

Abschlussbericht Verbundprojekt HADU



Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund

**Evaluation des Untergrunds der Metropolregion Hamburg
basierend auf der
Analyse und der Modellierung
gegenwärtiger geologischer Strukturen und deren Dynamik**

gefördert durch das BMBF
im Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN

Forschungsvorhaben: 03G0621A und 03G0621B

Zusammenstellung des Berichts: Prof. Dr. Claus-Dieter Reuther¹⁾,
Prof. Dr. Torsten Dahm¹⁾ und Dr. Matthias Ohrnberger²⁾

Zusammenstellung des Anhangs Informatik:
Prof. Dr. D.P.F Möller¹⁾ und Dr. J. Wittmann¹⁾

(1) Universität Hamburg FKZ 03G0621A. (2) Universität Potsdam FKZ 03G0621B

HADU Verbundpartner



Geologisch-Paläontologisches Institut u. Museum,
Universität Hamburg
Bundesstrasse 55, 20146 Hamburg, Germany



Institut für Geophysik, *ZMAW*
Universität Hamburg, Bundesstr. 55
20146 Hamburg, Germany



Institut f. Geowissenschaften Universität
Potsdam, Postfach 601553 14415 Potsdam,
Germany



Informatik, Universität Hamburg
Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme
Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg, Germany

HADU Kooperationspartner



Geologisches Landesamt Hamburg
Behörde für Stadtentwicklung und
Umwelt:

Geologische Karten und Bohrdaten der
Stadt Hamburg



Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Fein-Nivellements und seismisches
Monitoring

Inhalt	Seite
1. Kurzdarstellung des Projekts	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	2
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
2. Eingehende Darstellung des Projektes	5
2.1. Erzielte Ergebnisse	5
2.1.1 Verbundpartner GEOLOGIE	5
Senkungsbereiche im Hamburger Stadtgebiet: Lokalisierung, Klassifizierung und Alter der Strukturen	5
Geologie der Metropolregion Hamburg	5
Charakterisierung und Morphologie des Salzstockdaches des Othmarschen-Langenfelde Diapirs	7
Hinweise auf Subrosionserscheinungen im Untersuchungsgebiet	8
Der Othmarschen-Langenfelde Diapir (OLD) und die zeitliche Entwicklung der Salzstrukturen im Raum Hamburg	8
Senkungsstrukturen im Hamburger Stadtgebiet	10
Übersicht zu den Erdfalltypen und ihrer Entstehung	12
Ausgewählte Beispiele zu Erdfällen im Hamburger Stadtgebiet	14
Ergebnisse aus Bohrdaten (Höhenmodelle / Tiefenlagen der Sedimente)	35
Die Entwicklung der Bahrenfelder Senke	41
2.1.2 Verbundpartner GEOPHYSIK	45
Die Entwicklung eines Array Mess- und Analyse Verfahrens (WARAN)	45
Kombinierte geophysikalische Messungen in HADU	48
Hammerschlagseismik	49
Mikrogravimetrie	49
Ambient Vibration Messungen	50

2.1.3 Literaturverzeichnis	52
2.1.3 Erfolgskontrollbericht	54
2.1.4 Vertraulichkeit	59

**Anhang: Abschlussbericht Verbundpartner Informatik
einschließlich Erfolgskontrollbericht Informatik (36 Seiten)**

1. Kurzdarstellung des Projekts

1.1 Aufgabenstellung

Anlass der Untersuchungen zur Dynamik des geologischen Untergrunds der Metropolregion Hamburg waren im Stadtgebiet vorkommende, mit Torfen und Sanden verfüllte, schüsselförmige Bereiche, die durch unterschiedlich starke bis plötzliche Absenkungen entstanden sind. Einige dieser Senkungsstrukturen sind mit Wasser verfüllt und bilden so kleine Seen und Sumpfgebiete in den nicht bebauten Hamburger Parks. Andere mit Torf verfüllte Senken sind überbaut. Aus Aufzeichnungen, die mehr als 200 Jahre zurückreichen, ist bekannt, dass es in Hamburg in bestimmten Stadtteilen immer wieder zu einem - manchmal sehr heftigen - Absinken der Erdoberfläche kommt. Dagegen sind in anderen Stadtteilen nur sehr geringe Absenkungen zu verzeichnen. Als Ursache für die Absenkungen kommen Auslaugungen und Verkarstungserscheinungen im Dachbereich eines Salzdiapirs infrage. Hier kann eine lösungsbedingte Hohlrumbauebildung zur Erdfallbildung führen. Die Metropolregion Hamburg wird von vier Salzdiapiren unterlagert. Drei davon blieben in mehreren hundert m Tiefe stecken; jedoch der Othmarschen-Langenfelde Diapir reicht im Bezirk Altona bis nahe unter die Erdoberfläche.

Aufgaben und Ziele der vorwiegend geologisch/geophysikalischen Arbeiten waren: (a) die Identifizierung und Klassifizierung flacher und tiefer Untergrundstrukturen im bebauten Stadtgebiet. Dazu gehört die Klärung der Ursachen für die an der Erdoberfläche auftretenden Senkungsstrukturen und die Kenntnis über das Alter dieser Bereiche sowie die Erfassung der Form des in der Tiefe liegenden Othmarschen-Langenfelde Diapirs mit der verdeckten Morphologie seiner Dachregion. (b) 2- und 3-D Modellierungen der geologischen Strukturen in verschiedenen Maßstäben (Senken und Salzstockoberfläche sowie die Tiefenstruktur des gesamten Salzstocks), (c) die Entwicklung und Anpassung neuartiger geophysikalischer Erkundungsmethoden (Ambient Vibrations) auf die Fragestellung eines oberflächennahen Salzstocks, und (d) die Darstellung möglicher mit dem Salzstock oder anderen Ursachen in Verbindung stehender Geofahren.

Hinweis: Die Daten wurden mit den dem Projekt zur Verfügung stehenden modernen Geräten gewonnen und nach bestem Wissen und Gewissen geologisch interpretiert. Aus wissenschaftlicher Sicht geben die Ergebnisse der vorgenommenen Untersuchungen Hinweise auf mögliche Gefährdungstatbestände. Der Bericht wird gleichzeitig mit der Abgabe an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) an das Bezirksamt Altona (Dezernat Wirtschaft, Bauen und Umwelt), das Bezirksamt Eimsbüttel (Dezernat Wirtschaft, Bauen und Umwelt) sowie an das Geologische Landesamt (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt) der Freien und Hansestadt Hamburg übergeben, mit der Bitte verwaltungsseitig zu prüfen, ob sich hinsichtlich der Forschungsergebnisse ein Handlungsbedarf ergibt.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das interdisziplinäre Zusammenwirken zwischen Geologen und Geophysikern der Universitäten Hamburg und Potsdam ermöglicht die Interpretation der Strukturen des geologischen Untergrunds der Metropolregion Hamburg (Bezirke Altona und Eimsbüttel) in verschiedenen Skalenbereichen und erlaubt Rückschlüsse von den an der Oberfläche analysierten Strukturen auf die Dynamik im tieferen Untergrund - und umgekehrt gibt die Modellierung der Salzstockoberfläche Hinweise und Erklärungen für das Vorkommen und die Anordnung von Erdfällen im entsprechenden Stadtgebiet. Die Datenverarbeitung der einzelnen Verbundpartner des HADU-Projektes wurden im Rahmen der Zusammenarbeit auf der Ebene der Dateninterpretation vorgenommen.

An dem Projekt waren folgende Verbundpartner / Arbeitsgruppen beteiligt: Institut für Geologie, Universität Hamburg (Prof. Dr. C.-D. Reuther, Dipl.-Geol. N. Buurman, Dipl.-Geol. S. Reiss, Vergabe von drei zeitlich eng begrenzten Werkverträgen zur Durchführung von Georadarmmessungen und Datierungen - Von den wissenschaftlichen Mitarbeitern war Herr Reis in der Anfangsphase vom 01.07.2005 bis 31.12.2005 (BAT IIA) im Projekt beschäftigt. Vom 16.05.2005 war Herr Buurman mit einer halben BAT IIA Stelle als einziger wiss. Mitarbeiter im Projektbereich Geologie bis zum Ende der Laufzeit des Projekts beschäftigt; Institut für Geophysik, Universität Hamburg (Prof. Dr. T. Dahm, Dr. A. Deghani, Frau Dipl.-Geophys. M. Miensopust 01.08.2005 - 31.08.2005 BAT IIA/2, Herr Dipl.-Geophys. J. Reinhard 01.10.2005 - 31.10.05 31.12.2005 BAT IIA und Frau Dr. D. Kühn 01.11.2005 - 30.09.2007 BAT IIA), Institut f. Geowissenschaften, Universität Potsdam (Prof. Dr. F. Scherbaum, Dr. M. Ohrnberger, Dipl.-Ing. D. Vollmer); Institut für Technische Informationssysteme, Universität Hamburg (Prof. Dr. D.P.F. Möller. Der wiss. Mitarbeiter Dr. J. Wittmann war nach anfänglichen Personalproblemen im Projektbereich Informatik auf einer vollen Stelle seit 01.10.05 bis zum Ende der Projektlaufzeit im Projekt tätig, s.a. Zwischenbericht 2005).

Die für die Aufgaben des Projektes ungewöhnlich knappen Personalmittel wurden während der Begutachtung so festgelegt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Planung der Beiträge der Verbundpartner wurden zu Beginn des Projekts Zeitpläne aufgestellt in denen für die Durchführungen der Arbeiten Meilensteine festgelegt wurden. Unter Einhaltung dieser Zeitpläne und Vorgaben wurden die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse während der Laufzeit des Projekts in jährlichen Zwischenberichten dargelegt sowie bei *kick-off meetings* und Statusseminaren in Hannover (September 2005), Freiberg (September 2006), Schwanau (Januar 2007), Hamburg (November 2007) und in Braunschweig (Dezember 2008) präsentiert. Die geologischen Untersuchungen (Verbundpartner Geologie) erfolgten überwiegend im Rahmen der Dissertation von Herrn Dipl. Geol. Nils Buurman, die nach dem Ende der Beschäftigung im Projekt und parallel zur jetzigen Tätigkeit von Herrn Burmann bei der DEA im Laufe des Jahrs 2009 abgeschlossen werden soll. Ein Problem in der Endphase des Geophysik-Projektes entstand durch die verkürzte Förderung der Personalstelle im Bereich der Geophysik, was eine weiterführende Auswertung der geophysikalischen Daten und eine vertiefende interdisziplinäre Auswertung mit dem Geologie-Projekt stark erschwerte. Die Hauptziele des Antrags wurden durch den großen Einsatz aller Beteiligten erreicht.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Bei den unterschiedlichen Ansätzen der Verbundpartner zum Gesamtthema wurde hinsichtlich der Anwendung des Georadarverfahrens beim Verbundpartner Geologie auf eigenen Erfahrungen und Arbeiten bezüglich tektonischer und sedimentärer Strukturen im oberflächennahen, verdeckten Untergrund aufgebaut. Bei der Durchführung des Vorhabens kamen folgende Geräte zum Einsatz: Georadar GSSI Sir 3000 (Geophysical Survey Systems., Inc.) mit Antennen für den 100 MHz und 200 MHz Bereich bei max. Eindringtiefen von 20 m, respektive 5 m. Zur Ergänzung der Georadaruntersuchungen wurden lokal auch geoelektrischen Untersuchungen mit der Anlage SYSCAL Junior durchgeführt die über 48 (Multi-) Elektroden verfügt durchgeführt. Hier wurden Eindringtiefen bis 34 m erreicht. Das Geologische Landesamt Hamburg (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg) stellte dem umfangreiche Bohrdaten zur Verfügung, die im Projekt weiter ausgewertet und interpretiert wurden. Die Strukturerrfassung des verdeckten flachen Untergrunds mit dem Georadarverfahren erfolgt zerstörungsfrei da keine Aufgrabungen nötig sind. Bei dem Verfahren wird der Untergrund mit elektromagnetischen Wellen abgetastet. Die von den Antennen ausgesandte Signale werden im Untergrund an Diskontinuitäten bzw. Objekten aufgrund deren unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften reflektiert und an der Oberfläche wieder empfangen. Das Messergebnis ist bereits vor Ort im Radargramm sichtbar. Die Messdaten werden mit Spezialprogrammen weiter prozessiert und aus dem Wellenbild werden Tiefenlage und Art der Strukturen ermittelt. Aus mehreren parallelen Radarprofilen werden schließlich 3D-Darstellungen der Untergrundsstrukturierung erzeugt. Über das Vorkommen, die Strukturierung und die Mechanismen sowie die Entwicklung und das Alter der Absenkungs- und Einbruchsstrukturen in Hamburg lagen zu Beginn des Projekts noch keine bzw. nur spärliche Daten vor.

Als komplementäres Untersuchungsverfahren für die tieferen Strukturen wurden im Projekt von den Verbundpartnern Geophysik Hamburg und Potsdam Messungen der seismischen Bodenunruhe durchgeführt (*ambient seismic vibrations technologies*). Ausschlaggebend bei dieser Methode sind die unterschiedlichen elastischen Eigenschaften und Dichten des geologischen Untergrunds. Bei dem Verfahren macht man sich die Großstadt bedingten „Erschütterungen“ durch den Strassen- und Bahnverkehr und/oder Industriebetriebe usw. zu Nutze. Die durch den „Großstadt-Noise“ verursachten Oberflächenwellen (Rayleigh Wellen) werden in ihrer Ausbreitung durch die lokalen geologischen Strukturen im Untergrund beeinflusst. Die sich elliptisch ausbreitenden Rayleigh Wellen haben eine horizontale und eine vertikale Komponente. Die Phasengeschwindigkeit hängt von der Frequenz ab (Dispersion) ebenso das Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Komponente (H/V – Verhältnis = frequenzabhängige Elliptizität). Aus der Dispersion wie auch aus dem Verhältnis der Amplituden können eindimensionale Tiefenprofile der Scherwellengeschwindigkeit, der Kompressionswellengeschwindigkeit und der Dichte abgeleitet werden. Voraussetzung für die *ambient vibration* Methode ist ein genügend hoher Impedanzkontrast zwischen den unterschiedlichen Sedimenten bzw. den Strukturen im Untergrund. Am Institut für Geowissenschaften der Universität Potsdam und im Institut für Geophysik der Universität Hamburg wurde ein Mikroarray entwickelt und erprobt, welches eine nahezu echtzeitfähige vor Ort Analyse gestattet. Unter Hamburg lässt sich mit den H/V-Messungen die Tiefenlage des Scherwellengeschwindigkeitskontrasts zwischen Sediment und Salz ermitteln. Dazu werden H/V-Verhältnisse in Pseudotiefen umgerechnet und nach einer Kalibrierung mit Array- und Bohrdaten zur Abschätzung von wahren Tiefen verwendet. Zu Beginn des Vorhabens lagen Erfahrungen mit H/V und Arraymessungen vor, die bisher allerdings immer auf selbständig messende Einzelstationen beruhten, wobei die Daten nach dem Ablauf des Messtages im Labor beurteilt und prozessiert werden mussten, ohne Einfluss- oder Korrekturmöglichkeit auf die Messgeometrie. Es existierte kein System mit Echtzeit-Datenübertragung im Feld, so dass Messungen zeitaufwändig waren und nicht im Feld optimiert werden konnten. Weiterhin baute das Vorhaben der Geophysik auf Erfahrungen mit gravimetrischen und anderen oberflächennahen geophysikalischen Messungen und deren Interpretation auf. Ein Inversionsverfahren zur

Bestimmung der 3D Morphologie der Dachregion eines Salzstockes existierte nicht und wurde während des Projektes entwickelt.

Der Verbundpartner Technische Informationssysteme brachte seine methodischen Kenntnisse zur Datenhaltung und zu Auswerteverfahren aus verschiedenen vorausgegangen Projekten ein. Die anfängliche Zielsetzung, die zur Verwaltung der Projektdaten eine Datenbank im klassischen Sinne vorgesehen hatte, wurde einem flexibleren Datenmodell angepasst, das die erhobenen Daten für die einzelnen Verbundpartner separat verwaltet und einen einfachen Zugriff auf die Daten der Projektpartner ermöglicht. Der Fokus wurde auf die Konsistenz und Reproduzierbarkeit der aus den Daten abgeleiteten Analyseergebnisse gelegt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der gesamten Projektlaufzeit bestand eine sehr enge Kooperation mit dem Geologischen Landesamt Hamburg (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg) sowie mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg bei Nivellements, seismischem Monitoring und Bereitstellung von Spezialkarten.

- leere Seite -

2. Eingehende Darstellung des Projektes

2.1. Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Verbundpartner GEOLOGIE

Senkungsbereiche im Hamburger Stadtgebiet: Lokalisierung, Klassifizierung und Alter der Strukturen

Der erste Teil dieses Berichts beruht überwiegend auf den vorläufigen Kapiteln der Dissertation von Dipl.-Geol. Nils Buurman (Buurman 2009). Dieser hat im 2. und 3. Projektjahr als einziger wissenschaftlicher Mitarbeiter auf der als „halbe Stelle“ bewilligten Projekt-Position sowohl die Feldarbeiten als auch deren Auswertung und Interpretation der Georadardaten sowie der Bohrungen (bis auf Datierungsbohrungen) vorgenommen. Die bisherigen Ausführungen von Herrn Buurman wurden vom Projektleiter Prof. Dr. C.-D. Reuther für diesen Bericht teilweise überarbeitet/gekürzt, in manchen Abschnitten auch vollständig übernommen.

Geologie der Metropolregion Hamburg

Geologisch liegt die Stadt Hamburg mit ihren ca. 2 Millionen Einwohnern in einem spät-tertiären Becken mit einer quartären und rezenten Sedimentbedeckung. Bei den oberflächennahen Ablagerungen handelt es sich um mehr oder weniger verfestigte glaziale, interglaziale und postglaziale Kiese, Sande, Tone und lokal vorkommende Torflinsen. Wie der gesamte norddeutsche Raum wird auch Hamburg von Salzdiapiren unterlagert. Diese sind aus Tiefen von ca. 5000 m aufgedrungen, haben dabei die überlagernden Schichten deformiert und reichen teilweise bis knapp unter die Oberfläche. Salzkavernen, die im oberen Teil des Diapirs durch unterirdische Salzauslaugung entstehen stellen akute Geogefahren dar, da diese entweder langsam zusammensacken oder plötzlich einstürzen können.

Unter der Metropolregion Hamburg kommen fünf Salzdiapire vor; vier sind in größeren Tiefen stecken geblieben: Reitbrook bei – 800 m unter NN, Geesthacht bei – 500 m unter NN, Meckelfeld bei – 450 m unter NN und Sottorf bei – 350 m unter NN. Der Othmarschen-Langenfelde Diapir dringt fast bis an die Oberfläche auf (Abb. 1) auf. Die Top-Region dieses Salzstockes liegt unter den Bezirken Altona und Eimsbüttel. Hier stieß man um 1900 auf den Gipshut, als dort im Stadtteil Stellingen in einer Ziegeleigrube Tone abgebaut wurden.

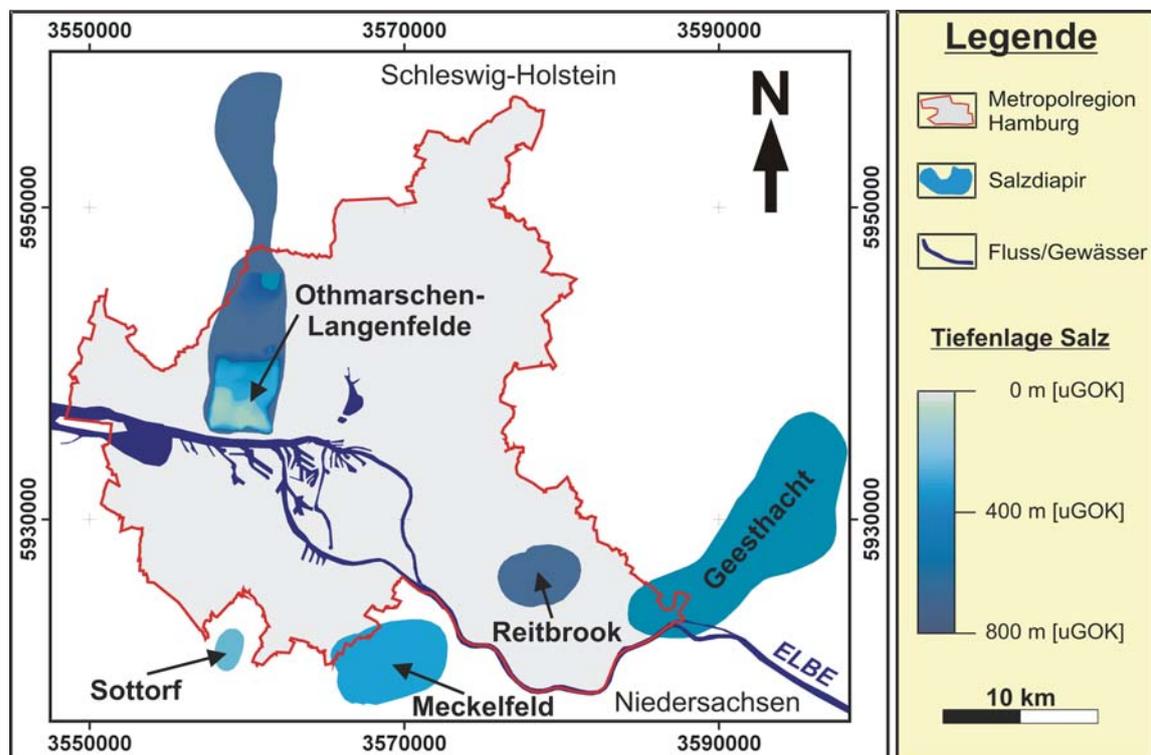


Abb. 1: Metropolregion Hamburg mit unterlagernden Salzdiapiren

Das unmittelbare Untersuchungsgebiet (Abb 2) liegt im Bezirk Altona der Freien- und Hansestadt Hamburg. Das Gebiet umfasst eine Fläche von ca. 10 km² und wird im SW von der Elbe bzw. dem Jenischpark (3557300/5935500), und im NE nahe des Winsbergring (3560600/5938500) begrenzt. Die Koordinaten beziehen sich auf das Gauß-Krüger System/Zone 3. Die Geländearbeiten wurden in den Stadtteilen Bahrenfeld, Groß Flottbek und Othmarschen durchgeführt.

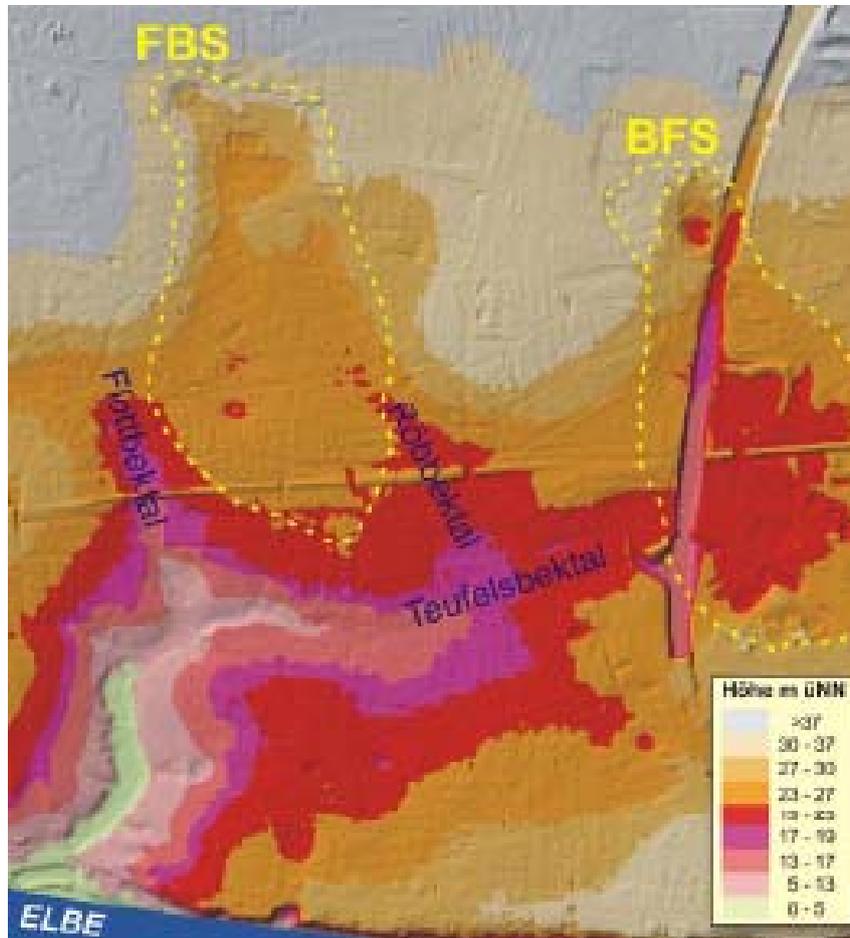


Abb. 2: Höhenmodell des Untersuchungsgebiets innerhalb der Metropolregion Hamburg mit Bachtälern und Bereichen von Großsenken: FBS Flottbeker Senke, BFS = Bahrenfelder Senke

Geomorphologie des Untersuchungsgebietes: Die Morphologie des bearbeiteten Geländes ist in Abb. 2 in einem Höhenmodell dargestellt das auf 125650 Höhenpunkten basiert. Die Daten dazu entstammen der digitalen Stadtgrundkarte, welche seit Mitte des Jahres 2001 für die Fläche der Freien und Hansestadt Hamburg vorliegt. Die Höhenmaxima erreichen im äußersten Norden des Arbeitsgebietes ca. 50 m üNN, die morphologisch tiefstgelegenen Bereiche im Flottbektal, im Jenischpark und am Elbstrand im Süden befinden sich bei ca. 1 m üNN. Die meisten Flächenanteile des Arbeitsgebietes liegen im Mittel zwischen 19 m und 29 m üNN. Die natürliche Geländeoberfläche ist, wie in einer Stadt zu erwarten, z.T. stark anthropogen überprägt.

Geologie des Arbeitsgebiets: Die nördlichsten Bereiche des Arbeitsgebietes sind durch das flächenhafte Auftreten von Schmelzwassersanden größerer Mächtigkeit und geringmächtigen Sanden über Geschiebelehm gekennzeichnet. Südlich davon erstreckt sich ein weites Gebiet aus Geschiebelehm, Schluff und Geschiebemergeln bis hin zum Elbhang im Süden. Diese Sedimente gehören in den Bereich einer Grundmoräne und sind, wie auch die Sande im Norden, Saaleeiszeitlichen Alters (ca. 230 000 – 130 000 Jahre). Innerhalb der Sande sowie auch in Bereichen bindiger Sedimente der Grundmoräne treten lokal Mudde- und Torfbildungen auf. Diese erscheinen entweder als zirkulare oder subzirkulare kleinräumige Ablagerungen innerhalb der großen Senkenbereiche in Flottbek und Bahrenfeld oder sie bilden eine flächenhafte Füllung innerhalb der zentralen Bereiche der Bahrenfelder Senke. Genetisch sind diese wohl Fluss- und Verschwämmungsablagerungen sowie durch Versumpfung oder Vermoorung entstandene biogene Sedimentfüllungen. Bis heute wurde noch keine flächendeckende Datierung dieser Verfüllungen vorgenommen. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass es sich sowohl um eemzeitliche (Zeitspanne vor ca. 126 000 bis 115 000 Jahren) als auch um Bildungen des Holozäns (jünger 10 000 Jahre) handelt. Ebenfalls finden sich innerhalb der bindigen Sedimente des Bereichs der

Grundmoräne lokale Ablagerungen von Schmelzwassersanden und Sanden über Geschiebelehm. Bei der Betrachtung aller kleinräumigen Torf- und Muddevorkommen sowie lokal auftretender Sande im Arbeitsgebiet fällt auf, dass deren geographische Verteilung entlang einer weitläufigen „U-Form“ ausgerichtet ist.

Im NE und E ist vereinzelt auch Geschiebelehm über Sanden abgelagert. Im äußersten Süden des Arbeitsgebietes kommen unterhalb des Elbhangs Talsande mit humosen Einlagerungen vor. Diese bilden einen schmalen Streifen entlang des Elbufers und sind, wie auch Flussablagerungen der Teufelsbek, holozänen Alters.

Charakterisierung und Morphologie des Salzstockdaches des OLD: Die geologischen Kompilationen (Buurman 2009) zeigen, dass zu Beginn der Hamburger Ton (HT) -Zeit im unteren Mittelmiozän der Aufstieg der zentralen Bereiche größer war als die Subrosion. Das Salzstocktop wies noch eine konvexe Wölbung auf. Seismische Profile der BGR zeigen, dass alle Schichten unterhalb der HT-Basis eine relativ hohe Mächtigkeit aufweisen und dann in Richtung Salzstockzentrum hin stark auszudünnen. Alle jüngeren tertiären Schichten laufen dagegen mit annähernd söhligem Lage über dem Flankenbereich zusammen und biegen dann mit etwa konstanter Mächtigkeit flexurartig zum Salzstockzentrum hin um (PREXL, 1997).

Die heutige Morphologie des Hutgesteins des Othmarschen-Langenfelde Diapirs ist typisch für Salzstöcke, die in jüngster Zeit der Subrosion unterlagen oder noch unterliegen. Oberhalb der Salzstockflanken hat sich ein verdickter, unvollständiger Ringwall des Hutgesteins aufgebaut, während sich zu den zentralen Bereichen des Salzstockes hin eine Subrosionswanne ausgebildet hat. Die Entstehung dieser morphologischen Senke und der flankennahen Hochbereiche erklärt sich wie folgt: Im Zentrum eines Diapirs steigen bevorzugt die mobilsten evaporitischen Bestandteile auf. In Nordwestdeutschland sind dies vor allem Rotliegendesalinare (Haselgebirge), das z2-Salinar und Kalisalze. Diese drängen die weniger mobilen Bestandteile zu den Flanken des Diapirs wo sich diese dann konzentrieren. Gerat der Scheitelbereich des aufsteigenden Diapirs zunehmend in Zonen zirkulierender Wässer, kommt es zur Intensivierung der Salzlösung. Das Verhältnis zwischen der Aufstiegsrate und der Salzlösungsrate kann sich dabei aus verschiedenen Gründen ändern:

- die Aufstiegsrate des Salzes nimmt ab oder kommt vollkommen zum Erliegen
- es kommt zur Freilegung des Scheitelbereiches und somit zur Salzlösung bzw. zur Erosion der höchsten Bereiche
- klimatisch bedingt ändern sich die Grundwasserverhältnisse im Bereich des Salzstockes, so dass es zu erhöhten Lösungsraten kommt
- durch intensive Aufwölbung kommt es besonders im Scheitelbereich zur Ausbildung verschiedener, meist sehr komplexer Extensionsstrukturen (z.B. *ring faults*, antithetische Gräben oder Halbgräben, *flower structures*, lang gestreckte Scheitelgräben, Kluftsysteme etc.), welche zum einen neue Wasserwegsamkeiten schaffen und zum anderen die Lösungsoberfläche deutlich vergrößern. Resultierend erhöht sich die Salzlösungsrate.
- Ausbildung einer salzgesättigten Sole in Depressionen. In diesen Bereichen kommt es zu keinem oder nur geringem Austausch mit Frischwasser, so dass die Salzlösung zum Erliegen kommt.

Aufgrund ihrer hohen Löslichkeit werden nun bei der flächenhaften Subrosion die mobilen Stein- und Kalisalze bevorzugt subrodiert, während sich in den Flankenbereichen die weniger löslichen Anteile, vor allem Anhydrit und Gips, zu einem Ringwall weiter aufbauen. Das Deckgebirge oberhalb der Subrosionswanne sackt bei fortschreitender Salzlösung nach. Dadurch bildet sich zunächst ein flexurartiges Umbiegen der überlagernden Sedimentbedeckung zum Wannenzentrum hin aus. Die Struktur des Ringwalls paust sich bis in das Deckgebirge durch. Zu bruchhaften Deformationen des Deckgebirges kommt es, wenn bei anhaltender Subrosion die Flexuren spröde deformieren oder sich aktive, interne tektonische Strukturen des Salzstockes durch die überlagernden Sedimente pausen. Langfristig unterstehen auch Gips und Anhydrit des Randbereiches der Lösung und es kommt zum Nachbrechen des Deckgebirges.

Am südlichen Teil des Othmarschen-Langenfelde Diapirs durchbrechen an zwei Lokalitäten diese Hochbereiche des Ringwalls die überlagernden Schichten und stehen oberflächennah an. Dieses ist zum einen der Bereich der nördlichen Ausfahrt des Elbtunnels und des allgemeinen Krankenhauses Altona. Als ovale Struktur erstreckt sich dieser Höhenzug des Salzstockes nach Norden bis ungefähr zur Autobahnausfahrt Bahrenfeld. Ein weiterer kleiner Ausstich des Salzdiapirs ist in Langenfelde bekannt (LINKE, 1983). Hier stehen die aufgeschleppten Gipse und Tone oberflächennah an und wurden in der Kallmorgen'schen Ziegeleigrube bis zum ersten Weltkrieg abgebaut. NIEDERMAYER (1962) grenzt den OLD durch die Lage von Senkungsgebieten und erbohrten Gipsen des Hutgesteins ein. Dabei wirft er die Frage auf, ob es sich bei dem erbohrten Gips und Ton nicht um aufgeschleppte Keuperschollen handelt und nicht um permische Sedimente. Entsprechend wären die oberflächennah anstehenden und teilweise abgebauten Gesteine der Kallmorgen'schen Ziegelei und deren Deutung als Zechstein fraglich und es handele sich vielmehr um Evaporite des Gipskeupers und grünlich gefärbten so genannten Kapselton.

Durch die intensive Verkarstung und den charakteristischen und ungewöhnlich mächtigen Gipsstut ist über interne Deformationen und Störungsmuster nicht viel bekannt. Auch seismische Daten lassen nur unsichere Interpretationen zu. Dies kann daran liegen, dass an der Grenzfläche zwischen Caprock und Steinsalz, bedingt durch den hohen Impedanzsprung, eine so starke Streuung und Abschwächung des Signals erfolgt, dass darunter liegende Strukturen nicht mehr abgebildet werden. PREXL (1997) interpretiert aus seismischen Profilen über dem OLD, dass im Gegensatz zu dem flexurellen Schichtumbiegen in den westlichen Teilen des Salzstockes, im östlichen Bereich bruchhafte Deformation überwiegt, d. h. die Ausbildung eines Scheitelgrabens. Auch die nur schwer interpretierbare Quartärbasis scheint noch durch Störungen versetzt zu sein. Der von ihm geschätzte Versatz an der Hauptverwerfung beträgt etwa 100 m. NIEDERMAYER (1962) beschreibt den postmiozänen Hebungsbetrag ebenfalls mit 100 bis 120 m.

Heute noch anhaltende Subrosionsprozesse in dem Bereich Othmarschen, Langenfelde und Flottbek deutet auf einen Salzaufstieg in jüngster Zeit hin.

Hinweise auf Subrosionserscheinungen im Untersuchungsgebiet: Im Untergrund des Stadtgebietes Hamburgs sind Subrosionserscheinungen, die Auswirkungen in Form von Subsidenz und lokal auftretende Erdbeben bis an die Erdoberfläche zeigen, aus den Stadtteilen Othmarschen, Langenfelde, und Großflottbek bekannt. Dieses stark bebaute Stadtgebiet liegt oberhalb der südlichen Hochbereiche des Othmarschen-Langenfelde Diapirs, der in einer Tiefe von weniger als 100 m unter der Geländeoberkante ansteht. Im Gegensatz dazu liegt der erweiterte Strukturbereich, der Salzstock Schnelsen, mit seinem Hutgestein in Tiefenlagen um - 400 m (N.N.). Das nördliche Strukturende, der Salzstock Quickborn, liegt außerhalb des Stadtgebietes. Ähnlich der Struktur in Othmarschen überdecken hier ebenfalls nur wenige Zehner-Meter quartärer Sedimente das Hutgestein und auch hier sind ablaugungsbedingte Subsidenzen der Erdoberfläche oberhalb der Salzstruktur bekannt (z. B. der Prophetensee). Weitere Salzstöcke im Raum Hamburg (Reitbrook, Meckelfeld und Sottorf) werden von mehr als 480 m mächtigen quartären und älteren Gesteinen überdeckt. Eventuell auftretende Salzlösungsprozesse im tiefen Untergrund scheinen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Morphologie des Geländes und die Bebauung der Stadt Hamburg zu haben.

Die Dokumentation plötzlicher Einbrüche der Erdoberfläche die mit Lösungsprozessen der chemischen Sedimente in den Hochbereichen des Othmarschen-Langenfelde Diapirs zusammenhängen könnten, beginnen am 22. Januar 1760 und mit einem weiteren Ereignis am 8. August 1771. Das letzte Kollapsbeben ereignete sich am 8. April 2009. Eine kurze Aufstellung dieser Kollapsereignisse finden sich bei Paluska (2002) und in Buurman 2009.

Neben Subsidenz und dem Auftreten von Einsturzbeben sind die Lösungsprozesse im Untergrund auch durch Bohrungen zu belegen. Im Zuge von Bodenuntersuchungen für eine geplante Elbe-Hochbrücke entstand 1938 nach einer Bohrlochsprengung südlich des ehemaligen Christianeums eine ca. 2000 qm große Erdsenke, als Folge eines verstürzten Hohlraumes (GRUBE, 1973). NIEDERMAYER (1962) berichtet von erbohrten Hohlräumen in einer Teufe zwischen 123,5 m und 125,4 m sowie zutage geförderten Höhlensedimenten zwischen 135,5 und 167,2 m Tiefe. Diese Hohlräume sind durch Gipsverkarstung entstanden und wurden bei Kernbohrungen (Nr. 42) im Zuge des Bauvorhabens des Krankenhaus Altona erbohrt. Bei diesen Vorerkundungen wurde mehrfach auch die Gipsoberfläche erbohrt (ab 36 m bzw. 52 m). Während der Bauarbeiten des Elbtunnels südlich des ehemaligen Othmarscher Dorfteichs riss ein Kernrohr samt Diamantkrone ab, nachdem es in einer Teufe zwischen 53,75 m und 65,75 auf „keinen nennenswerten Widerstand“ gestoßen war (GRUBE, 1973).

Der Othmarschen-Langenfelde Diapir (OLD) und die zeitliche Entwicklung der Salzstrukturen im Raum Hamburg (aus: Buurman 2009)

Im Stadtgebiet Hamburg und angrenzenden Bereichen Schleswig-Holsteins und Niedersachsens gibt es zahlreiche Salzstrukturen, deren Genese trotz räumlicher Nähe zueinander weder zeitlich noch strukturell in Verbindung steht.

Beim Salzstock Othmarschen-Langenfelde handelt es sich um eine ca. 20 km langen Salzmauer die sich von der Elbe im Süden über Schnelsen bis nach Quickborn im Norden hin erstreckt („LINKE 1996). Am nördlichen und am südlichen Ende weist die Struktur deutliche Hochlagen auf, so dass hier das Hutgestein praktisch die Erdoberfläche erreicht. In dem Bereich dazwischen (Raum Schnelsen) hängt die Struktur girlandenartig durch (LINKE 1996).

Initiiert wurde die Kissenbildung durch Bewegungen an den die Struktur unterlagernden Sockelfugen. Im Süden verbindet die W-E verlaufende Stade-Langenhelde Störungszone die Salzstrukturen Stade, Hahnöfersand sowie Langenhelde und streicht weiter in östlicher Richtung aus. In Langenhelde kommt es zur Vergitterung mit der vermutlich westabschiebenden Quickbornstörung. Diese verläuft von dort aus in Richtung Norden über Schnelsen bis zur Salzstruktur Quickborn und verschnidet sich dort mit der wiederum W-E verlaufenden Elmshorn-Sievershütten Störungszone. Das Muster der Sockelstörungen im Großraum Hamburg ist in Abb. 3 dargestellt.

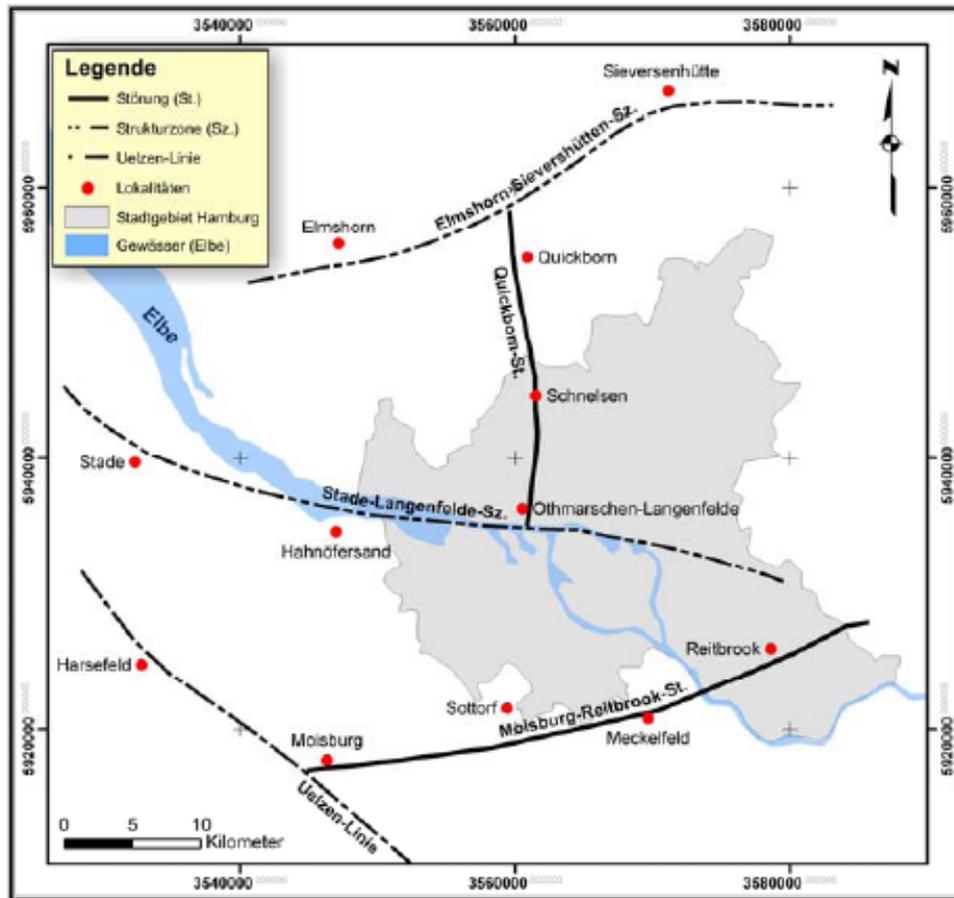


Abb. 3: Sockelstörungen im Großraum Hamburg (Baldschun et al. 2009 - Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor)

Überlagert werden die Sockelstörungen im Bereich des OLD von einem mächtigen Salzkissen des Oberrotliegend Salinars (ro-Salzkissen), welches im Norden und im Süden ca. 2500 m – 3000 m Mächtigkeiten erreicht, im Raum Schnelsen auch mächtiger sein kann (bis 5000 m). Darüber liegen die Salze des Zechsteins.

Bereits in der unteren Trias (vermutlich ab dem mittleren Buntsandstein) formt sich entlang des Störungsmusters von Stade bis Sievershütten ein schwach gewölbtes Salzkissen mit Höhepunkt im Gipskeuper. Die zentrale Hamburger Scholle stellt in diesem Zeitraum eine ausgeprägte Schwellenregion dar. Während andere Salzstrukturen im weiteren Hamburger Raum wie Elmshorn, Reitbrook, Meckelfeld, Sottorf und Moiburg bereits während des Lias bzw. des Dogger das Diapir Stadium erreicht hatten, bildete sich im Bereich des OLD das Kissen unter besonderer Beteiligung der Oberrotliegendsalinare weiter aus. Der Schwerpunkt der Salzzuwanderung und die damit zusammenhängende Bildung primärer Randsenken lag vorwiegend ost-südöstlich etwa im Gebiet von Harburg-Ochsenwerder. In geringerem Ausmaß migrierte auch Salz aus dem Raum Pinneberg in den Strukturkern. Während der jungkimmerischen Phase an der Wende Jura/Kreide war die Hamburger Scholle Emersionsgebiet, so dass durch die Hebungsphase der Pompeckj-Scholle im Mittleren und Oberen Jura die gesamte Struktur mit seiner Scheitelregion ins Abtragungsniveau geriet.

Während der höheren Unterkreide erfolgte eine Transgression und Schichten des Apts bzw. Alps überdecken weite Bereiche der Strukturen und deren Umfeld. Weitere Salznachschübe in der Oberkreide führten zu erneuten Aufwölbung. Die Mobilisierung der Oberrotliegendsalinare dauerte bis zum Oberoligozän an.

Ab dem Miozän bildete sich ein großflächiger Subsidenzraum in den Bereichen der Randschollen des nordwestlich gelegenen Glückstadt-Grabens. Eine dieser Randschollen ist die Hamburg-Scholle. Syngenetisch mit der Inversion des Glückstadt-Grabens (Hebung) und dem Absinken und gleichzeitigen Einkippen nach SE der Hamburg-Scholle ab dem Untermiozän durchbrachen die Salzmassen an den Strukturabschnitten Othmarschen-Langenfelde, Schnelsen und Quickborn ihre Deckschichten und stiegen weiter auf. Die Kissenflanken sanken als Basis sekundärer Randsenken zu tiefen Subsidenztrögen ein. Im nördlichen Strukturabschnitt verlief diese Absenkung an den westlichen Flanken rascher als an den östlichen. Resultierend aus halokinetischer und epirogen-tektonisch bedingter Subsidenz entstand das „Hamburger Loch“ (BENTZ, 1949; LÖHNERT, 1965) bzw. der „Hamburger-Supertrog“ (HINSCH, 1986). Neben den Salzstrukturen Othmarschen-Langenfelde, Schnelsen und Reitbrook sind sechs weitere Salzstrukturen im Norden Hamburgs an der Ausbildung dieser Einsenkung beteiligt (Buurman 2009).

Das Salzstocktop wies im unteren Mittelmiozän (Hamburger Ton-Zeit) noch eine konvexe Wölbung auf, der Aufstieg der zentralen Teile des Salzstockes muss somit größer gewesen sein als die Wirkung der Subrosion. PREXL (1997) zeigt, dass die Basis des Hamburger Ton ungefähr parallel zur Salzstockflanke verläuft und die Mächtigkeit des Hamburger Tons zum Salzstockzentrum hin ausdünnert.

Zu Beginn des Elbe-Zyklus im Reinbek (HINSCH, 1986), erfolgte, angeregt durch neuerliche, epirogen-tektonische Impulse eine Intensivierung des Salzaufstiegs aus den Flanken des noch immer mächtigen, vorwiegend von Oberrotliegend-Salinaren aufgebauten Kissenfußes.

Die obermiozäne Transgression greift gerade noch über das Top der Salzstruktur hinweg. Diese Ablagerungen werden dann noch über ihr primäres Sedimentationsniveau gehoben (NIEDERMAYER, 1962). Die jüngeren tertiären Schichten wie Glimmerton (Obermiozän), Kaolinsande (Pliozän) als auch das Quartär verlaufen mit etwa konstanten Mächtigkeiten über die Salzstockflanken hinweg. Erst dann biegen die Schichten flexurartig zum Salzstockzentrum hin um. Eine fortschreitende Subrosion bis in die jüngste Vergangenheit kann daher angenommen werden (PREXL, 1997).

Trotz fortgesetzter Absenkungstendenzen der Hamburg-Scholle wird sich die Salzstruktur von Othmarschen-Langenfelde bis Quickborn weiter aufwölben. Der nördliche Strukturbereich liegt mit seinem Scheitel im Subrosionsniveau, der Salzzustrom erfolgt vorwiegend aus der östlichen Kissenflanke des mächtigen Rotliegend-Salzkissen. Das verkarstete Hutgestein des Oberrotliegend (12 m Haselgebirge erbohrt) wird im Kulminationszentrum von maximal 30 m mächtigen quartären Schichten überdeckt.

Unter dem südlichen Strukturbereich ist im Kissenfuß noch ein erhebliches Reservoir sowohl an Oberrotliegend- als auch Zechsteinsalz vorhanden. Die Beteiligung des Oberrotliegend-Salinar an dem embryonalen Diapir ist aufgrund der Lage der Struktur im Zentrum des NW-Deutschen Permtroges wahrscheinlich, aber bisher nicht durch Bohrungen nachgewiesen. Bohrungen im Raum Langenfelde, welche Gips und Tone des Hutgesteins erbohrten, werden von NIEDERMEYER (1962) als aufgeschleppte Keuperschollen beschrieben. Während die Gipsoberfläche aufgrund von zahlreichen Vorerkundungen zur Realisierung von zumeist Hochbauten erbohrt wurde, ist lediglich eine Bohrung von 1928 bekannt, mit der der eigentliche Salzkörper erreicht wurde. Die Bohrung der Sternwoll-Spinnerei erreichte die Gipsoberfläche in einer Teufe von ca. 77 m; zwischen 181 m und 466 m wurden Wechsellagen aus Tonen, Gips sowie roten und weißen Steinsalzen erbohrt (NIEDERMAYER, 1962).

Senkungsstrukturen im Hamburger Stadtgebiet: Absenkungen der Erdoberfläche in Hamburg haben verschiedene Ursachen. Sie beruhen im oberflächennahen Bereich des Othmarschen-Langenfelde Diapirs auf salztektonischen Prozessen die zur Weiterentwicklung der Randsenken um den Diapir herum führen. Über dem Top-Bereich des Diapirs sind die Absenkungen auf Auslaugungen im Untergrund und der damit verbundenen Entstehung von Hohlräumen und deren Zusammensacken oder Zusammenbrechen zurückzuführen. Weitere beobachtbare Absenkungen resultieren aus den Setzungen in lokalen Torflagen. Derartige Torflagen kommen generell in schüsselförmigen Strukturen vor, deren Entstehung bislang meist unbekannt war.

In der Dachregion des Othmarschen-Langenfelde Diapirs (OLD) wurden sämtliche Senken untersucht. An der Erdoberfläche ist dabei nicht ersichtlich, ob es sich bei der Senke um einen Erdfall oder um ein so genanntes Toteisloch handelt. Die Toteislöcher entstanden dadurch, dass während des Pleistozäns Eisblöcke der damaligen Inlandvereisung durch die Gletscherbewegungen in die End- oder Grundmoränen eingepresst wurden und in der Geschiebemasse vor ihrem Abschmelzen eine Zeitlang überdauerten. Andere Toteislöcher entstammen einer damaligen Gletscherzunge, welche beim raschen, unregelmäßigen Abtauen und Rückzug des Gletschers viele Einzelblöcke zurückließ. Neben und auf diesen Eisblöcken wurden durch Schmelzwässer transportierte Sedimente abgelagert. Das Eis war somit vor dem Auftauen durch

die Sonne geschützt und konnte so, je nach Klima, über lange Zeiträume weiter bestehen. Es schmolz erst sehr viel später, unter Hinterlassung von Hohlformen ab. Die mit Sedimenten (Torfe, Sand) verfüllten Hohlformen lassen sich hinsichtlich Erdfall (Abb. 4a) oder Toteisloch (Abb. 4b) aufgrund der Internstruktur der Sedimentfüllung und der Strukturierung ihrer Basis klar unterscheiden.

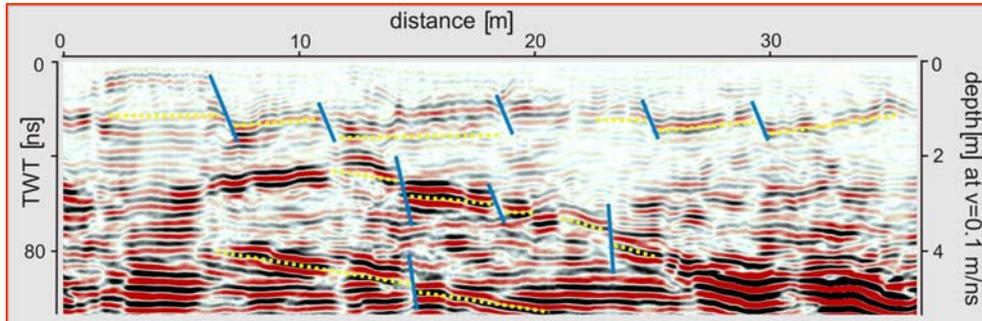


Abb. 4a: Sedimentäre Internstrukturen und Basis einer durch Erdfall entstandenen Senke

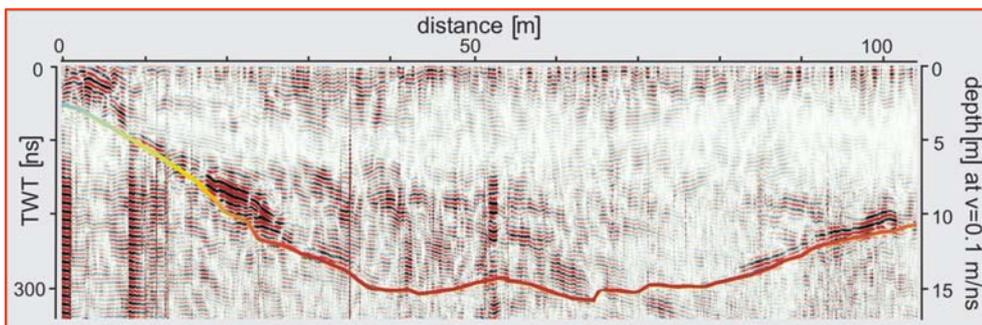


Abb. 4b: Sedimentäre Internstrukturen und Basis einer durch Toteis entstandenen Senke

Waltham et al. (2005)	Solution-Typ	Collapse-Typ	Caprock-Typ	Dropout-Typ	Suffosion-Typ	Buried-Typ
				Subsidence-Typ		
Williams (2004)	Solution-Typ	Collapse-Typ	Caprock-Collapse	Dropout-Typ	Dropout-Typ	Buried-Typ
Lowe & Waltham (2002)	Dissolution-Typ	Collapse-Typ	Caprock-Typ	Dropout-Typ	Dropout-Typ	Buried-Typ
Ford & Williams (1989)	Solution-Typ	Collapse-Typ			Suffosion-Typ	—
White (1988)	Solution-Typ	Collapse-Typ	—	Cover Collapse	Cover Subsidence	—
Culshaw & Waltham (1987)	Solution-Typ	Collapse-Typ	—	Subsidence-Typ		Buried-Typ
Beck & Sinclair (1986)	Solution-Typ	Collapse-Typ		Cover Collapse	Cover Subsidence	—
Jennings (1985)	Solution-Typ	Collapse-Typ	Subjacent-Collapse	Subsidenz-Typ		—
Bögli (1980)	Solution-Typ	Collapse-Typ / Subsidence-Typ (schnell) (langsam)		Alluvial		—
Sweeting (1972)	Solution-Typ	Collapse-Typ	Solution-Subsidence	Alluvial		—
weitere verwendete Klassifikationen	Cockpit	Cave Collapse Tiankeng Tumour Cenote	Interstratal Collapse Breccia Pipe		Shakehole Ravelling	Filled Compaction Pipe

Tabelle 1: Nomenklatur von Erdfällen (Buurman 2009)

Erdfälle an und unter der Erdoberfläche entwickeln sich durch das Zusammenwirken verschiedener geologischer Prozesse unter verschiedenen geologischen Gegebenheiten. Die wichtigsten Faktoren sind die Beschaffenheit des löslichen Gesteins und des Deckgebirges, die hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse sowie klimatische Bedingungen. Die Einteilung der Erdfälle in sechs Haupttypen wurde nach den charakteristischen Entstehungsprozessen eines jeden Typs vorgenommen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich jeder Erdfall unter unterschiedlichen lokalen Bedingungen entwickelt und somit viele Übergänge zwischen den definierten sechs Haupttypen bestehen. Die Zuordnung wurde anhand der Kombination von zwei oder mehreren Prozessen vorgenommen, durch die ein Erdfall geprägt wurde.

Die historische Überlieferung plötzlicher Einbrüche der Erdoberfläche in Hamburg reicht bis ins 18. Jahrhundert zurück. Klare Aufzeichnungen existieren seit dem 20. Jahrhundert. Während der letzten 100 Jahre wurden ca. 20 lokal sehr eng begrenzte Einsturzbeben registriert. Einige verursachten erhebliche Gebäudeschäden. Das letzte Einsturzbeben in Hamburg ereignete sich am 8. April 2009.

Übersicht zu den Erdfalltypen und ihrer Entstehung

solution- (*dissolution-*) Typ

Vorkommen in Gebieten in denen die wasserlöslichen Gesteine nur gering von Fest-, Lockergesteinen oder Bodenbildung überlagert werden.

Allgemein können die Durchmesser der Oberflächendepressionen zwischen 1 m und 1000 m variieren, die maximale Tiefe kann zwischen 1 m und mehr als 100 m liegen. Diese Großformen werden auch als (Lösungs-) Doline oder Lösungsbecken bezeichnet.

Dieser Typ entsteht zunächst durch Lösung des Gesteins entlang von Klüften im Untergrund. Der Durchfluss von Wasser und die entsprechende Lösungsrate des Festgesteins erhöhen sich, wenn die Lösung wieder abfließen kann. Durch die Lösungsprozesse innerhalb des Spaltensystems wird das Festgestein nahezu ausgehöhlt. Die Zirkulation aggressiver Bodenwässer führt zu Bildung des so genannten Epikarsts (KLIMCHOUK, 2000) oder des subkutanen Karsts (WILLIAMS, 1983). Im Laufe der Zeit wird der Epikarst in alle Richtungen von Rissen durchzogen bis es zur Ausbildung von Lagen separierter Blöcke kommt. Diese ca. Meter-großen Blöcke sacken oder stürzen in kleinen Kollapsereignissen in die entstandenen Spalten und Höhlen. Viele Dolinen des *solution*-Typs zeigen deswegen auch Eigenschaften des Kollapses. Ist der Kontakt zwischen Salz und zirkulierenden Wässern unterbunden, kommt die Salzlösung und die Absenkung der Geländeoberfläche zum Erliegen. Dieses gilt auch, wenn sich eine gesättigte, nicht abfließende Sole ausbilden kann, die den weiteren Lösungsprozess hemmt oder völlig zum Stillstand bringt.

collapse- und *caprock-* Typ

Die *collapse-* und *caprock-* Typen (Abb. 5) sind durch Bruchbildung und Kollaps von ungestützten Decken, Firsten und Gewölben der Lösungshohlräume charakterisiert. Diese Erdfalltypen variieren zwar in ihrer Größe deutlich, die meisten sind jedoch kleiner als 100 m im Durchmesser. Kennzeichnend sind die steilen Ränder der Einbruchsstrukturen.

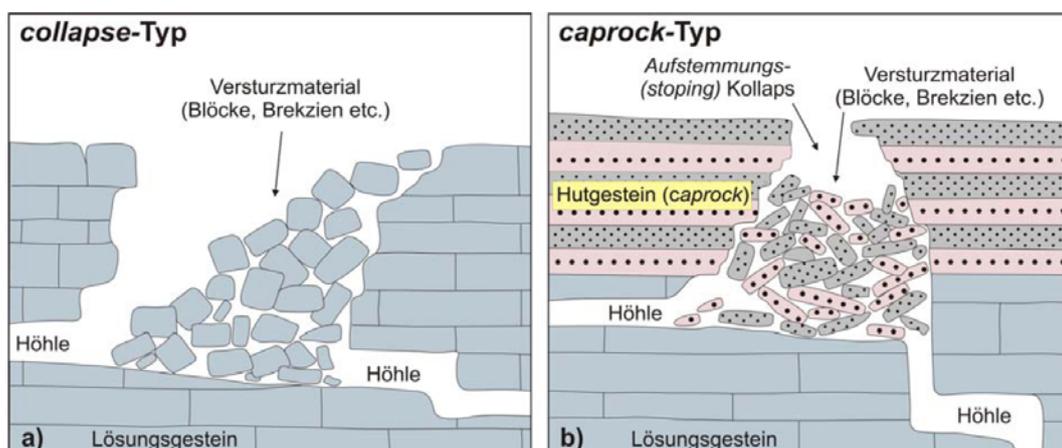


Abb 5: (a) *Collapse* -Typ, das lösbare Gestein steht bis an die Erdoberfläche an. (b) *Caprock* -Typ, das lösbare Gestein wird von anderen Sedimenten oder dem sogenannten Hutgestein (eines Salzdiapirs) überlagert (Buurman 2009 verändert nach Waltham et. Al 2005)

Der Lösungsraum ist zunächst nicht großflächig. Die Lösung beginnt zuerst an offenen Spalten. Eine Erweiterung der Wasserwegsamkeit führt zu einem größeren Wasserdurchfluss und zur Erhöhung der Lösungsrate. Ab einer bestimmten Hohlraumgröße sind aber nicht nur Lösungsprozesse an dessen Vergrößerung beteiligt. Statisches Versagen der Wand- und Kuppelbereiche erweitern den Hohlraum besonders nach oben, der sich dann auch in den wasserunlöslichen Gesteine fortsetzt. Je nach Gesteinsbeschaffenheit (massig, geschichtet, Inhomogenitätsgrad) führen herunter brechende Gesteinsplatten zur Erweiterung des Hohlraums. Der Höhlenerweiterung entgegen wirkt das Verkannten einzelner Dachblöcke bzw. die statischen Eigenschaften des Höhlendaches. Ab einem kritischen Punkt der Auflast, kommt es zum Einbruch, bei der die Höhle durch das Versturzmateriale verfüllt wird. Ist das Volumen des verstorzten und somit aufgelockerten Dachmaterials geringer als das der Höhle selbst, so paust sich die Kollapsstruktur bis an die Erdoberfläche durch.

Eine Überbauung kann je nach der Größe der damit verbundenen zusätzlichen Auflast des Deckgebirges zu plötzlichen Einstürzen unerkannter Hohlräume führen.

subsidence-Typen

Erdfälle des *subsidence*-Typs (Abb. 6) sind durch sogenannte Suffosion charakterisiert. Dabei werden Bodenteilchen und Sedimente durch Wasser über Spalten- und Kluftsysteme im Untergrund weggeführt. Theoretisch wäre auch ein gravitativer Transport von feinsandigem Material möglich. Das mitgenommene Material wird auf seinem Weg entweder in Höhlen oder Klüften abgelagert oder es tritt als Schuttfächer aus einer Höhle zutage. Das Material kann auch in einem Aquifer abgeführt, transportiert und erst weiter entfernt abgelagert werden. Im Gegensatz zu den anderen Erdfalltypen verstürzt hier jedoch nicht ein Hohlraum innerhalb des Lösungsgesteins, sondern es wird ein im Deckgebirge entstehendes Massendefizit ausgeglichen.

Je nach Zeitdauer in der sich eine subsidence-Struktur bildet unterscheidet man verschiedene Typen: Beim **dropout-Typ** bricht das Deckgebirge schlagartig ein; beim reinen **suffosion-Typ** erfolgt eine langsame, mehr oder weniger kontinuierliche Absenkung der Oberfläche die mit dem Abtransport des Materials oder die Lösungsrate im Untergrund einher geht.

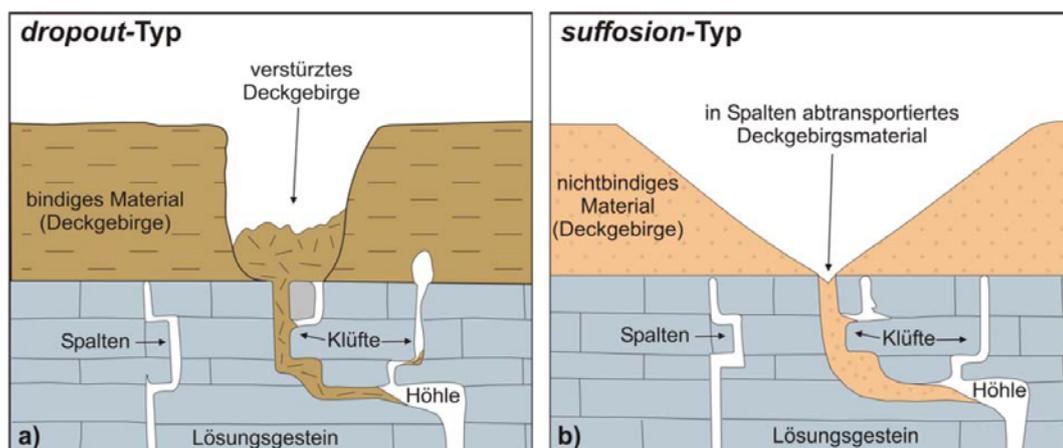


Abb 6: (a) *dropout*-Typ, (b) *suffosion*-Typ (Buurman 2009 verändert nach Waltham et. Al 2005)

Die Auswirkungen und das morphologische Erscheinungsbild eines Erdfalles des *dropout*-Typs sind denen des *collapse*-Typs meist sehr ähnlich. Die Übergänge zwischen den beiden Strukturen sind fließend, bzw. es kommt zu einer Kombination beider Typen, wenn aus einer langsamen Subsidenz ein schlagartiges Ereignis zum endgültigen Kollabieren der Geländeoberfläche führt. Letztendlich hängt dieses von dem Anteil an kohäsiven Komponenten des Deckgebirges ab. Die Unterscheidung zwischen den beiden Erdfalltypen wird besonders dann erschwert, wenn das Kollapsereignis schon längere Zeit zurückliegt. Die ursprüngliche Versturzhöhle des *dropout*-Typs kann durch Erosion an den ehemals steilen Flanken stark abgeböschert werden. Dabei wird das erodierte Material ins Erdfallinnere befördert, während sich der Durchmesser der ehemaligen Röhre vergrößert. Schließlich verfüllen die oberflächennahen Sedimente die Hohlform.

Erdfälle des *subsidence*-Typs können sich innerhalb jedes Sediments im Deckgebirge ausbilden. Besonders häufig treten sie dort auf, wo pleistozäne Gletscher Till abgelagert haben. Der Till ist meist ausreichend wasserdurchlässig und enthält einen hohen Anteil an bindigen Komponenten. Feine nichtbindige Sedimente wie Löss und feiner Sand können im Spaltensystem des verfestigten oder bindigen Gesteins durch Wasser transportiert werden

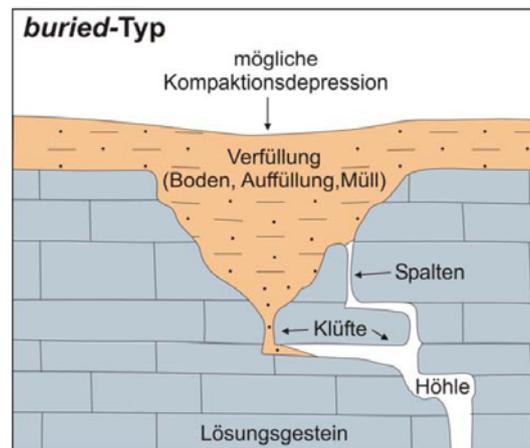
buried-Typ

Abb 7: *buried*-Typ (Buurman 2009 verändert nach Waltham et. Al 2005)

Bei ingenieurgeologischen Betrachtungen spielt der *buried*-Typ eine wichtige Rolle. Denn das Erkennen eines verborgenen Erdfalls lässt darauf schließen, dass es hier im Untergrund Lösungsprozesse stattgefunden haben oder evtl. noch stattfinden. Aber auch ohne weitere Lösungsprozesse im tiefen Untergrund kann ein Erdfall des *buried*-Typs aktiv sein. Innerhalb der Verfüllung kann es zu Materialschwund durch Suffosionsprozesse kommen. Dabei werden Hohlräume innerhalb der Versturzbrekzie mit Sedimenten kleiner Korngrößen verfüllt. Das darüber liegende Verfüllungsmaterial sackt nach und die Verfüllung wird aufgelockert. Besonders an den Randbereichen können Rutschungen oder stufenartige Abbrüche entstehen. Somit wird neues Material von den Böschungen in die Depression transportiert. Je nach Sediment kommt es zur Abdichtung der Hohlform und ihrer Füllung mit Regenwasser. Versumpfung und Verlandungsprozesse führen oder führten in der Vergangenheit zur Torfbildung. Diese biogenen Verfüllungen lassen sich leicht kompaktieren. Schon bei geringer Auflast oder Austrocknung kommt es zu Setzungserscheinungen. Viele Verfüllungen sind auch künstlich und bestehen aus Bauschutt und Müll usw. Im Übergangsbereich zwischen den Füllungen und dem angrenzenden Untergrund kommt es zu unterschiedlichen Setzungen, was bei einer Überbauung unbedingt in Betracht gezogen werden muss.

Ausgewählte Beispiele zu Erdfällen im Hamburger Stadtgebiet

Struktur Bahrenfelder See Der Bahrenfelder See (Struktur BS8 in Buurman 2009) im Bezirk Altona ist mit einem Durchmesser von ca. 80 m eine mit Wasser gefüllte Senkungsstruktur. Um diesen See kursieren in der Hamburger Geschichte viele geheimnisvolle Berichte. So soll hier im Mittelalter ein Kloster mit frevlerischen Mönchen versunken und 1859 ein Fuhrwerk mit Pferd und Wagen spurlos verschwunden sein. In den 1970er Jahren wurde rund um den See eine Parkanlage angelegt. Dabei wurden im Westen (Theodorstraße) und im Süden (B 431) Aufhöhungen geschaffen welche die natürlichen Böschungen und Abbruchkanten einer gut erhaltenen Erdfallstruktur miteinander verbinden.

Zur Erkundung des Erdfalls hat Dipl.-Geol. N. Buurman im Projekt einen Schwimmkasten für das Georadar entwickelt mit dessen Einsatz jeweils 3 Profile mit unterschiedlichen Antennenfrequenzen (100 MHz & 200 MHz) über den See gezogen wurden. Aufgenommen wurde dabei die Bathymetrie des Sees und die Strukturierung des Seebodens sowie seines Untergrunds. An Land wurden mit den beiden Antennen je fünf weiteren Radarprofile an Land aufgenommen um die räumlichen Ausbreitung der Gesamtstruktur sowie die Charakterisierung und Interpretation des peripheren strukturellen Inventars im Untergrund zu erkunden. Die Profile wurden so angelegt, dass sie möglichst eine Flucht vom Seezentrum weg und einen 90° Winkel zu den Randstrukturen bilden. Die maximale Analysertiefe mit dem GPR liegt hier bei ca. 12 m.

Die bathymetrische Untersuchungen zeigen eine deutliche Asymmetrie der Hohlform. Dabei liegt ein deutlicher Tiefenbereich der Schlammsohle von ca. 5.3 m im nördlichen Seeende (Koordinaten 559494/5935656). Nache dem südlichen Seeufer reicht die Schlammsohle deutlich tiefer (Koordinaten 559507/5935628). Das Tiefenmaximum liegt hier bei ca. 8.6 m (Abb. 8b). Die heutige Seemitte ist also nicht das strukturelle Zentrum. Während sich der Seeboden im Radarogramm als deutlicher Reflektor abhebt, ist zwischen der eigentlichen Wassersäule und dem Grund häufig eine Zwischenschicht diffuser Reflektoren zu erkennen (Abb. 8a). Hierbei handelt es sich um stark wassergesättigte Schlämme oder auch Seepflanzen.

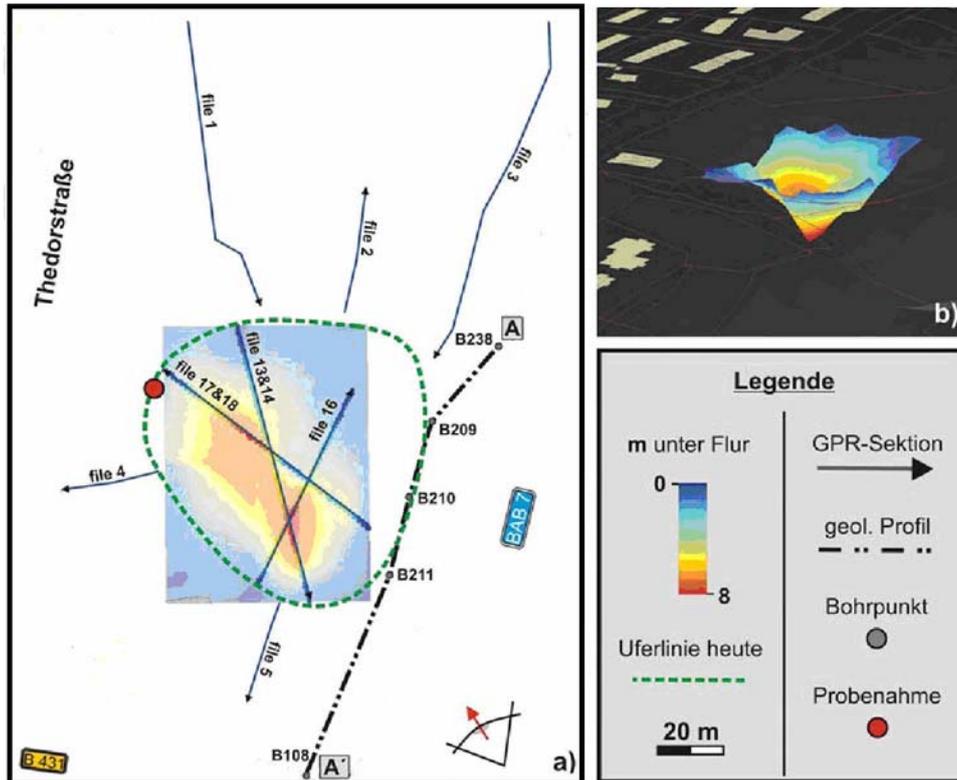


Abb. 8: Geographische Lage der Struktur Bahrenfelder See mit heutigem Seeufer (grün gestrichelte Linie), GPR Profilen mit Zugrichtung der Antennen, geologischem Profil A-A' und bathymetrischer Auswertung (m unter Flur bezieht sich hier auch auf m unter Seeoberfläche); b) räumliche Darstellung des Seebodens (Blickrichtung nach NW).

Primärstruktur: Die Profile zeigen die steil einfallenden primären Gleitflächen, an denen Reflektoren aneinander versetzt wurden. Die Einzelversätze betragen jeweils mehrere dm. Die der räumlichen Darstellung der interpolierten Bewegungsflächen (Abb. 8b) zeigt die trichterförmige Gestalt der Struktur. Innerhalb dieses Trichters zeigen alle Reflektoren Deformationen an. In diesem Bereich wird bis zur maximalen Analysetiefe keine strukturelle Basis erreicht; d.h. es sind über die gesamte Hohlform im Untergrund keine horizontalen Reflektoren zu ermitteln. Vielmehr lassen sich eindeutige Rückschlüsse auf eine Versturztöhre ziehen. Der Trichterkragen hat einen maximalen Durchmesser von ca. 20 m, während die Verjüngung (Trichterhals) nach unten hin 10 m und in maximaler Analysetiefe von ca. 12 m nur noch einen Durchmesser von ca. 5 m erreicht. Der zentrale Punkt der primären Einsturztöhre liegt bei (559507/5935628). Unterhalb des nördlichen Tiefenbereichs der bathymetrischen Untersuchungen hingegen lassen sich bis in die maximale Analysetiefe keine primären Abbruchstrukturen erkennen. Die Reflektoren fallen hier in Richtung Seezentrum zwar signifikant steiler ein als die des Seebodens und zeigen teilweise signifikante Versätze, jedoch treten darunter zum strukturellen Rand hin weitere subhorizontal gelagerte weitgehend ungestörte Reflektoren auf. Diese Reflektoren definieren hier eine strukturelle Basis (Abb. 10a, Profil 13a, 18b).

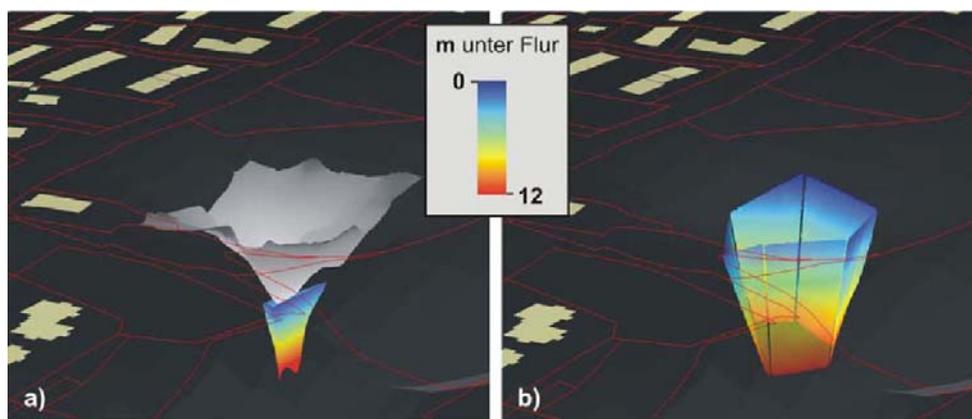


Abb. 9: Räumliche Darstellung a) des Seebodens (grau) und der primären Versturztöhre; b) der äußeren Abbruchkanten (Blickrichtung nach NW).

Sekundärstrukturen: Die äußeren Abbruchstrukturen liegen unter der Wasseroberfläche nahe dem heutigen Seeufer in unterschiedlichem Abstand zum Einsturzzentrum. Die GPR Profile 13a, 16a und 18b zeigen, dass diese, am äußeren Rand der Bahrenfeld See Struktur liegenden Bewegungsflächen etwa gleich steil einfallen wie die primären Abbruchkanten. Jedoch weisen die versetzten Reflektoren in den ufernahen Bereichen deutlich geringere Einfallswerte auf als die Reflektoren am Rand des primären zentralen Einsturztrichters (Abb. 9a). Die Versätze der Stufen variieren innerhalb mehrerer dm. Das Profil 13a (Abb. 9a) bildet die sekundäre Abbruchkante im Südbereich des Sees ab. Diese liegt dem primären Versturztichter am nächsten. Der Versatz beträgt ca. 1 m. Eine weitere Abbruchstruktur wurde mit einer Sondierungsbohrung zur Altersdatierung von Torfen angebohrt werden. Diese Bohrung befindet sich am nordwestlichen Seeufer und belegt eine sekundären Abbruchkante nahe den Profilen 13 und 14.

Unter den primären Abbruchkanten zeigt sich in den Reflektoren keine Basis; unter den sekundären Abbruchkanten sind zum Rande der Hohlform hin in allen Radarprofilen subhorizontale und meist ungestörten Reflektoren festzustellen. Die räumliche und geographische Lage der sekundären äußeren Abbruchstruktur ist in Abbildung 9b dargestellt. Der maximale Durchmesser dieses Strukturbereiches beträgt ca. 70 m.

Randbereich der Bahrenfeldstruktur: Die Strukturierung des Randes der Gesamtstruktur wird aus den Radarprofilen (Abb. 8a, Profile file 1-5). Ersichtlich. Profil 3 in Abbildung 10b ist mit 110 m das längste aller hier vermessenen Radarsektionen. Am Profilbeginn sind außerhalb des Senkenbereiches keine Deformationen erkennbar. Die Reflektoren verlaufen weitgehend parallel zur Geländeoberkante und sind entsprechen kaum unterbrochen. Die Wechselfolge von hellen Bereichen und kräftigen hervortretenden Reflektoren weisen auf Materialwechsel hin, die als vier verschiedene Radarfazies interpretiert werden. Die Mächtigkeiten der einzelnen Radarfazies Rf1-4 liegen bei ca. 3 m, 2 m, 2,5 m sowie >5 m. Nach etwa 65 m Profilverlauf keilt Rf2 aus. Auf dem letzten Viertel des Profils zeigen sich, versetzt voneinander, konvexe Linsenstrukturen, deren Tops entweder parallel zur Geländeoberkante des Hanges verlaufen oder eine leicht konkave Wölbung aufweisen. Das EW-verlaufende, knapp 30 m lange Profil 4 (Abb. 10c) bildet ebenfalls drei deutlich unterscheidbare Radarfazies ab, deren Mächtigkeiten mit denen des Profils 3 übereinstimmen. Auch hier zeigen sich geringe Versätze innerhalb der Reflektoren sowie die Ausbildung von linsenförmigen Strukturen, welche auf oberflächennahe Bodenbewegungen schließen lassen. Steilstehende Abbruchflächen, welche ganze Pakete von Reflektoren aneinander versetzten werden hingegen in den peripheren Strukturbereichen nicht beobachtet.

Deformationsstil: Ungeachtet der asymmetrischen Position der primären Versturztöhre innerhalb der Gesamtstruktur sind die primären und sekundären Strukturen eindeutig zu identifizieren. Die Strukturen spiegeln sich in Reflektoren mit starken Impedanzkontrasten wieder, die in kräftigen Farben dargestellt werden. Die entsprechenden Boden-Sedimentlagen lassen sich über mehrere Meter durchgängig verfolgen bevor sie abrupt an steilen Abbruchkanten stufenartig aneinander versetzt werden. Ebenso deutlich lassen sich undeformierte Reflektoren des Seebodens, der Schlammsohle und der strukturellen Basis zuordnen. Neben den durchgängigen undeformierten Reflektoren und den markanten Abbruchkanten zeichnen sich Bereiche undeutlicher, gezerrter oder gestauchter Sedimentstrukturen ab. Dabei handelt es sich um Rutsch- oder Gleitmassen, die auf den verstellten Gleitbahnen gravitativ zum Zentrum der Primärstruktur abrutschen. Jedoch ist eine Zunahme der Deformationen zum Zentrum des Erdfalls hin nicht zu beobachten. Besonders im nördlichen Randbereich des Sees, wo der Abstand zwischen äußeren Sekundärstrukturen und dem primären Versturztichter besonders groß ist (ca. 30 – 40 m), sind die an den Reflektoren festzustellenden Versätze größer als in Richtung Kollapszentrum. Unterhalb der deformierten Sekundärstrukturen fallen die Reflektoren subhorizontal bis horizontal ein und stellen den weitgehend undeformierten Bereich der strukturellen Basis dar. Sowohl die undeformierte Basis als auch die Reflektoren der sekundären Strukturen enden an der markanten und subvertikal einfallenden primären Abbruchkante. Einzelne Versätze liegen hier im Bereich eines Meters. Die Reflektoren innerhalb der zentralen Versturztöhre zeigen keine klaren Versätze mehr an, sondern bilden die versturzten Sedimente, der Kollapsbrekzie, ab. Der Versturztichter selbst reicht, wie die Deformationsmuster der Sekundärstrukturen, bis nahe an die Schlammsohle heran. Die Reflektoren der Schlammsohle selbst folgen auch unmittelbar oberhalb des Kollapszentrums dem Verlauf des Seebodens ohne Deformationenr anzuzeigen. Der Rand der Bahrenfeldstruktur ist durch oberflächennahes Bodenkriechen charakterisiert. Dies zeigt sich am Sichelwuchs des jungen und alten Baumbestandes sowie in der Ausbildung kleinerer Geländestufen. Diese rezenten Bewegungsindikatoren müssen allerdings nicht unmittelbar durch eine Aktivität des Erdalles induziert worden sein.

Geologisches Profil: (Abb. 11) Die mehr 30 m tiefe, zentral gelegene Hohlform ist überwiegend mit feinen und Mittelsanden verfüllt. Die Randbereiche bilden Geschiebemergel und Geschiebelehm, welche nach Norden über das abgebildete Profil hinaus weiterhin ansteigen. Die morphologische Senke hat an der Geländeoberkante einen Durchmesser von mehr als 200 m, während der Durchmesser der Sandfüllung im tieferen Bereich ca. 120 m beträgt. Im zentralen Bereich der kommt eine mächtige Torffüllung mit einer asymmetrischen Basis vor. Im Süden steigt der Rand der Torfe deutlich steiler an als im Norden. Auch die Oberkante des Torfes zeigt einen unregelmäßigen Verlauf. Zwischen den Bohrungen B209 und B210 liegt ein deutlicher Versatz von ca. 3 m im Topbereich des Torfes.

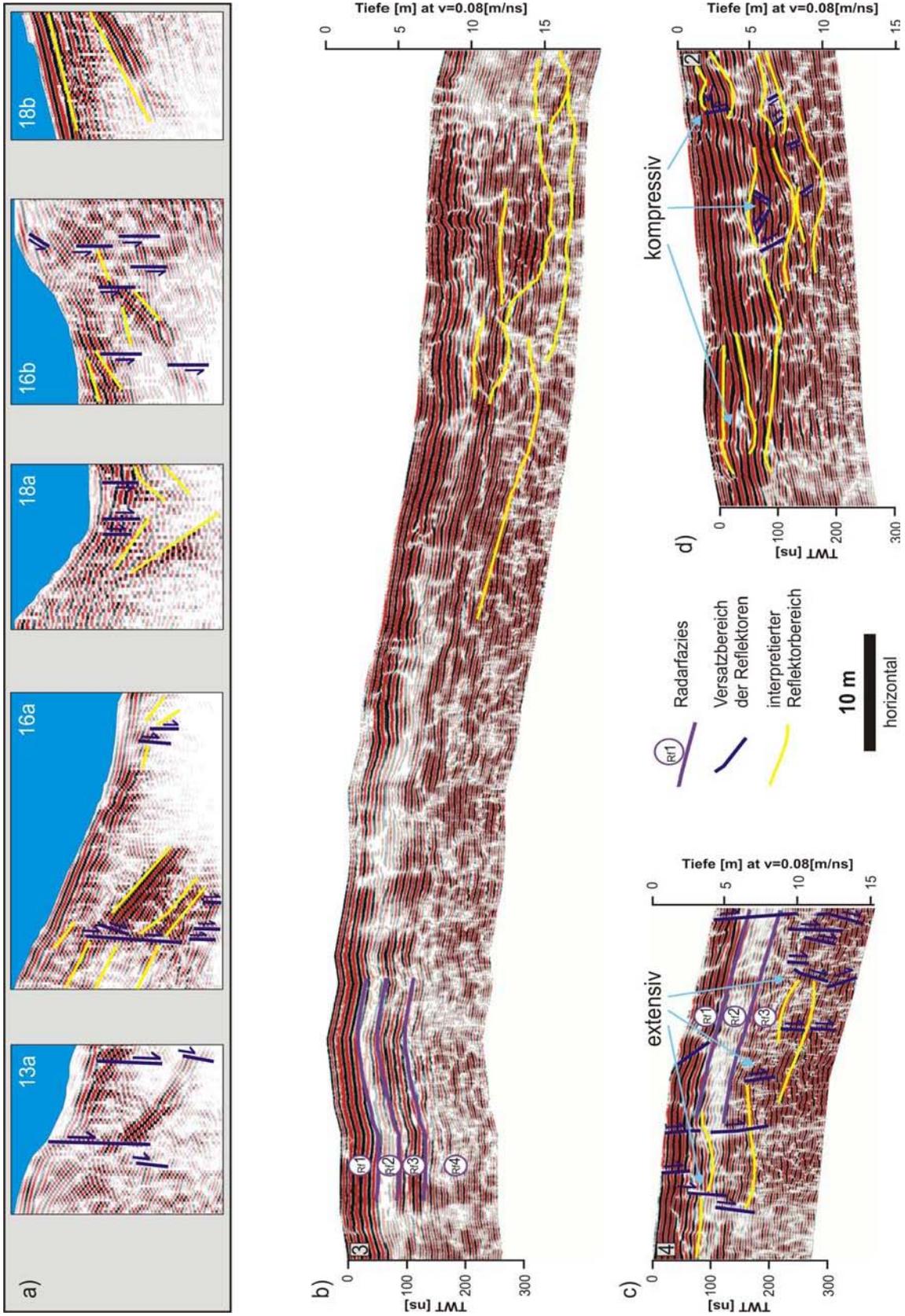


Abb. 10: GPR-Sektionen **a**) primäre und sekundäre Abbruchkanten unterhalb der Wassersäule (Ausschnitte der GPR-Sektionen); **b-d**) Interpretation der GPR-Sektionen an Land (gesamte Profillängen).

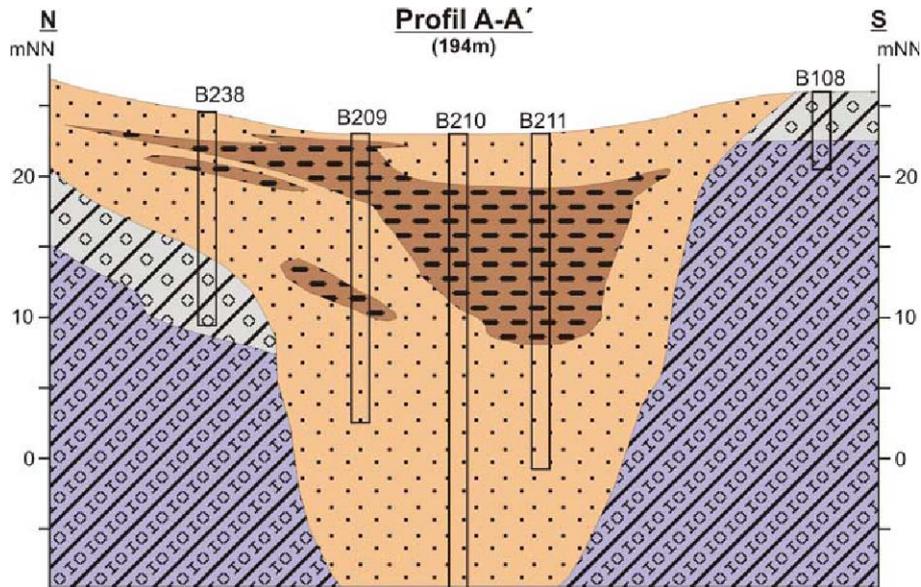


Abb. 11: Geologisches Profil Struktur Bahrenfelder See: A-A', 3,5 fach überhöht; orange=Sand, braun=Torf, grau=Geschiebelehm, lila=Geschiebemergel (Quelle der Bohrdaten: Geologisches Landesamt Hamburg).

Pollendatierungen der Torflagen aus einer Bohrung am nordwestlichen Ufer des Bahrenfelder Sees weisen in 3,8 m Tiefe auf ein Alter von ca. 9000 Jahren der Torfe hin (RICKERT 2008) und belegen damit ein Mindestalter der Bahrenfeld See Struktur. Die oberflächennaheren Torfe lassen sich in ein Zeitfenster zwischen der Mitte des 14. Jahrhunderts bis Ende des 19. Jahrhunderts einordnen; in diesem Bereich wurde zwischen 0,97 m und 1,27 m eine steil einfallende Sandlage erbohrt die anthropogenes Material enthält und auf einen Einsturz zurückgeführt wird..

Klassifizierung und Genese: Die kreisrunde Bahrenfeld Struktur ist Erdfallsee und wird als *dropout*-Typ klassifiziert. Belegt wird dies durch die Geometrie der signifikanten primären Einsturzhöhle. Die subvertikal bis vertikal orientierten primären Abbruchkanten charakterisieren die steilen „Wandbereiche“ der Kollapsröhre in der das Versturzmateriale, die Kollapsbrekzie, abgelagert wurde. Unklar ist die Ursache der Asymmetrie der Gesamtstruktur mit den stark variierenden Abständen zwischen primären und sekundären Abbruchkanten. Die im Süden steiler einfallenden Reflektoren und das Bewegungsmuster der Sedimente belegt, dass der initiale Massentransport hier intensiver erfolgte als über die deutlich flacher einfallenden Gleitflächen im Norden. Dennoch belegen die gut ausgeprägten sekundären Abbruchkanten, an denen die flachen Gleitflächen nahe dem nördlichen Uferbereich aneinander versetzt wurden, dass auch hier ein Kollapsereignis hoher Intensität gewirkt haben muss. Hierfür spricht neben den geophysikalischen Messergebnissen auch die erbohrte und mit jungen Sedimenten wiederverfüllte Kluft am Nordwestrand des Sees sowie der für einen schlagartig eingebrochenen Oberflächenkollaps große Durchmesser der kreisrunden Sekundärstruktur von ca. 70 m. Dabei muss von einem enormen Massendefizit im tieferen Untergrund ausgegangen werden, welches zu einer beträchtlichen gravitativen Massenverlagerung geführt hat.

Eine aktive Subsidenz im Bereich der Struktur BS8 kann nicht ausgeschlossen werden, jedoch entspräche diese derzeit nicht der Form eines schlagartigen Versturzes. Im zentralen Bereich der Einsturzhöhle reichen die verstellten Reflektoren bis nahe an den Seeboden heran. Auch die peripheren Bereiche zeigen zum Uferbereich des Sees eine Intensivierung der Bewegungsstrukturen im Untergrund. Dieses kann allerdings ebenso auf ein rein gravitativ induziertes Kriechen oberflächennaher Sedimente am Hang oder im Böschungsbereich des Sees zurückzuführen sein, welches durch Sichelwuchs der Bäume an der Geländeoberkante bestätigt wird. Die oberflächennahe, als Gleithorizont fungierenden Geschiebemergel begünstigen diesen gravitativen Kriechprozess.

Struktur Groß Flottbek BS9

Die Lokalität liegt in Groß Flottbek. Sie wurde, 1914 als kreisförmige Vertiefung erkannt und als Einbruchstruktur gedeutet. Nach Presseberichten im "Altona'schen Merkur" sollen hier in der Nacht vom 24. zum 25. Januar 1834 fünf Eichen von 30 Fuß Höhe spurlos versunken sein. Um 1895 wurde diese Depression vollkommen verfüllt bzw. sogar überhöht aufgeschüttet. (Lit. in Burman 2009). Durch spätere Setzungen des vermutlich nicht verdichteten Materials entstand wieder eine Senke in der später ein Gartenteich angelegt wurde. Heute ist die Struktur völlig unter Rasen verdeckt, ist aber nach starken Regenfällen als kreisrunde Vernässungszone wieder zu erkennen.

Die Vorerkundung der Struktur erfolgte mit dem Geoelektrikverfahren eingesetzt. Dann wurden zwei Messfelder (Abb. 12) Mf1 (100 MHz Antenne) und Mf2 (200 MHz Antenne) für parallel verlaufende Georadarprofile zur dreidimensionalen Darstellung der Struktur angelegt. Im Erdfallzentrum wurde eine Flachbohrung (Gs1) zur Datenkorrelation abgeteuft.

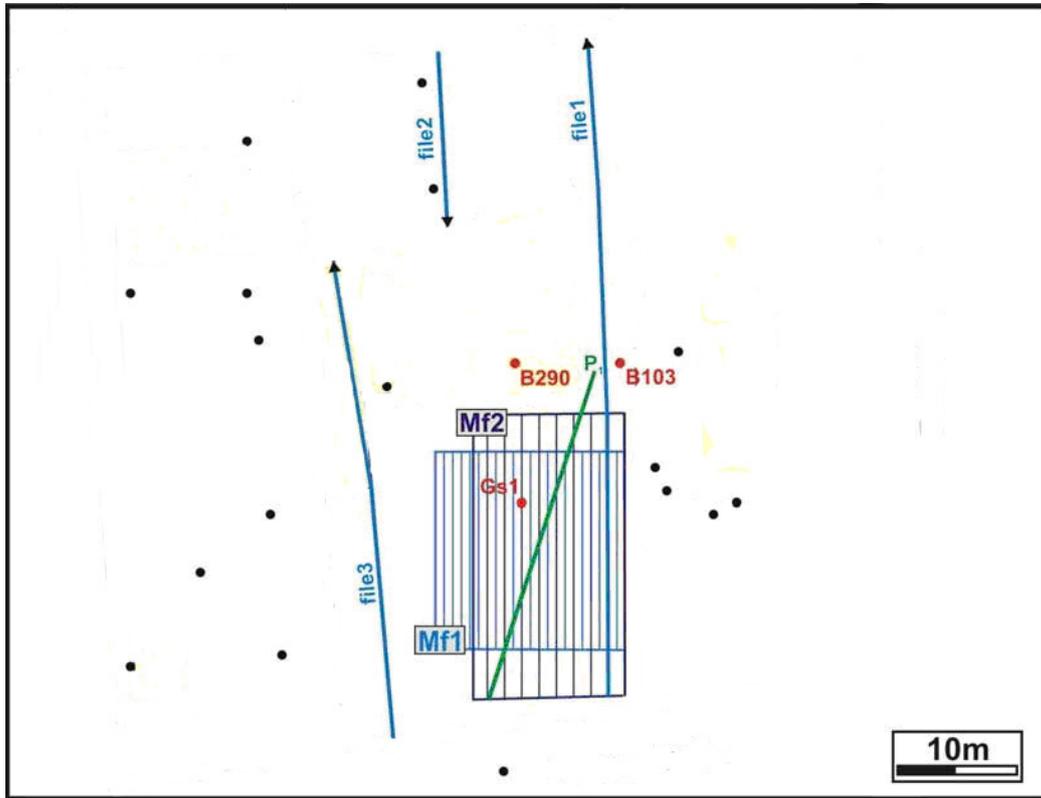


Abb. 12: Lage der GPR Profile 1-3 (blaue Pfeile) mit Zugrichtung der Antennen, Mf1=Messfeld 1, Mf2=Messfeld 2, Geoelektrikprofil P1 (grün); Bohrpunkte (schwarz), Bohrpunkte (rot) zur Korrelation mit GPR Daten (Quelle Bohrpunkte: Geologisches Landesamt Hamburg), Bohrung Gs1 (eigens abgeteuft Bohrung).

Widerstandsgoelektrik: Die Messung erfolgte mit der Anlage Syscal Junior Switch 48 bei einfacher Auslage. Entlang des Profils (P1) wurden zwei unterschiedliche Konfigurationen gemessen (Konfiguration 1: 0,6 m Elektrodenabstand, Wenner-Schlumberger Geometrie mit 775 Quadrupolmessungen, Orientierung der Auslage: SW-NE, Länge 28,2 m. Konfiguration 2: 0,6 m Elektrodenabstand, Dipole-Dipole Geometrie mit 596 Dipolmessungen, Orientierung und Länge wie bei Konfiguration 1) Beide Messungen wurden auf der identischen Auslage durchgeführt und sind direkt miteinander vergleichbar.

Das Profil (Abb. 13) zeigt in Oberflächennähe deutlich hochohmige Bereiche der Auffüllung. Während blaue Farben ab einer Analysetiefe von ca. 2,4 m einen signifikanten Wechsel zu niederohmigen, also gut leitenden Materialien an den Randbereichen signalisieren, bildet sich bei Profilmeter 14,5 ein deutlicher Widerstandskontrast ab. Die farbkodierten höherohmigen Bereiche bilden eine trichterförmige Struktur ab. Während diese Trichterstruktur anhand des durchgängigen Widerstandskontrastes im Südwesten bis zur Geländeoberkante zu verfolgen ist, erstreckt sich der nördliche Strukturbereich vermutlich noch bis über die Sektion hinaus. Die Gesamtstruktur zeigt somit eine leichte Asymmetrie. Im äußersten Nordosten wird der Einfluss des Fundamentes des Mehrfamilienhauses durch die besonders hochohmigen Signale sichtbar.

Bis zur maximalen Analysetiefe wird aus dem sich verjüngenden Trichter eine nur wenige Meter breite Röhre. Die Lage des strukturellen Zentrums liegt bei beiden Inversionsergebnissen bei ca. 14,5 m.

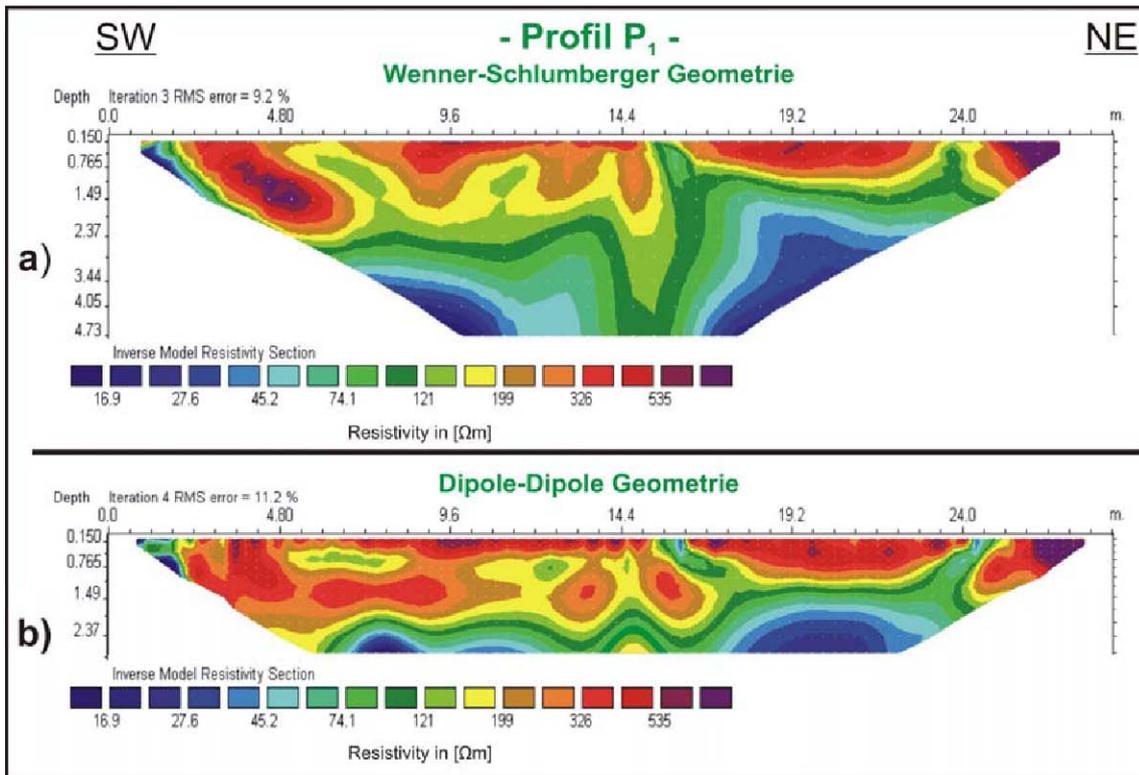


Abb. 13: Graphische Darstellung der Inversionsergebnisse; a) Wenner-Schlumberger Konfiguration, b) Dipole-Dipole Konfiguration.

Georadar: Die geoelektrischen Voruntersuchungen erlaubten eine klare Definition des Untersuchungsbereichs für die Georadaranalyse. Die Struktur Groß Flottbek steht für eine relativ kleinräumige Struktur die mit verhältnismäßig geringem technischen und zeitlichem Aufwand sehr detailliert dreidimensional dargestellt werden kann (Abb. Ende).

Bathymetrischen Vermessung: Der zentrale Bereich des Messfeldes zeigt eine kreisrunde Struktur (Abb. 14). Der zum Zentrum hin stärker werdende Farbwechsel von grün nach gelb bezeugt eine Zunahme des Einfallwinkels der Reflektoren im Untergrund mit der Tiefe und signalisiert den Kragenbereich der Versturzstruktur. Das Erdfallzentrum ist durch rote Farbtöne gekennzeichnet und wird als Versturzröhre interpretiert. Die geographische Lage der zentralen Struktur hat die Koordinaten (559384/5935316). Die maximale Analysentiefe beträgt rund 11 m. Der farbigen bathymetrischen Auswertung der Radardaten wurde ein in Grautönen dargestellter Zeitschnitt (xy-Ebene) unterlegt. Dieser liegt bei einer Analysentiefe von ca. 6 m und unterstreicht die charakteristischen Hauptmerkmale der Kollapsstruktur. Der kreisrunde „glatte“ Außenbereich entspricht dem weit geöffneten Trichter, der markante Kragen ist durch das starke Relief hervorgehoben und die Versturzröhre ist in der Aufsicht durch die unruhigen Reflektoren der Versturzbrekzie in dieser Tiefenlage gekennzeichnet. Der maximale Durchmesser des zentralen Trichters beträgt ca. 8 m, der des Kragens ca. 5,5 m und die Versturzröhre hat einen Durchmesser von 4 m bis 5 m. Diese Werte lassen sich gut mit dem Ergebnis der Widerstandsmessungen korrelieren.

Primärstrukturen: Das Radargramm (Mf1: file19) in Abbildung 15a zeigt einen tomographischen Schnitt von Süd nach Nord durch den zentralen Erdfall. Der kräftige Reflektor einer oberflächennahen Depression mit einem maximalen Durchmesser von ca. 7 m wird als Sohlebereich des ehemaligen Gartenteichs interpretiert. Hier wird der initiale Oberflächenversturz abgebildet. Die horizontalen Reflektoren der Verfüllung dieses primären Versturzkraters an der ehemaligen Geländeoberkante zeigen weder Deformationen noch eine Schüttungsrichtung an und bilden das charakteristische Muster einer anthropogenen Verfüllung, welche später verdichtet wurde. Auffällig ist, dass diese oberflächennahe Depression nicht unmittelbar über der zentralen primären Versturzröhre liegt, sondern oberhalb des nördlichen Kragenbereiches P2 (Abb. 15 b). Die mit dem Georadar erkannte Asymmetrie der Struktur bestätigt die Beobachtung der Geoelektrik. Abbildung 15a und 15b zeigen, dass die südliche Trichterflanke ein deutlich geringeres Einfallen aufweist als die nördliche. Erstere verflacht zum Strukturrand hin immer mehr und der Neigungswinkel nähert sich dem Einfallen der Geländeoberkante. Die nördliche Trichterflanke hingegen hat konstante Einfallswerte. Die Messdaten zeigen, dass sich diese Flanke über das nördliche Ende des Messfeldes bis unter das Mehrfamilienhaus hin erstreckt.

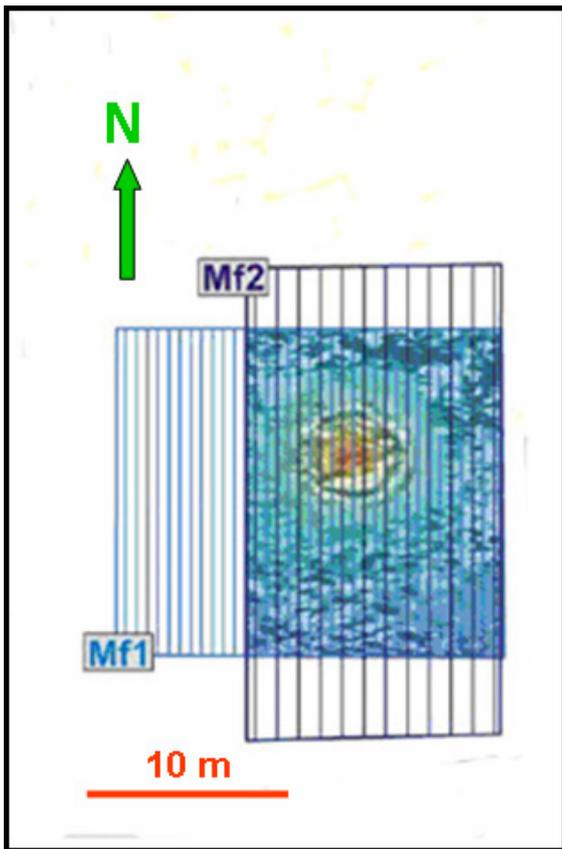


Abb. 14: Bathymetrische Auswertung (halbtransparent) über xy-Schnitt in 6 m Tiefe; grün: Trichter, gelb: Kragenbereich, rotbraun: Versturzhöhle.

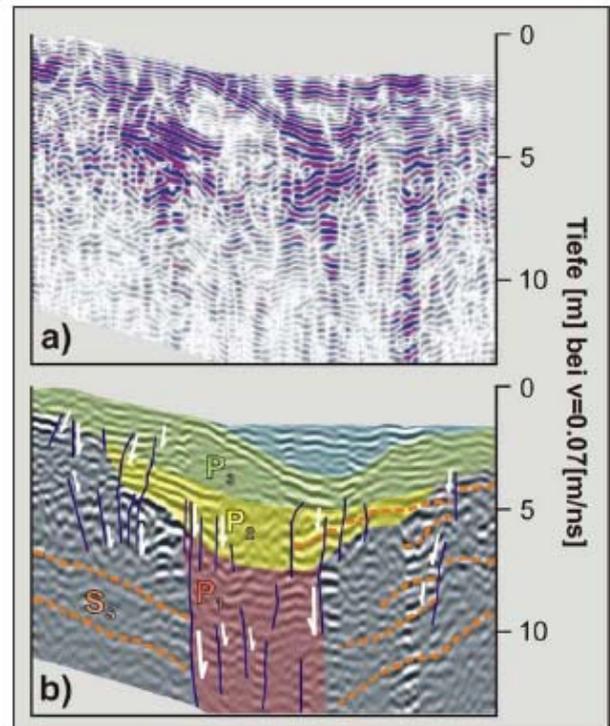


Abb. 15: Radarsektion Mf1-file18 (Länge 17m); a) nicht interpretierte Reflektoren; b) Interpretation: rot=P1-primäre Versturzhöhle, gelb=P2-Kragen, grün=P3-Trichter, hellblau: verfüllter Gartenteich, dunkelblaue Linie=vertikale Gleitflächen, gestrichelte Linie (orange)=S2-sekundäre Rutschflächen.

Unmittelbar im Verjüngungsbereich zwischen Erdfalltrichter P3 und der zentralen Versturzhöhle P1 ist der Kragen P2 durch Reflektoren hoher Impedanz zu erkennen. Diese Reflektoren „reißen“ abrupt an den steilen Abbruchkanten der primären Kollapsröhre ab. Die zerrüttete Verfüllung innerhalb dieses Übergangsbereichs erscheint in der Radarsektion als chaotisches Hyperbelmuster der Versturzbrekkzie und lässt sich bis in den oberen Bereich der primären Kollapsröhre verfolgen. Die Mächtigkeit dieses ehemals aufgelockerten Sedimentes lässt sich auf ca. 3 m abschätzen. In den tieferen Bereichen der Versturzhöhle sind die Reflektoren überwiegend subhorizontal gelagert. Einzelne Pakete hervortretender Reflektoren deuten an, dass innerhalb der Versturzhöhle Sedimentkörper senkrecht aneinander versetzt worden sind. Die Primärstrukturen lassen sich bis zur maximalen Analysetiefe von ca. 11 m gut verfolgen.

Vermessung sekundärer Bewegungsflächen: Wegen der örtlichen Gegebenheiten war die räumliche Analyse der Sekundärstrukturen lediglich in dem Bereich zwischen der primären Versturzhöhle und den Messfeldrändern, sowie unterhalb des Kragenbereiches möglich. Die Distanz zwischen den primären Abbruchkanten der Versturzhöhle und den Messfeldrändern beträgt nach Norden bzw. Süden einer Strecke jeweils 5 m. Innerhalb dieses Analysebereichs treten konzentrisch einfallende Reflektoren sekundärer Bewegungsflächen auf. Die Abb 15 zeigt, dass die Reflektoren der sekundären Gleitflächen im Süden der Versturzhöhle weniger deformiert wurden als die steiler einfallenden Reflektoren des nördlichen Strukturbereiches. Letztere werden entlang vertikal bis subvertikal einfallender Abbruchkanten (Abb. 15, blaue Linien) um mehrere dm aneinander versetzt. Durch die unterschiedlichen Neigungswinkel im Norden und Süden wird die Asymmetrie der Struktur sowohl zu den Randbereichen des Messfeldes als auch bis in die maximale Analysetiefe bestätigt. Vereinzelt treten Muster von linsenförmigen Rutschmassen auf. Eine strukturelle Basis ist innerhalb des gesamten Datenraumes bis in die maximale Analysetiefe nicht zu erkennen. Dieses spricht dafür, dass innerhalb des Datenkubus lediglich das zentrale und schlagartige Versturzereignis vollständig dokumentiert wurde. Die konzentrisch einfallenden Reflektoren sekundärer Deformationen reichen zu allen Seiten über die Ausmaße des Messfeldes hinaus und lassen sich bis in die maximale Analysetiefe verfolgen. Daher muss von einem wesentlich weiträumigeren Subsidenzbereich ausgegangen werden.

Randbereiche der Struktur: Weitere Radarprofilen (file1 bis file3) geben Auskunft ob der zentrale Verstoß im Bereich eines weiträumigeren Subsidenzbereichs liegt. Durch die angrenzende Überbauung konnten keine Parallelprofile zur 3D-Modellierung angelegt werden. File1 verfolgt die Strukturen in der Verlängerung des östlichen Messfeldrandes nach Norden. Auf der Höhe des zentralen Verstoßes, der hier nicht mehr direkt dokumentiert wird, weisen verstellte Reflektoren auf eine deutliche Bodenunruhe hin. Die Radarsektion schneidet in diesem Bereich die Struktur im Streichen der konzentrisch einfallenden Reflektoren, also in einem äußerst flachen Winkel. Da die Lage der Struktur durch die räumliche Analyse bekannt ist, wird aus der Radarsektion gefolgert, dass sich bei einem kontinuierlich geraden Profilverlauf oberhalb dieser Circularstruktur der Antriebswinkel erhöht. Bei Profilmeter 25 bildet sich nahe dem Analysemaximum die undeformierte Basis in horizontalen Reflektoren ab. Oberhalb der Basis steigen diskordant die Reflektoren des äußeren nördlichen Erdfalltrichters bis zum Profilmeter 37 nach Norden an und brechen abrupt an wiederum horizontal gelagerten Reflektoren in ca. 3 m Tiefe unter Flur ab. Das Profil verläuft hier in unmittelbarer Nähe zum Gebäude, so dass es sich bei diesem konstanten horizontalen Radarsignal um Wandeffekte der Kellerwanne und des Fundaments handeln kann. Gestützt wird diese Vermutung durch das Wiederauftreten der nach Süden geneigten Reflektoren nördlich des Mehrfamilienhauses. Auch das Kurzprofil file2 nördlich des Gebäudes zeigt nach Süden geneigte Reflektoren an. Das westlich der Messfelder angelegte Profil file3 kann lediglich auf der Höhe des Messfeldes interpretiert werden, da im weiteren Verlauf das Signal der Tiefgaragenzufahrt aufgenommen wurde. In dem interpretierbaren Bereich der Radarsektion lässt sich eine deutliche Bodenunruhe feststellen. Durch den flachen Antriebswinkel der Struktur besteht jedoch dieselbe Problematik in der Interpretierbarkeit der Daten wie in Profil file1. Trotz des geringen Datensatzes kann davon ausgegangen werden, dass das Gebäude zumindest teilweise auf den peripheren Bereichen der Subsidenzstruktur errichtet wurde. An der Geländeoberkante sind jedoch keine Deformationsstrukturen zu erkennen.

Deformationsstil: Die räumliche Analyse des Zentralbereiches des Erdfalls zeigt drei wesentliche strukturelle Merkmale der Deformation: Sequenzen besonders intensiver Deformation zeichnen sich in der interpretierten Radarsektion (Abb. 15b) in Form von subvertikalen oder vertikalen Abbruchkanten ab (dunkelblaue Linien). Der jeweilige Versatz der an den Abbruchkanten verstellten Reflektoren kann mehrere dm betragen. Durch die Aneinanderreihung mehrerer „gestaffelter“ Versätze bildet sich ein Stufenmuster der Reflektoren aus. Dieses ist nördlich der zentralen Verstoßröhre intensiver ausgeprägt als im südlichen Bereich des Erdfalls, wo die Reflektoren allgemein flacher einfallen. Die Länge jeder Abbruchkante variiert. An dem Hauptabbruch des primären Verstoßes ist die Deformation am stärksten. Entlang dieser saiger stehenden Gleitflächen wird das Massendefizit im Untergrund durch einen schlagartigen Verstoß einer kompakten „Sedimentsäule“ ausgeglichen. In den tieferen Analysebereichen zwischen 8 m und 11 m bleibt die ehemals horizontale Lagerung der verfestigten Sedimente erhalten oder wird nur geringfügig gestört. Teilweise werden auch Pakete horizontaler Reflektoren innerhalb der Hauptverstoßröhre aneinander versetzt. Konzentrisch einfallende Reflektoren außerhalb des Primärverstoßes enden abrupt an den primären Bewegungsflächen. Abbildung 15b zeigt die Abbruchkanten in Form dunkelblauer Linien unterschiedlicher Länge und die verstoßte „Sedimentsäule“ in transparentem rot.

In den weniger intensiv deformierten Bereichen tritt in den Reflektoren ein unruhiges Wellenmuster in Richtung zum Verstoßzentrum hin auf. Die Reflektoren zeigen ein „flexurartiges“ Umbiegen der Sedimente oberhalb und unterhalb der Abbruchkanten im nördlichen Strukturbereich. Südlich des Hauptverstoßes ist dieses Wellenmuster der flacher einfallenden Reflektoren nur schwach ausgeprägt oder fehlt völlig und steht nicht in einem Zusammenhang mit weiteren Abbruchkanten, da diese hier nicht ausgebildet sind (Abb. 14).

Reflektoren von Rutschkörpern bzw. Gleitmassen sind in dem zentralen Bereich des Erdfalls nur gering und undeutlich ausgeprägt. Diese treten oberhalb des Kollapskragens auf und lassen sich bis in den höheren Bereich der Verstoßröhre in Form der Kollapsbrekzie nachvollziehen. Weniger stark zerrüttet sind die Gleitmassen am nördlichen Strukturbereich. Hier treten linsenförmige oder sigmoidale Reflektoren an den am stärksten geneigten „Wellenhängen“ der deformierten Gleitflächen auf.

Mit zunehmendem Abstand vom Verstoßzentrum vermindert sich die Intensität der Deformation signifikant. Der Einfallswinkel der Reflektoren nimmt deutlich ab und nähert sich einem parallelen Verlauf zur Geländeoberkante an. Die undeformierte strukturelle Basis des Erdalles endet erst nördlich des Mehrfamilienhauses an der Geländeoberkante.

Bohrung: In der Bohrung wurden keine oberflächennahen organogenen Sedimente angetroffen für die Datierung angetroffen. Bei der Verfüllung des zentralen Bereiches der Hohlform wurden überwiegend feine Sande und Mergel erbohrt. Aus einer Tiefe von 3,8 m traten Kohlereste und Porzellanscherben zu Tage. Dieses Material weist auf eine junge anthropogene Verfüllung hin ist jedoch nicht als Zeitmarker für Siedlungsaktivität, sondern als zeitgenössischer „Müll“ der Verfüllung von 1895 zu interpretieren. Auf eine weitere Vertiefung der Bohrung wurde verzichtet, da zum

einen aus den umliegenden Referenzbohrungen in größerer Tiefe keine Torfe zu erwarten waren und zum anderen weil die genutzte Bohrausrüstung durch hohe Kohäsion in den Feinsanden an ihre technischen Grenzen stieß. Zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen den oberflächennahen geologischen Informationen und geophysikalischen Daten wurden zwei nahe gelegene Bohrungen B290, B103 mit Gs1 und dem Profil file 1 korreliert. Damit können zwei Leithorizonte erfasst werden (Top Sand, Top Geschiebemergel) – Abb. 16

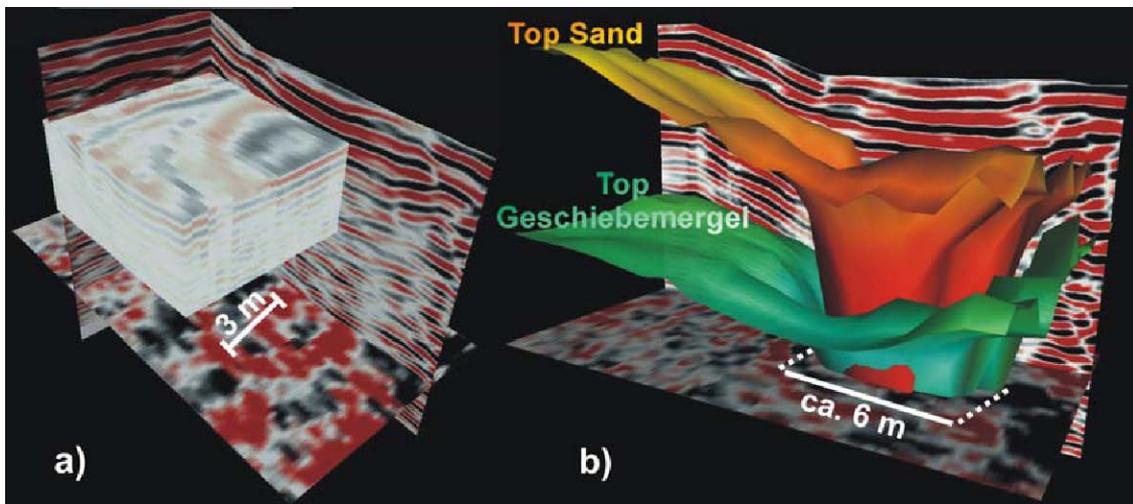


Abb. 16: Visualisierung des 3D-Datensatzes der Erdfallstruktur BS9; **a)** Auflösung der zentralen Struktur in drei Ebenen und einem Volumen-Cubus, **b)** räumliche Interpretation der Erdfallstruktur mittels Korrelation von Bohrdaten und geophysikalischen Daten.

Klassifizierung und Genese: Der ehemalige Oberflächenkollaps ist seit seiner letzten merklichen Aktivität vor rund 175 Jahren zumindest in den Bereichen der Überbauung und der zentralen Versturzhöhle und des ehemaligen Gartenteiches anthropogen verfüllt worden. Da eine rezente Aktivität in Form einer Oberflächen Senke nicht erkennbar ist, wird die Struktur zunächst als **buried-Typ** klassifiziert.

Sowohl die Auswertung des widerstandsgoelektrischen Verfahrens als auch die Georadarmethode zeigen, dass der zentrale Bereich der Struktur durch eine kleinräumige Versturzhöhle mit einem Durchmesser von wenigen Metern und einem engen Kragenbereich gekennzeichnet ist. Das ehemals nahe der Geländeoberkante befindliche Material verstürzte schlagartig in einen sich nach unten hin verjüngenden Trichter und wurde dabei stark zerrüttet. Dieses zeigen die deutlichen Reflektorenmuster der Versturzbrekkzie innerhalb des Kragenbereiches und der oberen Versturzhöhle an. In den tieferen Sektionen der Kollapshöhle sind einzelne Pakete des kompakten Versturzmateriale aneinander versetzt. Die hohe primäre Versturzenenergie zeigt sich auch außerhalb der primären Abbruchkanten, besonders in den steiler einfallenden Reflektoren des nördlichen Kollapstrichters. Unabhängig einer Materialänderung werden die Reflektoren deutlich aneinander versetzt oder flexurartig verbogen. Zu beobachten sind interne konzentrisch gleitende Rutschmassen. Da der primäre Kollapstrichter einen Durchmesser von 10-15 m nicht überschreitet, führte dieses primäre schlagartige Subsidenzereignis zur Ausbildung eines **dropout-Typ** Erdfalles. Die asymmetrische Form der Struktur ist auf das primäre Versturzenereignis zurückzuführen, da diese ungleichmäßige Gestalt durch die deformierten Reflektoren belegt wird. Somit scheiden sekundär eingetragene Kolluvien oder sich unmittelbar nach dem Versturz bildende Erosionsflächen durch Wassereintrag aus.

Die Intensität des kleinräumigen Versturzes wird ebenfalls durch den reliktsch erbohrten Kulturschrott der Verfüllung in 4 m Tiefe unter Flur deutlich. In dieser Tiefe bildet sich mit dem Muster unruhiger Reflektoren die Oberkante der zerrütteten Versturzbrekkzie ab, welche unmittelbar nach dem Versturz den „Boden“ des Kraters bildete und eine Mächtigkeit von 3 m bis 4 m aufweist. Der Krater selbst zeigte einen nur unwesentlich größeren Durchmesser von 5 m bis 8 m. Anhand der Betrachtung nahe gelegener Bohrungen wird deutlich wie es zur Ausbildung und dem statischen Erhalt einer derart steilen Röhre bis nahe an die Geländeoberkante kommen konnte. Die Bohrungen belegen durchweg eine geringmächtige Auflage von Feinsand. Darunter folgt eine mächtige Abfolge bindiger Sedimente aus Geschiebemergeln.

Unklar ist die Entwicklung der Struktur in den peripheren Bereichen der Hohlform. Der vorhandene Datensatz lässt auf einen deutlich größeren Durchmesser der Gesamtstruktur von mehr als 30 m schließen. Hier wird die undeformierte Basis sichtbar und definiert das strukturelle Ende in horizontaler als auch in vertikaler Ausbreitung. Die Reflektoren fallen deutlich flacher ein als in Versturznähe und auch die Deformations- und Bewegungsmuster sind weniger intensiv

ausgeprägt. Eine mögliche Erklärung wäre ein einsetzender Prozess sedimentären Kriechens zum Erdfallzentrum hin. Dieser Prozess würde durch die geologischen Gegebenheiten begünstigt, da die zum Erdfallzentrum hin geneigten bindigen Böden als Gleithorizont für die feinen Sande dienen können. Bei ausreichender Bodenfeuchte reichen für diesen Prozess bereits Neigungswinkel von 3-5° aus. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass die peripheren Strukturen durch eine weiträumige Subsidenz geringer Versatzbeträge hervorgerufen wurde.

Im Verlaufe der Untersuchungen wurden keine eindeutigen rezenten Bewegungen an der Geländeoberfläche erkannt. Straßenrisse und mündliche Überlieferungen aus der Nachbarschaft weisen hingegen auf Bewegungen im oberflächennahen Untergrund hin. Ein direkter Nachweis auf einen Zusammenhang mit der Erdfallstruktur Groß Flottbeke konnte nicht hergestellt werden.

Struktur Pfitzner/Bauerstraße

Die Lokalität (Struktur BS12 in Buurman 2009) befindet sich im Bezirk Altona auf einer freien Rasenfläche zwischen der Pfitzner- und der Bauerstraße. Während umfangreicher baulicher Maßnahmen zur Errichtung mehrerer Hochhäuser in den späten 60er Jahren und bei der Einrichtung weiterer Sportanlagen im Bereich der Pfitznerstraße und Bauerstraße wurde die Geländeoberkante durch Auskofferungsarbeiten sowie durch (Teil-) Verfüllungen von Senken stark verändert.

Für das HADU Projekt war eine sichelförmige, teilverfüllte Hohlform südlich des Sportplatzes von besonderem Interesse. Diese Depression ist zum Teil mit Bauschutt verfüllt und zeigt zwischen den steilen Randbereichen und dem Zentrum einen Höhenversatz von ca. 1,5 -2 m. In dem zentralen Strukturbereich und an den Böschungen hat sich eine üppige Sumpflvegetation ausgebildet, zeitweise ist die Senke mit Wasser gefüllt.

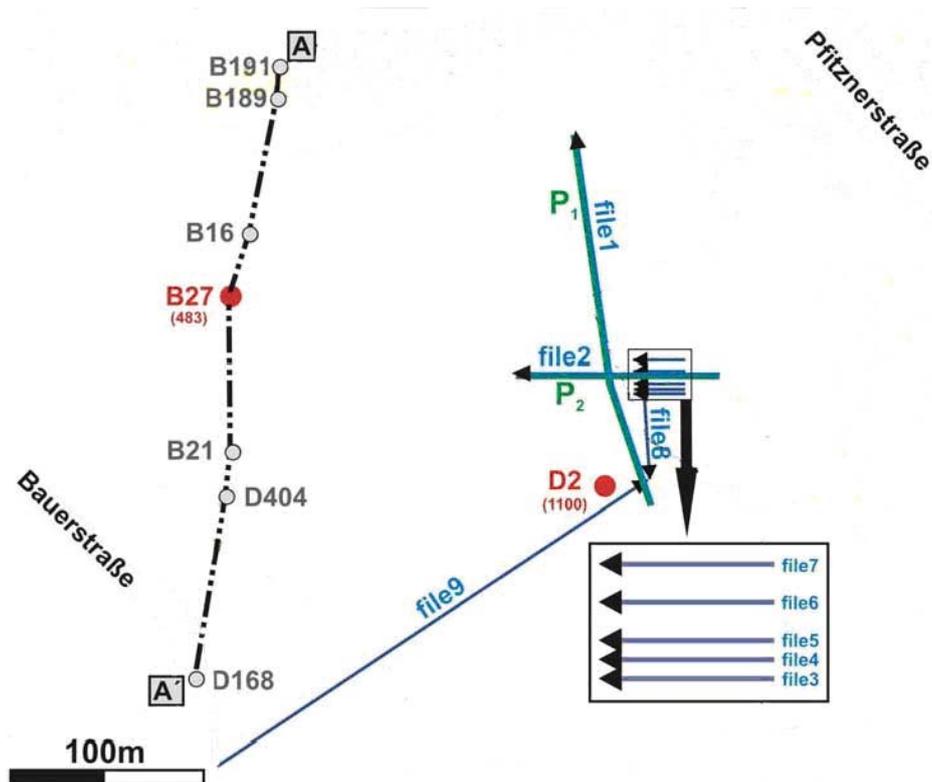


Abb. 17: Geographische Lage der Struktur Pfitzner/Bauerstraße; GPR Profile mit Zugrichtung der Antennen (blaue Pfeile), Geoelektrikprofile (grün); Bohrpunkte (grau); Wiederholungsbohrungen/ Probenahmen für Altersdatierungen (rot); Lage des geologischen Profils A-A' (schwarze Strich-Punkt Linie).

Diese Struktur wurde mittels Widerstandsgeoelektrik sowie mit dem Georadar untersucht. Neben der Auswertung bestehender Bohrdaten wurden zusätzliche Bohrungen zur Altersdatierungen an Torfen verschiedener Tiefensektionen durchgeführt. Die Lage der geophysikalischen Messprofile sowie die ausgewerteten Bohrpunkte zeigt die Abb. 17.

Widerstandsgoelektrik: Die Messungen der kreuzförmig angelegten Goelektrikauslage (mit Syscal Junior Switch 48) erfolgte in der Wenner-Schlumberger Konfiguration. Aufgrund der unterschiedlichen Profillängen wurden verschiedene Elektrodenabstände gewählt. Die beiden Auslagen lassen sich wie folgt beschreiben: Profil **P1** mit 500 cm Elektordenabstand in Wenner-Schlumberger Geometrie mit 544 Dipolmessungen; Orientierung der Auslage in N-S Richtung; Länge 175 m; Schnittpunkt mit Profil **P2** bei 60 m. Profil **P2** mit 200 cm Elektordenabstand in Wenner-Schlumberger Geometrie mit 590 Quadrupolmessungen, Orientierung der Auslage in E-W Richtung, Länge 94 m; Schnittpunkt mit Profil **P1** bei 50 m. Die genaue Beschreibung der Messung findet sich in Buurman (2009)

Profil **P1** erreicht eine maximale Analysetiefe von ca. 34 m unter Flur. Nach ca. 38 m Profillänge zeichnet sich innerhalb der ersten 10 Tiefenmeter eine besonders hochohmige Zone ab. Diese endet nach ca. 118 m in nördlicher Richtung und entspricht annähernd dem geographischen Verlauf des Senkenbereichs der Geländeoberkante. Signifikant sind zwei lokal voneinander getrennt auftretende Tiefenmaxima innerhalb des Profilverlaufes. Das südliche Maximum befindet sich nahe 48 m Profilauslage und erreicht eine Tiefe von ca. 12 m. Das zweite Maximum liegt bei 110 m Auslagenlänge und endet bereits nach ca. 8 Tiefenmetern. In der nächsten Tiefensektion, ungefähr in der Mitte des Profils bei Auslagenlänge von 85 m, folgt zunächst ein Bereich geringen elektrischen Widerstandes. Da keine direkte Zuordnung von Materialien bzw. Gesteinen möglich ist, lässt sich hier aufgrund von nahegelegenen Bohrungen mutmaßen, dass es sich in dieser Tiefenlage um eine gut durchfeuchtete, humose Sedimentlage handelt (Torf oder Mudde). Darunter folgt eine weitere hochohmige Zone. Diese erstreckt sich bis zur maximalen Analysetiefe von ca. 34 m. Das geoelektrische Profil charakterisiert somit einen trichterförmigen, überwiegend hochohmigen Bereich, dessen maximale Ausdehnung nahe der Geländeoberkante ca. 80 m beträgt und in den tiefsten Niveaus zwischen 10 m und 20 m liegt. Das Muster der Widerstandsverteilung von Profil **P1** ist komplementär zu dem Ergebnis von Groß Flottbek, wodurch die erste Interpretation der Struktur als Erdfall gestützt wird. Die zwei oberflächennahen Tiefenmaxima des oberen hochohmigen Bereiches deuten an, dass es oberflächennah zu zwei separaten Geländeeinbrüchen gekommen ist. Das Versturzmateriale wurde von dort aus in Richtung des tiefer gelegenen Zentralbereiches gravitativ abtransportiert. In Abbildung 18a ist die Widerstandsverteilung der Wenner-Schlumberger Messung sowie der RMS-Fehler der dritten Iteration angegeben.

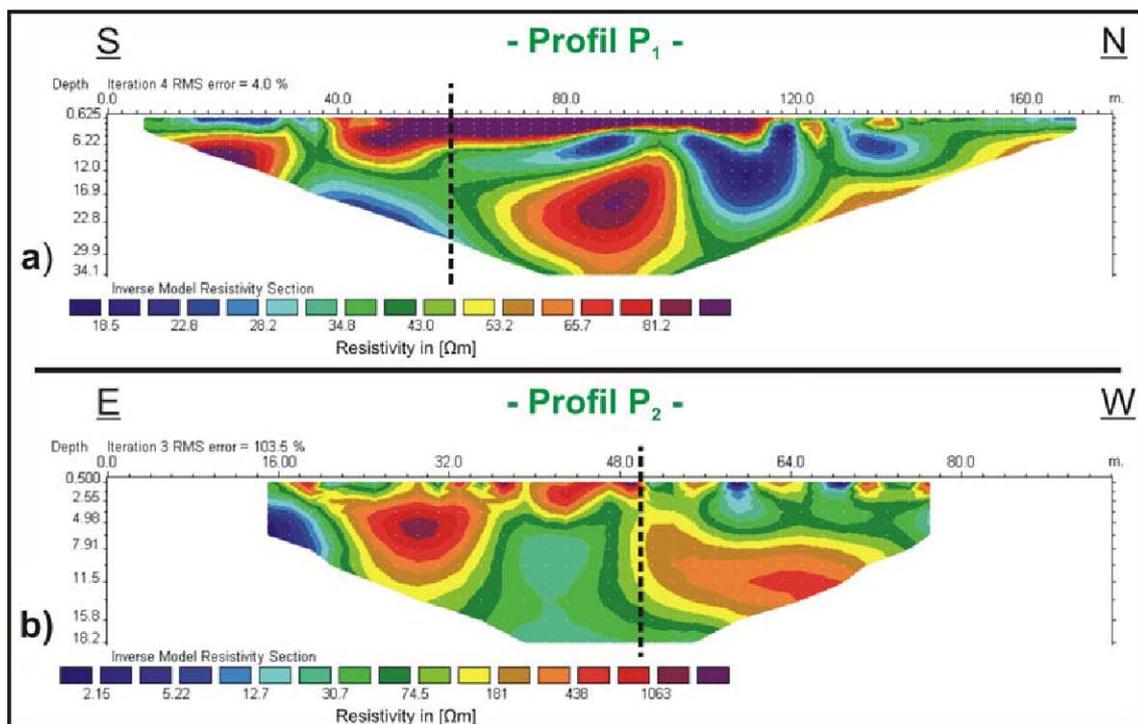


Abb. 18: Profile der Widerstandsgeoelektrik, a) N-S Profil **P1** mit einem Elektrodenabstand von 5 m, b) E-W Profil **P2** mit einem Elektrodenabstand von 2 m.

Bedingt durch die Unterschiede in der Auslage sind die Messwerte von Profil **P2** nicht direkt mit denen von Profil **P1** korrelierbar. Aussagekräftig ist die Widerstandsverteilung jedoch innerhalb der Inversion. Der geringere Abstand zwischen den Elektroden von 2 m bei einer Profillänge von 94 m führt zu einer Analysetiefe von nur ca. 17 m. Auf den ersten 15 m der Auslage machen sich Randeffekte des Hochhausfundaments, Gehwegplatten und intensive Effekte der Auffüllung bemerkbar, so dass einige Analysepunkte für die Auswertung vernachlässigt werden mussten. Eine hochohmige Zone im Bereich ab ca. 16 m markiert den Senkenrand. Bei ca. 50 m schneiden sich die beiden Geoelektrikprofile. Hier beginnt ein weiterer hochohmiger Bereich unterhalb des Zentralbereiches der Senke. Auch wenn die Messwerte von Profil **P2** von deutlich geringerer Qualität sind als die von Profil **P1**, so markieren sie doch die Rand- und Zentralbereiche der Depression im Untergrund in E-W Richtung des südlichen Strukturbereiches.

Die Widerstandswerte der Wenner-Schlumberger Messung sowie der RMS error der dritten Iteration sind in Abbildung 18b gegeben.

Georadar: Weiterführende Untersuchungen der Hohlform wurden mittels 100 MHz sowie 200 MHz Antennen durchgeführt. Die Messstrecken entsprechen von ihrem geographischen Verlauf den Profilen 1 und 2 der Widerstandsgeoelektrik und dienen der detaillierten geometrischen Vermessung der Hohlform im oberflächennahen Untergrund. Zur Klärung des Deformationsstils wurden jeweils fünf weitere Parallelprofile mit ca. 90° gegen den östlichen Strukturrand gelegt. Die maximale Analysetiefe beträgt ca. 11 m.

Ergebnisse der bathymetrischen Vermessung: Die geographische Ausbreitung und die Geometrie der Struktur im Untergrund entsprechen der Depression an der Geländeoberkante. Die ausgelängte Hohlform im Süden und im Norden jeweils ein separates Tiefenmaximum innerhalb des Profilverlaufes und stützt die Ergebnisse der Widerstandsmethode. In Abbildung 19 ist die bathymetrische Auswertung der Radarsektionen abgebildet. Die aus weiteren Radardaten interpolierte Struktur ist in schwachen Farben hinterlegt und deutet die geographische Lage und die Form der Hohlform(en) unter der Geländeoberkante an.

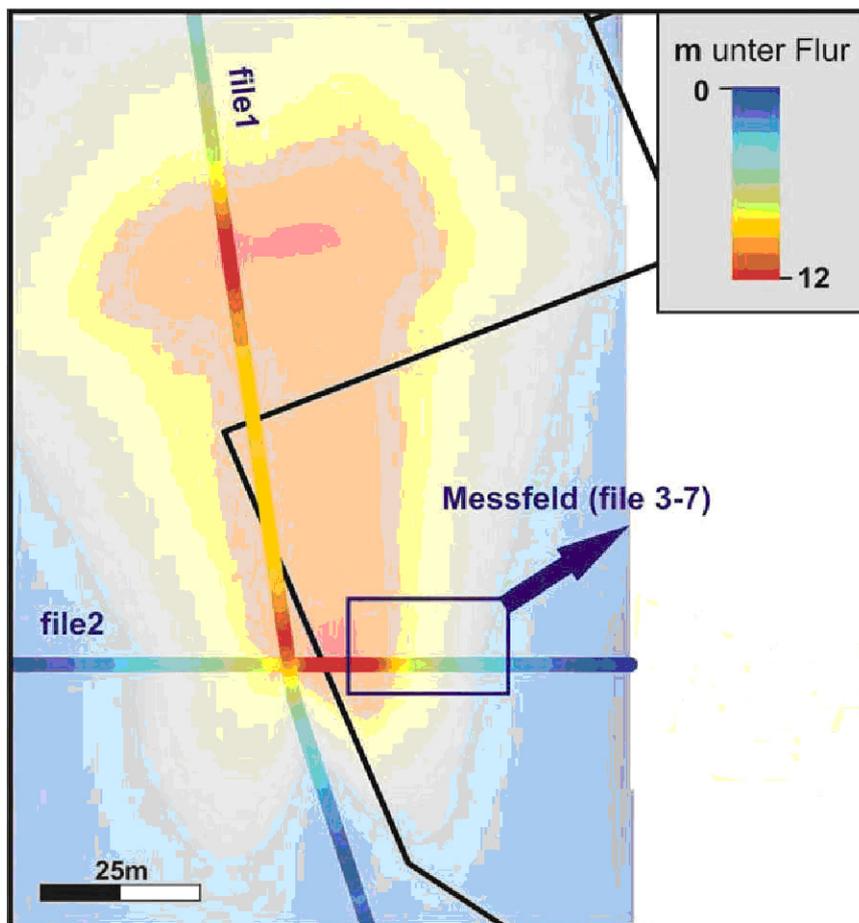


Abb. 19: Bathymetrische Auswertung der GPR-Sektionen file 1-7 mit einer maximalen Tiefendifferenz von ca. 15m; rot=Tiefenmaximum, dunkelblau=max. Höhenlage des Profils (Basisreflektor im Niveau der GOK des Strukturrandes).

Vermessung der Primärstrukturen: Die zentralen Bereiche über den geophysikalischen Tiefenmaxima sind schlecht begehbar sodass hier die Messbedingungen eingeschränkt sind. Die beiden Tiefenmaxima werden als zwei getrennt voneinander kollabierte Bereiche der Geländeoberkante interpretiert deren räumliche Nähe zueinander zur Ausbildung einer länglichen Hohlform führte. Die primäre Abbruchstruktur im Süden der Senke wird von den beiden Radarprofilen 1 und 2 gekreuzt sowie von der Geoelektrik bestätigt (Zentrum Koordinaten 559838/5935112). Um den Charakter dieses Erdfalls zu bestimmen, wurden nahe der südlichen primären Abbruchkante die Randstrukturen detailliert analysiert. Dabei konnte die primäre Abbruchkante der Versturzhöhle zumindest teilweise von den Profilen 3 bis 7 erfasst werden. Die Abbildung 21 und 22 zeigen die Geometrie dieses Versturztrichters. Die Verfüllung der Versturzhöhle selbst, die Versturzbrekkzie, ist durch horizontal gelagerte und aneinander versetzte Reflektoren charakterisiert. Die Versturzbrekkzie lässt sich vom Analysemaximum bis in ca. 5 m unter Flur verfolgen und markiert in dieser Tiefenlage den Übergang zum Kragenbereich des Versturztrichters. Ergänzend zur südlichen Struktur wurde die Lage des nördlichen Oberflächenkollapses abgeschätzt (Koordinaten 559827/5935173).

Vermessung sekundärer Bewegungsflächen: Die fünf Parallelprofile zur detaillierten Vermessung des Randbereiches beginnen von einer Basislinie aus im ungestörten Bereich östlich der Struktur nahe dem Hochhaus Nr.4. Die Profile 3, 4 und 5 liegen in einem Abstand von 2,5 m zueinander. Der Abstand zwischen Profil 5, 6 und 7 beträgt jeweils 5 m. Jede Sektion hat eine Länge von ca. 25 m (Abb. 17). Das Radargramm 5 (Abb. 21) zeigt nach 5 m Profilverlauf die deutlich verstellten Reflektoren des Randbereiches nahe der östlichen Böschung, welche die sekundären Bewegungsflächen bilden. Hier liegt die undeformierte Basis in einer Tiefe von ca. 6 m und bildet die unterste sekundäre Bewegungsfläche. Die Tiefenlage der Basis nimmt in Richtung der Primärstruktur deutlich zu und verschwindet schließlich mit der primären Bewegungsfläche der Versturzhöhle in der Tiefe. Der Neigungswinkel der verstellten Reflektoren im Untergrund nimmt zum Strukturrand hin ab. Somit dünnt der Bereich deformierter Sedimentschichten innerhalb der Böschungen aus und reicht nur geringfügig über die Dimensionen der Geländevertiefung hinaus. Zum strukturellen Zentrum hin versteilen sich die Reflektoren konzentrisch und enden an der subvertikal einfallenden primären Abbruchstruktur.

Die Randbereiche der Struktur: In den weiteren Profillinien 8 & 9 bzw. peripheren Profilabschnitten der Sektionen 1 & 2 bestätigen sich die Ergebnisse aus den Analysen des Strukturrandbereiches. Die undeformierte Basis steigt mit zunehmender Distanz von der Primärstruktur an. Darüber gelegene Reflektoren flachen weiter ab und dünnen aus. Ebenso nimmt der Deformationsgrad der Reflektoren in den peripheren Bereichen ab. Dennoch kommt es zu gravitativen, konzentrischen Bewegungen im Untergrund, welche sich bis an die Geländeoberkante durchpausen. Neben den leicht deformierten Reflektoren im oberflächennahen Untergrund lässt sich dieses eindeutig anhand der Ausbildung von kleinen Geländestufen im südlichen Peripherbereich der Struktur belegen. Die Fotos (Abb. 20a und b) zeigen, wie das Gelände mit treppenstufenartigen Versätzen zum südlichen Strukturzentrum hin abfällt.



Abb. 20: Depression zwischen Pfitzner und Bauerstraße: Der Blick nach Westen auf den südlichen Randbereich der Struktur zeigt die Ausbildung von Geländestufen als Resultat von Bodenbewegungen die in Richtung des südlichen Erdfallzentrums erfolgten.

Deformationsstil: Die Struktur Pfitznerstraße weist vier verschiedene Deformationsstile auf. (1) Ein Bereich horizontal bzw. subhorizontal gelagerter Reflektoren ab einer Tiefe von ca. 6m und tiefer = ungestörte Lagerung der Schichten im Untergrund im östlichen Randbereich der Struktur. Diese Zone ist in den Abbildungen 5P und 6P als **Z1** in grauer Farbe gekennzeichnet und dünnt ungefähr 4 m vor Beginn der Primärstruktur am unteren Rand der Radarsektion aus.

(2) Diskordant darüber liegt die unterste Bewegungsfläche, die randliche strukturelle Basis (**Z2a**). Dieser Reflektor ist mit ca. 20° zum Strukturzentrum hin geneigt, kaum deformiert und wird als Gleithorizont interpretiert. Oberhalb dieser Basis lassen sich zum strukturellen Zentrum hin Rutschungen und kleine Versätze erkennen. Die Basisfläche ist in Abbildung 21 und 22 in braunen Farbtönen dargestellt. Mit Zunahme des Neigungswinkels der durchgängigen Gleithorizonte, häufen sich die Muster des Rutschmaterials. In Abbildung 21 und 22 ist der nur leicht deformierte durchgängige Gleithorizont (**z2b**) in orange dargestellt.

(3) Erhöht sich der Neigungswinkel weiter oder nähert sich ein Reflektor dem Bereich eines schlagartigen gravitativen Massentransportes nahe der Primärstruktur, führt dies zur Ausbildung von Abbruchkanten. An diesen steil stehenden Bewegungsflächen werden sowohl Rutschkörper als auch Gleitflächen ähnlich einer steilen Abschiebung aneinander versetzt. In den Abbildungen 21 und 22 sind die Abbruchkanten in blauer Farbe gekennzeichnet, die grüne Fläche (**z3**) beschreibt den an den Abbruchkanten versetzten Reflektor. Die Versätze variieren hier im Bereich mehrerer Dezimeter.

(4) Die zentrale Zone (**z4**) ist durch eine primäre Versturzröhre gekennzeichnet. Diese Röhre wird von den subvertikalen oder vertikalen primären Abbruchkanten gebildet, an denen schlagartig Material gravitativ senkrecht nach unten versetzt wurde. Das Muster der subhorizontalen Reflektoren dieses Versturzmaterils lässt sich bis zum Tiefenmaximum hin verfolgen. Der obere Bereich der Versturzröhre weitet sich oberhalb des Kragenbereiches zu einem Trichter. Am Kragen der Versturzröhre endet sowohl die primäre Abbruchkante als auch die Versturzbrekkzie. Darüber und randlich der Primärstruktur fallen die Reflektoren zum Trichtermittelpunkt hin ein. Nahe der Geländeoberkante deuten die Reflektoren ungestörte und keilförmige Strukturen an. Dabei handelt es sich entweder um anthropogene Verfüllungen oder um Paläooberflächen kolluvialer Einträge, welche vom Rand her die Depression des ursprünglichen Oberflächenkollapses verfüllen.

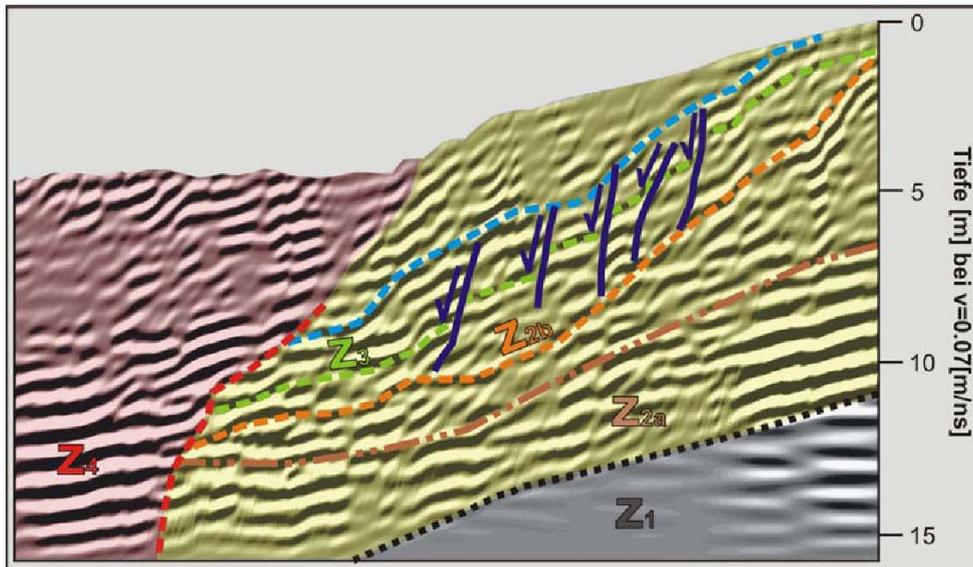


Abb. 21: Radarsektion file 5 (Länge 25m): Deformationsmuster des östlichen Randbereiches der Struktur Pfitzer Strasse bis zum Kollapszentrum. **z1**=undeformierte Gesteine; Sekundärstrukturen (transparent gelbe Zone): schwarze Punktlinie=strukturelle Basis; **z2a**=Zone leichter Deformationen mit Ausbildung von Gleithorizonten (braune Linie); **z2b**=Zone intensiver Deformation mit deutlich verkipptem Reflektor der Gleitfläche (orangene Linie) und Rutschkörpern drüber; **z3**=Zone signifikanter Deformation mit an Abbruchkanten (dunkelblaue Linien) versetzten Gleitflächen (grüne Linie) und Rutschmassen; primäre Versturzzone (transparent rote Zone): **z4**=Zone der primären Versturzstrukturen; primäre Abbruchkante (rote, vertikal bis subvertikal verlaufende Strich-Linie), Versturzbrekkzie (horizontale Reflektoren) - darüber deuten sich keilförmige (kolluviale oder anthropogene) Verfüllungen an.

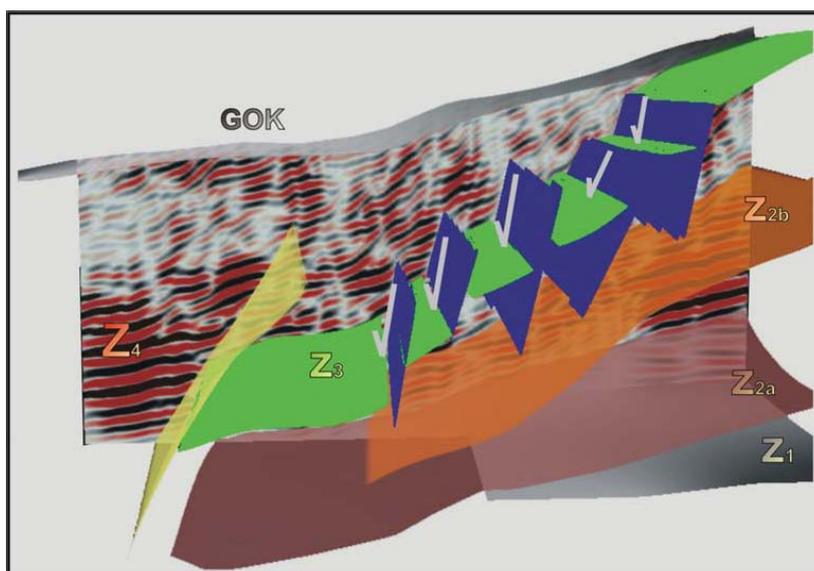


Abb. 22: 3D-Modell der Deformationsstrukturen und Bewegungsindikatoren des östlichen Randbereiches der Hohlform S12 bis zum Versturzzentrum, generiert aus den Radarsektionen file 3-7. Die Zonierung entspricht Abb. XE, die primäre Abbruchfläche ist hier in gelber Farbe dargestellt.

Bohrungen zu Altersdatierung: Die erste Bohrung liegt nahe dem südlichen Strukturzentrum der Hohlform (Abb. 17 Punkt D2). Die zweite Bohrung diente zum einen als Vergleichsbohrung, zum anderen der weiteren Charakterisierung der übergeordneten Struktur „Bahrenfelder Senke“ sowie dem Höhenmodell der Sedimente der Senke, welches im Kapitel Bohrungen besprochen wird.

Ein weiteres Argument für die Auswahl der zweiten Bohrlokation liefert die historische Recherche des Bebauungsplans. Diese hatte ergeben, dass nach einer Bohrlochsprennung (Bodenuntersuchungen für eine geplante Elbehochbrücke) im Jahre 1938 eine Erdsenke von etwa 2000 qm eingetreten war (unveröff. Gutachten FULDA 1938). Die Labilität des Deckgebirges (und des Gipsshutes) im Bereich der Bahrenfelder Senke war somit bekannt und erklärt, warum ein weiter Bereich dieses Gebietes erst in den 1960er Jahren bebaut wurde. Auch heute sind flächenhaft lediglich Sportanlagen jedoch wenige Gebäude errichtet worden.

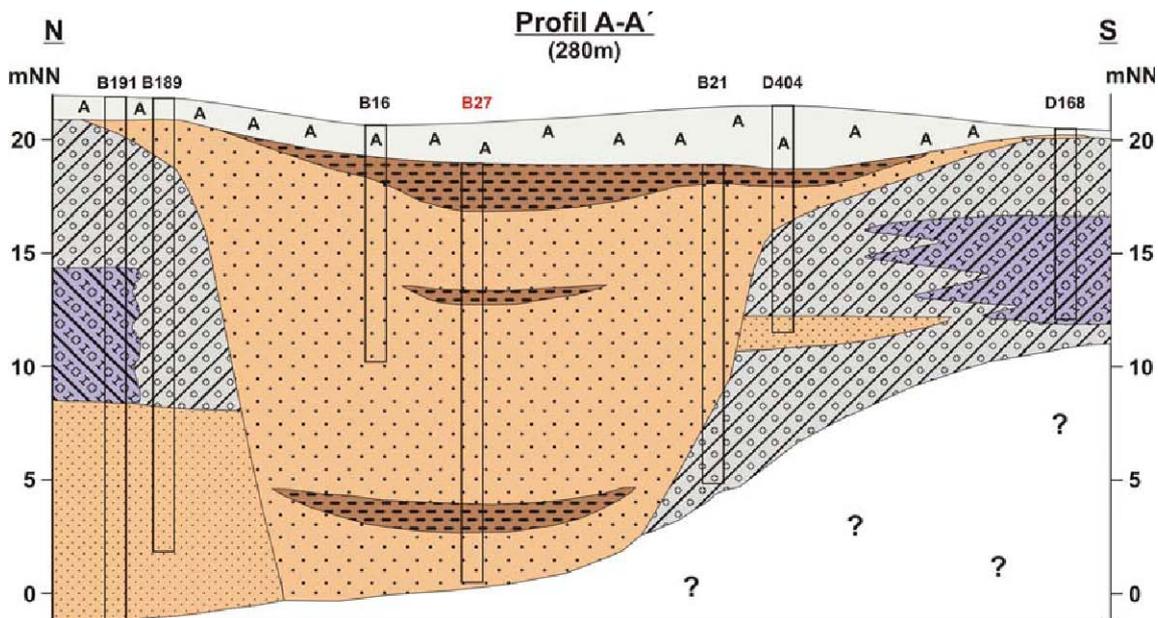


Abb. 23: Das geologische Profil A-A' (6fach überhöht) zeigt eine nach unten geöffnete Hohlform. Die Verfüllung besteht aus Mittel- und Feinsanden. Die Randbereiche sind durch bindige Böden charakterisiert. Drei kleinräumige Torfhorizonte unterschiedlicher Tiefenlage wurden altersdatiert und dienen als Referenz zu den Torfen der Hohlform S12; orange=Sand, braun=Torf, grau=Geschiebelehm, lila=Geschiebemergel, grau "A"=anthropogene Auffüllung (Quelle der Bohrdaten: Geologisches Landesamt Hamburg).

Unter Berücksichtigung der möglichst zentralen Lage innerhalb der Bahrenfelder Senke, dem Höhenmodell des Salzstockes und der oben angeführten Argumente wurde als zweite Bohrung eine Wiederholung der Altbohrung B27 (483) durchgeführt und beprobt. Die Altbohrung B27 wurde bereits zu einem Zeitpunkt vor der anthropogenen Verfüllung der Depression abgetäuft. In Abbildung 17 sind die Bohrlokalitäten dargestellt. Das geologische Profil A-A' (Abb. 23) setzt die Bohrung B27 in einen geologischen Zusammenhang mit der Gesamtstruktur. Das Profil dokumentiert die zentrale Lage der Sondierung innerhalb einer verdeckten Hohlform. Angetroffen und beprobt wurden drei kleinräumige Torfbildungen unterschiedlicher Tiefen. Nach RICKERT (2008) weisen diese gegenüber der Altbohrung geringere Mächtigkeiten auf. Die Verfüllung der Hohlform besteht neben den biogenen Sedimenten aus feinen und mittleren Sanden. In den Randbereichen wurden bindige Sedimente, Geschiebelehm und Geschiebemergel nachgewiesen. Das Profil bestätigt hier das Untergrundmodell der Bahrenfelder Senke (Kapitel 5) und zeigt, dass auch verfüllte und maskierte Hohlformen im Untergrund durch das Höhenmodell aufgespürt werden können.

Eine vollständige Bearbeitung der Pollenanalyse findet sich in dem projektinternen Bericht von RICKERT (2008). Die Beprobung der oberen Torfe (4,57 - 4,66 m) beschreibt ein zeitliches Spektrum von Atlantikum (9000 - 5750) über Subboreal (5750 - 2750) bis zum (mittleren) Subatlantikum (1000 - 400 nChr.). In den Bereichen zwischen 7,55 m und 9,40 m sind die datierten Proben nicht eindeutig zuzuordnen. Sicher lässt sich jedoch aussagen, dass diese Proben deutlich älter sind und nicht mehr dem Boreal zugeordnet werden können. Rickert diskutiert anhand der Pollenspektren die Bildungszeit der biogenen Sedimente innerhalb eines Interstadials der Weichsel-Kaltzeit, hält aber auch einen

Bildungszeitraum im späten Eem für möglich. Der Nachweis der Wasserpflanze *Myriophyllum spicatum* und Algen der Gattung *Pediastrum* ab einer Tiefe von 9,14 m zeigt, dass es sich hier entgegen dem Verzeichnis der Bohrung B27 des geologischen Landesamtes Hamburg nicht um einen stark humosen bis torfigen Feinsand handelt, sondern um eine sandige Mudde/Sandmudde bzw. einen Feinsand mit eingeschalteten Muddelagen.

Weitere Differenzen zwischen den biogenen Sedimenten der beiden Bohrlokalitäten können anhand der eindeutig datierten, oberen Torfe dargestellt werden. Die Torfe des mittleren Subatlantikums (2000 bis 1000 aBPcal) treten in der Peilstangenbohrung im Bereich ab 0,61 m unter der Geländeoberkante auf, dieses entspricht in Bohrung B27 20,08 mNN. Die gleich alten Torfe treten hingegen in Bohrung 1100 bei 17,83 mNN auf. Da es sich um Niedermoortorfe handelt, deren Bildung im Bereich des mittleren Grundwasserspiegels erfolgte, kann dieser „Sprung“ von rund 2,2 m erst nach der Bildung der Torfe erfolgt sein. Der Grundwasserspiegel muss bei der geringen Entfernung der Bohrpunkte zueinander ehemals in der gleichen Tiefe gelegen haben. Dies deutet auf ein lokales Absinken zumindest der Struktur BS12 des heute tiefer liegenden Torfes hin. Sollte es sich bei der maskierten Hohlform ebenfalls um einen Erdfall handeln, so kann hier von einem „relativen“ höheren Absenkungsbetrag der Struktur BS12 von 2,2 m gegenüber der maskierten Hohlform ausgegangen werden.

Klassifizierung und Genese: Bedingt durch eine zumindest teilweise erfolgte anthropogene Verfüllung der Kollapsstruktur wird dieser Erdfall zunächst seinem Erscheinungsbild an der Oberfläche als **buried-Typ** klassifiziert. Die Auswertung geophysikalischer Daten des südlichen Strukturbereichs der Hohlform BS12 zeigt das charakteristische Muster eines schlagartigen Kollapsereignisses. Der Genese nach wird der Erdfall entsprechend als **dropout-Typ** klassifiziert. Dieser bildet im Allgemeinen kleinräumige und kreisrunde Oberflächeneinbrüche aus. Die elongierte Oberflächenstruktur lässt sich durch das nahegelegene nördliche Kollapszentrum erklären. Die Distanz zwischen den beiden Erdfällen ist so gering, dass es zwischen den Einbruchtrichtern zu Überlappungen der Randbereiche kommt. Entsprechend einer „Schnittmenge“ wurde aus dieser Zone Material in beide Einsturztrichter transportiert. Der Gesamtbetrag des bewegten Materials ist hier also deutlich höher als in den anderen Randbereichen. Somit kommt es zur Ausbildung einer einzigen, deutlich größeren und sichelförmigen Depression. Die tieferen Sektionen der Widerstandsgeoelektrik deuten an, dass sich der eigentliche Massentransport im Untergrund durch nur eine zentrale Zone zwischen den Oberflächeneinstürzen vollzieht. Aus diesem Grunde muss die gesamte Hohlform als Kollapsstruktur angesehen werden, deren Hauptcharakteristik in mehreren und räumlich voneinander getrennten Oberflächeneinbrüchen besteht. Kleinräumige „stockwerkartig“ auftretende Torfbildungen, sowie die nahegelegene Torfbildung gleichen Alters aber unterschiedlicher Tiefenniveaus stützen diese Beobachtung. Eine sichere zeitliche Zuordnung der Erdfallaktivität kann auf einen Zeitraum nach der Bildung der Torfe des mittleren Subatlantikums vorgenommen werden. Rezente Bewegungen im Bereich der Struktur BS12 werden durch die Stufenbildung an der Geländeoberkante, sowie durch Neigungsmessungen an den Hochhäusern belegt. Ob diese jedoch mit einem anhaltenden Massenverlust im Untergrund in Verbindung stehen, oder durch Setzung bzw. auch Bodenkriechen hervorgerufen werden, kann hier nicht eindeutig nachgewiesen werden. Eine kontinuierliche und kleinräumige Vermessung kann hierüber Aufschluss geben.

Struktur Flottbek Markt

Ein Schwerpunkt der Georadarsuchungen lag durch das ganze Projekt hindurch auf der strukturellen Erfassung des verdeckten Untergrunds des Bereichs um den Flottbeker Markt (Reuther et al. 2007, Struktur FS2 in Buurman 2009). Das Gelände um den Flottbeker Markt fällt flach aus allen Richtungen ein. Im Zentrum liegt ein Feuchtgebiet; in einem Radius von ca. 80 m um das Feuchtgebiet blieb das Gelände bislang unbebaut. Im anschließenden bebauten Gebiet weisen die Fassaden der Häuser z.T. erhebliche Schäden auf.

Am westlichen Rand des heutigen Flottbeker Marktplatzes befand sich noch 1927 ein Teich, der einen Abfluss Richtung Süden durch das vermoorte Gebiet südlich des Marktes hatte und den Ursprung des Baches Röbbek bildete. Teich und Moor wurden immer wieder mit Sand und Müll verfüllt, der Moorbereich besteht noch heute und wurde bislang abgesehen seiner Randbereiche nicht bebaut.

Im Unterschied zu den bislang behandelten Erdfallbereiche wurde die räumliche Analyse des Erdfalls mittels Bohrungen (97 Bohrungen) durchgeführt. Die Bohrdaten wurden dem Projekt vom Geologischen Landesamt Hamburg zur Auswertung überlassen. Die Randbereiche der Struktur wurden eingehend mit dem Georadar analysiert. Zur Korrelation der geophysikalischen Daten mit den lokalen geologischen Verhältnissen wurden im Projekt eigene Bohrungen abgeteuft.

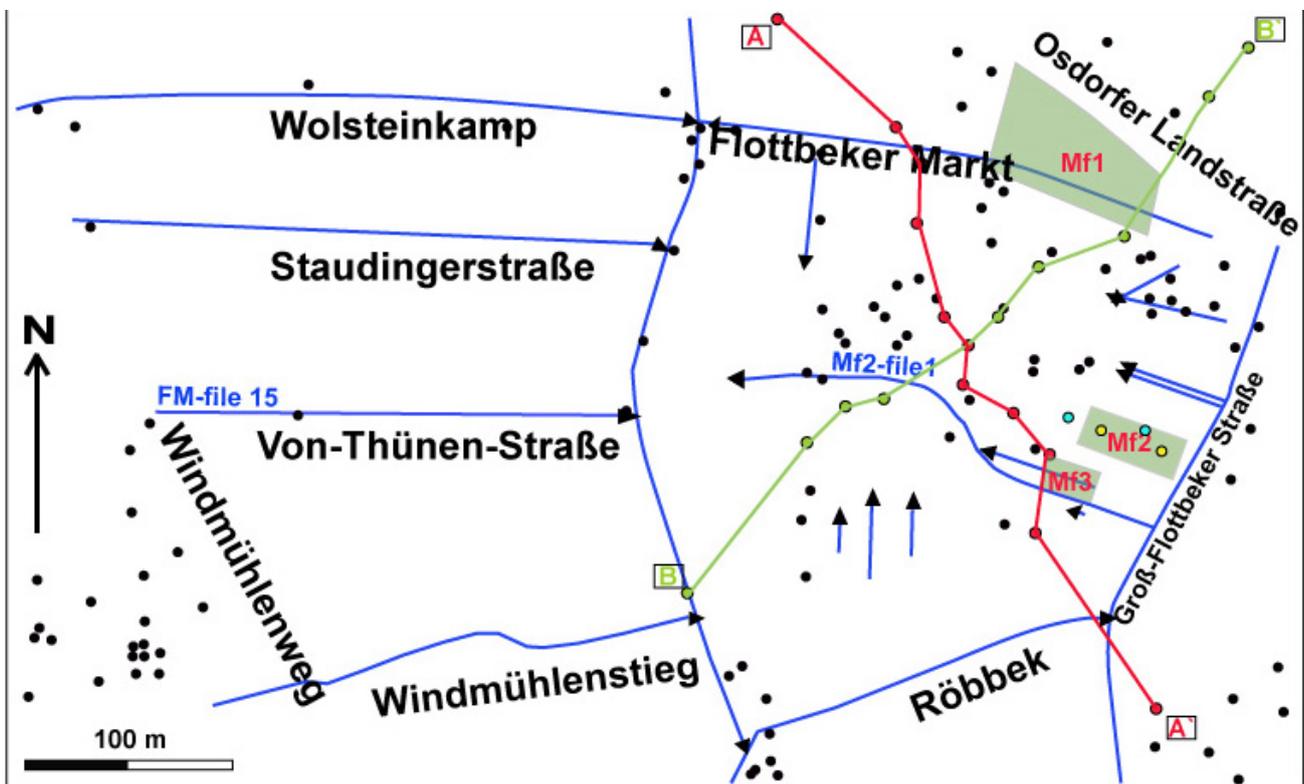


Abb. 24: Stadtbereich Flottbek Markt: GPR Profile mit Zugrichtung der Antennen (blaue Pfeile); GPR-Messfelder (Polygone in grün); Bohrpunkt (schwarz); Bohrpunkt (rot) im geologischen Profil A-A' (rote Linie); Bohrpunkt (grün) im geologischen Profil B-B' (grüne Linie); Bohrpunkt (blau) = Korrelationsbohrung für GPR-Daten (Quelle: Geologisches Landesamt Hamburg); Bohrpunkt (gelb) = im Projekt abgeteufte Korrelationsbohrung für GPR-Daten.

Im Zentrum der Struktur waren wegen des dichten Bodenbewuchses und Baumbestands und den oberflächennahen Wurzelböden, der Verfüllung mit Müll sowie dem während der Laufzeit des Projekts ansteigenden Stauwasserspiegels keine Georadaruntersuchungen möglich.

Das Probenmaterial für die Altersbestimmungen stellte die Firma Enders & Dürkop während Baugrunduntersuchungen (2008) zur Verfügung; die datierten biogenen Sedimente entstammen dem nördlichen Grundstücksbereich der Schule in der Straße Röbbek 4a-b.

Die Struktur Flottbek Markt ist annähernd kreisrund. Die vorhandenen Bohrungen dieses Bereichs (Abb. 24) wurden hinsichtlich der Verbreitung der unterschiedlichen Sedimente in der Hohlform interpretiert, um daraus Schlüsse auf die räumliche Strukturierung zu ziehen. Als erster Leithorizont / Modellfläche wurde der Top des Geschiebelehm gewählt (Buurman 2009). Im Randbereich der Struktur liegt der Geschiebelehm zwischen 1 m und 5 m unter Flur und fällt dann sehr steil bis in eine Tiefe von über 20 m ab. Der Bereich in dem der Geschiebemergel tiefer als 17m üB. NN liegt hat einen Durchmesser in Nord-Süd- sowie in Ost-West-Richtung von ca. 250 m. Das strukturelle Zentrum liegt nahe des Kreuzungspunktes der beiden geologischen Profile A-A' (Abb. 25) mit B-B' (Abb. 26). Zu diesem Zentrum fällt der Geschiebelehm in eine Tiefe von mehr als 25 m ab und wurde mit den Bohrungen nicht mehr erfasst. Untersuchungen der Verbreitung und Tiefenlage der stratigraphisch jüngeren Sande die den Geschiebelehm überdecken definieren einen Senkenbereich mit einem Durchmesser zwischen 150 m in Nord-Süd- und 185 m in Ost-West Richtung. Die tiefsten Bereiche der zweiten Modellfläche „Top Sand“ liegen zwischen 11 - 13 m unter Flur. Das strukturelle Zentrum hat eine ovale Form und liegt nordwestlich des Kreuzungsbereichs der beiden geologischen Profile und weist somit gegenüber dem modellierten strukturellen Zentrum des Geschiebelehms auf eine leichte Asymmetrie der Struktur hin.

Verteilung und Mächtigkeiten der die Hohlform verfüllenden Sedimente: Profile Abb. 25 und 26.

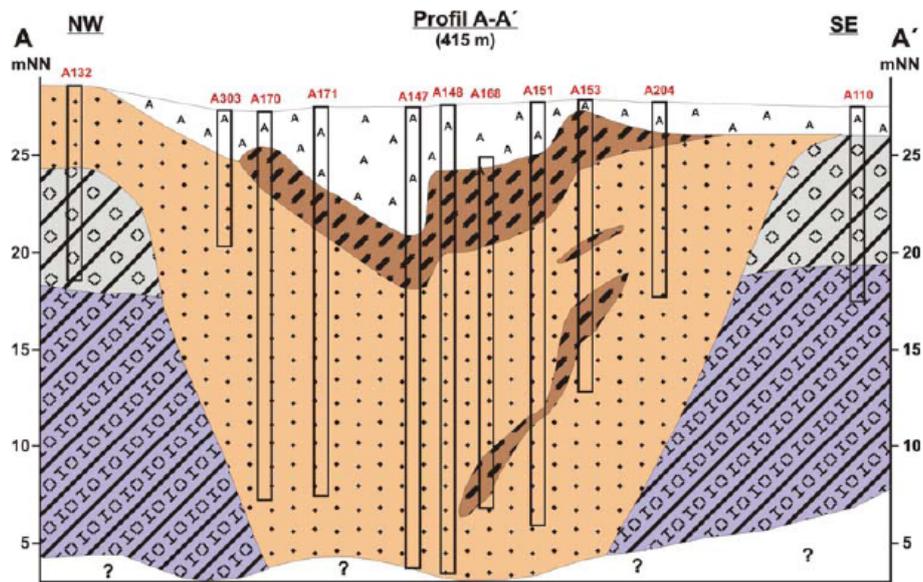


Abb. 25: Geologisches Profil A-A' durch die Flottbek Markt Struktur (orange = Sand, braun = Torf, grau Geschiebelehm, violettblau = Geschiebemergel, weiß = anthropogene Auffüllung (Bohrdaten des Geologischen Landesamts))

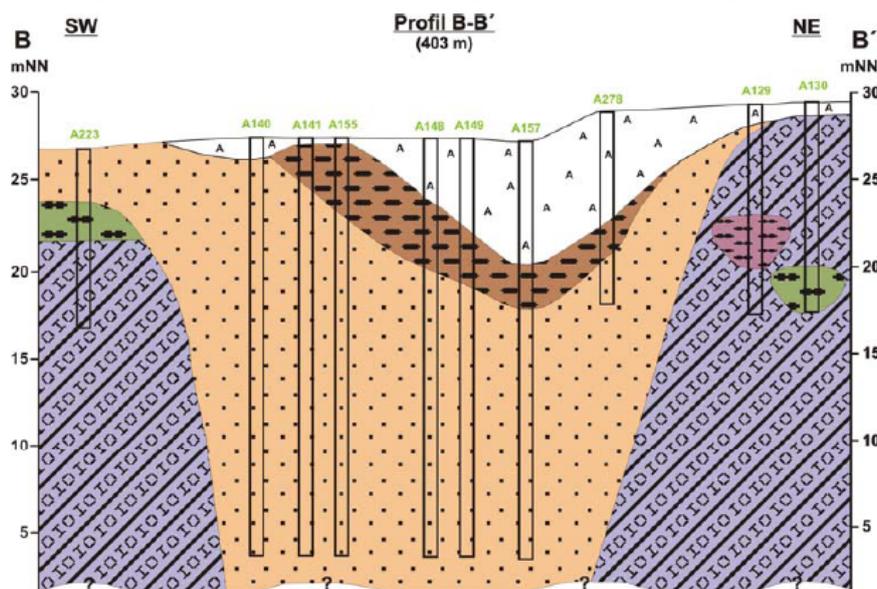


Abb. 26: Geologisches Profil B-B' durch die Flottbek Markt Struktur (orange = Sand, braun = Torf, oliv = Schluff, lila = Ton, violettblau = Geschiebemergel, weiß = anthropogene Auffüllung (Bohrdaten des Geologischen Landesamts)).

Die Georadaruntersuchungen Flottbek Markt betrafen den unmittelbaren strukturellen Randbereich der Struktur im Übergang zwischen der zentralen, stark bewaldeten Zone und den privaten Gärten bzw. nicht überbauten, begehbaren Flächen. Der zentrale Strukturbereich konnte mit dem Georadar aus den oben angeführten Gründen nicht untersucht werden. Die GPR-Untersuchungen umfassen 18 Einzelprofile und drei Messfelder (Eine ausführliche Darstellung und Interpretation dieser Untersuchungen findet sich in Buurman 2009).

Aus dem Randbereich der Struktur wird hier eine Radarsektion des Messfelds exemplarisch dargestellt. Hier konnte das im Radargramm abgebildete Deformationsmuster im Untergrund mit Schäden im Mauerwerk eines darüber liegenden Hauses korreliert werden (Abb. 27). Das Profil verläuft durch den gesamten Zentralbereich der Hohlform und endet nahe dem westlichen Strukturrand (Abb. 6).

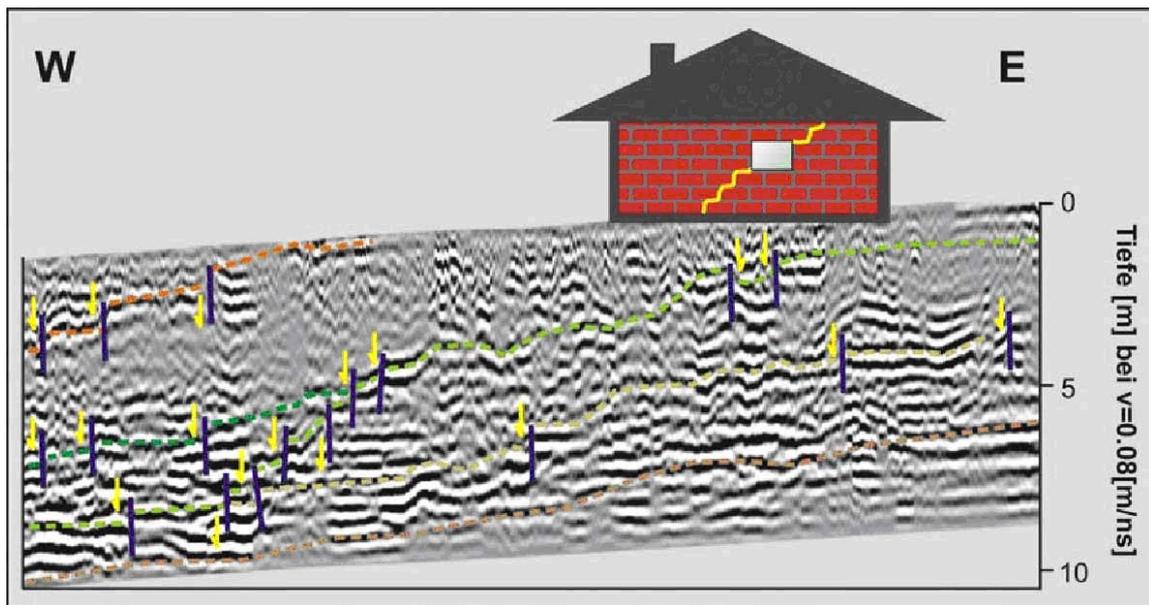


Abb. 27: Radarsektion aus Messfeld Mf3 (~3,5fach überhöht), 100 MHz, Länge 60 m; das Radargramm zeigt verschiedene Paläooberflächen im östlichen Randbereich der Flottbek Markt Struktur. Die interpretierten Reflektoren (gestrichelte Linien) bedeuten: orangene Interpr.-Linie=Top Sand, dunkelgrüne Interpr.-Linie=Top Torf, hellgrüne Interpr.-Linie=Top Sand/Basis Torf, braune Interpr.-Linie=Geschiebelehm (strukturelle Basis), olivfarbene Interpr.-Linie=geringmächtige sandige Zwischenschicht mit Korngrößenwechsel; dunkelblaue Linien=Abbruchkanten. Abbruchkanten und Bewegungssymbole erläutern den Deformationsstil des typischen Stufenmusters zum Strukturzentrum hin. Aus der Abb. geht hervor, dass das darüberstehende Haus zumindest teilweise oberhalb des aktiven Strukturrandes liegt. Die angedeutete Rissbildung in der Verfugung spiegelt den progressiven Deformationsstil des Untergrundes im Mauerwerk wieder.

Der westliche Rand der Flottbeker Senke fällt geographisch mit dem peripheren Bereich der Untergrundsstrukturen zusammen. Die Straßen Wolsteinkamp, Staudingerstraße, Von-Thünen-Straße und Windmühlenstieg verlaufen in der Einfallrichtung des Hanges auf den zentralen Bereich der Struktur Flottbek Markt zu. Während der Untersuchungen waren in den Fassaden der dortigen Häuser Risse zu sehen und ebenfalls Straßenschäden zu beobachten. Der Hang liegt im Einflussbereich von Erderschütterungen, welche seit Jahrzehnten mit einer Erdfallstruktur in der Seestraße in Verbindung gebracht werden. Für eine strukturelle Untersuchung des Untergrundes wurden hier acht Parallelprofile mit dem Georadar im Verlauf der vier Straßen angelegt. Trotz verschiedener Störfaktoren wie Kanaldeckel, Abwasserleitungen usw. ist über die gesamte Länge des Profils ein markanter Reflektor zu erkennen (gelbe gestrichelte Linie in Abb 28). Dieser zeigt ein weites Wellenmuster, bei dem die Wellenflanken deutlich steiler als die Geländeoberkante einfallen. Die Spur der steilen Wellenflanken lässt sich jeweils noch einige Meter weiter in den Untergrund verfolgen (blaue gestrichelte Linie), während sich oberhalb der Wellentäler linsenförmige Sedimentkörper starker Impedanz abheben (grüne gestrichelte Linie = Top Sedimentkörper). Im rechten Profilbereich markiert die orangene gestrichelte Linie den Fazieswechsel von bindigen Sedimenten im Westen und Sand in Richtung zum Strukturzentrum. Die Symbole der Zickzacklinien nahe der Geländeoberkante lokalisieren die während der Messung kartierten Straßenschäden. Die Lage der Symbole zeigt, dass die kartierten Rissbildungen sowohl oberhalb des

Wellenscheitels sowie der steilen Wellenflanken auftritt, dort wo eine durch Hangaktivität provozierte Zerrung am ehesten zu erwarten ist. Ebenso lassen sich Straßenrisse oberhalb der Sedimentlinsen im Wellental erkennen. Da eine Rutschung immer am Wellentop beginnt und entlang der steileren Flanke abrutscht, wurden diejenigen Bereiche in den Radargrammen markiert, an denen es am ehesten zu einer Zerrung und später zur Ausbildung von Abbruchkanten kommen kann. Diese Punkte wurden miteinander verbunden und definieren die in der Geogefahrenkarte (Anlage) gezeigte Abbruchkante.

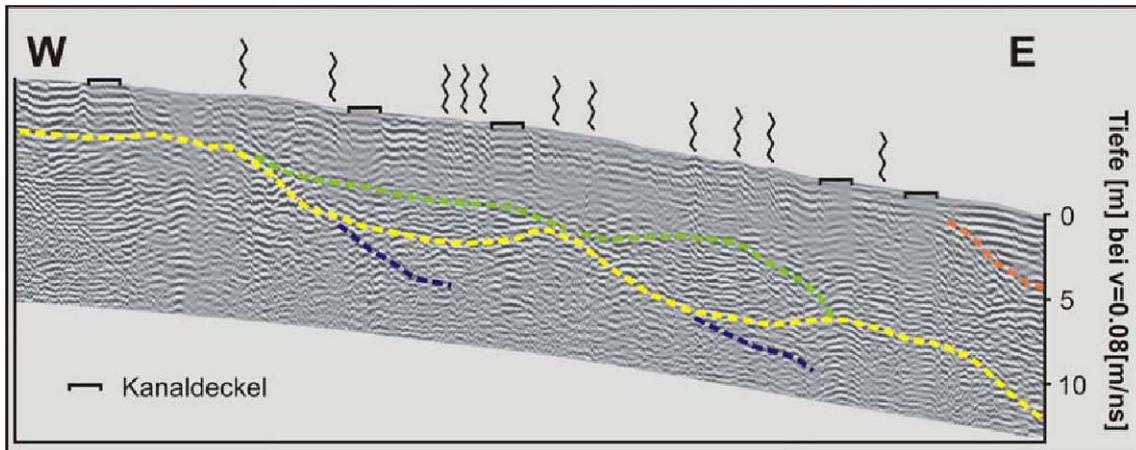


Abb. 28: Radarsektion FM-file15 (~3,5fach überhöht), 100 MHz, Länge 202 m. Das Radargramm zeigt den westlichen Randbereich der Flottbek Markt Struktur bzw. den zentralen westlichen Strukturrand der Flottbeker Senke.

Der Deformationsstil der Flottbek-Markt Struktur ist einheitlich und zeigt deutliche Analogien zu dem Deformationsstil der Sekundärstrukturen und Randbereiche der zuvor im Detail beschriebenen Erdfälle. Innerhalb der Analysetiefe konnte eine weitgehend undeformierte Basis bindiger Sedimente erkannt werden, welche zum strukturellen Zentrum hin steil unter die Analysetiefe von rund 11 m fällt. Darüber lagernde Sande und organogene Sedimente weisen die typischen Reflektorenmuster der zum Strukturzentrum hin gestaffelten Abbruchkanten auf. Die Versatzbeträge an den Abbrüchen variieren zwischen wenigen dm und fast einem Meter. Auffällig ist das inhomogene Deformationsmuster innerhalb der Torfschichten. Während die Basis des Torfes noch ein ausgeprägtes Stufenmuster der im Liegenden befindlichen Sande übernimmt, findet sich am Top Torf lediglich ein wellenartiger Reflektorenverlauf. Die biogenen Sedimente scheinen die bruchhaften Bewegungen aufgrund ihrer Materialeigenschaften zu puffern. Die den Torfen überlagernde Sande zeigen wiederum das gestaffelte Muster der Abbruchkanten. Die Interpretation der Radarprofilen zeigt eine deutliche Zunahme des Einfallwinkels aller Paläooberflächen zum Zentrum hin. An den flacher geneigten Reflektorenabschnitten ist zunächst die Ausbildung von Rutschkörpern zu beobachten, während Versätze der Reflektoren erst in den steiler einfallenden Bereichen auftreten.

Aus der strukturellen Analyse mittels Georadar und den nicht zu erhebenden Daten im Zentralbereich der Hohlform Flottbek Markt bleibt unklar, ob es ein oder mehrere Versturzzentren gibt.

Aufgrund der hohen Stauwasserstände während der Projektarbeiten war die Gewinnung eines Bohrkerns oberflächennah anstehender organogener Sedimente zur Datierung aus dem zentralen Strukturbereich nicht möglich. Jedoch stellte freundlicherweise die Firma Enders & Dührkop Sedimentproben zur Verfügung, welche während Baugrunduntersuchungen im Februar 2008 im Bereich Röbbek 4a-4b zu Tage gefördert wurden. Die Pollenanalyse und Datierung wurde im Dr. B. Rickert (RICKERT 2008) durchgeführt. Aus den verschiedenen Bohrungen konnten in unterschiedlichen Tiefen Torflagen festgestellt werden die sowohl der ausgehenden Eem Zeit (ca. 120 000 Jahre) als auch einem Frühweichsel-Interstadial 90 000 – 60 000 Jahre zugerechnet werden können.. (Brörup-Interstadial).

Bedingt durch die intensive anthropogene Verfüllung mit einer Mächtigkeit von mehr als 5 m ist die Struktur Flottbek Markt übergeordnet als *buried*-Typ zu klassifizieren. Die ermittelte Trichterstruktur hat nahe der Geländeoberkante einen Durchmesser von fast 400 m. Die Weite des strukturelle Abschnitts, der bei einem Erdfall des *dropout*-Typs dem Kragen entspräche und die Verjüngung des Trichters zur engen Versturzzöhre betrifft, beträgt 150 m bis 250 m. In einer Tiefe von rund 30 m uGOK beträgt der Durchmesser der Sandverfüllung noch ca. 150 m. Ein Zentralverstoß im Untergrund konnte mit den gegebenen Untersuchungsmöglichkeiten nicht festgestellt werden. Jedoch zeigen die geophysikalischen Messergebnisse der Randbereiche das gleiche Deformationsmuster wie es bei kleinräumigeren *dropout*-Typen beobachtet wird: Eine nur gering deformierte Basis bindiger Sedimente, welche zum strukturellen

Zentrum hin steil abtaucht und stufenartige Versätze aufweist. Rutschungsmuster und ein kontinuierlich zunehmender Neigungswinkel der verschiedenen Paläooberflächen in der Flottbek Struktur in Richtung Zentrum, weisen auf aktive Subsidenz hin, die mindestens bis zum Beginn der anthropogenen Verfüllung stattfand. Der Vergleich der modellierten Flächen Top Geschiebelehm und Top Sand zeigt, dass die letzten Absenkungen der Geländeoberkante vor der Verfüllung nicht im Zentrum der Modellfläche Lehm vor sich ging, sondern nordwestlich des Kreuzungspunktes der beiden Profile. Hier hat die jüngste natürliche Verwitterungsfläche der oberen Sande ihr Tiefenmaximum. Hinweise auf langzeitliche Absenkung geben die in der Struktur entstandenen Torflagen. Die unteren Torflagen lassen sich dem Eem-Interglazial (ca. 120 000 Jahre) und dem Brörup Interstadial (vor 90 000 – 60 000 Jahren) zuordnen RICKERT (2008); die oberen Torfe dem Atlantikum (vor ca. 7500 Jahren). Dazwischen geschaltete, schräg gestellte Sandlagen weisen auf mehrere Absenkungsphasen hin.

Innerhalb der weiträumigen Struktur lassen sich somit für einen langen Zeitraum, der ungefähr vor 120 000 Jahren beginnt, Absenkungsprozesse nachweisen, bei denen es innerhalb der Struktur zu Verlagerungen des Subsidenzzentrums gekommen ist, was sich den unterschiedlich gelagerten Torflagern ausdrückt. Das große Massendefizit kommt durch einen Massentransport zustande der überwiegend durch den mächtigen zentralen Sandkörper erfolgt. Die andauernde Absenkung seit dem Eem (120 000 Jahre) lässt sich auch dadurch belegen, dass eine derartig alt angelegte Hohlform während der Weichsel-Kaltzeit (vor 1110 000 bis 10 000 Jahre) aufgrund der spätglazialen Solifluktuationsprozesse eingeebnet worden wäre wenn sie danach nicht weiter abgesunken wäre.

Hinweise auf weiter Absenkungen sind lokale Torflagen mit einem ungefähren Alter von 7500 Jahren. Jüngste Absenkungen in der Flottbek Struktur äußern sich in Bauwerksschäden. Eine Erklärung für die Bauwerksschäden könnte das anhaltendes Massendefizit im Zentrum des Erdalles sein welches ein sedimentäres Kriechen induziert wodurch die oberen Sande auf den bindigen Böden in eine langsame Bewegung geraten, die zu den Schäden in der Überbauung führen könnten.

Die Flottbergmarkt Struktur ist ein verborgener Erdfall vom *suffosion*-Typ.

Bohrungen

Parallel zu den Georadar- und Geoelektrikuntersuchungen wurden zur weiteren Erfassung der Beschaffung des Untergrunds Daten von mehr 2500 Bohrungen aus dem Bereich über dem Othmarschen-Langenfelde Diapir ausgewertet. Diese stellte freundlicherweise unser Kooperationspartner, das Geologische Landesamt Hamburg zur Verfügung. Mit diesen Daten konnten einerseits die aus den Radarprofilen abgeleiteten Schichtfolgen verifiziert werden; zum anderen wurden damit charakteristische Bodenhorizonte bis in eine Tiefe von ca. 20 m flächenhaft ermittelt und so unterschiedliche Senkungscharakteristika festgestellt (Reuther et al 2007).

Ergebnisse aus Bohrdaten

Die Bohrdaten des Arbeitsgebietes wurden zunächst so aufbereitet, dass deren Verwaltung im GIS flexibel gehandhabt, stetig ergänzt und unter verschiedenen Fragestellungen genutzt werden konnte. Die Voraussetzungen, Grundlagen der Bewertung und Anforderungen an die mehrdimensionalen Bohrdatenmodelle finden sich bei Buurman 2009. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse aus den räumlichen Modelle des geologischen Untergrunds vorgestellt die zur Identifizierung von kleinräumigen Strukturen und Anomalien dienen. Ein Schwerpunkt liegt auf der geographischen Verteilung der zirkularen oder subzirkularen Strukturen und deren Lagerungsanomalien, welche oft durch anthropogene Veränderungen der Geländeoberfläche nicht erkennbar sind. Im Detail wurden diese Zirkularstrukturen auf ihre Größe und Gestalt, Tiefenlage und Verfüllung sowie auf ihre internen strukturellen Verbindungen und Begrenzungen hin untersucht. Zur Aufbereitung der vom Geologischen Landesamt zur Verfügung gestellten Bohrdaten wurden im Projekt eigene Parameter definiert und spezielle Tabellen erarbeitet. Für die Bohrpunkt Modelle (BP-Modelle) wurden die Bohrdaten nach der Methode *Natural Neighbor* interpoliert (Buurman 2009).

Für das Arbeitsgebiet wurden 2515 Bohrprofile mit einer Teufe von mindestens 20 m für die Anfertigung von Flächenmodellen verschiedener Schichten genutzt. Jedes Höhenmodell beinhaltet die geographische Verteilung und die absolute Anzahl der jeweils für die Berechnung der Flächen genutzten Bohrungen. Ausführungen zur Bewertung und Interpretation der Datensätze sowie die entsprechenden Tabellen finden sich in BUURMAN 2009

Betrachtung von Flächenmodellen und Mächtigkeiten verschiedener Sedimente: Da die Höhenmodelle der verschiedenen Sedimente in der Anzahl der Bohrpunkte und deren geographischer Verteilung variieren, wurde die Bohrpunktverteilung für jedes Modell zusätzlich zur geographischen Ausbreitung der jeweiligen Modellfläche mit betrachtet. Außerdem werden die Anzahl der verwendeten Bohrpunkte sowie die Größe der Modellfläche angegeben.

Anthropogene Veränderungen der Geländeoberkante über die Zeit wirken sich nicht auf die Modellierung aus, da die Bohrungen mit Höhenangaben in mNN angesprochen werden. Bei Biurman (2009) werden die morphologischer Charakteristika flächenhafter Sedimentmodelle (Sand, Geschiebelehm, Geschiebemergel ausführlich beschrieben und ergänzende Mächtigkeitsabschätzungen der Sedimentkörper vorgenommen. Zusätzlich werden die Mächtigkeiten lokal in Senken auftretenden Torfe erfasst deren Verteilung im vorliegenden Bericht aufgezeigt wird.

Betrachtung der Modellflächen und Mächtigkeiten speziell flächenhafter Torfvorkommen: Torfe treten innerhalb des Arbeitsgebiets überwiegend in kleinräumigen Arealen auf. Für die Torfvorkommen wurde eine Spezialkarte angefertigt (vertrauliche Anlage aus Dissertation Buurman 2009: Karte I) Jedem einzelnen Torfvorkommen wurde mindestens eine Tiefenangabe zugewiesen. Damit lässt sich abschätzen, oberhalb welcher Sedimentlage (Sand, Geschiebelehm oder Geschiebemergel) sich der Torf bilden konnte. In 2D⁺- oder 3D-Modellen sind so verschiedene Torflagen voneinander zu unterscheiden.

Flächenhafte Torfvorkommen finden sich in der Bahrenfelder Senke (Lokation siehe Abb 2). Bei den Untersuchungen wurden in den Bohrdaten altersmäßig obere-, mittlere- und untere Torfe voneinander unterschieden. Obere und mittlere Torfe lassen sich als Flächen modellieren (Abb 29). Der untere Torf ist lediglich durch drei Bohrungen belegt und wird nicht als Höhenmodell dargestellt.

Der obere Torf ist in 74 Bohrungen der heutigen Bahrenfelder Senke (ca. 0,25 km²) belegt. Das entspräche einer Bohrpunktdichte von 288 Bohrungen pro km². Die geographische Verteilung der Beprobungen ist durch schwarze Punkte in Abbildung 29 dargestellt. Die jeweilige Tiefenangabe der Basis des oberen Torfes wird durch den Farbbalken in der Legende beschrieben. Sowohl Hoch- als auch Tieflagen der Torfbasis können durch Bohrpunkt-Cluster berechnet werden. Nur in wenigen Fällen wird zwischen isolierten Bohrpunkten interpoliert.

Die Basis des oberen Torfes der Bahrenfelder Senke ist durch vier Bereiche markanter Tieflagen charakterisiert, welche jeweils ein bis drei Tiefenzentren zeigen. Unterbrochen werden die Tieflagen durch rasche morphologische Anstiege. Somit spiegelt auch die Torfbasis die zuvor durch die weiteren Sedimentmodelle dargestellte morphologisch unruhige Charakteristik der Bahrenfelder Senke wider.

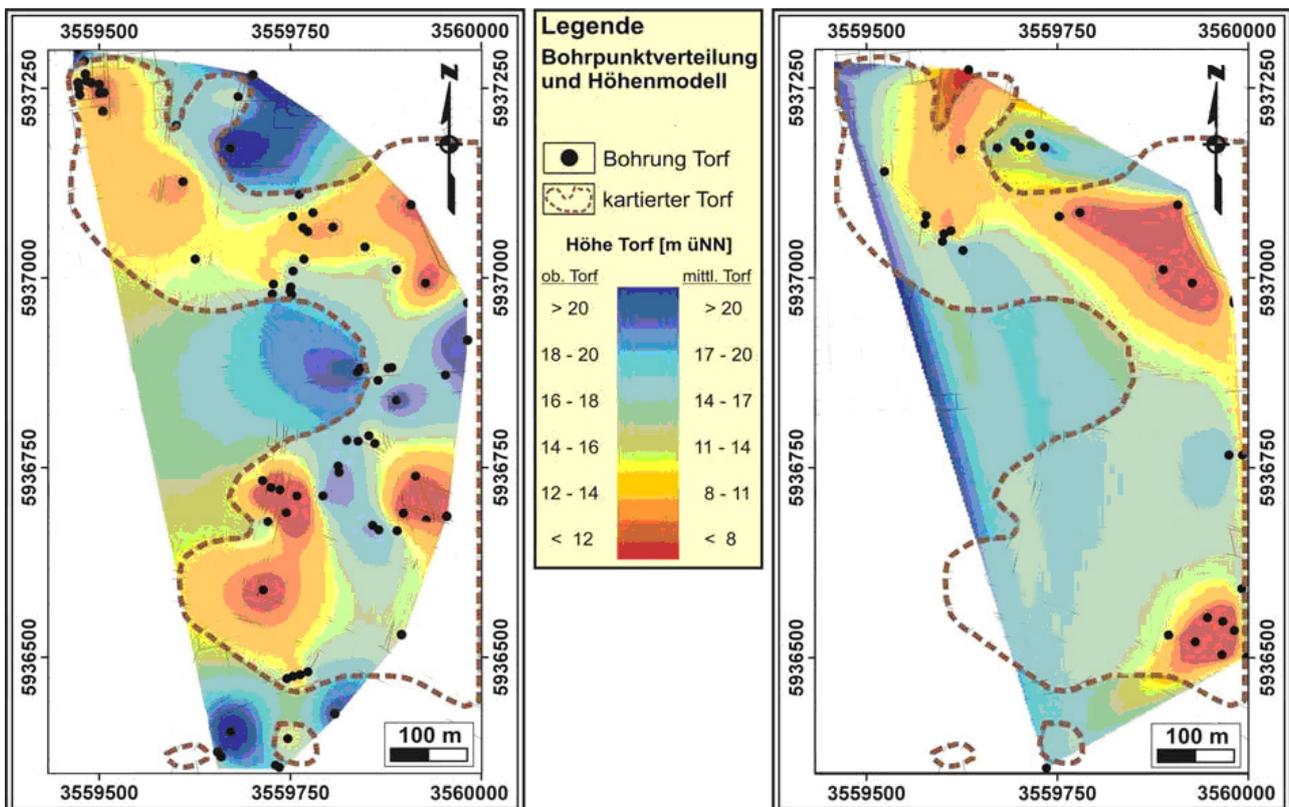


Abb. 29: links = Höhenmodell Basis oberer Torf und die Verteilung der Bohrungen auf oberem Torf innerhalb der Bahrenfelder Senke; rechts = Höhenmodell Basis mittlerer Torf und die Verteilung der Bohrungen auf mittlerem Torf innerhalb der Bahrenfelder Senke

In Abbildung 29 rechts ist die geographische Verteilung von 34 Bohrungen dargestellt, welche den mittleren Torf der heutigen Bahrenfelder Senke belegen. Dieses entspräche einer Bohrpunktdichte von 136 Bohrpunkten km^2 . Auch hier werden die Hoch- und Tieflagen der Torfbasis überwiegend durch Bohrpunkt-Cluster berechnet. Die Anzahl der Bohrpunkte reicht allerdings nicht aus, um ein flächendeckendes realistisches Bild dieser Torfbasis zu erzeugen. Ein Abschnitt der Senke jedoch, welcher sich von Nordwesten nach Südosten und anschließend nach Süden erstreckt, stellt einen interpretierbaren Datenbereich dar. Im Nordwesten, am östlichen Senkenrand sowie im Südosten werden drei markante Depressionen abgebildet. Die nördliche sowie die südliche Tiefenanomalie der Basis der mittleren Torfe weichen von Ihrer geographischen Lage deutlich von denen des oberen Torfes ab. Die mittlere Depression stimmt hingegen in ihrer geographischen Lage und der Ausbreitung mit den oberen Torfen überein und wird überwiegend von identischen Bohrungen belegt. Auffällig ist, dass sich hier das Relief der Basis der mittleren Torfe in diesem Bereich gegenüber der Morphologie der oberen Torfe wesentlich stärker versteilt. Dieses kann allerdings auch auf einen Interpolationseffekt der geringeren Bohrpunktdichte der mittleren Torfe zurückzuführen sein.

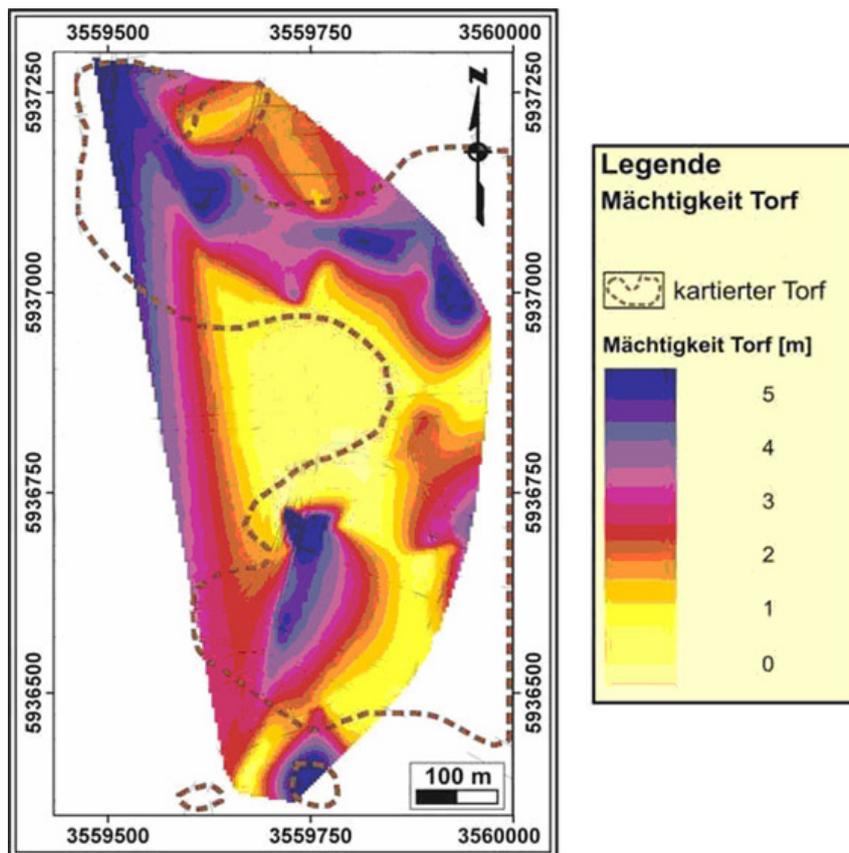


Abb. 30: Modellmächtigkeit des oberen Torfs innerhalb der Bahrenfelder Senke.

Abbildung 30 zeigt die Verteilung der Mächtigkeiten des oberen Torfes. Hieraus ist ersichtlich, dass die Depressionen an der Basis mit den Zonen größter Torfmächtigkeiten übereinstimmen. Ebenso entsprechen geographische Bereiche größter Torfmächtigkeit morphologischen Depressionen der unter den Torfen befindlichen Sandbasis. Die Sande weisen hier nur eine geringe Sedimentmächtigkeit auf. Als Voraussetzung für die Bildung des Torfes muss gegeben sein, dass die Hohlformen zumindest teilweise unterhalb des Grundwasserspiegels gelegen haben. Zum anderen hat die Vermoorung bereits eingesetzt, bevor die Depression von den Randbereichen her zusedimentiert werden konnte. Diese Bedingungen sind unter natürlichen Umständen nur dann gegeben, wenn es zu einem Grundwasseranstieg oder zur lokalen Absenkung der Geländeoberkante unter den Grundwasserspiegel kommt. Die Torfkissen können dann lokal und kleinräumig anwachsen und die Depression verfüllen.

Die Mächtigkeitsverteilung des mittleren Torfes ist in Abbildung 31 dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass die Depressionen im Nordwesten und Südosten Torfmächtigkeiten bis ca. 5 m erreichen, während nur eine Bohrung der zentral gelegenen Depression eine Mächtigkeit von mehr als 2 m dokumentiert. Besonders für die Berechnung und die Interpretation der Mächtigkeiten sei hier auf die ungenügende Anzahl an nutzbaren Bohrungen hingewiesen.

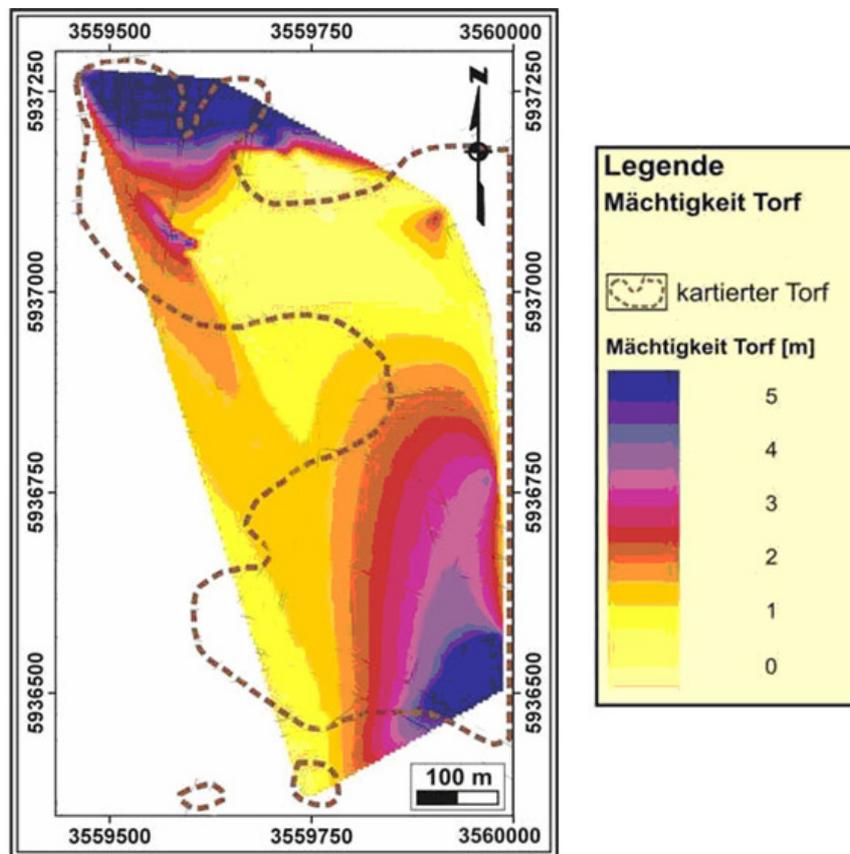


Abb 31: Modellmächtigkeit des mittleren Torfes innerhalb der Bahrenfelder Senke.

Der untere Torf der Bahrenfelder Senke wird durch nur drei Bohrungen belegt (Bohrpunkt in Abb. 32 und Abb. 33). Ein aussagekräftiges Höhenmodell kann mit diesem Datensatz für den unteren Torf nicht erstellt werden. Die Torfmächtigkeiten der einzelnen Lokalitäten variieren zwischen 0,4 m und 1,2 m. Auch diese Mächtigkeitsangaben sollen zunächst keiner weiteren Analyse unterstellt werden, da diese vergleichsweise geringmächtigen Torfe auch der Verfüllung des Randbereichs einer Tiefenanomalie entstammen können.

Korrelation der Sedimentmodelle

Die farblichen Umrundungen in Abb. 32 und 33 zeigen die Ränder von drei Sedimentmodellen. Das entsprechende Tiefenzentrum ist durch einen Stern gekennzeichnet. Die grünen Markierungen entsprechen den Tiefenanomalien des Sandmodells, Magenta steht für Anomalien des Geschiebelehmmodells und die blauen Strukturen ergeben sich aus dem Höhenmodell des Geschiebemergels. Die graphische Überlagerung der Markierungen erlaubt die Abgrenzung von Zonen akkumulierender Anomalien, separiert gelegener Hohlformen sowie von strukturlosen Bereiche innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Analyse der unterschiedlichen Torfe innerhalb der Bahrenfelder Senke Da lediglich in der Bahrenfelder Senke flächenhaft und zudem mehrere Generationen von Torfbildungen erbohrt wurden, wurde dieses Gebiet im Detail analysiert und die einzelnen Torfbildungen mit den Modellen der weiteren Sedimente exemplarisch in Bezug gesetzt. Die Abbildung 32 und 33 zeigen eine separierte Darstellung der jeweiligen Basis des oberen bzw. des mittleren Torfes. Zusätzlich werden in beiden Abbildungen die lokalen Bildungen des unteren Torfes (graue Punkte) sowie die zentralen Tiefenanomalien der weiteren Sedimente (Sterne) abgebildet.

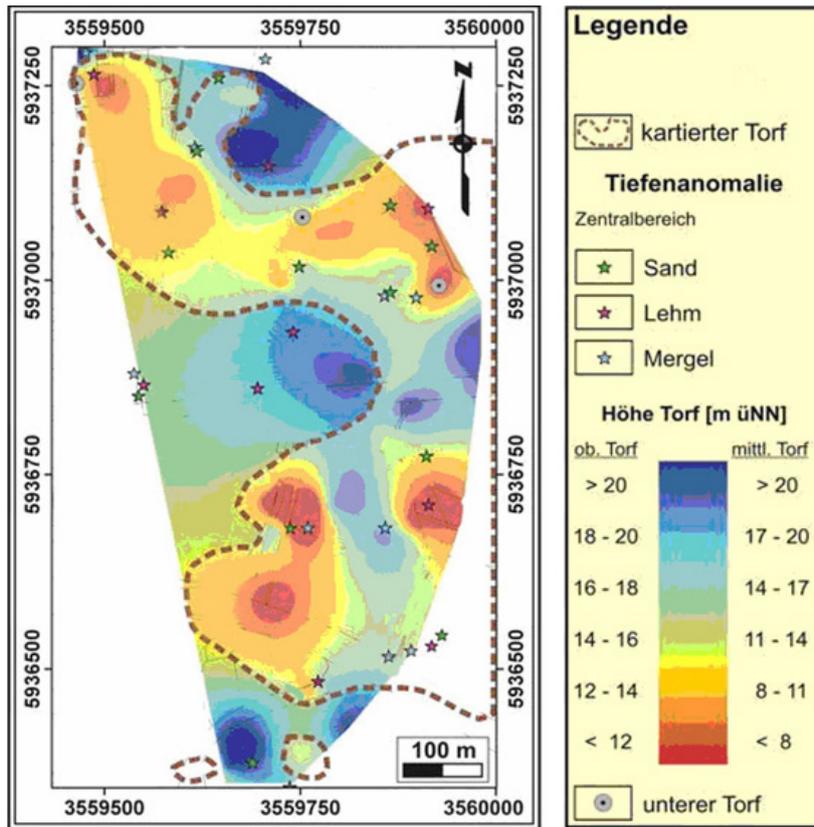


Abb. 32: Höhenmodell Basis oberer Torf. Verteilung der Tiefenanomalien in der Bahrenfelder Senke.

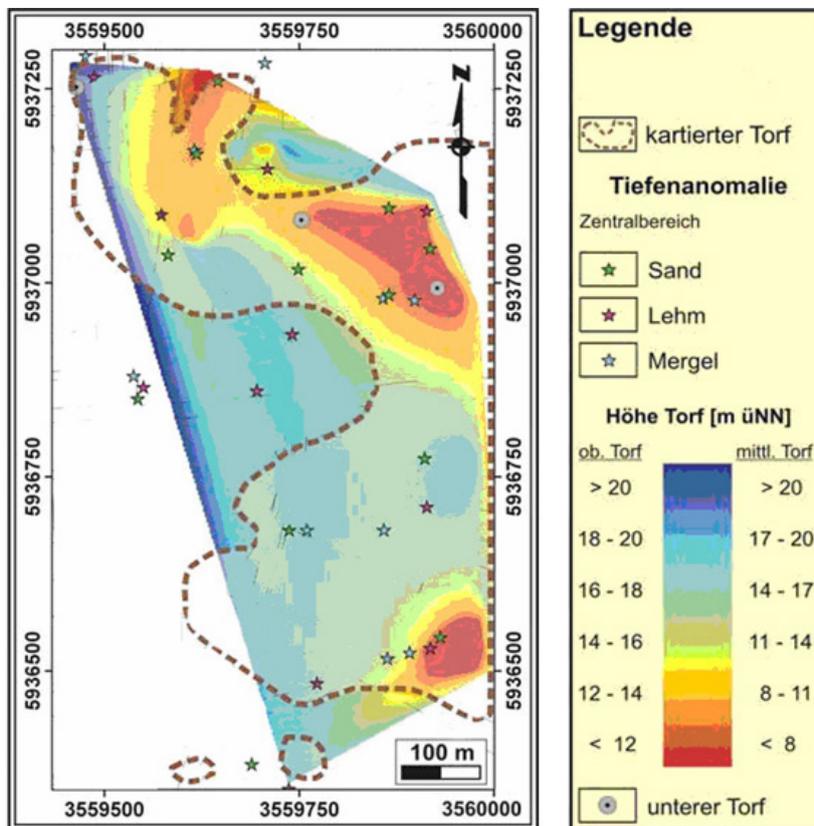


Abb. 33: Höhenmodell Basis mittlerer Torf. Verteilung Tiefenanomalien weiterer Sedimentmodelle

Markiert man nun die geographischen Bereiche, in denen es sowohl zu Tieflagen der jeweiligen Torfbasis, zu einer hohen Torfmächtigkeit sowie zu zentralen Tiefenanomalien der weiteren Sedimentmodelle kommt, so lässt sich die Bahrenfelder Senke in 10 Sektoren untergliedern (Abb. 34). Diese werden im Folgenden beschrieben:

- Sektor 1: Die Bohrungen dokumentieren das Vorkommen von unteren sowie von den oberen Torfen. Der untere Torf ist lediglich in einer Bohrsäule innerhalb des Sektor 1 belegt und hat eine Mächtigkeit von ca. 0,5 m. Die Basis des oberen Torfes liegt innerhalb einer Hohlform, deren Tiefenmaxima sowohl durch die geringmächtigen Sande, als auch durch die tiefer gelegene Basis des Lehmes und durch den Mergel belegt wird. Die maximale Torfmächtigkeit beträgt hier 4 bis 5 m.
- Sektor 2: Innerhalb dieses Sektors werden mittlere sowie obere Torfe erbohrt. Die Basis der oberen sowie der mittleren Torfe zeigt jeweils leichte Differenzen in der geographischen Lage ihrer Tiefenmaxima. Beide liegen jedoch räumlich in unmittelbarer Nähe des Zentralbereiches einer Tiefenanomalie der Lehmbasis. Die Mächtigkeit jeder Torflage erreicht ca. 4 m bis 5 m.
- Sektor 3: Diese Hohlform wird durch Tiefenmaxima der Basis des Sandes sowie durch den Mergel dokumentiert. Innerhalb dieser Depression wurden lediglich mittlere Torfe erbohrt. Diese erreichen Mächtigkeiten von bis zu 5 m.
- Sektor 4: Die ältesten erbohrten Torfe sind hier die unteren Torfe der Bahrenfelder Senke. Die beiden Vorkommen sind in zwei Bohrungen im Nordwesten sowie im Südosten des Sektors belegt. Die geographische Verteilung der mittleren und der oberen Torfe stimmt nahezu überein. Auffällig ist, dass trotz einer flächenhaften und tief liegenden Basis der mittleren Torfe lediglich im Nordosten Torfmächtigkeiten bis zu 2,5 m erreicht werden. Ansonsten ist der mittlere Torf flächenhaft mit einer deutlich geringeren Mächtigkeit von ca. 1 m belegt. Die Basis des oberen Torfes zeigt drei Tiefenmaxima, welche Torffüllungen bis jeweils 5 m Mächtigkeit in sich bürden. Die Morphologie der Basis der oberen Torfe ist im Gegensatz zur Basis der mittleren Torfe durch weniger intensive Reliefunterschiede zwischen den Randbereichen und den Tiefenmaxima charakterisiert. Neben den Torfen dokumentieren die Basis des Sandes, des Lehms und der Mergel die Existenz der markanten Hohlform.

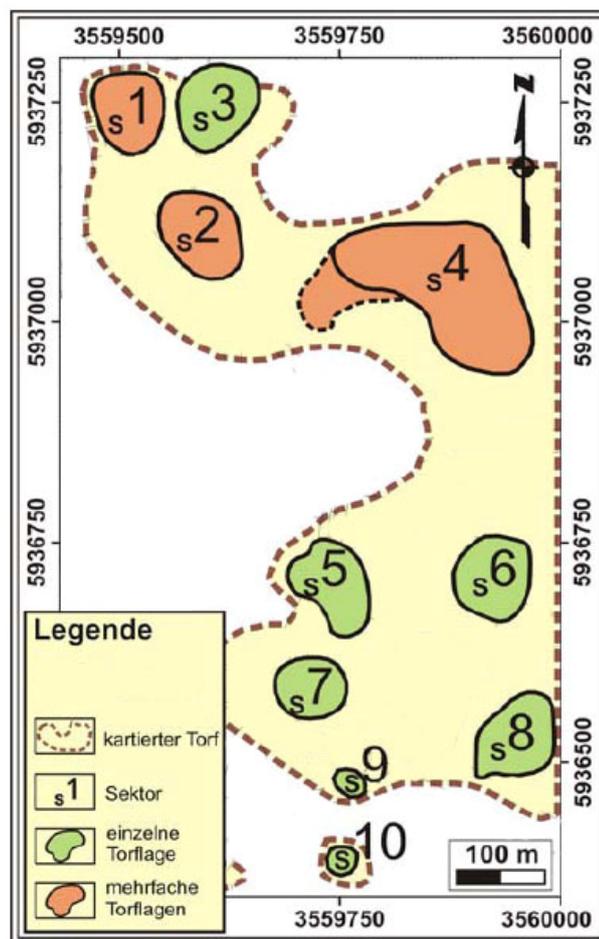


Abb. 34: Verteilung der einzelnen Sektoren verschiedener Torfvorkommen innerhalb der Bahrenfelder Senke.

- Sektor 5: Innerhalb dieses Sektors wurden lediglich obere Torfe erbohrt. Diese erreichen eine Mächtigkeit von maximal 5 m. Das Tiefenmaximum der torfgefüllten Hohlform wird durch die zentralen Bereiche der Tiefenanomalien der Sandbasis sowie durch den Mergel bestätigt.
- Sektor 6: Auch in Sektor 6 belegen Bohrungen lediglich den oberen Torf, deren Mächtigkeit zwischen 2 und maximal 4 m variiert. Der tiefste Punkt der Torfbasis ist geographisch identisch mit der zentralen Tiefenanomalie der Lehmbasis darunter. Das Tiefenmaximum der Sandbasis ist etwas weiter nördlich gelegen, befindet sich aber dennoch innerhalb des Bereichs der Hohlform.
- Sektor 7: Das Vorkommen des oberen Torfes ist hier lediglich durch eine einzige Bohrung belegt. Die Tiefenlage der Torfbasis und die Torfmächtigkeit entsprechen der räumlich nahe gelegenen Torffüllung von Sektor 5. Eine Bestätigung der Hohlform in weiteren Tiefensektionen ist durch die Höhenmodelle weiterer Sedimente nicht gegeben.
- Sektor 8: Die im Südosten der Bahrenfelder Senke gelegene Hohlform ist mit mittleren Torfen verfüllt. Diese erreichen eine Mächtigkeit von bis zu 5 m. Bestätigt wird die Hohlform durch Tiefenmaxima der Sand- sowie der Lehmbasis.
- Sektor 9: Hier beträgt der Durchmesser der Hohlform nur wenige 10er Meter. Belegt wird die kleinräumige Struktur durch vier Bohrungen und die zentrale Tiefenanomalie des Lehms. Die maximale Mächtigkeit der oberen Torfe beträgt hier ca. 3 m.
- Sektor 10: Die im äußersten Süden der Bahrenfelder Senke gelegene und isolierte Hohlform ist mit oberen Torfen verfüllt. Dieses lokale Torfvorkommen wird von nur einer einzigen Bohrung belegt, welche eine Mächtigkeit der Torfe von 4 bis 5 m dokumentiert. Zentrale Bereiche von Tiefenanomalien weiterer Sedimente sind hier nicht eindeutig mit dem Torfvorkommen zu korrelieren.

Die Entwicklung der Bahrenfelder Senke

Die Bildung von bis zu drei unterschiedlichen Torflagen hat sich nicht flächenhaft innerhalb der Bahrenfelder Senke vollzogen, sondern kleinräumig. Die Hohlformen einiger Sektoren sind lediglich mit einer einzigen Torflage verfüllt, während Bohrungen in anderen Hohlformen zwei oder drei unterschiedliche Torflagen angetroffen haben. Ebenso zeigen Hohlformen benachbarter Sektoren unterschiedliche Verfüllungen einzelner Torfe oder variieren in ihrer Kombination aus oberen, mittleren und unteren Torfen.

Bringt man die zentralen Tiefenanomalien der Sedimente mit einer zeitlichen Abfolge und den lokalen Entstehungsbedingungen der drei unterschiedlichen Torflagen in Verbindung, so lässt sich damit die Entwicklung Bahrenfelder Senke aufzeigen. Die geographische Verteilung der unterschiedlichen Torfvorkommen in verschiedenen Tiefenlagen, bzw. das Fehlen einzelner Torflagen, wird in diesem Modell nicht durch aktive Schwankungen des Grundwasserspiegels erklärt, sondern durch die lokale Absenkung der Geländeoberkante unterhalb des Grundwasserspiegels. Diese Absenkungen vollziehen sich kleinräumig und zu unterschiedlichen Zeiten. Je nach Anzahl und Art der dokumentierten Torflagen innerhalb eines Sektors, lassen sich die Absenkungsereignisse abzählen und zeitlich relativ zueinander einordnen.

Torfe	Anzahl der Sektoren (Einzelvorkommen)	Anzahl der Torfe (total)	Sektoren
o	5	8	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10
m	2	4	2, 3, 4, 8
u	-	2	1, 4
o & m	1	2	2, 4
o & u	1	2	1, 4
m & u	-	1	4
o & m & u	1	1	4

Tabelle 1: Auflistung der Einzelvorkommen und der Kombinationen verschiedener Torfe innerhalb der einzelnen Sektoren der Bahrenfelder Senke.

Der untere Torf ist lediglich in Sektor 1 und Sektor 4 (hier zweimal) lokal erbohrt. Die Basis der drei Hohlformen in diesen beiden Sektoren muss zu dieser Zeit unterhalb des Grundwasserspiegels gelegen haben, damit es hier zu lokalen Torfbildungsprozessen kommen konnte. Die zentralen Tiefenanomalien der Basis des Lehms und der Mergel entsprechen in ihrer geographischen Lage den erbohrten unteren Torfen des Sektor 1 und der südlichen Bohrung in Sektor 4. Die Torfvorkommen der westlichen Bohrung in Sektor 4 wird nicht durch eine zentrale Tiefenanomalie der Sedimentmodelle bestätigt. Das Gebiet der anderen Sektoren innerhalb der heutigen Bahrenfelder Senke zeigt zu dieser

Zeit keine weiteren Torfbildungen und lag oberhalb des Grundwasserspiegels. Weitere Aussagen lassen sich hier aufgrund der geringen Datenmenge der unteren Torfe nicht treffen.

Der mittlere Torf ist in vier Sektoren der Bahrenfelder Senke gut ausgebildet. Zu dieser Zeit lag im Norden der Grundwasserspiegel in den Sektoren 2, 3 und 4 oberhalb der Basis der Hohlformen. Im Südwesten konnte sich nur in Sektor 8 der mittlere Torf ausbilden. Auffällig ist die große Torfmächtigkeit innerhalb der lokalen Hohlformen der nördlichen und des südlichen Sektors mit bis zu 5 m. Die Mächtigkeit des mittleren Torfes in Sektor 4 ist hingegen lokal sehr begrenzt und erreicht mit ca. 0,5 bis 2 m eine deutlich geringere Mächtigkeit (Abb. 31.), obwohl die Basis der Torfe markante Tiefenmaxima zeigt (Abb. 29 rechts). In Anbetracht der heutigen Ausdehnung der Bahrenfelder Senke zeigt sich, dass zu der Zeit der Bildung mittlerer Torfe, die Senkenstruktur deutlich kleiner gewesen sein muss. Die morphologische Unruhe der Geländeoberkante ist durch lokale Oberflächeneinbrüche geprägt, welche lediglich im Bereich des vierten Sektors mit denen der unteren Torfe geographisch übereinstimmen. Nördlich und südlich des vierten Sektors wird die Senke durch weitere Geländeeinbrüche erweitert und durch Torfe verfüllt. Die Symbole der zentralen Tiefenanomalien der weiteren Sedimentmodelle der Sektoren 1, 5, 6, 7, 9 und 10 lassen sich zur Zeit der Bildung des mittleren Torfes nicht mit Hohlformen und Torfbildungen korrelieren (Abb. 33). Zu dieser Zeit liegen diese Sektoren in den höheren Bereichen der Senke oberhalb des Grundwasserspiegels. Die genannten zentralen Tiefenanomalien der weiteren Sedimentmodelle dieser Sektoren entstehen erst zu einem späteren Zeitpunkt.

Der obere Torf findet sich in acht der zehn Sektoren wieder. Lediglich Sektor 3 im äußersten Norden und Sektor 8 im äußersten Südosten der Bahrenfelder Senke führen den oberen Torf nicht. Anhand der Bohrdaten lässt sich nicht eindeutig feststellen, ob es zur Zeit der Bildung des oberen Torfes zu einem allgemeinen Grundwasseranstieg innerhalb der Bahrenfelder Senke in den Sektoren 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9 und 10 gekommen ist, oder ob sich die Flur der Bahrenfelder Senke durch eine flächenhafte Absenkung mit lokalen Subsidenzzentren in ein Tiefniveau unterhalb des Grundwasserspiegels bewegt hat. Die Torfbildungen dokumentieren, dass die Morphologie der Bahrenfelder Senke zu dieser Zeit durch mindestens acht schüsselförmige Hohlformen geprägt war.

Bestätigt wird die Existenz dieser Depressionen zum einen durch die lokal auftretenden hohen Torfmächtigkeiten von bis zu 5 m. Diese fallen von ihrer geographischen Lage mit den zentralen Tiefenanomalien der weiteren Sedimentmodelle unterhalb der Basis des oberen Torfes zusammen (Abb. 32). Zum anderen belegen geringmächtige aber flächenhafte Torfbildungen innerhalb der heutigen Bahrenfelder Senke, dass zu dem Zeitpunkt der Bildung des oberen Torfes der Grundwasserspiegel geringfügig oberhalb der Randbereiche einiger Hohlformen gelegen haben muss. Auch dieses kann durch das Oberflächenmodell der Basis des oberen Torfs nachvollzogen werden. Die geographische Verteilung der einzelnen Absenkungstrichter, welche zu der Bildung dieser Torfe führte, zeigt Bereiche deutlicher Überschneidungen der Ränder einzelner Strukturen (Abb. 32 links). Diese Überschneidungsbereiche liegen entsprechend in einem geringeren Tiefniveau als die Randbereiche, welche sich nicht im Überschneidungsbereich mehrerer Absenkungen befinden. Der geringmächtige obere Torf konnte sich so in den flächenhaften Überschneidungsbereichen unterhalb des Grundwasserspiegels ausbilden. Abbildung 35 zeigt ein schematisches Entwicklungsmodell der Bahrenfelder Senke zur Bildungszeit der unterschiedlichen Torfe. Die jüngsten Absenkungsstrukturen sorgen für einen weiteren Massenverlust der Zentralbereiche der heutigen Bahrenfelder Senke. Während die Sektoren 2 und 4 bereits mehrfach deformiert wurden, erweitern besonders die Subsidenzen in den nordwestlichen und südwestlichen Sektoren die Großenke zu ihrem heutigen geographischen Ausmaß (Abb. 32).

Deformationsmuster der zentralen Bahrenfelder Senke: Innerhalb von Sektor 4 sind alle drei Torfe unterschiedlichen Bildungsalters durch Bohrungen dokumentiert. Diese werden im Folgenden zur Darstellung der mehrfachen Deformation innerhalb des Zentralbereichs der Bahrenfelder Senke herangezogen. Die Ausbildung einer ersten lokalen Subsidenz und somit ein erstes Deformationsereignis (**D1**) belegt die Dokumentation des unteren Torfs (**Tu**). Die Basis **Tu** ist konvex, während das Top **Tu** entsprechend dem Grundwasserspiegel zunächst subsöhllich gelagert ist. Anschließend kommt es zu sedimentärem Eintrag von den Rändern der Depression (Abb. 35a). Ein weiteres Subsidenzereignis (**D2**) führt wiederum zur Ausbildung einer Depression an der Geländeoberkante. Bereits zuvor verformte Sedimente des oberflächennahen Untergrundes werden erneut deformiert und Ablagerungen jünger **D1** erstmalig versteilt. Dabei tritt eine signifikante Versteilung besonders der Basisflanken der bereits zuvor deformierten Kollapsstruktur im Untergrund ein. Bezogen auf den Sektor 4 bildet sich zunächst eine seichte Senke aus. Deren Subsidenzzentrum liegt ca. 2,5 m unterhalb des derzeitigen Grundwasserspiegels, während die Wassertiefe an den nahe gelegenen Randbereichen lediglich ca. 0,5 bis 1 m beträgt. Innerhalb dieser Kollapsstruktur bilden sich bis zum Niveau des Grundwasserspiegels die mittleren Torfe (**Tm**) aus. Später kommt es von den Randbereichen, der zu diesem Zeitpunkt bereits deutlich vergrößerten Bahrenfelder Senke, zu Sedimenteinträgen in das Senkeninnere (Abb. 35 b). Dieser Prozess wiederholt sich ein weiteres Mal. Es kommt erneut zum Kollaps (**D3**), Flur sowie Sedimente werden deformiert und Flankenbereiche bereits bestehender Subsidenzstrukturen werden versteilt. In den nahe gelegenen Gebieten der zentralen Bahrenfelder Senke kollabieren zu dieser Zeit weitere, räumlich voneinander getrennt liegende Flurbereiche. Durch einen erhöhten gravitativen Massentransport und lösungsbedingte Massenverluste im tieferen

Untergrund erweitert sich der ursprünglich zentrale Senkenbereich räumlich zu einer Großsenke. Sektor 4 ist nun von wenigstens drei Kollapsstrukturen betroffen. Mindestens zwei dieser Strukturen überschneiden sich in Ihren Randbereichen. Während die westliche dieser beiden Strukturen ein junges, singuläres Subsidenzereignis darstellt, wurde der Kollapsmechanismus im Gebiet des östlichen Absenkungstrichters bereits zum dritten Mal aktiviert. Im Folgenden bilden sich in den Hohlformen und deren randlichen Überschneidungsbereichen die oberen Torfe (To) bis zum Tiefenniveau des Grundwasserspiegels aus (Abb. 35c).

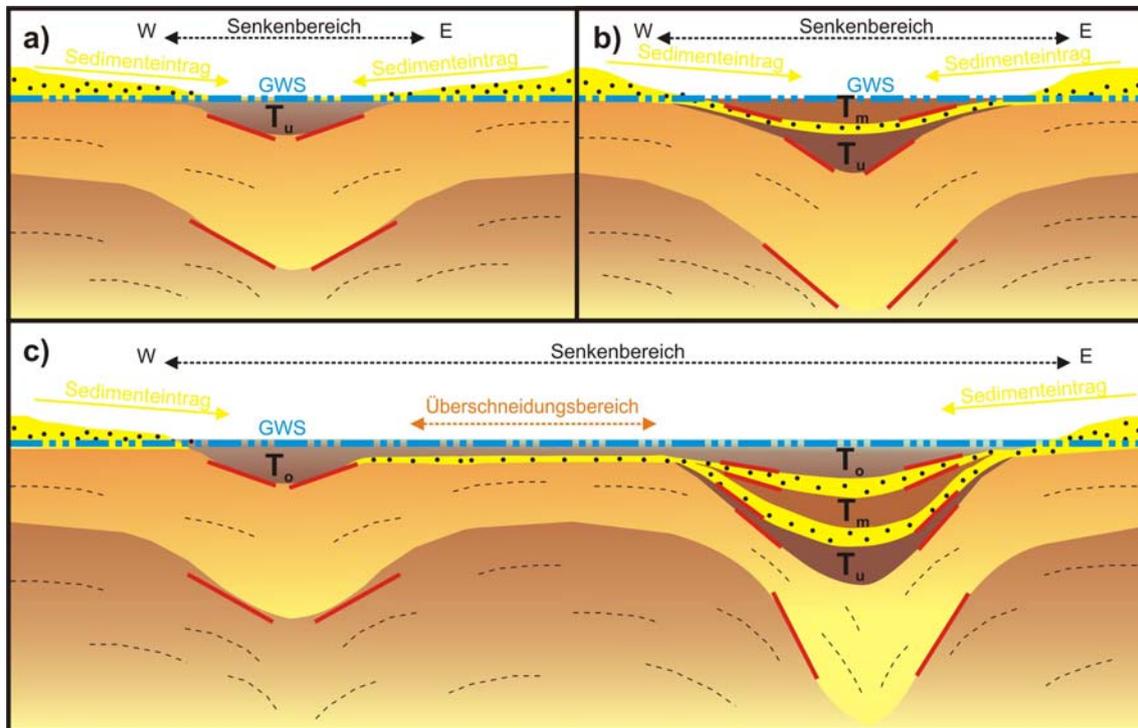


Abb. 35: Entstehung der Bahrenfelder Senke (schematische Darstellung). a) Kollapsereignis (D1) und Ausbildung der unteren Torfe (Tu) bis zum Grundwasserspiegel (GWS), b) zweites Subsidenzereignis (D2) unter Ausbildung der mittleren Torfe (Tm) bis zum konstanten GWS und fortschreitende Flankenversteilung bereits deformierter Sedimente, c) zwei zeitnahe Deformationsereignisse (D3) an benachbarten Lokalitäten unter Ausbildung der oberen Torfe (To) im Westen und im Osten. Im Überschneidungsbereich sinkt die Flur unter den GWS. Auch hier kommt es zur Torfbildung. Im Osten setzt sich die Versteilung der Flanken und bereits deformierten Tops fort. Der Senkenbereich erweitert sich intensiv (aus Buurman 2009).

Mit Hilfe des Modells der räumlich begrenzten, polyphasen Deformation des Untergrundes lassen sich nicht nur die verschiedenen Kombinationen einzelner Torfvorkommen mit ihren unterschiedlichen Bildungszeiträumen und Tiefenlagen, sowie die torffreien Bereiche innerhalb der Großsenke zu bestimmten Zeiten ableiten. Auch die räumliche Gestalt der mittleren Torfe wird hierdurch erklärbar. Innerhalb benachbarter Strukturen liegen mittlere Torfe mit steilen konvexen Basisflanken und konvexen Tops neben Torfbildungen mit vergleichbar gering ausgeprägter Morphologie der Basisflanken und subhorizontal gelagerten Tops. Bohrsäulen, die mittlere Torfe mit ausgeprägt konvexer Gestalt belegen, enthalten auch immer Vorkommen oberer Torfe in höheren Niveaus der Bohrsäule. Innerhalb der Bohrsäulen, welche mittlere Torfe von gering ausgeprägter konvexer Gestalt dokumentieren, fehlen hingegen diese jüngeren oberen Torfe.

Die Bahrenfelder Senke – eine Uvalastruktur

Die Bahrenfelder Senke entspricht mit ihrer breiten schüsselförmigen, etwas gewundenen Vertiefung einer Uvala-Struktur wie diese aus Karstgebieten bekannt sind. Diese Strukturen haben eine unebene Sohle und entstehen durch die Vereinigung mehrerer Erdfälle. Die Ausbildung der NS-streichenden Depression in Bahrenfeld wird durch den geologischen Prozess der intensiven Subrosion des oberflächennahen Salzstockdaches des OLD angetrieben. Durch die Ablaugung wasserlöslicher Gesteine des Diapirs kommt es zum Massentransport durch Lösung. Oberhalb des morphologischen Hochbereiches des Salzdomes entsteht so ein Massendefizit, welches durch gravitatives, lokales Nachsacken des Deckgebirges zu verschiedenen Zeiten ausgeglichen wird. Die durch Bohrungen dokumentierten

unterschiedlichen Torfbildungen belegen zum einen mehrfache Subsidenzereignisse an einer Lokalität. Zum anderen zeigt die kleinräumige Variabilität der Kombinationen verschiedener Torfe, die geographische Verbreitung jeder einzelnen Absenkung. Während sich zunächst einzelne Hohlformen an der GOK ausbilden und diese zumindest teilweise mit Torf verfüllt werden, kommt es über längere Zeiträume zur räumlichen Überschneidung der Randbereiche einzelner Hohlformen. Es entsteht eine längliche Karstwanne mit mehreren lokalen Tiefenmaxima. Die Senkenränder beschreiben eine unregelmäßige Gestalt, an denen sich eine Böschung ausbildet und zur Verflachung des Reliefs führt. Außerdem vergrößert sich der Durchmesser der Senkenstruktur und es kommt zu Sedimenteinträgen zum Senkeninneren hin.

Der räumliche Bereich des Massentransports durch Lösung im tieferen Untergrund sowie die Summe des gesamten Massendefizits der einzelnen Subsidenzereignisse über längere Zeiträume spiegelt sich somit in der morphologischen Gestalt der zentralen Bahrenfelder Senke entlang einer mehr oder weniger NS-streichenden Achse wieder. Die Korrelation zwischen dem Höhenmodell der GOK, den verschiedenen Höhenmodellen oberflächennaher Sedimente und den aktuellen Höhenmodellen des OLD, welche durch gravimetrische sowie seismische Daten erstellt wurden, zeigen deutliche Übereinstimmungen in ihrer geographischen Lage. Die Uvalastruktur „Bahrenfelder Senke“ zeichnet somit an der GOK ein inverses Abbild der Lösungsbereiche des OLD nach.

Das Gesamtvolumen der im tieferen Untergrund über geologische Zeiträume gelösten Gesteine des OLD lässt sich über das Volumen der Senke, das Gesamtvolumen der Torfverfüllungen unter Berücksichtigung des Kompaktionsgrades, sowie weiterer Sedimenteinträge grob abschätzen. Die Georadaruntersuchungen in der Struktur Pfitznerstrasse kommen zum gleichen Ergebnis. Hier wurden die Bewegungen über die Pollenanalyse zusätzlich datiert werden (siehe Analyse Struktur Pfitznerstrasse).

Die Lage sowie ein Register mit Klassifizierung der Erdfälle im Dachbereich des Othmarschen Langenfelde Diapirs findet sich im vertraulichen Anhang in der Karte II.

2.1.2 Verbundpartner GEOPHYSIK

Die Entwicklung eines Array Mess- und Analyse Verfahrens (WARAN):

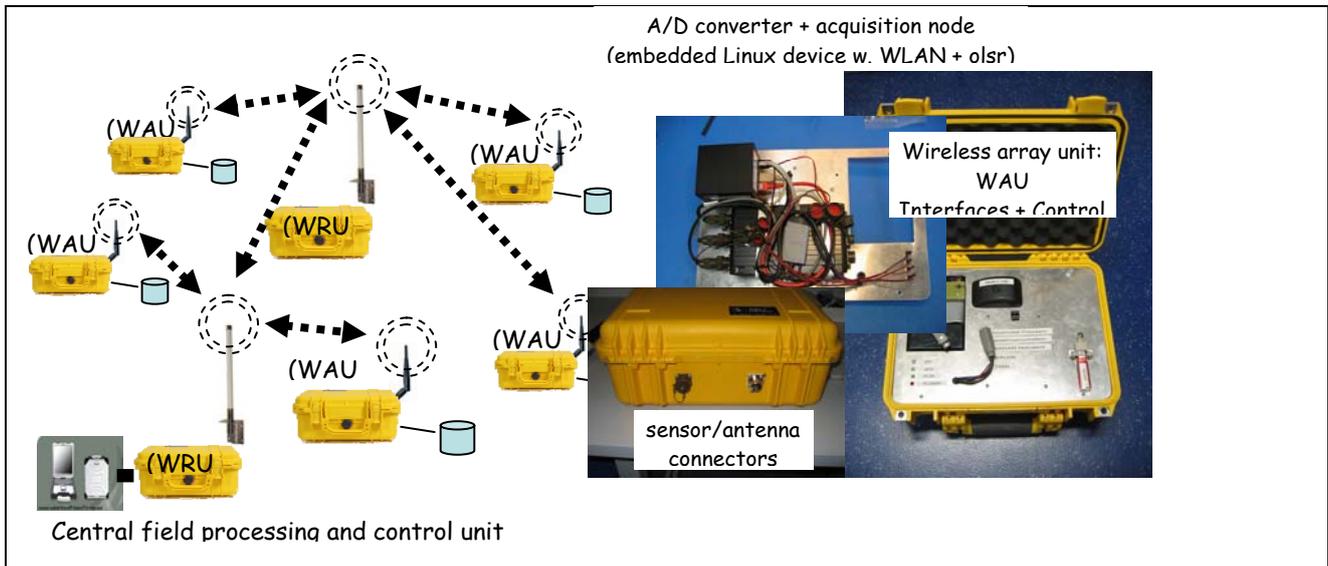


Abb. 36: WARAN Stationen mit kabelfreier Datenakquisition und WLAN Radiotelekommunikation. Das System unterstützt ein robustes und flexibles Multistations-Networking, geringen Stromverbrauch und ist einfach erweiterbar. Auf den Linux-Plattformen laufen die Echtzeit Datenakquisition und Transport Protokolle Seedlink (Heinloo GFZ).

Am Institut für Geowissenschaften der Universität Potsdam wurde ein Wireless Array Analysis System für kleinskalige Arrays entwickelt und erprobt, welches eine nahezu echtzeitfähige vor Ort Analyse im Feld gestattet. Das System wurde im Teilprojekt II im Laufe des ersten Jahres der HADU Förderung entwickelt und dann erfolgreich in Hamburg eingesetzt. Es wurden 15 Arraystandorte mit unterschiedlichen Geometrien und mehrere 100 Einzelstation H/V Messungen durchgeführt. Die kabellose Verbindung zwischen Einzelstationen des Arrays wird über spezielle WLAN-Knotenstationen gewährleistet. Die Vernetzung ist intelligent und baut nicht auf statischen Punkt-zu-Punkt Verbindungen auf, was Redundanz und damit Sicherheit der Datenübertragung gewährleistet. Seit der Entwicklung innerhalb von HADU ist das System von anderen Seismologie-Gruppen in Deutschland bereits mehrfach kopiert worden. Das System ist auf mehreren Tagungen vorgestellt worden (Ohrnberger et al., 2006, 2008) und eine technische Publikation ist in Arbeit.

Die Anwendungen in Hamburg haben gezeigt, dass die Messung der seismischen Bodenunruhe nahezu überall möglich ist, insbesondere auch innerhalb von Großstädten wie Hamburg. Durch die technologischen Entwicklungen zur Datenakquisition und Datenanalyse konnten nun selbst in logistisch schwierigen Mess-Umgebungen (Stadtgebiet) effiziente und qualitativ hochwertige seismologische Array-Messungen durchgeführt werden.

Die im Antrag vorgeschlagene adaptive Mess-Strategie wurde wie beschrieben umgesetzt und an 15 verschiedenen Standorten auf dem Stadtgebiet Hamburgs getestet. Die erzielten Ergebnisse (Rohprodukt: geschätzte Dispersionskurven) zeigen die erwarteten Verbesserungen hinsichtlich des abgedeckten Wellenlängen Bereiches. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass die Anzahl von acht seismischen Stationen ausreichend ist, um qualitativ hochwertige Mess-Ergebnisse zu erhalten. Die erarbeitete Mess-Strategie wurde seit 2006 außerdem bei knapp 50 Standorten in Deutschland und Europa angewendet und insgesamt etwa 250 Einzelarray-Messungen durchgeführt. In nahezu allen Fällen konnten speziell die Dispersionskurven-Ergebnisse im kurzen Wellenlängenbereich wesentlich verbessert werden. Oft ist es möglich, Frequenzen der seismischen Bodenunruhe im Bereich 15-25 Hz, in einigen Fällen sogar zwischen 30-40Hz nutzbar zu machen. Dieser Wellenlängenbereich war bisher die Domäne der aktiven MASW Verfahren und deren Ergebnisse wurden bisher oft nur als a priori Information in Inversionsverfahren eingebunden.

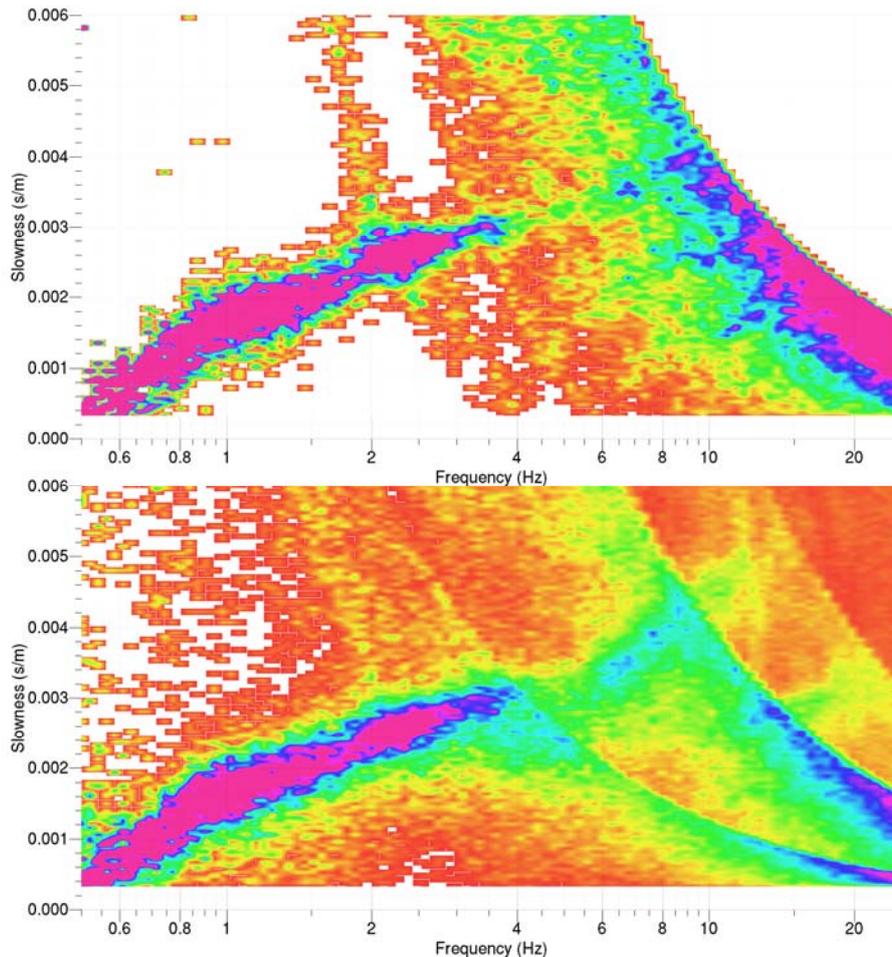


Abb. 37: Vergleich einer unbearbeiteten Dispersionskurven-Statistik für eine Einzelarraymessung (oben, Array-Apertur ca. 200 m) und der Zusammenschau aller Array-Messungen an einem Standort (unten, Array Aperturen von 15 m bis 900 m). Deutlich ist zu erkennen, dass im Frequenzbereich oberhalb von 4Hz nur die Ergebnisse aus den kleineren Messkonfigurationen eine Interpretation von Teilästen der Dispersionskurve ermöglichen.

Es bleibt zu bemerken, dass die Interpretation von Dispersionskurven stets als 1-D Approximation erfolgt, d.h. physikalische Materialparameter des Untergrundes werden als horizontal geschichtet angenommen und eine Variation ist nur entlang der vertikalen Dimension erlaubt. Streng genommen beschränkt sich die getroffene Annahme jeweils nur auf den Bereich innerhalb der Stationsaufstellung, d.h. für kleine Aperturen im Bereich von einigen Metern, für die größeren Aufstellungen im Bereich weniger hundert Meter. Gibt es nun starke laterale Variationen der Materialparameter im Gesamtbereich des untersuchten Standortes, könnte man erwarten, dass die Dispersionskurvenstücke, die aus kleinen und größeren Aperturen gewonnen werden, z. T. deutliche Unterschiede im überlappenden Wellenlängenbereich aufweisen. Erstaunlicherweise sind nach unserer bisherigen Erfahrung nur in sehr seltenen Fällen geringfügige Unterschiede zwischen partiell bestimmten Dispersionsästen von Messungen an Einzelarrays beobachtet worden. Dies spiegelt einerseits die glättenden Eigenschaften von Oberflächenwellen wider, lässt jedoch auch den Raum zu der Interpretation, dass nur ein geringer Grad an lateraler Inhomogenität (im Vergleich zur vertikalen Änderung), bei seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in sedimentärer Lagerung vorherrscht.

Die passive Aufzeichnung der seismischen Bodenunruhe an einem zeitlich synchronisierten und räumlich konzentrierten Stationsverbund (Array) ist zwar ein prinzipiell kostengünstiges Verfahren, stellt jedoch in urbanen (dicht bebauten) Gebieten eine gewisse logistische Herausforderung dar, wenn Messungen effizient gestaltet werden sollen. In HADU wurde diese Herausforderung mit einem einfachen und naheliegenderem Konzept begegnet und bereits in einer frühen Phase des Projektes soweit technisch umgesetzt, dass die angestrebten Array-Messungen der seismischen Bodenunruhe auf dem Hamburger Stadtgebiet wie geplant durchgeführt werden konnten. Das entwickelte System wurde mit dem Akronym WARAN (Wireless ARray ANalysis system) versehen.

Beim Zeitpunkt der Antragstellung (2004) wurde nach einer Marktanalyse und dem verfügbaren Finanzrahmen von den Antragstellern eine Punkt-zu-Punkt Datenkommunikation zwischen einem zentralen Auswerterechner und den einzelnen Datenaufzeichnungsgeräten favorisiert. Hierbei sollten TCP/IP Pakete über eine drahtlose Funkverbindung über den Umweg einer seriellen Kommunikationsschnittstelle (RS232) verschickt und am Empfangsrechner über eine sogenannte 'named pipe' (FIFO Datei) wieder verfügbar gemacht werden. Diese Art der Datenkommunikation war zu dieser Zeit erfolgreich in verschiedenen Projekten erprobt worden.

Zum Zeitpunkt der Antragsbewilligung gab es jedoch interessante Neuerungen in den WLAN Marktsegmenten zu beobachten. Hierbei waren speziell Entwicklungen im Bereich von Freifunk Netzen (<http://www.freifunk.org>) so vielversprechend, dass kurz vor Projektbeginn an der Universität Potsdam durch Eigenfinanzierung ein embedded Linux system mit integrierter Mesh-Fähigkeit als WLAN Kommunikationsknoten beschafft und im Sinne der Aufgabenstellung getestet wurde. Durch diese neu am Markt erschienene Hardware konnten mit einfachen Mitteln sogenannte MANETs (Mobile Ad-hoc NETWORKS) aufgebaut werden.

MANETs verwenden einen von 2 Kommunikationsmodi des WLAN Standards. Dieser sogenannte Ad-hoc modus ermöglicht eine direkte Kommunikation zwischen zwei gleichberechtigten Endgeräten über die WLAN Schnittstelle und steht im Gegensatz zu der normalerweise praktizierten 'Infrastruktur' Konfiguration, bei der ein Hauptgerät als sogenannter Zugriffsknoten (Access Point AP) agiert und andere Geräte als Nutzer oder Gast betrachtet werden. Neben Verwendung des Ad-hoc Standards zeichnet sich ein MANET noch zusätzlich über die Verwendung eines intelligenten Kommunikations-Protokolls aus, das jedem kommunizierenden Knoten in einem MANET sämtliche notwendigen Routing Informationen zur Verfügung stellt. Somit ist es jedem Gerät möglich, nicht nur mit den direkt erreichbaren (sichtbaren) nächsten Nachbarn zu kommunizieren, sondern mit allen Geräten des MANETS. Aufgrund der potentiell kompletten Vernetzung mobiler Endgeräte spricht man hier deswegen auch von sogenannten Mesh-Netzwerken. Eine weitverbreitete, da sehr robuste, Implementierung eines Mesh-Protokolls wird durch das 'Optimized Link State Routing Protocol' erreicht (olsr – <http://www.olsr.org>).

Der MANET Ansatz ist für die logistischen Randbedingungen bei der Datenkommunikation zwischen Sensorsystemen gegenüber Infrastruktur-basierten Verfahren vorzuziehen. Alle Knoten sind gleichberechtigt und können auf die gleiche Art und Weise konfiguriert werden (im Sinne der Kommunikationsparameter). Eine Umsetzung dieses Ansatzes wurde durch die bereits oben erwähnten Entwicklungen im Bereich des WLAN Massenmarktes (hardware) und der OpenSource Gemeinde (Entwicklung von Softwarekomponenten wie z. B. olsrd bzw. embedded linux systeme mit entsprechender Funktionalität) ermöglicht. Im Einverständnis mit dem Projektträger wurde deswegen die Konzeption von WARAN geändert und die Implementierung kostenneutral umgesetzt.

WARAN besteht aus folgenden Komponenten:

- acht identische Sensorsysteme / Sensorknoten, die von uns als Wireless Array Unit (WAU) bezeichnet werden. Jedes dieser Systeme besteht aus einem 3-Komponenten Seismometer, einem 3-Komponenten A/D Wandler mit GPS-Zeitsynchronisation und einem embedded Linux System mit Mesh-Funktionalität auf WLAN Basis und zugehöriger Antenne. Die Stromversorgung der Sensorknoten erfolgt über eine 12 Ah Bleigel Batterie.
- Drei identische Kommunikationseinheiten zur Reichweitenverlängerung. Diese Systeme werden als Wireless Repeater Units (WRU) bezeichnet und bestehen nur aus einem embedded Linux System mit Mesh-Funktionalität auf WLAN Basis und zugehöriger Antenne.
- Einem Auswertesystem, bestehend aus einem Laptop mit erweiterter Softwarekonfiguration, um die aufgezeichneten Datenströme von den Sensorknoten während des Messfortschrittes zu verarbeiten.
- Als Softwarekomponenten kamen reine OpenSource Entwicklungen zum Einsatz. Neben den verwendeten Betriebssystemen (angepasste Linux-OS für elektronische Kleinstgeräte) nylon und OpenWRT, ist für die geforderte Funktionalität vor allem der 'olsrd' (<http://www.olsr.org>) und die TCP/IP basierte Datenakquisitions-Server/Client Architektur 'seedlink' (Entwicklung Heinloo, GFZ Potsdam). Zur Echtzeitauswertung der Wellenformdaten im Hinblick auf Phasengeschwindigkeiten, wurden eigene Softwarekomponenten (cap Software Paket von Ohrnberger, 2004) mit Hilfe der OpenSource Bibliothek 'liblink' und 'libmseed' (beides von Chad Trabant) von weiterentwickelt und stehen selbstverständlich als OpenSource Entwicklung der Allgemeinheit zur Verfügung.

FAZIT: Nach unserer Kenntnis ist bzw. war WARAN die erste Entwicklung eines Sensor-Mesh-Netzes in der Seismologie, das nicht nur auf eine drahtlose Abfrage der Mess-Apparatur abzielt (Statuskontrolle), sondern die

aufgezeichneten seismischen Wellenformen in Quasi-Echtzeit¹ drahtlos kommuniziert und während laufender Messung ausgewertet. Obwohl hier prinzipiell auch eine Punkt-zu-Multipunkt WLAN Kommunikation (Standard Infrastruktur-Modus) möglich gewesen wäre, ist das hier angewendete MANET Prinzip aus mehreren Gründen vorzuziehen:

- 1) Der Ad-hoc Modus macht keinen Unterschied zwischen den einzelnen Kommunikationsknoten. Alle Knoten (ob Sensorknoten WAU, reiner Kommunikationsknoten WRU oder Auswerteknoten) können bezüglich der Kommunikationsparameter identisch konfiguriert werden.
- 2) Im Gegensatz zu einer 'Infrastruktur' Konfiguration ist es in einem MANET durch die Verteilung der Routing Information zwischen Nachbarknoten nicht notwendig, dass alle Sensorknoten den Auswerteknoten per direkter Sichtverbindung (also im single-hop) erreichen. Beim Fehlen der Mesh-Funktionalität würde in logistisch schwierigem Gelände mit vielen Hindernissen (z.B. dicht bebautes Stadtgebiet) die Herstellung der Funkverbindungen u. U. scheitern bzw. mindestens einen erheblichen zeitlichen Aufwand bei der Positionierung von Funkeinheiten bedeuten.
- 3) Da in MANETS zudem eine kontinuierliche dynamische Anpassung der Routing Tabellen aufgrund der gemessenen Signalstärken zwischen Nachbarknoten erfolgt, stellen veränderte Umgebungsbedingungen im Sinne von temporär auftauchenden Hindernissen zwischen einzelnen Kommunikationsknoten kein grundsätzliches Problem dar. Dieser Umstand ermöglicht eine Arrayverarbeitung der Wellenformdaten ohne Wartezeiten.

Die Echtzeitverarbeitung der Wellenformen wird durch die Kombination des MANET Konzeptes mit dem TCP/IP basierten client/server Konzept von seedlink ermöglicht. Nur aus diesem Grund ist es tatsächlich möglich, Messungen **sofort** auszuwerten und die folgenden Array-Experimente (Geometrie-Anpassung) auf Basis der bereits gewonnenen Information zu dimensionieren.

Kombinierte geophysikalische Messungen in HADU

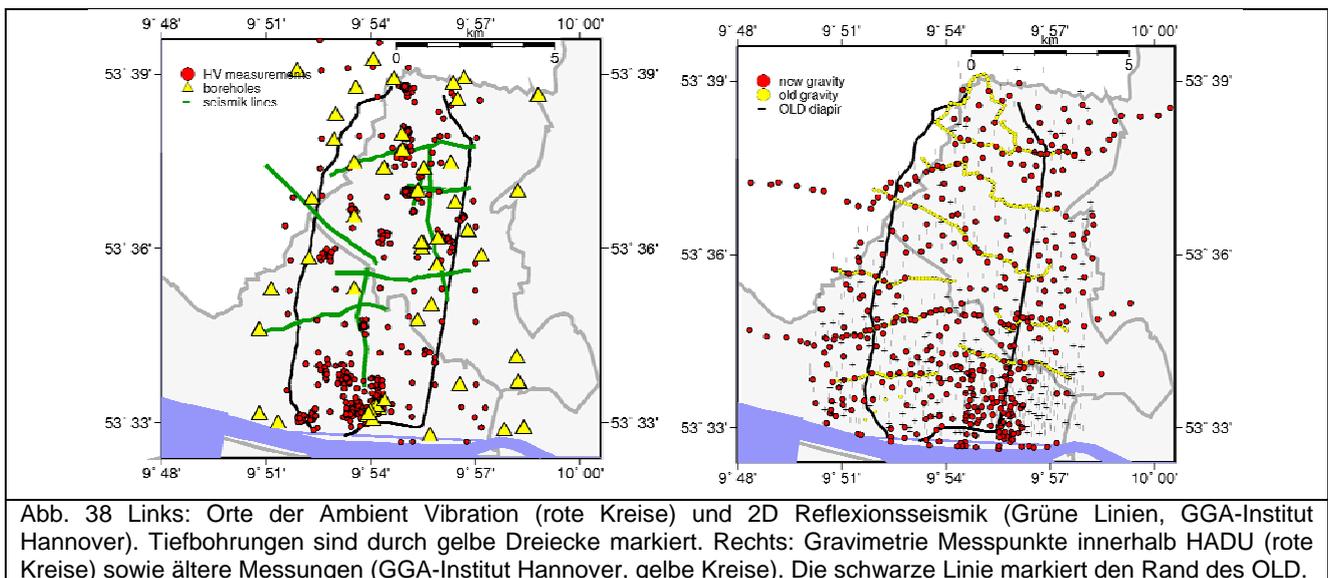


Abb. 38 Links: Orte der Ambient Vibration (rote Kreise) und 2D Reflexionsseismik (Grüne Linien, GGA-Institut Hannover). Tiefbohrungen sind durch gelbe Dreiecke markiert. Rechts: Gravimetrie Messpunkte innerhalb HADU (rote Kreise) sowie ältere Messungen (GGA-Institut Hannover, gelbe Kreise). Die schwarze Linie markiert den Rand des OLD.

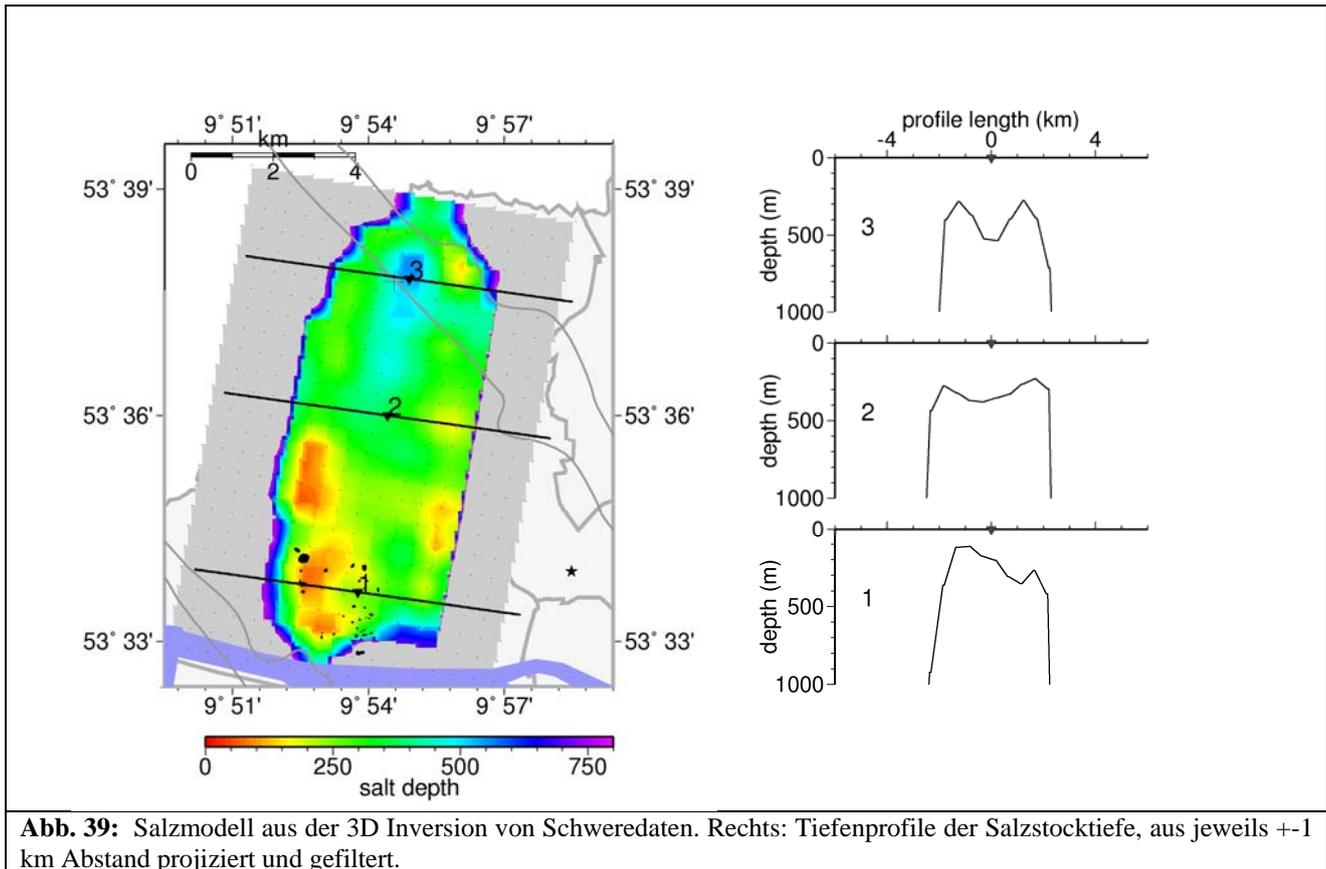
Im Teilprojekt der Geophysik wurden unterschiedliche Mess- und Erkundungsverfahren verwendet und die Vorteile einer kombinierten bzw. gemeinsamen Auswertung untersucht. Im Einzelnen wurden kleinskalige Hammerschlagseismik, flächendeckende Mikro-Gravimetrie innerhalb Hamburgs über den gesamten Salzstock, flächendeckende H/V Ambient Vibration Messungen und Array Messungen durchgeführt (Abb. 38).

¹ Der Ausdruck 'Quasi-Echtzeit' wird gewählt, da aufgrund des verwendeten Blockformates bei der Datenakquisition und Datenkommunikation ein geringer Zeitverzug durch die Datenblockung auftritt. Der Zeitverzug ist abhängig von der Samplingrate der Aufzeichnung und der benötigten Kommunikationszeiten durch das TCP/IP Protokoll und liegt bei den von uns verwendeten Einstellungen ($f_{\text{samp}} = 100$ Hz) in der Größenordnung von 3-5 Sekunden. Sogenannte 'harte Echtzeitbedingungen' bedeuten maximale Verzögerungen durch die Laufzeiten der Informationsübertragung mit Lichtgeschwindigkeit, also wenige Nano- bis Micro-Sekunden.

Hammerschlagseismik:

Die Hammerschlagseismik diente als Zusatzmessung, um die P- und teilweise auch S-Wellengeschwindigkeit der obersten Meter der unverfestigten Sedimente abzuschätzen. Die Auswertungen haben bestätigt, dass sich mit Kenntnis der Geschwindigkeiten in den obersten Metern die Inversion von tiefergehenden Geschwindigkeitsmodellen mit Hilfe von Arrays und H/V Peaks verbessern lassen (vgl. Kühn et al., 2009). Des Weiteren trugen die Daten zur Ableitung eines mittleren Sedimentmodells im Caprock des Salzstocks bei, das für eine aktuelle Erdbebensequenz im April 2009 in Hamburg-Flottbek bereits erfolgreich getestet werden konnte (Dahm et al., 2009).

Mikrogravimetrie:

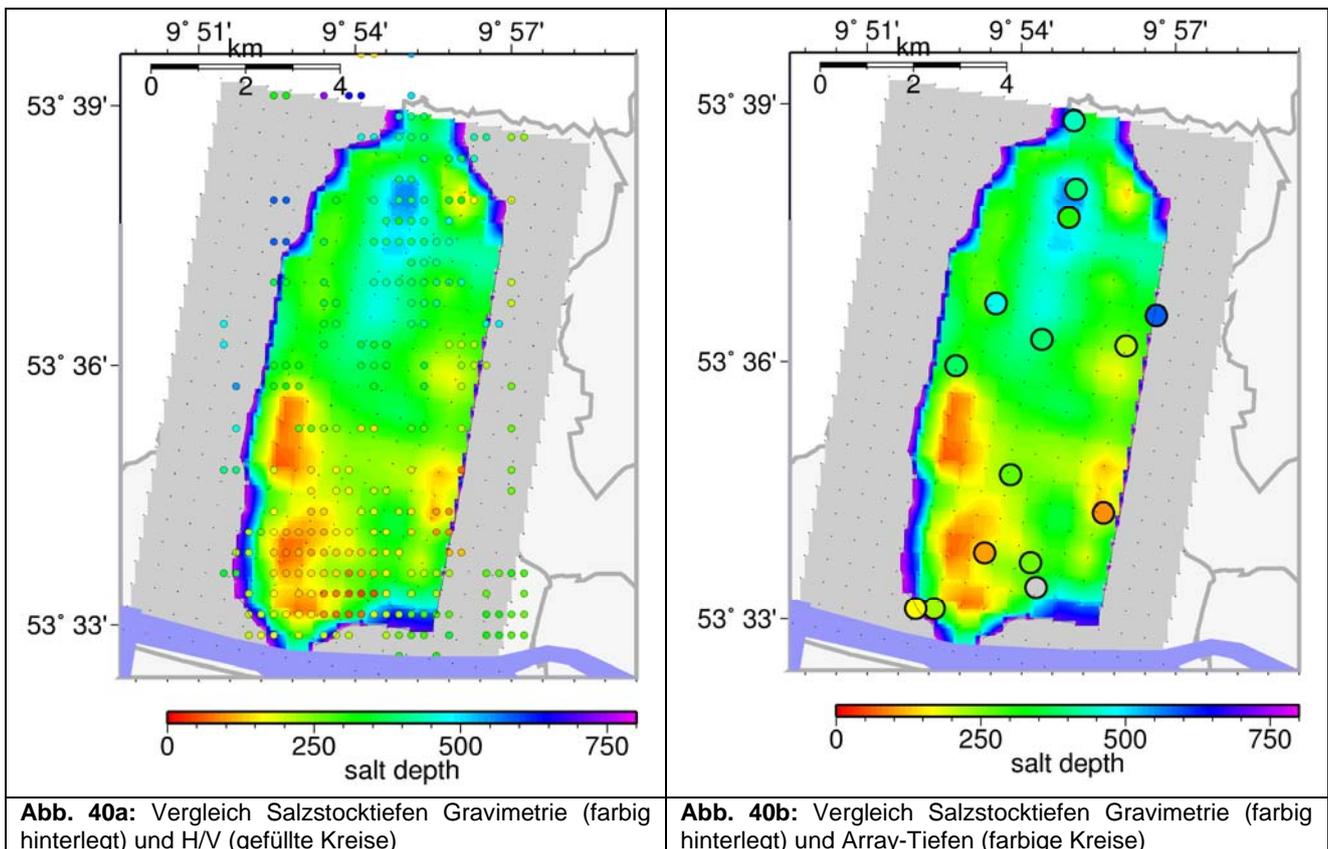


Schweremessungen wurden innerhalb der ersten 2 Jahre der Förderung kontinuierlich gesammelt. Zusätzlich wurden frühere Schweremessungen in den Datensatz integriert, und alle Daten gemeinsam prozessiert, um eine hochaufgelöste Bougueranomalie-Karte über dem Salzstock zu erhalten. Die Bougueranomalie wurde zur Ableitung eines 3D Morphologie- und Tiefenmodells des Salzstocks verwendet, wobei Bohrloch Statigraphiedaten und frühere Seismikmessungen als Constraints eingebaut wurden (Dahm et al., 2008). Für die 3D-Inversion der Schweredaten wurde eigens ein Inversionsprogramm entwickelt, welches ein kubisches Dichtemodell berücksichtigt und auf die Geometrie eines Diapirs in geschichteten Sedimentstrukturen abgestimmt ist. Das Schweremodell der Gravimetrie Daten bestimmt vor allem die tieferen Bereiche des Diapir-Dachgebäudes, und löst dabei im Wesentlichen den Übergang zwischen kompakten Steinsalz zu überliegenden Sedimenten und Caprock auf. Abb. 9 zeigt das entwickelte Salzstockmodell sowie drei Tiefenschnitte auf Querprofilen senkrecht zur Streichrichtung des Diapirs. Im südlichen Bereich des OLD reicht der Salzstock bis nur etwa 100 m unter die Oberfläche und fällt in Richtung Norden ab bis in Tiefen von etwa 400 m. Die neuen Daten haben die Pfannenstruktur des OLD bestätigt und erhärtet, zeigen aber auch, dass die Hochlagen entlang den Diapirschultern nicht gleichmäßig ausgebildet sind, sondern dass es im Schulterbereich einzelne Spots anomaler Salzstocktiefe gibt (z.B. ehemalige Ziegelei mit Gipsabbau oder im Nordosten des OLD unter Hamburg). Die Pfannenstruktur und Morphologie des OLD kann durch Subrosion und Lösungseffekte gedeutet werden. Innerhalb HADU wurden unterschiedliche Daten und Indikatoren für Salzlösung gesammelt und miteinander verglichen, und insgesamt konnte damit gefolgert werden, dass die Dachregion des OLD auch heute noch signifikanter Subrosion und Salzlösung unterliegt (Dahm et al., 2008).

Ambient Vibration Messungen

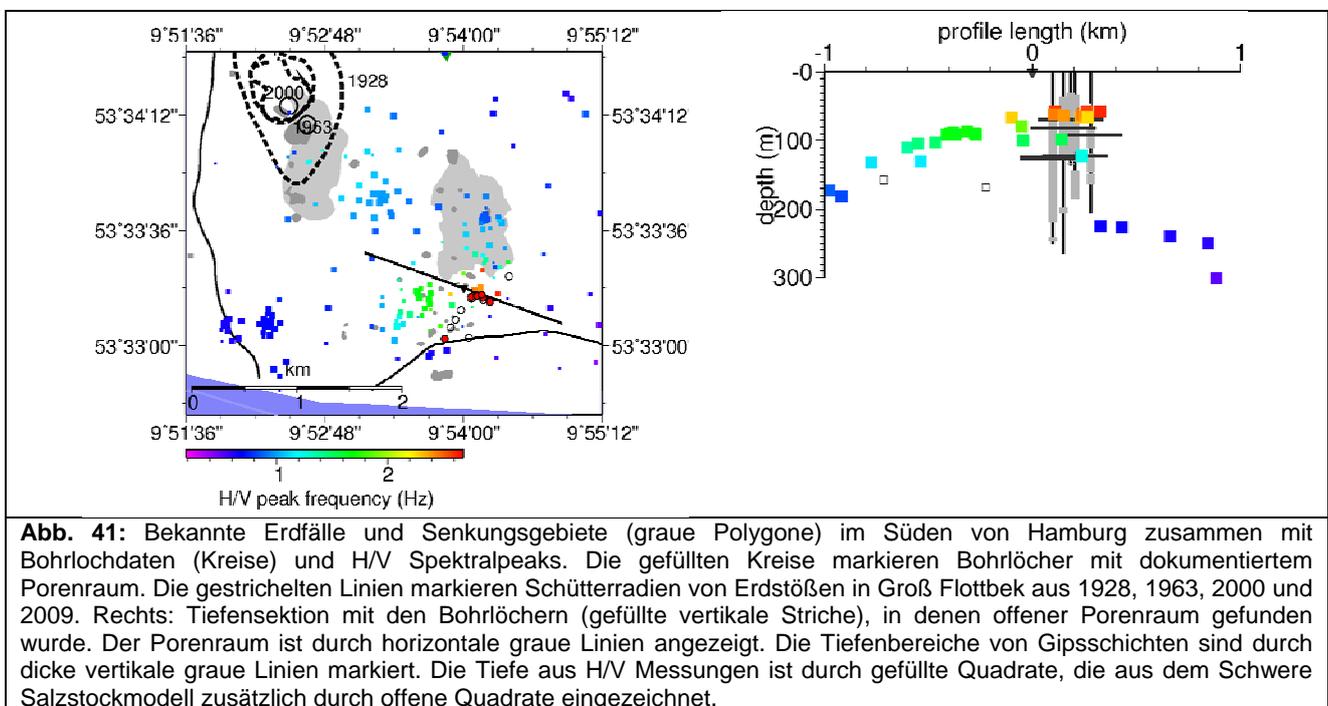
Ein wichtiges Ziel des Teilprojektes der Geophysik in HADU war die Erkundung des Salzstockes mit Hilfe von H/V und kleinskaligen seismologischen Arrays, d.h. sogenannten Ambient Vibration Verfahren. Diese Verfahren nutzen die ständige seismische Bodenunruhe, um daraus Strukturinformationen über den Untergrund zu erhalten. Insbesondere konnten durch die Auswertung von Peaks in H/V Spektren (Verhältnis von horizontalen zu Vertikalen Amplitudenspektren) die Tiefenlagen des ersten signifikanten Scherwellen Geschwindigkeitskontrastes bestimmt werden. Die Frequenz-Wellenzahl Analyse des Hintergrundrauschens auf Arrays konnte benutzt werden, um frequenzabhängige Phasengeschwindigkeiten von Rayleighwellen zwischen etwa 0.5 und etwa 20 Hz zu bestimmen. Die sogenannten Dispersionskurven lassen sich in ein Scherwellen Geschwindigkeitsmodell invertieren (ebenso wird die Dichte und P-Wellengeschwindigkeit abgeschätzt). Die wichtige Frage in HADU war, wie gut sich die Ambient Vibration Verfahren für die Erkundung eines flachen Salzstockes unter einer Stadt eignen, und welche Vorteile eine kombinierte Messung und Auswertung bringen.

Die Ergebnisse werden ausführlich in Dahm et al. (2008) und Kühn et al. (2009) diskutiert (beides im Anhang). Für die Evaluation der Ambient Vibration Methoden spielte das entwickelte Salzstockmodell aus Schweredaten sowie die innerhalb HADU zusammengetragenen Bohrlochdaten eine wichtige Rolle. Die flächenhafte Umrechnung der H/V Peaks in Pseudotiefen erfolgte anhand der Kalibration mit Hilfe von Bohrloch-Informationen über Gips und Salztiefen sowie mit Hilfe des Salzstockmodells aus der Gravimetrie. Eine „beste empirische Beziehung“ für die Pseudotiefe ergab $z = a \cdot f^b$, mit $a=125.29$ und $b=13.91$ (vgl. Kühn et al., 2009, Dahm et al., 2008).



Die Ambient Vibration Pseudotiefen wurden mit den Ergebnissen aus flächenhaft gravimetrischen Messungen verglichen (Abb. 40a). Dabei stellte sich heraus, dass H/V und Gravimetrie nicht die gleichen Strukturen auflösen. Während die Gravimetrie den Übergang von Sedimenten zu kompakten Salzstockschichten auflöst, erkennen die H/V Messungen auch Bereiche von Caprock Floatern oder Bereiche erhöhter Porosität (siehe Kühn et al., 2009). Das konnte vor allem im südlichen zentralen Bereich des OLD erkannt werden, wo auch genügend Bohrlochmessungen bis in den Gips für einen systematischen Vergleich zur Verfügung standen (s.u. und Dahm et al., 2008). Gravimetrie und H/V Messungen ergänzen sich daher und bieten sich als kombinierte geophysikalische Erkundungsmethode an.

Die Tiefenstrukturen aus den punktuellen Arraymessungen passen gut zu den bestimmten Tiefen des Salzstockes aus der Gravimetrie (Abb. 40b). Die wenigen Ausnahmen liegen allesamt direkt am Rand des OLD. Die 1D Inversion von Arraymessungen ist im direkten Randbereich vermutlich nicht mehr zulässig. In dem Projekt konnte gezeigt werden, dass Array Messungen zusätzlich auch notwendige Parameter zur Kalibration der H/V Messungen für die obersten 10-er Meter bereitstellen. Unter Zuhilfenahme der Arraymessungen und der Hammerschlag-Seismik konnte ein brauchbares mittleres Geschwindigkeitsmodell für die überliegenden Sedimente abgeleitet werden, welches z.B. zur Interpretation vom Mikrobeben ($M < 0.5$) im April 2009 in südlichen Bereich des Salzstockes verwendet wurde (siehe Dahm et al, 2009). Die Erdbeben unter Groß Flottbek traten in einem Bereich des OLD auf, der innerhalb von HADU durch Erdfälle und Subrosions-Indikatoren charakterisiert wurde. Mit Hilfe der erzielten Ergebnisse aus HADU, und zusammen mit aufgezeichneten Seismogrammen an drei Stationen, konnten die Erdbeben genauer untersucht und z.B. Herdtiefen abgeschätzt werden. Alle drei Beben traten in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander in einer Tiefe von etwa 90 m oder mehr auf. Die Bebenherde liegen entweder auf oder aber etwa 60 m über dem eigentlichen Sediment-Salz-Übergang (Dahm et al., 2009). Mögliche Ursachen der Erdbeben sind entweder der Einsturz von Paläo Gipskarst, die Migration einer Sedimentröhre über einem Lösungshohlraum, oder Reibungsinstabilitäten auf einer Rutschungsfläche eines Lösungstrichters über der Flottbek Markt Senke.



Das wiederholte Auftreten von Erdstößen aus einem lokalen Gebiet in Groß Flottbek lässt vermuten, dass unter Groß Flottbek Gips und möglicherweise größere Hohlräume existieren. Allerdings gibt es dafür bisher keinen direkten Beweis. Auf der anderen Seite zeigen die Tiefbohrungen im zentralen südlichen Bereich des OLD offenen Porenraum zwischen etwa 90 und 140 m Tiefe (rotgefüllte Kreise in Abb. 10). Die meisten Bohrlochdaten indizieren Gips und keinen Anhydrit. Der Gips-Caprock scheint aber nicht kompakt sondern nur bruchstückhaft mit Ton- und Schluffschichten durchsetzt (z.B. Bohrung 6036-C2, Sternwoll-Spinnerei). Wir vermuten daher keinen starken Dichtekontrast in Tiefen der ersten Gipsfloater.

Die Interpretation der mäßigen Bougueranomalie über dem Bereich der dicken Caprock Schichtpakete trotz eines starken Geschwindigkeitskontrastes in geringer Tiefe kann dadurch erklärt werden. Eine kompakte Gips-schicht hat eine Dichte von etwa 2320 kg/m^3 , während die mittlere Dichte von Ton nur etwa $1800 - 1900 \text{ kg/m}^3$ ist (Bohrung 5836 D135, Plaumann, 1979). Ein Schichtpaket aus Gips und Ton wird daher keinen starken Dichtekontrast gegenüber den überliegenden Sedimenten aufweisen. Abb. 10 zeigt die spektralen Peaks und Pseudotiefen aus H/V Messungen, die im zentralen südlichen Bereich eine Anomalie aufweisen und die Hochlage der Caprock Schichten auflösen können.

2.1.3 Literaturverzeichnis

- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor - Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. Hrg. BGR Hannover und Staatl. Geol. Dienste in der Bundesrepublik Deutschland. Hannover, 88 Seiten, 3 CD-ROMs
- Bentz, A. (1949): Erdöl und Tektonik in Nordwestdeutschland, Germany, Amt Bodenf. Hannover-Celle: 387
- Buurman, N. (2009): Dissertation Universität Hamburg – Charakterisierung von Zirkular-Strukturen im geologischen Untergrund Hamburgs zur Abgrenzung verkarstungsfähiger Bereiche. (Arbeitstitel).
- Dahm, T. and Kühn, D. and Kröger, J. and Wiederhold, H. and Reuther, C.D. and Dahghani, A. and Scherbaum, F., (2008): The roof region of a shallow salt diapir in the metropolitan area of Hamburg, Germany: A geophysical approach. Submitted to Geophys. J. Int., revised.
- Dahm, T. and Heimann, S. and Bialowons (2009): A seismological study of shallow weak earthquakes in the urban area of Hamburg city, Germany, and its possible relation to salt dissolution. Manuscript, attached to this final report.
- Grube, F. (1973): Ingenieurgeologische Erkundung der Erdfälle im Bereich des Salzstockes Othmarschen-Langenhofe (Hamburg). Symposium, sink-holes and subsidence : engineering - geological problems related to soluble rocks = effondrements et affaissements : problèmes de géologie de l'ingénieur relatifs aux roches solubles : proceedings, Hannover, 1973, Essen : Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau: pp1-7 (T4-B)
- Hinsch, W. (1986): Strukturell-halokinetische Gliederung Schleswig-Holsteins im Känozoikum. Structural-halokinetic division of Schleswig-Holstein in the Cenozoic. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde, vol.18, pp.603-609, 1986
- Hinsch, W. (1986): The Northeast German Tertiary basin; Miocene and Pliocene. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde, vol.18, pp.679-699, 1986
- Klimchouk, A.B. (2000) The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. and Dreybrodt, W. (eds), Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers, pp. 91-99. National Speleological Society: Huntsville.
- Kühn, D. and Ohrnberger, M. and Dahm, T. (2009): Imaging a shallow salt diapir using ambient seismic vibrations beneath the densely built-up city area of Hamburg, Northern Germany. Manuscript, attached to this final report.
- Linke, G. (1983): Geologische Übersichtskarte Raum Hamburg 1:50000, Quartärbasis, Blatt 1: Morphologie. Hamburg: Geologisches Landesamt
- Linke, G. (1983): Geologische Übersichtskarte Raum Hamburg 1:50000, Quartärbasis Blatt 2: Geologie-Präquartärer Untergrund. Hamburg: Geologisches Landesamt
- Linke, G. (1996): Aufbau und Entwicklung der Salzstruktur Othmarschen-Langenhofe-Schnelsen-Quickborn. In: Feldmann, L. & Quade, H. (Hrsg): Der Untergrund der Norddeutschen Tiefebene, Exkursionsführer und Veröffentlichungen GGW vol.197, pp.47-48
- Löhnert, E. (1965): Glaziäre Rinnen im Raum Hamburg und ihre Beziehungen zum präquartären Untergrund. Abhandlungen und Verhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins in Hamburg, N.F. Bd.X: pp 47-51
- Niedermayer¹, J. (1962) Die geologischen Verhältnisse im Bereich des Salzstockes von Hamburg-Langenhofe. Abh.u.Verh.Naturwiss.Ver. in Hamburg, vol. 6: pp167-175
- Niedermayer², J. (1962): Baugeologische Probleme in Hamburg. Zeitung der Deutschen Geologischen Gesellschaft, vol. 114: pp189-194
- Ohrnberger, M., Vollmer, D. and Scherbaum, F. (2006): WARAN - A mobile wireless array analysis system for in-field ambient vibration dispersion curve estimation, Abstract-ID 2017, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, ECEES, 3-8 September, 2006, Geneva, Switzerland.

- Ohrnberger, M., Vollmer, D., Endrun, B. (2008): A Portable Wireless Array Analysis System for in-Field Estimation of Shear Wave Velocity Profiles from Ambient Seismic Wave-Fields, 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2008, Hersonissos, Crete, Greece, 7-12 September 2008
- Paluska, A. (2002): Erdfall am Flottbeker Marktweg.- 68 S., Geologisches Landesamt, BUG Hamburg (unveröffentlichtes Gutachten)
- Plaumann, S. (1979): Schweremessungen über dem Bereich des Salzstockes Othmarschen Langenfelde in Hamburg. Report, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NlfB).
- Prexl, A. (1997): Geologie von Salzstockdächern – Ergebnisse aus der Interpretation 2D seismischer Linien von Gorleben, Othmarschen-Langenfelde (Hamburg) und der deutschen Nordsee.-Dipl.-Arbeit, Hannover: 62
- Reuther, C.-D, Buurman, N., Kühn, D., Ohrnberger, M., Dahm, T. & Scherbaum, F. (2007): Erkundung des unterirdischen Raumes der Metropolregion Hamburg – Das Projekt HADU (Hamburg a dynamic Underground).- Geotechnik 30(2007)1, S.: 11- 20.
- Rickert, B.-H. (2008): Pollenanalytische Datierungen an organogenen Sedimenten in Erdfällen im Rahmen des HADU-Projekts.- unveröff. Abschlussbericht HADU-Projekt, 23 Seiten
- Waltham, T., Bell, F. and Culshaw, M. (2005) Sinkholes and Subsidence, Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Williams, P.W. (1983) The role of subcutaneous zone in karst hydrology . Journal Hydrology, 61, 45-67

2.1.3 Erfolgskontrollbericht

2.1.3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms:

Die entwickelten Erkundungsmethoden und deren beispielhafte Anwendung tragen zu Zielen des Programms "Innovative Technologien zur Erkundung des Untergrundes" bei.

2.1.3.2 Wissenschaftlicher oder technischer Erfolg des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen:

Die wissenschaftlichen und technischen Erfolge werden für die geologischen und geophysikalische Teilprojekte als hoch angesehen. Der wissenschaftliche Erfolg äußert sich in den bereits publizierten Ergebnissen und in der im Bereich Geophysik zur Publikation vorliegenden Manuskripte und den Präsentationen bei wissenschaftlichen Kongressen (s.a. Punkt IV des Erfolgskontrollberichtes). Eine umfangreiche Dissertation die im Teilprojekt Geologie begonnen wurde (Dipl.-Geol. Nils Buurman befindet sich in der Abschlussphase. Die Arbeit wird publiziert, ferner sind weitere Publikationen daraus vorgesehen).

Der wissenschaftlich technische Erfolg manifestiert sich in der Tatsache, dass das Konzept der WLAN basierten seismologischen Echtzeit Array Analyse bereits von mehreren Gruppen übernommen wurde und auch teilweise weiterentwickelt wird. Im Rahmen des EU-Projektes NERIES wurde z.B. das WARAN Konzept zur Untergrunduntersuchung von Starkbebenstations-Standorten in verschiedenen Ländern Europas eingesetzt. Ähnliche Geräte-Entwicklungen bzw. das 'Meshing' seismologischer Sensoren mit dem Ziel der Echtzeitauswertung von Multi-Sensor-Netzwerken werden z.Z. an der Université Joseph Fourier Grenoble (LGIT, Arbeitsgruppe P.-Y. Bard und D. Jongmans), an der ETH Zürich (Arbeitsgruppe D. Fäh) und am Institute of Engineering Seismology & Earthquake Engineering (ITSAK, Arbeitsgruppe Theodulidis und Savvaidis) in Thessaloniki in Kooperation mit der Universität Potsdam vorangetrieben.

In ähnlicher Form, allerdings mit unterschiedlichem Schwerpunkt -der kontinuierlichen Überwachung vulkanischer Seismizität bei größeren Dimension der Funkstrecken- wurde das Konzept der seismologischen Sensornetze im BMBF Projekt Exupery (Geotechnologien Programm Frühwarnsysteme) weitergeführt und erprobt.

Mit den Georadar- und Geoelektrik-Untersuchungen wurde die Strukturierung von Senkungsstrukturen exemplarisch erfasst. Aus den Georadardaten wurde für spezielle Bereiche der Hamburger Stadtbezirke Altona und Eimsbüttel eine Erdfallkarte sowie ein Erdfallregister erstellt. Die Erdfälle wurden in verschiedene Unterklassen differenziert und damit der unterschiedliche Charakter der Erdfallbildung und den verbundenen Geogefahren aufgezeigt. Die in Hamburg mit den Georadaruntersuchungen gesammelten Erfahrungen lassen sich sehr gut auf die Einstufung der Entstehung und Aktivität von Erdfällen (speziell von verdeckten Erdfällen) in Erdfallgebieten in Schleswig-Holstein und Niedersachsen in der Verbindung mit Salzstöcken im Untergrund anwenden. Insbesondere wurden mit der Erfassung der Untergrundstrukturen in bebauten Gebieten klare Hinweise dafür gefunden, welche Gründe zur Absenkung des Untergrunds geführt haben und somit Schäden an Bauwerken verursachten. Mit dem im Projekt für das Radargerät entwickelten Schwimmkastens wurde aufgezeigt, dass Radaruntersuchungen des geologischen Untergrunds auch von einer Wasseroberfläche aus möglich sind.

2.1.3.3 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung:

Der Finanzplan als auch der Zeitplan des Projektes wurden weitgehend eingehalten. Von der bewilligten Zuwendung in Höhe von 469.003,00 € wurden 7.041,44 € nicht eingesetzt und an den Projektträger zurück überwiesen.

2.1.3.4 Fortschreibung des Verwertungsplan:

(Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen)

1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Vom Zuwendungsempfänger selbst oder von eingeschalteten Dritten wurden weder Erfindungen gemacht oder Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen noch wurden Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen in Anspruch genommen. Standortbezogene Lizenzen – keine.

2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).

seitens Verbundpartner Geologie der Universität Hamburg: keine
 seitens Verbundpartner Geophysik der Universität Hamburg: keine
 seitens Verbundpartner Institut für Geowissenschaften Universität Potsdam: keine

Die Ergebnisse sind in erster Linie rein wissenschaftlicher Natur.

3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen

Die kombinierte Auswertung von passiv seismologischen Beobachtungen der seismischen Bodenunruhe und Gravimetrie-Daten wurde im Rahmen des Projektes beispielhaft durchgeführt und wird für ähnlich gelagerte Fragestellungen in anderen Regionen vorbildhaft sein.

Nutzen für öffentliche Aufgaben: Aus wissenschaftlicher Sicht geben die Ergebnisse der vorgenommenen Untersuchungen Hinweise auf mögliche Gefährdungstatbestände. Der Bericht wird gleichzeitig mit der Abgabe an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) an das Bezirksamt Altona (Dezernat Wirtschaft, Bauen und Umwelt), das Bezirksamt Eimsbüttel (Dezernat Wirtschaft, Bauen und Umwelt) sowie an das Geologische Landesamt (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt) der Freien und Hansestadt Hamburg übergeben, mit der Bitte verwaltungsseitig zu prüfen, ob sich hinsichtlich der Forschungsergebnisse ein Handlungsbedarf ergibt.

Der wissenschaftliche Kontakt und die Zusammenarbeit zwischen dem Geologischen und Geophysikalischen Institut der Universität Hamburg mit dem Geologischen Landesamt (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt) bleibt weiter bestehen. Sämtliche Ergebnisse werden dem Geologischen Landesamt Hamburg zur Verfügung gestellt und sind dort einsehbar. Das Geologische Landesamt führt in diesem Rahmen im Zuge der Fortführung der geologischen Landesaufnahme die Beobachtungen der geologischen Veränderungen weiter.

4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse.

Das Projektergebnisse bilden eine gute Grundlage zur Entwicklung von Systemen zur gezielten Erfassung von Hohlräumen im verdeckten Untergrund bebauter Bereiche. Die Datengrundlage erlaubt die Entwicklung eines Konzepts zur Untergrunddarstellung dieser bebauten Bereiche einer Stadt. Die nächsten Schritte wären auf der Basis der Georadarergebnisse Ansätze zu seismischen Untersuchungen des bislang nicht erfassbaren Tiefenbereichs zwischen 10 und 100 m Tiefe. Hierzu könnten Systeme für die Abbildung der Variationen der Scherwellengeschwindigkeiten im verdeckten Untergrund bebauter Bereiche weiter entwickelt werden. Weitere Maßnahmen wären die Kombination von aktiven ('Multiple Analysis of Surface Wave' - MASW) Beobachtungsverfahren zur verfeinerten Interpretation lateraler Heterogenitäten des Untergrundes in flachen Tiefenbereichen (< 40 m) und den größeren, aber tiefer reichenden passiven Beobachtungen (Tiefenbereich zw. 10 m und 200-500 m).

Auf der Basis der im Projekt ermittelten Erdfalltypen mit „kriechender“ Aktivität mancher Erdfälle müssten jetzt gezielte LIDAR-Messungen (*Light detection and ranging*) zur 3D-Aufnahme der Erdfälle durchgeführt werden. Damit könnten genaue Absenkungsraten bestimmt werden und die dadurch zu erwartenden Gebäudeschäden abgeschätzt werden, beziehungsweise könnten bei Neubaumaßnahmen entsprechende bauliche Vorkehrungen getroffen werden. In Zusammenarbeit mit baugrundtechnischen Institutionen könnten die vorliegende Projektergebnisse als Basis für dynamischen Untersuchungen des oberflächennahen geologischen Untergrunds dienen (z.B. Auswirkungen des Straßenverkehrs auf den Untergrund). In Zusammenarbeit mit wirtschaftlich orientierten Institutionen könnten auf der Basis des im Projekt festgestellten Gefährdungspotential der Erdfälle eine Georisikenanalyse vorgenommen werden.

2.1.3.5 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben:

nicht zutreffend.

2.1.3.6 Wissenschaftlichen Tagungen auf denen das HADU-Projekt von den Verbundpartnern präsentiert wurde (aufgeführt sind sämtliche Arbeiten/Präsentationen der Hamburger Verbundpartner Geologie und Geophysik sowie die an diesen Arbeiten beteiligten Wissenschaftler des Verbundpartner Geophysik der Universität Potsdam):

2005

Geo Erlangen 2005 System Earth - Biosphere Coupling Regional Geology of Central Europe vom 24. – 29. September 2005

Buurman, N., Reuther, C.-D. & Reiss, S. (2005): 3D-GPR mapping of a recent active subsidence area (sink hole) at Lüneburg salt diapir, northern Germany. *Geo Erlangen 2005 System Earth - Biosphere Coupling Regional Geology of Central Europe vom 24. – 29. September 2005*

Reiss, S., Reuther, C.-D. & Buurman, N. (2005): Insights in the dynamic underground of Hamburg. *Geo Erlangen 2005 System Earth - Biosphere Coupling Regional Geology of Central Europe vom 24. – 29. September 2005*

Reuther, C.-D., Reiss, S. & Buurman, N. (2005): Georadar assessment regarding *subsidence and collapse structures* in urban regions: The HADU project: Hamburg – a dynamic underground. *Geo Erlangen 2005 System Earth - Biosphere Coupling Regional Geology of Central Europe vom 24. – 29. September 2005*

2006

11. Symposium “Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie”, 22.—24. März 2006 – Göttingen, Germany

Buurman, N. (2006): Erkundung von Erdfallstrukturen in der Metropolregion Hamburg und Lüneburg mit dem Georadar (Ground Penetrating Radar).- 11. Symposium “Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie”, 22.—24. März 2006 – Göttingen, Germany

Buurman, N. & Reuther, C.-D. (2006): Erkundung von Erdfallstrukturen in der Metropolregion Hamburg und Lüneburg mit dem Georadar (Ground Penetrating Radar). 11. Symposium “Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie”, 22.—24. März 2006 – Göttingen, Germany

European Geosciences Union (EGU) 02. - 07. April, 2006 – Wien, Austria

Buurman, N. & Reuther, C.-D. 2006: Profiling of sinkholes in the metropolitan region of Hamburg and Lüneburg with ground penetrating Radar. EGU 02. - 07. April, 2006 – Wien, Austria, Geophysical Research Abstracts Vol. 8 EGU06-A-01878

Reuther, C.-D., Buurman, N. & Reiss, S. (2006): Hamburg- A dynamic Underground (The HADU project). EGU 02. - 07. April, 2006 – Wien, Austria, Geophysical Research Abstracts Vol. 8 EGU06-A-01868

Kühn, D., Ohrnberger, M., Vollmer, D., Dahm, T., Scherbaum, F. and Dehghani, A., 2006. Ambient Vibration Array Measurements Using a Wireless Array Analysis System, *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S23A-0140.

1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology ECEES, 3.-8. September 2006, Geneva, Switzerland

Ohrnberger, M., Vollmer, D., and Scherbaum, F., 2006. WARAN - A mobile wireless array analysis system for in-field ambient vibration dispersion curve estimation, Abstract-ID 2017, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, ECEES, 3-8 September, 2006, Geneva, Switzerland.

GeoBerlin der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 02.-04.10.2006, Berlin (3D-Geologie – eine neue Chance für die Nutzung und den Schutz des Untergrunds)

Buurman, N. & Reuther, C.-D.(2006): 3D visualisation of shallow subsurface structures related to salt diapirs. *GeoBerlin, 02.-04.10.2006, Berlin*

Kühn, D., Ohrnberger, M., Vollmer, D., Dahm, T., Dehghani, A. & Scherbaum, F. (2006): Ambient seismic vibration measurements at the Othmarschen-Langenhofe salt dome (Hamburg): First steps within the HADU project. GeoBerlin, 02.-04.10.2006, Berlin

Ohrnberger, Vollmer, Kühn, Scherbaum, and Dahm (2006): A Mobile Wireless Array Analysis System For In-Field Estimation of Shear Wave Velocity Profiles in Hamburg (HADU – Hamburg a Dynamic Underground) From Ambient Seismic Wave-Fields, GeoBerlin, 02.-04.10.2006, Berlin.

Reuther, C.-D., N. Buurman, N., Dahm, T., Kühn, D., Ohrnberger, M., Scherbaum, F. Möller, D.P.F. & Wittmann, J. (2006): Hamburg - A dynamic underground: The HADU project. GeoBerlin, 02.-04.10.2006, Berlin

2007

European Geosciences Union (EGU) April, 2007 – Wien, Austria

Kühn, D., Ohrnberger, M., Vollmer, D., Dahm, T., Scherbaum, F., and Dehghani, A., 2007. Imaging a shallow salt diapir beneath the densely built-up city area of Hamburg, Northern Germany, using ambient noise recordings, EGU General Assembly, 15-20 April, 2007, Vienna, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, EGU 2007 03433,

2008

12. Symposium “Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie”, 2 – 4. April, 2008 – Karlsruhe, Germany

Buurman, N. & Reuther, C.-D. (2008): Verborgene rezente und Paläo-Erdfällen in der Metropolregion Hamburg – eine Georisikoanalyse. 12. Symposium “Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie”, 2. - 4. April 2008 – Karlsruhe, Germany TSK Karlsruhe, Geotectonic Research, Volume 95/01

Reuther, C.-D. -Projekt-Koordinator (2008): Erfassung geologischer Untergrundstrukturen in der Metropolregion Hamburg.- Präsentation des Projekts HADU - Hamburg a dynamic underground. 12. Symposium “Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie”, 2. - 4. April 2008 – Karlsruhe, Germany TSK Karlsruhe, Geotectonic Research, Volume 95/01

European Geosciences Union (EGU) 13.-18. April 2008 – Wien, Austria

Buurman, N. & Reuther, C.-D. (2008): Identification and characterization of recent and paleo subsurface collapse structures in the metropolitan region of Hamburg – a hazard potential analyzes. EGU General Assembly, Section Sinkhole hazards, Ground Movement: Measurements, Subsurface Causes, and Interpretation, 13.-18. April 2008, Wien, Austria, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU 2008-A-06144

Dahm, T.; Kühn, D.; Kröger, J.; Ohrnberger, M; Wiederhold, H.; Reuther, C.D.; Scherbaum, F; Dehghani, A., Geophysical study of a shallow salt diapir in the densely built-up city area of Hamburg, Northern Germany, EGU General Assembly, 13-18 April, 2008, Vienna, SM14, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU 2008, 10124,

Reuther, C.-D., N. Buurman, N., Dahm, Dehghani, A., T., Kühn, D., Möller, D.P.F., Ohrnberger, M., Scherbaum, F. & Wittmann, J.(2008): Detection of the subsurface structure in the Metropolitan region of Hamburg: The HADU-Project (Hamburg - A Dynamic Underground). EGU, Section Sinkhole hazards, Ground Movement: Measurements, Subsurface Causes, and Interpretation, 13.-18. April 2008, Wien, Austria, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-06207

31st General Assembly of the European Seismological Commission, Hersonissos, Crete, Greece, 7-12 September 2008:

Ohrnberger, M., Kühn, D., Dahm, T., Scherbaum, F., Small Aperture Array Recordings of Ambient Vibrations in Hamburg, 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2008, Hersonissos, Crete, Greece, 7-12 September 2008.

Ohrnberger, M., Vollmer, D., Endrun, B., A Portable Wireless Array Analysis System for in-Field Estimation of Shear Wave Velocity Profiles from Ambient Seismic Wave-Fields, 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC 2008, Hersonissos, Crete, Greece, 7-12 September 2008.

Weitere Präsentationen:**2005**

Reuther, Reiss, Buurman: Präsentation des Projekts in „Nacht des Wissen“ der Hamburger Universitäten und Hochschulen am 29. Oktober

2006

Reuther Präsentation des Projekts in „Lange Nacht der Museen“ in Hamburg am 29.04.2006.

Ausführlicher Artikel auf der Wissen-Seite der Süddeutschen Zeitung, Donnerstag 11. Mai 2006: Auf Salz gebaut.- Unter Hamburg suchen Geologen Auslöser von Erdbeben.

Ausführlicher Artikel im Hamburger Abendblatt, Mittwoch, 2. August 2006: Darum bebt Hamburgs Erde

NDR 3-Fernsehbericht über das HADU-Projekt. DAS! - Magazin, vom 14.10.2006

Ohrnberger, M.: Präsentation der WARAN Entwicklung (wireless ad-hoc mesh Netze in der Seismologie) bei der Instrumentenpool Sitzung am 24.10.2006 am GFZ Potsdam. Präsentationstitel: *Wireless communication for mobile sensor networks - WARAN - a Wireless ARray ANalysis system (a custom solution developed for ambient vibration array measurements in urban environments)*

Ohrnberger, M.: Präsentation der WARAN Entwicklung bei Marie-Curie TOK-DEV, Kick-off meeting, 17.06.2006, Thessaloniki. Präsentationstitel: *„An off-spring development based on results of SESAME: WARAN (Wireless Array Analysis system)“*

Ohrnberger, M.: Präsentation der WARAN Entwicklung in NERIES JRA4 Meeting (Utrecht), 23.06.2006. Präsentationstitel: *„An off-spring development based on results of SESAME: WARAN (Wireless Array Analysis system)“*

2007

Dahm, T. Präsentation Gymnasium Heidberg, Februar 2007: Können sich Erdbeben in Hamburg ereignen? Analyse der Erdbebengefahr in Norddeutschland.

2008

Dahm, Kühn, Kröger, Ohrnberger, Wiederhold, Dehghani, Reuther, Scherbaum. Geowiss. Kolloquium, 9. Juni 2008, Universität Jena. Die Dachregion des Othmarschen Langenfelde Diapirs in Hamburg: Geophysikalische Untersuchungen.

Dahm, Kühn, Kröger, Ohrnberger, Wiederhold, Dehghani, Reuther, Scherbaum. Präsentationen Verein Bönningstedter Geologen, 17 Dezember 2008, Bönningstedt. Der Othmarschen-Langenfelde Diapir in Hamburg.

Reuther Kolloquiumsvortrag am Geologischen Institut Halle (Ingenieurgeologie) zum Hadu-Projekt am 24.01.2008

VII. Erfolgte oder geplante Publikationen der Ergebnisse:

Reuther, C.-D, Buurman, N., Kühn, D., Ohrnberger, M., Dahm, T. & Scherbaum, F. (2007): *Erkundung des unterirdischen Raumes der Metropolregion Hamburg – Das Projekt HADU (Hamburg a dynamic Underground).*- Geotechnik 30(2007)1, S.: 11- 20.

eingereichte vollständige Manuskripte:

Dahm, Kühn, Kröger, Ohrnberger, Wiederhold, Reuther, Dehghani, and Scherbaum (2008): *The roof region of a shallow salt diapir in the metropolitan area of Hamburg, Germany: A geophysical approach.* eingereicht bei GJI, revision R1

Dahm, Heimann, Bialowons (2009): A seismological study of shallow weak earthquakes in the urban area of Hamburg city, Germany, and its possible relation to salt dissolution. Vollständiges Manuskript, dem Bericht beigelegt, einzureichen bei JOSE oder Near Surface Geophysics.

Kühn, Ohrnberger, Dahm (2009): Imaging a shallow salt diapir using ambient seismic vibrations beneath the densely built-up city area of Hamburg, Northern Germany. Vollständiges Manuskript, dem Bericht beigelegt, wird eingereicht in einem Special Volume on Array Seismology in JOSE

Buurman, N. (2009): Dissertation Universität Hamburg – Charakterisierung von Zirkular-Strukturen im geologischen Untergrund Hamburgs zur Abgrenzung verkarstungsfähiger Bereiche. (Arbeitstitel) wird nach Fertigstellung dem BMBF nachgereicht.

2.1.3.8 Vertraulichkeit für einzelne Abschnitte des Erfolgskontrollberichts: nein

Der Erfolgskontrollbericht der Universität Hamburg wird nicht als vertraulich eingestuft. Zwischen den drei Geo-Projekten (Geologie, Hamburg; Geophysik, Hamburg und Geophysik, Potsdam) bestand während der Projektlaufzeit eine sehr gute Kooperation; viele Ansätze und Ergebnisse wurden gemeinsam entwickelt und erzielt. Der Erfolgskontrollbericht Informatik befindet sich im Anhang des Abschlussberichtes im Informatik-Teil. Für den Inhalt dieses Teiles sind die Informatik-Autoren Prof. Dr. Möller und Dr. Wittmann verantwortlich. Gemeinsame wiss. Publikationen oder Dokumentationen zusammen mit der Informatik sind nicht erstellt oder eingereicht worden und deshalb auch nicht unter Punkt VII dieses Erfolgskontrollberichts integriert.

2.1.4 Unter diesem Abschnitt sind im Abschlussbericht Abschnitte aufgeführt, die als vertraulich eingestuft werden. Dabei handelt es sich um die Karte der Sedimentanomalien im Stadtgebiet sowie die Karte zur Lage der untersuchten Erdfälle in Hamburg und ihrer Klassifikation mit einem zugehörigen Erdfallregister.

Anhang Informatik

Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund

HADU

Abschlussbericht

Verbundpartner Informatik Verfasser: D.P.F. Möller und J. Wittmann

Teil 1: Kurzdarstellung	Seite 2
Teil 2: Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses	Seite 4
Teil 3: Erfolgskontrollbericht	Seite 33

Teil 1: Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

In den Gesamtkontext des Verbundprojektes HADU ist ein Teilprojekt Informatik eingebunden, das vom Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme (TIS) der MIN-Fakultät an der Universität Hamburg bearbeitet wurde. Im Zentrum dieses Informatik-Teilprojektes steht einerseits die Aufbereitung des im Rahmen der geologischen Teilprojekte entstehenden Datenmaterials sowie und andererseits dessen Auswertung durch geeignete algorithmische Verfahren. Die Aufgaben des Teilprojektes Informatik sind:

- Aufbau thematischer Datenmodelle
- 3D-Darstellung des Datenmaterials
- Integration von Fuzzy-Methoden zur Behandlung von Unschärfen.

Dabei kommt dem Informatik Teilprojekt die besondere Aufgabe zu, neben der Aufbereitung und Verfügbarmachung der Messdaten auch Hilfestellung bei den Auswertemethoden zu liefern und damit die Ausführbarkeit und die Qualitätssicherung für den gesamten Workflow der wissenschaftlichen Arbeiten des HADU Projektes zu gewährleisten.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Um die vielschichtigen Aufgaben der einzelnen Teilprojekte des HADU Gesamtprojektes optimal bearbeiten zu können, ist die intensive Kooperation mit den Projektpartnern unerlässlich. Im Rahmen der interdisziplinären Zusammenarbeit konnten Abhängigkeiten auf Ebene der Interpretation der Daten, die als Folge der Zusammenarbeit im HADU Projekt aufgetaucht sind, gelöst werden, aber auch die Bearbeitung auf softwaretechnischer Ebene durch das interdisziplinäre Team aus Informatikern und Geowissenschaftlern, mit dem Ziel einer konsistenten Datenintegration, konnte so erfolgreich durchgeführt werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen der interdisziplinären Zusammenarbeit waren vom Teilprojekt Informatik die von den geowissenschaftlichen Partnern ausgeführten Messungen einerseits zusammenzuführen und andererseits zu interpretieren. Dabei wurde sehr schnell deutlich, dass das eigentlich erst dann möglich ist, wenn die Teilprojekte einen

gesicherten Stand erreicht haben, woraufhin dann die weiteren Aktivitäten fokussiert wurden, was letztendlich zum Ergebnis hatte, dass die Aufgabenstellung für das Teilprojekt Informatik im Projektverlauf flexibler gefasst wurden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Wie in den meisten Kooperationsprojekten starten die Teilgruppen auch bei HADU nicht ohne Vorarbeiten bzw. bereits getätigte Untersuchungen. Für das Teilprojekt Informatik bedeutet dies, dass sowohl Daten in erheblicher Menge bereits vorliegen als auch bereits Methoden implementiert sind, die der Auswertung und Darstellung dieser Daten dienen. Selbstverständlich sind Datenhaltung und Auswerteverfahren bei wissenschaftlichen universitären Projekten in der Regel proprietär entstanden und in extremem Maß auf die jeweiligen Bearbeiter und die jeweilige Messsituation zugeschnitten, was nicht unbedingt ein Nachteil sein muss, sondern vielmehr auch als ein Vorteil angesehen werden kann.

Vor diesem Hintergrund wurde die anfängliche Zielsetzung, die zur Verwaltung der Projektdaten eine Datenbank im klassischen Sinne vorgesehen hatte, zugunsten einer flexibleren, web-basierten Lösung angepasst. Die hierbei entwickelte und implementierte Lösung verzichtet auf Funktionalitäten im Hinblick auf einen möglichen Mehrbenutzerbetrieb und das zugehörige Transaktionsmanagement, wie es bei regulären Datenbank und Datenmanagementsystemen zur Anwendung kommt, zugunsten eines Datenmodells, das die erhobenen Daten für die einzelnen geowissenschaftlichen Teilprojekte separat verwaltet, einen einfachen (lesenden) Zugriff auf die Daten der Projektpartner ermöglicht und besonders auf die Konsistenz und Reproduzierbarkeit der aus den Daten abgeleiteten Analyseergebnisse fokussiert.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

War nicht erforderlich, da sich das teilprojekt bis zu einem gewissen Grad quasi als „Dienstleister“ für die geowissenschaftlichen Teilprojekte verstanden hat.

Teil 2: Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses

6 Datenmodellierung und Datenverwaltung

6.1 Problemanalyse: Die Arbeitsweise der Projektpartner

Zum Verständnis der Prozesse, die bei der Erfassung, Speicherung und Weiterverarbeitung respektive Auswertung der geowissenschaftlichen Messdaten ablaufen, ist es unerlässlich, eine genaue Übersicht über die Ausgangssituation zu erlangen. Im Folgenden soll daher die Arbeitsweise der beteiligten interdisziplinären Projektpartner dargestellt werden. Dabei sind zwei Teilaufgaben zu berücksichtigen: Einerseits die Menge und das Format der anfallenden Daten und andererseits der Workflow von der Datenerhebung bis hin zur Auswertung und Präsentation.

Georadar-Untersuchungen

Am unproblematischten ist der Ablauf der Georadar-Untersuchungen zu beschreiben, die als geowissenschaftliches Teilprojekt am Institut für Geophysik der Universität Hamburg (siehe auch in [1], [3]) durchgeführt werden: Entlang einer zuvor festgelegten Trajektorie wird die Messeinrichtung über die Oberfläche geführt, wobei ein hochfrequentes Signal abgestrahlt, von den Bodenschichten reflektiert und anschließend vom Messgerät wieder eingefangen wird. Die Streuung und Beugung des reflektierten Signals lässt auf die Bodenbeschaffenheit schließen. Auf diese Weise entstehen Reflektionsprofile senkrecht zur Trajektorie bis in Tiefen von etwa 5 bis 10 Metern. Diese Radarprofile werden in jeweils einer Datei abgelegt. Durch geschickte Wahl der Oberflächentrajektorie versucht man, ein 3-dimensionales Bild der Situation im Boden zu erarbeiten. Dazu können einerseits Filteralgorithmen auf den einzelnen Profilen sinnvoll eingesetzt werden. Andererseits versucht man, die Profile derart darzustellen, dass sie Rückschlüsse über die räumlichen Relationen der Schichtung erlauben.

Softwaretechnisch ist die Analyse des Workflows für dieses geowissenschaftliche Teilprojekt relativ einfach zu gestalten: Die Rohdaten werden in einem definierten Verzeichnis abgelegt und anschließend mit dem open-source Programm „KoGeo“ [4] weiterverarbeitet. In dessen Rahmen stehen die notwendigen Analyse- und Visualisierungsmethoden zur Verfügung. Sämtliche Verarbeitungsschritte werden von KoGeo in einer Access-Datenbank protokolliert. Strukturierungseinheit ist dabei ein so genanntes Projekt, in dem die zusammen bearbeiteten Daten verwaltet werden und dem alle Nutzeraktionen in einer separaten Access-Datenbank (*.db) zugeordnet sind.

Gravimetrie-Messungen

Für die Gravimetrie-Messungen, die als geowissenschaftliches Teilprojekt ebenfalls vom geologischen Institut der Universität Hamburg durchgeführt werden, stellt sich die Situation ähnlich dar: In diesem Fall erfolgt die Messung an einem festen Messort im Untersuchungsgebiet und liefert eine Frequenzantwort für genau diese Position und variable Tiefen. Dieses Frequenzspektrum wird dabei im wesentlichen manuell auf einen auffälligen Peak in den Frequenzwerten untersucht und dahingehend interpretiert, dass in der Tiefenlage des gefundenen Peaks ein Schichtwechsel im Untergrund angenommen wird. Schwierigkeiten, aus methodischer Sicht, bereitet dabei die Eichung des Messgerätes bezüglich der exakten geographischen Lage des Messortes. Diese wird im wesentlichen durch eine Reihe von der Messung nachgelagerten Korrekturrechnungen, die eine genauere Eingrenzung der Tiefenlage erlauben, erreicht.

Auch hier bleibt der Workflow im wesentlichen sequentiell: Er beginnt bei dem an einer exakt bestimmten Position gemessenen Frequenzspektrum, das in einer Datei abgelegt wird, gefolgt von der manuellen Festlegung des Peak-Wertes und den ebenfalls manuell und einzeln ausgeführten Korrekturmethode. Diese liegen als einzelne Hauptprogramme vor. Sämtliche Ergebnisse der Bearbeitung werden für das gesamte Untersuchungsgebiet in einer ASCII-Datei zusammengefasst, die zeilenweise den exakten Messort, die ermittelte Tiefenlage sowie die korrigierten Werte für diese Tiefenlage enthält. Darüber hinaus sind für jede Messung noch Metadaten, wie Messdatum, ID des Messgerätes, besondere Vorkommnisse, usw. verzeichnet. Zur Visualisierung dieser Ergebnisdatei wird das Generic Mapping Tool GMT [5] verwendet, mit dessen Hilfe für jeden Messpunkt ein die Tiefenlage codierender Farbpunkt auf einer Karte des Untersuchungsgebietes angezeigt wird.

Ambient vibrations – Messungen

Erheblich komplexer läuft die Verarbeitung der so genannten ambient-vibrations-Messungen im Rahmen eines weiteren geowissenschaftlichen Teilprojekts, für welches das Institut für Geowissenschaften der Universität Potsdam [6] zuständig war. Ziel ist es wiederum, zu einem Messort die Tiefenlage eines Schichtwechsels zu bestimmen. Dies geschieht bei dieser Messmethode im wesentlichen über die Bestimmung von Resonanzspektren und eine Korrelationsanalyse zwischen mehreren Messstationen. Am Ende der Verarbeitungskette steht eine Schar von so genannten Geschwindigkeits-Tiefe-Profilen, aus denen wiederum eine Schätzung der Tiefenlage für einen Schichtwechsel abgeleitet wird. Abb. 1 zeigt den Ablauf im Detail. Sämtliche dafür benötigten Methoden sind im ebenfalls frei verfügbaren Programmpaket geopsy [7] implementiert. Allerdings stellt geopsy keine datenbank-ähnliche Verwaltung seiner Ergebnisse zur Verfügung, sondern erlaubt lediglich einen Dateixport der Resultate mit ausführlichen Header- bzw. Metainformationen für den jeweiligen Arbeitsschritt. Der Anwender ist folglich selbst für eine vollständige und konsistente Sicherung seiner Arbeitsergebnisse verantwortlich. Dies geschieht

im Rahmen des HADU Projektes durch entsprechende Konventionen für Dateibaum und Dateibezeichnungen, wie sie vom Informatik Teilprojekt eingeführt wurden und in nachfolgender Abbildung 1 dargestellt sind.

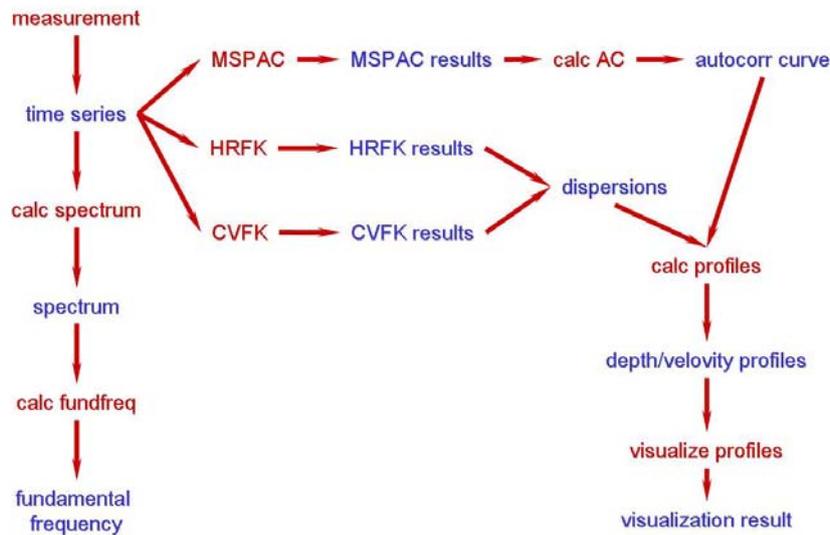


Abb. 1: Workflow zur Analyse der Ambient-Vibration Messdaten

Wie in den meisten Kooperationsprojekten starten die Teilgruppen auch bei HADU nicht ohne Vorarbeiten bzw. bereits getätigte Untersuchungen. Für das Teilprojekt Informatik bedeutet dies, dass sowohl Daten in erheblicher Menge bereits vorliegen als auch bereits Methoden implementiert sind, die der Auswertung und Darstellung dieser Daten dienen. Selbstverständlich sind Datenhaltung und Auswerteverfahren bei wissenschaftlichen universitären Projekten in der Regel proprietär entstanden und in extremem Maß auf die jeweiligen Bearbeiter und die jeweilige Messsituation zugeschnitten, was nicht unbedingt ein Nachteil sein muss, sondern vielmehr auch als ein Vorteil angesehen werden kann.

Insgesamt ergibt eine Analyse der Ist-Situation das folgende Bild:

- Sehr viele Erfahrungen wurden mit Daten aus anderen Untersuchungsregionen gesammelt, die nicht oder nur wenig auf die Situation des Hamburger Untergrundes anpassbar sind.
- Die geforderte Geo-Referenzierung der Daten im Sinne eines übergreifenden Datenmodells erscheint für die Auswertung nur von geringer Bedeutung, da sich sämtliche Analysen auf den jeweils lokal begrenzten Messbereich beziehen.
- Alle Datensätze werden direkt durch die Erheber der Daten intensiv vorverarbeitet. Dies geschieht interaktiv und in der Regel nicht ausreichend dokumentiert.
- Auch zur Visualisierung der Messergebnisse werden individuelle Visualisierungstechniken und –tools verwendet. Auch hier ist die Vorgehensweise hochgradig proprietär und in der Regel nicht ausreichend dokumentiert.

- Aus den vorgenannten Punkten geht damit fast zwangsläufig hervor, dass ein Datenaustausch zwischen den Projektgruppen und eine Auswertung über die Teilprojektgrenzen hinweg nur in sehr eingeschränktem Maße erfolgt.

Damit lassen sich die folgenden Teilaufgaben für das Teilprojekt Informatik herausarbeiten:

1. Schaffung einer einheitlichen Bedienoberfläche für alle Arbeiten im Projekt
2. Vollständige Geo-Referenzierung des Datenmaterials
3. Vollständige Visualisierung des Untersuchungsgebietes
4. Sinnvolle Ergänzung unvollständiger Daten
5. Cross-Referenzierung der Datensätze untereinander

Bei dieser Aufgabenliste fällt auf, dass die Integration so genannter Fuzzy-Methoden nicht mehr als isoliertes Projektziel gesehen werden kann, sondern vielmehr als untergeordnetes Verfahren zur sinnvollen Ergänzung von Datenlücken, zur Gewichtung der Bedeutung einzelner Messwerte bei der Visualisierung und integriert in die Methoden zur Klassifikation der einzelnen Bodenschichten in Erscheinung tritt. Darüber hinaus erscheint es zweckmäßig, die bereits vorliegenden proprietären Methoden, bei der Konzeption des Gesamtsystems zu berücksichtigen, um Doppelentwicklungen und Know-How-Verlust zu vermeiden. Diese Überlegungen leiten direkt zum nächsten Abschnitt über, der die Zielarchitektur für das HADU-Projekt erläutert.

6.2 Bedarfsanalyse und Designentscheidung für das Zielsystem

6.2.1 Analyse des Ist-Zustandes

Auf Grund der Beschreibung der Arbeitsweise in den Teilprojekten kann nun eine Analyse des Ist-Zustandes bezüglich der methodischen Vorgehensweise, der Datenhaltung, des Workflows und der Ergebnisinterpretation erfolgen.

Ein Blick auf die erhobenen und verarbeiteten Daten führt zu drei wesentlichen Aspekten: Erstens handelt es sich bei den Messdaten um relativ große Datenmengen, die in einem hochgradig proprietären Format vorliegen. Auf diese Basisdaten ist zweitens kein wahlfreier Zugriff notwendig, zur Analyse wird stets nur auf die einzelnen Datensätze in ihrer Gesamtheit zugegriffen. Drittens werden diese Daten um einen Satz von Metadaten ergänzt (wie zum Beispiel Erhebungsdatum, Datenerheber, Typ und ID der Messeinrichtung, ...), die allerdings für die Weiterverarbeitung keine direkte Bedeutung haben, sondern rein dokumentarischen Zwecken dienen.

Bezüglich des Workflow laufen Georadar- und Gravimetrie-Untersuchungen rein sequentiell ab. Bei der Analyse der Ambient Vibrations-Messungen verzweigt sich der Workflow zwar mehrfach, es sind jedoch weder Zyklen festzustellen noch werden

getrennte Zweige in einem der Verzweigung Nachgelagerten Arbeitsschritt wieder zusammengeführt. Sämtliche Arbeitsschritte sind als separat zu behandelnde Methodenaufrufe interpretierbar, die ihre Ergebnisse aus einer oder mehreren Input-Dateien beziehen und in einer Ergebnisdatei mit definiertem Format ablegen. Die Bearbeitung Workflows für die einzelnen Messmethodiken verlaufen unabhängig voneinander und sind lediglich über gemeinsame Messorte verbunden.

Erst am Ende der algorithmischen Bearbeitungskette treten die drei Teilprojekte zueinander in Beziehung: Sie ermitteln auf unterschiedlichem Weg jeweils einen Wert für die Tiefenlage des Schichtwechsels (im Hamburger Projektkontext die Tiefenlage des Salzstocks) zu einer durch den Messort gegebenen Position auf der Erdoberfläche. Darüber hinaus besteht keine methodische Verknüpfung der Daten während der Analyse, diese erscheint im Gegenteil derart in sich abgeschlossen für die jeweiligen Messmethodiken, dass eine wechselseitige Integration auf der Ebene von Zwischenergebnissen nicht möglich ist. Unabhängig von der Machbarkeit und dem Nutzen einer solchen Integration ist diese durch die zeitlichen und personellen Rahmenbedingungen des Projektes nicht vorgesehen und soll daher an dieser Stelle auch nicht näher beleuchtet werden.

6.2.2 Fazit für das Zielsystem

Für die Auslegung des Zielsystems zur Unterstützung der Projektarbeiten ergeben sich aus der vorangehenden Analyse die folgenden Konsequenzen:

1. Ein Datenbanksystem klassischer Art mit Schwerpunkt auf einem komplexen Relationenmodell, intensiver Nutzung von Rollen und Rechten und parallel zu bearbeitenden Transaktionen erscheint für das Projektumfeld nicht geeignet.
2. Im Vordergrund muss vielmehr die lückenlose Dokumentation und Reproduzierbarkeit der Verarbeitungskette der Workflows in den Teilprojekten stehen. (Im Detail in [2] erläutert.)
3. Darüber hinaus sollten sich die Bearbeiter auf einfachem Wege Informationen über die (Teil-) Ergebnisse der Partner machen können. Dies erfolgt einerseits über den Austausch von Dateien mit Zwischenergebnissen der Analyse, andererseits über eine zusammenfassende, die Ergebnisse der Teilprojekte integrierende Ergebnisdarstellung in Form einer Visualisierung des aktuellen Modells für die Grenzschicht des Salzstockes.
4. Die verwendeten Methoden liegen bei den Partnern in Form der genannten Softwarepakete vor und sind auf die jeweiligen Bedürfnisse der Analyse sehr gut zugeschnitten. Es erscheint daher nicht sinnvoll, diese Systeme unter einer gemeinsamen Bedienoberfläche zusammenzufassen, zumal dazu methodisch keine Veranlassung besteht.

6.2.3 Systemarchitektur für das HADU-Zielsystem

Zugangswege

Abbildung 2 zeigt die aus der vorausgegangenen Analyse resultierende oberste Schicht der HADU-Architektur, die im Folgenden näher erläutert werden soll. Der Ansatz betont zwei unterschiedliche Zugangswege in das System:

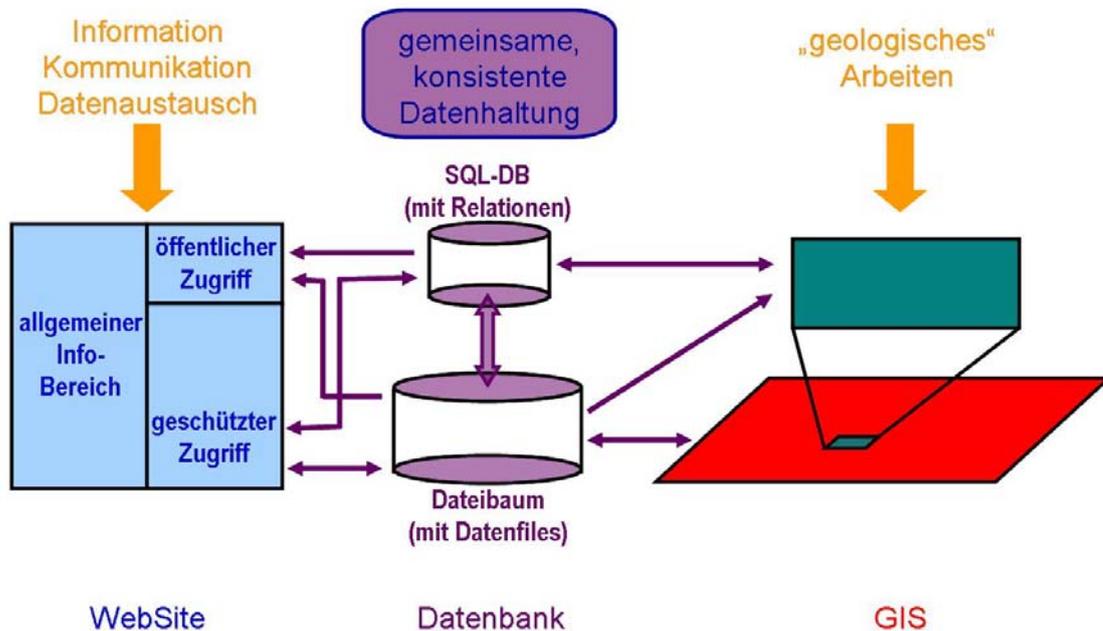


Abb. 2: Die HADU Systemarchitektur

Zugang zu Informations- und Dokumentationszwecken

Technisch gesehen ist dieser Zugang browserbasiert über ein Web-Portal realisiert. Innerhalb der allgemein zugänglichen Website für das Projekt gibt es einen nicht-öffentlichen, passwort-geschützten Bereich. Dort wird die Analyse der Messdaten in Form einer nahtlos dokumentierten Abfolge von Methodenaufrufen verwaltet. Neben den zum Methodenaufruf notwendigen Input- und Output-Dateien werden Metainformationen über jeden Verarbeitungsschritt sowie Vor- und Nachbedingungen für die Methodenanwendung abgelegt. Näheres über das Design der Methodenkette ist wiederum in [2] beschrieben.

Für den Wissenschaftler eines geowissenschaftlichen Teilprojektes repräsentiert dieser Teil des HADU-Systems die Datenbankkomponente. Hier kann er seine Zwischenergebnisse in der Analysekette ablegen, die Entstehungsgeschichte von Ergebnissen nachvollziehen und sich (Teil-) Ergebnisse anderer Teilprojekte ansehen. Als Grundparametrisierung ist dafür ein lesender und schreibender Zugriff auf Daten und Methoden des eigenen Teilprojektes eingerichtet, während der Zugriff auf die übrigen Teilprojekte ausschließlich zu Informationszwecken, also lesend, erfolgt.

Zugang zu Analysefunktionalitäten

Neben dem Web-Zugriff stellt die HADU-Architektur eine Zugriffsmöglichkeit für die eigentlichen Analysearbeiten der beteiligten Wissenschaftler zur Verfügung. Hier sind zwei Arbeitsweisen möglich: Im ersten Fall ruft der Anwender die benötigte Software in seiner gewohnten Arbeitsumgebung auf und legt die Ergebnisdaten im Dateibaum des Servers an definierter Stelle ab. Bis auf die zentralisierte Datenhaltung erfordert diese Arbeitsweise keinerlei Änderungen bzw. Anpassungen gegenüber des gewohnten Workflows bei den geowissenschaftlichen Anwendern. Solange die Konventionen für Dateiformat und Dateierendungen eingehalten werden, die in den beteiligten Teil-Projektgruppen ohnehin schon eingeführt sind, kann einerseits die Datenanalyse wie gewohnt durchgeführt werden, andererseits fließen die Daten in die Datenhaltung auf dem Server ein. Dieses Konzept funktioniert dabei auch für sämtliche proprietäre Softwarepakete, aber auch für ein GIS-Projekt, bei dem entsprechende shape-Files abgespeichert werden.

In einem zweiten Schritt steht die Verknüpfung der mehr oder minder unabhängig voneinander zu behandelnden Messorte zu einer einheitlichen Sicht für das gesamte Untersuchungsgebiet an. Hierfür eignet sich der Zugang über ein GIS. Für jede der Meßmethoden wird zunächst ein Layer mit den geographischen Positionen der Messorte erzeugt. Über eine Selektion eines dieser Messorte gelangt man anschließend in ein zugeordnetes Auswerte- bzw. Visualisierungsprogramm, das als eigenständige Anwendung in einem eigenen Fenster geöffnet wird. Dort können sämtliche nicht schreibenden Funktionalitäten ausgeführt werden, die Kontrolle ist vom GIS auf das angeschlossene Programm übergeben. Wird dieses terminiert, findet sich der Nutzer an der Stelle im GIS wieder, von der aus er das proprietäre Programm aufgerufen hat. Voraussetzung für diese Form der „losen Kopplung“ ist die Existenz einer Strukturierungseinheit im aufgerufenen Programm, die Daten zu einer (oder mehreren) Lokationen zusammenfasst. Dies wird im Detail am Beispiel der Anbindung von KoGeo erläutert werden.

Auf diese Weise ist die Navigation in den Projektdaten im Gegensatz zur Betonung der Methodenkette auf der Datenhaltungsseite über die geographische Position möglich. Sinnvolle Visualisierungen und interpretierende Daten-Zusammenstellungen sind über die Möglichkeit verwirklicht, innerhalb der angeschlossenen Programmpakete Projekte (oder ähnliche Strukturierungseinheiten) zu definieren.

6.2.4 Die Systemarchitektur

Logische Sicht

Abbildung 3 zeigt die Architektur des Systems aus der Sicht des Workflows, also der logischen Entwicklung von den Rohdaten bis hin zur interpretierten Visualisierung. Zwei widersprüchliche Aspekte sind bei der Entwicklung dieser Systemarchitektur eingeflossen: Einerseits die Forderung nach Integration bereits vorhandener

Methoden, die bei den Anwendern bereits vorliegen, und andererseits die Zusicherung von Datenkonsistenz und Reproduzierbarkeit trotz einer insgesamt eher offenen und wenig restriktiven Gesamtarchitektur.

Im Mittelpunkt steht dabei die Verarbeitungskette, also die sukzessive Anwendung von Methoden auf die Ausgangsdaten. Sämtliche Datensätze sind dabei attribuiert und enthalten neben den eigentlichen Nutzdaten Metadaten zur allgemeinen Charakterisierung, zur Geo-Referenzierung, zur Genauigkeit bzw. den Grad der Unsicherheit und schließlich die Verweise auf den Datensatz aus dem sie erzeugt wurden und die Methode incl. Methodenparameter, mit der sie erzeugt wurden. Diese Angaben garantieren die Konsistenz und Dokumentierbarkeit der Verarbeitungskette. Darüber hinaus wird jeweils Information über ein geeignetes Visualisierungsverfahren incl. dessen Parameter gespeichert, so dass jederzeit eine sinnvolle Anzeige erfolgen kann.

In analoger Weise werden die verwendeten Methoden nicht nur durch ihren Namen (d.h. die Angabe der Methodenklasse) gespeichert, sondern darüber hinaus mit dem vollständigen Satz der Aufrufparameter auf der einen Seite (das sichert die Reproduzierbarkeit), auf der anderen Seite aber auch eine Metabeschreibung, die insbesondere Regeln für eine korrekte und konsistente Anwendung der Methode in der Form von Restriktionen bezüglich der Inputparameter beinhaltet.

Sowohl auf die Datenbasis als auch auf die Methoden kann nun auf drei unterschiedliche Weisen mit jeweils unterschiedlichem Komfortgrad zugegriffen werden:

- a) über eine Suchmaske, in der nach vorhandenen Infos über die Angabe von Metadaten und/oder Parametern gesucht werden kann. Derartige Anfragen arbeiten auf Datenebene und liefern lediglich den betreffenden Datensatz bzw. den Methodenaufruf mit den zugehörigen Metainfos zurück.
- b) über eine Kommando Shell, welche die Ausführung der Methode bzw. den Aufruf der Visualisierung auslöst.
- c) über ein GIS, in das die hier aufgeführten Methoden in einem eigenen Menü integriert sind, während die Daten durch entsprechende Erweiterung der Meta-info eingebunden werden können.

Auf diese Weise der gleichberechtigten Speicherung von Daten, Methoden zusammen mit deren jeweiligen Metainfos sind die Anforderungen nach

1. Reproduzierbarkeit bzw. Dokumentation der Analyseschritte durch die Verweise auf den jeweilig vorausgehenden Verarbeitungsschritt und die vollständige Liste von Methodenparametern
2. Konsistenz durch den Abgleich der Metadaten zwischen Methoden und Daten bereits beim Methodenaufruf

gewährleistet. Wesentlich ist dabei, dass diese beiden Forderungen zunächst unabhängig von einer Bedienoberfläche bzw. der GIS-Integration gelöst sind. Über den Shell-Zugang bleiben die bereits entwickelten Methoden für die Anwender in

ihrer bekannten Form zugreifbar. Die Anfrageoberfläche kann im ersten Ausbauschnitt direkt auf der Ebene der Datenbank realisiert werden und bedeutet damit nur geringen zusätzlichen Aufwand. Da die Datenstrukturen für Daten und Methoden von den Anwendern der geowissenschaftlichen Teilprojekte selbst vorgegeben werden, kann man auf Akzeptanz bei der vollständigen Beschreibung der Metadateneinträge ausgehen, da diese nur ohnehin notwendige Protokollinformationen abfragen. Damit ist auf der einen Seite eine größtmögliche Kontinuität der Arbeitsweise für die geowissenschaftlichen Teilprojekte gegeben, auf der anderen Seite sind jedoch auch sämtliche Information zur sauberen Integration in eine einheitliche GIS-Oberfläche bereitgestellt.

Etwas außerhalb dieses Konzeptes stehen bei dem hier beschriebenen Stand der Planung alleine die Visualisierungsmethoden. Prinzipiell wären diese auch als Endpunkte einer Verarbeitungskette (Daten – Methode - ...) denkbar. Allerdings verlangen diese Methoden eine Sonderbehandlung nicht nur deshalb, weil sie sozusagen als potentielle Endpunkte an jeder Stelle der Kette aufgerufen werden können und die Daten nur lesend zugreifen, sondern auch deshalb, weil sie auch in der technischen Umsetzung in aller Regel eine Sonderbehandlung verlangen, indem beispielsweise ein neues Fenster der Oberfläche geöffnet werden muss, das spezielle Operationen (Drehen, Blickwinkel ändern, ...) beinhaltet.

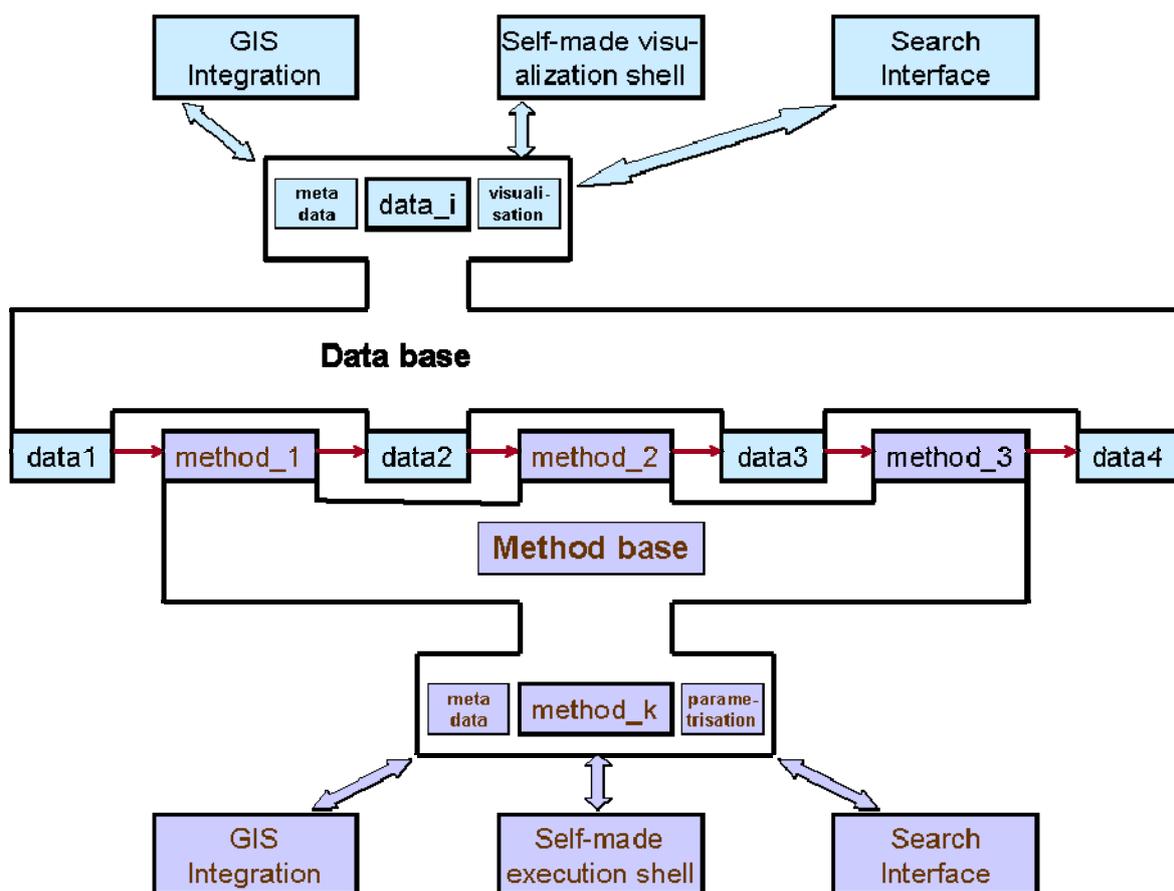


Abb.3: Systemarchitektur aus logischer Sicht

6.2.5 Bedienoberfläche

Die vorgeschlagene Bedienoberfläche für das HADU-Projekt (vgl. Abb. 4) spiegelt nunmehr diese logische Sicht der Systemarchitektur wider. Für den Zugriff auf die Methoden steht zur Navigation ein bipartiter Ableitungsbaum zur Verfügung, der die Historie sämtlicher gespeicherter Datensätze abbildet. In diesem Baum kann man entweder navigieren oder aber einen neuen Knoten parametrisieren und anschließend den entsprechenden Methodenaufruf zur Ausführung bringen. Dazu ist die Angabe von Ausgangsdatsatz, der Methodenklasse und der Methodenparameter notwendig. Meldungen der Methode werden in einem Ausgabefeld angezeigt.

Neben dieser relativ einfach gehaltenen Oberfläche zur Methodenausführung steht auch eine Visualisierungsoberfläche zur Verfügung. Hier steht allerdings nicht die Methodenkette im Mittelpunkt, sondern die geographische Lokalisation der einzelnen Messdatensätze. Entsprechend sind die Wurzeln des Navigationsbaumes Identifikatoren für die einzelnen Messstellen bzw. Untersuchungsgebiete. Unter diesem Kriterium sind dann die relevanten Datensätze auf gleicher Ebene angesiedelt. Im Arbeitsfenster kann sich das jeweilige geowissenschaftliche Teilprojekt für den markierten Datensatz anschließend drei Visualisierungsvarianten ansehen: Die tabellarische Form des Datensatzes, eine 3D-Visualisierung, die auf Grund der hinterlegten Visualisierungsinformationen erfolgen kann, und eine Anzeige der Metadaten für den selektierten Datensatz.

Zu diesen beiden beschriebenen Ansichten wird zusätzlich die bereits erwähnte Datenbanksicht zur Verfügung gestellt. Sie dient der gezielten, konventionellen Suche nach Datensätzen, Metainformationen, Methodenparametern, usw. Es ist zu beachten, dass das Einfügen von Daten an dieser Stelle bislang nicht berücksichtigt wurde. Der Grund wird bei genauerer Betrachtung des Systemkonzeptes klar: Neue Datensätze, die als Ausgangsknoten der Verarbeitungskette dienen, kommen nur durch neue Messungen zustande und müssen von den jeweiligen Bearbeitern der geowissenschaftlichen Teilprojekte exakt beschrieben und mit Metainformation versehen werden. Alle weiteren Schritte sind durch Anwendung der Methoden vordefiniert, die entsprechenden beschreibenden Informationen werden beim Methodenaufruf in Form der Parameter eingegeben bzw. sind durch die Kenntnis der Semantik in der jeweiligen Methodenklasse gespeichert.

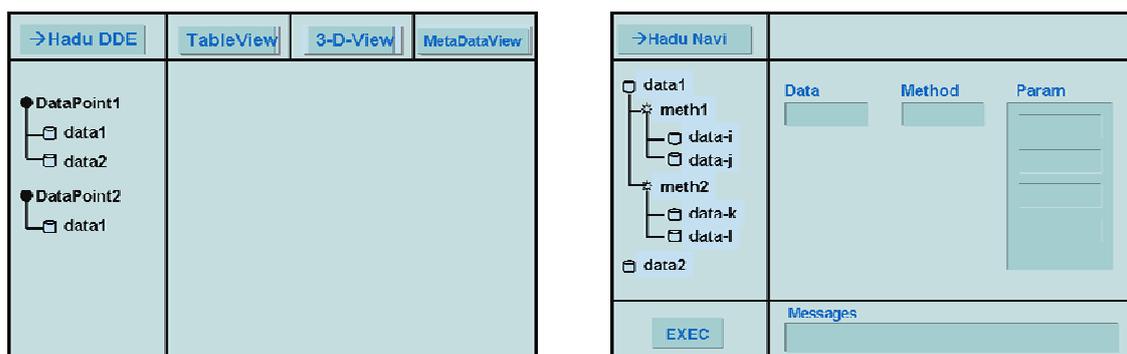


Abb.4: Konzept der Bedienoberfläche

Beispiel 1: Workflow based access

Abbildung 5 zeigt den schematischen Auswertungs-Workflow zur Analyse der Ambient-vibrations Messdaten, Abbildung 6 den abstrakten Aufbau der Verarbeitungskette bestehend aus Methoden und Daten. Im wesentlichen wird der Ablauf innerhalb des Programmpaketes geopsy abgearbeitet. Zwischenergebnisse können in Dateien exportiert werden, wobei neben den eigentlichen Ergebnisdaten auch die den jeweiligen Methodenaufzuruf beschreibenden Metadaten abgelegt werden. Dies entspricht genau den Anforderungen für den lückenlosen Aufbau der Methodenkette. Wurde die Analyse unterbrochen, kann sie durch Import der betreffenden Datei beliebig fortgesetzt werden.

Somit besteht ein Basiselement der Kette aus der angewandten Methode und der Ergebnisdatei bestehend aus Metadaten und Ergebnis des Methodenlaufes. Ein solches Basiselement kann an beliebiger Stelle in der Kette an einen geeigneten Datenknoten angehängt werden, was entweder zu einer Ketten-Verlängerung oder zu einer Verzweigung führt. Der aus mehreren hintereinander ausgeführten Konkatinationen entstehende bipartite Ableitungsbaum dient, analog der Darstellung eines Dateibaumes, dem wahlfreien Zugriff auf seine Elemente. Eine relativ einfache Bedienoberfläche wurde bereits in [2] beschrieben.

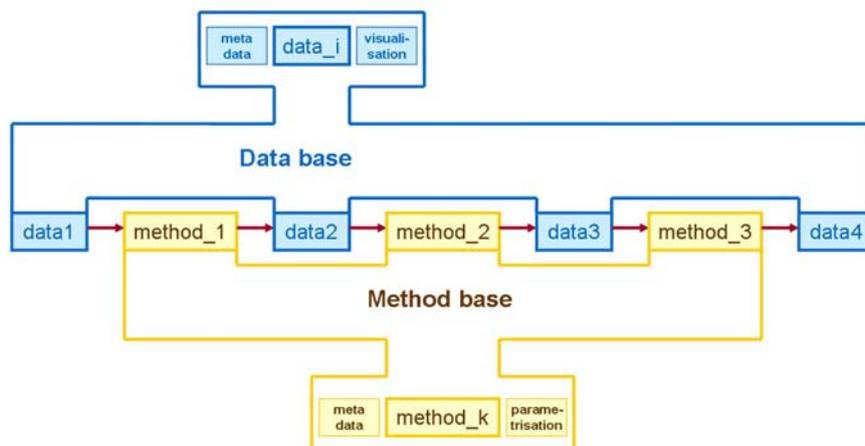


Abb. 5: Die Daten-Methoden-Kette in allgemeiner Form

Beispiel 2: geographical based access

Die zweite Zugriffsvariante ist in Abbildung 6 dargestellt. Als Daten liegt eine Karte im GIS mit verschiedenen Layern vor, die, getrennt nach Messmethodik, die jeweiligen Messorte beinhaltet. Durch Selektion eines Punktes auf dieser Karte, erhält der Benutzer des jeweiligen geowissenschaftlichen Teilprojekts eine Auswahl der für diesen Punkt vorliegenden Projekte. Hier erlaubt eine M:N Zuordnung zwischen geographischem Punkt und Projekt sowohl den Zugriff auf die gewünschte Art der

Messdaten als auch einen Vergleich von mehreren Messorten in einem Projekt. Nach erfolgter Selektion wird jedenfalls das für diesen Ort angelegte Projekt im geeigneten Programm gestartet. Die Kontrolle geht vom GIS auf das Projekt behandelnde Programm über, weshalb auch mehrere Projekte in separaten Fenstern gleichzeitig geöffnet werden können, um eine vergleichende Analyse zu starten. Mit dem Schließen der so geöffneten Projekte geht die Kontrolle zurück ans GIS.

Auf diese Weise können die beiden benötigten Use-Cases realisiert werden: Ein Zugriff zum Informieren und Präsentieren der Ergebnisse unter der einheitlichen Oberfläche des GIS ohne dessen Beschränkung bezüglich 3D einerseits, und andererseits ein voller Zugriff auf die Methoden der angekoppelten Softwarewerkzeuge zur eigentliche Durchführung der Datenanalyse andererseits. Dabei beschränkt sich der Zugriff im ersten Fall auf Leserechte, im zweiten Fall sind Schreiberechte zum Export der Analyseergebnisse in die Methodenkette notwendig.

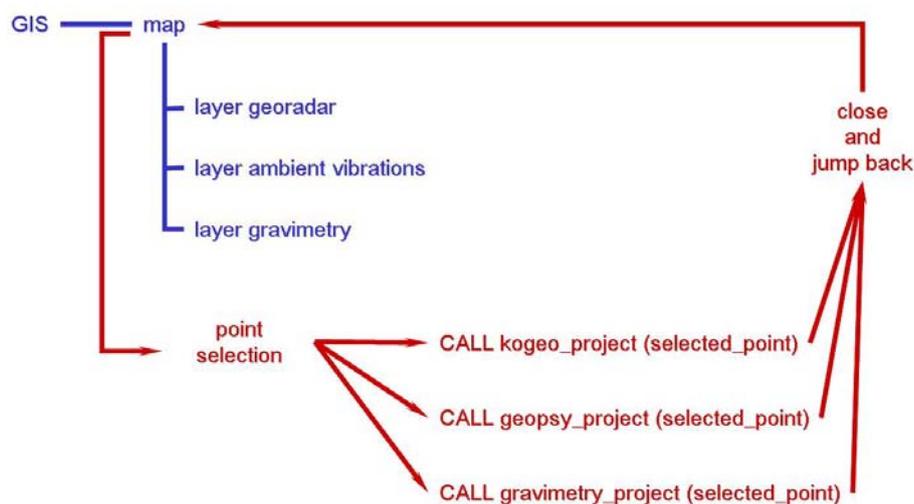


Abb. 6: Zugriffsweg zum geographischen Arbeiten

7 Visualisierung

Mit dem beschriebenen Funktionsumfang sind die Anforderungen an eine gemeinsame Datenhaltung und einen weitgehend autarken Analyseprozess abgedeckt. Es fehlt allerdings noch die Integration der Ergebnisse zu einem Gesamteindruck des Untergrunds unter dem Untersuchungsgebiet in 3D. Dies kann weder das GIS noch die proprietären Methoden leisten. Eine Betrachtung der Endknoten in den Analyseketten der verwendeten Messverfahren zeigt jedoch folgendes: In allen Fällen wird zu einem geographischen Ort (Messort) eine Schätzung der Tiefenlage des gesuchten Schichtwechsels getroffen. Diese Tiefenwerte können in einer räumlichen Matrix für den Untergrund im Untersuchungsgebiet gespeichert werden. Eine solche Matrix wird nur schwach besetzt sein, weshalb eine direkte Darstellung ihres Inhalts nicht sinnvoll erscheint. Vielmehr müssen erstens geeignete Methoden

der Interpolation angewandt werden, um einen einigermaßen kontinuierlichen Verlauf der Konturen zu gewährleisten, andererseits sollte in die resultierende Visualisierung das Maß für die Genauigkeit von Messung, anschließender Analyse und Güte der Interpolation einfließen.

Wie diese inhaltlichen Probleme gelöst werden können, soll dieser Beitrag nicht behandeln. Die Einbindung der dazu notwendigen Arbeitsschritte in das beschriebene Analysesystem soll hier allerdings abschließend skizziert werden: Zunächst muss, basierend auf den Endknoten der verfahrenstypischen Analyseketten, eine Methode implementiert werden, die die Schätzung der Tiefenlage für jede behandelte geographische Position in die Ergebnismatrix für das gesamte Untersuchungsgebiet übernimmt. Dort wird für jede Position ein Tripel aus Messmethode, Tiefenlage und Genauigkeit des Datums abgelegt. So führt diese Matrix die Analyse-Workflows zusammen. Auf sie kann jedoch nur lesend zugegriffen werden, weshalb die Ausnahme zur Konkatenations- bzw. Verzweigungsregel aus Abschnitt 4.3 toleriert werden kann.

Auf der Basis dieser Ergebnismatrix kann anschließend ein beliebiges 3D-Visualisierungsverfahren, in Analogie zu den bereits gekoppelten Analysetools, eingebunden werden. Dessen Aufruf erfolgt in Konsistenz zum benötigten, ausschließlich lesenden Zugriffsrecht aus dem GIS heraus, als Ergebnis wird eine im Fenster des so angeschlossenen Tools frei bearbeitbare 3D-Visualisierung angezeigt, die auf einer geeigneten Interpolation der Werte in der Ergebnismatrix basiert und das erwähnte Genauigkeitsmaß als Attribut der interpolierten Kurve umsetzt, beispielsweise durch Intensität oder Transparenz der Kurvenlinie. Für die Implementierung ist eine Kopplung an MatLab vorgesehen, das sowohl über ein breites Spektrum an Interpolationsverfahren verfügt als auch eine interaktiv bearbeitbare Visualisierung inklusive einer ausgereiften Druckfunktion bereithält.

7.1 Formalisierung der Visualisierungsaufgabe

Bei genauer Analyse liegt im HADU-Projekt eine Situation vor, wie sie häufig bei der Auswertung von Messdaten im Geo- bzw. Umweltwissenschaftlichen Kontext auftritt und die Bearbeiter der geowissenschaftlichen Teilprojekte vor zwei grundlegende Problemfelder stellt:

Für jede der Messmethodiken existiert eine Infrastruktur bestehend aus Software, Hardware und nicht zuletzt dem Know-How der jeweiligen geowissenschaftlichen Teilprojekt Bearbeiter, die allerdings hochgradig spezialisiert in Bezug auf genau diese Messmethodik ist [8]. Diese proprietären Lösungen sind alleine genommen nicht in der Lage, eine integrative Interpretation der gemessenen Daten zu unterstützen, die ja gerade darauf basiert, dass Daten unterschiedlichster Datenquellen zusammengefasst werden, um ein präziseres Modell bzw. Bild der gemessenen Situation zu ermöglichen. Datenlücken können durch eine derartige Integration geschlossen werden und die Aussagekraft der Einzelmessung kann

durch die Integration in den Kontext des gesamten Mess-Szenarios gestellt und damit erhöht werden.

Eine Abstraktion in Form einer mathematischen Formalisierung ist sinnvoll, um sowohl das Integrations- als auch das Interpretationsproblem lösen zu können. Das folgende Vorgehen beschreibt eine allgemeine Methodik, wie mit Datenmengen der beschriebenen Form umgegangen werden sollte, und ist daher weit über den Kontext des HADU Projekts hinaus für viele ähnlich gelagerte Analysen von Geo- bzw. Umweltdaten anwendbar.

Der Anschaulichkeit wegen, wird aber auch in diesem Abschnitt auf die Semantik des HADU Projekts beispielhaft zurückgegriffen. So stellt sich konkret die Frage, wo die Grenzlinie des Salzstocks anzunehmen ist als eine Klassifikation für jeden Punkt im dreidimensionalen Raum als eine Funktion, die jeden Raumpunkt einen Bodentyp aus einer vorgegebenen Menge zuordnet:

$$(x, y, z) \rightarrow i \quad \text{with} \quad \begin{array}{ll} x, y, z \in R & \text{Raumkoordinaten} \\ i \in N & \text{Bodentyp} \end{array}$$

Differenziert man nach den durchgeführten Messungen, so ergibt sich für jede Messmethodik zunächst eine separate Funktion F , die jedem Raumpunkt einen Messwert u zuordnet, allerdings noch keine Klassifikation im oben genannten Sinne darstellt. Formal zeigt der Index x dieser Funktion an, welcher Messmethodik die Zuweisung zuzuordnen ist. (Im Beispiel: drei Datenquellen, georadar (R), ambient vibrations (AV) and wells (W).)

$$F_x : (x, y, z) \rightarrow u_x \quad \text{with} \quad \begin{array}{l} x \in D_x^x \subseteq R \\ y \in D_y^x \subseteq R \\ z \in D_z^x \subseteq R \\ u_x \in R \end{array}$$

Zunächst abstrahiert diese Formalisierung die Tatsache, dass einerseits bei den Messungen ja gerade nicht für jeden Punkt des Raumes ein Messwert vorliegt und dass andererseits die Rohdaten nicht unbedingt auf einen reellwertigen Bereich u abgebildet werden können, sondern dass bereits an dieser Stelle eine Einschränkung, z.B. auf einen ganzzahligen Wertebereich mit nur wenigen Kategorien vorliegen kann.

7.2 Spezifikation des Problems auf der Basis der Formalisierung

Es liegt hier also die Situation vor, dass für jeden Raumpunkt ein Messwert der jeweiligen Messmethode bekannt ist, für die Visualisierung und die Interpretation allerdings ein bereits klassifizierter Messwert, also die Angabe des Bodentyps i aus der vorgegebenen Menge von Möglichkeiten, benötigt wird. Damit präzisiert die Formalisierung die Grundaufgabe in zwei Teilschritte: Erstens die Verarbeitung der

rohen Messdaten und zweitens die Klassifikation gemäß der vorgegebenen Menge von Bodentypen.

Um eine solche Klassifikation vorzunehmen, sind zwei unterschiedliche Alternativen möglich, wie es aus Abbildung 7 ersichtlich ist::

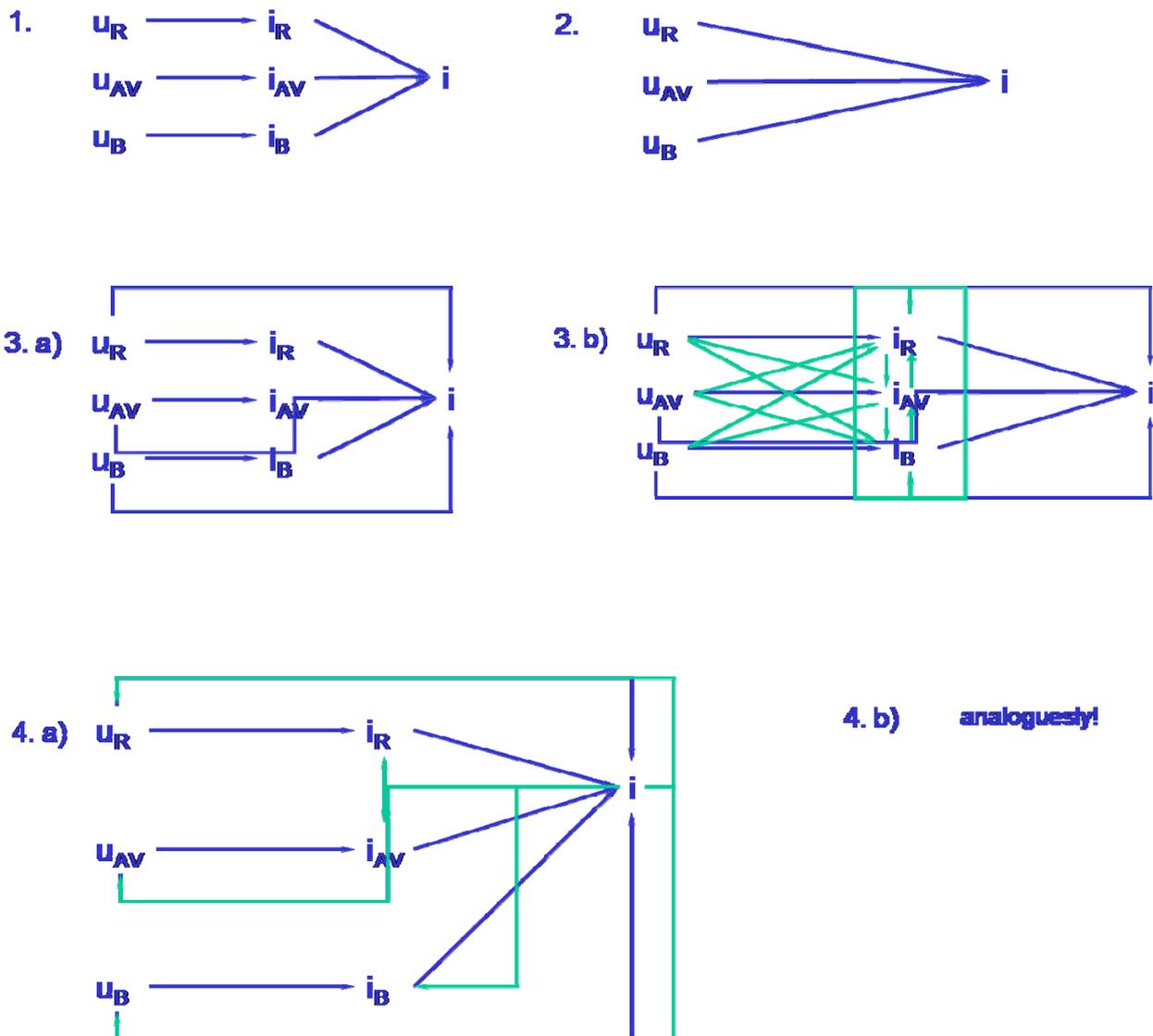


Abb. 7: Unifikations-/Interpretations-Varianten

1. Erst für jede Messmethode klassifizieren, anschließend die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden in einer gemeinsamen Interpretation zusammenführen. (Abb. 7.1)
2. Die Einzelmessungen direkt, also in einem einzigen Arbeitsschritt zu einer integrierten Interpretation zusammenführen. (Abb. 7.2)

Die Basisversionen bei der Datenanalyse können erweitert und differenziert werden, so dass weitere Alternativen entstehen:

3. Kombinierte Klassifikation: Zunächst individuelles Klassifizieren für jede der Messmethoden und anschließende Interpretation durch die Einbeziehung der Einzelklassifikationsergebnisse und der Rohdaten. (Abb. 7.3a) Oder: Vereinigung aller Rohdatenmengen zu Hilfe nehmen, um eine verbesserte Klassifikation sowohl einer individuellen Messung als auch der zusammenfassenden Interpretation aller Daten zu erhalten. (AA. 7.3b)

Feedback Klassifikation: Führe die Klassifikation nach einem der Schemata aus, wie sie unter Punkt 1. bis 3. erläutert sind, aber versuche, das jeweilige Ergebnis durch Anpassung an die Gesamtinterpretation im Sinne einer Rückkopplungsschleife zu optimieren. Die Tiefe der Rückkopplung kann dabei variieren und hat weitere Varianten des Interpretationsalgorithmus zur Folge:

- a. Tiefe 1 repräsentiert ein Feedback auf die Ebene der individuellen Klassifikationen,
- b. Tiefe 2 geht bis auf die Rohdaten der jeweiligen Einzelmessung zurück. (Abb 7.4a). Integriert man nun noch die Ergebnisse, die von den übrigen Messmethoden vorliegen, lassen sich beliebig komplexe Feedback-Interpretationen konstruieren (siehe Abb. 7.3b), was bis zu einem vollständig rückgekoppelten Netzwerk zwischen gemessenen Daten und Interpretationen führt, wie es sich analog zu Abb. 7.3b entwickeln lässt.

Eine zusammenfassende Auswertung dieser vier Basisvarianten führt zu der folgenden Charakterisierung: Eine klassische Vorwärts-Interpretation scheint relativ einfach durchzuführen, weil in diese nur das Wissen über den Analyse-Workflow der gerade behandelten Messmethodik einfließt. Andererseits wird die Klassifikationsaufgabe allerdings auch nicht durch zusätzliche Informationen aus anderen Messmethoden unterstützt. Genau diese Unterstützung bietet die kombinierte Klassifikation mit und ohne Feedback-Mechanismus. Allerdings sind bei einer solchen Vorgehensweise Regeln anzugeben, wie die Daten integriert werden sollen und vor allem, wie die isolierten Interpretationen der einzelnen Messmethoden zueinander zu gewichten sind. Im Allgemeinen führt die Formalisierung zu erheblich höherer Transparenz bezüglich des Analyse-Workflows und erlaubt damit auch eine bessere Dokumentation der Ergebnisse im Vergleich zu einer mehr oder weniger durch den Stil und Kenntnisstand des jeweiligen geowissenschaftlichen Bearbeiters des jeweiligen Teilprojekts geprägten pragmatischen Vorgehensweise.

Verallgemeinert man nunmehr auch die Anforderungen, die an die Klassifikationsfunktion in den unterschiedlichen Varianten gestellt werden, so identifiziert man zwei Basisaufgaben, die einer besseren Klassifikation im Wege stehen, nämlich Lücken im Datenmaterial und zum Teil erhebliche Qualitätsunterschiede bei den einzelnen Rohdatensätzen. Daraus lassen sich drei Grundprobleme ableiten, die durch die aufgeführten, mehr oder weniger erforschten Ansätze gelöst werden können (Abb.7.2 veranschaulicht die Basisaufgaben):

- Unvollständige Daten: Interpolation
- Redundante Daten: Fehlerminimierung/Optimierung
- Unsichere Daten: Fuzzy Klassifikation und Fuzzy Interpolation

Mit Hilfe diese Formalismen kann die Anfangsfrage konstruktiv in die folgenden Teilaufgaben strukturiert werden:

1. Verwende redundante Informationen / Messungen aus unterschiedlichen Messmethoden zur Verbesserung des endgültigen Klassifikationsergebnisses!
2. Beziehe die Qualität der Daten in den Klassifikationsprozess ein!
3. Integriere die Qualität der Daten in die abschließende Visualisierung!
4. Verwende zur eigentlichen Klassifikation Fuzzy-Ansätze!

Unter diesen Prämissen sind allerdings zusätzliche Informationen notwendig, die letztlich der geowissenschaftliche Benutzer des jeweiligen Teilprojekts des Klassifikations- und Visualisierungsverfahrens zur Verfügung zu stellen hat, nämlich: Informationen über die Qualität eines jeden einzelnen Messwertes und die Spezifikation des Fuzzy-Klassifikators in Form von Membership-Funktionen, Regeln und der Defuzzyfication-Funktion [9], wie dies zusammenfassend in Abb. 8 dargestellt ist.

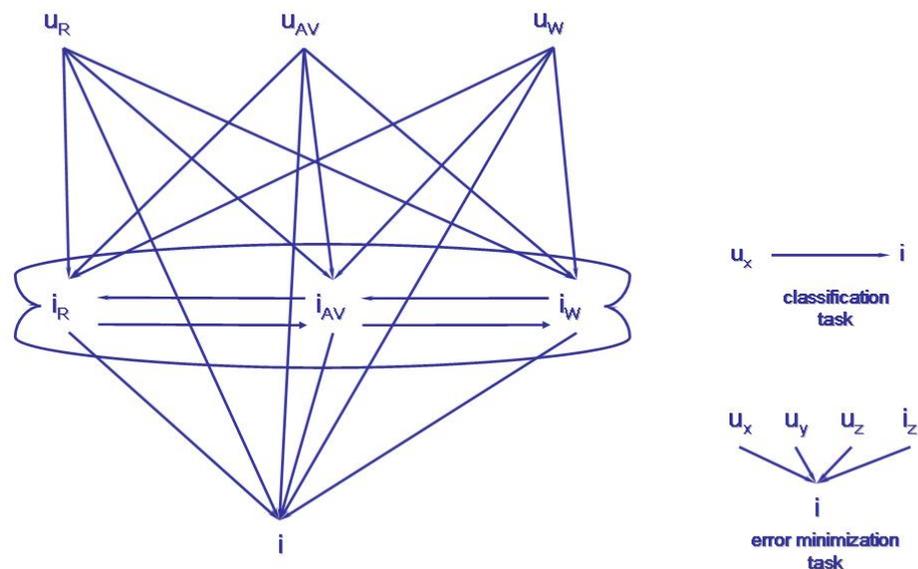


Abb. 8.: Basis Tasks für die Erzeugung einer generalisierten Interpretation

7.3 Integration des Maßes für Daten-Qualität

Will man die Qualität als zusätzliches Attribut in die Interpretation der Messdaten, also deren Klassifikation, einbeziehen, so sind zunächst zwei Stellen zu identifizieren, an denen diese Qualität berücksichtigt werden muss: Einerseits ist das die Qualität des Messwertes selbst, also die Ebene der Rohdaten, andererseits ist es die Qualität der jeweiligen Weiterverarbeitungsmethode bzw. Analyseverfahren und in

letzter Konsequenz die Qualität der Klassifikation selbst. Integriert in den bislang vorgestellten Formalismus stellt sich diese Situation folgendermaßen dar:

Sowohl die Funktion f als auch die Klassifikationsfunktion k werden um eine zweite Dimension erweitert:

$$f^Q : (x, y, z) \rightarrow (u, q) \quad \text{mit } x, y, z, u \quad \text{analog zu } F_X$$

$q \in \text{Qual}$ Qualitätswert

$$k^Q : (u, q) \rightarrow (i, q) \quad \text{mit } u, i \quad \text{analog zu } F_X$$

$q \in \text{Qual}$ Qualitätswert

Auf der Basis dieser Definitionen kann man zurückblicken auf die unterschiedlichen Alternativen zur Klassifikation, wie sie in den Abschnitten 2.1 und 2.2 dargestellt sind. Es wird jetzt klar, dass sämtliche Alternativen, die auf Rückkopplungsmechanismen basieren oder Parameteranpassung auf der Basis von mehreren einfließenden Datenmengen umsetzen, algorithmisch als Optimierungsschleife aufgefasst werden müssen, die eine iterative Neuberechnung der Klassifikation und einen Fehlerminimierungsalgorithmus zur Anpassung der Gewichte für die Einzelmessungen im Sinne einer Parameteroptimierung enthält. Abbruchkriterium für diese Schleife ist eine einstellbare Schwelle für den Qualitätswert.

Diese Überlegung lenkt die Aufmerksamkeit auf die Ausgestaltung des Definitionsbereiches Q für den Qualitätswert. Hierzu sind verschiedene Alternativen für das Attribut q denkbar:

- q als qualitativer Wert
- q als Fuzzy-Wert
- q in Form eines Genauigkeits-Intervalles für den gegebenen Wert i als Epsilon-Intervall für die gegebenen Werte
- q als quantitativer Wert

Darüber hinaus sind weitere Differenzierungen bzw. Vereinfachungen zu treffen, die die Auflösung der Qualitätsfunktion einerseits im dreidimensionalen Raum und andererseits bezüglich der unterschiedlichen Messungen betreffen. Am allgemeinsten und am genauesten wäre es selbstverständlich, jedem einzelnen Raumpunkt (also jedem Tripel (x, y, z)), einen individuellen Qualitätswert zuzuordnen, wie es der Formalismus in seiner allgemeinen Form erlaubt und verlangt. Aus praktischen Gründen wird man im Hinblick auf den Aufwand, der notwendig ist, jeden Raumpunkt individuell mit einem Qualitätswert für die Messung zu versehen, eine vereinfachte Bewertung vornehmen, zumal oftmals aus der Natur des jeweils angewandten Meßverfahrens die durch den Formalismus geforderte Genauigkeit

ohnehin nicht ableitbar ist und daher eine individuelle Attributierung nicht angemessen wäre.

Daher wird man in praktischen Fällen einen gemeinsamen Qualitätswert für eine einzelne Messung oder gar für alle Messungen mit einem bestimmten Messverfahren zugewiesen. Die damit realisierte Granularität des Qualitätsattributes mag zunächst als unzureichend, bezogen auf die Möglichkeiten, erscheinen, die der Formalismus bietet, und er wird Ungenauigkeiten nach sich ziehen, wenn Werte innerhalb einer Messung miteinander verglichen werden müssen. Aber für die eigentliche Fragestellung, Datenmengen unterschiedlicher Messungen und Messmethoden zu integrieren und mit den beschriebenen Interpretationsmechanismen zusammenzuführen, kann der Qualitätswert durchaus seinen Zweck erfüllen, indem er als Maß dient, das in die Fehlerminimierung eingeht, wenn zusammengehörige, aber konkurrierende Messungen zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Im Kontext des HADU Projekts werden die Qualitätswerte für die unterschiedlichen Messmethoden vorbesetzt, und der Anwender des jeweiligen geowissenschaftlichen Teilprojekts kann anschließend an den Stellen, für die er eine begründete abweichende Qualitätswertung vornehmen möchte (so genannte Ausreißer, bekannte Störeinflüsse, etc.), manuell differenzieren.

7.4 Resultierender Workflow und Design Decisions

Für den jeweiligen geowissenschaftlichen Teilprojektnutzer ist der Workflow, d.h. die Reihenfolge, in der die einzelnen Bewertungs- und Interpretationsfunktionen angewandt werden, entscheidend für die Qualität der Klassifikation. Die möglichen Sequenzen im Workflow von den Rohdaten bis zur interpretierten 3D-Visualisierung und die damit zusammenhängenden Abhängigkeiten sind in Abbildung 9 am Beispiel der Situation im Projekt HADU zusammengefasst.

Abbildung 9 zeigt auf ihrer linken Seite die Situation in der 3D-Domäne, in der gemessen wird. Es schließt sich die Ebene der Rohdaten an, die mit Hilfe der drei unterschiedlichen Messmethoden (radar R, ambient vibrations AV, and wells W) ermittelt wurden. Diese Messergebnisse müssen nunmehr interpretiert werden, um eine Klassifikation zu ermöglichen, ein Arbeitsschritt, der zu den (partiellen) Interpretationen der Messergebnisse IR, IAV und IW, oder aber direkt zu einer Interpretation I führt. In analoger Weise eröffnen sich unterschiedliche Workflows, um die Interpretation I zu visualisieren: unabhängig voneinander, als integriertes 3D-Modell, das auf der Basis der partiellen Interpretationen beruht, oder aber basierend ausschließlich auf den Rohdaten ohne jeden Interpretationsschritt.

Für das HADU-Projekt konnte noch keine endgültige Entscheidung über den optimalen Auswerte-Workflow getroffen werden. Allerdings haben sich bei den Arbeiten zwei unterschiedliche Vorgehensweisen herauskristallisiert: Aus der Sicht der geowissenschaftlichen Anwender der Teilprojekte ist es vorrangig, sehr schnell und ohne Zusatzangaben zu einer Visualisierung zu kommen, um sich einen

„Eindruck“ von der geologischen Situation im Untergrund zu machen. Eine Entscheidung für eine vom System geforderte Bewertung im Sinne eines Qualitätswertes wird dabei so weit als möglich an das Ende des Auswerte-Workflows geschoben. Genau mit dieser Vorgehensweise scheint allerdings keine optimale Interpretation und Klassifikation erreichbar zu sein, vielmehr erscheint es diesbezüglich optimal, das Datenmaterial in frühen Stufen des Workflows zu bewerten und auch partiell zu interpretieren, um bei der Integration einen möglichst guten Abgleich validierter partieller Interpretationen vornehmen zu können. Als Ergebnis stehen diese beiden Vorgehensweisen nebeneinander, die Analyse- und Visualisierungstools erlauben beide Extreme im Workflow, letztlich muss es dem geowissenschaftlichen Anwender überlassen bleiben, wo dieser seine jeweiligen Prioritäten setzen möchte.

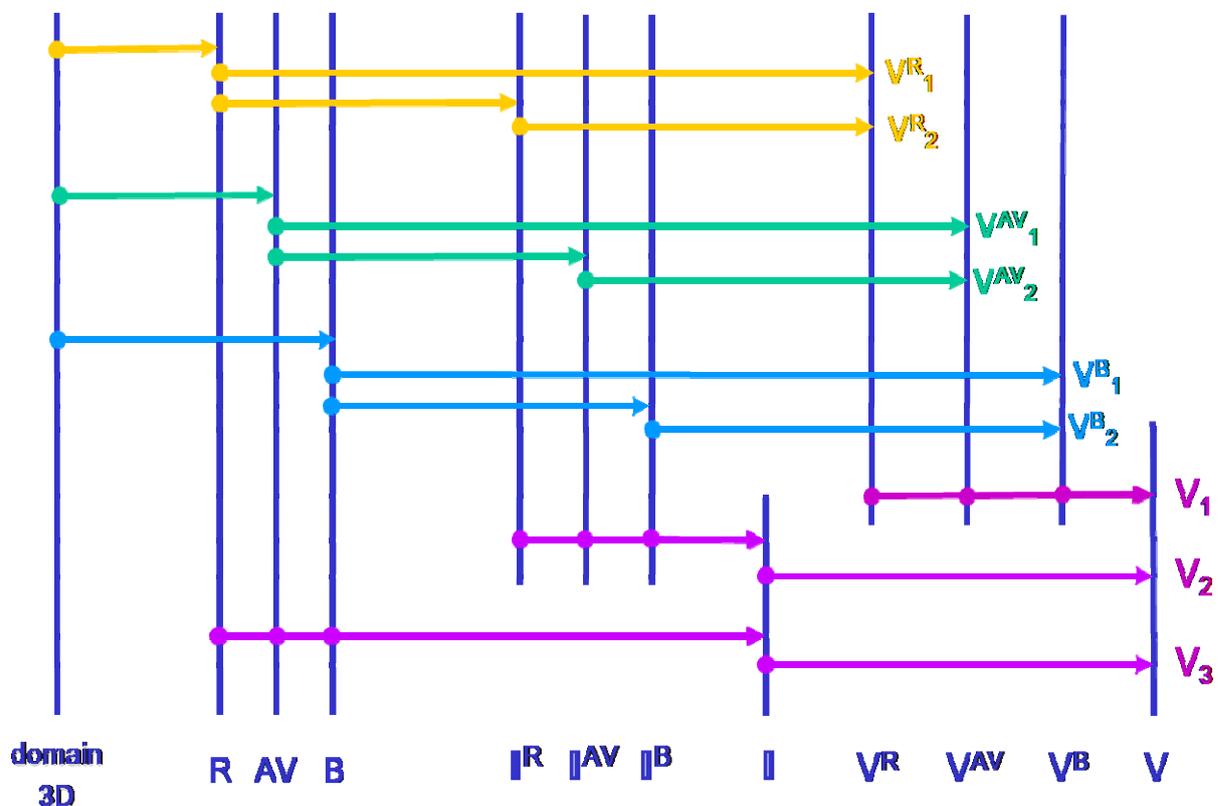


Abb. 9.: Rohdaten workflow zur Interpretation und Visualization

8 Behandlung von Unschärfen durch Fuzzy-Modellierung

Im vorausgehenden Abschnitt 2 über die Datenvisualisierung wurde bereits ein Qualitätswert eingeführt, der eine Bewertung der Messung an einem Bestimmten Punkt repräsentiert. Es handelt sich in diesem Fall um ein reellwertiges Attribut, das dem Messwert eines Raumpunktes zugeordnet ist. Nunmehr stellt sich allerdings das Problem, die Qualität einer Messung sinnvoll anzugeben und zusätzlich die Daten der unterschiedlichen Messverfahren bei dieser Bewertung zu integrieren. Es ist offensichtlich, dass von einem geowissenschaftlichen Anwender nicht verlangt werden kann, für jeden gemessenen Raumpunkt einen entsprechenden Qualitätswert anzugeben. Folglich werden allgemeine Regeln aufgestellt werden müssen, die eine automatische Belegung des Qualitätsattributes erlauben. Im Gegensatz zum formal und allgemein gehaltenen vorausgehenden Abschnitt 2 soll nunmehr die Integration von Fuzzy-Methoden als ein Beispiel für die Umsetzung des eingeführten Qualitätswertes aus geowissenschaftlicher Anwendersicht in Form eines Benutzerhandbuches, das die einzelnen Arbeitsschritte erläutert, vorgestellt werden. Der nachfolgend beschriebene Workflow ist unter Verwendung der MatLab-Toolbox „Fuzzy“ für das HADU Projekt erarbeitet und umgesetzt worden.

In MATLAB gibt es fünf primäre GUI- Werkzeuge, um Fuzzy-Systeme zu erstellen [10], [11]:

- FIS Editor
- Membership Function Editor
- Rule Editor
- Rule Viewer
- Surface Viewer

Damit der Nutzer ein auf die Bedürfnisse seines Anwendungsfeldes angepasstes Fuzzy-Bewertungssystem erstellen kann, gibt er zunächst die Dimension des Problems und die Schnittstellen im FIS-Editor an. Im Beispiel werden 3 Messungen unterschiedlicher Messmethodiken mit den jeweiligen Qualitätswerten angenommen, d.h., es müssen 6 Inputs spezifiziert werden, wie in Abb. 10 dargestellt.

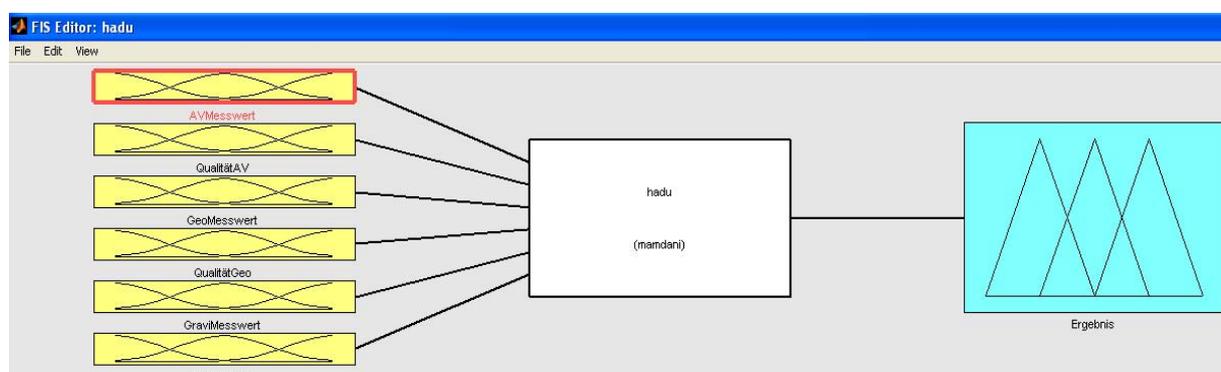


Abb. 10 Fuzzy Bewertungssystem

Um die Zugehörigkeitsfunktionen zu definieren, muss der geowissenschaftliche Nutzer auf die entsprechenden Inputs klicken (siehe Abb. 11 roter Kasten), woraufhin der Membership Function Editor erscheint, in dem die Zugehörigkeitsfunktionen zu definieren sind. Hier muss der geowissenschaftliche Nutzer angeben, welche Messwerte zu welchen Bodentypen gehören. Im obigen Beispiel sind die Messwerte zwischen 0 und 100 Meter vom Bodentyp „Sand“, Messwerte zwischen 50 und 250 vom Bodentyp „Gestein“ usw.

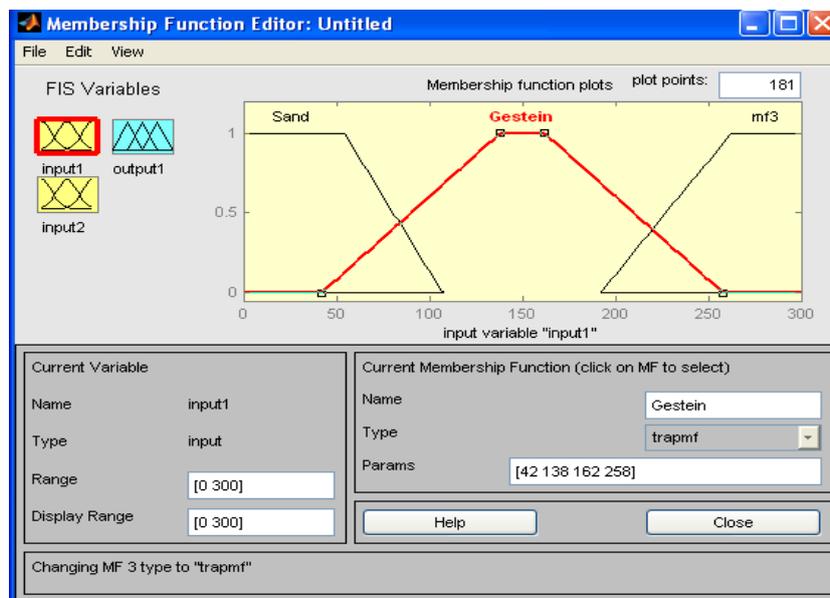


Abb.11.: Definition der Zugehörigkeitsfunktion

Analog kann der geowissenschaftliche Nutzer die Qualität des gemessenen Wertes erstellen. Dabei klickt er auf die entsprechende Eingabe (Abb. 11 input2 roter Kasten), definiert die Parameter der X -Achse unter „Range“, entscheidet sich für den Typ und Namen der jeweiligen Eingabe. Im obigen Beispiel geht die X-Achse von 0 bis 3 und 0 bis 1 wurde als „gut“ eingestuft. Der Nutzer hat sich für den Kurvenverlauf der Zugehörigkeitsfunktion für die Trapezform entschieden.

Die fertige Zugehörigkeitsfunktion der Qualität der gemessenen Werte könnte folgendermaßen aussehen (Abb. 12):

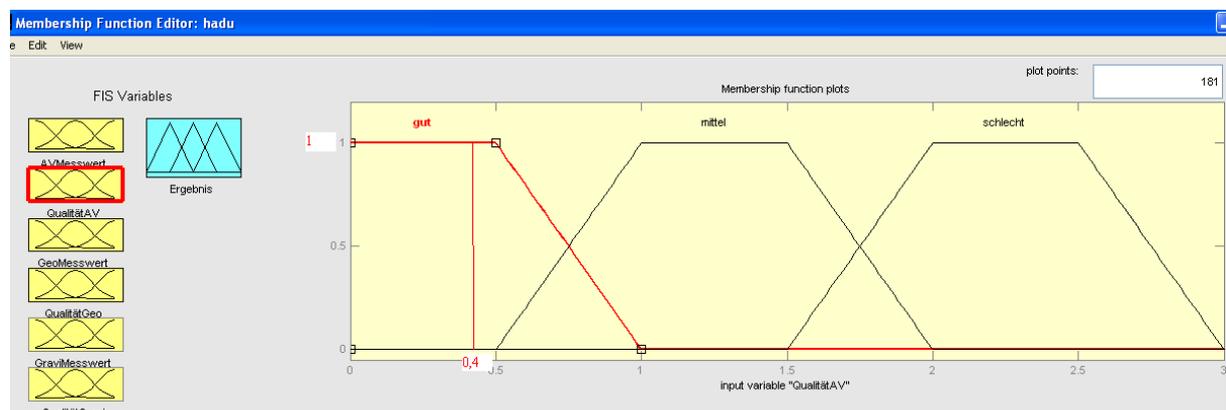


Abb.12 Inputs Fuzzy Bewertungssystem

Anschließend muss der Nutzer den Output des Fuzzy-Systems festlegen. Analog zur Definition der Inputs kann der geowissenschaftliche Nutzer nunmehr entscheiden, wie die Ausgabe zu gestalten ist: z.B. „schlechte Werte ignorieren“ oder „gute Werte zusammenfassen“ etc.

Beispielsweise könnten die Messmethoden zu eine der folgenden Klasse zusammengefasst werden:

- Bilde den Mittelwert aus den Messwerten mit der Qualität „gut“,
- Nehme den Messwert mit der Qualität „gut“ oder
- Verwerfe den Wert

Die so gewonnenen Klassifikationsergebnisse müssen nun wiederum mit einem Qualitätswert versehen werden:

Klassifikationsergebnis:

- Bilde den Mittelwert aus den Werten mit der Qualität „gut“
- Nimm den Messwert mit der Qualität „gut“
- Verwerfe den Wert

Qualitätswert:

gut
mittel
schlecht

Sind für alle Ein- und Ausgaben die Zugehörigkeitsfunktionen definiert, muss das eigentliche Entscheidungssystem in Form einer Regelbasis aufgestellt werden. Dieser Arbeitsschritt erfolgt im sog. Rule Editor. Mit diesem Tool kann der Nutzer beliebige Wenn-Dann-Regeln unter Verwendung der fuzzyfizierten Inputs aufstellen. Bedingungen können mit „und“ oder „oder“ verknüpft, negiert werden.

Im Beispiel könnten die Regeln etwa lauten:

WENN (AVMesswert ist Sand) UND (QualitätAV ist gut) UND
(GeoMesswert ist Sand) UND (QualitätGeo ist gut) UND
(GraviMesswert ist Sand) UND (QualitätGravi ist gut) DANN
(Ergebnis ist bildemittelwertgut).

WENN (AVMesswert ist Sand) UND (QualitätAV ist gut) UND
(GeoMesswert ist Sand) UND (QualitätGeo ist mittel) UND
(GraviMesswert ist Sand) UND (QualitätGravi ist schlecht) DANN
(Ergebnis ist nimmwertgut).

Im Regeleditor sammelt sich auf diese Weise eine Menge an Fuzzy-Rules an, wie es Abb. 13 im Screenshot wiedergibt. Nun ist das System zur Bearbeitung von Inputs vorbereitet. Wenn Informationen über den Messwert mit korrespondierendem Bodentyp und dazugehöriger Qualität am Input anliegen, wird die Regelbasis durchlaufen, die aufgestellten Regeln angewandt und die Ergebnismenge gebildet. Welche Regel schaltet und welchen Beitrag sie zur endgültigen Klassifikation liefert, kann der geowissenschaftliche Anwender dynamisch verfolgen, wenn er sich den Ablauf der Klassifikation im sog. Rule-Viewer anzeigen lässt, wie es Abb. 14 zeigt.

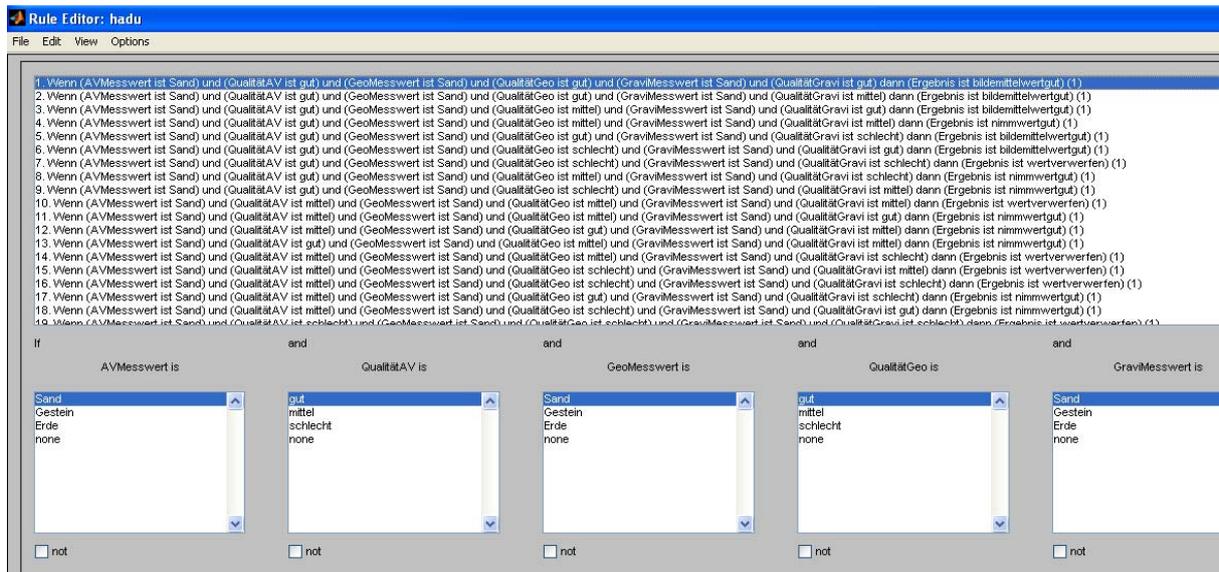


Abb.13.: Screenshot Fuzzy Regeleditor

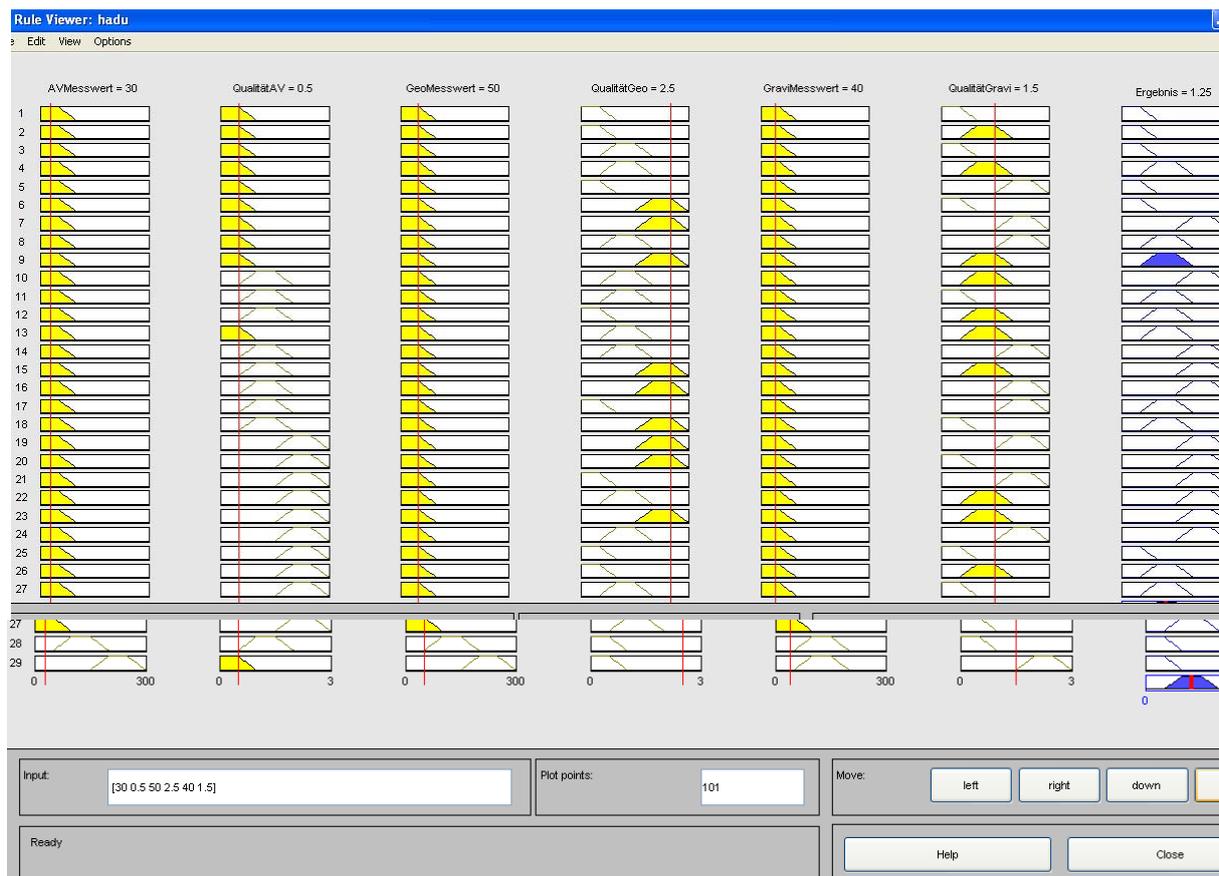


Abb.14.: Fuzzy Rule-Viewer

Im oberen Beispiel ist die Eingabe des geowissenschaftlichen Nutzers [30 0.5 50 2.5 40 1.5] das bedeutet bei Bodentyp Sand wurde mit der Messmethode Ambient Vibration der Messwert 30 mit Qualität „0.5=gut“, mit der Messmethode Georadar der

Messwert 50 mit Qualität „2.5=schlecht“ und mit der Messmethode Gravimetrie der Messwert 40 mit Qualität „1.5=mittel“ gemessen.

Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Eingabe 30 für Input1, die Eingabe 0.5 für Input2 die Eingabe 50 für Input3 usw. ist.

Sobald die Regeln durchlaufen werden markiert das System jede Regel „gelb“ die in der Eingabe auftaucht. Sieht man sich die erste Spalte an sind die Regeln 1 bis 27 „gelb“ markiert da gerade in den Regel 1 bis 27 der Bodentyp „Sand“ auftaucht, in Regel 28 und 29 jedoch nicht. Bei der vierten Spalte z.B. ist die Eingabe 2.5 d.h. Qualität wurde vom Nutzer als „schlecht“ eingestuft, die Regeln 6,7,9,15,16, 18-20 und 23 sind „gelb“ markiert, weil gerade bei diesen Regeln „schlecht“ auftaucht.

Das Klassifikationsergebnis aber ist in diesem Falle die Regel 9, die zu einem Grad von 1.25 „nimm Wert gut“ zutrifft.

9 Das Visualisierungstool

Wie bereits in den Projektberichten zum Teilprojekt Informatik beschrieben und begründet, hat während der Projektlaufzeit die Aufgabenstellung bezüglich der Visualisierung eine Modifikation erfahren, die den Schwerpunkt weg von der Interpolation der Daten und hin zu einer benutzergesteuerten Interpretation verschoben hat, wie sie im vorausgehenden Abschnitt erläutert wurde.

Die geplanten Interpolationsverfahren auf der Basis von NURBS erschienen angesichts der Datenlage zu wenig zielführend und ihre Anwendung im HADU-Projekt daher als nicht geeignet.

Aus diesen Gründen wurde auf der Basis von MatLab ein eigenes, interaktives Visualisierungstool entwickelt, das nur die „klassischen“ Interpolationsmethoden verwendet, dem geowissenschaftlichen Anwender dafür aber die Möglichkeit bietet, sich interaktiv und schrittweise eine Vorstellung von der Qualität seiner Messdaten und dem aus diesen Daten generierten Modell zu verschaffen. Dieses Tool kann die mit der Fuzzy-Methodik bearbeiteten Datensätze importieren und bildet damit neben der web-basierten Datenhaltung und der Fuzzy-basierten Qualitätsbewertung das Ende des Analyseworkflows.

Abbildung 15.1 zeigt die Bedienoberfläche. Im rechten Bereich kann zwischen den verschiedenen Messungen ausgewählt werden, die separat oder zusammen in einer Darstellung angezeigt werden können. Die Messpunkte sind in der 3D-Darstellung durch Kreise (ggfs. in unterschiedlichen Farben) markiert. Zusätzlich wählt der geowissenschaftliche Anwender noch das Interpolationsverfahren aus einer Liste aus und kann sich anschließend entweder eine beliebige Anzahl von Schnittflächen definieren oder aber die Anzeige von Isosurfaces aktivieren oder auch beide Darstellungen zusammen anzeigen lassen. (Abbildungen 15.2, 15.3 und 15.4)

Die Darstellungen werden nach jeder Auswahl aktualisiert, so dass der Anwender die Datensätze sowohl einzeln als auch im Vergleich betrachten und bewerten kann. Werden Punkte im 3D-Bereich selektiert, erscheinen die präzisen Koordinaten und der Messwert in einem separaten Fenster; selbstverständlich ist die gesamte Darstellung auch frei drehbar und zoombar.

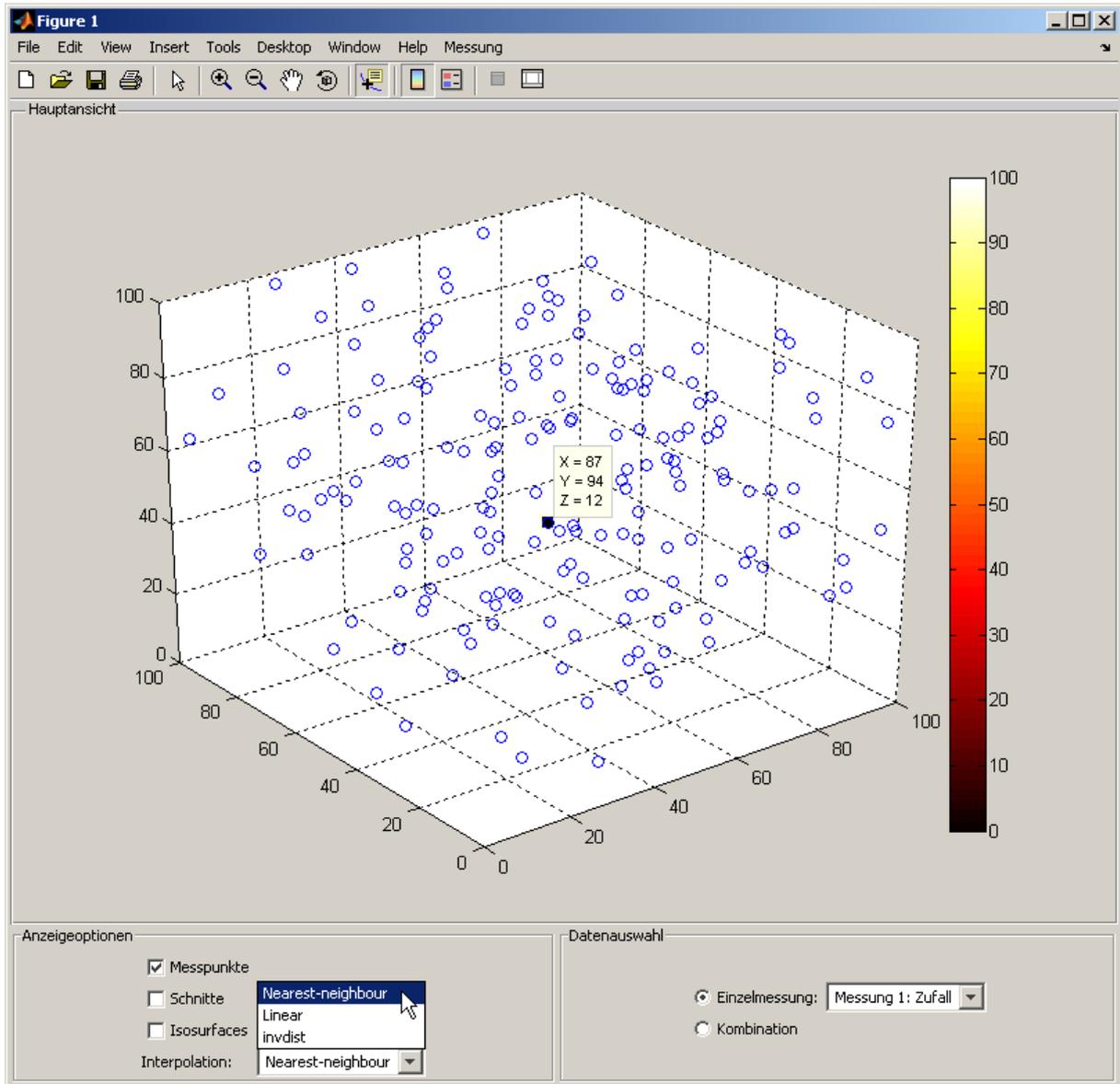


Abbildung 15.1: Das Visualisierungstool

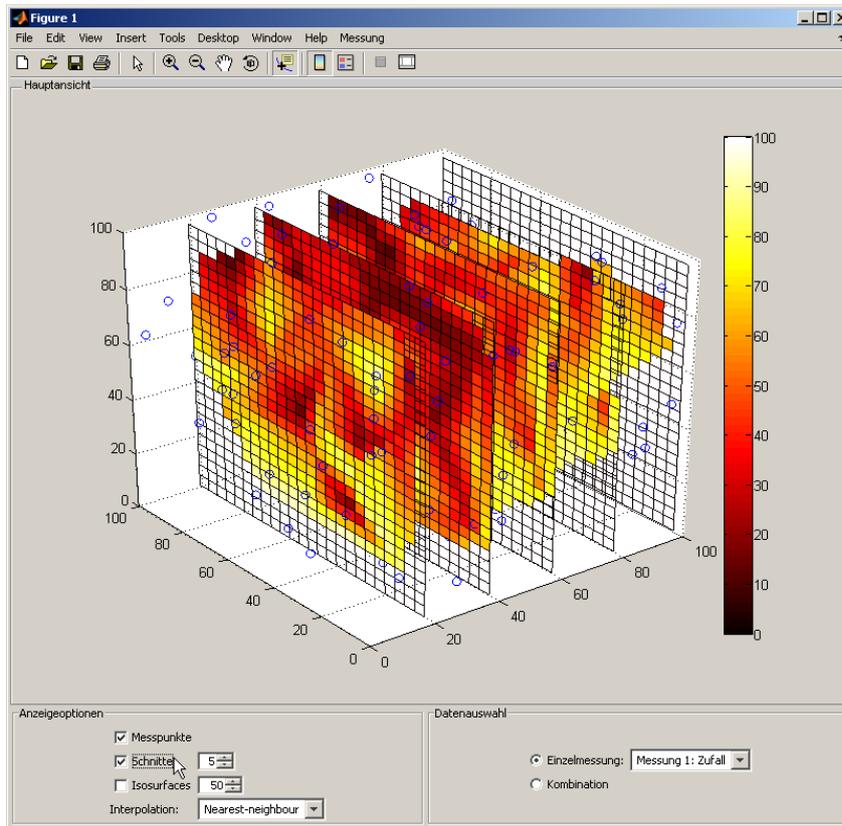


Abbildung 15.2: Schichtdarstellung

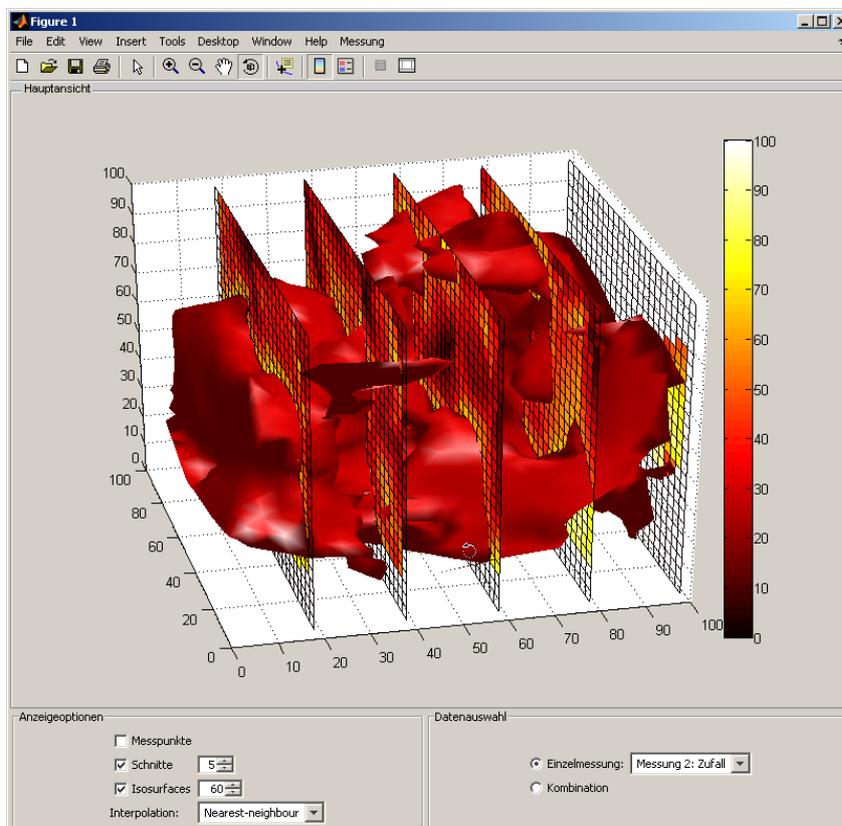


Abbildung 15.3: Isosurface-Darstellung

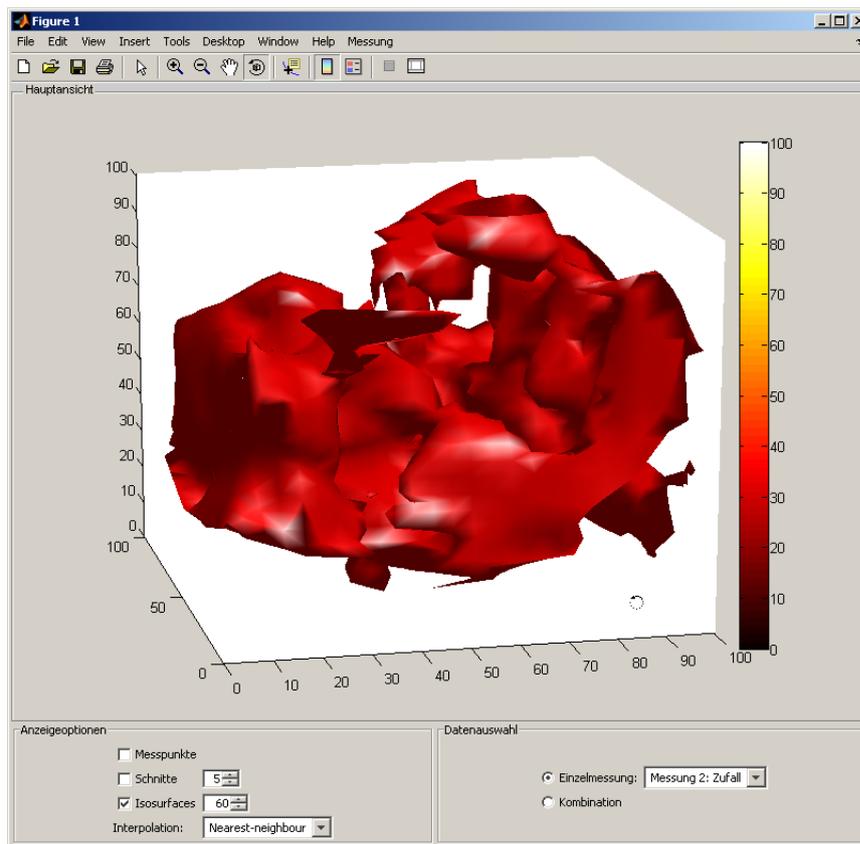


Abbildung 15.4: isolierte Isosurface-Darstellung

10 Links und References

- [1] Geotechnologien, Science Report No. 6, BMBF 2005, S.124-140
- [2] Wittmann, J.: HADU: Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund – Anforderungen und Lösungskonzepte des Teilprojektes Informationstechnologie; in: Wittmann, J.; Müller, M.: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften: Workshop Leipzig, Aachen 2006, S.245-253
- [3] <http://www.geophysics.zmaw.de> Homepage des Geologisch-Paläontologischen Institutes, Universität Hamburg, Arbeitsgruppe Prof. C.-D. Reuther
- [4] <http://www.kogeo.de/> Homepage des Kogeo Seismic Toolkit
- [5] <http://gmt.soest.hawaii.edu/> Homepage des Generic Mapping Tools (GMT)
- [6] <http://www.geo.uni-potsdam.de> Homepage des Instituts für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Arbeitsgruppe Prof. F. Scherbaum
- [7] <http://www.geopsy.org/> Homepage des Sesarray Projektes
- [8] Wittmann, J.: Konzeption der Softwarearchitektur für das Kooperationsprojekt HADU (Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund); in: Wittmann, J., Wohlgemuth, V.: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Berlin 2007, Aachen 2007, S. 115-125
- [9] Wieland, R. et al. (2004) SAMT - eine neue Open Source Plattform zur Landschaftsanalyse, Modellentwicklung und Integration räumlich expliziter ökologischer und ökonomischer Modelle in Schiefer, G. et al.: Integration und Datensicherheit - Anforderungen, Konflikte und Perspektiven, Referate der 25. GIL Jahrestagung, 8.-10. September 2004, Bonn, 2004, pp. 137-140
- [10] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [11] <http://www.mathworks.com/products/fuzzylogic/>

Teil 3: Erfolgskontrollbericht

11 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms gehörte in Sonderheit die Förderung interdisziplinärer Zusammenarbeit, hier von Geowissenschaftlern mit Informatikern, mit dem Ziel, Synergien durch die Beteiligung unterschiedlicher Disziplinen zu erzeugen. Dadurch war es möglich, im Kontext geowissenschaftlicher und informationswissenschaftlicher Grundlagenforschung, einen Methodentransfer aufzubauen, der dem geologischen Anwendungsbezug des Projekts, hinsichtlich der erforderlichen methodischen Untermauerung, zu einem übergeordneten Zugang verhalf.

12 Wissenschaftlicher, technischer Erfolg, Nebenergebnisse, Erfahrungen

Der wissenschaftliche Erfolg der gemeinsamen Arbeiten ist vorrangig dadurch begründet, dass neuartige Informatikmethodiken mit geowissenschaftlichen Anwendungsbezug entwickelt werden konnten, was nur durch die direkte Zusammenarbeit zwischen Geowissenschaften und Informatik möglich wurde.

In diesem Zusammenhang zu nennen sind in Sonderheit die

- Einbeziehung der Qualität von Messdaten beispielsweise dadurch, dass alle Datensätze direkt durch die geowissenschaftlichen Datenerheber intensiv vorverarbeitet und ausreichend dokumentiert wurden, was zu deutlich besseren Ergebnissen führte (vgl. hierzu auch Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund HADU, Abschlussbericht, Teilprojekt Informatik, Teil 2).
- Bewertung der geowissenschaftlichen Daten an Hand von Fuzzy-Sets, da es sich als notwendig herausgestellt hatte, dass teilweise zusätzliche Informationen notwendig sind, die letztlich der geowissenschaftliche Benutzer des jeweiligen Teilprojekts dem Klassifikations- und Visualisierungsverfahren zur Verfügung zu stellen hat. Diese Informationen beziehen die Qualität eines jeden einzelnen Messwertes und die Spezifikation des Fuzzy-Klassifikators in Form von Membership-Funktionen, Regeln und der Defuzzyfication-Funktionen ein.
- Abstraktionen in Form einer mathematischen Formalisierung, um sowohl das Integrations- als auch das Interpretationsproblem lösen zu können, wurden im HADU Projekt um eine Visualisierung für 3D mit unterschiedlichen Verfahren zur Ergänzung von Datenlücken weiterentwickelt.
- Wegen der Flexibilisierung der Arbeitsweise und des Zugriffsverhaltens der geowissenschaftlichen Nutzer und wegen fehlender Standardisierung sowie zum Zwecke des einfachen Zugriffs auf Rohdaten und Ergebnisse wurde ein

Browser-basiertes Portal anstatt einer reinen Datenbank-Lösung favorisiert und letztendlich im HADU Projekt erfolgreich umgesetzt. Die hat den Vorteil, dass sowohl die Methodik als auch die Architektur des Portals unabhängig vom HADU Projekt sind und damit auch auf auf ähnlich gelagerte Projekte direkt übertragbar sind.

Als Erfahrung aus dem Einsatz innovativer IT Strukturen in interdisziplinären Projekten haben sich für das Teilprojekt Informatik im Wesentlichen die folgenden vier Aspekte herauskristallisiert:

- der Wunsch der geowissenschaftlichen Anwender bereits bei ihnen im Einsatz befindliche Software unbedingt eingebettet zu sehen, die allerdings, aus Sicht der Informatik, nur einen sehr kleinen Teil der Anforderungen abdeckt, und in der Regel nicht nach modernen softwaretechnologischen Prinzipien erstellt wurde,
- die fehlende Standardisierung der Datenformate die sich als äußerst problematisch herausgestellt hat
- dass fehlende Systemwissen zur Bewertung und Interpretation der Daten, das für eine Interpolation bei der zu entwickelnden Visualisierung notwendig wäre
- der Konflikt zwischen Datenschutz und öffentlichem Zugriff

13 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Die durch den beim Projektbeginn erforderlichen Personalwechsel notwendigen doppelten Einarbeitungszeiten führten, zusammen mit der verspäteten Projektbewilligung dazu, dass die Arbeiten des Teilprojektes Informatik im Berichtszeitraum 2005 zunächst in Verzug geraten sind. Die durch die Besetzungsprobleme verbliebenen Restmittel aus 2005 konnten aber für eine Personalverstärkung in 2006/07 verwendet werden, so dass der anfängliche Rückstand im Teilprojekt Informatik, gegenüber der Planung, sich für die Erreichung der Projektziele als nicht gefährdend erwies, da durch die so besser ausgestattete Stelle bei deren Neubesetzung einen deutlichen Schub brachte. In toto wurde der Finanzierungsrahmen vollständig eingehalten.

Allerdings mussten, aufgrund der anfänglichen Personalprobleme im Teilprojekt Informatik, die Arbeitspakete des Teilprojektes vor dem Hintergrund der Ziele und der verbleibenden Projektlaufzeit, angepasst werden. Trotz dieser Änderungen bleibt das Grundkonzept der Planung mit seinen 4 Phasen bestehen (siehe nachfolgende Tabelle 1). Dabei ergeben sich die so genannten Deliverables zum Ende der jeweiligen Phasen direkt aus der Beschreibung der Teilaufgaben, wie folgt:

Phase I: Konfiguration und Analyse

Analyse des aktuellen Zustandes der Datenerhebung und Weiterverarbeitung sowie Anforderungsanalyse als eigene Teilaspekte wurden in den Arbeitsplan aufgenommen. Einarbeitung in den Stand der Technik in den Bereichen Fuzzy und 3D-Visualisierung vorgesehen.

Phase II: Konzeptionsphase

Konzeption der HADU IT-Infrastruktur mit den Teilbereichen Datenmodell und Systemarchitektur für die Konzeption des Gesamtsystems sowie den beiden Module Fuzzy-Ansätze und 3D-Visualisierung als spezielle Methoden.

Phase III: Umsetzungsphase
Umsetzung und Know How Transfer zu den Anwendern

Phase IV: Integrationsphase
Auf Grund des modularen Systemansatzes werden die in der Umsetzungsphase erstellten Module zusammengefügt und zum Zielsystem für HADU verknüpft. Dokumentation von Software und Projektergebnissen erstellt werden.

Tabelle 1:

		05				06				07				08	
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
P I	Konfiguration und Analyse														
	1. Analyse Ist-Zustand				X	X									
	2. Anforderungsanalyse				X	X	X	X	X						
	3. Erarbeitung Methodiken				X	X	X								
P II	Konzeptionsphase														
	1. Basic Tool Fuzzy							X	X	X					
	2. Basic Tool 3D-Visualisierung									X	X	X			
	3. Konzeption Datenmodell					X	X	X	X						
	4. Konzeption Systemarchitektur					X	X	X	X						
	5. Benutzer-Befragung						X	X							
	6. Benutzer Info & Schulung								X	X					
P III	Umsetzungsphase														
	1. Basic Tool Fuzzy								X	X	X				
	2. Basic Tool 3D-Visualisierung										X	X	X		
	3. Datenmodell								X	X	X	X	X		
	4. Systemarchitektur								X	X	X	X	X		
	5. Benutzer Info & Training											X	X	X	
P IV	Integrationsphase														
	1. Integration der Module												X	X	
	2. Dokumentation													X	X
	3. Training & Verbesserungen													X	X

14 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die neuen Methodiken zur Einbeziehung der Qualität von Messdaten in der geowissenschaftlichen Analyse sowie der neuartige Fuzzy Ansatz sind auch für andere geowissenschaftliche Projekte von großem Interesse und können, da in diesem Projekt entwickelt, von universitäten Projekten genutzt werden. Eine kostenlose Nutzung ist dabei insofern nicht möglich, da für die zur Verfügung Stellung Personal benötigt wird, welches nicht mehr vom Projekt bezahlt wird und damit für dessen Einsatz zu honorieren wäre.

15 Gemachte Erfindungen, Schutzrechte und deren Verwertung

Keine

16 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Neben den bislang angegebenen Methoden wurde auch komplizierte Interpolationsmethoden wie Splines, B-Splines und NURBS auf ihre Einsetzbarkeit hin untersucht, was sich allerdings als wenig zielführend herausstellte, weil

- das vorhandene Datenmaterial zu dünn ist
- eine Fehlerabschätzung wegen nicht vorhandener Qualitätskriterien bzw. Optimalitätskriterien nur sehr rudimentär gelingt.

Tagungsbeiträge:

Wittmann, J. et al.:

Validating Measurement Data by Quality Measures Using Fuzzy-Approaches

Als Full Paper eingereicht zur MathMod 2009, Wien

Wittmann, J.:

Basic Considerations on Using Visualization and Fuzzy Methods to Generate 3D-Models from Different Geological Data Sources

In: Hryniewicz, O.; Studzinski, J.; Romaniuk, M.: EnviroInfo Warsaw 2007 – Environmental Informatics and Systems Research, Aachen 2007, pp. 511-517

Wittmann, J.:

A Software Architecture for the Cooperation Project HADU (Hamburg's Dynamical Underground)

In: Hryniewicz, O.; Studzinski, J.; Romaniuk, M.: EnviroInfo Warsaw 2007 – Environmental Informatics and Systems Research, Aachen 2007, pp. 159-166

Wittmann, J.:

Konzeption der Softwarearchitektur für das Kooperationsprojekt HADU (Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund)

In: Wittmann, J., Wohlgemuth, V.: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Berlin 2007, Aachen 2007, S. 115-125

Wittmann, J.:

HADU: Hamburgs dynamischer geologischer Untergrund – Anforderungen und Lösungskonzepte des Teilprojektes Informationstechnologie

In: Wittmann, J.; Müller, M.: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften: Workshop Leipzig 2006, Shaker-Verlag, Aachen 2006, S. 245-254