern)		
Strom	[EUR/kWh]	0,12
Diesel	[EUR/l Diesel]	0,75
Personalkosten		
Busse	[EUR/Fz-Std]	39
Schienegebundene Verkehrsträger	[EUR/Fz-Std]	46

Tabelle 12 enthält Standardwerte für Personalkosten und Energieverbrauch.

1.2.4.4 Schlussbemerkung

Im Allgemeinen erfordert die Vulnerabilitätsbewertung einer Station die Berechnung zusätzlicher Reisezeiten und Betriebskosten für eine Reihe verschiedener Bedrohungen, von denen einige dieselben Auswirkungen haben. Um den Berechnungsaufwand zu minimieren, wird folgender Ansatz empfohlen:

1. Identifizieren Sie alle Kombinationen betrieblicher Auswirkungen, die bei mindestens einer relevanten Bedrohung auftreten.
2. Berechnen Sie für jede im ersten Schritt identifizierte Kombination zusätzliche tägliche Reisezeiten und operative Kosten.
3. Berechnen Sie zusätzliche (Gesamt-)Reisezeiten und Betriebskosten, indem Sie für jede Bedrohung die Dauer der operationellen Auswirkungen mit den Tageswerten der entsprechenden Kombination multiplizieren.

Wenn die Zeitspanne zwischen t_1 und t_2 in Teilperioden unterteilt wird, muss der dritte Schritt für jede Teilperiode durchgeführt werden, und die Werte der Teilperioden müssen summiert werden. Der Ansatz wird aufwendiger, wenn aus Gründen der Genauigkeit zwischen den Wirkungen an verschiedenen Tagestypen, z. B. Werktag, Samstag und Sonntag, unterschieden werden muss.

1.2.5 Geltungsbereich und Einschränkungen

Es wird empfohlen, immer dann das anspruchsvolle Verfahren zur Berechnung der Bewertungsindikatoren zu verwenden, wenn ein Verkehrsmodell zur Verfügung steht, da insbesondere die Annahme des vereinfachten Ansatzes, dass alle Nutzer den Schienenersatzverkehr nutzen, sowohl aus Sicht der Nutzer als auch aus Sicht des Betreibers unrealistisch ist. Beispielsweise könnten die Fahrgäste andere Linien oder Wege im öffentlichen Verkehrsnetz nutzen, um eine blockierte Station zu umgehen. Für die Betreiber könnte es schlicht unmöglich sein, die Kapazität einer U-Bahn-Linie mit Bussen bereitzustellen.

Bei einem Verkehrsmodell kann die intramodale Verlagerung (Nutzung alternativer Strecken oder Linien anstelle des Schienenersatzverkehrs durch Busse) leicht berücksichtigt werden. Wenn das Modell sowohl den öffentlichen als auch den privaten Verkehr einbezieht, können sogar die Auswirkungen einer intermodalen Verlagerung berechnet werden. Ein Modell könnte auch zusätzliche Informationen über die betroffenen Nutzer oder über Veränderungen in der Auslastung der Linien infolge von Routenänderungen der Fahrgäste im Netz liefern.

Modelle haben jedoch Anwendungsgrenzen. Für die Bewertung der Kritikalität könnte ein reines ÖV-Modell ausreichen, aber ohne ein IV-Modell können Veränderungen in der Verkehrsmittelwahl (z. B. als Folge eines verringerten Vertrauens in das öffentliche Verkehrssystem nach einem Zwischenfall) ggf. nicht ausreichend modelliert werden. Andere Einschränkungen könnten sich aus dem Zweck ergeben, für den das Modell erstellt wurde. Zu diesen Einschränkungen können das erfasste geografische Gebiet, die modellierten Verkehrsmittel oder die Genauigkeit des Modells in Bezug auf verschiedene Aspekte gehören. So

könnte das Modell z. B. eine taktbasierte Umlegung anstelle des wahren Fahrplans verwenden, oder es könnten betriebliche Aspekte wie Umläufe oder verwendete Fahrzeugkombinationen zur Vereinfachung des Modells nicht berücksichtigt worden sein. Oftmals werden nicht alle Schritte des klassischen 4-Stufen-Modells implementiert. Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung könnten durch eine aus Haushaltsbefragungen generierte Nachfragematrix ersetzt worden sein, da dies für den Zweck, für den das Modell einmal gebaut wurde, ausreichend gewesen wäre. Natürlich kann ein Modell auch einfach veraltet sein.

Eine andere Klasse von Problemen ergibt sich aus der Tatsache, dass ein Modell normalerweise kalibriert werden muss, um einem bestimmten beobachteten Zustand zu entsprechen. Das bedeutet, dass die Genauigkeit eines Modells abnimmt, je weiter ein Szenario von dem Basisszenario abweicht, für das es kalibriert wurde. Im Zusammenhang mit der Bewertung der Kritikalität bedeutet dies, dass die Auswirkungen gravierender Veränderungen im Netz, wie etwa der Einstellung des Verkehrs auf einer Linie, nur unzureichend prognostiziert werden können und, dass Extremfälle (z. B. Einstellung des gesamten Betriebs) überhaupt nicht simuliert werden können, da dann wahrscheinlich grundlegende Annahmen des Modells (wie z. B., dass Nachfrage und Angebot nahezu ausgeglichen sind) verletzt werden.

Obwohl also das anspruchsvolle Verfahren im Allgemeinen bessere Ergebnisse liefert als der vereinfachte Ansatz, sollten auch dessen Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden.

1.2.6 Zusammenfassung

Im Rahmen des U-THREAT-Projekts wurde ein sektorales Bewertungsverfahren zur Bewertung der operationellen Vulnerabilität entwickelt.

Um die Anzahl der Stationen, die im Detail bewertet werden müssen, zu reduzieren, besteht das Bewertungsverfahren aus einem zweistufigen Ansatz: Zunächst werden potenziell kritische Stationen auf der Grundlage definierter operationeller Vorfilterkriterien identifiziert. Danach wird die Vulnerabilität dieser Stationen im Detail bewertet.

Für die eigentliche Vulnerabilitätsbewertung kann ein vereinfachter oder ein umfassender, modellbasierter Ansatz angewendet werden. Es wird empfohlen, den umfassenden Ansatz zu wählen, insbesondere dann, wenn ein Verkehrsmodell zur Verfügung steht bzw. im Besitz des Verkehrsunternehmens ist, da in diesem Fall die erforderlichen Ressourcen für die Anwendung der Ansätze recht ähnlich sind. Der vereinfachte Ansatz erfordert kein Verkehrsmodell, erlaubt aber auch nur eine grobe Abschätzung der betrieblichen Vulnerabilität der Stationen. Er kann angewendet werden, wenn Verkehrsbetreiber keinen Zugang zu einem Verkehrsmodell haben.

Auf der Grundlage des beschriebenen Verfahrens sind Verkehrsunternehmen nun in der Lage, die Stationen ihres Netzes hinsichtlich der operationellen Vulnerabilität zu analysieren.

1.3 Exemplarische Vulnerabilitätsanalyse

Wie in Kapitel 1.2 der eingehenden Ergebnisdarstellung beschrieben, besteht die entwickelte Methodik aus den beiden Schritten

1. Vorfilter zur Identifikation potenziell kritischer Stationen und
2. Bewertung der Vulnerabilität aus betrieblicher Sicht.

Sie wurde anhand der Stationen zweier Städte mit umfangreichen U-Bahn-Systemen exemplarisch angewendet.

1.3.1 Ableitung kritischer U-Bahn-Stationen durch Anwendung betrieblicher Vorfilterkriterien

Dieses Kapitel beschreibt die Anwendung der Vorfilterkriterien auf die U-Bahn-Stationen zweier europäischer Städte.

1.3.1.1 Zielstellung

Die Aufgabe des Vorfilters besteht darin, potenziell kritische unterirdische Stationen zu identifizieren. Damit soll die Anzahl der im folgenden Schritt zu bewertenden Stationen auf eine überschaubare Größe reduziert werden.

Das Verfahren wurde auf die U-Bahn-Stationen zweier europäischer Städte angewandt, die aus Sicherheitsgründen anonymisiert und in

- Modellstadt 1 und

- Modellstadt 2

umbenannt wurden.

Die beiden Städte wurden ausgewählt, weil sie beide über umfangreiche unterirdische Netze verfügen und für jede von ihnen ein Verkehrsmodell zur Verfügung stand. Dies ermöglichte die Anwendung sowohl des modellgestützten als auch des vereinfachten Verfahrens zur Berechnung der Vulnerabilitätsindikatoren.

1.3.1.2 Vorfilterkriterien

Zur Identifikation der kritischsten Stationen, wurden zwei Indikatoren ausgewählt:

Der Indikator "Anzahl der Fahrgäste" beschreibt die Gesamtzahl der Fahrgäste aller an einer Station verkehrenden Linien pro Tag. Er ist ein gutes Kriterium, um die Auswirkungen von Bedrohungen auf die Verkehrsnachfrage zu beurteilen. Darüber hinaus ist er leicht quantifizierbar, entweder auf der Grundlage von Umfragen, die von den Verkehrsunternehmen regelmäßig durchgeführt werden, oder auf der Grundlage der Verkehrsmodelle der Betreiber.

Der zweite Indikator "Fahrgastkapazität" ist die Summe der Sitz- und Stehplätze aller an einer Station pro Tag verkehrenden Linien. Er erlaubt es, die Auswirkungen auf die erbrachte Dienstleistung (Verkehrsangebot) zu beurteilen und kann anhand von Fahrplänen und verwendeten Fahrzeugen leicht berechnet werden.

Für eine detailliertere Analyse lassen sich beide Kriterien untergliedern. So kann beispielsweise zwischen ein- und aussteigenden sowie durchfahrenden Passagieren oder zwischen Gesamtkapazität und Anzahl der Sitzplätze unterschieden werden.

1.3.1.3 Modellstadt 1

Das unterirdische Netz der Modellstadt 1 hat eine Gesamtlänge von mehr als 100 km und umfasst mehr als 80 Stationen. Mehr als 50 % seiner Länge befinden sich überirdisch, so dass sich auch nur etwa die Hälfte der Stationen in Tunneln befindet. Das U-Bahnnetz ist Teil eines öffentlichen Verkehrssystems, zu dem auch Busse, Straßenbahnen und S-Bahnen gehören.

1.3.1.4 Randbedingungen Modellstadt 1

Da sich das Projekt auf die Bewertung unterirdischer Stationen konzentriert, beschränkte sich die Analyse auf die Stationen, die sich tatsächlich in Tunneln befinden.

1.3.1.5 Ergebnisse für Modellstadt 1

Dank des für die Modellstadt 1 vorliegenden ÖV-Modells konnten alle Werte für beide Vorfilterkriterien aus dem Modell extrahiert werden.

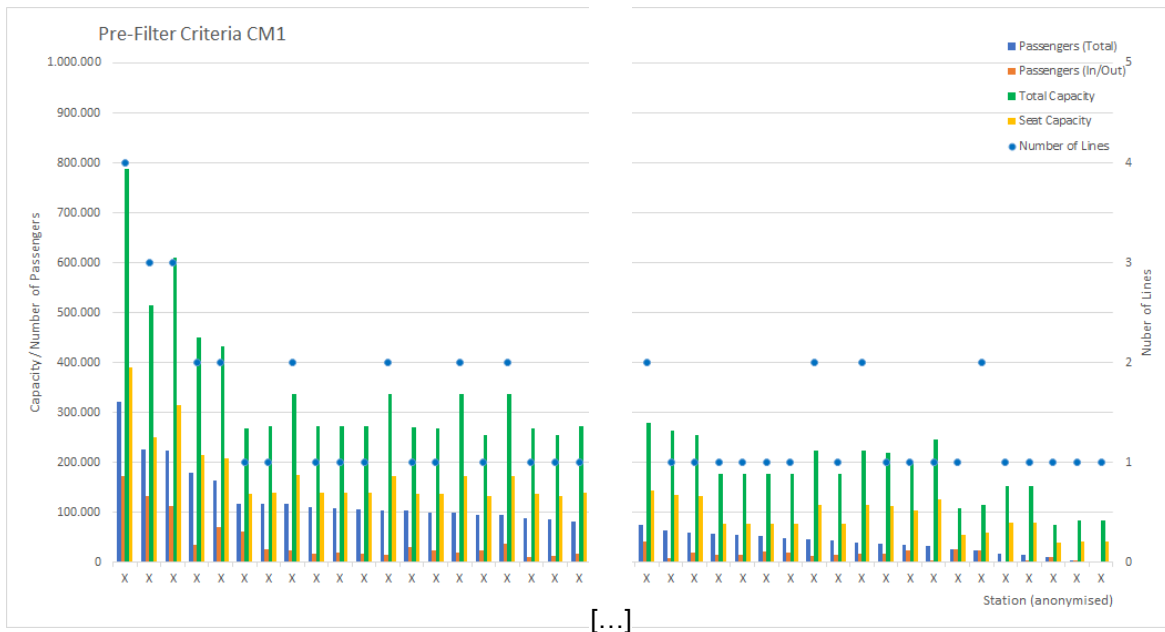


Abbildung 7: Werte der Vorfilterkriterien für Modellstadt 1 (Auswahl)

Abbildung 7 zeigt die Werte für "Anzahl der Fahrgäste" ("Passengers (Total)", blau) und "Fahrgastkapazität" („Total Capacity“, grün) sowie die Zusatzindikatoren "Einsteiger-/Aussteiger" ("Passengers (In/Out)", orange), "Sitzplatzkapazität" („Seat Capacity“, gelb) und "Anzahl Linien" („Number of Lines“, blaue Punkte). Die linke Y-Achse mit maximal 1.000.000 Fahrgästen gehört zu den ersten vier Indikatoren, die zweite Y-Achse zu "Anzahl Linien".

Jede Spaltengruppe entspricht einer Station, und die Stationen sind nach der Anzahl der Fahrgäste in absteigender Reihenfolge sortiert. Wie Abbildung 7 zeigt, sind die ersten 5 Stationen in Bezug auf beide Indikatoren die kritischsten. Diese Bahnhöfe sind aus betrieblicher Sicht auch deswegen potenziell kritisch, weil sie die Möglichkeit bieten, zwischen Linien umzusteigen (Anzahl Linien - blaue Punkte - größer eins).

1.3.1.6 Modellstadt 2

Das Netz der Modellstadt 2 besitzt eine Länge von mehr als 30 km und befindet sich fast vollständig unter der Erde. Somit sind fast alle Stationen echte unterirdische Stationen. Das U-Bahnnetz ist Teil eines öffentlichen Verkehrssystems, zu dem auch Busse, Straßenbahnen und S-Bahnen gehören.

1.3.1.7 Randbedingungen Modellstadt 2

Da alle Stationen von Modellstadt 2 echte U-Bahn-Stationen sind, wurden alle Stationen in die Analyse einbezogen.

1.3.1.8 Ergebnisse für Modellstadt 2

Wie bei Modellstadt 1 wurden alle Werte der beiden Vorfilterkriterien aus einem Transportmodell entnommen. Abbildung 8 enthält neben der "Anzahl der Fahrgäste" und der "Fahrgastkapazität" auch die Zahlen für Einsteiger und Aussteiger sowie die Anzahl der Linien, die an einer Station halten. Die Bahnhöfe sind nach "Anzahl der Fahrgäste" in absteigender Reihenfolge sortiert.

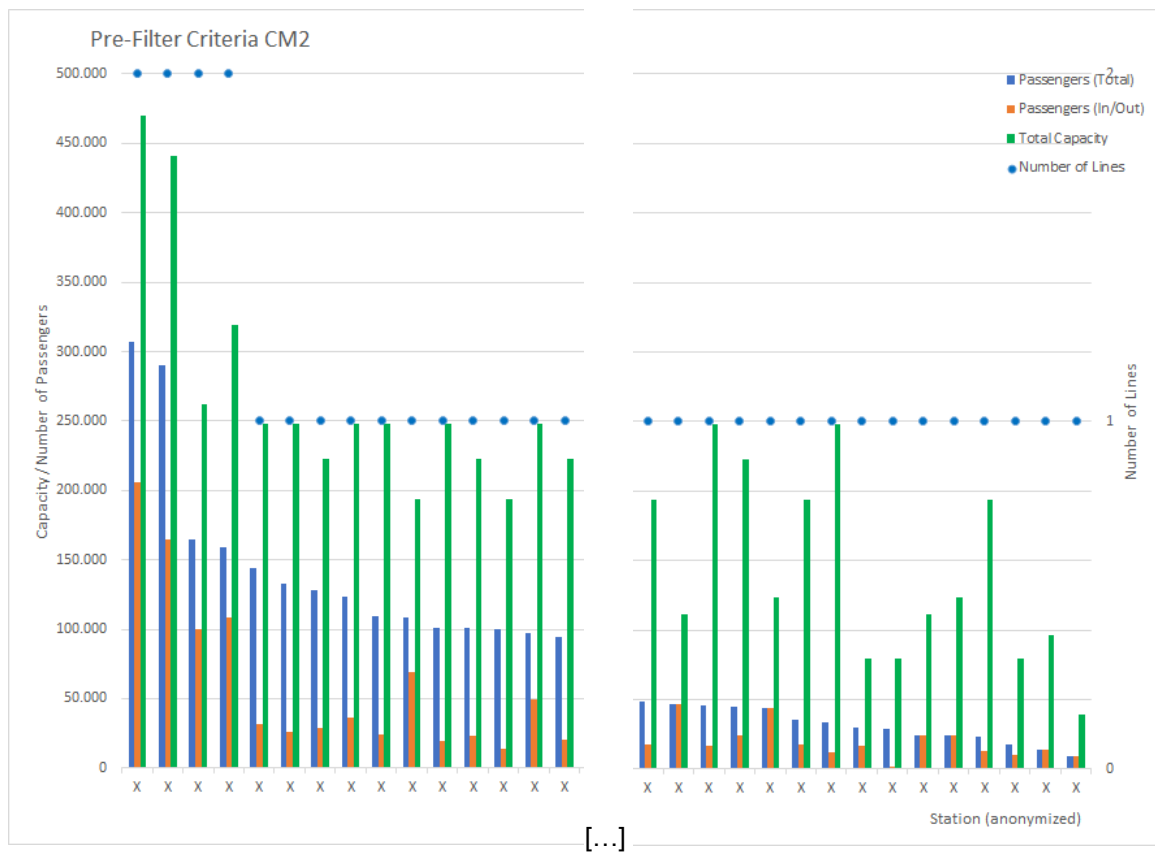


Abbildung 8: Werte der Vorfilterkriterien für Modellstadt 2 (Auswahl)

Wie in Abbildung 8 dargestellt, gibt es nur Stationen mit einer oder zwei Linien, und die 4 Kreuzungsstationen, an denen ein Umsteigen möglich ist (blaue Punkte zeigen an, dass die Anzahl der Linien 2 beträgt), sind nach beiden Indikatoren auch die kritischsten.

1.3.2 Bewertung der Vulnerabilität von U-Bahn-Stationen aus betrieblicher Sicht

1.3.2.1 Bewertungsindikatoren

Zur Berücksichtigung betrieblicher Aspekte bei der Bewertung der Vulnerabilität von Stationen wurden drei Bewertungsindikatoren definiert. Dabei handelt es sich um

- *Dauer,*
- *zusätzliche Reisezeit* und
- *zusätzliche Betriebskosten.*

Sie müssen für alle relevanten Bedrohungen jeder potenziell kritischen Station berechnet werden.

1.3.2.2 Bewertungsverfahren

Das folgende Vorgehen ermöglicht die Berechnung der Bewertungsindikatoren unter Berücksichtigung der relevanten Bedrohungen und der örtlichen Gegebenheiten einer Station:

1. Identifizierung kritischer Standorte
2. Identifizierung relevanter Bedrohungen
3. Identifizierung der Auswirkungen von Ereignissen auf den Verkehr
4. Operationalisierung von Bedrohungsauswirkungen im Hinblick auf Verkehrsszenarien
5. Berechnung von Änderungen der Reisezeit, der Fahrleistung und der Fahrzeit
6. Berechnung der Bewertungsindikatoren.

Der erste Schritt besteht darin, Bereiche zu identifizieren, in denen ein Ereignis auftreten könnte oder die davon betroffen sein könnten. Mögliche Orte können z. B. Eingänge, Tunnel, Bahnsteige oder Treppenhäuser sein.

Im zweiten Schritt werden die relevanten Bedrohungen in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten definiert. So sollte beispielsweise geprüft werden, ob Hochwasser eine relevante Bedrohung für eine bestimmte Station darstellt. Anschließend werden mögliche Auswirkungen auf den Verkehr, wie z. B. die Unterbrechung einer Linie, identifiziert. Es ist sinnvoll, sowohl Bedrohungen als auch Auswirkungen zu kombinieren, um "Bedrohungsszenarien" zu definieren, die Bedrohungen und die daraus resultierenden Konsequenzen widerspiegeln.

In Schritt 4 wird jeder Bedrohungseffekt im Hinblick auf ein Verkehrsszenario operationalisiert. Wenn zum Beispiel eine Strecke unterbrochen wird, muss definiert werden, zwischen welchen Bahnhöfen die Unterbrechung auftritt und ob zwischen diesen Bahnhöfen ein Schienenersatzverkehr eingerichtet wird.

Wenn Verkehrsszenarien definiert werden, werden für jedes Szenario Tageswerte der Bewertungsindikatoren berechnet. Je nach Verfügbarkeit eines Verkehrsmodells kann dies entweder mit einem umfassenden modellbasierten Verfahren oder mit einem vereinfachten Verfahren erfolgen. Beide Ansätze werden in Kapitel 1.2.3.2 beschrieben.

Schließlich werden die Werte der Bewertungsindikatoren für jede relevante Bedrohung jeder Station auf der Grundlage der für die jeweiligen Verkehrsszenarien berechneten Werte berechnet. Die Werte dienen als Input für die Gesamtbewertung der Vulnerabilität der Stationen (siehe Abschnitt 1.1).

1.3.2.3 Modellstadt 1

Für die erste Beispielanwendung wurden drei Stationen des U-Bahnnetzes der Modellstadt 1 (siehe Abschnitt 1.3.1.3) ausgewählt.

Um die Ergebnisse des modellgestützten und des vereinfachten Ansatzes vergleichen zu können, wurden die Werte der Bewertungsindikatoren der ersten Station mit beiden Ansätzen berechnet. Die anderen Stationen wurden hinzugefügt, um das Gesamtbewertungsverfahren, das auf dem paarweisen Vergleich von Stationen basiert, mit den Ergebnissen verschiedener Stationen versorgen zu können. Hierfür wurde nur der vereinfachte Ansatz angewandt.

1.3.2.4 Station 1

Station 1 ist eine potenziell kritische Station mit einer hohen Anzahl von Fahrgästen, an der sich die X- und die Y-Linie kreuzen.

1.3.2.4.1 Kritische Bereiche von Station 1

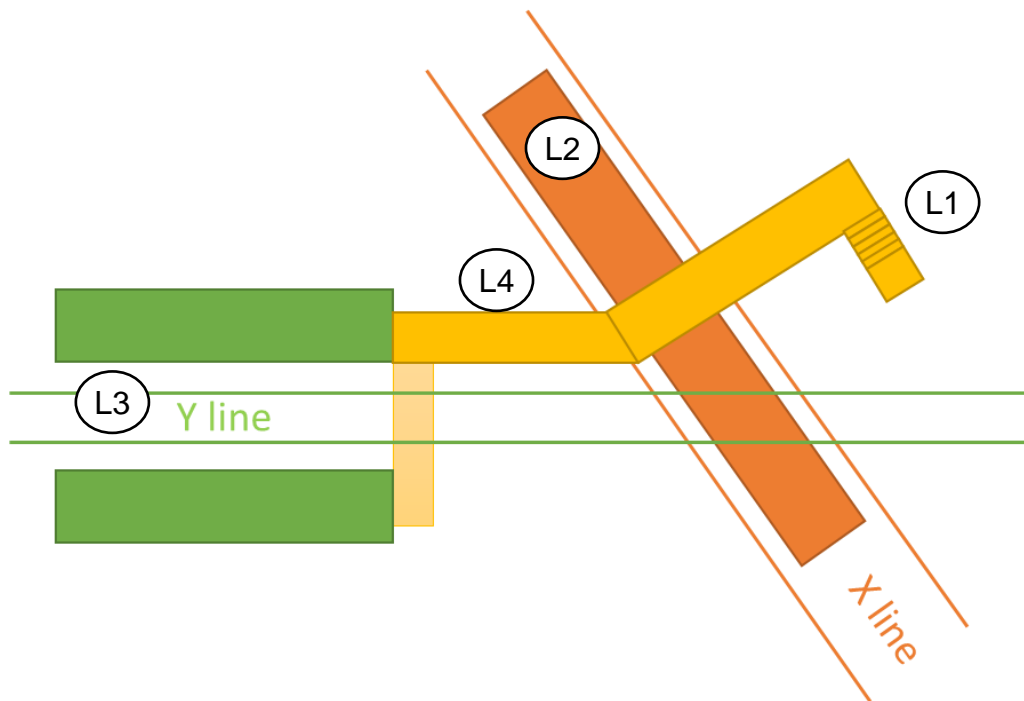


Abbildung 9: Kritische Bereiche von Station 1 (Modellstadt 1)

Abbildung 9 zeigt den abstrakten Grundriss der Station 1, die im Wesentlichen aus vier Teilen besteht: dem Eingangsbereich (L1), dem Tunnel der X-Linie (L2), dem Tunnel der Y-Linie (L3) sowie einem Personentunnel (L4).

Eingangsbereich (L1)

Der Eingangsbereich auf Ebene -1 bietet den einzigen Zugang sowohl zur X-Linie als auch zum Tunnel der Y-Linie.

Ein Ereignis in diesem Bereich könnte Fahrgäste daran hindern, den Bahnhof zu betreten oder zu verlassen und so dazu führen, dass Züge nicht im Bahnhof halten können. Die zusätzliche Annahme dabei ist, dass aus Sicherheitsgründen auch ein Umsteigen nicht möglich ist, da Personen im Notfall den Bahnhof nicht verlassen könnten.

Tunnel der X-Linie (L2)

Der Tunnel der X-Linie befindet sich auf der Ebene -2 unter dem Verbindungstunnel zwischen dem Eingangsbereich und dem Tunnel der Y-Linie. Er besitzt einen zentralen Bahnsteig zwischen den beiden Gleisen der X-Linie.

Ein Ereignis, das den Tunnel der X-Linie beschädigt, würde wahrscheinlich nur die X-Linie betreffen. Je nach Schwere des Ereignisses könnte es zu verkürzten Zügen auf der X-Linie, zur Durchfahrt von Zügen der X-Linie durch den Bahnhof ohne Halt oder zu einer Unterbrechung der X-Linie (Züge der X-Linie fahren nicht durch die Station) kommen.

Tunnel der Y-Linie (L3)

Der Tunnel der Y-Linie befindet sich im ersten Untergeschoss, d. h. auf derselben Ebene wie der Eingangsbereich und der Verbindungstunnel. Er besitzt zwei Bahnsteige, einen auf jeder Seite der Gleise. Die Bahnsteige sind durch einen Fußgängertunnel auf der Ebene -2 unter den Gleisen verbunden. Da es sich bei der Y-Linie um eine "Ringlinie" handelt, fahren die Züge auf beiden Bahnsteigen unabhängig voneinander.

Ein Zwischenfall im Tunnel der Y-Linie würde wahrscheinlich nur die Y-Linie betreffen, was zu verkürzten Zügen auf einer oder beiden Seiten, zur Durchfahrt von Zügen der Y-Linie auf einer oder beiden Seiten oder zu einer Unterbrechung der Y-Linie führen könnte (Züge der Y-Linie fahren nicht durch die Station).

Fußgängertunnel zwischen Eingangsbereich / Tunnel der X-Linie und dem Tunnel der Y-Linie (L4)

Der Personentunnel zwischen dem Eingangsbereich und dem Tunnel der Y-Linie befindet sich auf der

Ebene -1 über dem Tunnel der X-Linie.

Ein Zwischenfall in der Nähe des Eingangsbereichs könnte den Zugang zur X-Linie und zur Y-Linie verhindern. Er hätte dieselben Auswirkungen wie ein Zwischenfall im Einfahrtsbereich.

Ein Störfall im Bereich zwischen der X-Linie und dem Tunnel der Y-Linie würde den Zugang zur Y-Linie verhindern und dazu führen, dass Züge der Y-Linie in der Station nicht halten können.

Zusammenfassung

Nur Kombinationen von schweren Schäden in beiden unterirdischen Tunneln (L2 und L3) würden zu einem Totalverlust der Station führen, womit eine Unterbrechung der X-Linie und der Y-Linie Y und/oder keine Durchfahrt von Zügen auf beiden Linien gemeint ist. Mit Ausnahme von Schäden im Eingangsbereich (L1) oder im Fußgängertunnel (L4) in der Nähe des Eingangsbereichs ist die Station 1 für Fahrgäste also in fast allen Fällen entweder über die X-Linie oder über die Y-Linie erreichbar.

1.3.2.4.2 Relevante Bedrohungen

Tabelle 13: Bedrohungs-Wirkungs-Matrix

BEDROHUNG	id	BETRIEBLICHE AUSWIRKUNGEN												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Schließung eines oder mehrerer Zugänge der Station	Schließung eines Teils des Bahnsteigs	Schließung eines Seitenbahnsteigs (eine Richtung)	Schließung eines Mittelbahnsteigs oder zweier Seitenbahnsteige (beide Richtungen)	Schließung aller Bahnsteige	Unterbrechung einer Linie in eine Richtung	Unterbrechung einer Linie in beide Richtungen	Unterbrechung aller Linien (Station ist geschlossen)	Absperrung Tunnel zwischen benachbarten Stationen	Schließung von 1 oder mehreren benachbarten Stationen	Stilllegung einer kompletten Linie (kein Zugverkehr)	Stilllegung des gesamten U-Bahn-Netzes	Stilllegung des gesamten Netzes (kein U-Bahn/Bus/Straßenbahnverkehr)
Bombenangriff	EXP.													
kleine Sprengkraft (beweglich)	EXP-01	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	x	x	x
kleine Sprengkraft (Kontakt)	EXP-02	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x
NRBC-Angriff	NRBC													
BC (toxische Freisetzen aus der Industrie)	NRBC-10	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x
Mass Shooting (Amoklauf / Schießerei)	MS													
im Zug	MS-01	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	x
in Station	MS-03	x	x	x	x	x	-	x	x	-	-	x	x	x
Brand	FL													
Kleiner Brand in Station	FL-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Brand in Station	FL-02	x	-	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
Großer Brand in Station	FL-03	x	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
Kleiner Brand im Zug in Station	FL-04	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Mittlerer Brand im Zug in Station	FL-05	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Großer Brand im Zug in Station	FL-06	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Kleiner Brand im Zug im Tunnel	FL-07	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Mittlerer Brand im Zug im Tunnel	FL-08	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Großer Brand im Zug im Tunnel	FL-09	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-
Brand in einem technischen Teil der Station	FL-10	-	-	x	x	x	-	x	x	-	-	-	-	-
Brand in einem strategischen Raum (Operationszentrum)	FL-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-
Kabelbrand im Tunnel	FL-12	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	-
Kollision	DM.													
Kollision mit Hindernissen	DM-01	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-
Kollision mit anderen Zügen/Fahrzeugen	DM-02	-	-	x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-
Technisches Versagen	TF.													
Tunnelausfall	TF-05	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-
Stromausfall	TF-08	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
CBTC Versagen	TF-09	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
Hoax	HX.													
Explosion	HX-01	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-
Naturkatastrophen	ND.													
Überflutung	ND-01	x	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	-

A priori kann für die Station keine Bedrohung ausgeschlossen werden. In Anbetracht der geographischen Lage der Station sollte eine Überflutung in Betracht gezogen werden. Um den Aufwand für ein Anwendungsbeispiel überschaubar zu halten, wurden folgende Kategorien von Bedrohungen aus der in Tabelle 13 dargestellten Bedrohungs-Wirkungs-Matrix ausgewählt:

- Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01

- Feuer: Mittlerer Brand in Station / FI-02
- Technisches Versagen: Ausfall der Stromversorgung / TF-08
- Naturereignisse: Überflutung / ND-01

1.3.2.4.3 Bedrohungsszenarien

Nach der Identifizierung der relevanten Bedrohungen müssen für jede Bedrohung ein oder mehrere repräsentative Szenarien definiert werden. Unter "Szenario" ist ein spezifischer Satz von Parametern zu verstehen, die die Art, den Ort und die Intensität eines Vorfalls beschreiben. Aus diesen Annahmen werden Art und Ausmaß der Auswirkungen abgeleitet.

Im Allgemeinen ist es sinnvoll, mehr als ein Szenario pro Bedrohung zu definieren, um die Bandbreite der möglichen Folgen erfassen zu können. Für das Beispiel wird für jede Bedrohung vereinfachend nur ein Szenario definiert, aber dennoch versucht, das gesamte Spektrum der Auswirkungen abzudecken.

Vorüberlegungen

Da die Station 1 über einen Tunnel für jede Linie verfügt, verhält sie sich in vielerlei Hinsicht wie zwei Stationen (eine für die X-Linie, eine für die Y-Linie) im Netz. Es liegt nahe, für die meisten Bedrohungen ein Szenario für jeden Tunnel (L3 / L4) sowie einige Szenarien für den Eingangsbereich (L1) und den Verbindungstunnel (L4) vorzusehen. Darüber hinaus sollten Szenarien für den ungünstigsten Fall in Betracht gezogen werden, bei denen der Bahnhof vollständig geschlossen ist (keine durchfahrenden Züge).

Beispielszenarien

Im Ergebnis wurden für das Beispiel die folgenden Szenarien definiert:

1. Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01

Bei EXP-01 wird davon ausgegangen, dass nur der Zug, nicht aber der umgebende Tunnel beschädigt wird und dass der Zug leicht zur Reparatur abgeschleppt werden kann. Unabhängig davon, in welchem Zug bzw. Tunnel (X-Linie oder Y-Linie) die Explosion stattfindet, sind die Auswirkungen recht ähnlich:

- Unterbrechung des Verkehrs im gesamten Netz am Tag des Angriffs
- Schließung der Station für einen zusätzlichen Tag für Analysen durch die Polizei. Das bedeutet, dass beide Linien unterbrochen sind.

2. Feuer: Mittlerer Brand in der Station / FI-02

Es wird angenommen, dass auf dem linken Seitenbahnsteig der Y-Linie ein mittlerer Brand ausgebrochen ist. Dies hat die folgenden Auswirkungen:

- Der Zugang zur gesamten Station ist für einen Tag gesperrt. Züge der X-Linie fahren ohne Halt durch den nicht betroffenen Tunnel, die Y-Linie ist in zwei Teile geteilt, da die Züge den Tunnel nicht durchfahren können.
- Danach kann die X-Linie nach dem normalen Fahrplan verkehren, aber der linke Bahnsteig des Tunnels der Y-Linie kann nicht benutzt werden, bis die beschädigten Teile repariert sind. Für weitere 3 Tage fährt die Y-Linie also in einer Richtung durch den Bahnhof, ohne anzuhalten.

3. Technisches Versagen: Ausfall der Stromversorgung / TF-08

Es wird ein kurzer Stromausfall angenommen, der nur die Station selbst betrifft. Das bedeutet, dass zwar die Beleuchtung ausfällt, aber der Fahrstrom nicht beeinträchtigt ist. Somit muss die Station bis zur Beendigung des Stromausfalls für Personen geschlossen werden, was nur geringe Auswirkungen auf den Betrieb hat:

- Es wird angenommen, dass die Züge in dieser Zeitspanne (1 h) nicht in der Station halten.

4. Naturereignisse: Überflutung / ND-01

Es wird davon ausgegangen, dass der Tunnel der X-Linie, der unter dem Tunnel der Y-Linie und dem Personentunnel liegt, von einem nah gelegenen Fluss überflutet wird. Ein Worst-Case-Szenario, das für das Beispiel nicht untersucht wurde, könnte sogar die Überflutung der gesamten Station in Betracht ziehen.

- Infolgedessen kann der Tunnel der X-Linie drei Wochen lang nicht benutzt werden. Während dieser Zeit wird die X-Linie in zwei Teile geteilt.
- Die Überschwemmung betrifft auch den Tunnel außerhalb der Station und führt sogar zur Schließung benachbarter Stationen.

1.3.2.4.4 Operationalisierung der Wirkungen

Die Auswirkungen der Beispielszenarien wurden auf der Ebene der in der Bedrohungs-Wirkungsmatrix verwendeten abstrakten Wirkungen definiert (vgl. Tabelle 13). Sie sind in Tabelle 14 zusammen mit den übrigen theoretisch möglichen Wirkungen, die kursiv markiert sind, zusammengefasst.

Tabelle 14: Bedrohungswirkungen der Beispielszenarien (Modellstadt 1, Station 1)

Beispielszenario	Phase	Wirkungen
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	2	E8: Keine Durchfahrt, Unterbrechung aller Linien (Station geschlossen)
Feuer: Mittlerer Brand in Station / FI-02	1	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station
		E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beiden Seitenbahnsteige sind gesperrt. (X-Linie)
	E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beide Richtungen (Y-Linie)	
	2	E3: Züge halten nicht. Ein Seitenbahnsteig ist gesperrt (eine Richtung). (Y-Linie)
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station
		E5: Züge halten nicht. Alle Bahnsteige sind gesperrt.
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen (X-Linie)
		E9: Sperrung des Tunnels zwischen Stationen (X-Linie)
		E10: Schließung einer oder mehrerer benachbarter Stationen
Andere Wirkungen		<i>E2: Schließung eines Teils eines Bahnsteigs (X- oder Y-Linie)</i>
		<i>E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beide Seitenbahnsteige sind gesperrt. (Y-Linie)</i>
		<i>E6: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in einer Richtung (X- oder Y-Linie)</i>
		<i>E9: Sperrung des Tunnels zwischen Stationen (Y-Linie)</i>
		<i>E10: Schließung einer oder mehrerer benachbarter Stationen (Y-Linie)</i>
		<i>E11: Einstellung einer gesamten Linie (kein Zugverkehr)</i>
		<i>E12: Einstellung des U-Bahnbetriebs</i>

Als Voraussetzung für die Berechnung der Bewertungsindikatoren müssen die abstrakten Wirkungen kon-

ketisiert werden. Erst dann können die Auswirkungen in einem Verkehrsmodell modelliert und die Indikatorenwerte mit dem modellgestützten Verfahren berechnet oder, falls kein Verkehrsmodell vorhanden ist, mit dem vereinfachten Verfahren abgeschätzt werden.

Tabelle 15: Operationalisierung und Modellierung der Bedrohungswirkungen (Modellstadt 1, Station 1)

Wirkung	Operationalisierung
E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station	Die Sperrung des (einzigen) Zugangs zum Bahnhof (Eingangsbereich L1) würde Fahrten verhindern, die an der U-Bahn-Station beginnen oder enden, nicht aber das Umsteigen innerhalb der Station. Da die Wirkung in den Beispielszenarien nur in Kombination mit anderen, schwerwiegenderen Wirkungen auftrat, musste E1 nicht explizit modelliert werden.
<i>E2: Schließung eines Teils eines Bahnsteigs (X- oder Y-Linie)</i>	Die Sperrung eines Teils eines Bahnsteigs würde die Länge der Züge begrenzen und kann somit die Kapazität einer Strecke verringern. Dies könnte durch eine höhere Frequenz der Züge kompensiert werden. E2 wurde nicht modelliert, da es in den Beispielszenarien nicht vorkam.
E3: Züge halten nicht. Ein Seitenbahnsteig ist gesperrt (eine Richtung). (Y-Linie)	Zur Modellierung von E3 wurden im Verkehrsmodell die Halte in der Station 1 aus den Fahrten einer Richtung der Y-Linie entfernt. Die entfallenen Haltezeiten wurden zu den Fahrzeiten addiert, um die Auswirkungen auf andere Haltestellen zu minimieren. In Station 1 kann E3 nur auf der Y-Linie vorkommen, da der Tunnel der X-Linie einen zentralen Bahnsteig besitzt.
E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beiden Seitenbahnsteige sind gesperrt. (X-Linie)	Zur Modellierung von E4 (X-Linie) wurden im Verkehrsmodell die Halte in der Station 1 aus allen Fahrten der X-Linie gelöscht. Die entfallenen Haltezeiten wurden zu den Fahrzeiten addiert, um die Auswirkungen auf andere Stationen zu minimieren.
<i>E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beiden Seitenbahnsteige sind gesperrt. (Y-Linie)</i>	<i>Zur Modellierung von E4 (Y-Linie) wurden im Verkehrsmodell die Halte in der Station 1 aus allen Fahrten der X-Linie gelöscht. Die entfallenen Haltezeiten wurden zu den Fahrzeiten addiert, um die Auswirkungen auf andere Stationen zu minimieren. Die Wirkung E4 (Y-Linie) wurde modelliert, obwohl sie in keinem der Beispielszenarien vorkommt, da sie eine elegante Modellierung von E5 ermöglichte.</i>
E5: Züge halten nicht. Alle Bahnsteige sind gesperrt.	Im Verkehrsmodell wurde E5 nicht explizit modelliert, da es lediglich die Kombination von E4 für die X-Linie und für die Y-Linie darstellt.
<i>E6: Keine Durchfahrt. Unterbrechung einer Linie in einer Richtung. (X- oder Y-Linie)</i>	<i>Im Allgemeinen ist es aus betrieblicher Sicht schwierig, eine Linie nur in einer Richtung zu unterbrechen, während die entgegengesetzte Richtung normal funktioniert. Da es sich bei der X-Linie praktisch um eine Ringlinie handelt, entspräche hier die Unterbrechung in einer Richtung im Wesentlichen dem Weglassen der Richtung. Eine Unterbrechung der Y-Linie in einer Richtung erscheint aus betrieblicher Sicht unplausibel, da es aufgrund der Struktur des Netzes schwierig wäre, Züge, die in der nicht unterbrochenen Richtung fahren, wieder von ihren Endstationen zu ihren Anfangsstationen zurückzufahren, wenn sie nicht die Strecke durch Station 1 nehmen können. Beide Effekte wurden nicht modelliert, da sie in den Beispielszenarien nicht auftraten.</i>
E7: Keine Durchfahrt. Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen. (X-Linie)	Um diese Wirkungen zu modellieren, wurden im Gleisplan für die X- und die Y-Linie geeignete Bahnhöfe mit Weichen identifiziert, in denen die Züge auf das Gegengleis wechseln und von dort zurückfahren konnten. Bei der Modellierung der Auswirkungen von Überschwemmungen auf der X-Linie wurde davon ausgegangen, dass nur ein begrenzter Wassereintritt auftritt und dass entferntere Teile des Tunnelsystems nicht betroffen sind. Theoretisch könnte in Abhängigkeit von der angenommenen

	Wasserhöhe im Tunnel ein großer Teil der X-Linie ausfallen.
E8: Keine Durchfahrt. Unterbrechung aller Linien. (Station geschlossen.)	Im Verkehrsmodell wurde E8 nicht explizit modelliert, da es lediglich die Kombination von E7 für die X-Linie und für die Y-Linie darstellt.
E9: Sperrung des Tunnels zwischen Stationen (X-Linie)	Da eine isolierte Sperrung eines Tunnels in den Beispielen nicht auftrat, wurde sie weder für die X-Linie noch für die Y-Linie explizit modelliert, sondern implizit als Teil von Linienunterbrechungen (E7) berücksichtigt.
E10: Schließung einer oder mehrerer benachbarter Stationen	Wie bei E9 wurde die Schließung benachbarter Bahnhöfe weder für die X- noch für die Y-Linie explizit modelliert. Die Berücksichtigung erfolgte vielmehr implizit als Teil der Modellierung der Linienunterbrechung, da die Positionen der Weichen das Wenden der Züge in den benachbarten Bahnhöfen nicht erlaubten.
<i>E11: Einstellung einer gesamten Linie (kein Zugverkehr)</i>	<i>Bei der Modellierung der Einstellung einer kompletten Linie muss sorgfältig geprüft werden, ob dies mit dem vorliegenden Verkehrsmodell wirklich möglich ist, da die Auswirkungen auf Kapazität und Nachfrage extrem sein können. Der Effekt wurde nicht modelliert, da er in den Beispielszenarien nicht auftrat.</i>
<i>E12: Einstellung des U-Bahnbetriebs</i>	<i>Diese Wirkung kann nicht mit dem Verkehrsmodell modelliert werden, da die Auswirkungen auf Kapazität und Nachfrage zu extrem sind.</i>
E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)	<i>Diese Wirkung kann nicht mit dem Verkehrsmodell modelliert werden, da die Auswirkungen auf Kapazität und Nachfrage zu extrem sind.</i>

Tabelle 15 zeigt die Operationalisierung der abstrakten Wirkungen für Station 1. Es werden nur direkte Wirkungen berücksichtigt. Kompensationsmaßnahmen und ihre Auswirkungen werden erst bei der Berechnung der Bewertungsindikatoren berücksichtigt, da sie von den Annahmen abhängen, die in dem modellgestützten und dem vereinfachten Verfahren getroffen wurden.

1.3.2.4.5 Quantifizierung der Bewertungsindikatoren

Zur Bewertung der betrieblichen Aspekte wurden die folgenden Bewertungsindikatoren gewählt:

- *Dauer* der betrieblichen Auswirkungen (beginnend mit dem Vorfall bei t_0 und endend mit der Wiederaufnahme des Normalbetriebs bei t_2)
- *zusätzliche Reisezeit* der Nutzer
- *zusätzliche Betriebskosten* des Verkehrsunternehmens

Für jedes Beispielszenario wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Berechnung der Dauer der betrieblichen Auswirkungen
2. Berechnung von Änderungen der Reisezeit, der Fahrleistung und der Fahrzeit
3. Berechnung *zusätzlicher Reisezeiten* und *zusätzlicher Betriebskosten*

Die Indikatoren *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* werden nach dem modellgestützten Ansatz und dem vereinfachten Ansatz berechnet.

1.3.2.4.6 Dauer der Wirkungen

Die *Dauer* der Bedrohungswirkungen wurde bereits in Abschnitt 1.3.2.4.3 berücksichtigt. Basierend auf den dort beschriebenen Annahmen sind alle Dauern in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Dauern der Beispielszenarien (Modellstadt 1, Station 1)

Beispielszenario	Phase	Dauer	Wirkungen
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	1 Tag	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	2	1 Tag	E8: Unterbrechung aller Linien (Station geschlossen)
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI	1	1 Tag	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station
			E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beide Seitenbahnsteige sind gesperrt. (X-Linie)
			E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen (Y-Linie)
	2	3 Tage	E3: Züge halten nicht. Ein Seitenbahnsteig ist gesperrt (eine Richtung). (Y-Linie)
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	1 Stunde	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station
			E5: Züge halten nicht. Alle Bahnsteige sind gesperrt.
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	3 Wochen	E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen (X-Linie)
			E9: Sperrung des Tunnels zwischen Stationen (X-Linie)
			E10: Schließung einer oder mehrerer benachbarter Stationen

Wie aus Tabelle 16 entnommen werden kann, gliedert sich die Zeit zwischen dem Vorfall und der Aufnahme des Normalbetriebs für die ersten beiden Szenarien in zwei Phasen mit Wirkungen und Dauern. Die Gesamtdauer des eingeschränkten Betriebs ergibt sich jeweils aus der Summe der Dauern der Phasen.

Im dritten und im vierten Szenario gibt es nur jeweils eine Phase und eine Dauer.

1.3.2.4.7 Zusätzliche Reisezeit und zusätzliche Betriebskosten

1.3.2.4.8 Modellgestützter Ansatz

Um mit Hilfe des vorliegenden Verkehrsmodells *zusätzliche Reisezeiten* und *zusätzliche Betriebskosten* zu berechnen, wurden alle in Tabelle 15 beschriebenen Wirkungen als Modifikationen des Basismodells modelliert. Diese Modifikationen sind in Tabelle 17 zu sehen.

Tabelle 17: Modifikationen (Modellstadt 1, Station 1)

ID	Modifikation	Beschreibung
1	X hält nicht	X-Linie hält nicht
2	Y hält nicht	Y-Linie hält nicht
6	Y unterbrochen	Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]
40	X unterbrochen	X-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]
46	Y hält >	Y-Linie hält nur in Richtung >

Danach wurde für jede Phase jedes Beispielszenarios ein Verkehrsszenario als Kombination der jeweiligen Modifikationen erstellt (vgl. Tabelle 18). Beispielsweise besteht das Verkehrsszenario 5 aus den Modifikationen 1 und 2, weil weder die X- noch die Y-Linie in Phase 1 von Szenario 3 (Ausfall der Stromversorgung) hält.

Tabelle 18: Modellierung der Verkehrsszenarien (Modellstadt 1, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Beschreibung	Modifikationen
2	Basisszenario	Szenario ohne Bedrohungswirkungen	–
101	S1-P2	Beispielszenario 1, Phase 2, Unterbrechung aller Linien	40, X unterbrochen 6, Y unterbrochen
90	S2-P1	Beispielszenario 2, Phase 1, X-Linie hält nicht, Y-Linie unterbrochen	1, X hält nicht 6, Y unterbrochen
87	S2-P2	Beispielszenario 2, Phase 2, Y-Linie hält nur in Richtung ">" (linker Seitenbahnsteig)	46, Y hält >
5	S3-P1	Beispielszenario 3, Phase 1, X- und Y-Linie halten nicht	1, X hält nicht 2, Y hält nicht
71	S4-P1	Beispielszenario 4, Phase 1, X -Linie unterbrochen	40, X unterbrochen

Anschließend wurden für jedes Verkehrsszenario die Auswirkungen auf die Fahrgäste simuliert und die daraus resultierenden Tageswerte für Reisezeit, Fahrleistung und Fahrzeit im Modell berechnet.

Tabelle 19: Vorläufige Ergebnisse für absolute Reisezeit, Fahrleistung und Fahrzeit pro Tag (Modellstadt 1, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Verkehrsleistung Bus [km]	Verkehrsleistung U [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U-Bahn [h]
2	Basisszenario	539.013	250.736	35.656	12.339	1.112
101	S1-P2	557.360	250.736	32.824	12.339	975
90	S2-P1	546.320	250.736	34.626	12.339	1.046
87	S2-P2	539.410	250.736	35.656	12.339	1.112
5	S3-P1	542.313	250.736	35.656	12.339	1.112
71	S4-P1	549.690	250.736	33.853	12.339	1.040

Die in Tabelle 19 dargestellten Ergebnisse der Modellierung zeigen erwartungsgemäß erhöhte Reisezeiten im Vergleich zum Basisszenario, wenn die Bedrohungen eintreten. Fahrleistung und Fahrzeit sind in den reinen Durchfahrtsszenarien unverändert und in den Szenarien mit unterbrochenen Linien, in denen eine oder zwei Linien nicht auf der vollen Länge ihrer Strecke verkehren, geringer. Die Fahrleistung und die Fahrzeit für Busse bleiben unverändert, da in den Verkehrsszenarien von Tabelle 19 keine Schienenersatzverkehre berücksichtigt wurden.

Im Falle einer Unterbrechung einer Linie würde der Betreiber jedoch einen Schienenersatzverkehr einrichten, um seinen Kunden einen akzeptablen Service zu bieten. Darüber hinaus zeigte eine Analyse der Auslastungsraten im Netz, dass die Kapazitäten einiger Buslinien nicht ausreichen würden, um alle Fahrgäste, die auf Umleitungsstrecken ausweichen, aufzunehmen.

Tabelle 20: Absolute Reisezeit, Fahrleistung und Fahrzeit pro Tag für Szenarien mit Schienenersatzverkehr durch Busse (SEV) (Modellstadt 1, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Verkehrsleistung Bus [km]	Verkehrsleistung U [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U-Bahn [h]
2	Basisszenario	539.013	250.736	35.656	12.339	1.112
103	S1-P2 SEV	552.349	256.209	32.824	12.626	975
91	S2-P1 SEV	545.331	251.626	34.970	12.398	1.064
87	S2-P2	539.410	250.736	35.656	12.339	1.112
5	S3-P1	542.313	250.736	35.656	12.339	1.112
76	S4-P1 SEV	548.321	253.194	33.853	12.462	1.040

Bis auf die Durchfahrtszenarien wurden alle Szenarien um einen Schienenersatzverkehr (SEV) erweitert. Die Ergebnisse für die modifizierten Szenarien sind in Tabelle 20 dargestellt.

Ein Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 19 mit Tabelle 20 zeigt, dass die Einführung des Schienenersatzverkehrs erwartungsgemäß zu kürzeren Reisezeiten für die Fahrgäste führt. Auf der anderen Seite sind die Fahrleistungen und Fahrzeiten der Busse und damit natürlich auch die Betriebskosten gestiegen.

Tabelle 21: Zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Verkehrsleistung, zusätzliche Fahrzeit und zusätzliche Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 1, Station 1, modellgestützter Ansatz)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Verkehrsleistung Bus [km]	Verkehrsleistung U-Bahn [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U-Bahn [h]	Betriebskosten [EUR]
103	S1-P2 SEV	13.336	5.473	-2.832	287	-137	-10.007
91	S2-P1 SEV	6.318	1.057	-1.029	59	-66	-8.709
87	S2-P2	396	0	0	0	0	0
5	S3-P1	3.300	0	0	0	0	0
76	S4-P1 SEV	9.307	2.458	-1.802	123	-72	-7.559

Auf der Grundlage der absoluten Werte wurden Werte für *zusätzliche Reisezeit*, *zusätzliche Verkehrsleistung* und *zusätzliche Fahrzeit* berechnet. Anschließend wurden daraus mit dem in Kapitel 1.2.4.3 beschriebenen Verfahren die *zusätzlichen Betriebskosten* berechnet. Alle Tageswerte sind in Tabelle 21 dargestellt.

Neben der erhöhten Reisezeit für die Fahrgäste zeigt die Tabelle, dass die täglichen Betriebskosten in den Szenarien mit unterbrochenen Linien, bei denen eine oder zwei Linien nicht auf der gesamten Länge ihrer Strecken betrieben werden, sinken. An diesem Punkt sollte der Betreiber sorgfältig prüfen, ob die errechneten Kosteneinsparungen, welche Abschreibungskosten (einschließlich Zinskosten), zeitabhängige Wartungskosten, kilometerabhängige Wartungskosten, Personalkosten und Energiekosten beinhalten, tatsächlich realisiert werden können.

Tabelle 22: Bewertungsindikatoren für die Beispielszenarien von Station 1 (Modellstadt 1, Station 1, modellgestützter Ansatz)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	OHNE BEWERTUNG	1	–	–
	2	S1-P2 SEV	1	13.336	-10.007
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	S2-P1 SEV	1	6.318	-8.709
	2	S2-P2	3	1.189	0
	Summe:		4	7.507	-8.709
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	S3-P1	0,04	138	0
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	S4-P1 SEV	18	167.535	-136.059

Um die Werte der Bewertungsindikatoren der Beispielszenarien zu berechnen, werden die Dauern mit den Tageswerten der entsprechenden Verkehrsszenarien multipliziert. Wenn der eingeschränkte Betrieb in verschiedene Phasen unterteilt ist, wird dieser Schritt für jede Phase durchgeführt, und die Werte der Phasen werden anschließend aufsummiert (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22 zeigt auf den ersten Blick die herausragende Bedeutung der Auswirkungen des Hochwasserszenarios, die sowohl auf ihre Dauer als auch auf die Schwere der Verkehrseinschränkungen zurückzuführen ist. Auf der anderen Seite kann ein kurzer Stromausfall zwar für einige Passagiere ärgerlich sein, besitzt jedoch insgesamt keine schwerwiegenden Folgen.

Da die Auswirkungen einer Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (mit Auswirkungen auf U-Bahn, Bus und Straßenbahn) nicht sinnvoll modelliert werden können, konnten die Werte für die Bewertungsindikatoren der Phase 1 des Explosionsszenarios nicht berechnet werden und stehen daher für die Vulnerabilitätsbewertung nicht zur Verfügung (in Tabelle 22 rot markiert). Auch wenn die Bearbeitung dieses Problems die Aufgabe einer Gesamtbewertung ist, sollen an dieser Stelle drei grundsätzliche Ansätze zur Lösung des Problems erwähnt werden:

- Das Fehlen von Werten könnte kein Problem darstellen, wenn die Wirkung einer Bedrohung für alle verglichenen Stationen identisch ist. So stellt beispielsweise eine Betriebseinstellung eine realistische Folge für alle Terroranschläge in der Innenstadt dar. Bei einer vergleichenden Bewertung der Stationen sind dann nur die Wahrscheinlichkeit oder Plausibilität einer Bedrohung und die übrigen Bedrohungswirkungen relevant.
- Wenn aufgrund der Methodik des Bewertungsverfahrens zwingend numerische Werte benötigt werden, könnten geschätzte Werte vom Betreiber oder aus anderen Quellen oder Standardwerte verwendet werden.
- Nicht quantifizierbare Effekte könnten im Gesamtbewertungsverfahren qualitativ oder halb-qualitativ behandelt werden.

1.3.2.4.9 Vereinfachter Ansatz

Im Gegensatz zum umfassenden, modellgestützten Ansatz berücksichtigt der vereinfachte Ansatz nur das lokale Verkehrsnetz um eine Station herum. Zudem werden die Bewertungsindikatoren ohne ein Verkehrsmodell berechnet.

1.3.2.4.9.1 Vereinfachte Operationalisierung der Wirkungen

Alle in den Beispielszenarien (siehe Tabelle 14) auftretenden Effekte müssen auf der Grundlage der verfügbaren Daten in vereinfachter Form operationalisiert werden.

Tabelle 23: Vereinfachte Operationalisierung von Wirkungen und Kompensationsmaßnahmen (Modellstadt 1,

Station 1)

Wirkung	Annahmen für eine vereinfachte Operationalisierung
E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station	<p>Fahrgäste, die an Station 1 in einen Zug einsteigen wollen, müssen in Fahrtrichtung zum nächsten Bahnhof laufen.</p> <p>Fahrgäste, die den Zug an der Station 1 verlassen wollen, verlassen den Zug an der letzten Station vor der Station 1 und gehen zu Fuß zu Station 1.</p> <p>Fahrgäste, die in Station 1 umsteigen möchten, sind nicht betroffen.</p>
E2: Schließung eines Teils eines Bahnsteigs (X- oder Y-Linie)	Die Kapazitätsreduktion durch kürzere Züge wird durch zusätzliche Züge (höhere Frequenz) kompensiert. E2 führt zu höheren Betriebskosten, aber zu keiner Veränderung der Fahrzeiten.
E3 - E5: Züge halten nicht (X- oder Y-Linie)	<p>Analog zu E1 müssen Fahrgäste von/zu benachbarten Bahnhöfen zu/von Bahnhof 1 laufen.</p> <p>Abhängig von der genauen Wirkung kann dies nur die Fahrgäste einer Richtung einer Linie, alle Fahrgäste einer Linie oder sogar alle Fahrgäste beider Linien betreffen.</p>
E6 - E8: Keine Durchfahrt (X- oder Y-Linie)	<p>Es wird angenommen, dass für den ausgefallenen Teil der Strecke ein Schienenersatzverkehr mit Bussen eingerichtet wird.</p> <p>Alle Fahrgäste benutzen den Schienenersatzverkehr, um den ausgefallenen Teil der Linie zu überbrücken.</p>
E9 - E11: Sperrung eines Tunnels, benachbarter Stationen oder einer vollständigen Linie (X- oder Y-Linie)	<p>Es wird angenommen, dass für den ausgefallenen Teil der Strecke ein Schienenersatzverkehr mit Bussen eingerichtet wird.</p> <p><i>Es ist wichtig zu prüfen, ob die Annahmen ausreichend realistisch sind oder ob der Effekt nicht berechnet werden kann, weil die Auswirkungen auf Kapazität und Nachfrage zu extrem sind.</i></p>
<i>E12: Einstellung des U-Bahnbetriebs</i>	<i>Diese Wirkung kann nicht modelliert werden, da die Auswirkungen auf Kapazität und Nachfrage zu extrem sind.</i>
E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)	<i>Diese Wirkung kann nicht modelliert werden, da die Auswirkungen auf Kapazität und Nachfrage zu extrem sind.</i>

Tabelle 23 enthält plausible Annahmen für diesen Ansatz, die in den folgenden Berechnungen verwendet werden. Natürlich sollte bei der Operationalisierung die lokale Situation berücksichtigt werden. Wenn z. B. die Abstände zwischen den Bahnhöfen zu groß werden, könnte für die Effekte E1 und E3 - E5 anstelle des Fußweges ein Schienenersatzverkehr mit dem Bus angenommen werden. Dann würde davon ausgegangen, dass jede Person, die den Zug benutzt, im Falle einer Bedrohung den angebotenen Ersatzverkehr in Anspruch nimmt.

Abbildung 10 zeigt das lokale Verkehrsnetz der Station 1 in einem abstrakten Format. Zu erkennen sind die Kompensationsmaßnahmen der Wirkungen E6 - E8. Für den Fall, dass die Station aufgrund einer Bedrohung geschlossen wird, werden Ersatzbusverkehre für die ausgefallenen Streckenabschnitte eingerichtet. Beispielsweise definiert die Station A_Y den Start und die Station C_Y das Ende des eingestellten Teils der Y-Linie, wobei A_Y und C_Y nicht unbedingt die direkten Stationen vor und nach der Station 1 sein müssen. Für das Beispiel wurden anhand des Gleisplans für die X- und die Y-Linie geeignete Bahnhöfe mit Weichen identifiziert, in denen die Züge auf dem gegenüberliegenden Gleis zurückfahren können.

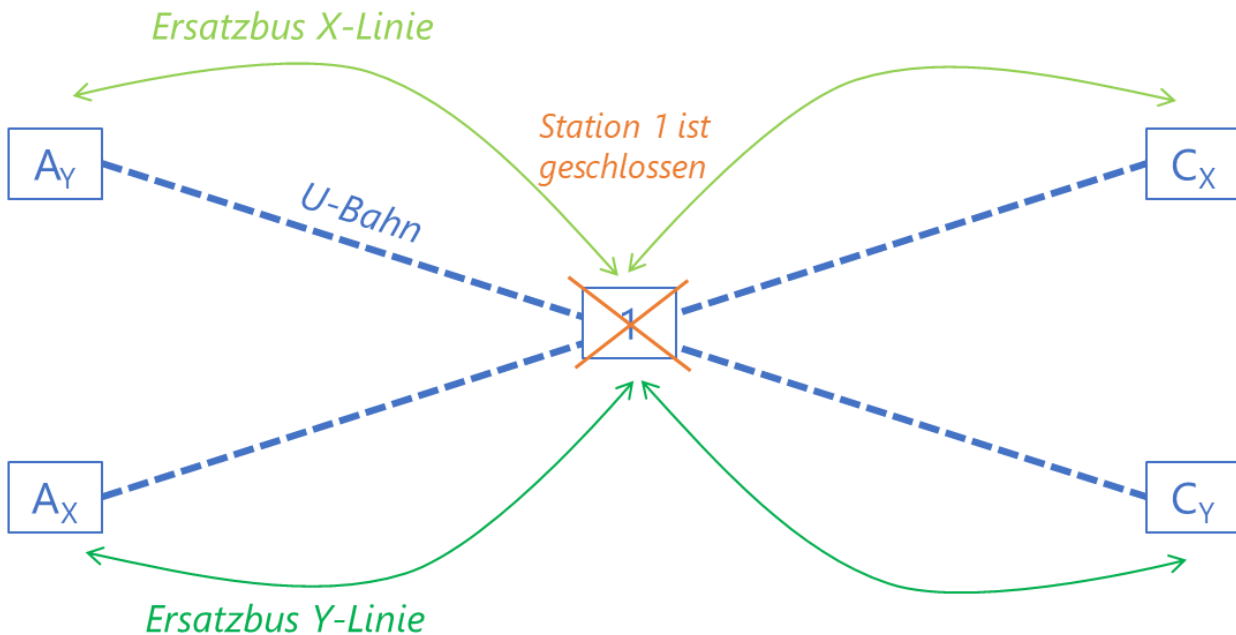


Abbildung 10: Lokales Verkehrsnetz mit Ersatzverkehren (Modellstadt 1, Station 1)

1.3.2.4.9.2 Verfügbare Daten

Für den vereinfachten Ansatz werden die folgenden Daten benötigt:

- Anzahl der betroffenen Benutzer der täglich im Bahnhof verkehrenden Züge
Diese Zahl sollte beim Betreiber erhältlich sein. Für das Beispiel wurde sie aus dem Visum-Modell übernommen.
- Entfernungen zwischen den Stationen [km]
Für die Beispielerrechnungen wurden die Entfernungen mit einem Web-Karten-Dienst geschätzt. Die Daten hätten auch beim Betreiber angefordert werden können.
- Fahrzeiten [min]
Die Fahrzeiten wurden mit Hilfe eines Web-Karten-Dienstes geschätzt.
- Entfernungen der Ersatzbusse [km]
Der Ersatzbus hat von der Station A_X über die Station 1 bis zur Station C_X (oder von A_Y über 1 bis C_Y) eine längere Strecke zurückzulegen als der Zug. Die Fahrstrecken wurden mit Hilfe eines Web-Karten-Dienstes geschätzt.
- Anzahl der Züge und Anzahl der Ersatzbusse
Um dieselbe Anzahl von Fahrgästen zu befördern, benötigt man im Beispielsfall etwa doppelt so viele Busse wie Bahnen. Der Schienenersatzverkehr fährt mit derselben Frequenz wie die U-Bahn-Linie. Das bedeutet, dass immer zwei Busse gleichzeitig die Stationen verlassen.

Um das Beispiel überschaubar zu halten, wurden Wartezeiten für Fahrgäste, deren Fahrten vor der Station A_X beginnen und nach der Station C_X (bzw. A_Y und C_Y) enden, nicht berücksichtigt.

Bei den Wirkungen E6 - E8 könnten die Fahrgäste theoretisch auch von der Station A_X zur Station C_X (bzw. von A_Y zu C_Y) laufen. Auch diese Möglichkeit wurde nicht in Betracht gezogen.

1.3.2.4.9.3 Berechnung

Der vereinfachte Ansatz geht von den gleichen Wirkungen (siehe Tabelle 17) und Verkehrsszenarien (Tabelle 18) wie der umfassende Ansatz aus, betrachtet jedoch nur das lokale Netzwerk. Das bedeutet, dass die Berechnung zwei Wirkungen für jede Linie und einen dritten für die Y-Linie berücksichtigt.

Wirkungen für beide Linien:

- *Linie hält nicht*

Dabei werden die Wirkungen E3 - E5 (siehe Tabelle 23) umgesetzt. Das bedeutet, dass die benachbarten Stationen berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass die Passagiere die gesamte Strecke bis zur Station 1 zu Fuß zurücklegen, selbst wenn ihre Ziele zwischen den Stationen liegen.

- *Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]*

Hier werden die Wirkungen E6 - E8 umgesetzt (siehe Tabelle 23). Das bedeutet, dass geeignete Stationen mit Weichen berücksichtigt werden, bei denen es sich nicht um die benachbarten Stationen handeln muss. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrgäste den jeweils angebotenen Schienenersatzverkehr zwischen A und C in Anspruch nehmen, auch wenn es andere Reisemöglichkeiten gäbe, z. B. zu Fuß zu gehen oder alternative Linien zu nehmen.

Der Unterschied zu den Auswirkungen bei "Linie hält nicht an" besteht also in der Entfernung zwischen Station A_x bzw. A_y und Station 1 sowie zwischen Station 1 und Station C_x bzw. C_y.

Zusätzliche Wirkung für die Y-Linie:

- *Y-Linie hält nur in Richtung ">"*

Damit werden die Effekte E3 - E5 berücksichtigt (siehe Tabelle 23), allerdings nur für eine Richtung. Es wird nicht berücksichtigt, dass Fahrgäste aus der nicht haltenden Richtung auch an Station 1 vorbeifahren und an der nächsten Station den Zug in die andere Richtung nehmen könnten, um zu Station 1 zurückzufahren.

Zusätzliche Reisezeit

Die *zusätzliche Reisezeit* der Fahrgäste errechnet sich aus der Differenz zwischen der Fahrzeit, die die Fahrgäste mit dem Zug benötigen würden, und der benötigten Zeit, wenn sie zu Fuß unterwegs sind (falls die Linie nicht hält) oder wenn sie den Ersatzbus nehmen müssten (falls die Linie nicht zwischen [...] und [...] verkehrt). Die zusätzliche Reisezeit der Fahrgäste von Station A nach Station C ergibt sich aus der Summe der Reisezeiten von Station A nach Station 1 und von Station 1 nach Station C.

In den folgenden Tabellen wird die *zusätzliche Reisezeit* der Fahrgäste für jede Wirkung und jede Linie berechnet.

Tabelle 24: Berechnung der zusätzlichen Reisezeit pro Tag der Fahrgäste der X-Linie (Modellstadt 1, Station 1)

Route:	A → 1	1 → C	A → C
Wirkung: X-Line hält nicht			
Fahrzeit U-Bahn [min]	2	1	
Gehzeit [min]	9	7	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	7	6	
Anzahl Fahrgäste	9.531	9.531	
Zusätzliche Reisezeit [h]	1.112	953	2.065
Wirkung: X-Line verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Fahrzeit U-Bahn [min]	4	6	
Fahrzeit Schienenersatzverkehr (Bus) [min]	6	12	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	2	6	
Anzahl Fahrgäste	104.225	100.308	
Zusätzliche Reisezeit [h]	3.474	10.031	13.505

Tabelle 25: Berechnung der zusätzlichen Reisezeit pro Tag der Fahrgäste der Y-Linie (Modellstadt 1, Station 1)

Route:	A → 1	1 → C	A → C
Wirkung: Y-Linie hält nicht			
Fahrzeit U-Bahn [min]	2	2	
Gehzeit [min]	12	6	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	10	4	
Anzahl Fahrgäste	7.951	7.951	
Zusätzliche Reisezeit [h]	1.325	530	1.855
Wirkung: Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Fahrzeit U-Bahn [min]	4	2	
Fahrzeit Schienenersatzverkehr (Bus) [min]	6	5	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	2	3	
Anzahl Fahrgäste	60.809	55.198	
Zusätzliche Reisezeit [h]	2.027	2.760	4.787
Wirkung: Y-Linie hält nur in Richtung >			
Fahrzeit U-Bahn [min]	2	2	
Gehzeit [min]	12	6	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	10	4	
Anzahl Fahrgäste	3.913	4.038	
Zusätzliche Reisezeit [h]	652	269	921

Zusätzliche Betriebskosten

Die *zusätzlichen Betriebskosten* errechnen sich aus den Größen *zusätzliche Verkehrsleistung* je Transportmittel und *zusätzliche Fahrzeit* je Verkehrsträger.

Zusätzliche Verkehrsleistung je Verkehrsträger

Die *zusätzliche Verkehrsleistung* je Verkehrsträger wird aus den Entfernungen zwischen den Stationen berechnet. Dabei wird entweder die Entfernung auf der Schiene oder die Entfernung auf der Straße berücksichtigt.

Für die Wirkungen *X/Y-Linie hält nicht* und *Y-Linie hält nur in Richtung >* ist die zusätzliche Verkehrsleistung für die Schiene gleich 0, da die Züge normal verkehren. In Tabelle 26 wird dies kurz dargestellt. Da dies keinen Einfluss auf die Betriebskosten hat, wird diese Variable danach nicht weiter betrachtet.

Tabelle 26: Berechnung der zusätzlichen Verkehrsleistung pro Tag je Verkehrsträger für die X-Linie (Modellstadt 1, Station 1)

Route:	A → 1	1 → C	A → C
Anzahl Züge in beiden Richtungen	424	424	424
Wirkung: X-Linie hält nicht			
Entfernung U-Bahn [km]	0,385	0,797	1,182
Zusätzliche Verkehrsleistung U-Bahn [Fz-km]	0	0	0
Wirkung: X-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Entfernung U-Bahn [km]	1,389	2,862	4,251
Zusätzliche Verkehrsleistung U-Bahn [Fz-km]	Nicht relevant	Nicht relevant	-1.802

Entfernung Schienenersatzverkehr (Bus) [km]	1,976	3,352	5,328
Anzahl Busse	848	848	848
Zusätzliche Verkehrsleistung Bus [km]	Nicht relevant	Nicht relevant	4.518

Tabelle 27: Berechnung der zusätzlichen Verkehrsleistung pro Tag je Verkehrsträger für die Y-Linie (Modellstadt 1, Station 1)

Route:	A → 1	1 → C	A → C
Anzahl Züge in beiden Richtungen	416	416	416
Wirkung: Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Entfernung U-Bahn [km]	1,48	1,06	2,54
Zusätzliche Verkehrsleistung U-Bahn [Fz-km]	Nicht relevant	Nicht relevant	-1.057
Entfernung Schienenersatzverkehr (Bus) [km]	1,77	1,72	3,49
Anzahl Busse	838	838	832
Zusätzliche Verkehrsleistung Bus [Fz-km]	Nicht relevant	Nicht relevant	2.902

Zusätzliche Fahrzeit je Verkehrsträger

Die *zusätzliche Fahrzeit* je Verkehrsträger wird auf die gleiche Weise berechnet wie die zusätzliche Verkehrsleistung je Verkehrsträger, jedoch unter Berücksichtigung der Fahrzeit und nicht der Entfernung.

Für die Wirkungen *X/Y-Linie hält nicht* und *Y-Linie hält nur in Richtung >* ist die zusätzliche Fahrzeit für die Schiene gleich 0, da die Züge normal verkehren. Auch dies wird in Tabelle 28 kurz dargestellt. Da dies keinen Einfluss auf die Betriebskosten hat, wird diese Variable danach nicht weiter betrachtet.

Tabelle 28: Berechnung der zusätzlichen Fahrzeit pro Tag je Verkehrsträger für die X-Linie (Modellstadt 1, Station 1)

Route:	A → 1	1 → C	A → C
Anzahl Züge in beiden Richtungen	424	424	424
Wirkung: X-Linie hält nicht			
Fahrzeit U-Bahn [min]	2	1	3
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn [Fz-h]	0	0	0
Wirkung: X-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Fahrzeit U-Bahn [min]	4	6	10
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn (je Fahrt) [min]	-4	-6	-10
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn [Fz-h]	Nicht relevant	Nicht relevant	-71
Fahrzeit Schienenersatzverkehr (Bus) [min]	5	11	16
Anzahl Busse	848	848	848
Zusätzliche Fahrzeit Bus [Fz-h]	Nicht relevant	Nicht relevant	226

Tabelle 29: Berechnung der zusätzlichen Fahrzeit pro Tag je Verkehrsträger für die Y-Linie (Modellstadt 1, Station 1)

Route:	A → 1	1 → C	A → C
Anzahl Züge in beiden Richtungen	416	416	416
Wirkung: Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Fahrzeit U-Bahn [min]	4	2	6
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn (je Fahrt) [min]	-4	-2	-6

Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn [Fz-h]	Nicht relevant	Nicht relevant	-42
Fahrzeit Schienenersatzverkehr (Bus) [min]	5	4	9
Anzahl Busse	832	832	832
Zusätzliche Fahrzeit Bus [Fz-h]	Nicht relevant	Nicht relevant	125

Nachdem *zusätzliche Reisezeit*, *zusätzliche Verkehrsleistung* und *zusätzliche Fahrzeit* für jede relevante Wirkung auf jeder Linie berechnet wurden (siehe Tabelle 17), werden die Ergebnisse in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Indikatorenwerte pro Tag für jede Wirkung und jede Linie (Modellstadt 1, Station 1, vereinfachter Ansatz)

Indikator / Größe	X-Linie hält nicht	Y-Linie hält nicht	X-Linie unterbrochen	Y-Linie unterbrochen	Y-Linie hält nicht in Richtung >
Zusätzliche Reisezeit [h]	2.065	1.855	13.505	4.787	921
Zusätzliche Verkehrsleistung U-Bahn [Fz-km]	0	0	-1.802	-1.057	0
Zusätzliche Verkehrsleistung Bus [Fz-km]	0	0	4.518	2.902	0
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn [Fz-h]	0	0	-71	-42	0
Zusätzliche Fahrzeit Bus [Fz-h]	0	0	226	125	0

Der nächste Schritt besteht in der Zusammenführung der Ergebnisse mit den jeweiligen Szenarien. Um beispielsweise *zusätzliche Reisezeit*, *zusätzliche Fahrleistung* und *zusätzliche Fahrzeit* für das Verkehrsszenario 1, Phase 2 (Unterbrechung beider Linien, siehe Tabelle 18) zu berechnen, müssen die jeweiligen Werte der einzelnen Effekte addiert werden, z. B.:

- *zusätzliche Reisezeit* = 13.505 h + 4.787 h = 18.292 h
- *zusätzliche Verkehrsleistung Bus* = 4.518 km + 2.902 km = 7.420 km.

Darüber hinaus sind zur Berechnung der Betriebskosten die in Abschnitt 1.2.4.3.1 beschriebenen Berechnungsvorschriften anzuwenden. Die Ergebnisse für alle Verkehrsszenarien sind in Tabelle 31 aufgeführt.

Tabelle 31: Zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Verkehrsleistung, zusätzliche Fahrzeit und zusätzliche Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 1, Station 1, vereinfachter Ansatz)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Verkehrsleistung Bus [km]	Verkehrsleistung U-Bahn [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U-Bahn [h]	Betriebskosten [EUR]
103	S1-P2 SEV	18.292	7.420	-2.859	351	-112	-2.244
91	S2-P1 SEV	6.852	2.902	-1.057	125	-42	-972
87	S2-P2	921	0	0	0	0	0
5	S3-P1	3.920	0	0	0	0	0
76	S4-P1 SEV	13.505	4.518	-1.802	226	-71	-1.272

Wie im modellgestützten Ansatz werden die Indikatorwerte für die Beispielszenarien als Produkte aus den Tageswerten und den Dauern der jeweiligen Verkehrsszenarien berechnet (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Bewertungsindikatoren für die Beispielszenarien von (Modellstadt 1, Station 1, vereinfachter Ansatz)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	OHNE BEWERTUNG	1	–	–
	2	S1-P2 SEV	1	18.292	-2.244
Mittlerer Brand in Station / FI-02	1	S2-P1 SEV	1	6.852	-972
	2	S2-P2	3	2.764	0
	Summe:		4	9.616	-972
Stromausfall / TF-08	1	S3-P1	0,04	157	0
Überflutung / ND-01	1	S4-P1 SEV	18	243.089	-22.894

Wenn der eingeschränkte Betrieb in verschiedene Phasen unterteilt ist, wird dieser Schritt für jede Phase durchgeführt, und die Werte werden danach aufsummiert. Beispielsweise besteht der eingeschränkte Betrieb des Brandszenarios FI aus zwei Phasen mit einer Länge von einem bzw. drei Tagen.

1.3.2.4.10 Ergebnisvergleich

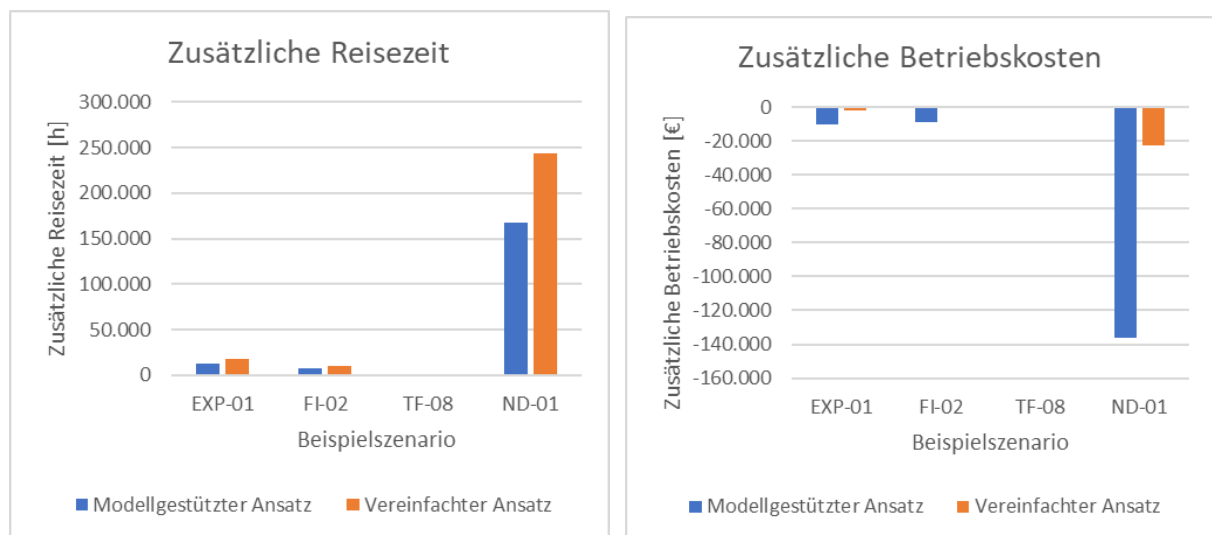


Abbildung 11: Vergleich modellgestützter und vereinfachter Ansatz (Modellstadt 1, Station 1)

Ein Vergleich der Werte der Bewertungsindikatoren aus beiden Ansätzen (vgl. Abbildung 11, Tabelle 22 und Tabelle 32) zeigt ähnliche Ergebnisse für die *zusätzliche Reisezeit*, wobei die Werte aus dem vereinfachten Ansatz durchweg höher sind. Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass alle Fahrgäste grundsätzlich auf ihrer Basisroute bleiben und die Ersatzbusse benutzen, während sie im modellbasierten Ansatz auf alternative Routen ausweichen können, um ihr Ziel zu erreichen.

Bei den *zusätzlichen Betriebskosten* sind die Werte aus dem vereinfachten Ansatz deutlich höher als die aus dem umfassenden Ansatz. Während die Kosteneinsparungen durch die unterbrochenen (und damit de facto verkürzten) U-Bahnverbindungen nahezu identisch sind, sind die Kosten für den Schienenersatzverkehr im vereinfachten Ansatz wesentlich höher. Dies liegt daran, dass im vereinfachten Ansatz versucht wurde, die Kapazität der U-Bahn durch Busse zu ersetzen, während es im modellbasierten Ansatz möglich war, die Kapazität der Ersatzbusse an das Fahrgastaufkommen (Nachfrage) anzupassen und so eher gering zu halten.

Natürlich müsste bei einer realen Anwendung für beide Ansätze gemeinsam mit dem Betreiber geprüft werden, inwieweit die errechneten Kosteneinsparungen für die U-Bahn tatsächlich realisiert werden können.

1.3.2.5 Station 2

Als zweites Beispiel wurde eine normale U-Bahnstation auf der Y-Linie gewählt.

1.3.2.5.1 Kritische Bereiche von Station 2

Station 2 verfügt über zwei seitliche Bahnsteige und zwei Eingangsbereiche mit insgesamt 6 Aufgängen zur Oberfläche. Die Station (und die Y-Linie) ist also zugänglich, solange mindestens eine der Eingangshallen intakt ist.

1.3.2.5.2 Relevante Bedrohungen und Bedrohungswirkungen

Um einen direkten Vergleich zwischen den Stationen zu ermöglichen, wurden für das Beispiel die gleichen Bedrohungen wie für Station 1 gewählt. Allerdings ist nur die Y-Linie von den Auswirkungen eines Vorfalles in Station 2 betroffen.

1.3.2.5.3 Dauer der betrieblichen Wirkungen

Es wurden dieselben Dauern wie bei Station 1 angenommen. Bedrohungen, Wirkungen und Dauern wurden in Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33: Bedrohungen, Wirkungen und Dauern (Modellstadt 1, Stationen 2 und 3)

Beispielszenario	Phase	Dauer	Wirkungen
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	1 Tag	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	1	1 Tag	E7: Keine Durchfahrt. Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen.
Feuer: Mittlerer Brand in Station / FI-02	1	1 Tag	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station E7: Keine Durchfahrt. Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen.
	2	3 Tage	E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beide Seitenbahnsteige sind gesperrt.
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	1 Stunde	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beide Seitenbahnsteige sind gesperrt.
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	3 Wochen	E7: Keine Durchfahrt. Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen. E9: Sperrung des Tunnels zwischen Stationen (X-Linie) E10: Schließung einer oder mehrerer benachbarter Stationen.

Analog Abbildung 10 zeigt Abbildung 12 das lokale Verkehrsnetz von Station 2 in abstrakter Form. Dargestellt ist außerdem der Schienenersatzverkehr für die Y-Linie.

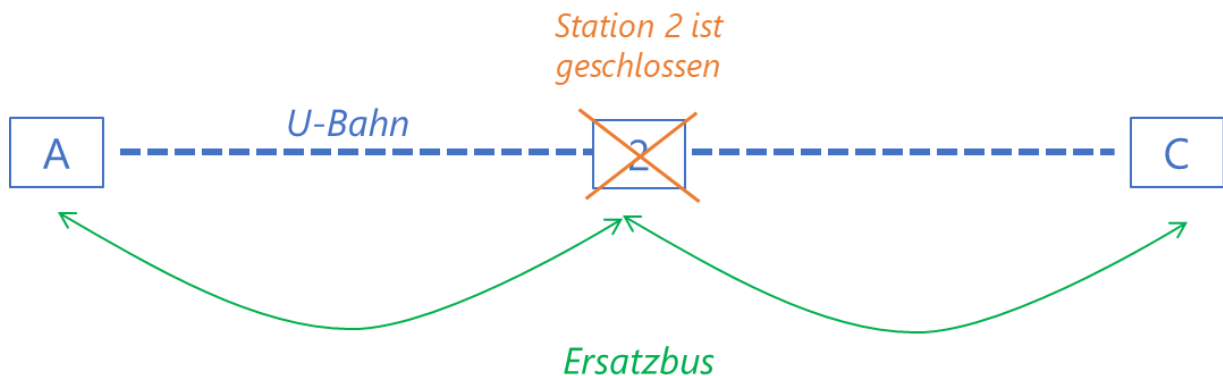


Abbildung 12: Lokales Verkehrsnetz mit Schienenersatzverkehr (Modellstadt 1, Station 2)

1.3.2.5.4 Operationalisierung der Wirkungen

Für Station 2 wurden nur zwei Verkehrsszenarien bewertet:

- Linie hält nicht*

Es wird angenommen, dass die Fahrgäste die gesamte Strecke von den angrenzenden Stationen bis zur Station 2 zu Fuß zurücklegen, auch wenn ihre Fahrziele eigentlich zwischen den Bahnhöfen liegen.
- Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]*

Unter Berücksichtigung der Standorte der Weichen wurden für alle Szenarien (einschließlich Überflutung) die gleichen Stationen A und C (wobei C keine benachbarte Station ist) identifiziert. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrgäste den angebotenen Ersatzdienst in Anspruch nehmen werden, auch wenn es andere Reisemöglichkeiten gäbe, z. B. zu Fuß gehen oder alternative Linien verwenden.

1.3.2.5.5 Berechnung der Bewertungsindikatoren

Für die Berechnung der Bewertungsindikatoren wurde der vereinfachte Ansatz angewandt.

Zusätzliche Reisezeit

Die *zusätzliche Reisezeit* der Fahrgäste errechnet sich aus der Differenz zwischen der Reisezeit, die die Fahrgäste mit der U-Bahn benötigen würden, und der Zeit, die sie benötigen, wenn sie entweder zu Fuß gehen (falls die Linie nicht hält) oder wenn sie den Ersatzbus nehmen (falls die Linie nicht zwischen [...] und [...] verkehrt). Die zusätzliche Fahrzeit der Fahrgäste von Station A nach Station C ergibt sich aus der Summe der Fahrzeiten von Station A nach Station 2 und von Station 2 nach Station C.

In den folgenden Tabellen wird die *zusätzliche Reisezeit* der Fahrgäste für jeden Fall und jede Linie berechnet.

Tabelle 34: Berechnung der zusätzlichen Reisezeit pro Tag der Fahrgäste auf der Y-Linie (Modellstadt 1, Station 2)

Route:	A → 2	2 → C	A → C
Wirkung: Y-Linie hält nicht			
Fahrzeit U-Bahn [min]	2	2	
Gehzeit [min]	11	10	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	9	8	
Anzahl Fahrgäste	8.289	8.289	
Zusätzliche Reisezeit [h]	1.243	1.105	2.349
Wirkung: Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			

Fahrzeit U-Bahn [min]	2	4	
Fahrzeit Schienenersatzverkehr (Bus) [min]	3	7.5	
Zusätzliche Fahrzeit [min]	1	3.5	
Anzahl Fahrgäste	46.634	40.884	
Zusätzliche Reisezeit [h]	777	2.385	3.162

Zusätzliche Betriebskosten

Die *zusätzlichen Betriebskosten* werden auf Basis der Größen *zusätzliche Verkehrsleistung* je Verkehrsträger und *zusätzliche Fahrzeit* je Verkehrsträger berechnet.

Zusätzliche Verkehrsleistung je Verkehrsträger

Die *zusätzliche Verkehrsleistung* je Verkehrsträger wird aus der Entfernung zwischen den Stationen berechnet. Dabei wird entweder die Entfernung auf der Schiene oder die Entfernung auf der Straße berücksichtigt.

Tabelle 35: Berechnung der zusätzlichen Verkehrsleistung pro Tag je Verkehrsträger für die Y-Linie (Modellstadt 1, Station 2)

Route:	A → 2	2 → C	A → C
Wirkung: Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Anzahl Züge in beiden Richtungen	416	416	416
Entfernung U-Bahn [km]	0,876	1,472	2,348
Zusätzliche Verkehrsleistung U-Bahn [Fz-km]	Nicht relevant	Nicht relevant	-977
Anzahl Busse	832	832	832
Entfernung Schienenersatzverkehr (Bus) [km]	0,768	1,874	2,642
Zusätzliche Verkehrsleistung Bus [Fz-km]	Nicht relevant	Nicht relevant	2.198

Zusätzliche Fahrzeit je Verkehrsträger

Die *zusätzliche Fahrzeit* je Verkehrsträger wird auf die gleiche Weise berechnet wie die *zusätzliche Verkehrsleistung* je Verkehrsträger, jedoch unter Berücksichtigung der Fahrzeit anstelle der Entfernung.

Tabelle 36: Berechnung der zusätzlichen Fahrzeit pro Tag je Verkehrsträger für die Y-Linie (Modellstadt 1, Station 2)

Route:	A → 2	2 → C	A → C
Wirkung: Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]			
Anzahl Züge in beiden Richtungen	416	416	416
Fahrzeit U-Bahn [min]	2	4	6
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn (je Fahrt) [min]	-2	-4	-6
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn [Fz-h]	Nicht relevant	Nicht relevant	-42
Anzahl Busse	832	832	832
Fahrzeit Schienenersatzverkehr (Bus) [min]	2	6,5	8,5
Zusätzliche Fahrzeit Bus [Fz-h]	Nicht relevant	Nicht relevant	118

Nachdem *zusätzliche Reisezeit*, *zusätzliche Verkehrsleistung* und *zusätzliche Fahrzeit* für jede relevante Wirkung berechnet wurden, werden die Ergebnisse in Tabelle 37 zusammengefasst.

Tabelle 37: Indikatorwerte pro Tag für jede auftretende Wirkung (Modellstadt 1, Station 2)

Indikator / Größe	Y-Linie hält nicht	Y-Linie unterbrochen
Zusätzliche Reisezeit [h]	2.349	3.162
Zusätzliche Verkehrsleistung U-Bahn [Fz-km]	0	-977
Zusätzliche Verkehrsleistung Bus [Fz-km]	0	2.198
Zusätzliche Fahrzeit U-Bahn [Fz-h]	0	-42
Zusätzliche Fahrzeit Bus [Fz-h]	0	118

Der nächste Schritt besteht in der Zusammenführung der Ergebnisse mit den jeweiligen Szenarien. Darüber hinaus sind zur Berechnung der Betriebskosten die in Abschnitt 1.2.4.3.1 beschriebenen Berechnungsvorschriften anzuwenden. Die Ergebnisse für alle Verkehrsszenarien sind in Tabelle 38 aufgeführt.

Tabelle 38: Zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Verkehrsleistung, zusätzliche Fahrzeit und zusätzliche Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 1, Station 2)

Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Verkehrsleistung Bus [km]	Verkehrsleistung U-Bahn [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U-Bahn [h]	Betriebskosten [EUR]
Y-Linie unterbrochen	3.162	2.198	-977	118	-42	-1.549
Y-Linie hält nicht	2.349	0	0	0	0	0

Die Indikatorwerte für die Beispielszenarien werden als Produkte aus den Tageswerten und den Dauern der jeweiligen Verkehrsszenarien berechnet (siehe Tabelle 39).

Tabelle 39: Bewertungsindikatoren für die Beispielszenarien (Modellstadt 1, Station 2)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	OHNE BEWERTUNG	1	-	-
	2	Y-Linie unterbrochen	1	3.162	-1.549
Feuer: Mittlerer Brand in Station / FI-02	1	Y-Linie unterbrochen	1	3.162	-1.549
	2	Y-Linie hält nicht	3	7.046	-
	Summe:		4	10.208	-1.549
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	Y-Linie hält nicht	0.04	94	-
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	Y-Linie unterbrochen	18	56.918	-27.887

Wenn der eingeschränkte Betrieb in verschiedene Phasen unterteilt ist, wird dieser Schritt für jede Phase durchgeführt, und die Werte werden danach aufsummiert. Beispielsweise besteht der veraltete Modus des Brandszenarios FI aus zwei Phasen mit einer Länge von einem bzw. drei Tagen.

1.3.2.6 Station 3

Als drittes Beispiel wurde eine andere Standard-U-Bahnstation der Linie X gewählt.

1.3.2.6.1 Kritische Bereiche von Station 3

Die Station besitzt einen Mittelbahnsteig und zwei Eingangsbereiche mit insgesamt 6 Aufgängen zur Oberfläche. Die Station (und damit auch die X-Linie) ist also zugänglich, solange mindestens einer der Eingangsbereiche intakt ist.

1.3.2.6.2 Relevante Bedrohungen und Bedrohungswirkungen

Um einen direkten Vergleich zwischen den Stationen zu ermöglichen, wurden für das Beispiel die gleichen Bedrohungen wie für Station 1 gewählt. Allerdings ist nur die X-Linie von den Auswirkungen eines Vorfalls in Station 3 betroffen.

1.3.2.6.3 Dauer der betrieblichen Wirkungen

Es wurden dieselben Dauern wie für Station 1 und 2 angenommen. Bedrohungen, Wirkungen und Dauern sind in Tabelle 33 von Abschnitt 1.3.2.5.3 zusammengefasst.

1.3.2.6.4 Operationalisierung der Wirkungen

Wie für Station 2 müssen für Station 3 nur zwei Verkehrsszenarien betrachtet werden:

- *Linie hält nicht*

Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrgäste die gesamte Strecke von den angrenzenden Bahnhöfen bis zur Station 3 zu Fuß zurücklegen, auch wenn ihre Fahrziele eigentlich zwischen den Bahnhöfen liegen.

- *Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...]*

Unter Berücksichtigung der Standorte der Weichen wurden für alle Szenarien (einschließlich Überflutung) die gleichen Stationen A und C (wobei C keine benachbarte Station ist) identifiziert. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrgäste den angebotenen Schienenersatzverkehr in Anspruch nehmen werden, auch wenn es andere Reisemöglichkeiten gäbe, z. B. zu Fuß gehen oder alternative Linien verwenden.

1.3.2.6.5 Berechnung der Bewertungsindikatoren

Die Werte der Bewertungsindikatoren *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* wurden analog zu den Werten für Station 2 berechnet.

Tabelle 40: Zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Verkehrsleistung, zusätzliche Fahrzeit und zusätzliche Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 1, Station 3)

Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Verkehrsleistung Bus [km]	Verkehrsleistung U-Bahn [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U-Bahn [h]	Betriebskosten [EUR]
Cut X line	8.276	2.167	-984	113	-35	-889
X no stop	2.041	0	0	0	0	0

Die Ergebnisse für die beiden Verkehrsszenarien sind in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Bewertungsindikatoren für die Beispielszenarien (Modellstadt 1, Station 3)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	OHNE BEWERTUNG	1	–	–
	2	X-Linie unterbrochen	1	8.276	-889
Feuer: Mittlerer Brand in Station / FI-02	1	X-Linie unterbrochen	1	8.276	-889
	2	X-Linie hält nicht	3	6.123	-
	Summe:		4	14.399	-889

Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	X-Linie hält nicht	0,04	82	-
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	X-Linie unterbrochen	18	36.738	-16.003

Die Indikatorwerte für die Beispielszenarien wurden als Produkte der Tageswerte und der Dauern der jeweiligen Verkehrsszenarien berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 41 dargestellt.

1.3.2.7 Zusammenfassung für Modellstadt 1

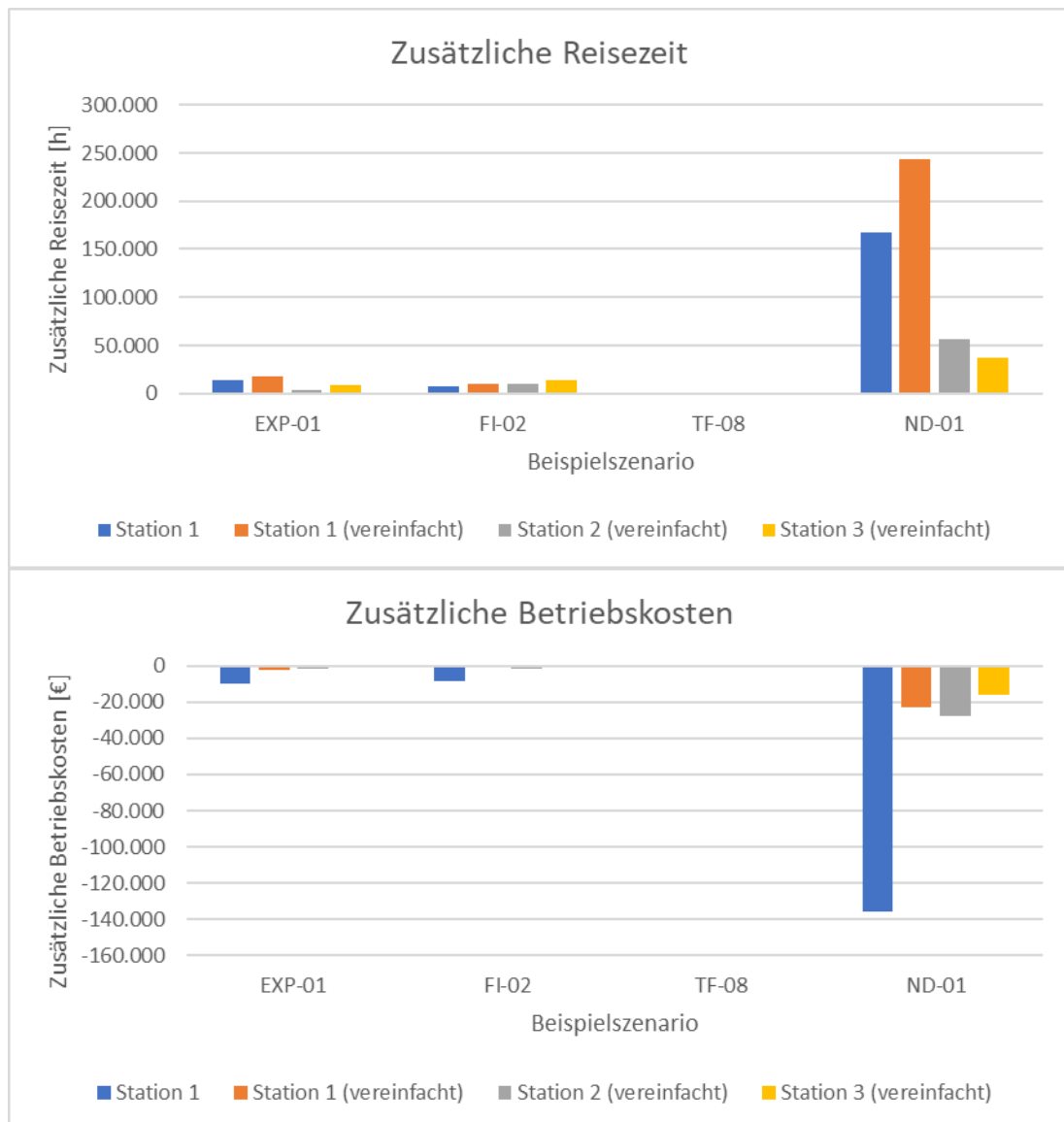


Abbildung 13: Ergebnisse für *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* für Modellstadt 1

In Abbildung 13 wurden die wichtigsten Ergebnisse für Modellstadt 1 zusammengefasst.

Die Diagramme zeigen für jede Station die zusätzliche Reisezeit und die zusätzlichen Betriebskosten, wobei für Station 1 die Ergebnisse des modellbasierten und die des vereinfachten Ansatzes dargestellt sind.

Offensichtlich führt das Überflutungsszenario bei allen Stationen zur größten Zunahme der Reisezeit der ÖV-Nutzer.

Da ein Vorfall in Station 1 sowohl die X-Linie als auch die Y-Linie betreffen kann, während in Station 2 und 3 nur jeweils eine der Linien betroffen sein kann, wurde erwartet, dass die Zunahme der Reisezeit in Station

1 am größten sein würde. Während dies für drei der vier Bedrohungsszenarien (Explosion, Ausfall der Stromversorgung und Überflutung) zutrifft, weist Station 3 für das Brandszenario den höchsten Wert der zusätzlichen Reisezeit auf. Der Grund für dieses Ergebnis liegt darin, dass im Szenario für Station 1 davon ausgegangen wurde, dass das Feuer im Tunnel der Y-Linie ausbricht und nur geringe Auswirkungen auf die X-Linie hat. Ein Brand im Tunnel der stärker belasteten X-Linie hätte einen höheren Wert für die zusätzliche Reisezeit ergeben.

Die Ergebnisse zeigen also, dass es im Allgemeinen sinnvoll ist, mehr als ein Szenario pro Bedrohung zu untersuchen, um die Bandbreite der möglichen Folgen berücksichtigen zu können. Angesichts der großen Unterschiede bei den Betriebskosten zwischen dem modellbasierten und dem vereinfachten Ansatz für Station 1 sollte zudem besonderes Augenmerk auf die berechneten Kosteneinsparungen gelegt werden. Es stellt sich insbesondere die Frage, in welchem Umfang diese tatsächlich realisierbar sind.

1.3.2.8 **Modellstadt 2**

Für das zweite Beispiel wurden drei Stationen aus dem U-Bahn-Netz der Modellstadt 2 (siehe Abschnitt 1.3.1.6) ausgewählt.

Wie beim ersten Beispiel wurden die Werte der Bewertungsindikatoren der Station 1 mit beiden Ansätzen berechnet, um die Ergebnisse des umfassenden und des vereinfachten Ansatzes vergleichen zu können. Für die beiden anderen Stationen wurde nur der vereinfachte Ansatz angewendet.

Auch bei Modellstadt 2 wurden alle Stationen und Linien anonymisiert.

1.3.2.9 **Station 1**

Bei Station 1 handelt es sich um eine potenziell kritische Station in Modellstadt 2 mit einer hohen Anzahl von Fahrgästen, in der sich die X- und die Y-Linie kreuzen.

1.3.2.9.1 Kritische Bereiche von Station 1

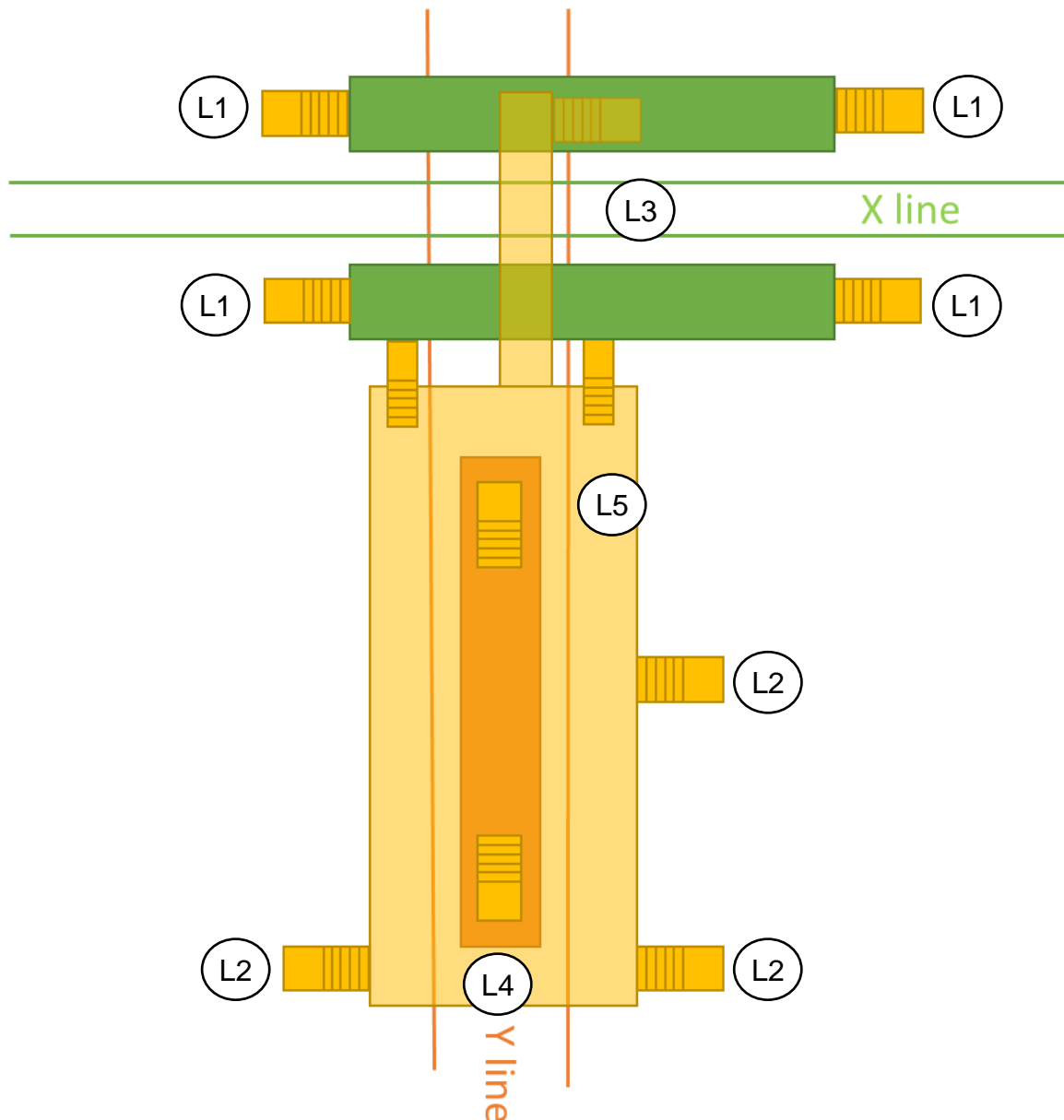


Abbildung 14: Kritische Bereiche von Station 1 (Modellstadt 2)

Ein- und Ausgänge (L1 und L2)

Die Station verfügt über zahlreiche Ein- und Ausgänge für die X- (L1) und die Y-Linie (L2).

Die beiden Seitenbahnsteige der X-Linie können direkt von den Eingängen her erreicht werden. (L1).

Der Bahnsteig der Y-Linie kann nur über eine Zwischenebene erreicht werden (L5), die auch als Verbindung zwischen den Tunneln der X- und der Y-Linie dient.

Tunnel der X-Linie (L3)

Der Tunnel der X-Linie ist der älteste Teil der Station. Er besitzt zwei Seitenbahnsteige.

Tunnel der Y-Linie (L4)

Der Tunnel der Y-Linie ist der tiefste Teil der Station. Zwischen den beiden Gleisen der Y-Linie befindet sich ein zentraler Bahnsteig.

Zwischenebene (L5)

Die Zwischenebene liegt oberhalb des Tunnels der Y-Linie, aber tiefer als die X-Linie. Sie bildet eine konstruktive Einheit mit dem Tunnel der Y-Linie.

Die Zwischenebene kann von der Oberfläche aus über verschiedene Eingänge erreicht werden (L2).

Es gibt Verbindungstunnel und Treppen zum Tunnel der X-Linie und dem der Y-Linie.

Zusammenfassung

Die Station besteht aus zwei konstruktiv getrennten Teilen, dem alten Tunnel der X-Linie und dem neuen Tunnel der Y-Linie mit der Zwischenebene. Das bedeutet, dass ein Ereignis in einem Teil der Station nicht notwendigerweise auch den anderen Teil beeinträchtigt. Außerdem ist aufgrund der hohen Anzahl von Ein- und Ausgängen und der verbindenden Zwischenebene die Zugänglichkeit beider Linien unter den allermeisten Umständen gewährleistet.

1.3.2.9.2 Relevante Bedrohungen und ihre Wirkungen

A priori kann für die Station keine Bedrohung ausgeschlossen werden. Um Vergleiche zu ermöglichen, wurden dieselben Bedrohungen wie für Station 1 von Modellstadt 1 gewählt:

- Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01
- Feuer: Mittlerer Brand in Station / FI-02
- Technisches Versagen: Ausfall der Stromversorgung / TF-08
- Naturereignisse: Überflutung / ND-01.

1.3.2.9.2.1 Bedrohungsszenarien

Für die Beispielrechnungen wurde zu jeder Bedrohung genau ein Bedrohungsszenario definiert:

1. Bombenangriff: Kleine Ladung im Zug / EXP-01

Bei EXP-01 wird davon ausgegangen, dass nur der Zug, nicht aber der umgebende Tunnel beschädigt wird und dass der Zug leicht zur Reparatur abgeschleppt werden kann. Unabhängig davon, in welchem Zug bzw. Tunnel (X-Linie oder Y-Linie) die Explosion stattfindet, sind die Auswirkungen recht ähnlich:

- Unterbrechung des Verkehrs im gesamten Netz am Tag des Angriffs
- Schließung des Tunnels, in dem sich die Explosion ereignet hat, für einen zusätzlichen Tag für Analysen durch die Polizei. Das bedeutet, dass die zugehörige Linie unterbrochen ist, während die Linie im anderen Tunnel normal verkehrt.

2. Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02

Es wird angenommen, dass auf dem Mittelbahnsteig des Tunnels der Y-Linie ein mittlerer Brand ausgebrochen ist. Dies hat die folgenden Auswirkungen:

- Der Zugang zur gesamten Station ist für einen Tag gesperrt. Beide Linien sind unterbrochen, da die Züge nicht durch die rauchgefüllte Station fahren können.
- Am zweiten Tag kann die X-Linie ohne Halt durch den Tunnel fahren, während die Y-Linie aufgrund notwendiger Reinigungs- und Reparaturarbeiten weiterhin unterbrochen ist.
- Am dritten Tag wird die Station für Passagiere geöffnet und die X-Linie verkehrt wieder nach dem normalen Fahrplan. Der Bahnsteig des Tunnels der Y-Linie kann jedoch nicht benutzt werden, bis die beschädigten Teile repariert sind. Das bedeutet, dass die Y-Linie zwei Tage lang zwar durch den Bahnhof fährt, aber nicht hält.
- Anschließend müssen zwar weitere Reparaturen ausgeführt werden. Dies hat aber keine Auswirkungen auf den Betrieb und auch die Y-Linie verkehrt wieder normal.

3. Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08

Es wird ein kurzer Stromausfall angenommen, der nur die Station selbst betrifft. Das bedeutet, dass zwar die Beleuchtung ausfällt, aber der Fahrstrom nicht beeinträchtigt ist. Somit muss die Station bis zur Beendigung des Stromausfalls für Personen geschlossen werden, was nur geringe Auswirkungen auf den Betrieb hat:

- Es wird angenommen, dass die Züge in dieser Zeitspanne (1 h) nicht in der Station halten.

4. Naturereignisse: Überflutung / ND-01

Es wird davon ausgegangen, dass der Tunnel der Y-Linie, der den tiefsten Teil der Station darstellt, von einem nah gelegenen Fluss überflutet wird. Ein Worst-Case-Szenario, das für das Beispiel nicht untersucht wurde, könnte sogar die Überflutung der gesamten Station in Betracht ziehen.

- Infolgedessen kann der Tunnel der Y-Linie drei Wochen lang nicht benutzt werden. Während dieser Zeit wird die Y-Linie in zwei Teile geteilt.
- Die Überschwemmung betrifft auch den Tunnel außerhalb der Station und führt sogar zur Schließung benachbarter Stationen.

1.3.2.9.2.2 Bedrohungswirkungen

Da dieselben Bedrohungen ausgewählt wurden und die Stationen eine ähnliche Struktur aufweisen, sind die Bedrohungswirkungen von Station 1 von Modellstadt 2 auf einer abstrakten Ebene (siehe Tabelle 5) beinahe mit denen von Station 1 von Modellstadt 1 identisch. Sie sind in Tabelle 42 zusammengefasst.

Tabelle 42: Bedrohungswirkungen der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 1)

Beispielszenario	Phase	Wirkungen
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	2	E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen (Y-Linie)
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station
		E8: Keine Durchfahrt, Unterbrechung aller Linien (Station geschlossen)
	2	E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beiden Seitenbahnsteige sind gesperrt. (X-Linie)
		E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen (Y-Linie)
3	E4: Züge halten nicht. Mittelbahnsteig oder beiden Seitenbahnsteige sind gesperrt. (Y-Linie)	
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	E1: Schließung eines oder mehrerer Eingänge der Station
		E5: Züge halten nicht. Alle Bahnsteige sind gesperrt.
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	E7: Keine Durchfahrt, Unterbrechung einer Linie in beiden Richtungen (Y-Linie)
		E9: Sperrung des Tunnels zwischen Stationen (Y-Linie)
		E10: Schließung einer oder mehrerer benachbarter Stationen

Wenn die Einzelwirkungen der verschiedenen Phasen kombiniert werden, ergeben sich sieben unterschiedliche Verkehrsszenarien. Diese sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Verkehrsszenarien (Modellstadt 2, Station 1)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	2	Y-Linie unterbrochen
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	X-Linie unterbrochen + Y-Linie unterbrochen
	2	X-Linie hält nicht + Y-Linie unterbrochen
	3	Y-Linie hält nicht
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	X-Linie hält nicht + Y-Linie hält nicht
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	Y-Linie unterbrochen (mit Tunnelausfall)

Aus den Einzelwirkungen ergeben sich die in Tabelle 43 zusammengestellten Verkehrsszenarien. Dabei wurden nur direkte Wirkungen der Ereignisse berücksichtigt. Kompensationsmaßnahmen und ihre Wirkungen werden im Rahmen der Berechnung der Bewertungsindikatoren betrachtet.

1.3.2.9.3 Computation of assessment indicators

1.3.2.9.3.1 Modellgestützter Ansatz

Im modellgestützten Ansatz wird ein Verkehrsmodell verwendet, um mögliche Wirkungen von Ereignissen zu prognostizieren.

1.3.2.9.3.1.1 Operationalisierung der Wirkungen

Um mit Hilfe des Verkehrsmodells zusätzliche Reisezeiten und zusätzliche Betriebskosten berechnen zu können, wurden alle in Tabelle 43 auftretenden Wirkungen als Modifikationen des Basisszenarios modelliert. Die Modifikationen sind in Tabelle 44 zu sehen.

Tabelle 44: Modifikationen (Modellstadt 2, Station 1)

ID	Modifikation	Beschreibung
1	X hält nicht	X-Linie hält nicht.
2	Y hält nicht	Y-Linie hält nicht.
10	Y West	Y-Linie verkehrt zwischen [...] und [...]
46	Y Ost	Y-Linie verkehrt zwischen [...] und [...]
48	X unterbrochen	X-Linie verkehrt zwischen [...] und [...]

Zur Modellierung von "X hält nicht" und "Y hält nicht", wurden alle Halte in Station 1 aus allen Fahrten der X- bzw. der Y-Linie gelöscht. Die entfallenen Haltezeiten wurden zu den Fahrzeiten im jeweiligen Bereich addiert, um Wirkungen auf andere Stationen zu minimieren.

Um die Unterbrechung einer Linie zu modellieren, wurden im Gleisplan möglichst nahe liegende Stationen mit Weichen identifiziert, an denen Züge wenden bzw. auf dem gegenüberliegenden Gleis zurückfahren können. Daraus ergab sich eine Unterbrechung der X-Linie auf einer Länge von 7 und der Y-Linie auf einer Länge von 3 Streckenabschnitten, wenn nur Station 1 selbst von einem Ereignis betroffen war. Bei der Modellierung der Überflutung des Tunnels der Y-Linie wurde eine begrenzte Wassermenge angenommen. Dennoch ergab sich eine Unterbrechung auf einer Länge von 10 Abschnitten.

Die verbleibenden Streckenteile wurden als Modifikationen 10, 46 und 48 modelliert.

Nach der Modellierung der Modifikationen wurde jedes der 6 Verkehrsszenarien aus Tabelle 43 als Kombination des Basisszenarios mit den jeweils relevanten Modifikationen definiert (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 45: Modellierung der Verkehrsszenarien (Modellstadt 2, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Beschreibung	Modifikationen
2	Basisszenario	Szenario ohne Bedrohungswirkungen	–
4	Y hält nicht	Y-Linie hält nicht in Station 1.	2
5	XY halten nicht	X- und Y-Linie halten nicht in Station 1.	1, 2
75	Y unterbrochen	Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...].	10, 46
92	X hält nicht Y unterbrochen	X-Linie hält nicht in Station 1 und, Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...].	1, 10, 46
98	X unterbrochen Y unterbrochen	X-Linie verkehrt nur zwischen [...] und [...] und Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...].	10, 46, 48
120	Y unterbrochen 2	Y-Linie verkehrt nicht zwischen [...] und [...].	46

In Verkehrsszenario 4 hält die Y-Linie nicht in Station 1, was der Anwendung von Modifikation 2 allein entspricht. Szenario 5 besteht aus den Modifikationen 1 und 2, da in Phase 3 von Beispielszenario 3 (Stromausfall) weder die X- noch die Y-Linie hält.

Szenario 75 modelliert die Unterbrechung der Y-Linie auf einer Länge von 7 Stationen, was bedeutet, dass sich der verbleibende Betrieb auf die westlichen und östlichen Teile ihrer Linienroute (modelliert durch Modifikationen 10 und 46) beschränkt.

Im Fall der Überflutung (Verkehrsszenario 120), die zum Ausfall eines großen Teils des Tunnels außerhalb von Station 1 führt, kann nur noch der östliche Teil der Linienroute befahren werden (Modifikation 46).

Szenario 92 entspricht Szenario 75 (Modifikationen 10 und 46) in Kombination mit dem Nicht-Halten der X-Linie (Modifikation 1). Verkehrsszenario 98 wiederum ist die Kombination aus Szenario 75 (Modifikationen 10 und 46) mit einer Unterbrechung der Y-Linie (Modifikation 48).

1.3.2.9.3.1.2 Bewertung der Verkehrsszenarien

Anschließend wird jedes Verkehrsszenario im Modell simuliert, und die Werte für Reisezeit, Fahrleistung und Fahrzeit werden berechnet.

Tabelle 46: Vorläufige Ergebnisse für absolute Reisezeit, absolute Fahrleistung und absolute Fahrzeit pro Tag (Modellstadt 2, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Fahrleistung [km]			Fahrzeit [h]		
			Bus	Tram	U	Bus	Tram	U
2	Basisszenario	467.137	127.136	18.536	19.932	7.610	914	713
4	Y hält nicht	474.981	127.136	18.536	19.932	7.610	914	713
5	XY halten nicht	474.978	127.136	18.536	19.932	7.610	914	713
75	Y unterbrochen	493.130	127.136	18.536	18.461	7.610	914	655
92	X hält nicht, Y unterbrochen	493.107	127.136	18.536	18.461	7.610	914	655
98	X unterbrochen, Y unterbrochen	516.088	127.136	18.536	16.131	7.610	914	562
120	Y unterbrochen 2	498.151	127.136	18.536	15.515	7.610	914	561

Die Ergebnisse der Modellierung, die in Tabelle 46 wiedergegeben sind, zeigen erwartungsgemäß im Ereignisfall gegenüber dem Basisszenario erhöhte Reisezeiten. Fahrleistung und Fahrzeit sind in den reinen „Durchfahr-Szenarien“ unverändert und in den „Unterbrechungs-Szenarien“, wo eine oder beide Linien nicht auf der vollen Länge ihrer Linienroute verkehren, niedriger. Fahrleistung und Fahrzeit von Bussen und Straßenbahnen sind unverändert, da in den Verkehrsszenarien von Tabelle 46 keine Ersatzverkehre berücksichtigt wurden.

Allerdings würde der ÖV-Betreiber im Falle eines Ereignisses wahrscheinlich einen Schienenersatzverkehr (SEV) einrichten oder Linien auf Alternativrouten verstärken, um seinen Kunden einen akzeptablen Service zu bieten. Deshalb wurden mit Ausnahme der „Durchfahrt-Szenarios“ zunächst alle Szenarien um vom Betreiber von Modellstadt 2 dokumentierte Standard-Ersatzverkehre erweitert.

Allerdings ergab eine Analyse der Besetzungsgrade, dass es aufgrund des Ausweichverhaltens von Passagieren auf Alternativrouten trotz Einrichtung der Ersatzverkehre zu einer Überlastung einzelner Streckenabschnitte kommen würde. Deshalb wurden die Szenarien um weitere Ersatzverkehre erweitert. Die Ergebnisse für die so modifizierten Verkehrsszenarien sind in Tabelle 47 dargestellt.

Tabelle 47: Absolute Reisezeit, Fahrleistung und Fahrzeit pro Tag für Szenarien mit Schienenersatzverkehr (SEV) (Modellstadt 2, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Fahrleistung [km]			Fahrzeit [h]		
			Bus	Tram	U	Bus	Tram	U
2	Basisszenario	467.137	127.136	18.536	19.932	7.610	914	713
4	Y hält nicht	474.981	127.136	18.536	19.932	7.610	914	713
5	XY halten nicht	474.978	127.136	18.536	19.932	7.610	914	713
91	Y unterbrochen SEV	488.354	130.205	20.016	18.461	7.766	997	655
94	X hält nicht, Y unterbrochen, SEV	488.344	130.205	20.016	18.461	7.766	997	655
100	X unterbrochen, Y unterbrochen, SEV	509.883	131.443	21.451	16.131	7.918	1.116	562
122	Y unterbrochen, 2 SEV	495.698	130.205	20.016	15.515	7.766	997	561

Der Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 46 mit denen von Tabelle 47 zeigt, dass erwartungsgemäß die Einrichtung von Ersatzverkehren zu einem Rückgang der Reisezeit der Passagiere führt. Andererseits nehmen Fahrleistungen und Fahrzeit der Busse und damit die Betriebskosten zu.

Tabelle 48: Zusätzliche Reisezeit, Fahrleistung, Fahrzeit und Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 2, Station 1)

ID	Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Fahrleistung [km]			Fahrzeit [h]			Betriebskosten [EUR]
			Bus	Tram	U	Bus	Tram	U	
4	Y hält nicht	7.844	0	0	0	0	0	0	0
5	XY halten nicht	7.841	0	0	0	0	0	0	0
91	Y unterbrochen, SEV	21.218	3.069	1.480	-1.471	156	83	-58	5.522
94	X hält nicht, Y unterbrochen, SEV	21.208	3.069	1.480	-1.471	156	83	-58	5.522
100	X unterbrochen, Y unterbrochen, SEV	42.747	4.307	2.915	-3.801	308	202	-151	5.338
122	Y unterbrochen, 2 SEV	28.561	3.069	1.480	-4.417	156	83	-152	-15.232

Auf der Grundlage der absoluten Werte wurden Werte für *zusätzliche Reisezeit*, *zusätzliche Verkehrsleistung* und *zusätzliche Fahrzeit* berechnet. Anschließend wurden daraus mit dem in Kapitel 1.2.4.3 beschriebenen Verfahren die *zusätzlichen Betriebskosten* berechnet. Alle Tageswerte sind in Tabelle 48 dargestellt.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die *zusätzlichen Betriebskosten* der

„Unterbrechungs-Szenarien“ Kosteneinsparungen beinhalten, die im letzten Szenario sogar zu einem rechnerischen Rückgang der Betriebskosten führen.

Der ÖV-Betreiber sollte deshalb gründlich prüfen, ob die berechneten Kosteneinsparungen, die Abschreibungskosten, zeitabhängige Wartungskosten, fahrleistungsabhängige Wartungskosten, Personalkosten und Energiekosten enthalten, im Ereignisfall tatsächlich realisiert werden könnten. Es ist insbesondere fraglich, ob im Fall kurzzeitiger Unterbrechungen tatsächlich Personalkosten eingespart werden könnten.

1.3.2.9.3.1.3 Bewertung der Beispielszenarien

Tabelle 49: Bewertungsindikatoren der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 1)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [day]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	KEINE BEWERTUNG	1	–	–
	2	91: Y unterbrochen, SEV	1	21.218	5.552
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	100: X unterbrochen, Y unterbrochen, SEV	1	42.747	5.338
	2	94: X hält nicht, Y unterbrochen, SEV	1	21.208	5.522
	3	4: Y hält nicht	2	23.533	0
	Summe:		4	87.488	10.861
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	5: XY halten nicht	0,04	327	0
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	122: Y unterbrochen, 2 SEV	18	514.098	-274.177

Um die Bewertungsindikatoren der Beispielszenarien zu berechnen, werden die Dauern mit den Tageswerten der zugehörigen Verkehrsszenarien multipliziert. Für das Feuer-Szenario, bei dem drei Phasen des eingeschränkten Betriebs unterschieden werden, wird dieser Berechnungsschritt für jede Phase durchgeführt und anschließend werden die Werte addiert (siehe Tabelle 49).

Tabelle 49 zeigt auf den ersten Blick die herausragende Bedeutung des Überflutungsszenarios, die sowohl aus der Dauer als auch aus der Schwere der damit verbundenen Betriebseinschränkungen resultiert. Auf der anderen Seite kann ein kurzer Stromausfall zwar für einige Passagiere ärgerlich sein, besitzt jedoch insgesamt keine schwerwiegenden Folgen.

Da die Auswirkungen einer Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (mit Auswirkungen auf U-Bahn, Bus und Straßenbahn) nicht sinnvoll modelliert werden können, konnten die Werte für die Bewertungsindikatoren der Phase 1 des Explosionsszenarios nicht berechnet werden (in Tabelle 49 rot markiert) und stehen daher für die Vulnerabilitätsbewertung nicht zur Verfügung (vgl. Bemerkungen am Ende von Abschnitt 1.3.2.4.8).

1.3.2.9.3.2 Vereinfachter Ansatz

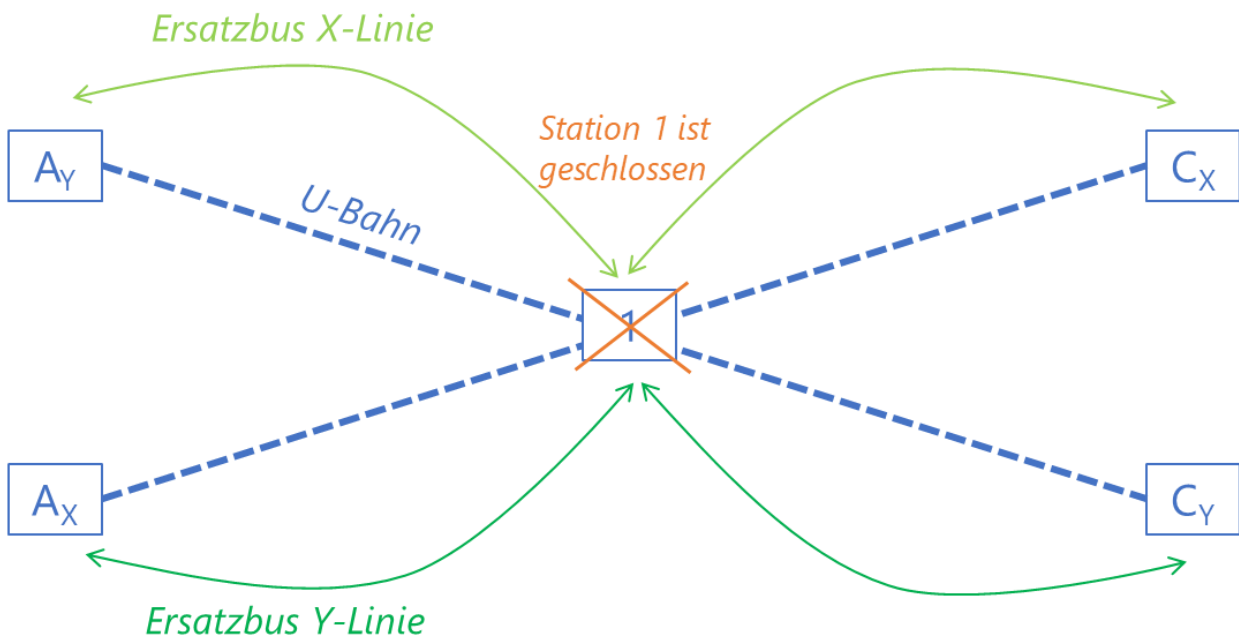


Abbildung 15: Lokales Verkehrsnetz mit Ersatzverkehren (Modellstadt 2, Station 1)

Im Gegensatz zum umfassenden, modellgestützten Ansatz berücksichtigt der vereinfachte Ansatz nur das lokale Verkehrsnetz um eine Station herum (siehe Abbildung 15). Zudem werden die Bewertungsindikatoren ohne ein Verkehrsmodell berechnet.

1.3.2.9.3.2.1 Vereinfachte Operationalisierung der Wirkungen

In Station 1 halten zwei Linien, und es müssen (ohne Einstellung des Betriebs im gesamten Netz) sechs Verkehrsszenarien bewertet werden (vgl. Tabelle 48). Diese bestehen aus verschiedenen Kombinationen von zwei Hauptwirkungen, die wie folgt in vereinfachter Form operationalisiert werden:

- *Linie hält nicht*

Es wird angenommen, dass die Passagiere die gesamte Strecke von den benachbarten Stationen bis zur Station 1 zu Fuß zurücklegen, selbst wenn ihre Ziele zwischen den Stationen liegen.

- *Linie unterbrochen / Linie verkehrt nicht zwischen [A] und [C]*

Bei jeder Linie werden dieselben Stationen A und C wie beim modellgestützten Ansatz verwendet (siehe Abschnitt 1.3.2.9.3.1.1). Das bedeutet, dass für die Y-Linie wegen des Überflutungsszenarios zwei verschiedene Verkehrsszenarien ("Y unterbrochen" und "Y unterbrochen 2") untersucht werden müssen.

Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrgäste den jeweils angebotenen Schienenersatzverkehr zwischen A und C in Anspruch nehmen, auch wenn es andere Reisemöglichkeiten gäbe, z. B. zu Fuß zu gehen oder alternative Linien zu nutzen.

Für den vereinfachten Ansatz werden die folgenden Daten benötigt (siehe weitere Erläuterungen in Abschnitt 1.3.2.4.9.2):

- Anzahl der betroffenen Benutzer der täglich im Bahnhof verkehrenden Züge
- Entfernungen zwischen den Stationen [km]
- Fahrzeiten von U-Bahnen und Bussen [min]
- Entfernungen der Ersatzbusse [km]
- Anzahl Züge und Anzahl Ersatzbusse.

1.3.2.9.3.2.2 Berechnung der Indikatoren der Verkehrsszenarien

Die Werte der Bewertungsindikatoren *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* wurden analog dem Vorgehen bei Modellstadt 1 berechnet. Die Ergebnisse für die sechs Verkehrsszenarien zeigt Tabelle 50.

Tabelle 50: Zusätzliche Reisezeit, zusätzliche Fahrleistung, zusätzliche Fahrzeit und zusätzliche Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 2, Station 1, vereinfachter Ansatz)

Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Fahrleistung Bus [km]	Fahrleistung U [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U [h]	Betriebskosten [EUR]
Y hält nicht	13.604	-	-	-	-	-
XY halten nicht	25.776	-	-	-	-	-
Y unterbrochen	9.507	2.897	-1.473	199	-57	-749
X hält nicht + Y unterbrochen	21.679	2.897	-1.473	199	-57	-749
X unterbrochen + Y unterbrochen	27.578	7.161	-3.901	579	-147	587
Y unterbrochen, 2 SEV	22.398	12.057	-4.419	740	-142	10.666

1.3.2.9.3.2.3 Berechnung der Indikatoren der Beispielszenarien

Tabelle 51: Bewertungsindikatoren der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 1, vereinfachter Ansatz)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	KEINE BEWERTUNG	1	-	-
	2	Y unterbrochen	1	9.507	-749
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	X unterbrochen + Y unterbrochen	1	27.578	587
	2	X hält nicht + Y unterbrochen	1	21.679	-749
	3	Y hält nicht	3	40.812	-
	Summe:		5	90.069	-161
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	XY halten nicht	0.04	1.031	-
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	Y unterbrochen 2	18	403.172	191.987

Die Indikatorenwerte der Beispielszenarien wurden als Produkt aus den Tageswerten und den Dauern der jeweiligen Phasen bzw. Verkehrsszenarien berechnet und sind in Tabelle 51 dargestellt.

1.3.2.9.4 Ergebnisvergleich

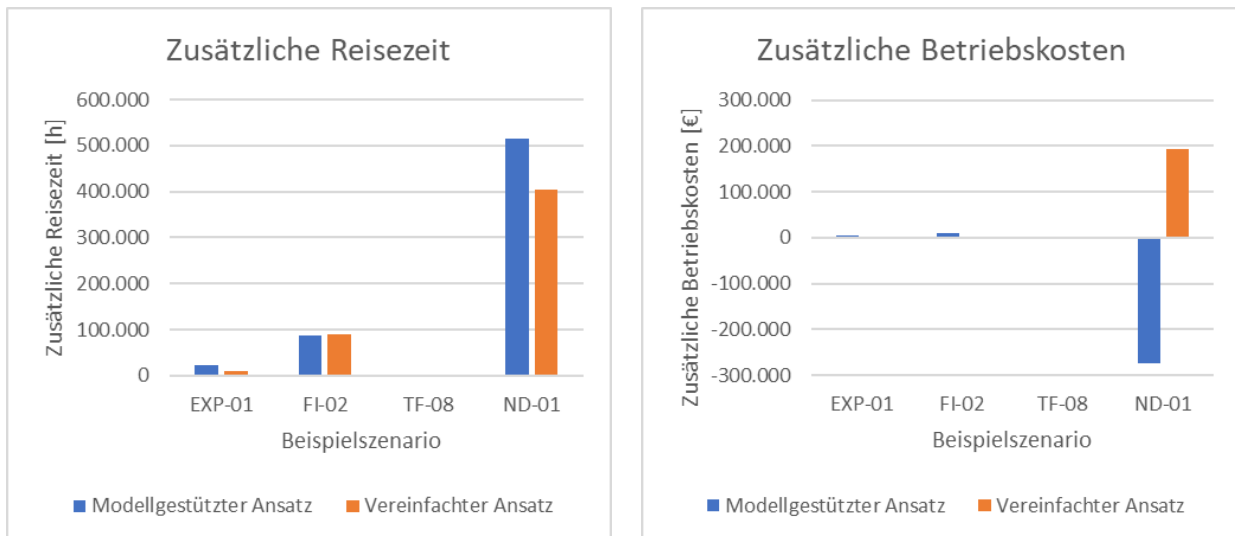


Abbildung 16: Vergleich modellgestützter und vereinfachter Ansatz (Modellstadt 2, Station 1)

Ein Vergleich der Werte der Bewertungsindikatoren aus beiden Ansätzen (siehe Abbildung 16, Tabelle 49 und Tabelle 51) zeigt, dass die Ergebnisse für *zusätzliche Reisezeit* in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Dies passt zu den Ergebnissen für Modellstadt 1 in Abschnitt 1.3.2.9.4.

Allerdings liegen im Gegensatz zu Modellstadt 1 die Werte des vereinfachten Ansatzes für das Explosions- (EXP-01) und das Überflutungsszenario (ND-01) niedriger als die des modellgestützten Ansatzes.

Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass beim vereinfachten Ansatz die Wirkungen des Ausfalls benachbarter Stationen – im Überflutungsszenario können insgesamt 10 Stationen nicht bedient werden – nicht explizit berücksichtigt werden, zum anderen darauf, dass dabei angenommen wird, dass die U-Bahn durch Busse mit derselben Gesamtkapazität ersetzt werden kann, was in der Realität nicht möglich ist.

Die letztere Annahme resultiert beim vereinfachten Ansatz außerdem in sehr hohen zusätzlichen Betriebskosten im Überflutungsszenario. Während dies aufgrund der unplausiblen Annahme problematisch ist, ist auch das Ergebnis des modellgestützten Ansatzes, der insgesamt einen Rückgang der Betriebskosten prognostiziert, da ein großer Teil der Y-Linie ausfällt und damit nicht mehr betrieben werden muss, fragwürdig, da vom ÖV-Betreiber vermutlich nur ein Teil der Kosteneinsparungen tatsächlich realisiert werden kann.

Insgesamt zeigt sich, dass die Anwendung des vereinfachten Ansatzes insbesondere im Fall des Ausfalls größerer Teile einer Linienroute problematisch ist, da die daraus resultierenden Wirkungen nicht ausreichend mit einem lokalen Modell (vgl. Abbildung 15) erfasst werden können.

1.3.2.10 Station 2

Als zweites Beispiel für Modellstadt 2 wurde eine normale Station an der X-Linie ausgewählt.

1.3.2.10.1 Kritische Bereiche von Station 2

Station 2 besitzt zwei Seitenbahnsteige und verfügt über insgesamt 6 Treppen mit zwei Eingangsbereichen. Die Station (und damit auch die Y-Linie) ist zugänglich, solange mindestens einer der Eingangsbereiche intakt ist.

1.3.2.10.2 Relevante Bedrohungen und Bedrohungswirkungen

Um einen direkten Vergleich zwischen den Stationen zu ermöglichen, wurden für das Beispiel die gleichen Bedrohungen wie für Station 1 gewählt. Allerdings ist nur die X-Linie von den Auswirkungen eines Vorfalls in Station 2 betroffen (vgl. Tabelle 52).

Tabelle 52: Verkehrsszenarien der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 2)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	2	X unterbrochen
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	X unterbrochen
	2	X hält nicht
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	X hält nicht
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	X unterbrochen (mit teilweisem Ausfall des Tunnels)

1.3.2.10.3 Vereinfachte Operationalisierung der Wirkungen

Für Station 2 wurden nur zwei Verkehrsszenarien bewertet:

- *Linie hält nicht*

Diese Wirkung tritt bei Feuer oder Stromausfall auf.

Es wird angenommen, dass die Fahrgäste die gesamte Strecke von den angrenzenden Stationen bis zur Station 2 zu Fuß zurücklegen, auch wenn ihre Fahrziele eigentlich zwischen den Bahnhöfen liegen.

- *Linie ist unterbrochen / Linie verkehrt nicht zwischen [A] und [C]*

Unter Berücksichtigung der Standorte der Weichen wurden für alle Szenarien (einschließlich Überflutung) die gleichen Stationen A und C (wobei C keine benachbarte Station ist) identifiziert. Diese Stationen sind für alle drei Szenarien, einschließlich des Überflutungsszenarios, identisch. Es wird angenommen, dass alle Fahrgäste den angebotenen Ersatzdienst in Anspruch nehmen werden, auch wenn es andere Reisemöglichkeiten gäbe, z. B. zu Fuß gehen oder alternative Linien verwenden.

1.3.2.10.4 Berechnung der Bewertungsindikatoren

Die Werte der Bewertungsindikatoren zusätzliche Reisezeit und zusätzliche Betriebskosten wurden analog dem Vorgehen für Modellstadt 1 berechnet.

Tabelle 53: Zusätzliche Reisezeiten, Fahrleistungen, Fahrzeiten und Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 2, Station 2)

Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Fahrleistung Bus [km]	Fahrleistung U [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U [h]	Betriebskosten [EUR]
X hält nicht	2.442	-	-	-	-	-
X unterbrochen	16.028	4.701	-2.427	362	-90	770

Tabelle 53 zeigt die Ergebnisse für die beiden Verkehrsszenarien.

Tabelle 54: Bewertungsindikatoren der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 2)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	KEINE BEWERTUNG	1	-	-
	2	X unterbrochen	1	16.029	770

Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	X unterbrochen	2	32.058	1.540
	2	X hält nicht	3	7.327	-
	SUM:			39.385	1.540
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	X hält nicht	0.04	98	-
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	X unterbrochen	18	288.521	13.862

Auch hier wurden die Indikatorenwerte der Beispielszenarien als Produkte aus den Dauern und den Tageswerten der zugehörigen Verkehrsszenarien berechnet (siehe Tabelle 54).

1.3.2.11 Station 3

Als drittes Beispiel für Modellstadt 2 wurde eine normale Station an der Y-Linie ausgewählt.

1.3.2.11.1 Kritische Bereiche von Station 3

Station 3 besitzt zwei Seitenbahnsteige und insgesamt vier Ein- und Ausgänge.

1.3.2.11.2 Relevante Bedrohungen und Bedrohungswirkungen

Um einen direkten Vergleich zwischen den Stationen zu ermöglichen, wurden für das Beispiel die gleichen Bedrohungen wie für Station 1 und 2 gewählt. Allerdings ist nur die Y-Linie von den Auswirkungen eines Vorfalls in Station 3 betroffen (vgl. Tabelle 55).

Tabelle 55: Verkehrsszenarien der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 3)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	E13: Einstellung des Betriebs im gesamten Netz (U-Bahn, Bus und Straßenbahn)
	2	Y unterbrochen
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	Y unterbrochen
	2	Y hält nicht
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	Y hält nicht
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	Y unterbrochen 2 (mit teilweisem Ausfall des Tunnels)

1.3.2.11.3 Vereinfachte Operationalisierung der Wirkungen

Für Station 3 müssen drei Verkehrsszenarien bewertet werden:

- *Linie hält nicht*

Dies Wirkung tritt bei Feuer oder Stromausfall auf.

Es wird angenommen, dass die Fahrgäste die gesamte Strecke von den angrenzenden Stationen bis zur Station 3 zu Fuß zurücklegen, auch wenn ihre Fahrziele eigentlich zwischen den Bahnhöfen liegen.

- *Linie ist unterbrochen / Linie verkehrt nicht zwischen [A] und [C]*

Zur Modellierung der Linienunterbrechungen wurden unter Berücksichtigung der Standorte der Weichen geeignete Stationen A und C identifiziert.

Da im Überflutungsszenario ein langer Teil des Tunnels der Y-Linie nicht verwendet werden kann, mussten zwei unterschiedene Unterbrechungs-Szenarien bewertet werden.

1.3.2.11.4 Berechnung der Bewertungsindikatoren

Tabelle 56: Zusätzliche Reisezeiten, Fahrleistungen, Fahrzeiten und Betriebskosten pro Tag (Modellstadt 2, Station 3)

Verkehrsszenario	Reisezeit [h]	Fahrleistung Bus [km]	Fahrleistung U [km]	Fahrzeit Bus [h]	Fahrzeit U [h]	Betriebskosten [EUR]
Y unterbrochen	18.647	7.391	-2.105	399	-57	9.850
Y hält nicht	8.272	-	-	-	-	-
Y unterbrochen 2	22.713	12.057	-4.419	740	-142	10.666

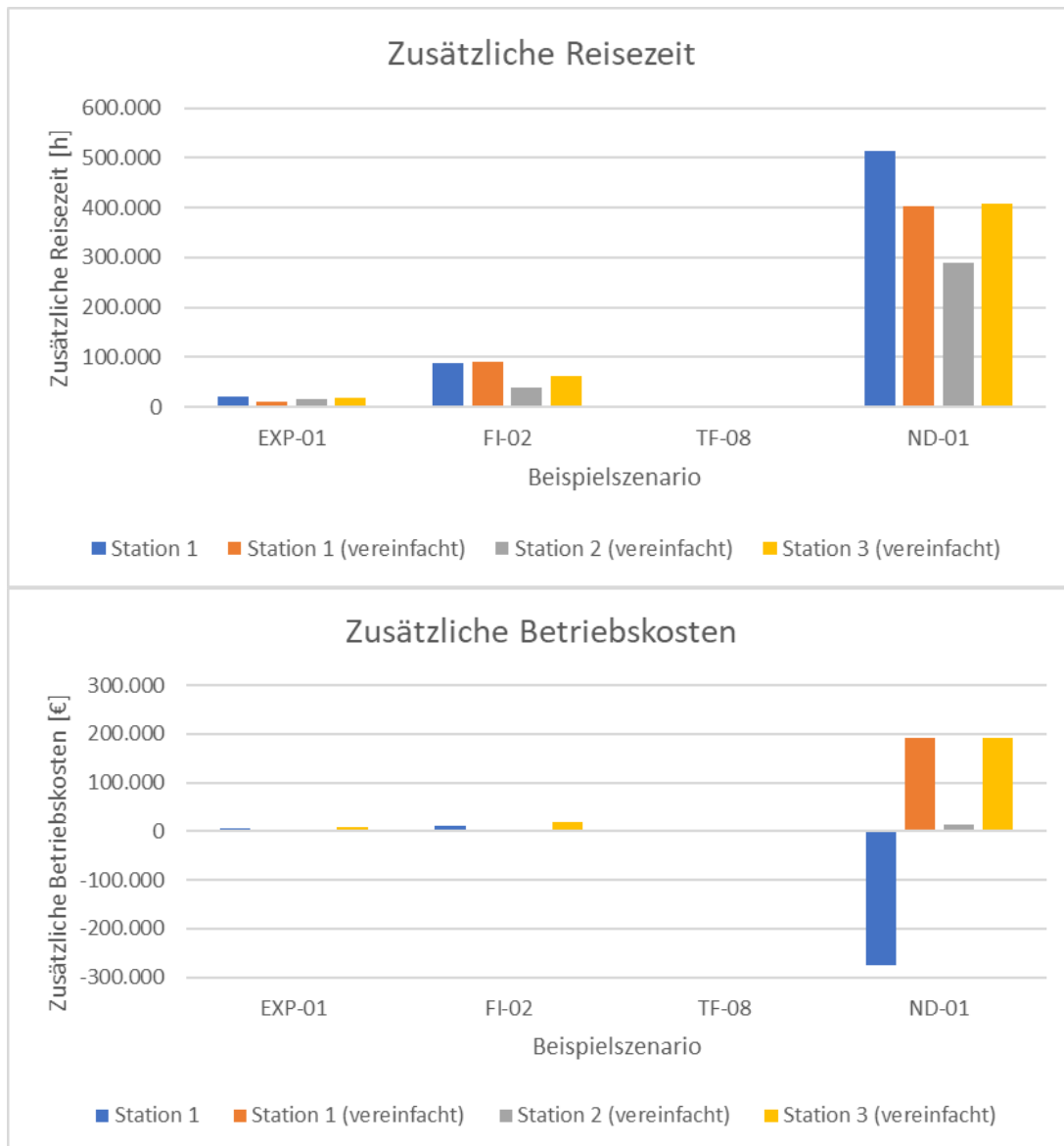
Die Werte der Bewertungsindikatoren *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* sind für alle drei Verkehrsszenarien in Tabelle 56 dargestellt.

Tabelle 57: Bewertungsindikatoren der Beispielszenarien (Modellstadt 2, Station 3)

Beispielszenario	Phase	Verkehrsszenario	Dauer [d]	Reisezeit [h]	Betriebskosten [EUR]
Bombenangriff: Kleine Sprengkraft (beweglich) / EXP-01	1	KEINE BEWERTUNG	1	-	-
	2	Y unterbrochen	1	18.647	9.850
Feuer: Mittleres Feuer in Station / FI-02	1	Y unterbrochen	2	37.294	19.700
	2	Y hält nicht	3	24.817	-
	Summe:			62.111	19.700
Technisches Versagen: Stromausfall / TF-08	1	Y hält nicht	0.04	331	-
Naturereignisse: Überflutung / ND-01	1	Y unterbrochen, 2 SEV	18	408.841	191.987

Auch hier wurden die Indikatorenwerte der Beispielszenarien als Produkte aus den Dauern und den Tageswerten der zugehörigen Verkehrsszenarien berechnet (siehe Tabelle 57).

1.3.2.12 Zusammenfassung für Modellstadt 2

Abbildung 17: Ergebnisse für *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* für Modellstadt 2

Die wichtigsten Ergebnisse für Modellstadt 2 sind in Abbildung 17 zusammengefasst. Die Diagramme zeigen die Werte für *zusätzliche Reisezeit* und *zusätzliche Betriebskosten* für jede Station, wobei für Station 1 sowohl die Ergebnisse des modellgestützten als auch die des vereinfachten Ansatzes dargestellt sind.

Offensichtlich führt auch bei Modellstadt 2 das Überflutungsszenario bei allen Stationen zur größten Zunahme der Reisezeit der ÖV-Nutzer. Wie bereits in Abschnitt 1.3.2.9.4 festgestellt wurde, unterschätzt der vereinfachte Ansatz die Wirkungen für Station 1, da er die Wirkungen auf benachbarte Stationen nicht explizit berücksichtigt (Im Überflutungsszenario können insgesamt 10 Stationen der Y-Linie nicht bedient werden).

Ein Vergleich der Werte von Station 2 und Station 3 für zusätzliche Reisezeit zeigt bei allen Szenarien höhere Werte für Station 3, was auf die höheren Passagierzahlen der Y-Linie zurückzuführen ist.

Da ein Ereignis in Station 1 sowohl die X- als auch die Y-Linie betrifft, während bei den Stationen 2 und 3 nur jeweils eine Linie direkt betroffen ist, war vor Durchführung der Berechnungen erwartet worden, dass die *zusätzlichen Reisezeiten* bei Station 1 immer am höchsten liegen würden. Im Gegensatz zu dieser Erwartung zeigt Abbildung 17, dass sich die Ergebnisse des vereinfachten Ansatzes für Station 1 und 3 nicht wesentlich unterscheiden. Das liegt daran, dass in den relevanten Bedrohungsszenarien (Explosion,

Feuer und Überflutung) angenommen wurde, dass in Station 1 hauptsächlich der Tunnel der Y-Linie betroffen ist und nur geringfügige Auswirkungen auf die X-Linie auftreten. Außerdem sind die Wirkungen vergleichbarer Ereignisse in Station 1 und Station 3 auf die Y-Linie nahezu identisch, da aufgrund der Lage auch jeweils dieselben Teile der Linienroute der Y-Linie betroffen sind. Dies spiegelt sich auch in den identischen *zusätzlichen Betriebskosten* für die Überflutungsszenarien von Station 1 und Station 3 wider.

Insgesamt zeigt dieses Ergebnis, dass es wichtig ist, je Bedrohung mehrere Bedrohungsszenarien zu betrachten, um möglichst viele unterschiedliche Wirkungen zu erfassen.

1.3.3 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel 1.3 wurde die in Kapitel 5.2 beschriebene Methodik zur Ableitung kritischer Stationen und zur Berechnung von Indikatoren, die eine Beurteilung der Verwundbarkeit von Stationen aus operationeller Sicht ermöglichen, auf zwei Städte mit vergleichsweise großen unterirdischen Netzen angewandt.

Die Vorfilterkriterien zur Ableitung potentiell kritischer unterirdischer Stationen konnten mit geringem Aufwand berechnet und angewendet werden und führten für beide Städte zu nachvollziehbaren, plausiblen Ergebnissen.

Auch die Anwendung des modellbasierten Ansatzes zur Berechnung von Bewertungsindikatoren führte innerhalb der Grenzen der verwendeten Modelle zu guten Ergebnissen. Das bedeutet zum Beispiel, dass die Auswirkungen auf den Modal Split nicht modelliert werden können, wenn das Verkehrsmodell den Individualverkehr nicht einbezieht. Andere, grundlegendere Einschränkungen betreffen extreme Effekte wie die Unterbrechung des Verkehrs auf einer Linie oder im gesamten Netz, die in einem Verkehrsmodell ggf. überhaupt nicht berechenbar sind und daher anders bewertet werden müssen, etwa durch die Verwendung von Standardwerten oder in qualitativer Form.

Ein großer Vorteil des modellbasierten Ansatzes besteht darin, dass netzweite Effekte durch den Wechsel von Fahrgästen auf alternative Routen oder Linien berechnet und visualisiert werden können. Dies ermöglicht z. B. die Überprüfung von Auslastungsgraden und die angemessene Dimensionierung von Schienenersatzverkehren.

Der vereinfachte Ansatz kann angewendet werden, wenn hauptsächlich lokale Effekte zu erwarten sind und es daher ausreicht, das lokale Netz zu berücksichtigen. Obwohl der vereinfachte Ansatz mit den Szenarien von Modellstadt 1 gut funktioniert hat, wird empfohlen, wenn möglich den modellbasierten Ansatz zu verwenden. In Abhängigkeit von den Stations- und Netzeigenschaften kann der vereinfachte Ansatz sowohl zu einer Unter- als auch zu einer Überschätzung der zusätzlichen Reisezeiten führen.

Während beide Ansätze zu konsistenten Ergebnissen in Bezug auf die Reisezeit führten, gab es erhebliche Unterschiede bei den Betriebskosten. Es muss daher sorgfältig geprüft werden, ob die kalkulierten Kosteneinsparungen realisiert werden können und ob die angenommenen Schienenersatzverkehre und damit die errechneten Mehrkosten realistisch sind.

Abschließend möchten wir darauf hinweisen, dass für die Beispielanwendung zwar nur ein Szenario pro Bedrohung in Betracht gezogen wurde, dass es für eine fundierte Kritikalitätsanalyse aber in der Regel notwendig ist, je Bedrohung mehrere Szenarien zu untersuchen, um die Bandbreite der möglichen Folgen zu berücksichtigen.

1.4 Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs zur Gewährleistung eines temporären Verkehrsangebots

Ein weiteres Ziel des Vorhabens bestand in der Erarbeitung und Bereitstellung eines Maßnahmenkatalogs zur Gewährleistung eines temporären Verkehrsangebots während des Zeitraums nach Eintritt eines Schadensereignisses bis zur Rückkehr des ÖPNV zum Normalbetrieb. Damit soll ÖPNV-Unternehmen und Kommunen eine Zusammenstellung generell geeigneter Maßnahmen zur Verfügung gestellt werden, auf deren Basis konkrete Alternativangebote für einzelne Städte erarbeitet werden können.

Dabei sollen die drei Säulen Betrieb, Bauwerke und Nutzer berücksichtigt werden. Der Fokus von PTV lag auf der betrieblichen Ebene, wobei insbesondere auch die sogenannten neuen Mobilitätsformen (Sharing-Angebote des Rad- und Pkw-Verkehrs) betrachtet wurden. Die Beschreibung der Maßnahmen geht dabei auch auf Randbedingungen (Platzverhältnisse, Auslastung anderer Verkehrsmittel und -träger im ungestörten Betriebszustand, Nutzerverhalten etc.) ein, die bei der konkreten Ausgestaltung derartiger Maßnahmen zu beachten sind.

1.4.1 Bereitstellung von Word und Excel-Vorlagen

Um eine homogene Bearbeitung des Maßnahmenkatalogs innerhalb der drei Arbeitspakete Betrieb, Bauwerk und Nutzer zu gewährleisten, wurden von PTV eine Word- und ein Excel-Vorlage bereitgestellt. Um den Export von Excel zu Word zu vereinfachen wurde auch ein Exporter in Form eines Excel-VBA-Makros zur Verfügung gestellt.

1.4.1.1 Die Word-Vorlage

Die Word-Vorlage wurde von allen Arbeitspaketen verwendet, um in den Berichten eine einheitliche Darstellung der Maßnahmen zu gewährleisten.

1 Description of measures

Table 1: Measure no. 0001



Measure	Enter <u>text here</u>			
Resilience stage	<input type="checkbox"/> Prepare	<input type="checkbox"/> Prevent	<input type="checkbox"/> Respond	<input type="checkbox"/> Recover
Effect on	<input type="checkbox"/> Operational resilience	<input type="checkbox"/> Structural resilience	<input type="checkbox"/> User-related resilience	
Type of measure	<input type="checkbox"/> Organisational	<input type="checkbox"/> Staff-related	<input type="checkbox"/> Technical	
Protection against ¹ (Status)	<input type="checkbox"/> <u>Bombing</u> (Enter status)	<input type="checkbox"/> NRBC (Enter status)	<input type="checkbox"/> <u>Mass shooting</u> (Enter status)	
	<input type="checkbox"/> <u>Fire</u> (Enter status)	<input type="checkbox"/> <u>Collision</u> (Enter status)	<input type="checkbox"/> <u>Technical failure</u> (Enter status)	
	<input type="checkbox"/> Hoax (Enter status)	<input type="checkbox"/> <u>Natural disaster</u> (Enter status)		
Status ²	Common use	Available	Research & development	
Abbreviation	CU <u>n.k.</u> ; not known	AV	RD	
Unit chosen for the investment, operational and maintenance costs	Enter text here			
Investment costs	Material costs:		Enter text here €/unit	
	Personnel costs:		Enter text here PM/unit	
Average lifetime	Enter text here a/unit			
Operational costs	Material costs:		Enter text here €/year/unit	

¹ If varying: Insert abbreviation of status in brackets (e.g. Bombing (AV), NRBC (RD), Mass shooting (AV) etc.)

² „Status“ means actual implementation in practice.

Maintenance costs	Personnel costs:	Enter text here PM/year/unit
	Material costs:	Enter text here €/year/unit
	Personnel costs:	Enter text here PM/year/unit
Description ³	<u>Current status:</u>	
	Enter text here	
	Further development in U-THREAT:	
Annex ⁴	Enter <u>text here</u>	
	Enter <u>text here</u>	

Abbildung 19: Word-Vorlage – Seite 2

1.4.1.2 Die Excel-Vorlage mit VBA-Makro

Die Word-Vorlage ist für Berichte gut geeignet, einfacher und übersichtlicher ist jedoch die Eingabe als Tabelle. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine Excel-Arbeitsmappe vorbereitet, die dieselben Felder wie die Word-Vorlage enthält.

Um die Felder automatisch von Excel nach Word zu exportieren, wurde von PTV ein Excel-VBA-Makro entwickelt. Die Schaltfläche „Export Table“ (siehe Abbildung 20) startet das Makro und bewirkt, dass alle Maßnahmen in die Word-Vorlage exportiert werden. So konnten bei der Berichterstellung Zeit gespart und Übertragungsfehler vermieden werden.

1.4.2 Beiträge zum Maßnahmenkatalog

Im Rahmen von Arbeitspaket 3 wurden von den Partnern gemeinsam die folgenden Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz vorgeschlagen:

- App zur Verbesserung der internen Kommunikation im Krisenfall
- Entwicklung eines Krisenhandbuchs
- Verbesserung der Zugerennung im Netz
- Ausreichende Weichen und Wendemöglichkeiten
- Qualifikation der Mitarbeiter
- Verträge mit Dritten zur Mobilisierung von Personal
- Zug-Zug-Kommunikation
- Automatisierte Erzeugung von Notfallfahrplänen
- Automatisierter Übergang zu Notfallfahrplänen
- Fahrerwechsel an Endhaltestellen
- Kooperation mit „verbundenen“ Fahrradverleihsystemen
- Kooperation mit Carsharing-Anbietern
- Vor-Priorisierung von Linien und Netzabschnitten

Die Maßnahmen und die Randbedingungen für einen sinnvollen Einsatz werden im Einzelnen im Deliverable [UT20-5] beschrieben. PTV erarbeitete dabei die Maßnahmen „Kooperation mit ‚verbundenen‘ Fahrradverleihsystemen“, „Kooperation mit Carsharing-Anbietern“ und „Vor-Priorisierung von Linien und Netzabschnitten“, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

1.4.2.1 Kooperation mit „verbundenen“ Fahrradverleihsystemen

Das Ziel einer Kooperation mit Fahrradverleihsystemen besteht darin, den Fahrgästen im Falle des Ausfalls einer Station die Möglichkeit anbieten zu können, zu einer in der Nähe liegenden Station zu gelangen. Die Einrichtung von Leihstationen in oder in der Nähe von U-Bahn-Stationen stellt die Sichtbarkeit des Angebotes im Normalbetrieb sicher.

Der Vertrag mit dem Anbieter sollte die Pflicht zur Bereitstellung zusätzlicher Räder im Falle des Ausfalls der jeweiligen Station beinhalten. Entsprechende Vereinbarungen könnten auch mit stationslos arbeitenden Anbietern oder den Anbietern von E-Scootern getroffen werden.

Alle derartigen Angebote sollten als Teil des ÖV-Angebots in ÖV-Apps und das Tarifsysteem eingebunden sein, um die Resilienz des Gesamtsystems zu verbessern.

1.4.2.2 Kooperation mit Carsharing-Anbietern

Die Einrichtung von Carsharing-Stationen in der Nähe von U-Bahn-Stationen und die Kooperation mit free-floating Carsharing-Anbietern, deren Fahrzeuge den ÖV-Nutzern zur Verfügung stehen, trägt dazu bei, im Falle des Ausfalls einer Station den Fahrgästen ein Transportmittel zur Verfügung zu stellen.

Alle derartigen Angebote sollten als Teil des ÖV-Systems in ÖV-Apps und das Tarifsysteem eingebunden sein. Ggf. werden ÖV-Nutzern vergünstigte Preise angeboten.

1.4.2.3 Vor-Priorisierung von Linien und Netzabschnitten

Es ist sinnvoll, dass ÖV-Betreiber bereits vor Eintreten einer Krise eine Bewertung der Wichtigkeit von Linien und Netzabschnitten vornehmen, da dies schnelle und informierte Entscheidungen im Falle ungeplanter Ereignisse ermöglicht.

Eine solche Vor-Priorisierung kann beispielsweise auf Basis der Anzahl der Fahrgäste, der Anzahl von Fahrten, der Existenz von alternativen Linien bzw. Verbindungen oder der Wichtigkeit bestimmter Stationen erfolgen und software-basiert automatisiert durchgeführt werden. Sie stellt einen wichtigen Beitrag zur schnellen Aufnahme eines eingeschränkten Betriebs nach einem Schadensereignis dar.

Der Vorgang der Priorisierung von Linien weist Ähnlichkeiten zum Prozess zur Ableitung kritischer Stationen dar, der in Kapitel 1.2 „Methodik zur Ermittlung“ des vorliegenden Berichts beschrieben wurde.

2 Relevante Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 58: Relevante Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position	Betrag [€] gemäß Nachkalkulation
Personalkosten	200.825,04
Reisekosten	9534,90

3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

3.1 Nutzen

Mit der entwickelten und softwareseitig demonstratorhaft umgesetzten Methodik liegt erstmals ein Verfahren vor, mit dem die betriebliche Vulnerabilität der Stationen des öffentlichen Verkehrs ermittelt werden kann. Darüber hinaus ist das Verfahren in ein Gesamtkonzept zur Vulnerabilitätsanalyse eingebettet, in dem neben den betrieblichen auch nutzerseitige und bauliche Aspekte der Vulnerabilität berücksichtigt werden.

Durch die Anwendbarkeit des Verfahrens könnten mittelfristig unterirdische ÖV-Netze deutscher Städte einer entsprechenden Analyse zugeführt werden. Die so identifizierten vulnerablen Stationen können durch wirksame Maßnahmen, die im Zuge des Teilvorhabens der PTV und der Teilvorhaben der Projektpartner von U-THREAT identifiziert wurden, geschützt werden.

3.2 Verwertbarkeit

Tabelle 59: Verwertungsabsichten

Verwertbare Projektergebnisse	Zeithorizont der Verwertung
Der in U-THREAT entwickelte Ansatz zur Abbildung von Störungen und der spezifischen Modifizierung des ÖV-Angebots wird projektspezifisch weiterentwickelt. Die weiterentwickelten Ansätze werden in Beratungsprojekten zum Einsatz kommen, sofern Nachfrage nach derartigen Leistungen besteht.	bis 2023
Gewonnene Erkenntnisse zu Bewertungsfragen und Maßnahmen werden in laufende Beratungsprojekte zur Resilienz von Verkehrsinfrastrukturen einfließen.	bis 2022
Bei entsprechender Nachfrage werden die in U-THREAT entwickelten Ansätze zur Ermittlung der betrieblichen Vulnerabilität bzw. verkehrlichen Kritikalität von ÖV-Stationen weiterentwickelt. Aufbauend auf diesen Weiterentwicklungen werden Beratungsleistungen angeboten. Dieses Angebot versetzt Verkehrsunternehmen als Betreiber vor dem Hintergrund knapper Budgets in die Lage, die kritischsten Bereiche der Verkehrsinfrastruktur gezielt mit Hilfe geeigneter Maßnahmen zu schützen.	bis 2023

4 Bekannt gewordener Fortschritt

Hinsichtlich Verfahren zur Identifizierung vulnerabler bzw. kritischer U-Bahn-Stationen sind während der Projektlaufzeit keine neuen Erkenntnisse bekannt geworden.

Mit Bezug zu generellen Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung ist kurz vor Beginn der Projektlaufzeit insbesondere das weiterentwickelte Verfahren der „Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr“ [BU 16] publiziert worden. Relevante Teilaspekte dieses Verfahrens sind in U-THREAT berücksichtigt und in die Methodik zur Identifizierung vulnerabler bzw. kritischer U-Bahn-Stationen aufgenommen worden. Dies betraf insbesondere Aspekte zur Berechnung der Betriebskosten.

5 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projektes gewonnenen neuen Erkenntnisse werden als Grundlage in fachliche Veröffentlichungen der PTV AG einfließen. Da es sich bei den behandelten Fragestellungen um sicherheitsrelevante Themen handelt, ist insbesondere die Veröffentlichung beispielbezogener Ergebnisse ausgeschlossen. Bisher wurden Ergebnisse des Teilvorhabens durch folgende Aktivitäten veröffentlicht:

5.1 Vorträge

Dahl, A., Erkennen wo es wenn hakt – Integrierte Anwendung von Verkehrsmodellen, Seminar Workshop: Verfügbarkeit des ÖPNVs in Krisenlagen, 9. April 2019, Düsseldorf, Deutschland

Fléchon, C., Stratégie de report du trafic, Présentation des résultats du projet franco-allemand U-THREAT, 29 Septembre 2020, Bron, Frankreich

Fléchon C., Manuel de Crise, Présentation des résultats du projet franco-allemand U-THREAT, 29 Septembre 2020, Bron, Frankreich

5.2 Publikationen

Vollmann, G., Thienert, C., Dahl, A.; (2019) Gefährdungs- und Widerstandsanalysen für U-Bahn Systeme - Methodische Ansätze der Stationsbewertung, exemplarische Anwendung, Einsatzmöglichkeiten für Tunnelbetreiber, erschienen in Forschung + Praxis 53, Tagungsband der STUVA-Tagung 2019 in Frankfurt am Main

Vollmann, G., Willmann, C., Thienert, C., Bevillard, J.-B., Dahl, A.; (2019): Vulnerability and resilience analysis for urban metro systems - methods and approaches of structured assessments 9th International Symposium on Tunnel Safety and Security, May 5th-7th, Stockholm, Sweden.

6 Literaturverzeichnis

- [BU16] Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (2016), Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr, 2016
- [EC08] Europäische Kommission. Richtlinie 2008/114/EG – Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern.
- [ER10] Erath, Alex: Assessing Network Vulnerability Using the Logsum Measure, 12th World Conference of Transport Research, Lisbon: 2010
- [SE12] SeRoN-Consortium: Deliverable 400 - Importance of the structures for the traffic network, 2012
- [SK13] SKRIBT-Konsortium: Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Verkehrsbezogene Objektanalyse, 2013
- [SK14] SKRIBT^{Plus}-Konsortium: Verbundprojekt SKRIBT^{Plus} - Schutz kritischer Brücken und Tunnel, AP 6 Modellsystem Wirksamkeiten – Kritikalitätsverfahren, 2014
- [UT18] U-THREAT consortium (2018), Analysis of past incidents and possible threats, deliverable D1.1 of the research project Underground Transport Hub Resilience to Ensure Availability and Tackle Danger (U-THREAT), 2018
- [UT20-1] U-THREAT consortium (2020), Methodology and scale for analyzing the vulnerability of underground mass transport systems on station/hub/tunnel, line and network level - Introduction and Qualitative Vulnerability Analysis (Steps 1 and 4), deliverable D2.1-1 of the research project Underground Transport Hub Resilience to Ensure Availability and Tackle Danger (U-THREAT), 2020
- [UT20-2] U-THREAT consortium (2020), Methodology and scale for analyzing the vulnerability of underground mass transport systems on station/hub/tunnel, line and network level – Indicators definition and assessment (Step 2), deliverable D2.1-2 of the research project Underground Transport Hub Resilience to Ensure Availability and Tackle Danger (U-THREAT), 2020
- [UT20-3] U-THREAT consortium (2020), Methodology and scale for analyzing the vulnerability of underground mass transport systems on station/hub/tunnel, line and network level - Risk classification (Step 3), deliverable D2.1-3 of the research project Underground Transport Hub Resilience to Ensure Availability and Tackle Danger (U-THREAT), 2020
- [UT20-4] U-THREAT consortium (2020), Methodology for deriving critical stations and hubs in terms of vulnerability, Deliverable D3.1.3 of the research project Underground Transport Hub Resilience to Ensure Availability and Tackle Danger (U-THREAT), 2020
- [UT20-5] U-THREAT consortium (2020), Measures for enhancement of operational resilience, Deliverable D3.4.2 of the research project Underground Transport Hub Resilience to Ensure Availability and Tackle Danger (U-THREAT), 2020