





Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung

Bericht zur Kooperation 2021

Dr. Christian Weidle , Dr. Henriette Sudhaus , Dieter Hoogestraat ,
Arne Schmidt, Alison Seidel , Noemi Schulze-Glanert,
Dipl.-Ing. Detlef Schulte-Kortnack, Prof. Dr. Thomas Meier
*Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel*

Dipl.-Geophys. Andreas Omlin
*Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und Ländliche Räume (LLUR)
Abteilung Geologie und Boden - Geologischer Dienst SH (SDG)
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek*

Beiträge zur seismologischen Überwachung in Norddeutschland

Nº 05, 2022

Weidle, C. et al.: Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung: Bericht zur Kooperation 2021.

ISSN 3052-7236

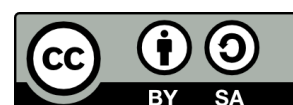
DOI 10.38071/2025-00971-0

Herausgegeben von

Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Veröffentlicht am 3. Juni 2022,

... online am 11. August 2025



Dieses Dokument ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Status Stationsnetz 2021	3
2.1	Permanent-Stationen	3
2.1.1	Zukünftiger Standort Dänischer Wohld	4
2.2	Lokale Stationsnetze	4
2.3	Arbeiten ausserhalb SH	6
2.4	Fazit	6
3	Status Datenzentrum - Erfassung und Auswertung seismologischer Daten	7
4	Ereignisübersicht 2021	11
4.1	Überregionale Seismizität	11
4.2	Seismische Ereignisse in SH	11
4.3	Andere relevante Ereignisse	14
5	Das lokale Netz um Bad Segeberg	17
5.1	Temporäres Experiment in der Kalkberghöhle	17
5.2	Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes	17
6	Array Detektionen am Helgoland Array	22
7	Das Spannungsfeld in Norddeutschland	27
8	Analyse von Bodenabsenkungen um die Kavernenspeicher in Kiel Rönne	29
8.1	Gaskavernen in Kiel-Rönne	30
8.2	BBD-Daten im Bereich der Kavernen	32
8.3	Modellierung	35
8.4	Optimierung eines Kavernenmodells	37
8.5	Modellergebnisse der Optimierung	39
8.6	Einordnung der Optimierungsergebnisse	39
9	Zusammenfassung	44
	Literatur	47
A	Ereigniskatalog für 2021	49
B	Abbildungsverzeichnis	55
C	Tabellenverzeichnis	57

1 Einleitung

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Geologischen Dienst SH (SGD) im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel konnten im Jahr 2021 trotz der pandemiebedingten Einschränkungen wichtige Fortschritte erzielt werden.

Das seismologische Stationsnetz in Schleswig-Holstein ist durch die erfolgreiche Kooperation zwischen dem SGD und dem IfG von ehemals zwei Stationen in 2012 auf mittlerweile 18 Stationen angewachsen. Die Stationen sind technisch hochwertig und haben eine sehr hohe Datenvollständigkeit. Am Standort Birkenmoor konnten Gestattungsvereinbarungen geschlossen werden, die einen Ausbau der bisher temporären Station zu einer weiteren permanenten Station ermöglichen. Dieser wurde bereits 2021 begonnen und soll im Frühjahr 2022 abgeschlossen werden. Neben dem landesweiten Stationsnetz sind auch die lokalen Netze auf Helgoland und um Bad Segeberg technisch konsolidiert. Regelmäßige Wartungen der Stationen (sowohl vor Ort als auch per Fernzugriff) bilden die Grundlage für die hohe Datenverfügbarkeit von allen Stationen in SH und das Fundament für die seismologische Überwachung (siehe Kapitel 2).

Im Rahmen der regelmäßigen und systematischen Datenauswertung aller in Echtzeit zur Verfügung stehenden Daten am IfG hat sich auch das Datenakquisitions- und -auswertesystem konsolidiert, wird aber weiterhin um neue seismologische Stationen außerhalb SHs erweitert. Durch bilateralen Datenaustausch mit dem dänischen geologischen Dienst können mittlerweile neun (statt vorher drei) Stationen aus Dänemark verwendet werden. Hinzu kommen zusätzliche Echtzeitdaten aus Hamburg und dem nördlichen Niedersachsen, welche die Auswertung seismologischer Ereignisse für SH verbessern. Neben der automatisierten Datenerfassung und -erstausswertung, wird anhand eines Beispiels die routinemäßige manuelle Auswertung diskutiert. Diese bleibt zur vollständigen Erfassung schwacher Ereignisse unersetzbar (siehe Kapitel 3).

Im Jahr 2021 aufgetretene tektonische Ereignisse mit Relevanz für SH sind Erdbeben in der zentralen Nordsee, welche in Lokation und Magnitude nicht untypisch für die Region sind, sowie bei Groningen (NL) und in Niedersachsen, welche mit den dortigen Gasförderungen in Zusammenhang stehen. Diese Ereignisse mit Magnituden bis zu 3.5 wurden sowohl vom landesweiten, als auch von den lokalen Stationsnetzen unabhängig voneinander zuverlässig detektiert. Anhand von Sprengungen der dänischen Marine in der nördlichen Kieler Bucht kann die Genauigkeit der seismologischen Lokalisierung auf ca. 5 – 10 km im marinen Bereich quantifiziert werden (siehe Kapitel 4).

Im Bereich des Segeberger Kalkbergs kommt es immer wieder zu kleineren Ereignissen mit einer hohen Ähnlichkeit in der Wellenform zu dem Erdbeben vom Oktober 1997.

Da die Ursache für diese wiederkehrenden Ereignisse mit nur einer Beobachtung an der seismologischen Station im Kalkberg nicht aufzulösen ist, wurde ein zusätzliches Netz an Geophonen für die Wintermonate 2021/22 in der Kalkberghöhle installiert. Diese Daten sollen eine Lokalisierung von eventuellen Quellen im Bereich der Höhle ermöglichen und dabei helfen, die seit 2018 bekannten Ereignisse während Perioden starken Frosts besser zu verstehen. Bei der Auswertung der Daten des lokalen Bad Segeberg Netzes sind im Februar 2021 wieder eine Vielzahl solcher Ereignisse detektiert worden und es wird gezeigt, daß andere detektierte Ereignisse mit wenigen Ausnahmen teleseismischen Erdbeben bzw. anderen nicht-tektonischen Quellen zugeordnet werden können (siehe Kapitel 5).

Das Helgoland-Array ist ein wichtiger Baustein zur Überwachung schwacher seismischer Ereignisse im Bereich der Nordsee. Hierzu wurde in 2020 eine separate Auswertung der Arraydaten initiiert und in 2021 in die Echtzeitauswertung eingebunden, sowie für das gesamte verfügbare Datenarchiv des Arrays ausgewertet. Aufgrund sehr niederschwellig gewählter Parameter ergibt sich eine umfangreiche Anzahl an Detektionen, welche in vielen Fällen mit teleseismischen oder regionalen Ereignissen in Zusammenhang stehen. Für die Sensitivität des Arrays für seismische Ereignisse im Bereich der Nordsee zeigt sich dennoch, daß diese Ereignisse zuverlässig detektierbar sind (siehe Kapitel 6).

Bei der Charakterisierung von Seismizität spielt die Beschreibung des Spannungszustands der Erdkruste eine wichtige Rolle. Dieser lässt sich vor allem aus Bohrlochdaten und Herdmechanismen von Erdbeben ableiten. Für Norddeutschland ist das großräumige Spannungsfeld konsistent abbildbar, allerdings ist die Datengrundlage hierfür sehr variabel, speziell in Schleswig-Holstein. Die Implikationen für SH und das Potential die Datenlage zu verbessern, wird in Kapitel 7 diskutiert.

Im Jahr 2021 haben wir kontinuierlich Analysen zur Datenqualität der Bodenbewegungsgeschwindigkeiten und anderer Signalkomponenten der Persistent Scatterer InSAR Zeitreihen des Bodenbewegungsdienstes Deutschland durchgeführt und weitere Methoden zur lokalen Kalibrierung der relativen Bodenbewegungsgeschwindigkeiten getestet. Diese Arbeiten führen wir 2022 fort und werden sie nach ihrem Abschluss zusammenfassend darstellen. Wir berichten hier über eine umfassende Untersuchung von langsamen jedoch stetigen Bodenbewegungen über dem Kieler Gasspeicher mittels geophysikalischer Modellierung. Diese Modellierungen zeigen einen plausiblen physikalischen Zusammenhang zwischen bekannten Verformungen in den Gasspeichern, die zur Abnahme des Speichervolumens führen, und den zu beobachtenden Bodenabsenkungen über den Speichern.

2 Status Stationsnetz 2021

Das seismologische Stationsnetz umfasst in Schleswig-Holstein derzeit 18 permanente und temporäre Installationen. Die Permanentstationen werden vom IfG in Kooperation mit der BGR in Hannover bzw. dem GFZ Potsdam betrieben, die temporären Stationen im Rahmen von Kooperationen mit dem SGD bzw. der BGR.

2.1 Permanent-Stationen

Seit Aufnahme der Kooperation zwischen SGD und IfG im Jahr 2014 ist das permanente seismologische Netz in Schleswig-Holstein stetig von ehemals zwei auf acht Standorte angewachsen und bildet das Rückgrat der landesweiten seismologischen Überwachung. Hinzu kommen lokale Netze um Bad Segeberg und auf Helgoland (s. Abschnitt 2.2), welche die seismische Überwachung in SH lokal weiter verfeinern (s. auch Weidle et al. [2020]). Das permanente Stationsnetz in Schleswig-Holstein bestand im Jahr 2021 aus den Stationen HLG (Helgoland), BSEG (Bad Segeberg), SKMB (Sankelmark bei Flensburg), KUDEN (Kuden, Dithmarschen), KHUS (Kellenhusen, Ostholstein) und BUESM (Büsum) (Abb. 1). Die Station QBN (Quickborn) registriert ebenfalls kontinuierliche Wellenformdaten, ist aber bisher nicht in Echtzeit ans Datenzentrum angebunden (s. Weidle et al. [2021]).

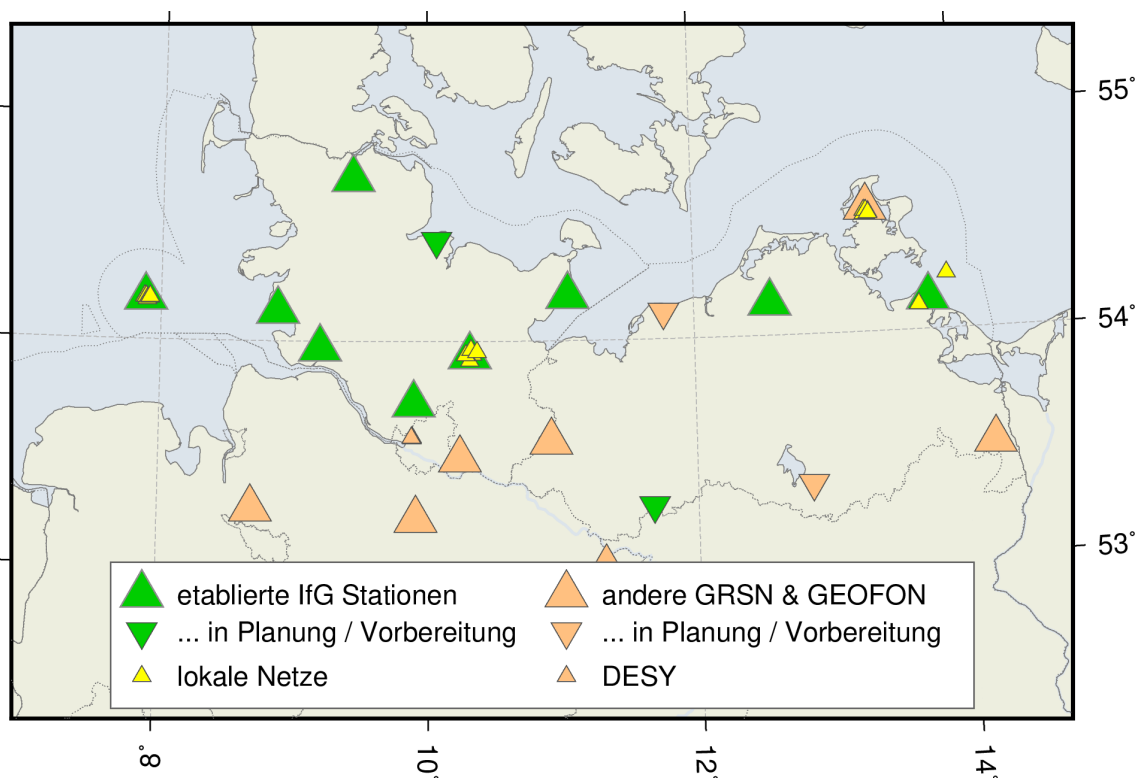


Abbildung 1: Übersicht seismischer Stationen in Norddeutschland. Permanentstationen (Dreiecke) in SH und MV werden vom IfG (grün) und der BGR und GEOFON (GFZ Potsdam) (orange) betrieben, in SH immer in Kooperation mit dem IfG. Lokale Netze des IfG (gelb) werden in Kooperation mit dem SGD (Bad Segeberg Netz) und der BGR (Helgoland) betrieben.

An den Stationen HLG, BSEG, KUDEN, SKMB und BUESM lief der Betrieb das ganze Jahr über störungsfrei, die Datenvollständigkeit an diesen Standorten ist über 99 %. Diese hohe Datenvollständigkeit ist das Ergebnis regelmäßiger Wartung der Stationen, sowohl vor Ort als auch aus der Ferne, und eine zeitnahe Behebung von auftretenden Fehlern, welches die Daten von den Stationen erfasst, zu verzeichnen. An der Station KHUS gab es im Frühjahr und Sommer jeweils mehrwöchige Datenausfälle aufgrund von Problemen mit der Daten- bzw. Stromanbindung. Die Probleme konnten zeitnah behoben werden und die Datenvollständigkeit für 2021 liegt bei ca. 78 %. An der Station QBN ist die Stromversorgung mit Solarpanelen in den Wintermonaten nicht rund um die Uhr gewährleistet, die Datenvollständigkeit liegt hier bei 89 %.

2.1.1 Zukünftiger Standort Dänischer Wohld

Im Zuge des weiteren Ausbaus des Stationsnetzes in SH konnte im Jahr 2021 die Einrichtung der zukünftigen Station auf dem Dänischen Wohld bei Gut Birkenmoor vorangebracht werden.

Seit 2019 führen wir bei Gut Birkenmoor bereits Testmessungen mit einer temporär eingerichteten Station durch. Im Jahr 2020 konnte mit den Eigentümern eine Vereinbarung zur dauerhaften Etablierung einer seismologischen Station getroffen werden. Im Juni 2021 wurde vom SGD ein verrohrtes (DN125) Bohrloch für die zukünftige Station erstellt und ein Leerrohr zum Stromanschluss-Schacht eingebaut (Abb. 2).

Für die Installation wurde vom SGD ein Datenrekorder beschafft, das Breitbandseismometer und zugehörige Elektronik (v.a. Stromversorgung und Datenübertragung) werden von der BGR bereitgestellt. Leider konnte die Installation in 2021 seitens der BGR nicht mehr vorgenommen werden, sie ist aber im Februar 2022, zum Zeitpunkt der Berichterstellung, bereits erfolgt. Die ursprünglich zu Testzwecken installierte Station im Keller des Gutshauses (s. Weidle et al. [2020]) verblieb bis zur finalen Einrichtung der permanenten Station in Betrieb und hatte in 2021 eine Datenvollständigkeit von 99 %. Die Verzögerung der Einrichtung der neuen Station stellte keine signifikante Einschränkung für die Erdbebenüberwachung dar, auch wenn mit der neuen Bohrlochstation eine höhere Datenqualität und Detektionsfähigkeit für schwache seismische Ereignisse zu erwarten ist. Auf die Bedeutung des Standortes Birkenmoor u.a. zur Überwachung der Kieler Bucht wird in Abschnitt 4 am Beispiel von Sprengungsereignissen näher eingegangen.

2.2 Lokale Stationsnetze

Das IfG betreibt in Zusammenarbeit mit der BGR Hannover seit 2017 ein lokales seismisches Netz auf Helgoland (Helgoland-Array, kurz HELGA). Das Netz ergänzt die Permanent-Station HLG in der Erdbebenwarte der CAU Kiel in der James-Krüß-Schule um fünf weitere Breitbandseismometer, drei davon auf Helgoland und zwei weitere auf der Düne. In



Abbildung 2: Dokumentation der Erdarbeiten zur Erstellung des Bohrlochs der zukünftigen Station Birkenmoor.

2021 wurden zwei Wartungen durchgeführt, da es sowohl im Winter 2020/21 als auch im Sommer 2021 zu Ausfällen gekommen ist, welche per Fernwartung nicht zu beheben waren. Seit Ende Oktober 2021 sind keine weiteren Störungen aufgetreten.

In Zusammenarbeit mit dem SGD betreibt das IfG ebenfalls seit 2017 das lokale seismische Netz um Bad Segeberg, zunächst mit drei, seit 2018 mit insgesamt fünf zusätzlichen Breitbandseismometern. Im Zuge von Wartungsarbeiten konnte im Frühjahr 2021 für zwei weitere Stationen (BSEA4, BSEA5) eine Datenübertragung in Echtzeit eingerichtet werden. An beiden Standorten gab es zuvor wiederholt technische Probleme, in Klein-Rönnau (BSEA4) führten diese zu mangelhafter Datenqualität, in Quaal (BSEA5) führte ein Ausfall im ersten Halbjahr 2021 zu einer großen Datenlücke. Durch die Echtzeitübermittlung der Daten können solche Probleme nun frühzeitig erkannt und zeitnah behoben werden.

Pandemiebedingt war es in 2020 nicht möglich, die Daten aller Stationen des Bad Segeberg - Netzes von den Stationen auszulesen und es wurde in Weidle et al. [2021] auf eine detaillierte Auswertung verzichtet. Diese wird im Abschnitt 5 für die Jahre 2020 und 2021 nachgereicht und diskutiert.

2.3 Arbeiten ausserhalb SH

Neben der Betreuung der seismologischen Stationsnetze in SH war das IfG weiterhin am Ausbau des Stationsnetzes in Mecklenburg-Vorpommern (MV) aktiv (Abb. 1). Auf Grundlage der im Jahr 2020 mit dem SGD am Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) in MV geschlossenen Kooperationsvereinbarung konnte das Stationsnetz in MV um zwei permanente Stationen in Marlow (Lkr. Rostock) und Peenemünde (Lkr. Vorpommern-Greifswald) erweitert und die seismologische Überwachung Norddeutschlands damit nachhaltig verbessert werden. Davon profitiert auch die Überwachung Schleswig-Holsteins. Die Kooperationen des IfG mit dem SGD in SH und dem SGD in MV ermöglichen einen effizienten Betrieb der seismologischen Netze in Norddeutschland, eine gemeinsame Auswertung und erlauben somit insgesamt eine effiziente seismologische Überwachung für SH, MV und die angrenzenden Randmeere.

2.4 Fazit

Der Stationsausbau in SH hat seit Aufnahme der Kooperation zwischen SGD und IfG zu einer deutlichen Verbesserung der seismologischen Überwachung in SH beigetragen. Die seitdem eingerichteten Stationen sind technisch konsolidiert, befinden sich in hochwertigem Zustand und sind derzeit nur gering störungsanfällig. Da die meisten Stationen über eine Datenübertragung in Echtzeit verfügen, können technische Störungen bzw. Datenausfälle schnell erkannt und bedarfsgerecht zeitnah behoben werden.

Aktuell sind noch drei Stationen ohne Datenanbindung ans IfG, die Station Quickborn (QBN) und zwei Stationen im lokalen Bad Segeberg Netz (Klein Gladebrügge, BSEA2 und Wege- und Zweckverband, BSEA3). Für Quickborn wird die Einrichtung der Datenübertragung im Jahr 2022 angestrebt. Für die beiden Stationen im Bad Segeberg Netz soll ebenfalls eine Datenanbindung realisiert werden, um eine kontinuierliche Auswertung der Daten zu ermöglichen. Hierzu bedarf es der Aufrüstung der Stationen mit Mobilfunkmodems.

In der gleichmäßigen Abdeckung SHs mit seismischen Stationen existiert im Landesinneren noch eine Lücke im Stationsnetz. Um auch schwache Ereignisse im Landesinneren und Nordwesten von SH zuverlässig detektieren zu können, wird die Einrichtung einer weiteren Station im zentralen Landesinneren, in der Region zwischen Husum und Schleswig vorgeschlagen. Hierzu sollen in 2022 potentielle Standorte identifiziert und Testmessungen für eine zukünftige Station durchgeführt werden.

3 Status Datenzentrum - Erfassung und Auswertung seismologischer Daten

Das 2018 am IfG in Betrieb genommene seiscamp-System (GFZ Potsdam and Gempa GmbH [2008]) wurde im vergangenen Jahr weiter ausgebaut und erfasst mittlerweile Daten von 221 global verteilten Stationen in Echtzeit. Im Laufe des Jahres 2021 wurden 2281 Ereignisse automatisch detektiert und lokalisiert, der weit überwiegende Anteil davon teleseismische Ereignisse mit Magnituden > 4.5 (siehe Abb. 3). Die Erfassung global verteilter Wellenformdaten und die automatische Detektion und Lokalisierung global messbarer Ereignisse ist notwendig, um zwischen lokalen Ereignissen in SH und teleseismischen Ereignissen unterscheiden zu können.

Der bereits etablierte bilaterale Datenaustausch mit dem Datenzentren des dänischen geologischen Dienstes (GEUS, Kopenhagen) konnte im vergangenen Jahr intensiviert werden. Die dänischen Kollegen haben Daten von weiteren Stationen in Dänemark freigegeben und mit nun sechs statt vorher zwei Stationen in Jütland und Seeland hat sich die Datenverfügbarkeit im nördlichen Umfeld von SH deutlich verbessert (Abb. 4). Dies stärkt die Überwachung für das nördliche SH und den südwestlichen Ostseeraum erheblich (siehe auch Kapitel 4). Darüberhinaus konnten Daten von drei seismologischen Stationen (eine davon derzeit außer Betrieb), welche das DESY Synchrotronzentrum in Hamburg-Bahrenfeld betreibt, und eine Station der BGR in Undeloh (Lüneburger Heide, NDS) in die automatische Datenverarbeitung eingebunden werden.

Für den internen Gebrauch wurde ein automatisiertes "Alert"-System eingerichtet, welches bei der automatischen Detektion von Ereignissen eine E-Mail an Mitarbeiter des IfG versendet. Diese E-Mail wird für alle Ereignisse global mit Magnituden grösser 6, für regionale Ereignisse bis zu 27° Epizentraldistanz und Magnituden grösser 5 und alle Ereignisse in einer Epizentraldistanz kleiner gleich 11° ausgelöst. Bei Ereignissen im Umkreis von weniger als 8° Epizentraldistanz, verschickt das System auch SMS-Textnachrichten. Im Jahr 2021 wurden so etwa 200 "alert"-emails und etwa 25 SMS Nachrichten versendet, u.a. für die Ereignisse in Niedersachsen, Groningen (NL) und der südlichen Nordsee (s. Kapitel 4).

Trotz der weitgehend automatisierten Erfassung und Erstauswertung der seismologischen Daten ist die manuelle Durchsicht von Wellenformen an den permanenten Stationen in SH weiterhin unabdinglich, um die Vollständigkeit beobachtbarer Ereignisse auch bei kleinen Magnituden sicherzustellen. In der tagesaktuellen Auswertung werden hierzu sogenannte 'helicorder'-Darstellungen genutzt, die eine schnelle Übersicht über die Wellenformen eines Tages liefern. Mit Hilfe von Detektionsmarkern können potentielle Ereignisse leicht erkannt und nachbearbeitet werden. Abb. 5 zeigt ein Beispiel für den 16.11.2021. In der Darstellung der Wellenformen (Abb. 5a) fällt zunächst ein Tag-Nacht-Rhythmus auf, mit einer Vielzahl von transienten Signalen in den Tagstunden. Besonders auffällig ist ein regelmäßiges Signal

etwa zu den Minuten 5, 25, 35 und 55 an der Station BSEG, welches mit dem Busfahrplan an der Nordseite des Kalkbergs korreliert. Ähnliche, wiederkehrende Signale sind auch an den Stationen KHUS und SKMB bekannt. Visuell auffällig ist auch ein regionales Erdbeben bei Groningen (NL) gegen 0:47 UTC, welches an allen Stationen deutlich erkennbar ist. Mit Hilfe des tagesaktuellen EMSC-Katalogs (EMSC [2021]) lässt sich dieses Ereignis unmittelbar zuordnen.

Um 17:12 Uhr am selben Tag gab es eine Sprengung der dänischen Marine in der Kieler Bucht südlich von Langeland (roter Kreis in Abb. 5, s. Kapitel 4). Diese ist in den Wellenformen nur schwer zu erkennen, kann aber in einer Darstellung der Kurtosis der Wellenformen (Abb. 5b) gut identifiziert werden. Die Kurtosis ist eine statistische Größe einer Datenreihe und kann hier als "Steilheit" der Wellenform verstanden werden. Impulsive Einsätze in der Wellenform, wie sie bspw. bei P- oder S-Wellen-Ankünften auftreten, haben eine hohe Kurtosis, emergente Signale, z.B. ein vorbeifahrendes Fahrzeug dagegen eher eine niedrige Kurtosis. Die Kurtosis ist daher gut geeignet impulsive Signale in den aufgezeichneten Wellenformen zu detektieren.

In der Darstellung der Kurtosis werden zudem Detektionen an den Stationen in SH mittels STA/LTA Detektor (blaue Marker) und seit Sommer 2021 auch regelmäßig Detektionen am Helgoland-Array markiert (rote Marker). Diese Detektionen können gezielt manuell nachgeprüft und ausgewertet werden. Die Einstellungen beider Detektionsalgorithmen sind sehr niederschwellig gewählt, weshalb sich ein Großteil der Detektionen als Fehldetektionen erweisen. Dieses Vorgehen sichert, bei vertretbarem Aufwand der Nachbearbeitung, daß auch kleinste Ereignisse nicht unerkannt bleiben.

Neben der Auswertung der eigenen, erhobenen Daten, werden Detektionen regelmäßig mit veröffentlichten Ereignislisten aus Niedersachsen, Dänemark und Schweden abgeglichen, um die Vollständigkeit des Ereigniskatalogs für SH sicherzustellen.

CAU global detections 2021

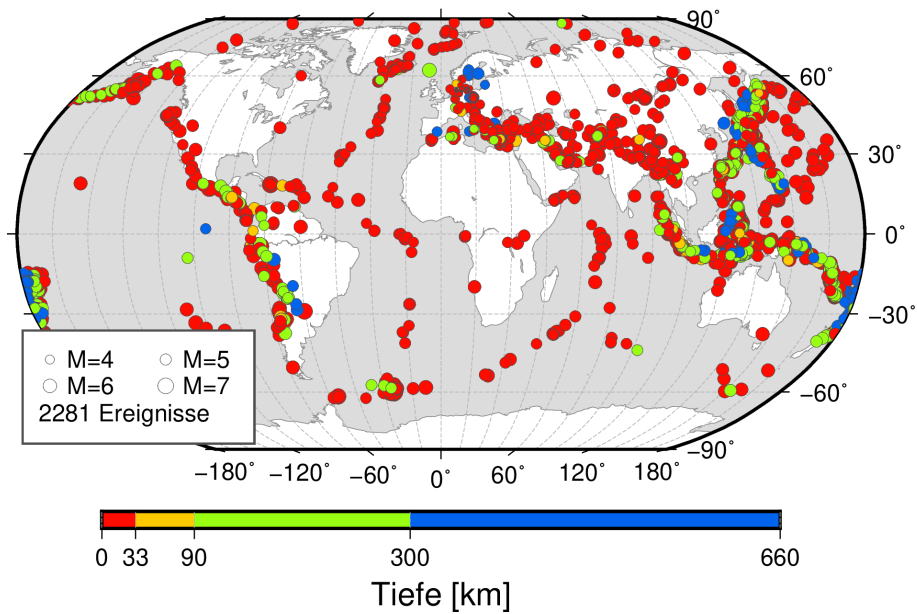


Abbildung 3: Verteilung aller in 2020 am Datenzentrum des IfG detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5 , welche vollautomatisch vom System prozessiert wurden.

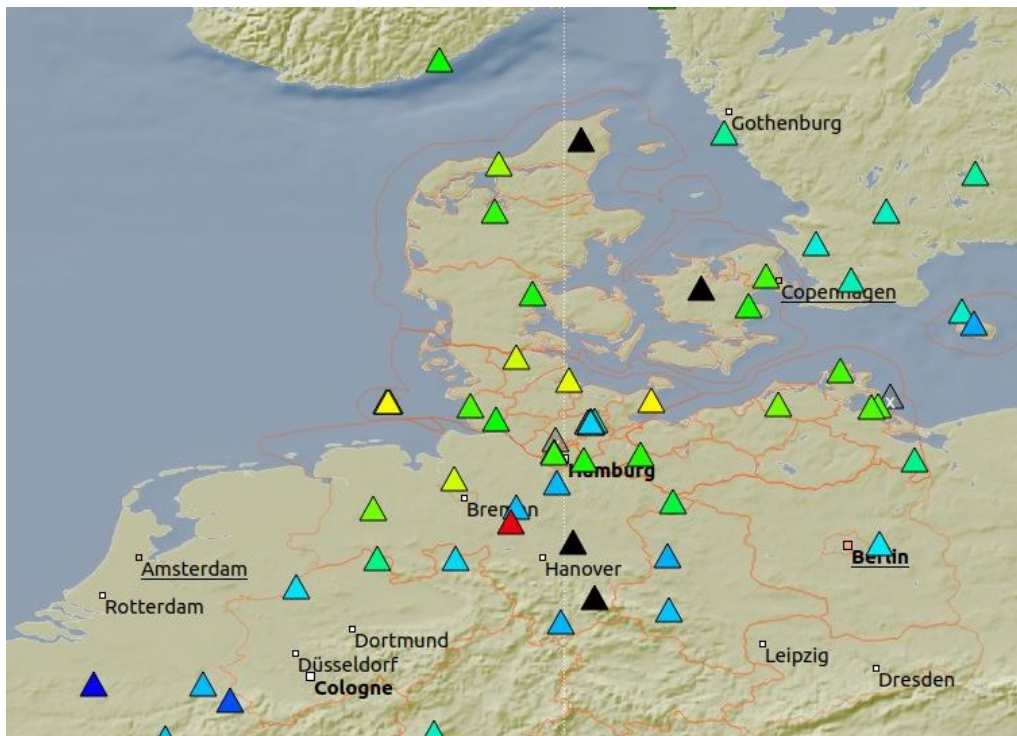
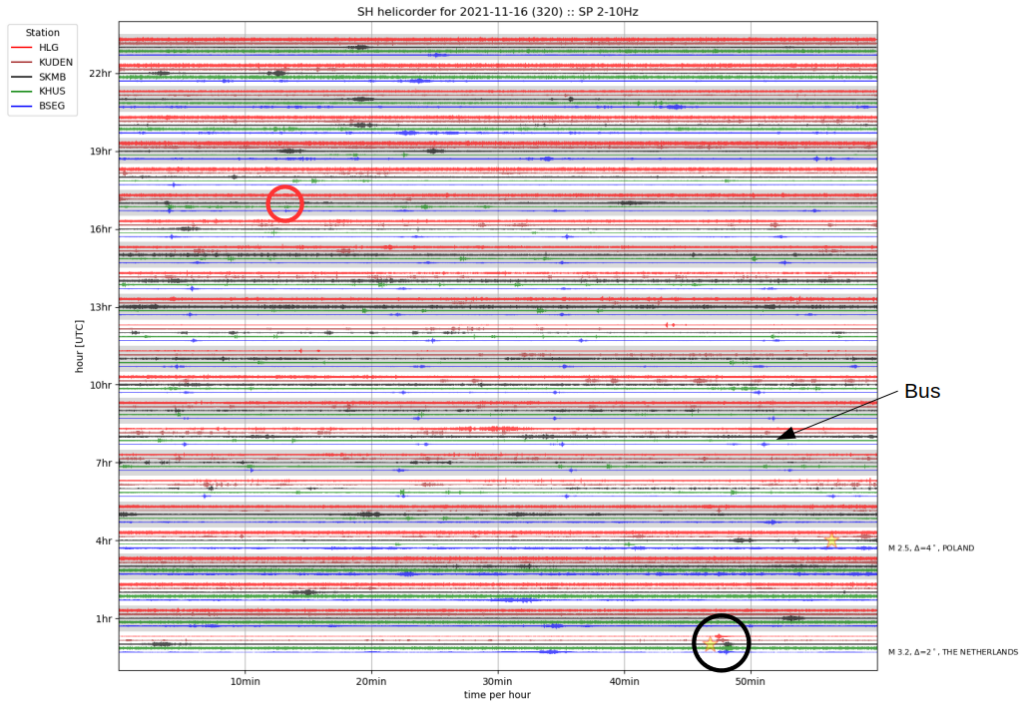
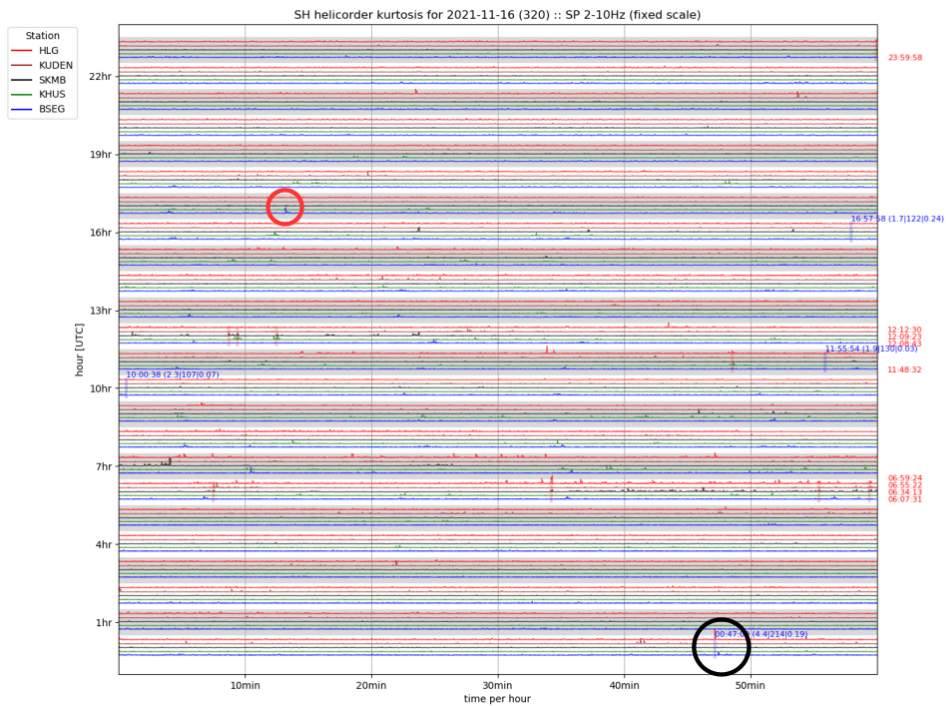


Abbildung 4: Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen in SH und Umgebung.



(a) Wellenformen an den Stationen HLG, KUDEN, SKMB, KHUS und BSEG, 2-8 Hz bandpass-gefiltert. Herzzeit von "bekannten" Erdbeben nach EMSC [2021].



(b) Kurtosis der Wellenformen. Blaue Markierungen sind Detektionen mittels STA/LTA Detektor an den Stationen in SH, rote Markierungen Detektionen am Helgoland-Array.

Abbildung 5: Helicorder Darstellung zur manuellen Durchsicht von täglichen Wellenformen. Markiert ist ein regionales Erdbeben bei Groningen (NL, schwarzer Kreis) und eine Sprengung in der Kieler Bucht (roter Kreis). Regelmäßige Signale an der Station BSEG etwa zu den Minuten 5, 25, 35 und 55 korrelieren mit dem Busfahrplan an der Nordseite des Kalkbergs.

4 Ereignisübersicht 2021

4.1 Überregionale Seismizität

Zur Betrachtung der überregionalen Seismizität wird der Erdbebenkatalog des European-Mediterranean Seismological Centers EMSC [2021] herangezogen, welcher Ereignisse von verschiedenen europäischen Agenturen sammelt und zu einem konsistenten Erdbebenkatalog harmonisiert (siehe auch Weidle et al. [2019]).

In der südlichen Nordsee gab es am 20. August 2021 ein Erdbeben der Magnitude 3.5. Solche Ereignisse sind in der Nordsee nicht unüblich (s. Weidle et al. [2020]), werden aber nur selten von der Bevölkerung an Land wahrgenommen. Sie treten unweit des Grenzbereichs der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) auf (s. Abb. 6). Im Bereich der Gasfelder um Groningen (NL) kommt es immer wieder zu seismischen Ereignissen mit Magnituden bis etwa 3, in 2021 sieben Ereignisse, welche auf Helgoland und an den Stationen Quickborn und Bad Segeberg meist gut messbar waren.

Das Ereignis vom 13. September 2021 im Landkreis Verden (NDS) mit Magnitude 2.9 steht vermutlich in Zusammenhang mit der Erdgasförderung in der Region und trat unweit der beiden Ereignisse mit Magnitude 3 vom 20. November 2019 bei Verden auf (s. Weidle et al. [2020]).

Herdzeit (UTC)	Länge (Ost)	Breite (Nord)	Tiefe (km)	Magnitude
2021-01-12T18:48:00.000000Z	1.85	53.06	10	2.3
2021-01-17T03:04:43.300000Z	11.05	58.70	15	2.4
2021-04-28T19:46:26.000000Z	6.68	53.36	3	2.3
2021-06-11T23:29:27.000000Z	6.76	53.34	3	2.1
2021-06-19T01:03:55.000000Z	6.72	53.32	3	2.3
2021-07-01T15:38:14.000000Z	6.81	53.30	3	2.2
2021-07-21T20:49:28.500000Z	8.81	52.84	4	2.0
2021-08-20T20:36:19.700000Z	4.52	54.73	5	3.5
2021-09-13T01:22:52.200000Z	9.23	53.09	8	2.9
2021-10-04T02:59:08.000000Z	6.75	53.35	3	2.5
2021-10-04T20:47:42.000000Z	6.76	53.36	3	2.3
2021-11-16T00:46:48.000000Z	6.76	53.31	3	3.2

Tabelle 1: Erdbeben im Jahr 2021 in der Umgebung von Schleswig-Holstein, Quelle: EMSC [2021].

4.2 Seismische Ereignisse in SH

Seit 1. Juni 2019 werden am IfG systematisch Wellenformen aus SH und benachbarter Stationen nach seismischen Ereignissen ausgewertet. Neben der automatischen Detektion im Seiscomp-System (siehe Weidle et al. [2019]) erfolgt eine tägliche, manuelle Durchsicht der Wellenformen nach potentiellen Ereignissen. Dies ist nach wie vor unabdingbar, da die Stationsdichte für eine zuverlässige automatische Detektion schwacher Ereignisse mit Magnituden unter 2 bei weitem nicht ausreicht. Abbildung 7 fasst den Katalog des Jahres

EMSC Katalog 2021.01.01 - 2021.12.31

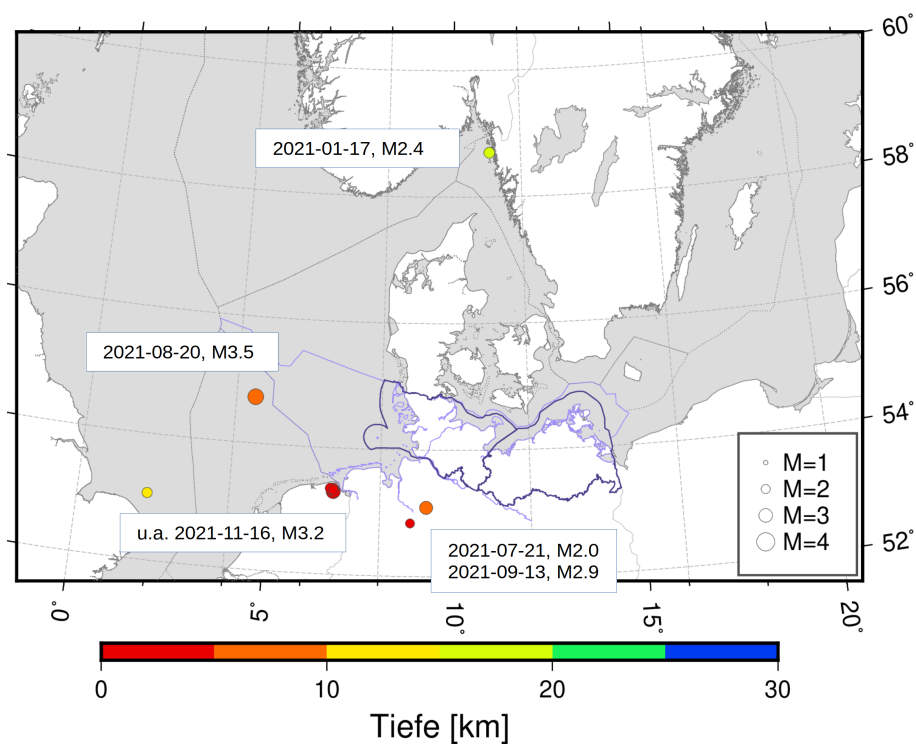


Abbildung 6: Ereignisse um Schleswig-Holstein im Jahr 2021, Quelle: EMSC [2021]. Die Landesgrenzen von SH und MV (dunkelblau) sind ebenso dargestellt, wie die AWZ Grenzen in der Nord- und Ostsee (blau) nach Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (s. Wikipedia [2021]).

CAU Bulletin 2021 categorical

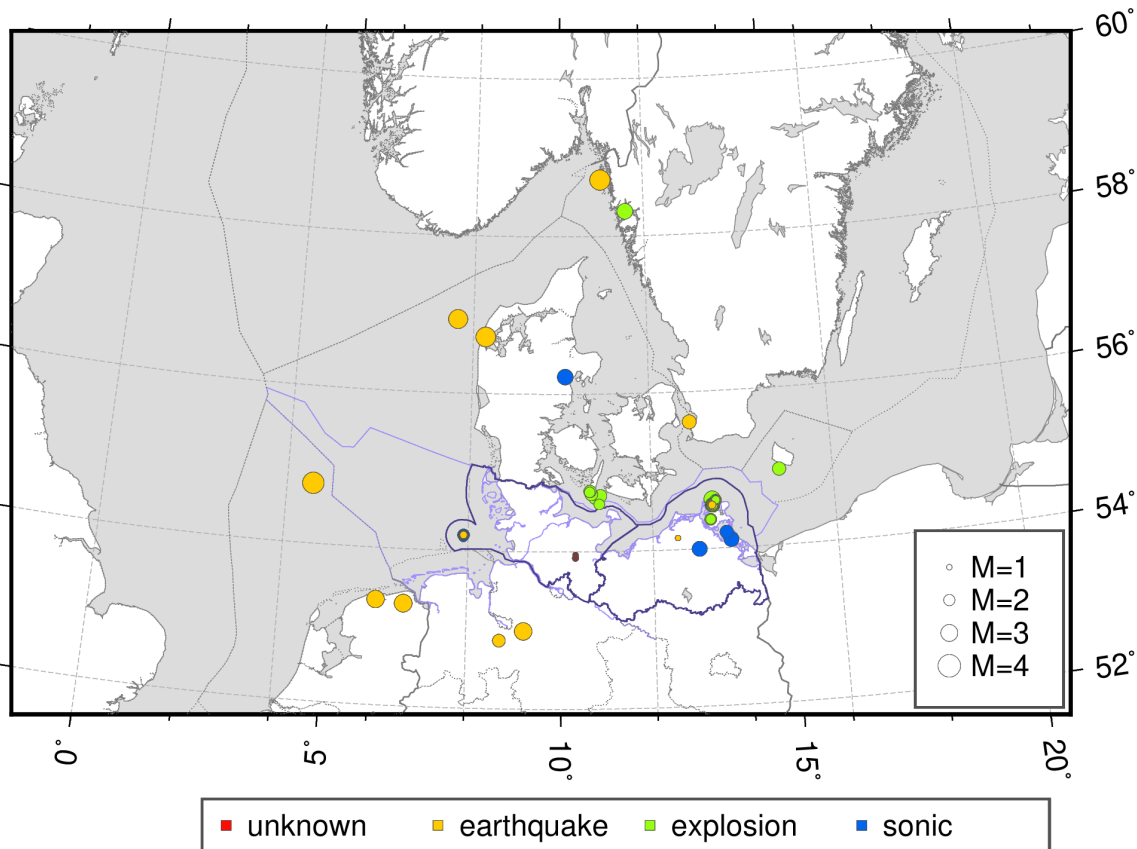


Abbildung 7: Übersichtskarte der in 2020 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.

2021 mit 102 detektierten und manuell ausgewerteten seismischen Ereignissen zusammen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in Tabelle 2 alle tektonischen und ausgewählte nicht-tektonische Ereignisse gelistet. Der vollständige Katalog für das Jahr 2021 befindet sich im Anhang A. Generell ist anzumerken, dass die Ereignistiefen in den meisten Fällen bei der Lokalisierung fixiert wurden, typischerweise auf eine Tiefe von 0 bzw. 10 km.

Am 25.12.2021 wurde gegen 0:41 Uhr Ortszeit (24.12.2021 23:41 UTC, s. Abb. 8) auf den Stationen des Helgoland-Arrays ein Ereignis registriert, dessen Ursprung nicht eindeutig zuzuordnen ist und eine tektonische Quelle nicht ausgeschlossen werden kann. Ein Ersteinsatz etwa bei Sekunde 38 an der Station HLGA1 wird von einer zweiten Phase ca. 1.5s später gefolgt (Abb. 8a). Im Gegensatz zu häufig beobachtbaren akustischen Ereignissen, welche sich mit etwa Schallgeschwindigkeit über die Stationen des HELGA-Arrays ausbreiten, beträgt die Differenzlaufzeit der zweiten Phase von Station HLGA1 zu den Stationen HLG und HLGA2 nur 0.8s. Beide Stationen sind 750m von HLGA1 entfernt, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt bei knapp 1 km/s. Interpretiert man die beiden Phasen als P- und S-Welleneinsatz ergäbe sich eine Epizentralentfernung von etwa 10 km. Eine Auswertung der Phasen mittels einer Polarisationsanalyse (Abb. 8b) zeigt jedoch einen nahezu

horizontalen Einfall beider Phasen mit vergleichbaren Polarisationsparametern und einem Backazimuth (Richtung zur Quelle) von etwa 60-80°. Für eine S-Welle würde man eine 90° verdrehte Polarisationsrichtung im Vergleich zur P-Welle erwarten. Eine Betrachtung der Partikelbewegung lässt ebenfalls keinen eindeutigen Schluß zu. Vor allem bei der zweiten Phase könnte es sich ebenso um eine Oberflächenwelle handeln, was auf ein oberflächliches Ereignis schließen würde. Da das Ereignis an den Stationen am Hafen und auf der Düne in den Wellenformen nicht sehr deutlich abgebildet ist, kann ein lokales Ereignis im Norden der Insel, z.B. ein Steinschlag an der Nordküste, nicht ausgeschlossen werden.

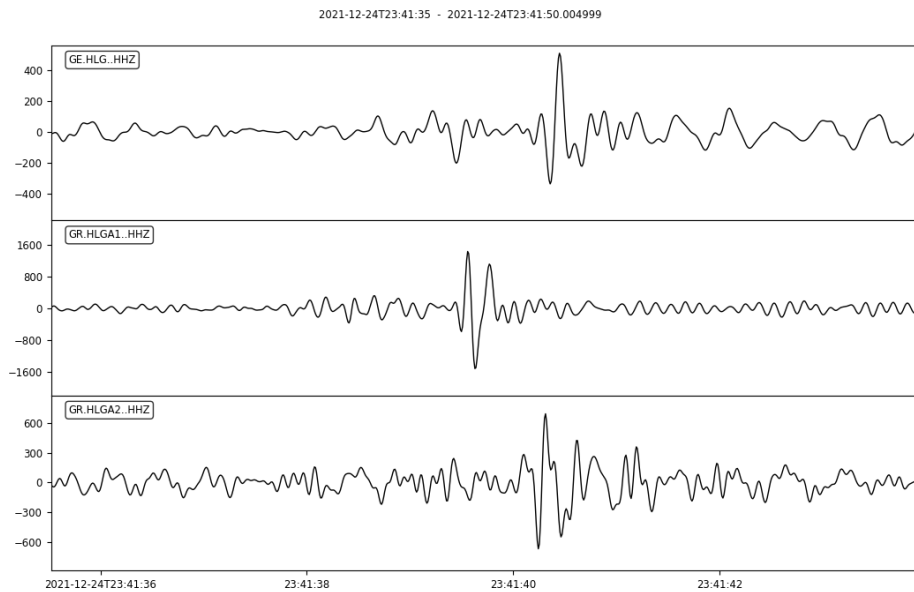
Weitere manuell bearbeitete Ereignisse um Helgoland sind anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit über das Helgoland Array als akustisch einzustufen, mögliche Quellen hierfür sind unbekannt. Ein weiteres, potentiell tektonisches Ereignis wurde im Norden Mecklenburg-Vorpommerns am 27.12.2021 um 0:33 Uhr (Ortszeit, 26.12.2021 23:33 UTC, s. Tabelle 2) registriert. Es wurde allerdings nur an der Station Marlow aufgezeichnet und hatte eine Magnitude von etwa 1. Im Gegensatz zu früheren Jahren wurden, wie in 2020, auch in 2021 keine regelmässigen Sprengereignisse in der Eckernförder Bucht detektiert. Eine Abfrage bei der BGR nach deren Ereigniskatalog ergab keine Ereignisse für das Jahr 2021.

4.3 Andere relevante Ereignisse

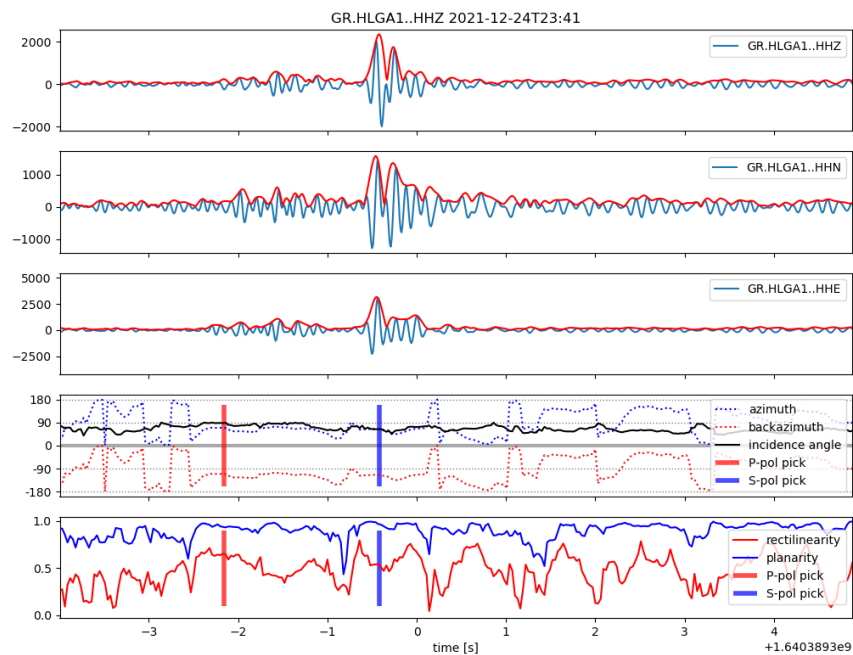
Der Katalog der seismischen Ereignisse 2021 des IfG weicht vom EMSC Katalog durch eine Vielzahl nicht-tektonischer, v.a. Sprengereignisse in der südwestlichen Ostsee und in SH und MV ab.

Am 15. und 16. November 2021 führte die dänische Marine südlich der Insel Langeland in der Kieler Bucht Sprengungen durch. Über den geologischen Dienst Dänemarks (GEUS) konnten wir die von der dänischen Marine berichteten Lokationen der Sprengungen mit den am IfG bestimmten seismologischen Lokalisierungen abgleichen. Von sechs Sprengungen konnten fünf detektiert und bis auf 5 km genau lokalisiert werden. Für zwei Ereignisse lag die Lokalisierungsgenauigkeit bei 10 bzw. 12 km. Für die Ereignisse wurden Magnituden von 2 bis 2.4 bestimmt, ein typischer Wert für Sprengungereignisse im marinen Bereich. Vor allem die zukünftige permanente Station Birkenmoor im Dänischen Wohld trug in diesen Fällen zu einer präzisen Lokalisierung bei. Diese Station wird bisher von der BGR nicht zu Lokalisierungszwecken genutzt und die Ereignisse sind daher nicht in deren Katalog gelistet.

Am Bad Segeberg Netz wurden sowohl im Februar als auch im Dezember 2021 eine Reihe seismischer Ereignisse detektiert, welche mit Perioden starken Frosts in Zusammenhang zu bringen sind. Dieses Phänomen ist seit 2018 bekannt (siehe Weidle et al. [2020]) und wird im Rahmen der Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes für das Jahr 2021 im Abschnitt 5 näher ausgeführt.



(a) Vertikalkomponente der Wellenform an drei Stationen, gefiltert 2-8 Hz. Von oben nach unten: Station HLG, HLGA1, HLGA2.



(b) Polarisationsanalyse der Wellenform an der Station HLGA1. Von oben nach unten: Z-, Nord- und Ost-Komponente, Polarisationsparameter, Geradlinigkeit und Ebenheit der Polarisationsparameter.

Abbildung 8: Das Ereignis vom 25.12.2021, 0:41 Uhr Ortszeit (UTC+1) aufgezeichnet auf Helgoland.

Tabelle 2: Tektonische und selektierte nicht-tektonische seismische Ereignisse im Jahr 2021 in Schleswig-Holstein und Umgebung. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2021-01-13 00:13:08	56.7203	8.2828	56.9	3.5	Denmark	earthquake
2021-01-16 19:23:31	56.9381	7.6323	74.4	3.4	North Sea	earthquake
2021-01-17 03:04:45	58.7176	10.9689	7.2	3.6	Sweden	earthquake
2021-02-01 15:07:24	58.3147	11.5592	0.0	2.8	Sweden	explosion
2021-02-11 09:22:23	54.1061	13.6928	0.0	2.7	Nordwestmecklenburg	atmospheric event
2021-02-25 17:45:16	54.2000	13.6000	0.0	2.4	Nordwestmecklenburg	atmospheric event
2021-03-10 19:15:13	54.7544	10.6415	0.0	1.9	Danmark	explosion
2021-04-10 00:17:42	53.9315	10.3195	0.0	0.2	Northern Friesland	rock burst
2021-04-14 16:35:15	54.9600	14.8240	0.0	2.4	Greater Bornholm	explosion
2021-05-17 09:20:35	55.6165	12.8909	2.1	2.5	Denmark	earthquake
2021-06-19 01:03:52	53.3412	6.0709	5.0	3.1	The Netherlands	earthquake
2021-08-07 22:30:59	54.5500	13.3100	0.0	1.4	Vorpommern-Rügen	earthquake
2021-08-20 20:36:21	54.7624	4.5700	10.5	3.8	North Sea	earthquake
2021-09-13 01:22:54	52.9890	9.2114	15.3	3.1	Niedersachsen	earthquake
2021-11-15 10:00:14	54.7074	10.8746	5.7	2.3	Germany	explosion
2021-11-15 11:51:04	54.7669	10.6472	1.1	2.2	Danmark	explosion
2021-11-15 13:15:16	54.7285	10.6776	8.1	2.3	Danmark	explosion
2021-11-15 15:36:46	54.6855	10.7638	8.2	2.4	Germany	explosion
2021-11-16 00:46:48	53.3055	6.6633	5.0	3.2	The Netherlands	earthquake
2021-11-16 17:12:58	54.6011	10.8479	11.0	1.9	Germany	explosion
2021-12-24 23:41:36	54.2000	7.9000	10.0	1.3	Helgoland Umgebung	earthquake
2021-12-26 23:33:40	54.1474	12.5402	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	earthquake

5 Das lokale Netz um Bad Segeberg

Das lokale Bad Segeberg Netz wurde 2017 installiert, um seismische Ereignisse in der Umgebung des Segeberger Salzstocks besser detektieren und lokalisieren zu können. Dies ist v.a. vor dem Hintergrund des Ereignisses vom 29. Oktober 1997 - dem Erdbeben bei Quaal - zu sehen (s. Meier and Omlin [2016] für eine ausführliche Auswertung dieses Ereignisses). Das seismologische Stationsnetz umfasst sechs Seismometer (Abb. 9) und die Empfindlichkeit des Netzes für sehr schwache Ereignisse mit Magnituden im Bereich -1 bis 0 konnte bereits nachgewiesen werden (Weidle et al. [2019]).

5.1 Temporäres Experiment in der Kalkberghöhle

Im Zuge der seit Juni 2019 routinemässigen, manuellen täglichen Auswertung von seismischen Wellenformen wurden in unregelmässigen Abständen Ereignisse an der Station BSEG im Kalkberg identifiziert, welche eine qualitativ sehr hohe Ähnlichkeit zueinander und auch zu der Wellenform des 1997er Ereignisses aufweisen (Weidle et al. [2021]). Neben tektonischen Quellen sind auch Verbrüche im Bereich der Höhle eine erwartbare Quelle für seismische Signale. Da diese Ereignisse typischerweise nur an der Station BSEG im Kalkberg beobachtbar sind, konnte deren Ursprung bisher nicht nachgewiesen werden. Zur Verbesserung der Datengrundlage wurden Ende September 2021 fünf zusätzliche Geophone (4.5 Hz Eigenfrequenz) in der Kalkberghöhle installiert, um ggf. auftretende Ereignisse im Bereich der Höhle besser verorten und charakterisieren zu können (Abb. 10). Die Messungen laufen bis Ende März 2022. Die Wahl des Winterhalbjahres für das Experiment begründet sich zum einen darin, daß die Höhle in dieser Zeit für Besucher geschlossen ist, zum anderen, daß in der Vergangenheit bereits Ereignisse aufgetreten sind, welche mit vorübergehenden Perioden starken Frosts zusammenhängen (Weidle et al. [2020]). Diese Ereignisse konnten bisher im Kalkberg und an der Station Stipsdorf (BSEA1) nachgewiesen werden, eine genauere Lokalisierung und Ursachenbestimmung war aber bisher nicht möglich. Mitte Dezember 2021 war es möglich, die Datenaufzeichnung in der Höhle zu verifizieren und die ersten Daten zu sichern. Eine umfassende Auswertung erfolgt nach Abschluß des Experiments.

5.2 Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes

Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen konnten in 2020 die Daten von den Stationen des Bad Segeberg Netzes nicht ausgelesen werden, weshalb im Vorjahresbericht auf eine dezidierte Auswertung dieser Daten verzichtet wurde. In 2021 konnten die Stationen im Sommer und auch noch einmal zum Jahresende besucht und Daten ausgelesen werden. Die folgende Auswertung umfasst demnach den Zeitraum Januar 2020 bis einschließlich September 2021.

Die Daten des lokalen Netzes wurden mit einem STA/LTA Detektionsalgorithmus prozessiert (s. Weidle et al. [2019]). Anschließend wurden die Detektionen zunächst statistisch

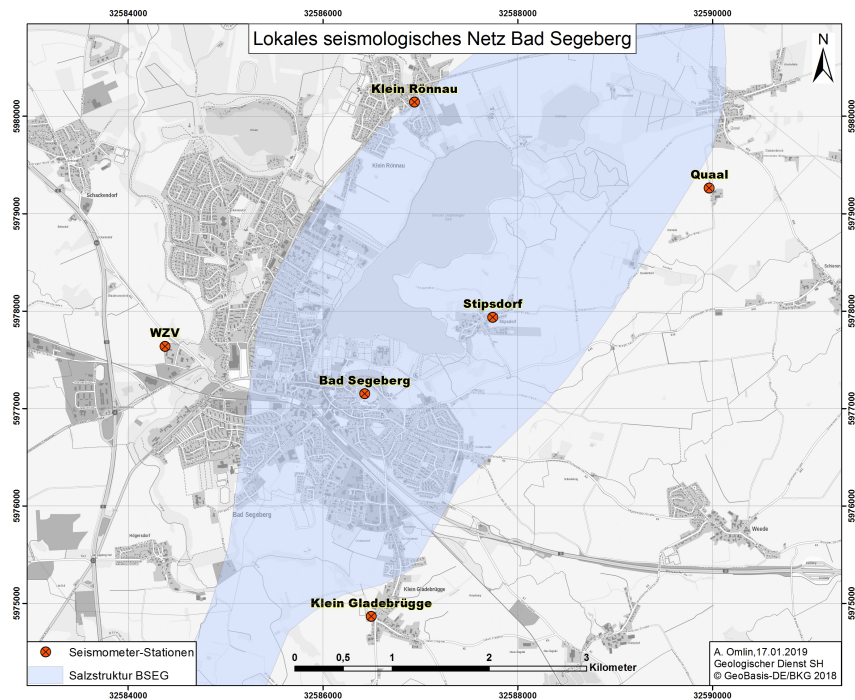


Abbildung 9: Status Bad Segeberg Netz 2021.

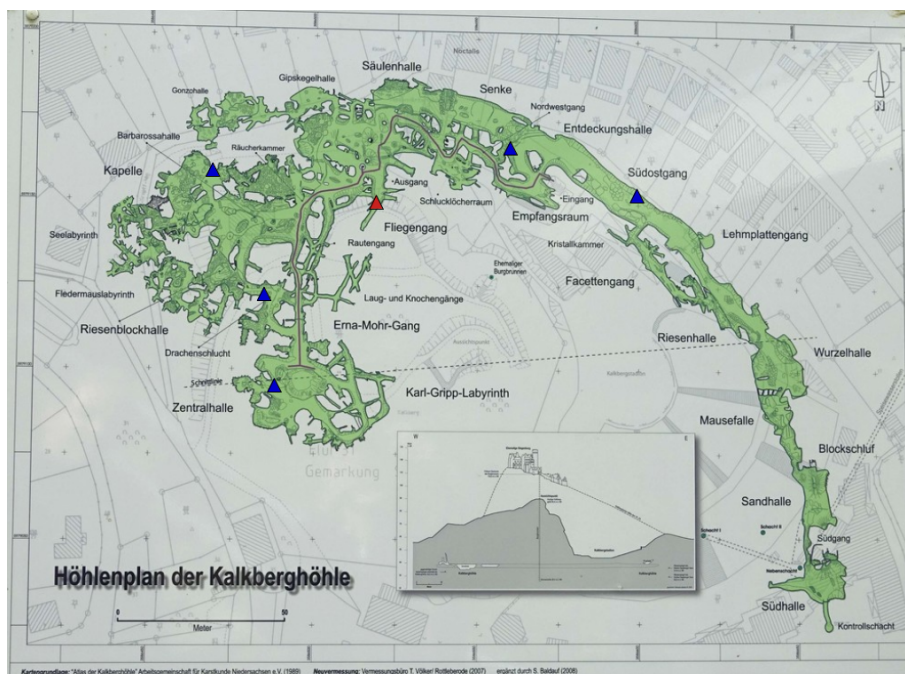


Abbildung 10: Übersichtskarte des Segeberger Kalkberg. (Schaufel am Ausgang der Höhle (Foto: D. Schulte-Kortnack). Markiert sind die Position des permanenten Seismometers im Fliegengang (rot) und die im Winterhalbjahr 2021/22 installierten zusätzlichen Geofone (blau).

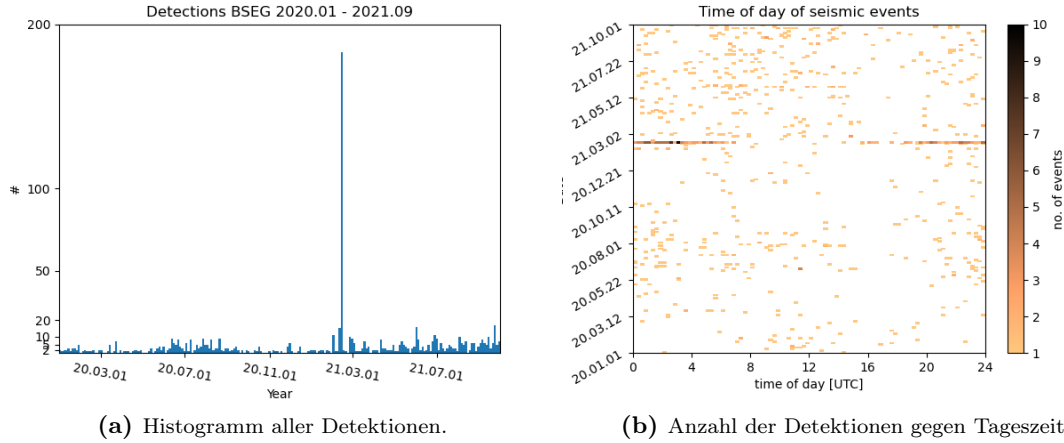


Abbildung 11: Detektionen am lokalen Bad Segeberg Netz. Histogramme mit Schrittweite 3 Tage.

ausgewertet (Abb. 11). Insgesamt wurden von Januar 2020 bis September 2021 809 Ereignisse detektiert. Der zeitliche Verlauf zeigt ein deutliches Maximum an Ereignissen in der ersten Februarhälfte 2021 (Abb. 11a). Vom 10.-15. Februar 2021 traten innerhalb weniger Tage etwa 200 Ereignisse auf, wovon etwa 25 bereits in der manuellen Auswertung (Kapitel 4) identifiziert wurden. Die Ereignisse treten vor allem in den Nachtstunden auf (Abb. 11b). Dieses Muster entspricht den bereits 2018 aufgetretenen Ereignisschwärmen, welche eindeutig mit Perioden starken Frostes korrelierten (Weidle et al. [2019], Weidle et al. [2020]). Auch im o.g. Zeitraum Mitte Februar 2021 gab es starken Nachtfrost bis zu -7°C (Ortmann [2022]).

Nach dem Ereignisschwarm 2018 wurde das Bad Segeberg Netz um die Standorte Klein-Rönnau und Quaal erweitert, sowie die Station am Wege- und Zweckverband (WZV) durch eine Bohrlochinstallation ersetzt. Während die Ereignisse mit Frostbezug im Februar 2018 nur an den Stationen im Kalkberg und Stipsdorf aufgezeichnet werden konnten, sind viele der im Februar 2021 aufgezeichneten Ereignisse auch in Klein-Rönnau an der Nordseite des Großen Segeberger Sees und vereinzelt sogar am WZV in den Wellenformen erkennbar (Abb. 12). Dies legt eine Quellregion im Bereich des Großen Segeberger Sees nahe. Typische Wellenformen dieser Ereignisse sind etwa 5 – 7 s lang, haben einen schwach impulsiven bis emergenten Einsatz und bilden meist einen "einfachen" Wellenzug. Zwei Phaseneinsätze, wie man sie bei tektonischen Ereignissen für den P- und S-Welleneinsatz erwartet, sind im Allgemeinen nicht zu erkennen (s. Weidle et al. [2019], Weidle et al. [2020]). Dieser Wellenformcharakter deutet daher weniger auf eine (Scher-)Bruchquelle als eine Quelle mit volumetrischer Größenänderung hin. Mit Daten aus dem laufenden Experiment in der Kalkberghöhle können solche Ereignisse möglicherweise weiter eingegrenzt werden. In der routinemäßigen Auswertung sind bereits einige Ereignisse um die Weihnachtstage 2021 aufgefallen, welche mit einer Frostperiode mit Temperaturen bis zu -9°C zusammenfallen.

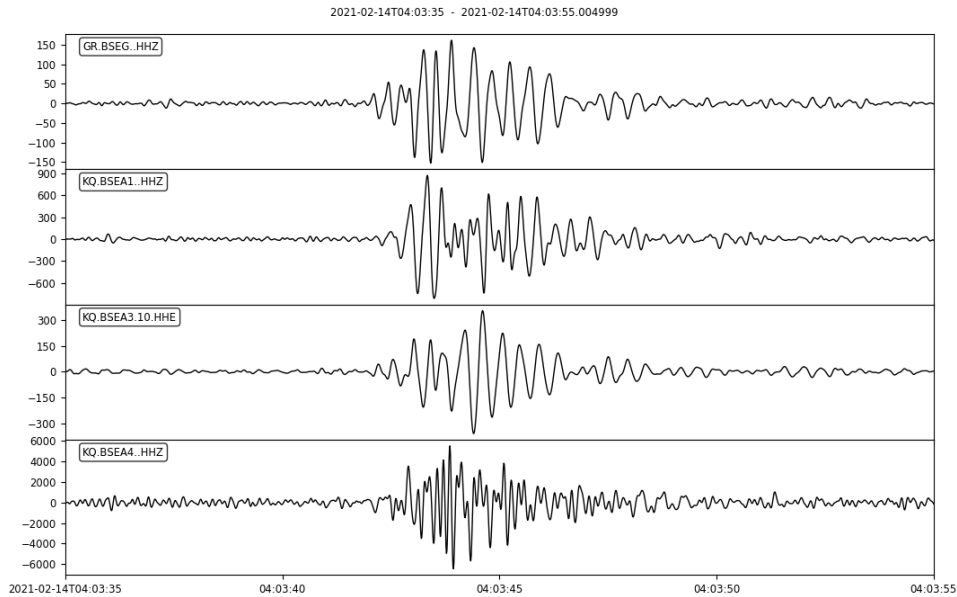


Abbildung 12: Wellenform eines Ereignisses am 14.2.2021 an den Stationen Kalkberg, Stipsdorf, WZV und Klein-Rönnau. Dargestellt ist die Vertikalkomponente, an der Station WZV (BSEA3) die horizontale Ost-Komponente.

Von den insgesamt 809 Detektionen in den betrachteten 21 Monaten wurden 716 Detektionen an nur zwei Stationen getriggert, 80 an drei, 9 an vier, 3 an fünf und eine Detektion an allen sechs Standorten. Hierbei handelt es sich um das Magnitude 2.9 Erdbeben bei Verden (NDS). An mindestens vier Stationen getriggerte Detektionen sind vorwiegend teleseismische Erdbeben, Gewitter und auch zwei der signifikantesten Ereignisse mit Frostbezug. Eine Detektion konnte nicht zugeordnet werden und wird als Fehldetektion klassifiziert. Von den Ereignissen, welche an drei Stationen getriggert wurden, finden sich 43 Ereignisse mit Frostbezug, einzelne regionale und teleseismische Erdbeben, Gewitter und rund 20 Fehldetektionen.

Von den 716 Detektionen an zwei Stationen sind 229 im Kalkberg (BSEG) getriggert worden, hiervon 148 mit Bezug zu den frostinduzierten Ereignissen, welche mindestens auch an der Station BSEA1 in Stipsdorf getriggert wurden. Die Station BSEA1 fällt in der Auswertung dahingehend auf, daß insgesamt 654 Detektionen an der Station getriggert wurden. Im Vergleich hierzu waren es insgesamt rund 300 an der Station BSEG im Kalkberg, je rund 200 an den Stationen BSEA2,3 und 4 und 85 an der Station BSEA5 in Quaal. Letztere war über den Winter 2020/21 längere Zeit ausgefallen.

Die hohe Anzahl an Triggerungen an der Station BSEA1 ist dem Standort direkt an der Dorfstraße in Stipsdorf geschuldet. Zudem befinden sich in dem Gebäude Pumpen für die Wasserversorgung der Gemeinde, welche in unregelmäßigen Abständen transiente Störungen erzeugen. Da der Detektor bereits bei Triggern auf 4 Kanälen (mind. 2 Stationen) eine Detektion auslöst, bedarf es für eine Detektion häufig nur eines zeitnahen transienten Signals an einer anderen Station (z.B. durch ein vorbeifahrendes Fahrzeug). Die vielen

Fehlalarme sind ein Resultat der sehr empfindlichen Parameterwahl für die Detektionen. Anhand der o.g. Ereignisse mit Frostbezug ist diese Parameterwahl aber gerechtfertigt und mit im Mittel 1-2 Detektionen pro Tag über 21 Monate auch für eine alltägliche Auswertung prinzipiell praktikabel.

Fazit Die Auswertung für das Bad Segeberg Netz für den Zeitraum Januar 2020 bis einschließlich September 2021 ergab rund 800 Detektionen, wovon sich ein Viertel zeitlich auf eine Periode starken Frosts im Februar 2021 konzentriert. Dieses schwarmartige Auftreten von Ereignissen in Frostperioden wurde bereits 2018 beobachtet (Weidle et al. [2020]) und kann durch zusätzliche Beobachtung der Ereignisse an den Stationen in Klein-Rönnau und am WZV auf den Bereich des Großen Segeberger Sees eingegrenzt werden.

Ereignisse, welche an mindestens drei Stationen des lokalen Netzes detektiert werden, sind überwiegend regionale und teleseismische Erdbeben, Donnerschläge während Gewittern und in nur in wenigen Ausnahmefällen Fehldetektionen durch zeitgleiche transiente Signale an verschiedenen Standorten. Hervorzuheben ist die Detektion des Magnitude 2.9 Ereignisses bei Verden (NDS), welches an allen Stationen getriggert wurde. Zusammen mit den vielen lokalen Ereignissen mit Frostbezug unterstreicht die Auswertung, daß das lokale Netz sehr gut geeignet ist, um schwache Ereignisse in der Umgebung von Bad Segeberg zuverlässig detektieren zu können.

Um die Daten des lokalen Netzes in der routinemäßigen Auswertung zu berücksichtigen, wird empfohlen die Stationen BSEA2 und BSEA3 in die Echtzeitdatenerfassung einzubinden. Mit im Mittel 1-2 Detektionen pro Tag am lokalen Netz, können somit regelmäßig und zuverlässig auch Detektionen an nur zwei Stationen umfänglich ausgewertet werden.

6 Array Detektionen am Helgoland Array

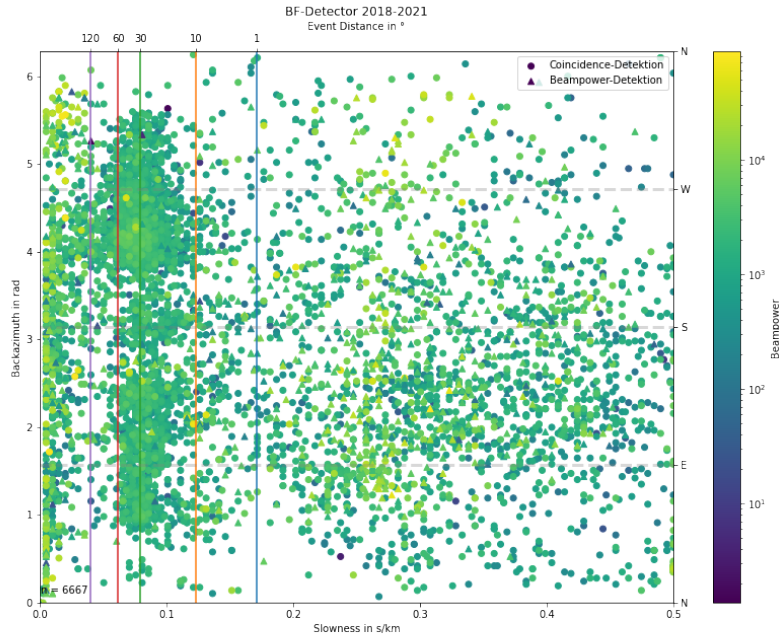
Das 2017 installierte Helgoland Array (HELGA) umfasst neben der permanenten Station in der Erdbebenwarte der CAU Kiel fünf weitere temporäre Stationen (Abb. 13). In 2020 wurden die Daten des Helgoland-Arrays erstmals mit Array-Verfahren ausgewertet (Weidle et al. [2021]) und diese Auswertemethode wurde 2021 in die routinemäßige Auswertung miteingebunden (s. Kapitel 3).

In Weidle et al. [2021] wurde das Auswerteverfahren und die Funktionalität für Helgoland anhand ausgewählter Beispiele beschrieben. Es werden zwei separate Kriterien für eine mögliche Detektion verwendet - zum einen die absolute 'Beampower' als Maß für absolute (Amplituden-)Kohärenz des Wellenfeldes, zum anderen die 'coincidence'-Detektion. Letztere verwendet charakteristische Funktionen, welche eine zeitliche Stabilität der 'Slowness' (horizontale Langsamkeit) und des 'Backazimuths' (Winkel der Einfallsrichtung gegen Nord) abbilden. Bei der 'coincidence'-Detektion ist in den meisten Fällen die absolute Beampower niedrig, es konnte aber gezeigt werden, daß die 'coincidence'-Detektion hilfreich sein kann, um auch schwache Ereignisse detektieren zu können. Im Anschluss an die Bestimmung geeigneter Parameter für die Datenbearbeitung wurde nun der gesamte vorhandene Datensatz für das seit Mitte 2017 bestehende HELGA-Array nachprozessiert. Da einige Stationen erst im Herbst 2017 etabliert wurden und andere zu Beginn noch technische Probleme aufwiesen, beschränkt sich die folgende Auswertung auf den Zeitraum Anfang 2018 bis Ende 2021.

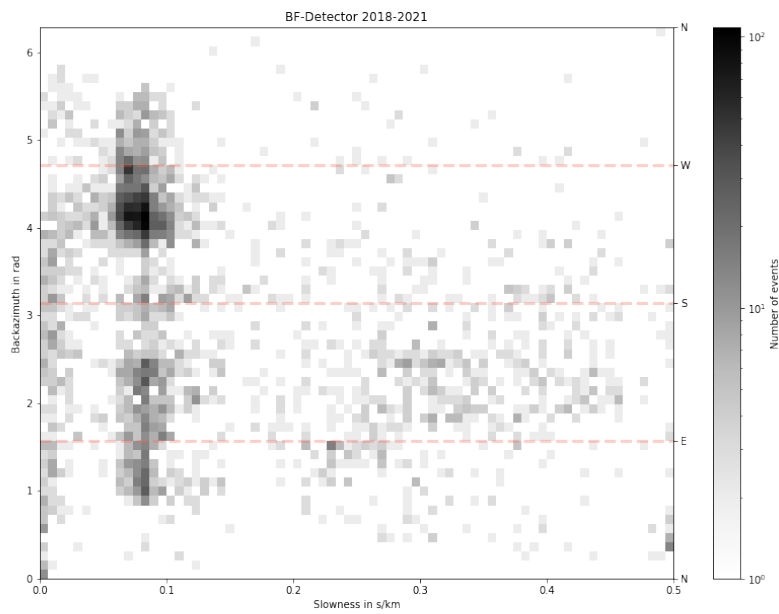


Abbildung 13: Karte des Helgoland Arrays (HELGA)

In diesem Zeitraum ergaben sich über 6.600 Detektionen, etwa 4-5 pro Tag (Abb. 14). Wie in Kapitel 3 dargestellt, sind die Parameter des Arrayprozessings defensiv gewählt,



(a) Detektionen farbkodiert nach Beampower.



(b) Histogramm der Detektionen.

Abbildung 14: Detektionen am HELGA-Array von Anfang 2018 bis Ende 2021.

um möglichst viele Detektionen bei gleichzeitig praktikabler, täglicher Anzahl für die routinemäßige Auswertung zu erzielen. In der täglichen Auswertung erweist sich die mittlere Häufigkeit von 4-5 Detektionen pro Tag als praktikabel, in der nachträglichen Auswertung für den Zeitraum 2018 – 2021 stellt die hohe Gesamtzahl der Detektionen aber eine große Herausforderung dar. Abbildung 14 zeigt alle Detektionen als Funktion der Slowness und des Backazimuths. Die Slowness kann als Einfallswinkel einer hypothetischen P-Welle gelesen werden, wobei niedrige Slownesswerte für steile und hohe Slownesswerte für flache Einfallswinkel stehen. Dies wird in Abbildung 14a zur Orientierung in Epizentraldistanzen für Ereignisquellen übersetzt (vertikale Linien), darf aber nicht adhoc als Distanz zur Quelle interpretiert werden, da die Ursache für die Detektion unbekannt ist.

Die 'Beampower'-Detektionen stellen etwa 10% aller Detektionen dar, d.h. für die überwiegende Anzahl der Detektionen ist die Amplitudenkohärenz niedrig. Dies kann als Indikator für eine hohe Anzahl Fehldetektionen gewertet werden, andererseits zeigt Abb. 14 eine nicht zufällige Verteilung der Detektionen. Eine starke Häufung findet sich bei sehr niedrigen Slownesswerten unterhalb von 0.04 s/km, eine weitere im Slownessbereich 0.06 – 0.12 s/km. Der erste Bereich impliziert ein steil einfallendes Wellenfeld, wie es für teleseismische P- und S-Wellen erwartbar ist. Eine große Anzahl der Detektionen kann mit teleseismischen Erdbeben mit Magnituden 4.5 und höher in Verbindung gebracht werden. Die Ursache für die hohe Detektionsdichte um Slownesswerte von 0.08 s/km ist unklar. Die Dominanz dieser Detektionen verdeutlicht die Histogrammdarstellung in Abb. 14b. Die Mehrzahl der Detektionen fällt aus westsüdwestlicher bzw. ostsüdöstlicher Richtung auf Helgoland ein. Die wahrscheinlichste Erklärung für diese Beobachtung ist eine temporäre Kohärenz des Wellenfeldes des seismischen Rauschens, welches durch Kopplung von Ozeanwellen in den Untergrund geprägt ist (sog. Meeresmikroseismik). Im Rahmen der seismologischen Überwachung für SH stellt sich die Frage, inwieweit diese Beobachtung für eine zuverlässige Detektion von seismischen Ereignissen in der Nordsee hinderlich sein könnten.

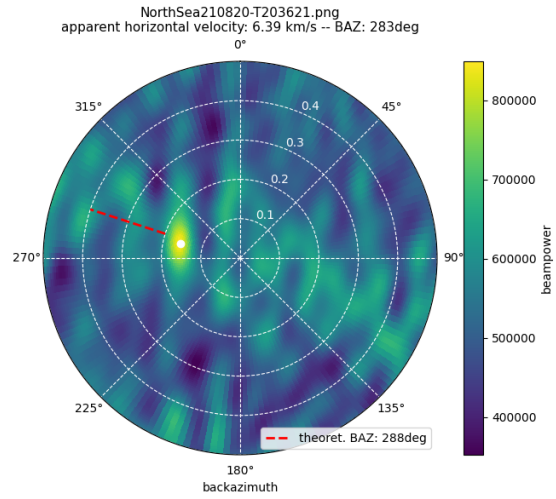
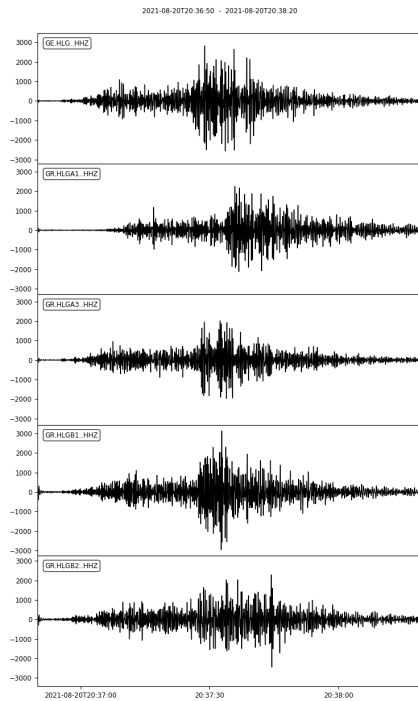
Regionale Ereignisse In Anbetracht der Vielzahl an schwachen Detektionen kann zunächst festgehalten werden, daß eine fokussierte, manuelle Auswertung der Array-Detektionen unabdingbar ist.

Für drei Ereignisse im Nordseeraum wurden die Beamforming-Ergebnisse näher betrachtet. Sowohl für das Magnitude 3.5 Beben in der zentralen Nordsee (Abb. 15, s. Lokation in Abb. 6), als auch Magnitude 3.2 und 2.3 Ereignisse bei Groningen (NL) (Abb. 16) konnten stabile Beams berechnet werden. Selbst das schwächste der drei Ereignisse weist eine Beampower oberhalb von 10^5 auf und liegt damit deutlich über der Detektionsschwelle des Detektors (vgl. Weidle et al. [2021]). In allen Fällen kann der Backazimuth sehr gut bestimmt werden und die horizontale Scheingeschwindigkeit passt zu P-Wellen-Phasen in der oberen Kruste, mit Slownesswerten im Bereich 0.14 bis 0.21.

Daraus kann zweierlei gefolgt werden: 1) Die Vielzahl an Detektionen behindert eine Detektion von Ereignissen mit Magnituden unterhalb 3 nicht, wobei die Beobachtung des Magnitude 2.3 Ereignisses in etwa 120 km Entfernung nicht mit einer Detektionsschwelle gleichzusetzen ist. 2) In den umfangreichen Detektionen ist v.a. der Slownessbereich von 0.14 bis 0.25 für regionale, potentiell tektonische Ereignisse relevant (s. auch Weidle et al. [2021]). Dieser liegt in Abb. 14 deutlich außerhalb der dominanten Punktwolke um 0.08 s/km.

Fazit und Ausblick Von 2018 bis Ende 2021 wurden mit dem Helgoland-Array über 6000 Detektionen ausgelöst. Die überwiegende Mehrheit ($\sim 90\%$) sind hierbei getriggert durch ein kurzzeitig stabiles Wellenfeld des seismischen Rauschens ohne transiente Amplitudenzunahme, mit überwiegender Einfallsrichtung aus westlichen und östlichen Richtungen und Slownesswerten von rund 0.08 s/km. Diese Detektionen stehen vermutlich in Zusammenhang mit der Kopplung von Ozeanwellen in die feste Erde. Dies wird am IfG – jenseits der Kooperation – im Rahmen von Studien zur Meeresmikroseismik bereits untersucht. Von den $\sim 10\%$ an Detektionen mit deutlicher Amplitude lassen sich viele mit regionalen und teleseismischen Erdbeben in Einklang bringen. Darüberhinaus treten auf Helgoland auch häufig akustische Signale auf, deren Ursache nicht zweifelsfrei aufzulösen ist. Kandidaten hierfür sind Gewitter, Bauarbeiten oder auch akustische Signale während Sturmereignissen.

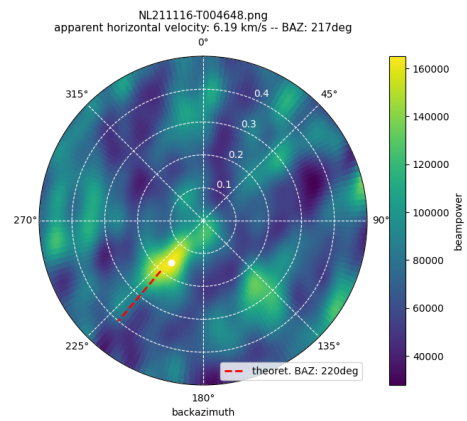
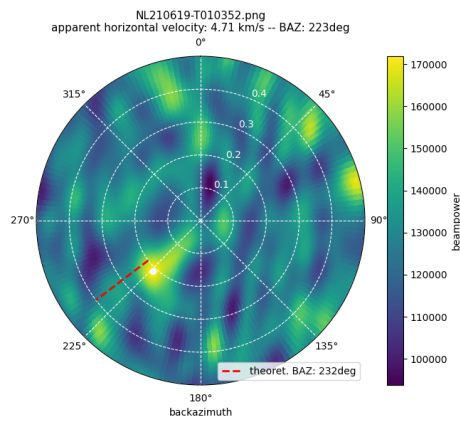
Seit Sommer 2021 ist die Array-Auswertung in die routinemäßige Auswertung eingebunden. Dies erlaubt eine regelmäßige Betrachtung auch insignifikanter Detektionen (im Mittel 4-5 pro Tag) und zukünftig eine a posteriori Bewertung der Vielzahl an Detektionen am Array. Die gezeigten Beispiele für seismische Ereignisse in der Nordseeregion zeigen deutlich, daß der Fokus der zukünftigen Auswertung v.a. im Slownessbereich von 0.1 bis 0.2 s/km liegen sollte, da regionale Ereignisse aus der Nordsee und Schleswig-Holstein in diesem Slownessbereich zu erwarten sind. Hierzu sollen auch die seit 2018 aufgetretenen Detektionen in diesem Slownessbereich noch detaillierter ausgewertet werden.



(b) Beamforming der Wellenformen. Der weißer Punkt markiert das Maximum in der Slowness-Backazimuth-Ebene. Theoretischer Backazimuth nach EMSC [2021] Lokation (rot gestrichelt).

(a) Wellenform (Z-Komponente) an den Stationen des HELGA-Arrays.

Abbildung 15: Erdbeben am 20.8.2021 in der Nordsee, Magnitude 3.5 (EMSC [2021]).



(a) Erdbeben vom 19.6.2021, Magnitude 2.3 (EMSC [2021]). (b) Erdbeben vom 16.11.2021, Magnitude 3.2 (EMSC [2021]).

Abbildung 16: Beams für zwei Erdbeben bei Groningen (NL). Bildbeschreibung wie in Abb. 15b.

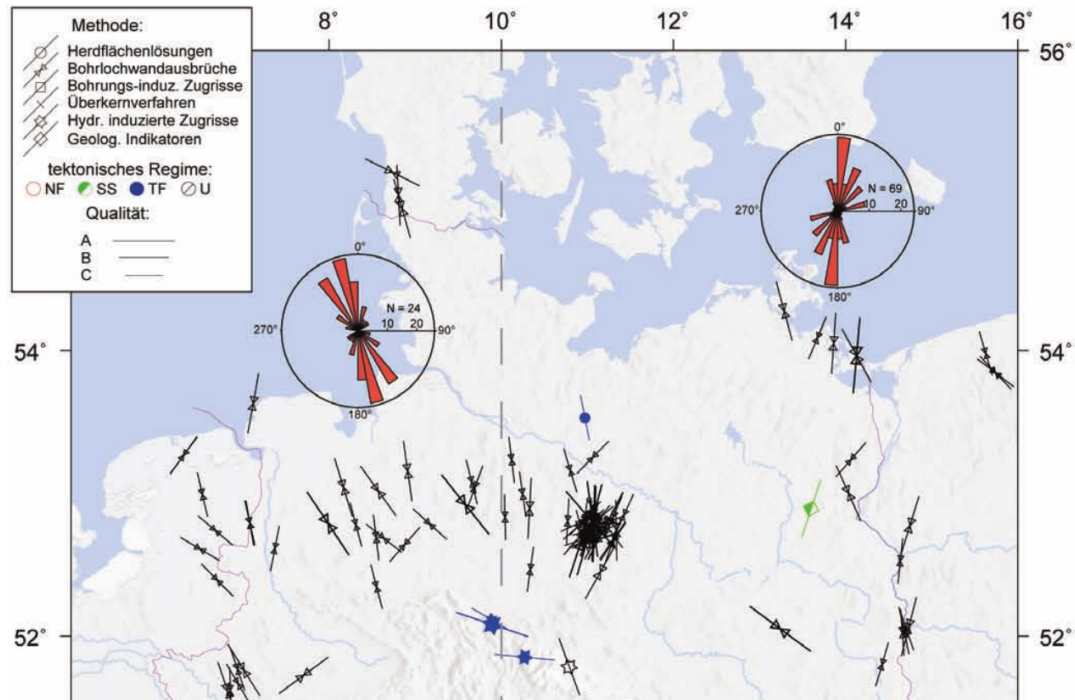
7 Das Spannungsfeld in Norddeutschland

Eine grundsätzliche Fragestellung in der Charakterisierung von Seismizität ist die Beschreibung des Spannungszustands an geologischen Störungen. Störungssysteme in der Erdkruste sind an der Erdoberfläche durch geologische Kartierung meist sehr gut bekannt (Abb. 17c), andererseits ist die Datengrundlage für die Beschreibung des Spannungszustandes regional sehr unterschiedlich (Abb. 17a). Verfahren, die den Spannungszustand in der Erdkruste beschreiben, stützen sich in großem Maße auf Messungen von Bohrlochwandausbrüchen und die Bestimmung von Herdmechanismen von Erdbeben (z.B. Reiter et al. [2015]). Im 'World-Stress-Map' – Projekt (WSM, Heidbach et al. [2018]) werden Informationen über das Spannungsfeld der Erdkruste weltweit gesammelt und in einer Datenbank homogenisiert.

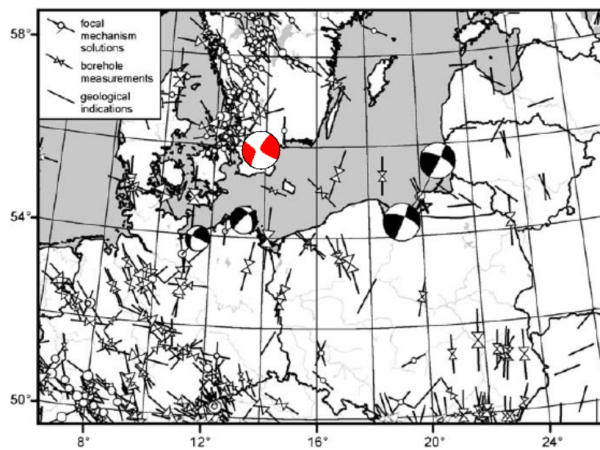
Ein Ausschnitt der WSM für Norddeutschland (Abb. 17a) zeigt eine generelle Nord-Süd Ausrichtung der horizontalen Hauptspannung. Dies ist konsistent mit den wenigen verfügbaren Herdmechanismen in Norddeutschland, welche ein überwiegend kompressives Spannungsfeld mit Blattverschiebungsmechanismen aufzeigen (Abb. 17b, 17c).

Reiter et al. [2015] diskutieren im Norddeutschen Becken eine Rotation der Hauptspannungsrichtung von NNW im Nordwesten zu NNE im Nordosten. Als mögliche Ursachen werden Änderungen der Krustenstruktur, Unterschiede in der postglazialen Hebungsgeschichte oder Änderungen der Steifigkeit der Erdkruste im Übergang zum osteuropäischen Kraton diskutiert. Ein für SH wichtiger Aspekt ist eine potentielle Entkopplung des sub-salinaren vom supra-salinaren Spannungsfeld durch die Zechstein-Evaporite. Speziell im supra-salinaren Spannungsfeld sind Abweichungen vom großräumigen tektonischen Spannungsfeld durch lokale Strukturen, z.B. Topographie oder den Dichtekontrast um die Salzstöcke, zu erwarten (Reiter et al. [2015]).

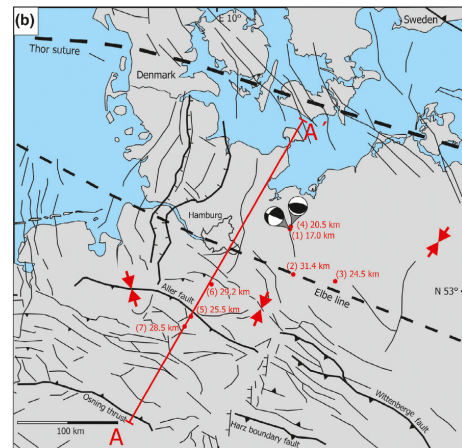
Die konsistente Interpretation des Spannungsfeldes in Norddeutschland impliziert für Schleswig-Holstein ein Nord-Süd kompressives Spannungsregime, allerdings sind kaum Datenpunkte aus SH enthalten. Diese dünne Datenlage erlaubt es insbesondere nicht, lokale Abweichungen des großräumigen Spannungsfeldes, bspw. in der Umgebung der Salzstöcke, abzubilden. Mit Bezug auf Herdmechanismen liegt das zum einen an der generell niedrigen Seismizität im Norden, zum anderen gibt es für die wenigen tektonischen Ereignisse (Leydecker [2011]) aufgrund des ehemals sehr lichten Stationsnetzes kaum instrumentelle Aufzeichnungen. Somit war eine Interpretation des Bruchmechanismus bisher erst für wenige Ereignisse in Norddeutschland möglich (Abb. 17b, 17c). Der Stationsausbau in SH bildet also neben all den in vorigen Abschnitten diskutierten Aspekten der seismologischen Überwachung auch die Datengrundlage, um bei zukünftigen bedeutsamen Ereignissen Interpretationen des Bruchmechanismus und letztlich über den Spannungszustand an Störungssystemen in SH vorzunehmen.



(a) Ausschnitt der Spannungskarte für Deutschland von Reiter et al. [2015]. Die Rosendiagramme summieren Orientierungsdaten westlich und östlich von 10° östlicher Länge.



(b) Grünthal et al. [2008] (deren Abb. 10), ergänzt durch Herdmechanismus des Bebens von Malmö am 16.12.2008 (rot) nach Ekström et al. [2012].



(c) Karte der Störungen in Norddeutschland und Herdmechanismen aus Brandes et al. [2019] (deren Abb. 1b).

Abbildung 17: Überblick verschiedener Studien zum Spannungszustand der Erdkruste in Norddeutschland. Horizontale Hauptspannungsrichtungen in (a) und (b) sind ergänzt durch Herdmechanismen von Erdbeben in (b) und (c).

8 Analyse von Bodenabsenkungen um die Kavernenspeicher in Kiel Rönne

Bodenabsenkungen im Bereich von Kavernenspeichern sind an mehreren Lokationen in Deutschland in den Daten des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) zu beobachten. Die Ursache dieser Setzungen dürfte am duktilen Verhalten von Steinsalz liegen, welches zu kontinuierlichem Schrumpfen von Kavernen führt. Eine Volumenabnahme im Untergrund kann sich in Form von langsamen Bodenabsenkungen bis an die Oberfläche durchprägen. An den Kavernenspeichern in Etzel (Niedersachsen, bei Wilhelmshaven, Abb. 18) beträgt die Bodenbewegung im Zeitraum 2014 bis 2019 im Zentrum des Absenkungstrichters über -40 mm/a.

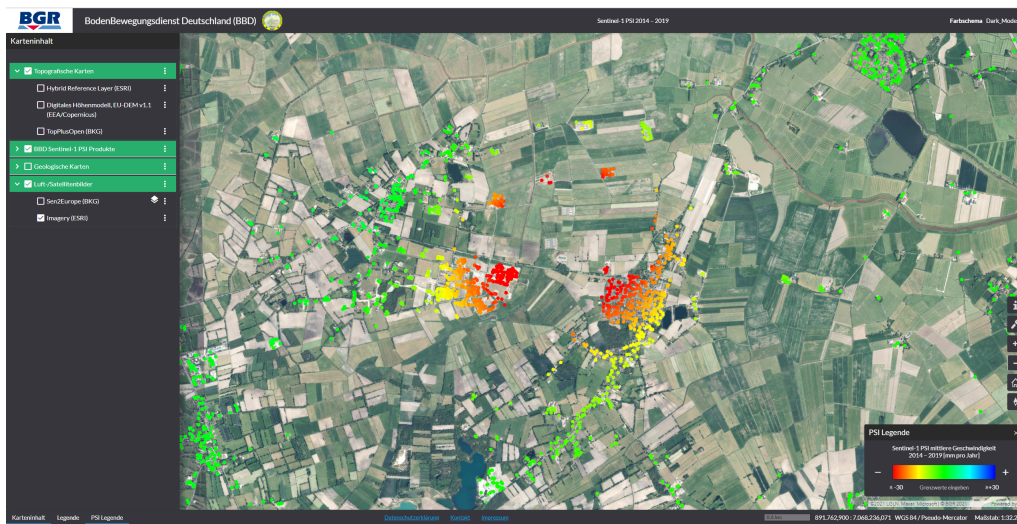


Abbildung 18: Bodenbewegung an den Kavernenspeichern in Etzel, Skala ± 30 mm/a.

Deutlich weniger stark ausgeprägt sind die Bodenbewegungen an den Kavernen in Harsefeld (Niedersachsen, bei Stade, Abb. 19), wo der Maximalwert bei rund -10 mm/a liegt und der Absenkungsbereich daher erst bei einer erheblich höher auflösenden Skala von ± 5 mm/a gut sichtbar wird.

Auch an den beiden Kavernenstandorten Bernburg (Abb. 20) und Bad Lauchstädt (Abb. 21) in Sachsen-Anhalt sind die Absenkungen mit Maximalwerten von fast -5 mm/a erst in der Skala von ± 5 mm/a zu identifizieren. In Bernburg liegen die Kavernen in einer Tiefe von 500 m bis 600 m im Zechstein. Die Mächtigkeit des Bundsandsteins darüber beträgt knapp 200 m. In Lauchstädt liegen die Kavernen etwas tiefer zwischen 700 m und 900 m mit einer etwa 500 m mächtigen Bundsandsteinschicht im Hangenden.

Die Skala von ± 5 mm/a ist die höchste Auflösungsstufe die BBD-Online anbietet. Im Bereich der Gaskavernen in Kiel-Rönne (Abb. 22) sind etwaige Bodenabsenkungen auf BBD-Online nicht mehr sichtbar. Lediglich die Rückstreuer der Betriebsgebäude zeigen geringe Setzungen von bis zu -4,2 mm/a (Abb. 23) an. BBD-Online verwendet ausschließlich persistente Rückstreuer mit einer temporalen Kohärenz von über 0,85 und berücksichtigt somit keine Daten geringerer temporaler Kohärenz (0,6 bis 0,85). Da wir über den gesamten

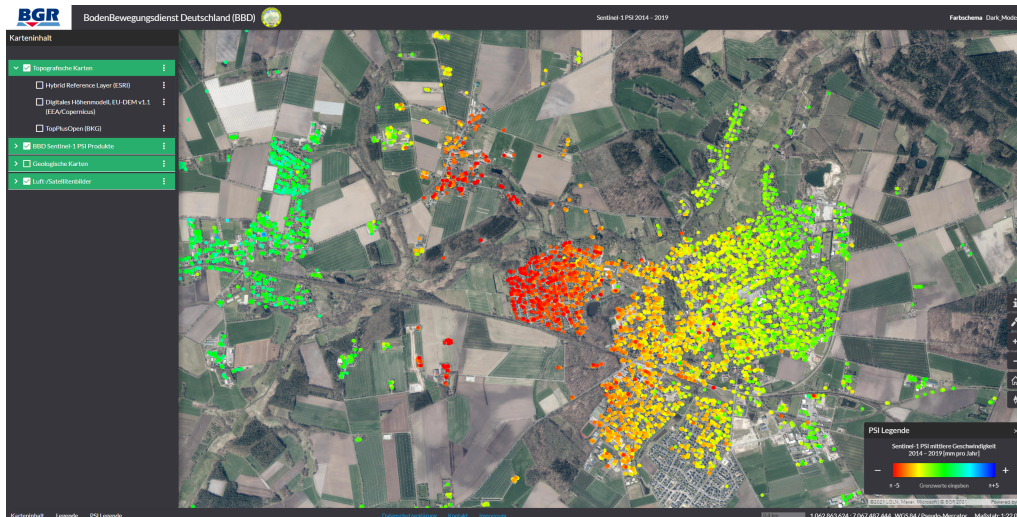


Abbildung 19: Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Harsefeld, Skala ± 5 mm/a



Abbildung 20: Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Bernburg, Skala ± 5 mm/a

Datensatz von Schleswig-Holstein verfügen, haben wir diesen für den Bereich Kiel Rönne weitergehend analysiert, um zu untersuchen, ob auch hier Bodenbewegungen über den Kavernen auftreten und, ob diese Bodenbewegungen auf die Kavernenschumpfung zurückgeführt werden können, obwohl die Salzstruktur von fast 1000 m Ton, Tonstein, Kalkstein und Schreiekreide mit erheblicher Gewölbewirkung überlagert wird.

8.1 Gaskavernen in Kiel-Rönne

Für die Gasversorgung in Kiel und dessen Umland betreiben die Stadtwerke Kiel drei im Salzstock Honigsee ausgesolte Gaskavernen, genannt K101, K102 und K103. Die im Jahr 1971 in Betrieb gestellte erste Kaverne K101 ist bereits stillgelegt. Ihr Hohlraum wurde im Teufenbereich von 1.307 m bis 1.335 m ausgesolt und erreichte eine Größe von ca. 32.000 m³. Das Aussohlen der größten Kaverne K102 zwischen 1.400 m bis 1.600 m begann Ende 1992. Sie ist von 1996 bis heute in Betrieb. Ihr ursprünglicher Hohlraum erreichte eine Höhe von



Abbildung 21: Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Bad Lauchstädt, Skala $\pm 5 \text{ mm/a}$

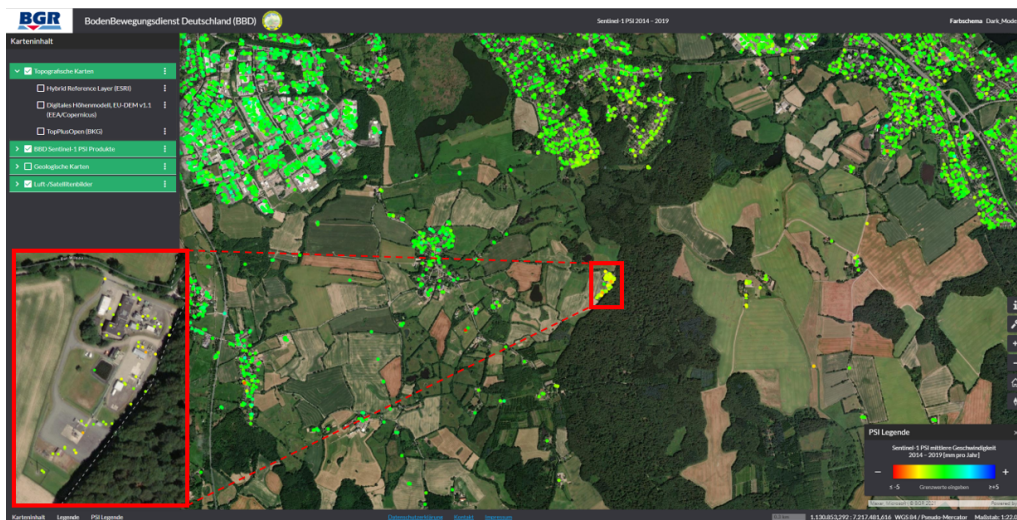


Abbildung 22: Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Kiel-Rönne, Skala $\pm 5 \text{ mm/a}$, mit eingehängter Vergrößerung des Betriebsgeländes

ca. 160 m und einen mittleren Durchmesser von ca. 60 m. Zusätzlich wurde im Jahr 2014 die dritte, kleinere Kaverne K103 fertiggestellt. Alle drei Sohl-Bohrungen wurden auf dem Betriebsgelände angesetzt. K101 wurde senkrecht abgeteuft, während K102 um mehr als 350 m nach Ost-Nordost und K103 ähnlich weit nach West-Nordwest abgelenkt wurden. Die Koordinaten und Volumina der Kavernen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Das Ziel unserer Analyse ist einen postulierten Prozess von schrumpfenden Salzkavernen mit Modellen einer Deformationsquelle abzubilden, um einen möglichen Zusammenhang von beobachteter Bodenabsenkung quantitativ mit der Volumenabnahme der Kavernen auf Plausibilität zu testen. Wir verwenden für die Anpassung dieser Modelle die existierenden Zeitreihendaten des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD), welche hier die Stapel von vier Sentinel-1 Satellitentracks umfassen: zwei von aufsteigenden (ascending) Orbits und zwei von absteigenden (descending) Orbits. Die Zeitreihen dieser Messungen überspannen den Zeitraum von Ende 2014 bis Anfang 2019 (BBD Teillieferung 3). Die Messungen



Abbildung 23: Zeitreihe des Rückstreuers mit der höchsten Setzungsrate auf dem Betriebsgelände der Kavernen Kiel-Rönne

finden an Punkten statt, die eine stabile Rückstreuung der Radarstrahlung aufweisen und als *persistent scatterer* oder kurz PS bezeichnet werden.

Das Schrumpfen der Kavernenhohlräume ist belegt und teilweise vermessen. Laut Datenblatt der SWKiel Speicher GmbH (SWKiel-Speicher-GmbH [2022]) hat die Kaverne K102 innerhalb von 11 Jahren nach Inbetriebnahme ca. 25% ihres ursprünglichen Volumens verloren. K102 fasste bei Inbetriebnahme 443.596 m^3 . Bei einer Vermessung im Jahre 2017 war das Volumen auf 338.547 m^3 geschrumpft. Diese Volumina entsprechen einem Würfel mit mehr als 76 m Kantenlänge, der um einen Würfel mit etwa 47 m Kantenlänge geschrumpft ist. K103 hat innerhalb der ersten sechs Betriebsjahre mehr als 50% ihres Volumens verloren, von anfangs 238.433 m^3 auf eine Größe von 109.137 m^3 bei einer Vermessung im Juli 2020. Diese Schrumpfung entspricht einem Würfel mit mehr als 50 m Kantenlänge. Wird in erster Annäherung von einer linearen Volumenabnahme ausgegangen, ergeben sich Raten von $9550 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ für K102 und $21.050 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ für K103, bzw. zusammen gerechnet von $30.600 \text{ m}^3/\text{Jahr}$. Unbekannt ist, ob im betrachteten Zeitraum noch mit einem zusätzlichen unbekannten Beitrag von K101 zu rechnen ist oder, ob diese Kaverne bereits vollkommen geschlossen ist.

8.2 BBD-Daten im Bereich der Kavernen

Es zeichnen sich erhöhte, vom Satelliten weggerichtete Bodenbewegungsgeschwindigkeiten im Südosten Kiels ab, die mehr als einen Millimeter im Jahr betragen und über einer Fläche von mehreren Quadratkilometern (Abb. 24) messbar sind. Die höchsten Bewegungsgeschwindigkeiten werden direkt über den Kavernen gemessen, an Rückstreupunkten die auf dem Betriebsgelände der Kavernenspeicher liegen (Abb. 25). Die Zeitreihen dieser Punkte zeigen einen weitestgehend linearen Verlauf der Bodenverschiebung. Um das Betriebsgelände der Kavernenspeicher sind in einem recht weiten Kreis nur sehr wenige weitere stabile, hochkohärente Rückstreupunkte gefunden worden (Abb. 24). Vereinzelt

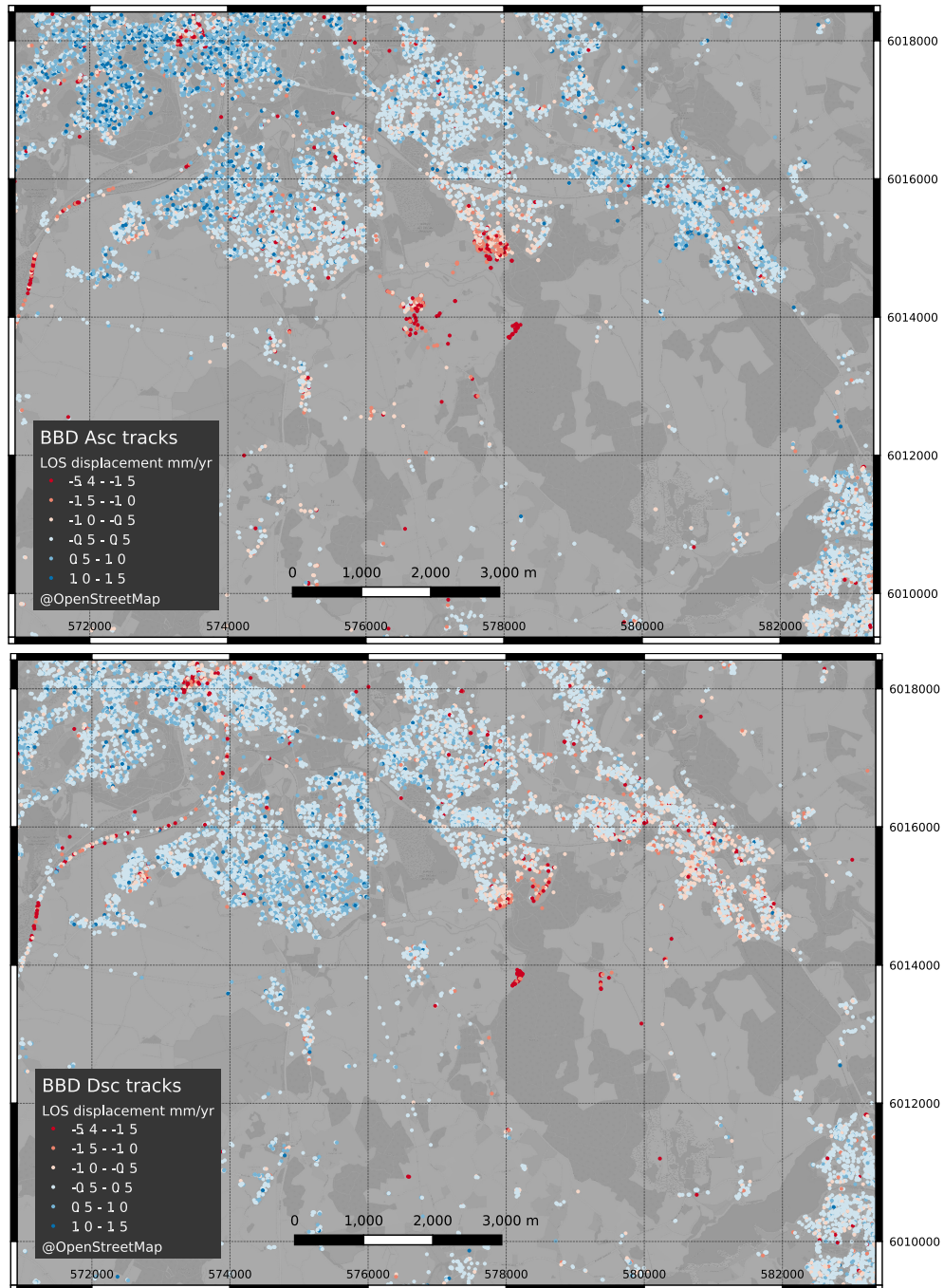


Abbildung 24: PS Punkte der jeweils beiden ascending Stapel der BBD TL3 (oben) und descending Stapel (unten) mit temporärer Kohärenz von mindestens 0.87, dargestellt in einer UTM Projektion (Zone 32N).

Tabelle 3: Verwendete Kavernendaten aus den Datenblättern der SWKiel Speicher GmbH (Volumenmessungen, SWKiel-Speicher-GmbH [2022]).

Kavernen	K101	K102	K103
Bohrbeginn	1966	1991	2006
Inbetriebnahme	1971	1996	2014
Ansatzpunkt Bohrung			
GK 3 Rechtswert [m]	3578318.0	3578295.5	3578228.0
GK 3 Hochwert [m]	6015853.0	6015785.6	6015715.0
UTM32 Eastings [m]	578216.4	578193.9	578126.4
UTM32 Northings [m]	6013885.6	6013818.2	6013747.7
Landepunkt Bohrung			
Tiefe (TVD) [m]	1500	1800	1890
GK 3 Rechtswert [m]	3578318.0	3578586.2	3578049.0
GK 3 Hochwert [m]	6015853.0	6015841.85	6015989.0
UTM32 Eastings [m]	578216.4	578484.5	577947.5
UTM32 Northing [m]	6013885.6	6013874.4	6014021.5
Volumenmessungen			
Jahr der Messung		1996	2014
Volumen (m ³ /Jahr)		443.596	238.433
Jahr der Messung		2017	2020
Volumen (m ³ /Jahr)		338.547	109.137

gibt es jedoch weitere leicht erhöhte Bodenbewegungsgeschwindigkeiten in der weiteren Umgebung und bis in Vororte von Kiel hinein. Die Bodenbewegungsrate nimmt mit der Entfernung vom Betriebsgelände der Kavernenspeicher ab. Bei den ascending Daten sind die erhöhten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten weiträumig eher westlich der Kavernengebäude auffällig (Abb. 24). Bei den descending Daten sind die stärksten Bodenbewegungen südöstlich zu beobachten (Abb. 24). Unterscheiden sich die gemessenen Bodenbewegungsgeschwindigkeiten systematisch zwischen Daten von ascending und descending Orbits, sind signifikante Horizontalkomponenten der Bodenbewegung angezeigt. Auch um die Kavernen in Kiel Rönne deuten die Beobachtungen auf horizontale Bodenbewegungen hin.

Erhöhte Bewegungsraten, positive wie negative, werden generell auch an anderen Orten gemessen, meist jedoch mit einer kleiner räumlichen Ausdehnung. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist kleiner als 2 und somit generell klein. Die Varianz der bearbeiteten Daten liegt bei etwas mehr als 1 mm²/Jahr bei den ascending Daten und ist mit mehr als 2,5 mm²/Jahr bei den descending Daten sogar noch größer. Das recht kleine Signal-Rausch-Verhältnis und die geringe Dichte von Beobachtungen nahe der Kavernenspeicher bietet keine hinreichende Datenbasis für die Auflösung der potentiellen Auswirkungen von drei nahe beieinander liegenden Kavernen im Rahmen der Modellierung. Daher werden die drei Kavernen in der Modellierung als ein Hohlraum (Punktquelle) betrachtet.

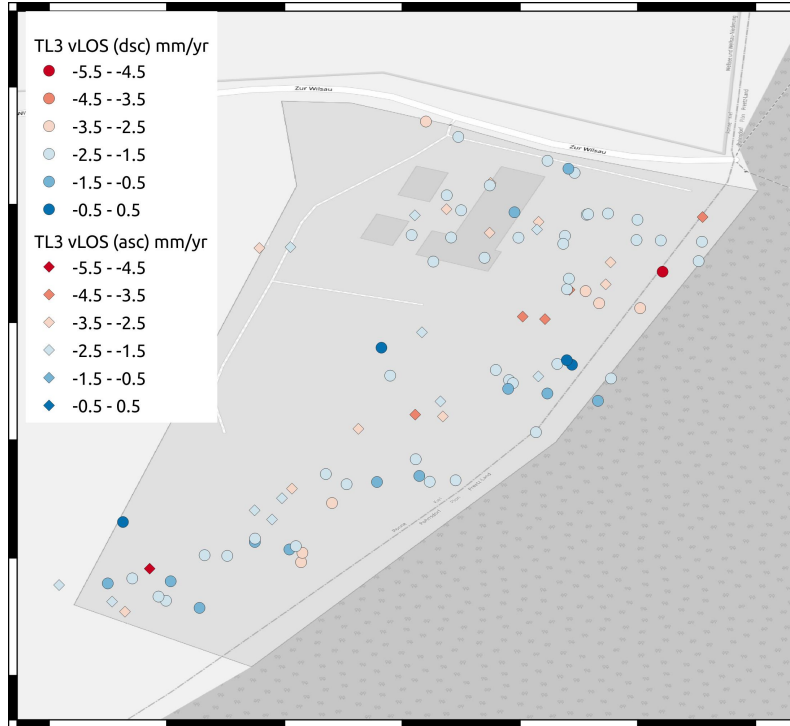


Abbildung 25: Detaildarstellung der Bodenbewegungsgeschwindigkeiten an den Kavernengebäuden des Kieler Gasspeichers.

8.3 Modellierung

In einer Modellierung testen wir die Hypothese, dass die beobachteten Bodenbewegungen mit dem Schrumpfen der Kavernen in einem Zusammenhang stehen könnten. Die behandelten Fragestellungen beinhalten im Speziellen, ob die Optimierung einer Punktquelle realistische Werte für den bekannten Ort, die bekannte mittlere Tiefe der Kavernen und deren teilweise bekannten Volumenverlust abschätzt.

Das Modell für das Verhalten der drei nahe beieinander liegenden Kavernen bildet eine einzige Punktquelle mit einer Volumenabnahme (isotroper Momententensor). Diese Punktquelle ist eingebettet in ein Drei-Schicht-Medium, welches als Generalisierung aus den Schichtenverzeichnissen der Kavernenbohrungen abgeleitet wurde. Das für die Modellierung benötigte Poisson-Verhältnis kann in isotropen Körpern aus der P-Wellengeschwindigkeit und S-Wellengeschwindigkeit berechnet werden. In einer benachbarten 3D-Seismik wurden P-Wellengeschwindigkeiten bestimmt. In dieser 3D-Seismik wurden nur P-Wellengeschwindigkeiten bestimmt. Wir leiten daraus S-Wellengeschwindigkeiten ab und bauen das Geschwindigkeitsmodell bestehend aus zwei elastischen 700 m und 550 m mächtigen Deckschichten mit einem Poisson-Verhältnis von 0.22 über einem viskoelastischen Halbraum auf (Abb. 26). Der viskoelastische Halbraum hat die Eigenschaften von Steinsalz mit den seismischen Geschwindigkeiten $v_p = 4.5 \text{ km/s}$ und $v_s = 2.6 \text{ km/s}$, einem Poisson-Verhältnis von 0.25 und einer Viskosität von $1 \cdot 10^{20} \text{ Pas}$.

Einen visuellen Eindruck über die Bodenbewegungsgeschwindigkeiten, die mit dieser Repräsentation zu erwarten sind, gibt Abbildung 27. Deutlich erkennbar ist der Einfluss der

Horizontalbewegungen, die zwar gegenüber den Vertikalbewegungen geringer sind, aber dennoch in den LOS projizierten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten deutlich erkennbar werden. Die maximalen Bodenbewegungsgeschwindigkeiten in LOS sind signifikant in westlicher Richtung verschoben bei einer Beobachtung von einem ascending Orbit und in östlicher Richtung verschoben bei einer Beobachtung von einem descending Orbit (Abb. 27). Diese Signalform ist so auch in den BBD Daten erkennbar (Abb. 24).

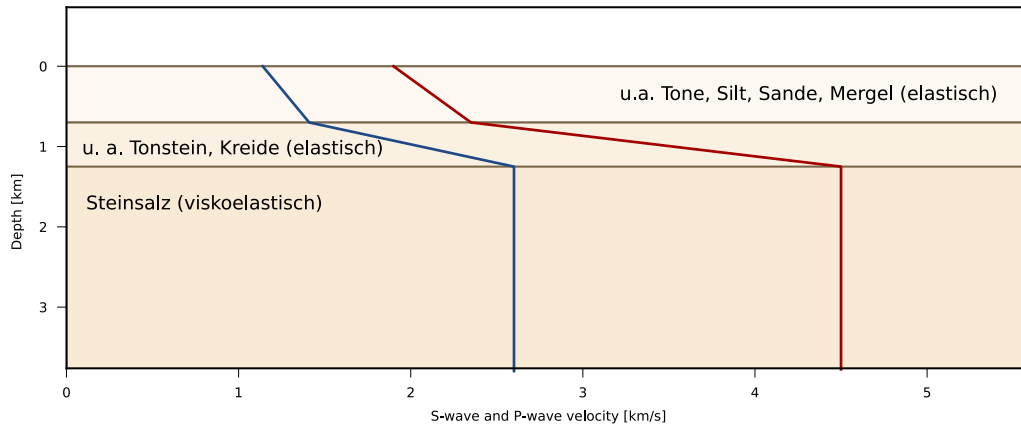


Abbildung 26: Dreischicht Modell im Bereich der Kavernen. Geschwindigkeiten sind in einer nahen 3D P-Wellen-Seismik ermittelt worden.

Die einzelnen PS Bodenbewegungsgeschwindigkeiten werden räumlich gemittelt. Das steigert die Effizienz bei den numerischen Modellierungen und unterdrückt den Einfluss von Ausreißerwerten. Zunächst werden die PS Punkte auf einem regelmäßigen Grid mit 500 m mal 500 m Pixeln zusammengefasst. Dieses Grid erfährt dann eine weitere Reduzierung durch Quadtree subsampling, bei welchem Bereiche im Grid mit geringer Variabilität bei benachbarten Pixeln zu größeren Bereichen zusammengefasst werden (Jónsson et al. [2002]). Bei stärkerer Variabilität und deutlichen räumlichen Gradienten bleibt die feine Einteilung erhalten (Abb. 28). Wir verwenden für diese Datenbearbeitung die open-source Software *Kite* (Isken et al. [2017]). Das nun optisch klare räumliche Muster zeigt deutliche Ähnlichkeiten jeweils in den beiden ascending Datensätzen und den descending Datensätzen (Abb. 28), aber auch systematischen Unterschiede zwischen ascending und descending.

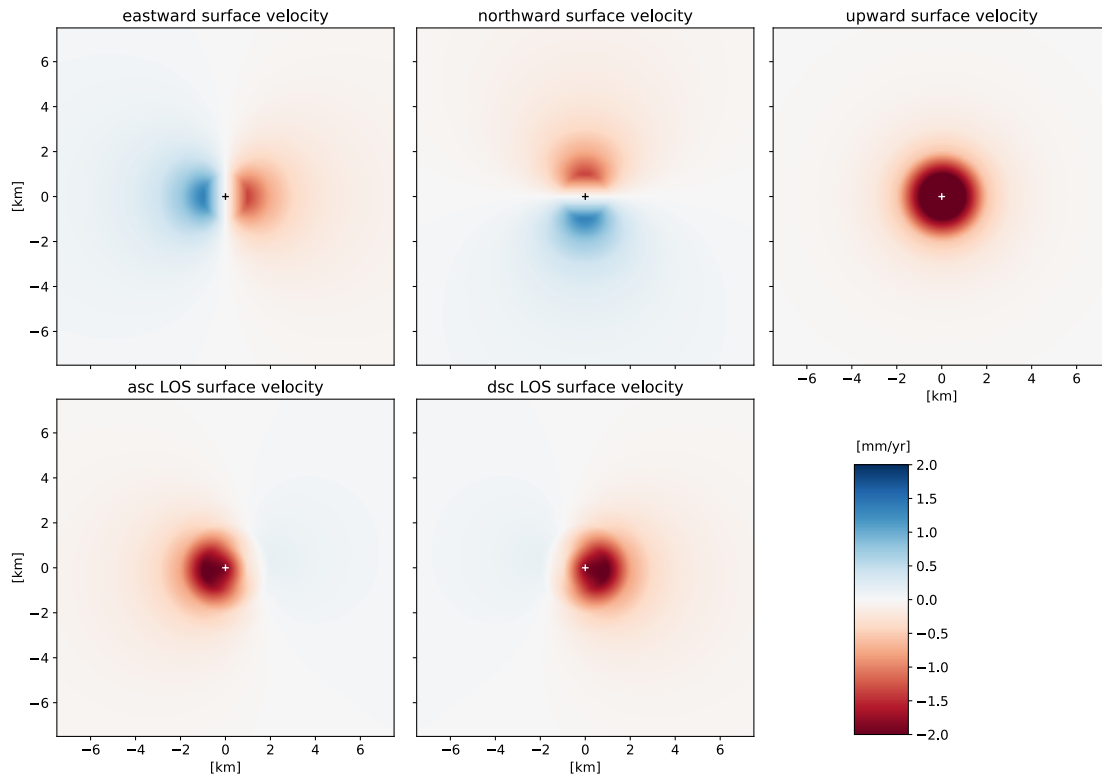


Abbildung 27: Vorwärtsmodellierung der Bodenbewegungsgeschwindigkeit über einer Punktquellenschrumpfung in 1200 m Tiefe in einem dreilagigen, elastisch-viscoleastischen Medium (Abb. 26). Separat gezeigt sind einzeln drei Komponenten der dreidimensionalen Bodenbewegung: Ost-, Nord- und Aufwärtsbewegung (oben) sowie die Projektionen in die Satellitenblickrichtung (LOS) von ascending und descending Orbits (unten). Der mittlere LOS Einfallswinkel in dieser Modellierung ist 40° . Schwarze und weiße Kreuze markieren die horizontale Position der Punktquelle.

8.4 Optimierung eines Kavernenmodells

In einer nichtlinearen Optimierung werden simultan der mittlere Ort der Punktquelle in allen drei Raumrichtungen abgeschätzt sowie die Volumenänderung. Referenzlokationen der Kavernen, zum Beispiel aus Bohrdaten, gehen nicht in die Optimierung ein, sondern werden in einem großzügigen Modellraum mit 2 km Radius relativ zu den Kavernengebäuden unabhängig bestimmt. Die Tiefe wird im Bereich von 500 m bis 3000 m abgetastet und die Volumenabnahme der Punktquelle wird im Wertebereich von $0 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ bis $100.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ gesucht. Die objektive Funktion dieser Optimierung ist die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen Modelldaten und den beobachteten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten, der sogenannte Misfit. Um die Modellierung effizient zu gestalten und hinreichend schnelle Vorwärtsmodellrechnungen mit wenigen Datenpunkten zu ermöglichen, werden die Bodenbewegungsgeschwindigkeiten der einzelnen Rückstreupunkte räumlich gemittelt in einem irregulären Quadtree Subsampling-Verfahren (Abb. 28).

Der wie beschrieben sehr offen gehaltene Parameterraum lässt Aussagen über die Lokalisierungsgenauigkeiten zu. Systematische Fehllokalisierungen könnten außerdem Hinweise auf ein möglicherweise zu stark vereinfachtes Mediummodell geben. Die Näherung des Untergrundes durch ein horizontal geschichtetes Medium ist eine starke Vereinfachung, welche

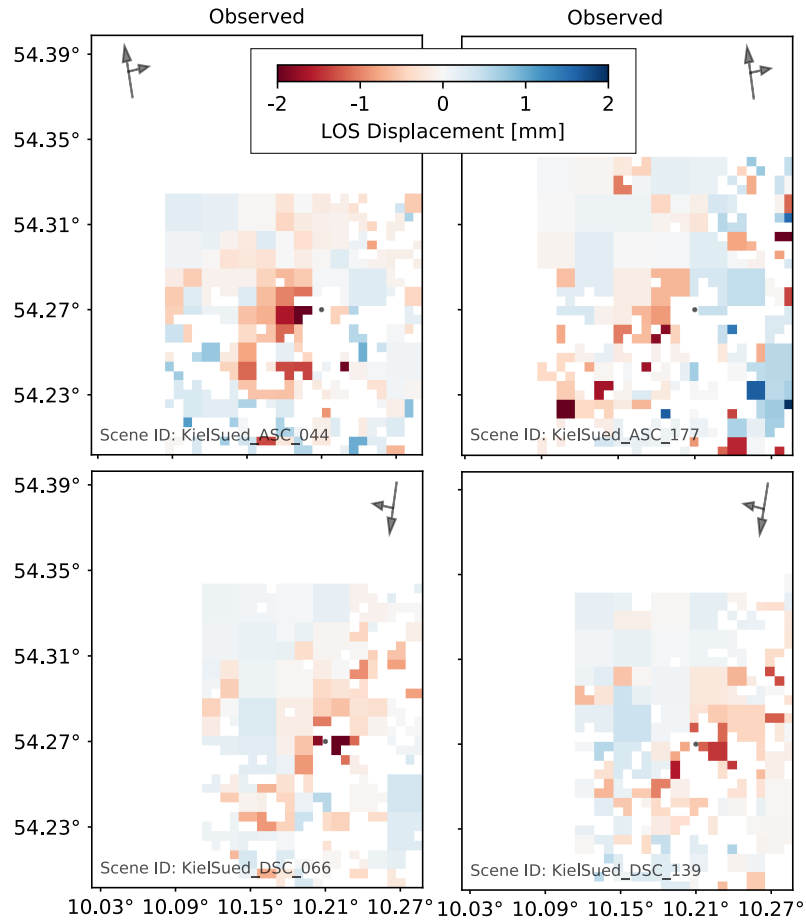


Abbildung 28: Räumlich gemittelten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten mittels Quadtree subsampling. Der größere dunkelgraue Punkt markiert die mittlere Lokation der Bohrungen von K101 und K102. Die Einfallswinkel der Radarstrahlung (Line-of-Sight) und damit die vertikale Projektionsrichtung der verschiedenen Messungen auf dem Betriebsgelände der Kavernenspeicher betragen 34.6° für ASC_044, 42.6° für ASC_177, 40.6° für DSC_066 und 32.3° für DSC_139.

die Ergebnisse des Kavernenmodells systematisch beeinflussen könnte.

Mittels einer randomisierten Auswahl von Volumenquellen werden viele verschieden ausgeprägte räumliche Muster von synthetischen Bodenbewegungsgeschwindigkeiten den Beobachtungen gegenübergestellt und anhand des Misfits bewertet. Die Suche erfolgt hier zunächst mit gleichverteilten Zufallswerten innerhalb des beschriebenen Modellraums und orientiert sich in einer anschließenden Phase an der Verteilung von Modellen mit kleinem Misfit.

Zusätzlich zur Optimierung werden in einem Bayesianischen Verfahren die Misfits der besuchten Modelle mit kleinen Misfits hinsichtlich ihrer Signifikanz bewertet, unter Berücksichtigung des kleinen Signal-Rausch-Verhältnisses. Das heißt Modelle, deren Misfit nicht signifikant größer ist als der kleinste Misfit, bilden das Modell-Ensemble, welches die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Modellparameter abbildet. Diese Art der Optimierung ist im hier verwendeten Grond Algorithmus implementiert (Heimann et al. [2018]).

8.5 Modellergebnisse der Optimierung

Eine Punktquellenschumpfung kann im betrachteten räumlichen Ausschnitt etwa 15% der beobachteten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten erklären (Abb. 29). Das optimale Modell liegt nahe der Kaverne K102 (Abb. 30) in 1050 m Tiefe und weist eine Schrumpfrate von $22.700 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ auf. 95% der Modelle liegen in einem Bereich von 700 m östlich bis 770 m westlich der Kavernengebäude, sowie 500 m nördlich und 1000 m südlich der Kavernengebäude (Abb. 31). Die Lage des optimalen Modells ist sehr ähnlich zu den Modellen größter Wahrscheinlichkeit, wobei die Wahrscheinlichkeitsverteilung leicht linksschief ist und damit viele östliche Kavernenpositionen einschließt. 50% der wahrscheinlichen Modelle liegen östlich des auf dem Kavernengelände gelegenen, gewählten Modellierungsursprungs.

Die Tiefenbestimmung zeigt eine deutlich rechts-schiefe Wahrscheinlichkeitsverteilung und damit eine größere Unsicherheit hinsichtlich größerer Tiefen. 75% der Modelle liegen jedoch flacher als 1.5 km (Abb. 31b). Es bestehen keine erkennbaren Abhängigkeiten zwischen den Lokalisierungsparametern (Abb. 31a).

Die Volumenabnahme zeigt eine spitze, nicht-Gaussche Verteilung mit einer leichten Linksschiefe (Abb. 31b). Das 95%-Vertrauensintervall schließt die Werte von $8.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ bis $55.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ als Volumenabnahme ein. Die Schätzungen der Volumenabnahme und der Tiefe zeigen eine deutliche Abhängigkeit voneinander (Abb. 31a). Flache Modelle zeigen systematisch eine geringere Volumenabnahme als tiefe Modelle.

8.6 Einordnung der Optimierungsergebnisse

Trotz des geringen Signal-Rausch-Verhältnisses in den Bodenbewegungsdaten gelingt es in der gezeigten Modellierung deren Signalform im Gebiet Rönne mit einer Schrumpfung im Untergrund nahe an den tatsächlichen Kavernen gut nachzubilden (Abb. 29). Die abgeschätzte Tiefe von 1050 m ist etwas flacher als die bekannte Tiefenlage der Kavernen, deren Hohlräume sich ab Tiefen von etwa 1300 m über mehrere Zehnermeter hinab erstrecken.

Die geschätzte Volumenschrumpfung von $22.700 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ mit einem breiten Vertrauensintervall von $8.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ bis $55.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ liegt in der richtigen Größenordnung, wenn die oben gemachten Abschätzungen aus den Volumenmessungen in den Kavernen zugrunde gelegt werden. Es scheint eine leichte Unterschätzung der Volumenabnahme vorzuliegen. Die Modellergebnisse deuten weiterhin auf einen Schwerpunkt der Schrumpfungsvorgänge nahe der größten Kaverne K102 hin (Abb. 30). Für diese Kaverne zeigen Vermessungsdaten Schrumpfungen von etwa $9550 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ an, während die größten Schrumpfungsvorgänge einige hundert Meter westlich nahe der Kaverne K103 ($21.050 \text{ m}^3/\text{Jahr}$) erwartet werden. Die Parameterabhängigkeiten, die in Abbildung 31a dargestellt sind, zeigen, dass sowohl die westlichere Lokation nahe K103 als auch größere Tiefen und größere Volumenabnahmen im Bereich der angezeigten Modellunschärfe liegen. Es scheint trotz geringer Datenüberdeckung und geringem Signal-Rausch-Verhältnis eine bessere Sensitivität für die Lokation der Kavernen gegeben als angenommen.

Inwieweit die Modellierungsannahme horizontaler Schichtung die Modellergebnisse verzerrend beeinflusst, ist nicht ohne erhebliche Eingriffe in die Methode zu bewerten. Nur eine 2.5D oder 3D Modellierung zur Gegenüberstellung könnte hier Klarheit schaffen. Wir wissen, dass die Mächtigkeiten der elastischen Deckschichten in Richtung Osten und Westen zunehmen. Die Anlehnung unseres Mediummodells an die Bohrdaten der Kaverne 103 könnte eine leichte Unterschätzung der effektiven Deckschichtmächtigkeit geführt haben. Auswirkungen einer dadurch effektiv schwächeren Dachung der Kavernen könnten eine Unterschätzung sowohl der Tiefe als auch der Volumenabnahme in den Kavernen sein. Die Tendenz zur Unterschätzung der Volumenabnahme und der Tiefe bei der Untersuchung könnte auch andere Ursachen haben. Von Modellierungen unterirdischer Volumenprozesse bei vulkanischen Aktivitäten und auch bei Subrosionsprozessen mit Beobachtungen von Bodenverschiebungen ist dies beschrieben und teilweise erklärt worden (Holohan et al. [2017]). Demnach können zusätzlich zu einer elastischen Verformung der Deckschichten plastische Verformungen im Untergrund zur Bodenbewegung beitragen. Diese Prozesse finden in geringeren Tiefen statt und wirken sich entgegengesetzt und damit abschwächend auf die Bodenbewegung durch unterirdische Volumenabnahme aus. Solche Prozesse werden in unserem Modell nicht berücksichtigt und würden automatisch der Punktquelle zugeschlagen. Diese würde dadurch schwächer und flacher geschätzt (Holohan et al. [2017]).

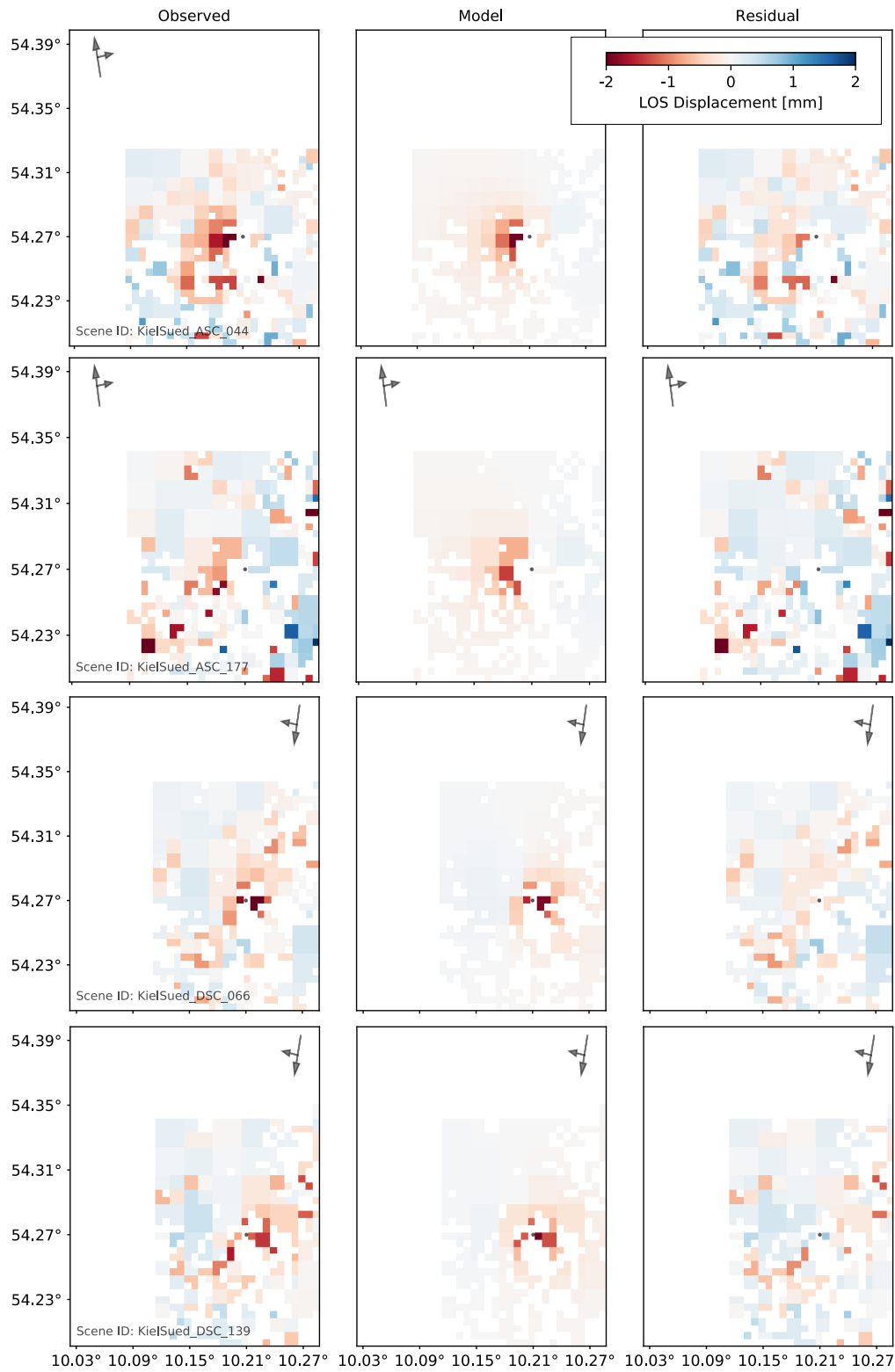


Abbildung 29: Vergleich der beobachteten (linke Spalte) und der berechneten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten (mittlere Spalte) und der Differenz von Beobachtungen und Modell (Residuen, rechte Spalte).

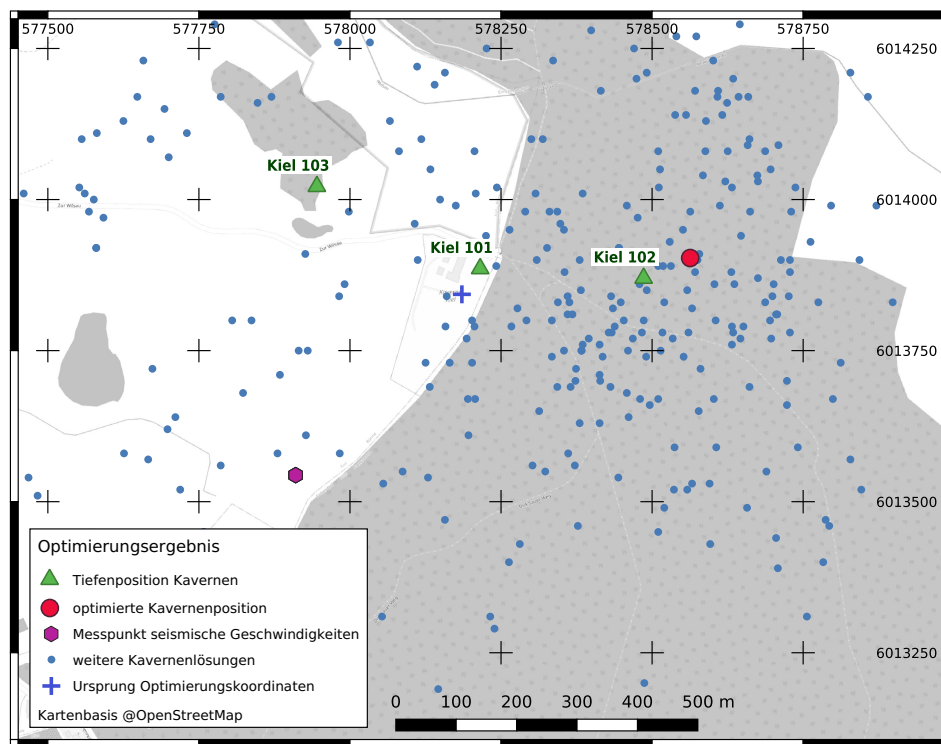


Abbildung 30: Horizontale Lage der Kavernen in der Tiefe, optimierte Kavernenposition der Modellierung und Streuung von 300 Kavernenpositionen unter Berücksichtigung der Datenfehler. Koordinaten sind in Metern in UTM, Zone 32.

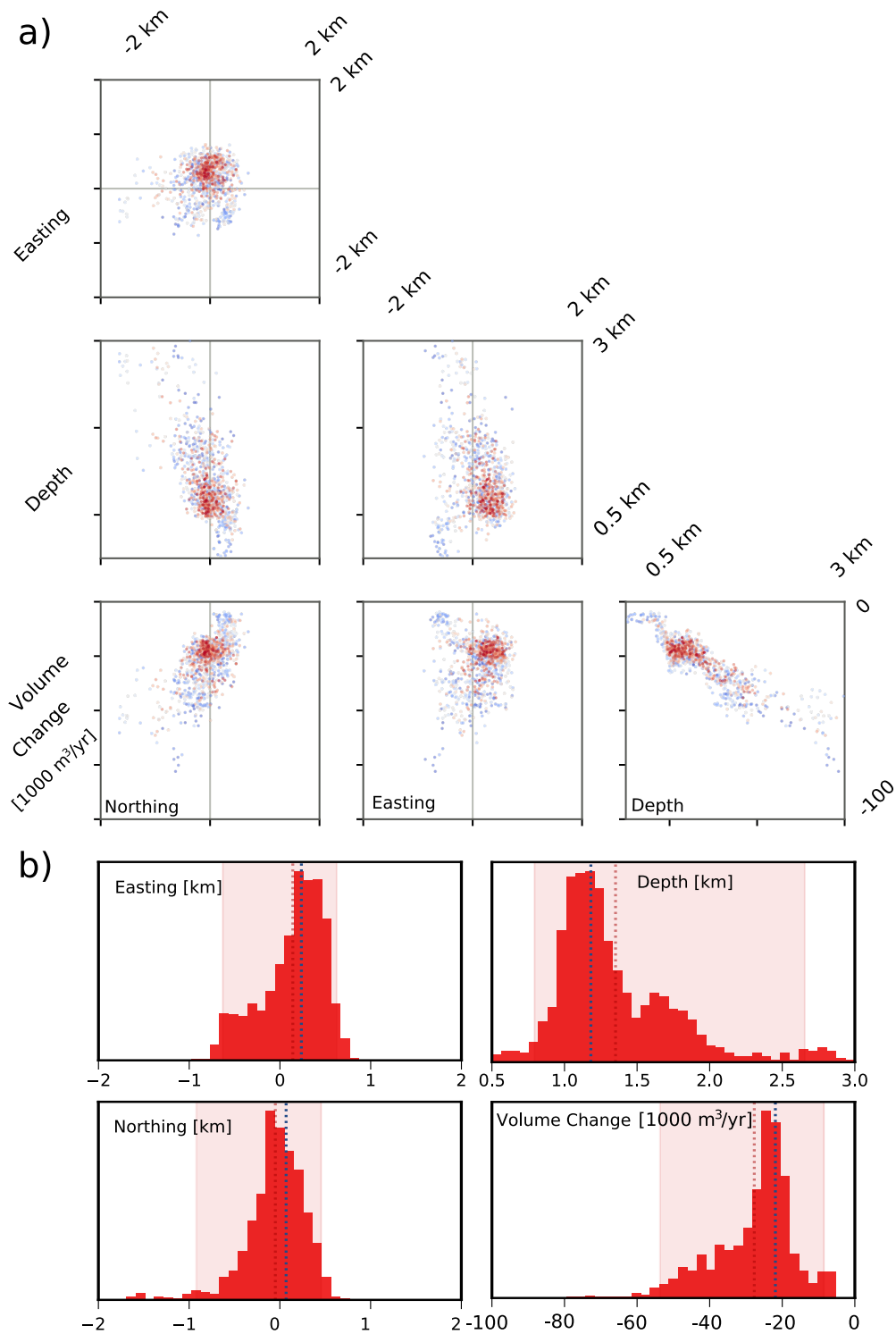


Abbildung 31: Verteilungen der wahrscheinlichen Kavernenmodelle. a) In Punktwolken dargestellte Modell-Ensembles visualisieren etwaige Abhängigkeiten zwischen Parametern. Die Punktfarbe grenzt besser angepasste Modelle (rot) gegenüber leicht schlechter angepassten Modellen (blau) ab. b) Histogramme zeigen die Häufigkeitsverteilungen einzelner Parameter. Die gestrichelten Linien markieren die Werte des am besten angepassten Modells (blau) und des Ensemble-Mittelwert (rot). Die blassrote Fläche zeigt das 95%-Vertrauensintervall der geschätzten Werte. Easting und Northing sind relative Positionen zu den Kavernengebäuden.

9 Zusammenfassung

Die Zusammenarbeit zwischen dem Geologischen Dienst SH (SGD) im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) bildet die Grundlage für eine systematische Überwachung der Seismizität in Schleswig-Holstein. Hierzu zählen der Betrieb eines seismologischen Stationsnetzes, eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung seismologischer Daten und eine Evaluierung und Klassifizierung beobachteter Ereignisse. Auf allen Feldern konnten seit Etablierung der Kooperation große Fortschritte erzielt werden.

Das seismologische Stationsnetz bestand im Jahr 2021 aus insgesamt 18 seismologischen Stationen, wobei acht das landesweite Stationsnetz und jeweils fünf zusätzliche Stationen auf Helgoland und um Bad Segeberg abbilden. Die Station Birkenmoor befindet sich aktuell in der Einrichtung und wird das landesweite Stationsnetz weiter stärken. Mit zunehmender Zahl an Stationen steigt auch der Aufwand für Betrieb und Wartung der Stationen, beides zahlt sich aber durch eine sehr hohe Datenverfügbarkeit von allen Stationen aus. Neben technischen Aspekten spielt auch die Qualitätskontrolle der seismologischen Daten eine wichtige Rolle im alltäglichen Betrieb des Messnetzes. In der Abdeckung seismologischer Stationen bestehen noch Lücken in Zentral-SH sowie in Nordfriesland.

Die Erfassung und Erstausswertung der seismologischen Daten erfolgt weitestgehend automatisiert, erfordert aber kontinuierliche Aufsicht, um technische Probleme frühzeitig erkennen und beheben zu können. In vielen Fällen ist dies per Fernwartung möglich, somit können Besuche einzelner Stationen auf das notwendige Mass reduziert werden. Es ist daher erstrebenswert, noch nicht online verfügbare Stationen durch Aufrüstung mit Mobilfunkmodems an die Echtzeitdatenübertragung anzubinden.

Die automatisierte Auswertung hat Ereignisse mit Magnituden ab etwa 3 zuverlässig erfasst, für schwächere Ereignisse bleibt eine manuelle Auswertung aber unabdingbar. Der sorgfältige Betrieb der Stationsnetze mit kontinuierlicher Wartung und Qualitätskontrolle resultiert in einer hohen Datenverfügbarkeit und -qualität, welche es bspw. am lokalen Netz von Bad Segeberg ermöglicht, Ereignisse mit Magnituden unter 1 zuverlässig detektieren zu können. Dies verdeutlicht, daß die Magnitudenschwelle der Vollständigkeit seismologischer Ereignisse im bestehenden Netz räumlich variabel ist. Auf Landesebene liegt sie aktuell bei etwa 2.5, wobei dies ein empirischer Wert ist. In Zukunft soll die Magnitude der Vollständigkeit regelmäßig quantifiziert und dessen Entwicklung durch den Ausbau des Stationsnetzes dargestellt werden.

Der Ereigniskatalog für Schleswig-Holstein enthält einige Ereignisse aus bekannten Quellregionen, wie der zentralen Nordsee und den Gasfördergebieten in Niedersachsen und Groningen (NL). Dazu enthält der Katalog auch stärkere Ereignisse im Norden Jütlands sowie

eine Vielzahl von anthropogen verursachten Ereignissen. Der Ereigniskatalog liefert einen wichtigen Beitrag zur umfassenden, regionalen Charakterisierung der Seismizität im südlichen Ostseeraum und bildet das Bindeglied zwischen den Katalogen der Erdbebendienste der Länder in Deutschland und der nationalen Dienste in Dänemark und Schweden.

Anthropogen erzeugte Ereignisse, v.a. Sprengungen, ermöglichen nicht nur eine regelmäßige Überprüfung der Funktionsfähigkeit der seismologischen Überwachung, sondern können auch dazu genutzt werden die Lokalisierungsgenauigkeit der seismologischen Lokalisierung zu quantifizieren, wenn Informationen zu den Sprenglokalisationen vorliegen. Für die Kieler Bucht liegt die Genauigkeit in der Epizentrallokation bei unter 10 km. Im Rahmen der Charakterisierung eines detektierten seismischen Ereignisses ist die Unterscheidung zwischen tektonischen, anderen natürlichen (z.B. Steinschlag, Donner) und anthropogenen Quellen (z.B. Sprengungen) nicht selten herausfordernd und stellt daher einen unersetzlichen Teil der manuellen Auswertung dar.

Am lokalen Bad Segeberg Netz konnten im Februar 2021 zum wiederholten Male eine Vielzahl von seismischen Ereignissen mit Magnituden bis zu etwa 1.5 detektiert werden. Das schwarmartige Auftreten dieser Ereignisse in Nachtstunden korreliert mit Perioden starken Frosts und wurde 2018 erstmals beobachtet. Darüberhinaus wurden in der Vergangenheit im Kalkberg auch wiederkehrend Ereignisse detektiert, die in der Wellenform dem 1997er Beben ähneln, deren Ursache aber nicht zweifelsfrei bestimmt werden konnte. Um die Ursachen für diese Ereignisse besser zu verstehen, wurde im Herbst 2021 ein temporäres Messnetz in der Kalkberghöhle eingerichtet, welches bis Frühjahr 2022 kontinuierlich registriert. Die Auswertung dieser Daten sollte weitere wichtige Hinweise zu möglichen Ursachen und Lokalisierungen dieser beiden grundlegend verschiedenen Ereignisse liefern. Die Auswertung des lokalen Netzes zeigt auch, daß das lokale Netz sehr gut geeignet ist, um ggf. auftretende tektonische Ereignisse auch mit sehr kleinen Magnituden zuverlässig zu erfassen.

Die Auswertung des lokalen Netzes auf Helgoland wurde in 2021 weiterentwickelt und in die kontinuierliche Auswertung eingebunden. Darüberhinaus zeigt eine Auswertung des Datenarchivs seit 2018 einerseits eine sehr hohe Anzahl an Detektionen die keiner individuellen Quelle zugeordnet werden können, sondern sich durch die Kopplung des Ozeans in den Untergrund ergeben. Andererseits können tektonische Ereignisse im Bereich der südwestlichen Nordsee durch die Auswertung sehr klar von diesen Detektionen getrennt werden und im Jahr 2021 aufgetretene Erdbeben in der Nordsee und den Niederlanden wurden zuverlässig detektiert. Eine Übertragung der Array-Analyse auf das lokale Bad Segeberg Netz würde weitere Möglichkeiten der Überwachung der Seismizität in Schleswig-Holstein und Umgebung eröffnen.

Ein wesentlicher Nebeneffekt der Charakterisierung von Seismizität ist die Beschreibung des Spannungszustands in der Erdkruste. Eine kurze Analyse verdeutlicht, daß der großräu-

mige Spannungszustand in Norddeutschland recht gut bestimmt ist. Gerade in SH bestehen aber aufgrund geringer Datenlage Unsicherheiten bei der Beschreibung lokaler Abweichungen, wie sie bspw. entlang von Salzstöcken entstehen können. Aus seismologischer Sicht war in der Vergangenheit die geringe Stationsüberdeckung das wesentliche Manko, welches eine Auswertung der wenigen bedeutsamen Ereignisse für Herdmechanismen verhinderte. Der Ausbau des Stationsnetzes in der Kooperation SGD-IfG in den letzten Jahren liefert aber bereits jetzt die Datengrundlage, um bei zukünftigen Ereignissen den Spannungszustand der Erdkruste auch in SH lokal zu analysieren.

Bei unseren Untersuchungen von Bodenbewegungsgeschwindigkeiten über den Kavernen in Kiel-Rönne können wir bei recht geringen Geschwindigkeiten von weniger als 5 mm/Jahr einen konsistenten räumlichen Zusammenhang erkennen. Aus den unterschiedlichen Blickrichtungen der Satelliten, von ascending und descending Orbits, werden neben vertikalen Bewegungen auch horizontale Bodenbewegungen erkennbar. Diese Bodenbewegungen zeigen eine geringe, jedoch stetige Bodenabsenkung mit einem Maximum nahe der Kavernen und eine horizontale Bewegung in Richtung der Kavernen an. In einer Modellierung wird gezeigt, dass diese Bodenbewegungen in guter Annäherung mit der Schrumpfung der Kavernen in der Tiefe erklärt werden können.

Literatur

- C. Brandes, T. Plenefisch, D. C. Tanner, N. Gestermann, and H. Steffen. Evaluation of deep crustal earthquakes in northern Germany - Possible tectonic causes. *Terra Nova*, 31(2):83–93, feb 2019. doi: 10.1111/ter.12372.
- G. Ekström, M. Nettles, and A. M. Dziewonski. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201(0):1 – 9, 2012. ISSN 0031-9201. doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920112000696>.
- EMSC. European-Mediterranean Seismological Centre, 2021. URL <https://www.emsc-csem.org>.
- GFZ Potsdam and Gempa GmbH. The SeisComP seismological software package, 2008. URL <http://www.seiscomp.de>. Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH.
- G. Grünthal, D. Stromeyer, K. Wylegalla, R. Kind, R. Wahlström, X. Yuan, and G. Bock. The Mw 3.1–4.7 earthquakes in the southern Baltic Sea and adjacent areas in 2000, 2001 and 2004. *Journal of Seismology*, 12(3):413–429, apr 2008. doi: 10.1007/s10950-008-9096-0.
- O. Heidbach, M. Rajabi, X. Cui, K. Fuchs, B. Müller, J. Reinecker, K. Reiter, M. Tingay, F. Wenzel, F. Xie, M. O. Ziegler, M.-L. Zoback, and M. Zoback. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744:484–498, oct 2018. doi: 10.1016/j.tecto.2018.07.007.
- S. Heimann, M. Isken, D. Kühn, H. Sudhaus, A. Steinberg, H. Vasyura-Bathke, S. Daout, S. Cesca, and T. Dahm. Grond - A probabilistic earthquake source inversion framework. Technical report, GFZ Potsdam, 2018. URL <http://pyrocko.org/grond/docs/current/>.
- E. P. Holohan, H. Sudhaus, T. R. Walter, M. P. Schöpfer, and J. J. Walsh. Effects of host-rock fracturing on elastic-deformation source models of volcano deflation. *Scientific reports*, 7(1):1–12, 2017.
- M. Isken, H. Sudhaus, S. Heimann, A. Steinberg, S. Daout, and H. Vasyura-Bathke. Kite - Software for Rapid Earthquake Source Optimisation from InSAR Surface Displacement. Technical report, GFZ Potsdam, 2017.
- S. Jónsson, H. Zebker, P. Segall, and F. Amelung. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements by Sigurjo. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4): 1377–1389, 2002.

- G. Leydecker. Erdbebenkatalog fuer Deutschland mit Randgebieten fuer die Jahre 800 - 2008 (Earthquake catalogue for Germany and adjacent areas for the years 800 to. *Geologisches Jahrbuch*, E 59, 2011.
- T. Meier and A. Omlin. Bericht zur Forschungskooperation 2015: Ortungsgenauigkeit und Detektion von seismischen Ereignissen in Schleswig-Holstein und Umgebung. Technical report, CAU Kiel, 2016.
- A. K. Ortmann. Private Wetterstation Bad Segeberg, 2022. URL <http://wetterstation-badsegeberg.de/>. Zuletzt abgerufen am 7.2.2022.
- K. Reiter, O. Heidbach, J. Reinecker, B. Müller, and T. Röckel. Spannungskarte Deutschland 2015. *Erdöl Erdgas Kohle*, 131(11):437–442, 2015.
- SWKiel-Speicher-GmbH. Technische Daten der Speicher, 2022. URL <https://www.swkiel-speicher.de/speicher/speicherdaten/unser-speicher>. Zuletzt abgerufen am 14. Februar 2022.
- C. Weidle, H. Sudhaus, T. Meier, and A. Omlin. Bericht zur Kooperation 2018 - Status der Erdbebenüberwachung für Schleswig-Holstein und Umgebung - erste Ergebnisse des seismischen Netzes bei Bad Segeberg. Technical report, CAU Kiel, 2019.
- C. Weidle, H. Sudhaus, T. Meier, and A. Omlin. Bericht zur Kooperation 2019 - Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung. Technical report, CAU Kiel, 2020.
- C. Weidle, H. Sudhaus, T. Meier, and A. Omlin. Bericht zur Kooperation 2020 - Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung. Technical report, CAU Kiel, 2021.
- Wikipedia. Ausschließliche Wirtschaftszone, 2021. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Ausschlie%C3%9Fliche_Wirtschaftszone.

A Ereigniskatalog für 2021

Tabelle A.1: Tektonische und selektierte nicht-tektonische seismische Ereignisse im Jahr 2021 in Schleswig-Holstein und Umgebung. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2021-01-01 10:22:05	54.2000	7.9000	0.0	1.4	North Sea	sonic blast
2021-01-02 15:04:29	54.2000	7.9000	0.0	1.4	North Sea	sonic blast
2021-01-13 00:13:08	56.7203	8.2828	56.9	3.5	Denmark	earthquake
2021-01-16 01:54:05	54.2000	7.9000	0.0	2.1	North Sea	sonic blast
2021-01-16 19:23:31	56.9381	7.6323	74.4	3.4	North Sea	earthquake
2021-01-17 03:04:45	58.7176	10.9689	7.2	3.6	Sweden	earthquake
2021-01-23 18:13:12	54.0000	13.0000	0.0	2.7	Germany	meteorite
2021-01-31 01:35:32	53.9359	10.3139	0.0	0.6	Northern Friesland	ice quake
2021-01-31 22:51:40	53.9612	10.3228	0.0	0.6	Germany	ice quake
2021-01-31 23:27:42	53.9612	10.3228	0.0	0.6	Germany	ice quake
2021-02-01 00:19:36	53.9612	10.3228	0.0	0.6	Germany	ice quake
2021-02-01 15:07:24	58.3147	11.5592	0.0	2.8	Sweden	explosion
2021-02-11 09:22:23	54.1061	13.6928	0.0	2.7	Nordwestmecklenburg	atmospheric event
2021-02-11 22:38:28	53.9394	10.3434	0.0	0.5	Segeberg	ice quake
2021-02-12 01:10:00	53.9361	10.3169	1.0	0.8	Northern Friesland	ice quake
2021-02-12 01:31:31	53.9612	10.3228	0.0	0.9	Northern Friesland	ice quake
2021-02-12 22:23:31	53.9612	10.3228	0.0	1.0	Segeberg	ice quake
2021-02-13 00:36:05	53.9200	10.3200	0.0	0.6	Northern Friesland	ice quake
2021-02-13 01:07:53	53.9200	10.3200	0.0	0.6	Northern Friesland	ice quake
2021-02-13 03:18:54	53.9200	10.3200	0.0	0.6	Segeberg	ice quake
2021-02-13 05:13:50	53.9612	10.3228	0.0	0.5	Segeberg	ice quake
2021-02-13 16:10:37	53.9200	10.3200	0.0	1.1	Segeberg	ice quake

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2021 in Schleswig-Holstein und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2021-02-13 19:57:28	53.9491	10.3265	0.0	0.4	Segeberg	ice quake
2021-02-13 22:59:08	53.9491	10.3265	0.0	0.8	Segeberg	ice quake
2021-02-13 23:48:20	53.9200	10.3200	0.0	0.7	Northern Friesland	ice quake
2021-02-13 23:55:56	53.9491	10.3265	0.0	0.5	Segeberg	ice quake
2021-02-14 00:07:18	53.9200	10.3200	0.0	0.6	Northern Friesland	ice quake
2021-02-14 00:18:33	53.9491	10.3265	0.0	0.3	Segeberg	ice quake
2021-02-14 01:15:46	53.9491	10.3265	0.0	0.9	Segeberg	ice quake
2021-02-14 01:48:20	53.9200	10.3200	0.0	1.1	Northern Friesland	ice quake
2021-02-14 02:18:32	53.9491	10.3265	0.0	0.5	Segeberg	ice quake
2021-02-14 04:03:42	53.9491	10.3265	0.0	0.6	Segeberg	ice quake
2021-02-14 16:09:09	53.9200	10.3200	0.0	0.8	Northern Friesland	ice quake
2021-02-15 01:45:32	53.9200	10.3200	0.0	0.7	Northern Friesland	ice quake
2021-02-25 17:45:16	54.2000	13.6000	0.0	2.4	Nordwestmecklenburg	atmospheric event
2021-03-10 19:15:13	54.7544	10.6415	0.0	1.9	Danmark	explosion
2021-03-18 02:42:52	54.1781	7.9058	0.0	1.1	Northern Friesland	sonic blast
2021-03-18 04:27:26	54.1758	7.9076	0.0	1.1	Northern Friesland	sonic blast
2021-03-27 19:58:14	56.2200	10.1100	0.0	2.8	Denmark	meteorite
2021-04-07 04:31:00	54.1700	7.9000	0.0	1.6	Northern Friesland	sonic blast
2021-04-09 22:11:13	54.1800	7.9000	0.0	1.2	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-04-10 00:17:42	53.9315	10.3195	0.0	0.2	Northern Friesland	rock burst
2021-04-14 16:35:15	54.9600	14.8240	0.0	2.4	Greater Bornholm	explosion
2021-05-17 09:20:35	55.6165	12.8909	2.1	2.5	Denmark	earthquake
2021-06-05 21:04:52	54.1838	7.8973	0.0	0.9	Helgoland Umgebung	sonic blast

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2021 in Schleswig-Holstein und Umgebung (Fortsetzung).
Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2021-06-17 23:55:47	53.9356	10.3170	0.0	-0.1	Segeberg	rock burst
2021-06-19 01:03:52	53.3412	6.0709	5.0	3.1	The Netherlands	earthquake
2021-06-26 11:23:15	54.3700	13.2669	0.0	2.1	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-06-30 07:21:37	54.3700	13.2669	0.0	1.8	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-07-04 17:25:17	54.2000	7.9000	0.0	0.7	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-07-06 13:59:05	54.2000	7.9000	0.0	1.5	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-07-09 22:59:32	54.6126	13.3956	0.0	1.7	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-12 05:47:10	54.1874	7.8954	0.0	1.6	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-07-12 14:16:29	54.6126	13.3956	0.0	1.7	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-13 11:40:49	54.6126	13.3956	0.0	1.6	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-13 12:57:35	54.6126	13.3956	0.0	1.5	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-13 13:22:55	54.6126	13.3956	0.0	1.5	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-14 09:53:51	54.2000	7.9000	0.0	1.3	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-07-17 09:21:07	54.6126	13.3956	0.0	2.0	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-19 06:34:18	54.6126	13.3956	0.0	1.6	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-19 14:06:28	54.6126	13.3956	0.0	1.7	Mecklenburg-Vorpommern	explosion
2021-07-21 20:49:27	52.8675	8.7015	19.1	2.3	Niedersachsen	earthquake
2021-07-31 21:37:56	54.2000	7.9000	0.0	1.7	Helgoland Umgebung	NULL
2021-08-06 12:49:58	54.6244	13.3170	0.0	2.9	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-06 13:04:00	54.5510	13.3200	0.0	2.3	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-07 11:45:01	54.5510	13.3200	0.0	2.6	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-07 11:47:51	54.5510	13.3200	0.0	2.6	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-07 22:09:02	54.5500	13.3100	0.0	1.1	Vorpommern-Rügen	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2021 in Schleswig-Holstein und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2021-08-07 22:30:59	54.5500	13.3100	0.0	1.4	Vorpommern-Rügen	earthquake
2021-08-13 11:48:32	54.5510	13.3200	0.0	2.6	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-13 11:49:52	54.5510	13.3200	0.0	1.8	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-13 11:51:40	54.5510	13.3200	0.0	2.3	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-13 12:39:08	54.5510	13.3200	0.0	2.5	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-13 13:05:38	54.5477	13.3214	11.0	2.1	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-13 13:22:32	54.5477	13.3214	0.0	2.5	Vorpommern-Rügen	explosion
2021-08-20 20:36:21	54.7624	4.5700	10.5	3.8	North Sea	earthquake
2021-08-25 02:45:21	54.2000	7.9000	0.0	1.0	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-08-25 03:10:30	54.2000	7.9000	0.0	0.9	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-09-07 00:12:28	54.2000	7.9000	0.0	1.1	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-09-13 01:22:54	52.9890	9.2114	15.3	3.1	Niedersachsen	earthquake
2021-09-23 12:58:46	54.2000	7.9000	0.0	1.7	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-10-04 06:27:27	54.2000	7.9000	10.0	1.6	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-11-01 21:32:34	54.2000	7.9000	0.0	1.5	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-11-15 10:00:14	54.7074	10.8746	5.7	2.3	Germany	explosion
2021-11-15 11:51:04	54.7669	10.6472	1.1	2.2	Danmark	explosion
2021-11-15 13:15:16	54.7285	10.6776	8.1	2.3	Danmark	explosion
2021-11-15 15:36:46	54.6855	10.7638	8.2	2.4	Germany	explosion
2021-11-16 00:46:48	53.3055	6.6633	5.0	3.2	The Netherlands	earthquake
2021-11-16 17:12:58	54.6011	10.8479	11.0	1.9	Germany	explosion
2021-12-04 00:50:28	54.2000	7.9000	10.0	1.5	Helgoland Umgebung	sonic blast
2021-12-24 23:41:36	54.2000	7.9000	10.0	1.3	Helgoland Umgebung	earthquake

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2021 in Schleswig-Holstein und Umgebung (Fortsetzung).
Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2021-12-25 23:22:41	53.9395	10.3205	10.0	0.6	Segeberg	ice quake
2021-12-25 23:35:02	53.9395	10.3205	10.0	0.4	Segeberg	ice quake
2021-12-26 01:40:25	53.9395	10.3205	10.0	0.2	Segeberg	ice quake
2021-12-26 02:54:20	53.9395	10.3205	10.0	0.4	Segeberg	ice quake
2021-12-26 05:32:48	53.9458	10.3161	10.0	0.8	Segeberg	ice quake
2021-12-26 22:11:20	53.9458	10.3161	10.0	0.9	Segeberg	ice quake
2021-12-26 23:33:40	54.1474	12.5402	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	earthquake
2021-12-27 01:09:31	53.9458	10.3161	10.0	0.7	Segeberg	ice quake
2021-12-27 01:15:17	53.9458	10.3161	10.0	0.5	Segeberg	ice quake
2021-12-31 09:41:44	54.1857	7.8967	10.0	1.4	Helgoland Umgebung	explosion
2021-12-31 11:37:57	54.1857	7.8967	10.0	1.8	Helgoland Umgebung	explosion

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht seismischer Stationen in Norddeutschland. Permanentstationen (Dreiecke) in SH und MV werden vom IfG (grün) und der BGR und GEOFON (GFZ Potsdam) (orange) betrieben, in SH immer in Kooperation mit dem IfG. Lokale Netze des IfG (gelb) werden in Kooperation mit dem SGD (Bad Segeberg Netz) und der BGR (Helgoland) betrieben.	3
2	Dokumentation der Erdarbeiten zur Erstellung des Bohrlochs der zukünftigen Station Birkenmoor.	5
3	Verteilung aller in 2020 am Datenzentrum des IfG detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5, welche vollautomatisch vom System prozessiert wurden.	9
4	Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen in SH und Umgebung.	9
5	Helicorder Darstellung zur manuellen Durchsicht von täglichen Wellenformen. Markiert ist ein regionales Erdbeben bei Groningen (NL, schwarzer Kreis) und eine Sprengung in der Kieler Bucht (roter Kreis). Regelmäßige Signale an der Station BSEG etwa zu den Minuten 5, 25, 35 und 55 korrelieren mit dem Busfahrplan an der Nordseite des Kalkbergs.	10
6	Ereignisse um Schleswig-Holstein im Jahr 2021, Quelle: EMSC [2021]. Die Landesgrenzen von SH und MV (dunkelblau) sind ebenso dargestellt, wie die AWZ Grenzen in der Nord- und Ostsee (blau) nach Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (s. Wikipedia [2021]).	12
7	Übersichtskarte der in 2020 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.	13
8	Das Ereignis vom 25.12.2021, 0:41 Uhr Ortszeit (UTC+1) aufgezeichnet auf Helgoland.	15
9	Status Bad Segeberg Netz 2021.	18
10	Übersichtskarte des Segeberger Kalkberg. (Schautafel am Ausgang der Höhle (Foto: D. Schulte-Kortnack). Markiert sind die Position des permanenten Seismometers im Fliegengang (rot) und die im Winterhalbjahr 2021/22 installierten zusätzlichen Geofone (blau).	18
11	Detektionen am lokalen Bad Segeberg Netz. Histogramme mit Schrittweite 3 Tage.	19
12	Wellenform eines Ereignisses am 14.2.2021 an den Stationen Kalkberg, Stipsdorf, WZV und Klein-Rönnau. Dargestellt ist die Vertikalkomponente, an der Station WZV (BSEA3) die horizontale Ost-Komponente.	20
13	Karte des Helgoland Arrays (HELGA)	22
14	Detektionen am HELGA-Array von Anfang 2018 bis Ende 2021.	23
15	Erdbeben am 20.8.2021 in der Nordsee, Magnitude 3.5 (EMSC [2021]). . . .	26

16	Beams für zwei Erdbeben bei Groningen (NL). Bildbeschreibung wie in Abb. 15b.	26
17	Überblick verschiedener Studien zum Spannungszustand der Erdkruste in Norddeutschland. Horizontale Hauptspannungsrichtungen in (a) und (b) sind ergänzt durch Herdmechanismen von Erdbeben in (b) und (c).	28
18	Bodenbewegung an den Kavernenspeichern in Etzel, Skala ± 30 mm/a. . . .	29
19	Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Harsefeld, Skala ± 5 mm/a	30
20	Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Bernburg, Skala ± 5 mm/a	30
21	Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Bad Lauchstädt, Skala ± 5 mm/a	31
22	Bodenbewegungen an den Kavernenspeichern in Kiel-Rönne, Skala ± 5 mm/a, mit eingehängter Vergrößerung des Betriebsgeländes	31
23	Zeitreihe des Rückstreuers mit der höchsten Setzungsrate auf dem Betriebsgelände der Kavernen Kiel-Rönne	32
24	PS Punkte der jeweils beiden ascending Stapel der BBD TL3 (oben) und descending Stapel (unten) mit temporärer Kohärenz von mindestens 0.87, dargestellt in einer UTM Projektion (Zone 32N).	33
25	Detaildarstellung der Bodenbewegungsgeschwindigkeiten an den Kavernengebäuden des Kieler Gasspeichers.	35
26	Dreischicht Modell im Bereich der Kavernen. Geschwindigkeiten sind in einer nahen 3D P-Wellen-Seismik ermittelt worden.	36
27	Vorwärtsmodellierung der Bodenbewegungsgeschwindigkeit über einer Punktquellenschumpfung in 1200 m Tiefe in einem dreilagigen, elastisch-viscoleastischen Medium (Abb. 26). Separat gezeigt sind einzeln drei Komponenten der dreidimensionalen Bodenbewegung: Ost-, Nord- und Aufwärtsbewegung (oben) sowie die Projektionen in die Satellitenblickrichtung (LOS) von ascending und descending Orbits (unten). Der mittlere LOS Einfallswinkel in dieser Modellierung ist 40° . Schwarze und weiße Kreuze markieren die horizontale Position der Punktquelle.	37
28	Räumlich gemittelten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten mittels Quadtree subsampling. Der größere dunkelgraue Punkt markiert die mittlere Lokation der Bohrungen von K101 und K102. Die Einfallswinkel der Radarstrahlung (Line-of-Sight) und damit die vertikale Projektionsrichtung der verschiedenen Messungen auf dem Betriebsgelände der Kavernenspeicher betragen 34.6° für ASC_044, 42.6° für ASC_177, 40.6° für DSC_066 und 32.3° DSC_139.	38
29	Vergleich der beobachteten (linke Spalte) und der berechneten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten (mittlere Spalte) und der Differenz von Beobachtungen und Modell (Residuen, rechte Spalte).	41

30	Horizontale Lage der Kavernen in der Tiefe, optimierte Kavernenposition der Modellierung und Streuung von 300 Kavernenpositionen unter Berücksichtigung der Datenfehler. Koordinaten sind in Metern in UTM, Zone 32.	42
31	Verteilungen der wahrscheinlichen Kavernenmodelle. a) In Punktwolken dargestellte Modell-Ensembles visualisieren etwaige Abhängigkeiten zwischen Parametern. Die Punktfarbe grenzt besser angepasste Modelle (rot) gegenüber leicht schlechter angepassten Modellen (blau) ab. b) Histogramme zeigen die Häufigkeitsverteilungen einzelner Parameter. Die gestrichelten Linien markieren die Werte des am besten angepassten Modells (blau) und des Ensemble-Mittelwert (rot). Die blassrote Fläche zeigt das 95%-Vertrauensintervall der geschätzten Werte. Easting und Northing sind relative Positionen zu den Kavernengebäuden.	43

Tabellenverzeichnis

1	Signifikante Erdbeben im Jahr 2021 (EMSC)	11
2	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung (IfG)	16
3	Verwendete Kavernendaten aus den Datenblättern der SWKiel Speicher GmbH (Volumenmessungen, SWKiel-Speicher-GmbH [2022]).	34
A.1	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung (IfG)	50