


Status der Erdbebenüberwachung für Schleswig-Holstein und Umgebung

Bericht zur Kooperation 2022

Dr. Christian Weidle , Olav Cornelius, Arne Schmidt
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
*Geologischer Dienst SH, Landesamt für Umwelt,
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek*

Beiträge zur seismologischen Überwachung in Norddeutschland

Nº 07, 2023

Weidle, C. et al.: Status der Erdbebenüberwachung für Schleswig-Holstein und Umgebung: Bericht zur Kooperation 2022.

ISSN 3052-7236

DOI 10.38071/2025-00973-0

Herausgegeben von

Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Veröffentlicht am 28. April 2023,

... online am 12. August 2025



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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Status Stationsnetz 2022	3
2.1	Permanentstationen	3
2.1.1	Installation der Station Birkenmoor - KQ.BIRK	4
2.2	Lokale Stationsnetze	7
2.3	Arbeiten ausserhalb SH	7
2.4	Fazit	8
3	Status Datenzentrum - Erfassung und Auswertung seismologischer Daten	9
3.1	AD (<i>Amplitude Decay</i>) Detektor	10
4	Ereignisübersicht 2022	13
4.1	Überregionale Seismizität	13
4.2	Seismische Ereignisse in SH	14
4.3	Andere relevante Ereignisse	16
5	Das lokale Netz um Bad Segeberg	20
5.1	Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes	20
5.2	Temporäres Experiment in der Kalkberghöhle	22
5.2.1	Aufbau des untertägigen Stationsnetzes	23
5.2.2	Vibrationsseismisches Experiment	25
5.2.3	Vorläufige Bewertung des passiv seismischen Experiments	29
6	Auswertung des Helgoland Array	32
6.1	Felsabbrüche auf Helgoland	35
7	Zusammenfassung	39
	Literatur	41
A	Ereigniskatalog für 2022	42
B	Abbildungsverzeichnis	57
C	Tabellenverzeichnis	58

1 Einleitung

Die Zusammenarbeit zwischen dem Staatlichen Geologischen Dienst SH (SGD) im Landesamt für Umwelt (LfU) und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel umfasst zum einen die Durchführung und Weiterentwicklung der regionalen, seismologischen Überwachung von Schleswig-Holstein, zum anderen die Durchführung von dezidierten Forschungsvorhaben zur Untersuchung lokaler Fragestellungen.

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. 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) sind eine unverzichtbare Komponente zur Sicherstellung einer hohen Datenverfügbarkeit von allen Stationen in SH. Am Standort Birkenmoor wurde die seit 2019 als Teststation betriebene seismologische Station als neue Bohrlochstation verstetigt. Die Installation im Bohrloch führt zu einer verbesserten Datenqualität (siehe Kapitel 2).

Die seismologische Überwachung eines Landes mittels eines so umfangreichen Stationsnetzes ist kosteneffizient nur durch automatisierte Datenerfassungs- und auswertesysteme möglich, welche kontinuierlich überwacht und bei Bedarf angepasst werden müssen. In Erweiterung zu den bestehenden Auswerteroutinen wurde im Jahr 2022 ein zusätzlicher, an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) entwickelter, Detektionsalgorithmus am IfG implementiert und an die zur Verfügung stehenden Daten und die Zielregion angepasst. Dadurch konnte die Detektion seismischer Ereignisse in SH und den angrenzenden Gebieten deutlich verbessert werden. Der neue Detektor erkennt seismische Ereignisse zuverlässig und trägt dazu bei, die routinemäßige Auswertung effizienter zu gestalten. Dennoch bleibt zur vollständigen Erfassung schwacher Ereignisse eine tägliche, manuelle Datendurchsicht weiterhin unverzichtbar (siehe Kapitel 3).

Tektonische Ereignisse mit Relevanz für SH im Jahr 2022 waren Erdbeben in der zentralen Nordsee, sowie bei Groningen (NL) und in Niedersachsen. Diese Ereignisse mit Magnituden bis zu 3.5 wurden sowohl vom landesweiten, als auch von den lokalen Stationsnetzen unabhängig voneinander zuverlässig detektiert. Darüberhinaus wurden, besonders von dem neu eingeführten Detektor, eine Vielzahl von seismischen Ereignissen mit Magnituden unter 2 in und um Schleswig-Holstein detektiert. Diese Ereignisse sind fast ausschließlich anthropogenen Aktivitäten zuzuordnen. Anhand von Sprengversuchen im Sperrgebiet vor Schönhagen, welche seit 2019 erstmalig wieder durchgeführt wurden, kann die Genauigkeit der seismologischen Lokalisierung auf ca. 5 – 10 km im Bereich der Kieler Bucht quantifi-

ziert werden (siehe Kapitel 4).

Im Bereich des Segeberger Kalkbergs kommt es immer wieder zu kleineren Ereignissen mit einer hohen Wellenformähnlichkeit mit dem Erdbeben vom Oktober 1997. Um die Ursache für diese wiederkehrenden Ereignisse weiter zu untersuchen, wurde im Winter 2021/22 ein untertägiges, passives, seismologisches Netz in der Kalkberghöhle installiert. Dieses Experiment wurde durch ein aktives, vibrationsseismisches Experiment ergänzt. Letzteres soll dabei helfen, sowohl potentielle Ungenauigkeiten in der Lokalisierung der untertägigen Stationen zu reduzieren, als auch einen Richtwert für die Geschwindigkeit der seismischen Wellenausbreitung im Bereich der Kalkberghöhle zu liefern. Für die Auswertung des passiven seismischen Experiments wurden für eine erste Einschätzung der erfassten Daten zunächst bestehende Detektionsroutinen genutzt (siehe Kapitel 5).

Das Helgoland-Array dient zuvorderst der Überwachung schwacher seismischer Ereignisse im Bereich der Nordsee. Im Rahmen der Array-Auswertung wurden die Parameter für die Detektion von seismischen Ereignissen weiter optimiert und Detektionen von bekannten Erdbeben in der Region analysiert. Darüberhinaus zeichneten die Stationen des Helgoland-Arrays einen bedeutsamen Felsabbruch am 29. April 2022 an der Nordspitze Helgolands auf. Die aufgezeichneten Wellenformen, wie auch weitere Detektionen im Laufe des Jahres und eine manuelle Durchsicht der Archivdaten von der Station HLG beleuchten das Potential der seismischen Überwachung von erosiven Prozessen an der Helgoländer Steilküste (siehe Kapitel 6).

2 Status Stationsnetz 2022

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

2.1 Permanentstationen

Das permanente seismologische Netz mit acht Stationen in Schleswig-Holstein 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 2022 aus den Stationen HLG (Helgoland), BSEG (Bad Segeberg), SKMB (Sankelmark bei Flensburg), KUDEN (Kuden, Dithmarschen), KHUS (Kellenhusen, Ostholstein), BUESM (Büsum), BIRK (Birkenmoor, s. Kap. 2.1.1) und QBN (Quickborn), wobei letztere bis Ende 2022 noch nicht ans Datenzentrum angebunden war (erfolgte aber im März 2023), sondern die kontinuierlichen Wellenformdaten lokal registrierte. (Abb. 1).

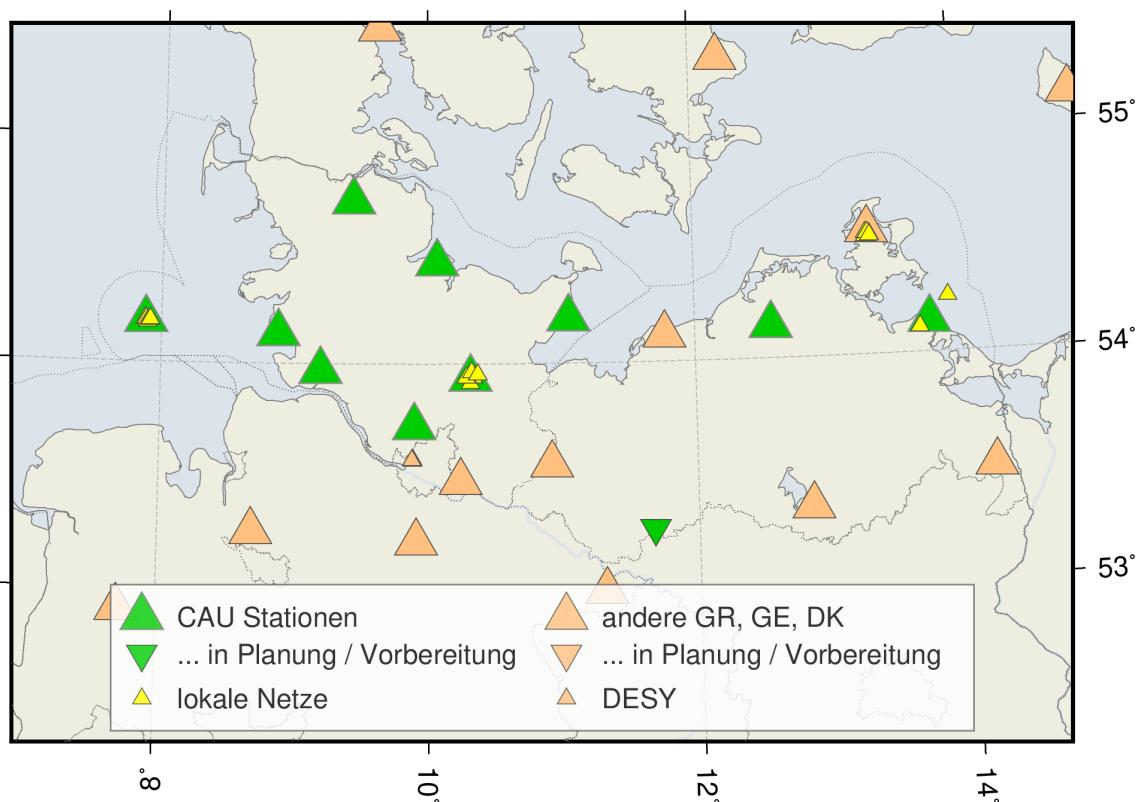


Abbildung 1: Übersicht seismologischer Stationen in Norddeutschland. Permanentstationen (Dreiecke) in SH und MV werden vom IfG (grün) und der BGR und GEOFON (GFZ Potsdam) (orange) betrieben, in SH immer in Kooperation mit dem SGD. Lokale Netze des IfG (gelb) werden in Kooperation mit dem SGD (Bad Segeberg)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

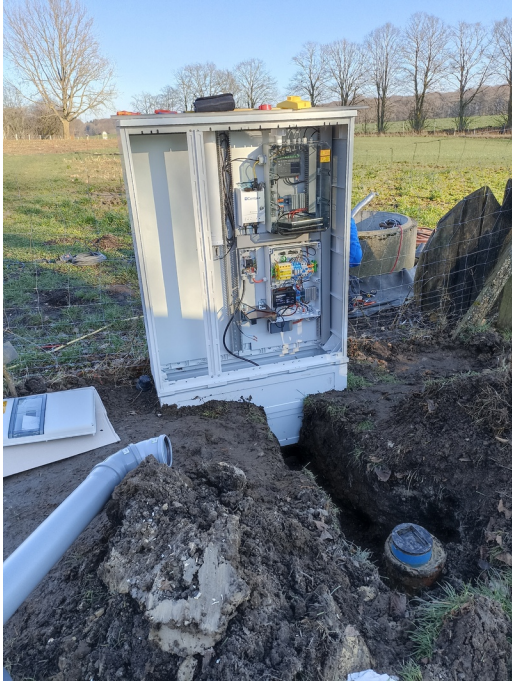
An den Stationen HLG, BSEG, KUDEN, SKMB und BUESM lief der Betrieb das ganze Jahr über störungsfrei, die Datenvollständigkeit an diesen Standorten ist über 99 %. Diese hohe Datenvollständigkeit ist das Ergebnis regelmäßiger Wartung der Stationen, sowohl vor Ort als auch aus der Ferne, und eine zeitnahe Behebung von auftretenden Fehlern. An der Station KHUS gab es im Frühjahr einen mehrwöchigen Datenausfall, hier liegt die Vollständigkeit bei 96%. An der Station QBN entstanden aufgrund der Stromversorgung mit Photovoltaik - wie auch in den Vorjahren - im Winter regelmäßige Datenlücken, die Datenvollständigkeit dieser Station lag 2022 bei 86%. Zu Beginn des Jahres 2023 wurde die Stromversorgung der Station erweitert, damit zukünftig ein kontinuierlicher Betrieb auch in den Wintermonaten, sowie eine Datenübertragung in Echtzeit möglich wird.

2.1.1 Installation der Station Birkenmoor - KQ.BIRK

Bereits seit 2019 führte das IfG auf Gut Birkenmoor Testmessungen mit einer temporär eingerichteten Station durch. Im Jahr 2020 konnte mit den Eigentümern eine Vereinbarung zur dauerhaften Etablierung einer seismologischen Station getroffen und im Sommer 2021 vom SGD eine Bohrung für die zukünftige Station erstellt werden (Weidle et al. [2022]).

Am 28. Februar 2022 wurde die Station seitens der BGR und mit Unterstützung von IfG und SGD eingerichtet (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. Das bis ca. 23 m u.G. verrohrte Bohrloch wurde mit etwas Glasperlen angefüllt und das Nanometrics Trillium Compact 120s Seismometer an einem Stahlseil in das Bohrloch herabgelassen. Nach einer Überprüfung der korrekten vertikalen Ausrichtung des Sensors am Boden des Bohrlochs, wurde das Seismometer mit Glasperlen weiter eingesandet um eine dauerhafte Stabilität des Sensors sicherzustellen.

Parallel zur Installation des Seismometers im Bohrloch wurde mit einem zweiten Seismometer an der Oberfläche eine Vergleichsmessung durchgeführt. Das Oberflächenseismometer wurde hierfür mit einem Kreiselkompass nach Norden ausgerichtet, um mit den Vergleichsdaten die horizontale Orientierung des Bohrlochseismometers bestimmen zu können. In der Auswertung wird hierfür die horizontale Partikelauslenkung an der Oberfläche (Nord-Ost Koordinaten) mit der im Bohrloch (Y-X Koordinaten) verglichen und durch Rotation des Y-X Koordinatensystems der Rotationswinkel bestimmt, an dem das Skalarprodukt beider Auslenkungsvektoren maximal wird (Abb. 3). An der Station Birkenmoor wurde im Ergebnis eine Verdrehung der Horizontalkomponenten um 240° gegen Nord festgestellt. Die Ausrichtung kann im Digitalisierer der Station hinterlegt werden und das Gerät rechnet die Horizontalkomponenten direkt in ein Nord-Ost-System um, welches dann per Datenfernübertragung ans Datenzentrum übermittelt wird. Die Orientierungskorrektur im Digitalisierer vor Ort vereinfacht die Datenerfassung, -archivierung und weitere Bearbeitung der Wellenformdaten auf Nutzerseite.



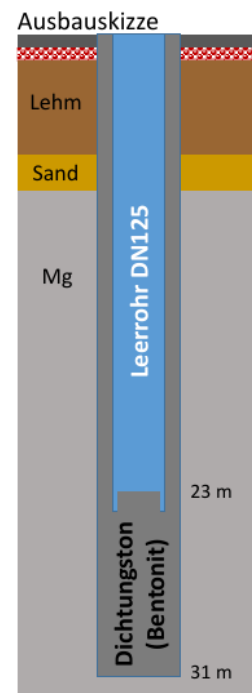
(a) Bohrlochkopf und Schaltschrank.



(b) Seismometer.



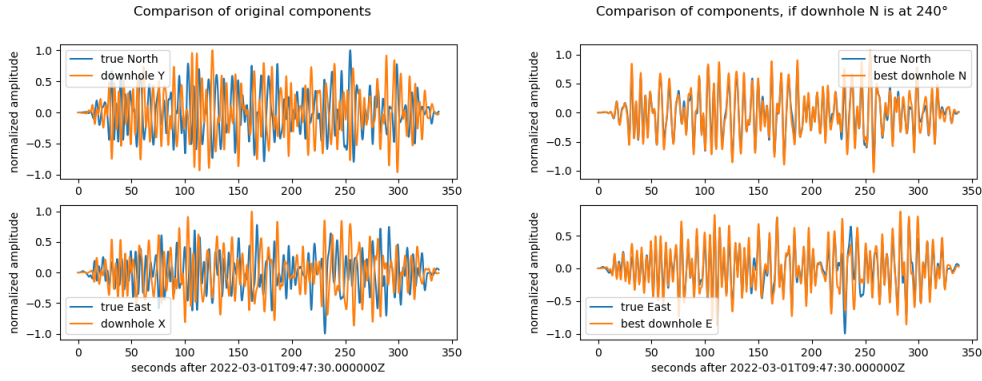
(c) Schaltschrank nach Einrichtung.



(d) Bohrprofil (A. Omlin, Weidle et al. [2022]).

Abbildung 2: Installation der Station Birkenmoor.

Ein Vergleich der Leistungsdichtespektren (PPSD, Abb. 4) der Station Birkenmoor am temporären Standort im Keller des Gutshauses mit der neuen Bohrlochstation zeigt eine Verbesserung des Rauschpegels von ca. -10 dB im Frequenzbereich von 2 - 20 Hz. Dieser Frequenzbereich ist für die Detektion von schwachen seismischen Ereignissen besonders

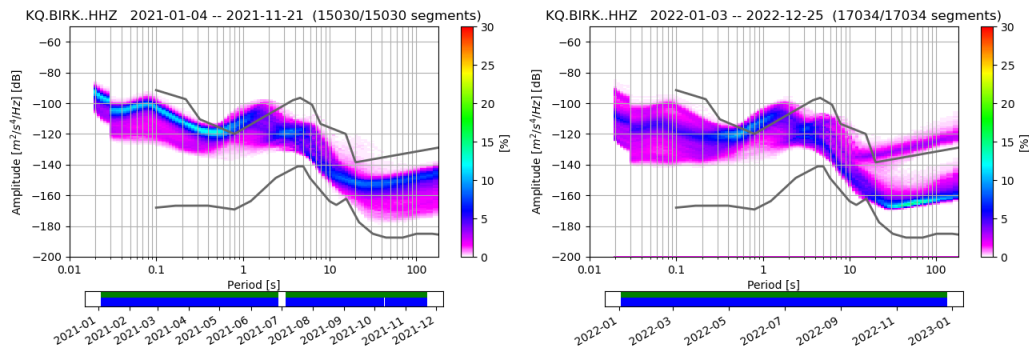


(a) Horizontalkomponenten Nord-Ost an der Oberfläche (blau) und Y-X im Bohrloch (orange). (b) Horizontalkomponenten nach Rotation um den Winkel mit der besten Anpassung.

Abbildung 3: Bestimmung der horizontalen Orientierung des Bohrlochseismometers.

relevant und die Bohrlochinstallation stellt somit eine Verbesserung gegenüber der Teststation dar. Auf Registrierungen von Sprengereignissen vor Schönhagen an der Station Birkenmoor wird im Kapitel 4) näher eingegangen.

Auch bei Perioden oberhalb von 5 s zeigt die Bohrlochstation ein deutlich reduziertes Rauschniveau. Dies ist auf die Abschirmung des Seismometers gegenüber Luftdruck- und Temperaturschwankungen im wassergefüllten Bohrloch zurückzuführen. Der Bereich oberhalb von 10 s Periode und -140 dB ist auf eine Fehlkonfiguration des Digitalisierers zu Beginn der Aufzeichnung zurückzuführen. Diese wurde zeitnah behoben, wonach sich das Niveau auf etwa -160 dB reduzierte und dort stabilisierte. Der Peak bei ca. 1 s wird durch seismische Wellen erzeugt, die die nahe Ostsee anregt. Diese seismischen Wellen werden Meeresmikroseismik genannt. Auch sie stellen ein interessantes Signal dar, dass potenziell genutzt werden kann, um die Wechselwirkung zwischen Wasserwellen und fester Erde zu quantifizieren.



(a) Teststation im Keller des Gutshauses.

(b) Bohrlochstation auf dem Gutsgelände.

Abbildung 4: Leistungsdichtespektren (PPSD) an der Station Birkenmoor.

Die ursprünglich zu Testzwecken installierte Station im Keller des benachbarten Gutshauses (s. Weidle et al. [2020]) wurde mit der finalen Einrichtung der permanenten Station

abgebaut. Mit der neuen Bohrlochstation steht eine weitere sehr gute seismologische Station für die Detektion seismischer Ereignisse in SH zur Verfügung.

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 Permanentstation 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 2022 wurde eine Wartung der Stationen durchgeführt. Im Sommer 2022 kam es zu einem Ausfall der Netzwerkverbindung zur Station HLGA1 an der Nordspitze Helgolands. Unser Kooperationspartner vor Ort konnte die Funktionsfähigkeit der Station im *offline*-Betrieb verifizieren, weshalb keine außergewöhnliche Wartung vor Ort vorgenommen wurde. Seit Anfang 2023 ist die Netzwerkverbindung wieder intakt und der Ausfall im letzten Sommer soll beim nächsten regulären Service vor Ort genauer untersucht werden.

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 konnten in 2022 die bis dato noch nicht in Echtzeit angebundenen Stationen BSEA2 (Klein Gladebrügge) und BSEA3 (WZV) mit Mobilfunkroutern ausgestattet werden. Somit sind nun alle Stationen des BSEG-Netzes in Echtzeit ans Datenzentrum am IfG angebunden, was sowohl eine kontinuierliche Auswertung der Daten des lokalen Bad Segeberg Netzes, als auch eine zielgerichtete, bedarfsorientierte Wartung der Stationen ermöglicht.

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 beteiligt (Abb. 1). Bereits Ende des Jahres 2021 wurde mit der Einrichtung eines lokalen seismischen Arrays - ähnlich zum Helgoland Array - auf der Insel Rügen begonnen. In Kooperation mit der Universität Hamburg wurde die, vom GFZ Potsdam betriebene, Permanentstation auf Rügen um sieben zusätzliche Breitbandseismometer erweitert. Ziel dieser Installation ist u.a. eine verbesserte seismologische Überwachung der südwestlichen Ostsee und der Küstenregion in MV. Von der BGR wurden in 2022 zwei weitere seismologische Stationen in MV in Betrieb genommen, zum einen in Schillersdorf im Süden von MV, zum anderen in Kühlungsborn an der Ostseeküste.

Von dem durch das IfG koordinierten Stationsausbau in MV profitiert auch die seismologische Überwachung Schleswig-Holsteins. Durch die neue BGR Station in Kühlungsborn wird bspw. die seismologische Überwachung der Lübecker Bucht gestärkt. 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, inklusive der in 2022 final eingerichteten Station Birkenmoor sind technisch konsolidiert, befinden sich in hochwertigem Zustand und sind aktuell nur gering störungsanfällig. Seit Anfang des Jahres 2023 verfügen darüberhinaus alle Stationen über eine Datenübertragung in Echtzeit, wodurch technische Störungen bzw. Datenausfälle schnell erkannt und bedarfsgerecht zeitnah behoben werden können. Zudem reduziert sich der Zeitaufwand für die Stationswartung, da ein Teil der regelmäßigen Überprüfungen per Fernzugriff erledigt werden können.

Zu Beginn des Jahres 2023 wurde die Station Quickborn mit einer neuen, leistungsfähigeren Stromversorgung ausgestattet. Dies soll einen dauerhaften Betrieb der Station auch in den bisher lückenhaften Wintermonaten sicherstellen und ermöglicht gleichzeitig eine Einbindung in die Echtzeitdatenerfassung und -auswertung. Auch diese Maßnahme trägt dazu bei, die Auswerteabläufe am IfG effizienter zu gestalten, da eine unregelmäßige Archivierung und Nachbearbeitung von *offline* registrierten Daten entfällt.

Auch wenn das Stationsnetz einen konsolidierten Status erreicht hat, wird die Leistungsfähigkeit des Netzes zur Erfüllung der Aufgaben eines flächendeckenden Monitorings laufend evaluiert. 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 2023 potentielle Standorte identifiziert und Testmessungen 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 254 global verteilten Stationen in Echtzeit. Im Vergleich zum Vorjahr wurden weitere Stationen in Sachsen und Thüringen, sowie in den Niederlanden in die Echtzeitauswertung aufgenommen (Abb. 5). Aufgrund fehlender seismologischer Stationen in Brandenburg, sowie der generell guten Datenqualität von Stationen in den sächsisch-thüringischen Mittelgebirgen, sind diese Stationen zur Abdeckung südlicher Azimuthe für seismische Ereignisse v.a. in MV und Umgebung hilfreich. Außerdem wurde vom niederländischen, seismologischen Datenzentrum am KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Utrecht, NL) der Zugriff auf einige Stationen in den Niederlanden ermöglicht. Diese Stationen verbessern die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeit im Bereich der Nordsee.

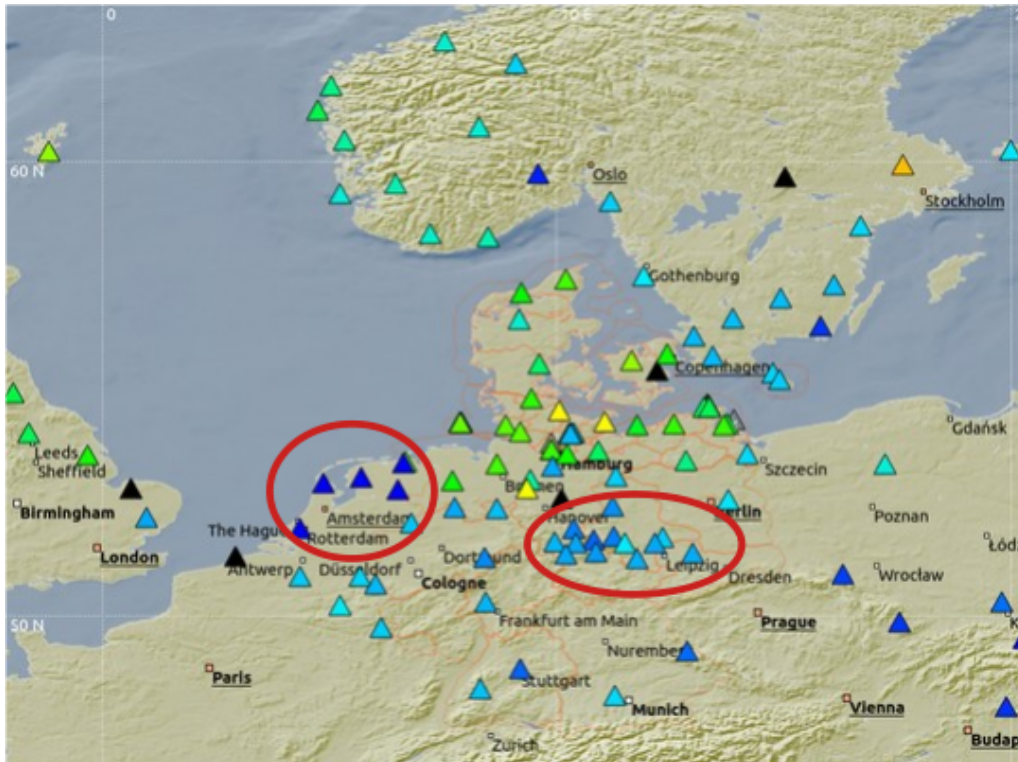


Abbildung 5: Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen in SH und Umgebung. Rot markiert sind in 2022 neu aufgenommene Stationen in Sachsen, Thüringen und den Niederlanden.

Im Laufe des Jahres 2022 wurden 2595 Ereignisse automatisch detektiert und lokalisiert, der weit überwiegende Anteil davon teleseismische Ereignisse mit Magnituden > 4.5 (siehe Abb. 6). 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.

CAU global detections 2022

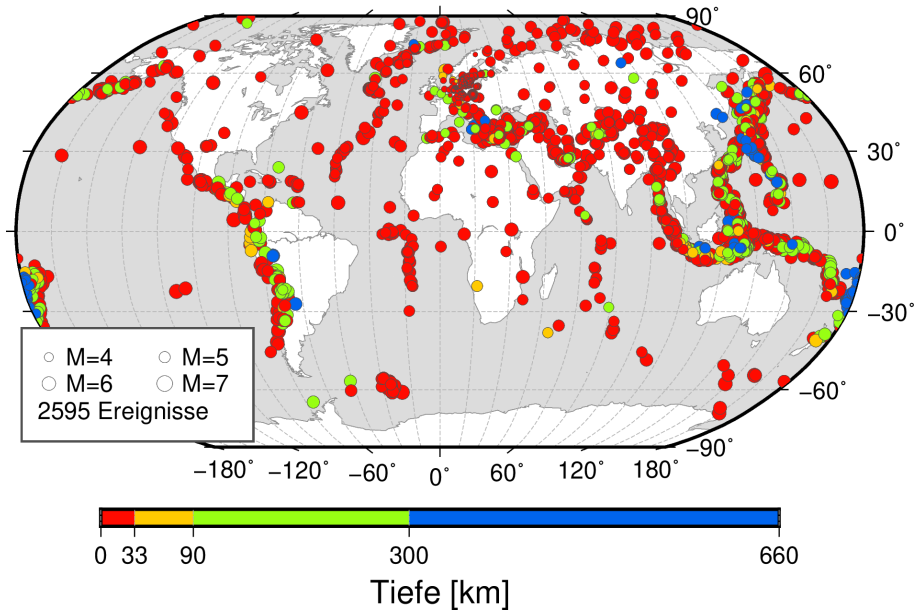


Abbildung 6: Verteilung aller in 2020 am Datenzentrum des IfG detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5 , welche vollautomatisch vom System prozessiert wurden.

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

3.1 AD (*Amplitude Decay*) Detektor

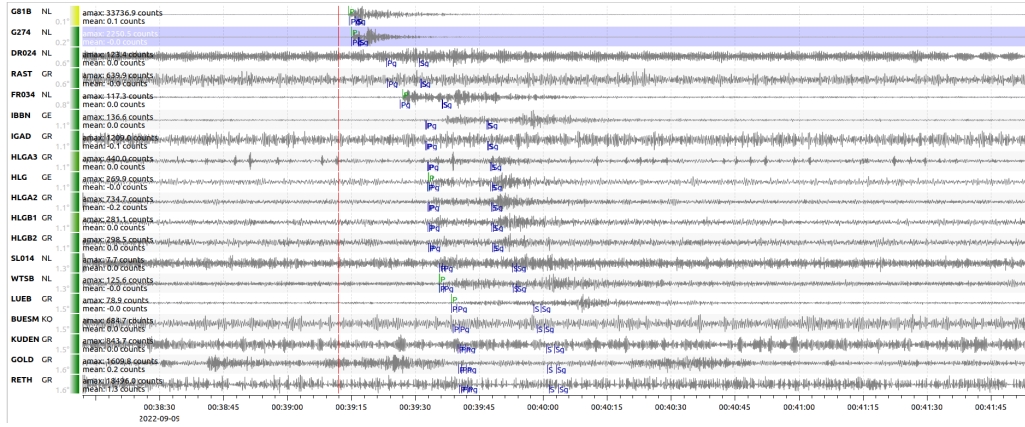
Neben der Kooperation im Rahmen des Stationsausbaus, pflegen wir auch einen regelmäßigen fachlichen Austausch mit dem Erdbebendienst des Bundes an der BGR. Dort wurde ein wellenformbasierter Ereignisdetektor entwickelt, welcher an der BGR zur Überwachung der Seismizität in ganz Deutschland eingesetzt wird. Im Zuge des fachlichen Austauschs stellte sich heraus, daß dieser Ereignisdetektor, kurz AD Detektor für *Amplitude Decay* (K. Stammler, pers. Komm.), im Norden Deutschlands nicht sehr effizient arbeitet. Dies liegt vor allem daran, daß die Abstände zwischen den seismologischen Stationen, welche der BGR in Echtzeit zur Verfügung stehen, zu groß sind. Hinzu kommt die allgemein niedrigere Datenqualität mit erhöhtem Signal-Rausch-Verhältnis an Stationen in Norddeutschland. Durch die Kooperationen mit dem dänischen und schwedischen Erdbebendienst stehen dem IfG zusätzliche Echtzeitdaten aus dem Gebiet der südwestlichen Ostsee zur Verfügung. K. Stammler (BGR) stellte uns freundlicherweise den Programmcode des AD Detektors zur Verfügung, um diesen am IfG eigenständig, sowie an die verfügbaren Daten und die zu überwachende Zielregion angepasst, zu nutzen.

Die Funktionsweise des Detektors basiert auf einer Stapelung der registrierten Wellenformen entlang vorberechneter Laufzeitkurven. Hierzu wird für das Zielgebiet ein Gitter mit hypothetischen Quellpunkten für seismische Ereignisse definiert (Abb. 7b) und für jede Kombination aus Gitterpunkt und Stationskoordinate eine theoretische Laufzeitkurve berechnet. Dieser rechenintensive Prozeß muss nur einmalig ausgeführt werden, die Laufzeitkurven werden abgespeichert.

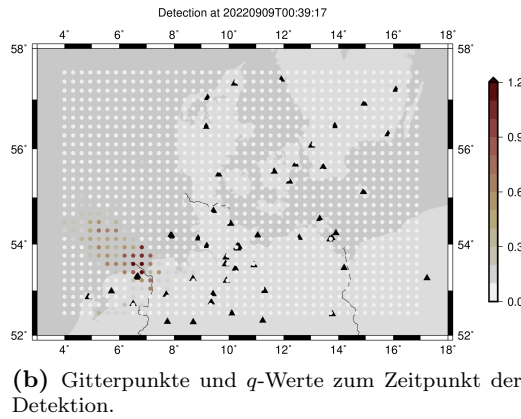
In Zeitschritten von 1 s werden nun sämtliche Wellenformen entlang dieser Laufzeitkurven für jeden Gitterpunkt gestapelt und über die Summenspur ein Qualitätswert (q -Wert) bestimmt. Dieser ergibt sich im Wesentlichen aus der Amplitude der gestapelten P- und S-Wellen-Zeitfenster und verschiedener Korrekturfaktoren, u.a. dem Stationsabstand vom Gitterpunkt (*amplitude decay*) und dem Signal-Rausch-Verhältnis. Für jeden Gitterpunkt ergibt sich so zu jedem Zeitschritt ein Qualitätswert (q -Wert) welcher mit der Präsenz einer seismischen Phase mit erhöhten Amplituden an mehreren Stationen korreliert. Im Falle eines Ereignisses in der Nähe eines Gitterpunkts ergibt sich ein hoher q -Wert - ist in den Zeitfenstern nur Rauschen vorhanden, ist der q -Wert nahe Null. Letzteres gilt auch für alle Gitterpunkte weit ab der tatsächlichen Quelle, denn für diese passen die Laufzeitfenster nicht zu der gemessenen Wellenausbreitung. Der maximale q -Wert aller Gitterpunkte lässt sich schließlich über die Zeit auftragen und mit einem einfachen Schwellwert ein Detektions-*Threshold* definieren (Abb. 7c).

Am Beispiel eines Bebens bei Groningen (NL) mit Magnitude 2.3 sind die Schritte in Abb. 7 veranschaulicht. In der Wellenformsektion des Ereignisses, hier bereits nach Epizentralentfernung sortiert, kann man an vielen Stationen eine P- und eine S-Welle mit erhöhten Amplituden erkennen. In einem Zeitfenster um die theoretischen Ankunftszeiten (blaue Marker in Abb. 7a) werden die Wellenformen für jeden Gitterpunkt (Abb. 7b) gestapelt. Zum Zeitpunkt der Detektion um 00:39:17 UTC ergibt die Stapelung für Gitterpunkte in der Region um Groningen erhöhte q -Werte (Abb. 7b). Die q -Werte an allen übrigen Gitterpunkten verbleiben nahe Null. Der AD Detektor liefert also nicht nur eine Detektion von seismischen Ereignissen bei Überschreiten eines definierten *Thresholds* des q -Werts über die Zeit (Abb. 7c), sondern auch adhoc eine ungefähre Lokalisierung. Diese ist zur schnellen Beurteilung einer Quellregion sehr hilfreich und kann im Anschluß durch eine manuelle Nachbearbeitung präzisiert werden.

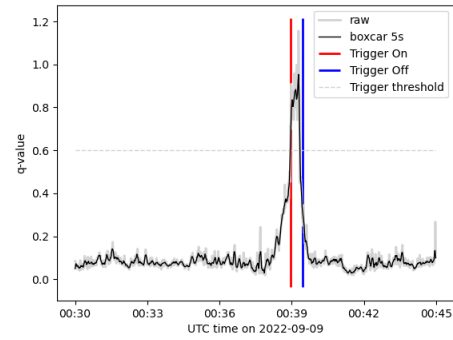
Im Rahmen der regelmäßigen Auswertung am IfG hat sich der AD Detektor schnell als zuverlässiges und präzises Instrument zur automatisierten Detektion von seismischen Ereignissen herausgestellt. Seit Inbetriebnahme im Sommer 2022 wurden der weit überwiegende Anteil der katalogisierten Ereignisse vom Detektor entdeckt. Aufgrund der hohen Datenqualität an den Stationen des schwedischen Stationsnetzes, welche in erster Linie auf die geologischen Randbedingungen auf dem skandinavischen Schild zurückzuführen ist, werden dort Ereignisse mit Magnituden bis zu 1.3 recht zuverlässig detektiert. Aber auch



(a) Wellenformsektion, theoretische P- und S-Wellen-Einsätze sind blau markiert.



(b) Gitterpunkte und q -Werte zum Zeitpunkt der Detektion.



(c) q -Werte als Funktion der Zeit.

Abbildung 7: Funktionsweise des AD Detektors am Beispiel eines Erdbebens bei Groningen (NL).

Ereignisse in Norddeutschland werden vom Detektor zuverlässig erfasst, z.B. Sprengungen im Rahmen von Kampfmittelräumungen in der Nordsee westlich von Helgoland (s. Kap. 4).

4 Ereignisübersicht 2022

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 nördlichen Nordsee gab es einige Ereignisse mit Magnituden bis zu 3.6 (s. Abb. 8). Solche Ereignisse sind in der Nordsee nicht unüblich (s. Weidle et al. [2020]), werden aber nur selten an Land wahrgenommen. Sie treten gelegentlich auch im Grenzbereichs der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) auf. Im Bereich der Gasfelder um Groningen (NL) kommt es immer wieder zu seismischen Ereignissen mit Magnituden bis etwa 3. Im Jahr 2022 sind im EMSC-Katalog sechs solcher Ereignisse aufgeführt, welche auf Helgoland und an den Stationen Quickborn und Bad Segeberg meist gut messbar waren.

EMSC Katalog 2022.01.01 - 2022.12.31

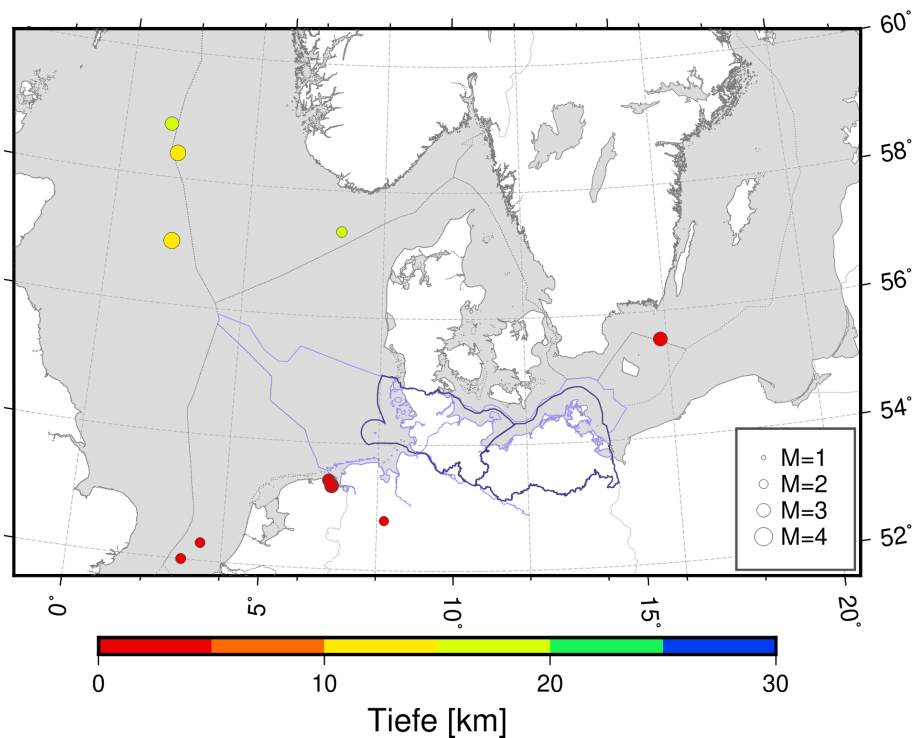


Abbildung 8: Ereignisse um Schleswig-Holstein im Jahr 2022, Quelle: EMSC [2021]. Die Landesgrenzen von SH und MV (dunkelblau) sind ebenso dargestellt, wie die AWZ Grenzen in der Nord- und Ostsee (blau).

Für das Ereignis vom 5. September 2022 im Landkreis Cloppenburg (NDS) wurde vom Niedersächsischen Erdbebendienst eine Magnitude von 2.2 bestimmt (LBEG [2013]). Das Ereignis steht vermutlich in Zusammenhang mit der Erdgasförderung in der Region. Her-

vorzuheben ist das Ereignis vom 26. September 2022 nordöstlich der Insel Bornholm (DK) in der südlichen Ostsee. Hierbei handelt es sich nicht um ein Erdbeben, sondern um eines von zwei seismischen Ereignissen, welche in Zusammenhang mit der Zerstörung der Nord Stream Pipelines im Gebiet um Bornholm am selben Tag zusammenhängen (siehe 4.3).

Herdzeit (UTC)	Länge (Ost)	Breite (Nord)	Tiefe (km)	Magnitude
2022-01-31T14:37:16.600000Z	1.82	57.00	10	3.6
2022-03-06T13:18:31.000000Z	6.74	53.36	3	2.1
2022-03-25T04:56:37.200000Z	1.69	58.39	10	3.5
2022-04-01T17:11:08.000000Z	6.77	53.35	3	2.7
2022-05-23T12:45:04.000000Z	2.98	52.00	0	2.3
2022-05-25T10:26:07.100000Z	1.40	58.84	15	3.0
2022-06-21T17:37:46.000000Z	3.44	52.28	0	2.2
2022-09-05T10:08:19.500000Z	8.19	52.79	3	2.1
2022-09-09T00:39:11.000000Z	6.70	53.41	3	2.3
2022-09-11T00:06:58.500000Z	6.75	57.35	15	2.4
2022-09-24T10:20:39.000000Z	6.70	53.41	3	2.8
2022-09-26T17:03:49.000000Z	15.82	55.55	0	3.1
2022-10-08T02:17:15.200000Z	6.78	53.32	3	3.1
2022-10-22T10:14:04.000000Z	6.79	53.32	3	2.2

Tabelle 1: Erdbeben im Jahr 2022 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 (s. Kap. 3) 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 9 fasst den Katalog des Jahres 2022 mit 317 detektierten und manuell ausgewerteten seismischen Ereignissen zusammen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in Tabelle 2 nur die tektonischen und einige der im Folgenden genannten nicht-tektonischen Ereignisse aufgelistet. Der vollständige Katalog für das Jahr 2022 befindet sich im Anhang A. Generell ist anzumerken, dass die Ereignistiefen in den meisten Fällen bei der Lokalisierung fixiert wurden, vor allem bei als Sprengung klassifizierten Ereignissen auf eine Tiefe von 0 km.

In Schleswig-Holstein gab es im Jahr 2022 keine Ereignisse, welchen eine tektonische Ursache zugeordnet werden kann. Im Stadtgebiet von Hamburg kam es am 18. August zu einem Erdfallereignis, über welches wir über den GD Hamburg informiert wurden. Das Ereignis war nur an den beiden aktiven Stationen des DESY in Flottbek sichtbar, aber anhand der singulären Beobachtung am quasi identischen Standort seismologisch nicht lokalisierbar. Ebenfalls wurde von Anwohnern ein potentielles Ereignis im Umfeld der Station Quickborn in der Nacht des 18. November berichtet. Dort ist in den Wellenformen kein

CAU Bulletin 2022 categorical

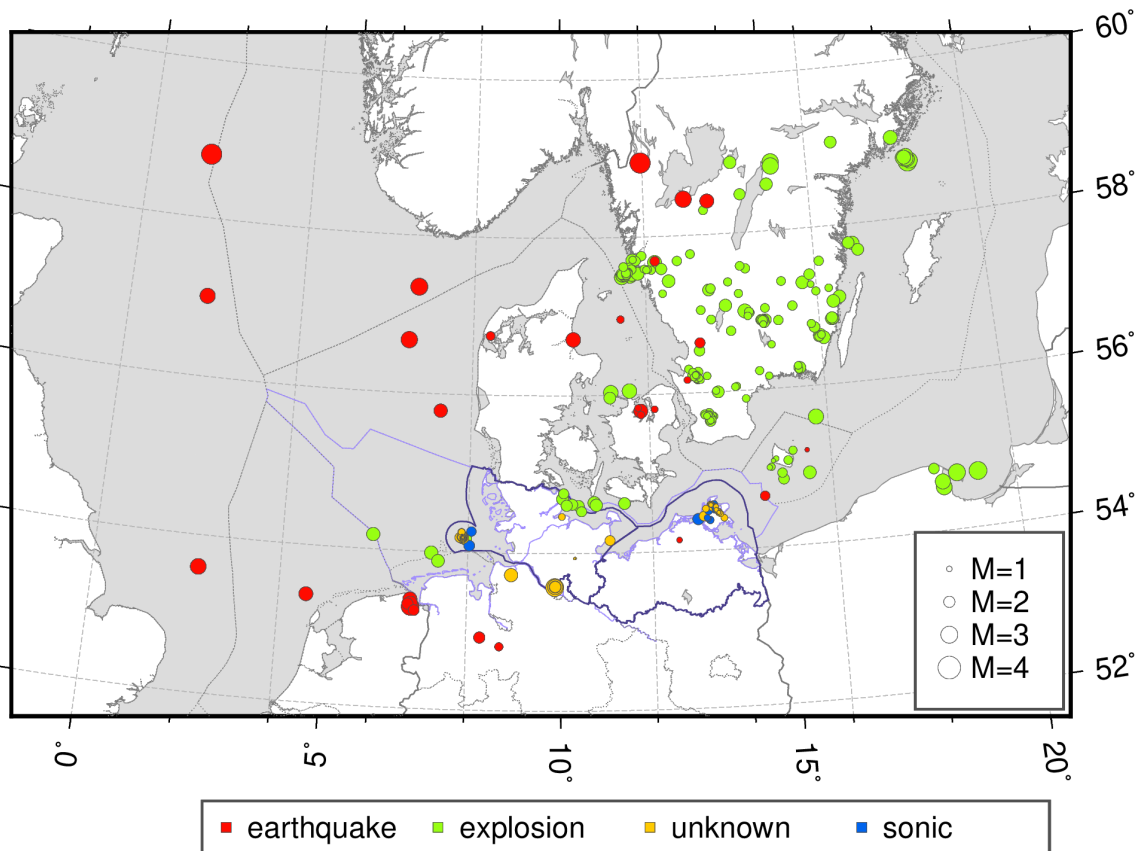


Abbildung 9: Übersichtskarte der in 2022 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.

Ereignis zu sehen, allerdings war die Aufzeichnung aufgrund der mangelnden Stromversorgung den Großteil der Nacht unterbrochen. Mit der Erweiterung der Stromversorgung der Station Quickborn, sollen solche Datenlücken zukünftig deutlich reduziert werden.

In der Nähe der Station Kellenhusen (Ostholstein) sowie an der Station Kuden (Dithmarschen) sind jeweils einmal verdächtige Wellenformen registriert worden. Die Ereignisse konnten aber mangels weiterer Aufzeichnungen an anderen Standorten nicht lokalisiert und genauer klassifiziert werden und sind in Abb. 9 ebenfalls als unbestimmt markiert.

Im Bereich der Eckernförder Bucht, genauer im militärischen Sperrgebiet Schönhagen, wurden Anfang November 2022 nach langer Pause erstmalig wieder Sprengversuche der Bundeswehr durchgeführt. Die Versuche wurden im Vorfeld öffentlich angekündigt und wir konnten von der Wehrtechnischen Dienststelle (WTD) in Kiel Informationen zu Sprengzeiten und Ladungsstärken erhalten.

Neben einer Vielzahl an Referenzsprengungen mit geringen Ladungsstärken von unter 3 kg TNT-Äquivalent (TNTeq), wurden auch vier Sprengungen mit Ladungen von ca. 65 kg TNTeq durchgeführt. Diese konnten am seismologischen Netz detektiert und im Bereich der

Eckernförder Bucht mit einer Genauigkeit von 5-10 km lokalisiert werden. Dies deckt sich mit früheren Beobachtungen zur Lokalisierungsgenauigkeit von Ereignissen in der Kieler Bucht (Weidle et al. [2022]). Durch die Station Birkenmoor hat sich die Detektionsfähigkeit und Lokalisierungsgenauigkeit von Ereignissen in der Kieler Bucht weiter erhöht. Einige Sprengungen mit geringeren Ladungsstärken waren an dieser Station in den registrierten Wellenformen ebenfalls nachvollziehbar, aufgrund mangelnder Beobachtung an weiter entfernten Standorten (Bad Segeberg, Sankelmark, Kellenhusen) aber nicht lokalisierbar.

Auch auf und um Helgoland wurden regelmäßig Ereignisse detektiert, die Mehrheit hiervon sind anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit über das Helgoland Array als akustisch einzustufen. Mögliche Quellen hierfür sind unbekannt, es deutet sich aber an, daß solche Ereignisse bei starkem Wind häufiger auftreten und aus dem Bereich des Hafens kommen. Möglicherweise sind Stoßbewegungen von Schiffen an die Kaimauern hierfür verantwortlich. Am 29. April 2022 kam es frühmorgens zu einem größeren Felsabbruch an der Nordspitze Helgolands, welches vom Helgoland-Array registriert wurde. Eine detaillierte Auswertung hierzu findet sich in Kapitel 6.

Am Bad Segeberg Netz wurden keine Ereignisse detektiert, welche auf eine tektonische Ursache hindeuten. Im Rahmen der Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes für das Jahr 2022 wird darauf im folgenden Kapitel 5 näher eingegangen.

4.3 Andere relevante Ereignisse

Der Katalog der seismischen Ereignisse 2022 des IfG enthält 318 manuell bearbeitete Ereignisse. Hierbei handelt es sich vor allem um eine Vielzahl nicht-tektonischer Ereignisse in der südwestlichen Ostsee, in SH und MV, sowie in Süd-Skandinavien. Neben den oben erwähnten Sprengversuchen bei Schönhagen führte die dänische Marine südlich der Insel Langeland in der Kieler Bucht gelegentlich Sprengungen durch (s. auch Weidle et al. [2022]). Dies konnte über den Kontakt zum dänischen Erdbebendienst (GEUS) bestätigt werden. Im Dezember 2022 kam es zu zwei Ereignissen in der Nordsee vor den ostfriesischen Inseln, sowie einem weiteren nordwestlich von Borkum. In den nautischen Warnnachrichten des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) war in den betreffenden Gebieten für diesen Zeitraum mit Kampfmittelräumungen im Bereich von offshore-Windparks zu rechnen. Anhand der Wellenform und den Herdzeiten der Ereignisse wurden diese entsprechend als Sprengungen klassifiziert.

Mit der Einrichtung des AD-Detektors (s. Kap. 3), welcher auch die Sprengungen in der Nordsee detektierte, werden auch eine Vielzahl an schwächeren seismischen Ereignissen in Dänemark und Schweden detektiert. Vor allem bei letzteren handelt es sich zum weit überwiegenden Teil um Sprengungen in bekannten Steinbrüchen. Als tektonisch einzustufende Ereignisse mit Magnituden bis etwa 2.5 traten im Norden der Insel Seeland, im

Norden Jütlands sowie der angrenzenden Nordsee und im Bereich des Kattegat auf. Diese Ereignisse sind häufig tiefer als 10 km und dadurch von Sprengungen unterscheidbar.

Im Gebiet um die Insel Bornholm sind auch regelmäßige Sprengungen sowohl auf der Insel, als auch im marinen Bereich bekannt. Daher waren zwei registrierte seismische Ereignisse am 26. September zunächst seismologisch nicht besonders interessant, bekamen durch die zeitgleich aufgetretenen Leckagen an den Nord Stream Gas Pipelines jedoch unerwartete Brisanz. Anhand der Wellenformen kann ein tektonisches Ereignis in beiden Fällen ausgeschlossen werden, vom Charakter ähneln die Wellenformen eher Sprengungsereignissen. Vor allem das zweite Ereignis nordöstlich von Bornholm ist von der Wellenformcharakteristik aber deutlich komplexer. Neben der Station Rügen bildet das Rügen-Array sowie weitere Stationen des IfG im Nordosten von MV eine wichtige Komponente für noch andauernde seismologische Auswertungen der beiden Ereignisse an verschiedenen Institutionen im In- und Ausland.

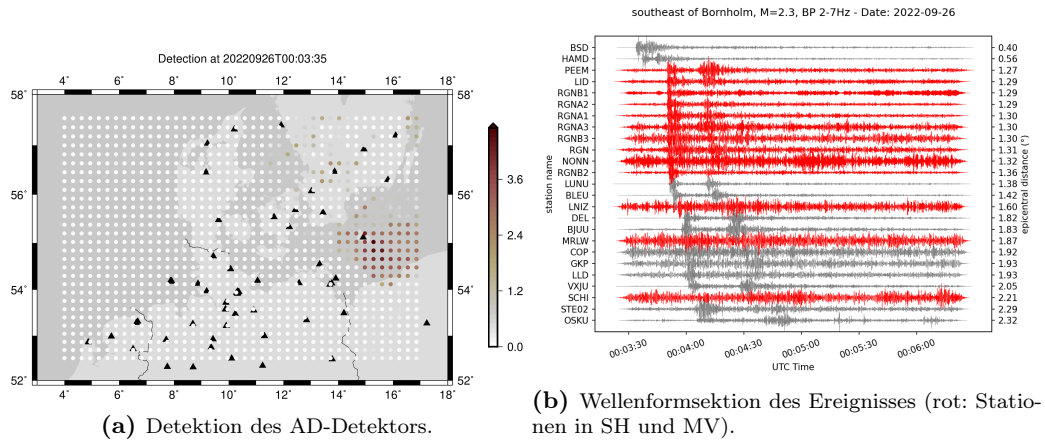


Abbildung 10: Das Ereignis vom 26.9.2022 um 00:03 UTC südöstlich von Bornholm.

Tabelle 2: Tektonische und selektierte nicht-tektonische seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein und Umgebung. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-03-12 03:45:40	58.9386	11.9622	0.0	3.6	Sweden	earthquake
2022-03-16 11:18:52	56.6709	6.5198	3.5	2.9	North Sea	earthquake
2022-04-01 17:11:09	53.3855	6.7978	3.5	2.5	The Netherlands	earthquake
2022-04-04 04:48:49	55.7944	11.8136	11.8	2.5	Danmark	earthquake
2022-04-21 00:53:17	53.5953	2.2515	7.2	2.8	North Sea	earthquake
2022-04-29 04:32:28	54.1885	7.8704	0.0	2.0	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-05-10 09:44:51	55.9783	11.0824	15.3	2.4	Danmark	earthquake
2022-05-25 10:26:09	58.8022	1.4715	74.8	3.6	North Sea	earthquake
2022-05-30 16:15:38	57.0142	1.7842	10.0	2.7	North Sea	earthquake
2022-07-10 01:16:13	56.7095	10.3013	29.9	2.6	Danmark	earthquake
2022-07-18 08:28:52	56.7510	8.3928	76.9	1.6	Region Nordjylland	earthquake
2022-07-20 11:31:32	56.6324	13.2160	0.1	1.8	Sweden	earthquake
2022-07-28 19:19:09	55.8330	11.7531	5.0	1.2	Danmark	earthquake
2022-08-18 04:52:20	53.5702	9.8736	0.0	3.2	Hamburg	cavity collapse
2022-08-21 13:57:16	58.4600	12.9758	0.0	2.9	Sweden	earthquake
2022-08-26 18:17:05	57.6872	12.2397	0.0	1.7	Sweden	earthquake
2022-08-31 10:13:30	56.0261	11.5208	8.3	2.6	Danmark	earthquake
2022-09-05 10:08:18	52.9245	8.2884	7.5	2.0	Niedersachsen	earthquake
2022-09-06 00:14:50	55.8116	12.1229	19.7	1.2	Region Hovedstaden	earthquake
2022-09-08 21:47:12	54.6496	14.4834	2.1	1.7	Baltic Sea	earthquake
2022-09-09 00:39:11	53.2465	6.8869	0.0	1.9	The Netherlands	earthquake
2022-09-11 00:06:57	57.3474	6.6945	71.6	3.0	North Sea	earthquake

Tabelle 2: Tektonische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein und Umgebung (Fortsetzung).
Der Ereignistyp wurde durch den Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-09-14 11:12:00	58.4229	13.5453	0.0	2.5	Sweden	earthquake
2022-09-18 00:05:09	54.1440	12.5720	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	earthquake
2022-09-24 10:20:40	53.3363	6.8187	5.0	2.4	The Netherlands	earthquake
2022-09-25 20:24:24	56.1666	12.8907	9.6	1.2	Sweden	earthquake
2022-09-26 00:03:26	54.9048	15.4992	0.0	2.3	Baltic Sea	explosion
2022-09-26 17:03:50	55.6027	15.7353	0.0	2.7	Baltic Sea	explosion
2022-10-08 02:17:17	53.2917	6.8091	6.3	3.1	The Netherlands	earthquake
2022-10-15 19:13:29	55.7450	11.8168	12.4	1.3	Danmark	earthquake
2022-10-22 10:14:06	53.3247	6.7486	0.0	2.0	The Netherlands	earthquake
2022-11-01 09:54:57	54.6208	10.2545	0.0	2.0	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-02 09:30:18	54.6909	10.0429	0.0	2.1	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-02 15:00:22	54.6078	10.1355	0.0	2.0	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-04 08:29:53	54.7586	10.0710	0.0	1.8	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-04 13:59:55	54.5304	10.4595	0.0	1.8	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-19 04:53:43	56.9611	11.3990	7.4	1.3	Denmark	earthquake
2022-11-20 14:38:34	55.1924	15.4775	12.2	0.8	Greater Bornholm	earthquake
2022-11-25 11:15:05	53.3731	4.5888	0.0	2.5	North Sea	earthquake
2022-12-07 19:25:39	52.8124	8.7039	24.5	1.5	Niedersachsen	earthquake
2022-12-11 13:00:13	53.8838	7.3649	0.0	2.3	Niedersachsen	explosion
2022-12-12 12:30:01	53.9837	7.2150	0.0	2.4	Germany	explosion
2022-12-17 23:17:51	55.7879	7.3038	27.8	2.4	North Sea	earthquake
2022-12-23 13:00:01	54.1837	5.9453	0.0	2.4	North Sea	explosion

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. 11) und die Empfindlichkeit des Netzes zur Detektion sehr schwacher Ereignisse mit Magnituden im Bereich -1 bis 0 konnte bereits nachgewiesen werden (Weidle et al. [2019]).

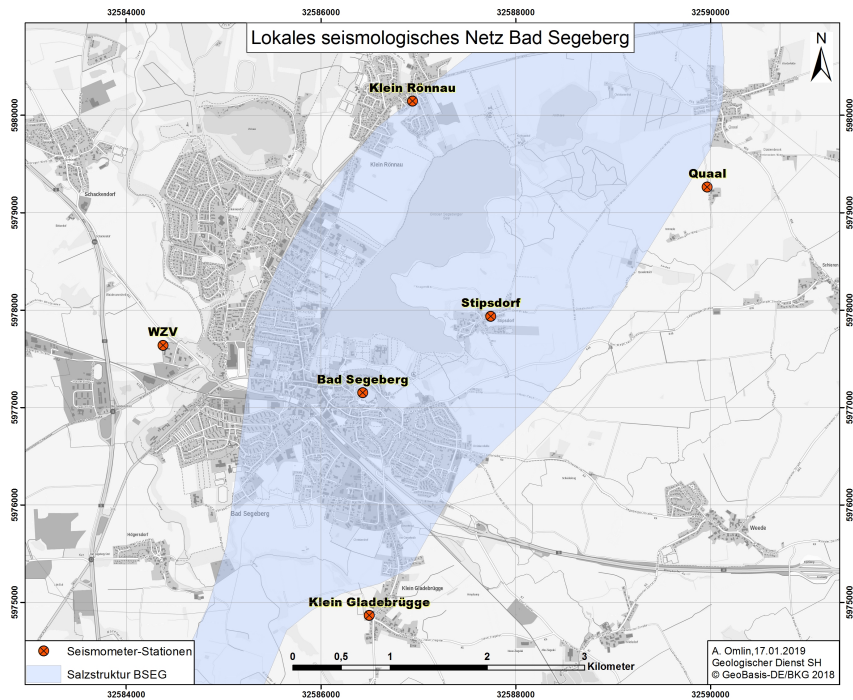
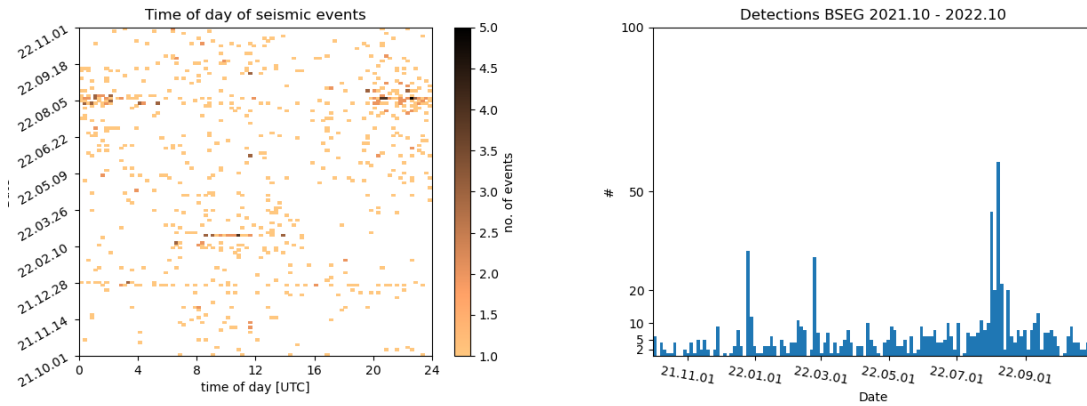


Abbildung 11: Status Bad Segeberg Netz 2021.

5.1 Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes

Im Laufe des Jahres 2022 wurden die Stationen BSEA2 (Klein Gladebrügge) und BSEA3 (WZV) mit Mobilfunkroutern nachgerüstet und stehen seitdem in Echtzeit der Auswertung zur Verfügung. Anschließend an die vorjährige Auswertung in Weidle et al. [2022] umfasst die folgende Auswertung den Zeitraum Oktober 2021 bis einschließlich Oktober 2022. Seit Anfang November 2022 sind alle Stationen in Echtzeit verfügbar und gehen in die routinemäßige Auswertung mit ein.

Die Daten des lokalen Netzes wurden mit einem STA/LTA Detektionsalgorithmus prozessiert (s. Weidle et al. [2019], Weidle et al. [2022]). Anschließend wurden die Detektionen zunächst statistisch ausgewertet (Abb. 12). Insgesamt wurden von Oktober 2021 bis Ende



(a) Anzahl der Detektionen gegen Tageszeit.

(b) Histogramm aller Detektionen.

Abbildung 12: Detektionen am lokalen Bad Segeberg Netz. Histogramme mit Schrittweite 3 Tage.

Oktober 2022 759 Ereignisse detektiert. Dies ist dieselbe Größenordnung wie im Vorjahreszeitraum, in dem 809 Ereignisse detektiert wurden (Weidle et al. [2022]).

Der zeitliche Verlauf zeigt drei Zeiträume mit einer erhöhten Anzahl an Detektionen (Abb. 12). Um die Weihnachtsfeiertage gab es in den Nachtstunden rund 30 Ereignisse, v.a. am 26.12.2021, welche an den Stationen im Kalkberg und Stipsdorf registriert wurden. Deren Auftreten korreliert mit einer Periode starken Frosts mit Tiefsttemperaturen bis -15°C (Deutscher Wetterdienst). Dieses Phänomen wurde in den Vorjahren wiederholt beobachtet, die Ursache und Lokation der Ereignisse konnte aber noch nicht zweifelsfrei geklärt werden (s. Weidle et al. [2019], Weidle et al. [2020], Weidle et al. [2022]).

Am 22. und 23. Februar 2022 gab es ebenfalls rund 30 Detektionen am lokalen Netz, an beiden Tagen vornehmlich im Zeitraum 10-14 Uhr MEZ. Diese Detektionen sind alle an der Station BSEA2 getriggert, dort gab es zu dieser Zeit eine Periode mit stark erhöhten transienten Störungen. Die Signale an der Station BSEA2 lassen einen Zusammenhang mit Bautätigkeiten vermuten und zeigen anhand der Wellenformen keine Hinweise für natürliche seismische Ereignisse.

Im Zeitraum 2.-7. August 2022 zeigen sich rund 100 Detektionen wiederum in den Nachtstunden, alle verbunden mit einer Triggerung an der Station BSEA1 in Stipsdorf. Auch dort kam es zu diesen Zeiten zu einem vermehrten Auftreten von lokalen transienten Störungen. Als Ursache werden die Pumpenanlagen am Stationsstandort vermutet, ein Zusammenhang mit natürlichen seismischen Ereignissen kann anhand der Wellenformen ebenfalls ausgeschlossen werden.

Von den insgesamt 759 Detektionen in den betrachteten 13 Monaten wurden 720 Detektionen an nur zwei Stationen getriggert, 33 an drei, 4 an vier und je 1 Ereignis an fünf bzw. allen sechs Standorten. Bei den beiden letztgenannten Ereignissen handelt es

sich um ein Magnitude 5.7 Erdbeben auf Kreta, sowie ein Magnitude 5.6 Erdbeben in der Region Tonga-Fiji im Südwestpazifik. Ereignisse aus letzterer Region führen häufig zu Detektionen nicht nur am Bad Segeberg Netz, sondern auch am regionalen Stationsnetz in Norddeutschland. Ursache hierfür ist eine konstruktive Interferenz und Amplitudenverstärkung von verschiedenen, durch den äußeren Erdkern laufenden P-Wellen Phasen.

Unter den an vier Stationen getriggerten Detektionen sind ebenfalls ein solches teleseismisches Erdbeben, ein Sprengungsereignis in der dänischen Ostsee, sowie Blitzeinschläge in der Region um Bad Segeberg nach Gewittern. Letztere lassen sich mit Daten der Blitzanalyse abgleichen (Kachelmann GmbH) und sind durch akustische Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Donnerschalls, welcher in die Seismometer einkoppelt, leicht zuzuordnen. Von den Ereignissen, welche an drei Stationen getriggert wurden, finden sich teleseismische und regionale Erdbeben, 2 Sprengungsereignisse in der dänischen Ostsee, 3 der Frostereignisse, 2 Donnerschläge sowie rund 20 Fehldetektionen.

Von den insgesamt 759 Detektionen sind 67 im Kalkberg (BSEG) getriggert worden, wobei mehr als die Hälfte in Zusammenhang mit den Ereignissen in der Frostperiode stehen. Die Station BSEA1 fällt in der Auswertung dahingehend auf, daß insgesamt 647 Detektionen an der Station getriggert wurden. An den übrigen Stationen wurden zwischen 166 Detektionen an der Station BSEA5 (Quaal) und 270 Detektionen an der Station BSEA3 (WZV) getriggert. Die hohe Anzahl an Triggerungen an der Station BSEA1 in Stipsdorf ist zum einen der Periode mit erhöhten Störungen Anfang August geschuldet. Zum anderen gibt es an dieser Station aufgrund der im Gebäude an- und abschaltenden Pumpen tendenziell mehr lokale transiente Signale als an den anderen Standorten. Abgesehen hiervon weist die Station in Stipsdorf aber aufgrund der ruhigen Lage abseits städtischer Infrastruktur eine generell hohe Datenqualität auf.

5.2 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 Ursache und Lokation bisher aber nicht nachgewiesen werden. Ebenso fehlt nach wie vor ein gutes Verständnis über die Ursache und Lokation der in Frostperioden auftretenden Ereignisse um den Kalkberg.

Zur Verbesserung der Datengrundlage wurden von September 2021 bis Ende März 2022 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

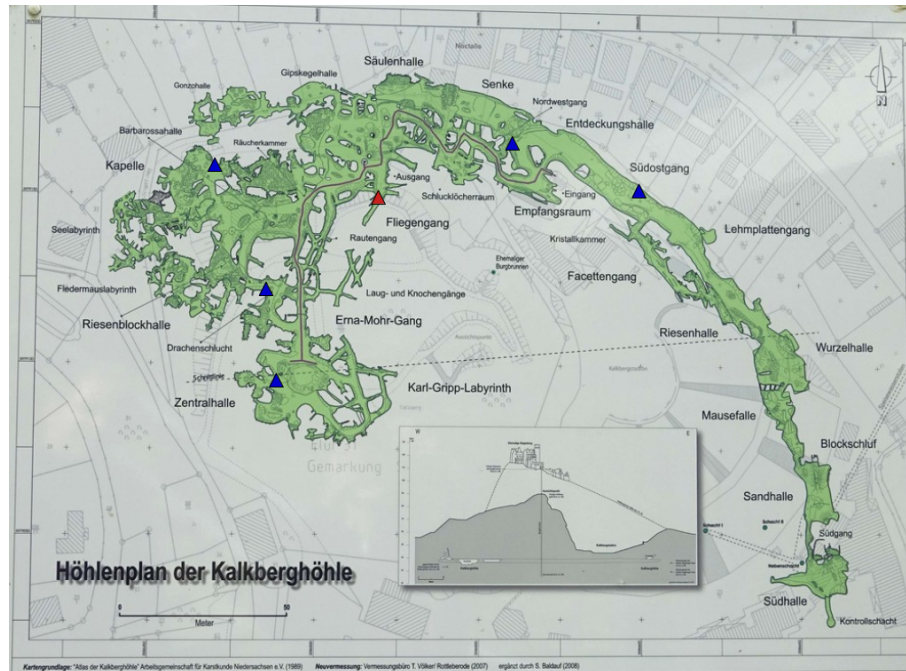


Abbildung 13: Übersichtskarte des Segeberger Kalkbergs. (Schautafel am Ausgang der Höhle (Foto: D. Schulte-Kortnack). Markiert sind die Position des permanenten Seismometers im Fliegengang (rot) und die im Winterhalbjahr 2021/22 installierten zusätzlichen Geofone (blau).

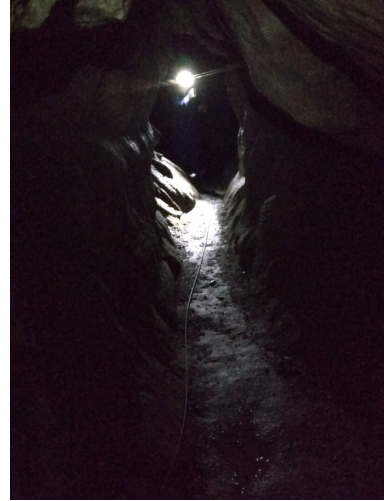
(Abb. 13). Die Wahl des Winterhalbjahres für das Experiment begründet sich v.a. darin, daß die Höhle in dieser Zeit für Besucher geschlossen ist. Zum anderen ist mit dem Auftreten von Ereignissen mit Frostbezug im Winter zu rechnen (Weidle et al. [2020]).

5.2.1 Aufbau des untertägigen Stationsnetzes

Die Installation und der Betrieb eines seismischen Messnetzes unter Tage ist erheblich aufwändiger als an der Erdoberfläche. Zum einen sind die Installationsbedingungen in unbeleuchteten Bereichen der Kalkberghöhle erheblich erschwert. Zum anderen müssen Strom- und Datenanbindung der Stationen, sowie deren Zeitsynchronisation gesichert werden. Hierfür wurde am Standort der Permanentstation, welche über einen Stromanschluß verfügt und in der Nähe des Ausgangs gelegen ist, eine zentrale Datenerfassung mit Digos Datacubes realisiert (Abb. 14). Zur Zeitsynchronisation wurde das GPS Signal am Höhlenausgang abgegriffen und kabelgebunden zu den Datenrekordern geleitet. Schließlich wurden die 4,5Hz-Geofone in der Höhle ausgebracht und mit 100m langen Datenkabeln an die Datenrekorder angeschlossen. An vielen Stellen, vor allem in den Seitenbereichen der Gänge gibt es eine lehmige Bodenschicht, in welche die Geofone relativ einfach eingebracht werden konnten. Zur Stabilisierung und zum Schutz von äußeren Einflüssen wurden sie zusätzlich mit Sandsäcken abgedeckt. Die Kabellänge limitierte die Auslage nach Osten nur ein wenig; das Geofon im Südostgang (Abb. 13) hätte aus Sicherheitsgründen ohnehin nur noch wenig weiter östlich ausgebracht werden können. Der östlichste Bereich der Höhle ist ohne weitere Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen aufgrund einer dort erhöhten CO₂-Konzentration nur eingeschränkt begehbar.



(a) Registriereinheiten an Permanentstation (im Hintergrund).



(b) Kabelausbringung in der Höhle.



(c) Ausrichtung mit Kompass.



(d) Fixierung mit Lehm und Sandsack.

Abbildung 14: Installation des untertägigen Experiments in der Kalkberghöhle am 21.9.2021.

Eine weitere Schwierigkeit, welche vor allem für die Auswertung relevant ist, ist die Übertragung der Geofonpositionen in ein konsistentes Koordinatensystem. Da die Datenrekorder mit GPS-Anbindung alle die Position der GPS-Antenne außen am Höhlenausgang erfassten, muss auf eine manuelle Bestimmung zurückgegriffen werden. Hierzu wurden in Abb. 13 die Positionen der Geofone eingetragen und anhand des Koordinatensystems digitalisiert. Inwieweit die inhärente Ungenauigkeit dieses Vorgehens für die Auswertung problematisch ist, sollte durch ein zusätzliches, aktives seismisches Experiment ermittelt werden.

5.2.2 Vibrationsseismisches Experiment

Um zum einen die Koordinaten der untertägigen Geofone für die Auswertung zu überprüfen und zum anderen oberflächennahe, für die Auswertung relevante, seismische Geschwindigkeiten ermitteln zu können, wurde Ende März 2022, kurz vor Abbau des untertägigen Experiments, eine aktive seismische Messung um den Segeberger Kalkberg durchgeführt. Hierbei wurden mit einer Vibrationsquelle (ELVIS) an verschiedenen Schusspunkten sowohl P- als auch S-Wellen Sweeps im Frequenzbereich 20-80 Hz angeregt und sowohl an den untertägigen, als auch an vier zusätzlichen, an der Oberfläche ausgebrachten Geofonen aufgezeichnet (Abb. 15). An allen Geofonen wurde die Messung mit einer Abtastrate von 400 sps aufgezeichnet, auf eine Umkonfiguration der Permanentstation wurde aber wg. des erheblichen Aufwandes und einer Beeinträchtigung des regionalen seismologischen Netzes verzichtet. Diese Station registrierte das Experiment mit 100 sps.

Um einer Störung durch transiente Signale, bspw. vorbeifahrende Fahrzeuge, vorzubeugen, wurden an jedem Schusspunkt drei redundante P-Wellen-Sweeps (vertikale Anregung) und sechs S-Wellen-Sweeps (horizontale Anregung, je drei in 90° verdrehte Richtung) angeregt. Jeder Schusspunkt wurde manuell mit einem Stonex GPS eingemessen und ein zusätzliches Geofon registrierte jede Anregung in etwa 1 m Abstand zur Vibrationsquelle als "Quellsignal".

Auswertung Zunächst wurden für jeden Schuss und jede korrespondierende Aufzeichnung die Spektrogramme der Wellenformen analysiert mit dem Ziel, diejenigen Aufzeichnungen zu identifizieren, an welchen das angeregte Signal nachvollziehbar vorhanden ist. Dies ist in Abb. 16 beispielhaft für die P-Wellenanregung am Punkt P4 illustriert.

In unmittelbarer Nähe zur Quelle ist das angeregte Signal mit einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) messbar und das Spektrogramm zeigt die charakteristischen Kennlinien eines Sweeps - einen linearen Anstieg der Anregungsfrequenz mit der Zeit (Abb. 16a). Zudem erkennt man auch weitere Linien im Spektrogramm, welche als Obertöne des angeregten Signals interpretiert, im folgenden aber nicht weiter betrachtet werden.

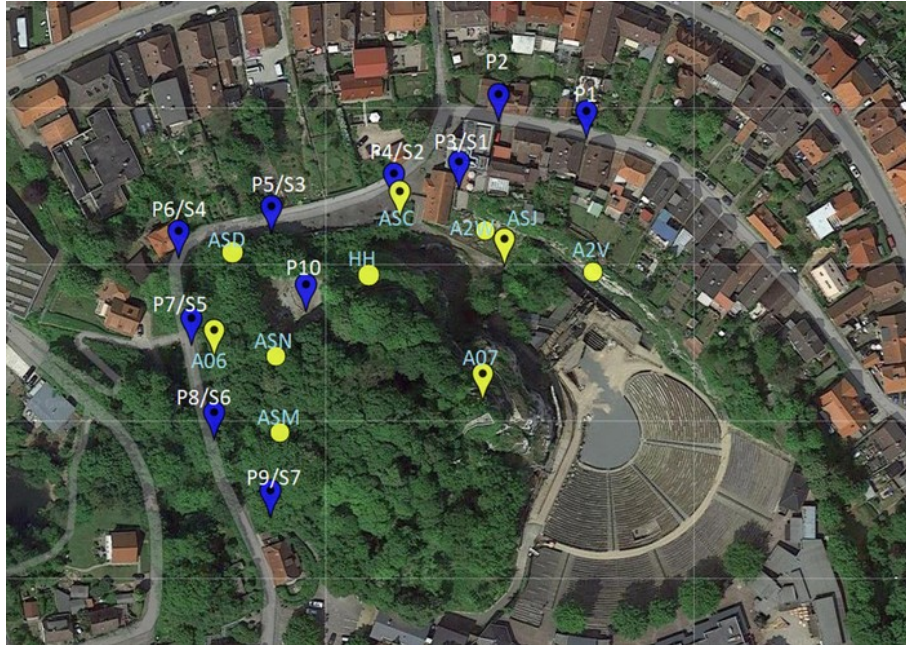
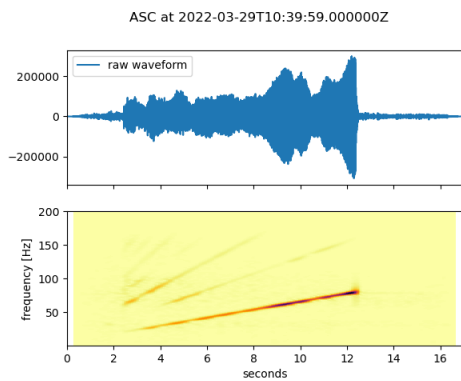
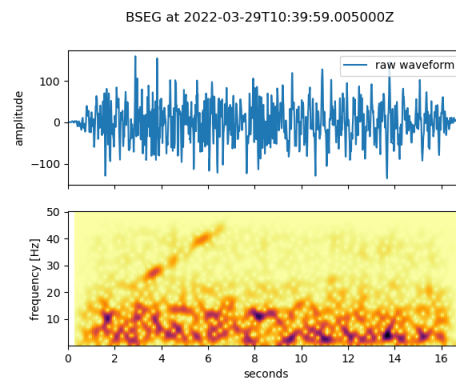


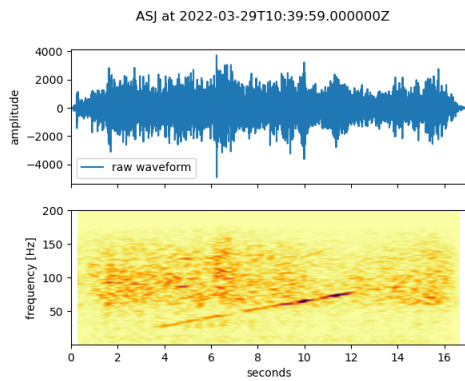
Abbildung 15: Übersichtskarte des vibrationsseismischen Experiments mit Schusspunkten und Index der P- bzw. S-Wellen-Anregung (blau). Die angeregten Sweeps wurden sowohl untertägig (gelbe Punkte, "HH" ist die Permanentstation), als auch an der Oberfläche (gelbe Marker) registriert.



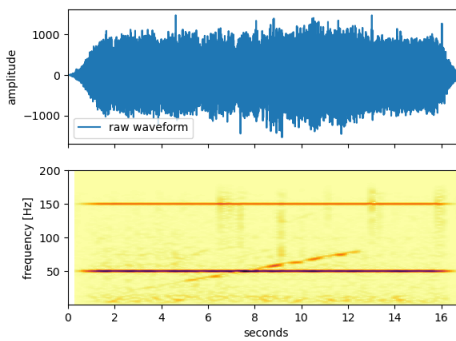
(a) 4 m neben der Quelle.



(b) Permanentstation BSEG



(c) Obertägige Station



(d) Untertägige Station

Abbildung 16: Wellenform und Spektrogramm des Schusses P4 (Abb. 15).

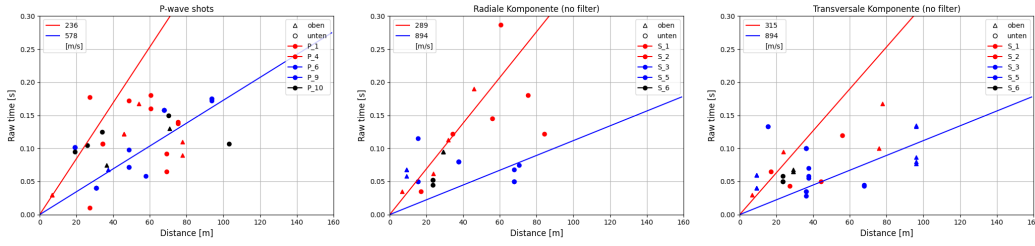
In etwa 27 m horizontaler Entfernung an der Permanentstation BSEG ist der Sweep im Frequenzbereich 20 - 50 Hz ebenfalls im Spektrogramm zu erkennen (Abb. 16b), wie auch an der Station ASJ in ca. 46 m Entfernung (Abb. 16c), obwohl das Signal in der Wellenform selbst visuell nicht zu erkennen ist. An der Station A2V in ca. 75 m Entfernung und Untertage gelegen, ist die Wellenform von starkem Rauschen dominiert (Abb. 16d). Das Spektrogramm zeigt scharfe Linien bei 50 und 150 Hz. Sehr wahrscheinlich handelt es sich hierbei um eine elektrische Einkopplung von Netzfrequenzen in den Datenlogger, begünstigt durch die großen Kabellängen. Dieses Rauschen ist an allen untertägigen Stationen vorhanden. Nichtsdestotrotz ist das angeregte Sweep-Signal im Spektrogramm deutlich zu erkennen, es steckt also nutzbare Information in dem verrauschten Signal.

Nachdem für jeden Schuss diejenigen Aufzeichnungen mit einer erkennbaren Signatur des Sweeps im Spektrogramm identifiziert wurden, wurden die entsprechenden Wellenformen mit dem "Quellsignal", der Aufzeichnung des Sweeps mit der Station AJC in ca. 1 m Entfernung zur Quelle, korreliert. Das Maximum der Korrelationsfunktion wurde ermittelt und der Zeitversatz (*timelag*) als Laufzeit der angeregten Wellen von Quelle zu Empfänger interpretiert.

Ergebnisse Die beobachteten Laufzeiten für die P- und S-Wellenschüsse (Abb. 17) zeigen eine Variabilität der Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Im Detail zeigt sich dabei häufig eine bimodale Verteilung der Laufzeiten entlang zweier Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Daher wurden die Messwerte nicht an eine, sondern an zwei Laufzeitgeraden angepasst. Hierzu wurden über eine Gittersuche die beiden Geschwindigkeiten bestimmt, für die die RMS-Differenz aller Messwerte zur jeweils nächstgelegenen Laufzeitgeraden minimal wird.

Bei der Auswertung der P-Wellen-Anregungen fiel auf, daß die beobachteten, über die gesamte Frequenzbreite von 10 - 80 Hz gemessenen Geschwindigkeiten sehr niedrige Werte von etwa 230 - 600 m/s aufweisen (Abb. 17a). Die naheliegendste Interpretation ist, daß trotz der vertikalen Anregung bevorzugt S-Wellen angeregt werden. Diese Beobachtung ist in der oberflächennahen Seismik nicht untypisch. Der Vergleich mit den breitbandig gemessenen S-Wellen Geschwindigkeiten bestätigt diese Interpretation prinzipiell, die S-Wellen-Geschwindigkeiten liegen zwischen 300 und 900 m/s und zeigen sowohl auf der (R)adial-, als auch auf der (T)ransversalkomponente recht deutlich zwei separate Laufzeitäste (Abb. 17b, c). Von den gemessenen S-Wellen-Geschwindigkeiten sind die transversal polarisierten S-Wellen tendenziell schneller als die radial polarisierten. Dies unterstützt ebenfalls die Interpretation der Konversion von P-Wellen zu radial polarisierten S-Wellen in der P-Wellen-Auswertung.

Um das starke 50 Hz Rauschen an den untertägigen Stationen zu eliminieren und gleichzeitig eine eventuelle Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu untersuchen, wurde die Auswertung der S-Wellen-Anregungen mit bandpassgefilterten Daten wie-



(a) Anregung von P-Wellen. (b) S-Wellen, Radialkomponente. (c) Transversalkomponente.

Abbildung 17: Laufzeiten für P- und S-Wellenschüsse, ungefilterte Daten, mit angepassten Laufzeitgeraden. Die Farben bezeichnen unterschiedliche Schusspunkte (s. Abb. 15).

derholt. Hierbei wurden die Frequenzbereiche von 10 - 40 Hz (äquivalent zu einem 40 Hz-Tiefpass) und 55 - 80 Hz (äquiv. zu 55 Hz Hochpass) separat betrachtet. Das Ergebnis zeigt sehr deutlich eine frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit von S-Wellen im Segeberger Kalkberg (Abb. 18).

Im tieffrequenteren Bereich dominieren Geschwindigkeiten von ca. 1000 m/s, sowohl auf der R-, als auch auf der T-Komponente. In beiden Fällen gibt es aber auch einen deutlich erkennbaren, langsameren Zweig mit Geschwindigkeiten von ca. 400 m/s, auf dem auch die meisten Messungen an den Oberflächenstationen liegen (Dreiecke in Abb. 18). Bei höheren Frequenzen liegen die Geschwindigkeiten deutlich niedriger, bei 500 - 600 m/s auf dem schnellen Laufzeitast, sowie bei 200 - 250 m/s auf dem langsameren. Auffällig ist, daß im höheren Frequenzbereich deutlich weniger verwertbare Messwerte aufgenommen werden konnten.

Fazit Im Bereich des Segeberger Kalkbergs liegen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von S-Wellen im Bereich von 200 - 1000 m/s, lassen sich aber insgesamt durch zwei frequenzabhängige Geschwindigkeiten beschreiben. Die höchsten Geschwindigkeiten von bis zu 1000 m/s sind im tieffrequenten Bereich von 10 - 40 Hz messbar. Dies ist zwar langsamer als aus Labormessungen bestimmte S-Wellengeschwindigkeiten von Anhydrit (2-3 km/s), allerdings sind in der Vor-Ort-Messung auch die oberflächennahe Schicht, die starke Zerklüftung des Kalkbergs, sowie der unbestimmte Grad der Wassersättigung des Anhydrits zu berücksichtigen. Dies wirkt sich vor allem auf die Wellenausbreitung bei hohen Frequenzen aus, was niedrigere Geschwindigkeiten von ca. 600 m/s oberhalb 50 Hz erklären kann.

Der langsamere Laufzeitast könnte sich durch die Wellenausbreitung in der oberflächennahen Schicht erklären. Hier scheinen Geschwindigkeiten von 400 m/s im tieffrequenten und 200 - 250 m/s im hochfrequenten Bereich plausibel. Die Anregung von P-Wellen zeigte, daß trotz vertikaler Anregung die meiste seismische Energie als S-Wellen abgestrahlt wird. Die beobachteten Ausbreitungsgeschwindigkeiten der P-Wellen Anregungen sind insgesamt sehr konsistent mit auf der R-Komponente gemessenen S-Wellengeschwindigkeiten.

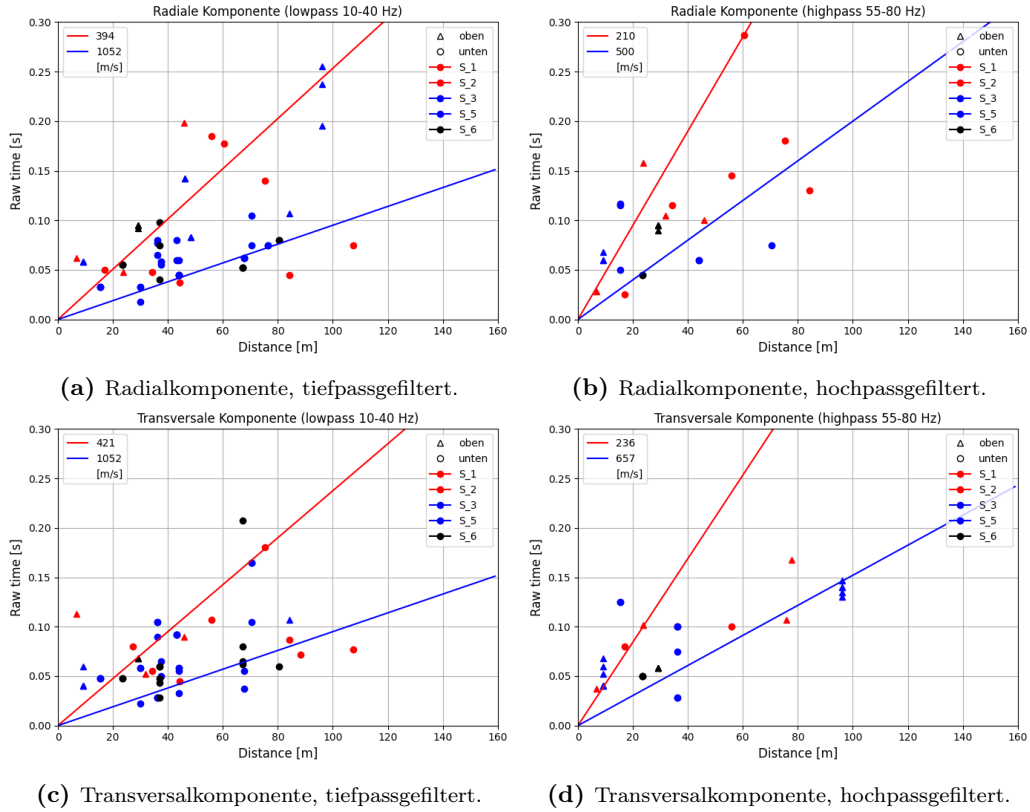


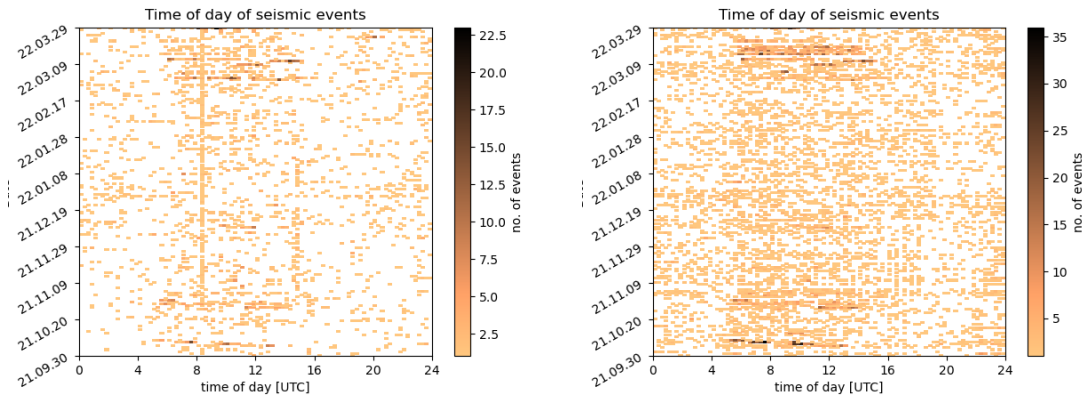
Abbildung 18: Laufzeiten für S-Wellenschüsse, gefilterte Daten, mit angepassten Laufzeitgeraden.

5.2.3 Vorläufige Bewertung des passiv seismischen Experiments

Vor der Auswertung der Daten des passiven seismischen Experiments in der Kalkberghöhle wurde zunächst der Fokus auf die Auswertung der Daten des aktiven Experiments gelegt. Diese Herangehensweise vereinfachte die Bewertung der Stationslokationen und es konnten Unstimmigkeiten in der ursprünglichen Lokalisierung der Geophone behoben werden. Zudem ergab die Auswertung des aktiven Experimentes Anhaltspunkte für seismische Geschwindigkeiten, welche für die Auswertung des passiven Experiments verwendet werden können.

Eine erste Auswertung der passiv registrierten Daten mit einem klassischen Detektionsverfahren, wie es für das lokale Bad Segeberg Netz verwendet wird, erhärtete schnell den in Weidle et al. [2022] geäußerten Verdacht, daß für die Auswertung des passiven Höhlennetzes eine anderer, an die geometrischen Gegebenheiten angepasster Detektionsalgorithmus verwendet werden muss.

Mit der klassischen STA/LTA-Detektion (Verhältnis von Amplituden in einem kurzen zu einem langen Zeitfenster) und den Parametern der Auswertung für das Bad Segeberg Netz, ergeben sich eine sehr hohe Anzahl von über 3000 Detektionen im Zeitraum September 2021 bis März 2022 (Abb. 19a). Auffällig sind regelmäßige Detektionen morgens gegen 8:30 UTC von November bis Ende März. Ein ähnliches Muster, etwas diffuser, zeigt sich nachmittags



(a) Detektionen mit Parametern des lokalen Bad Segeberg Netzes. (b) Detektionen mit angepassten Parametern für Ereignisse mit Frostbezug (Weidle et al. [2020]).

Abbildung 19: Detektionen am Höhlennetz im Segeberger Kalkberg. Histogramme mit Schrittweite 1 Tag.

zwischen 14:40 und 15:00 UTC, allerdings nur von November bis Januar. Die Ursache ist unklar, die Regelmäßigkeit deutet auf externe Einflüsse, evtl. von An- und Ausschalten von Licht- oder anderer elektronischer Anlagen, hin.

Zu Beginn des Experiments in der ersten Oktoberhälfte, sowie Anfang März, gibt es viele Detektionen in den Tagesstunden. Diese treten auch in Detektionen hervor, welche mit angepassten Parametern berechnet wurden (Abb. 19b). Diese Parameter sind an die Detektion von Ereignissen während Frostperioden am lokalen Bad Segeberg Netz angelehnt (Weidle et al. [2021]). Es werden hierbei über 8500 Detektionen getriggert, welche von einem Tag-Nacht-Rhythmus dominiert werden. Interessant ist, daß sich die Häufung von Ereignissen während der Tagstunden zu Beginn des Experiments zu späteren Stunden (Oktober 2020, 4-6 Uhr), zum Ende des Experiments zu früheren Stunden hin zu verschieben scheint. Ob und ggf. wie dieses Muster mit tageszeitlichen Variationen natürlichen oder anthropogenen Ursprungs zusammenhängt, ist unklar. Ebenso müssen die vielen Detektionen in den Tagstunden Anfang Oktober und Anfang März noch mit anderen Parametern, bspw. Höhlenezutritten aber auch meteorologischen Meßdaten, abgeglichen werden.

Die mit dem lokalen Netz detektierten Ereignisse während der starken Frostperiode um die Weihnachtstage 2021 zeigen hier in den Detektionen mit dem STA/LTA Algorithmus keine statistische Auffälligkeit. Diese Ereignisse wurden aber an allen Stationen des Höhlennetzes registriert, wie eine vorläufige manuelle Durchsicht ergab. Abb. 20 zeigt ein Beispiel von zwei, kurz hintereinander aufgetretenen Ereignissen. In der weiteren Bearbeitung können diese Ereignisse hilfreich sein, um eine, an die kleinskalige Geometrie des Messnetzes angepasste Parametrisierung des Ereignisdetektors zu bestimmen und ggf. Fehldetektionen zu reduzieren.

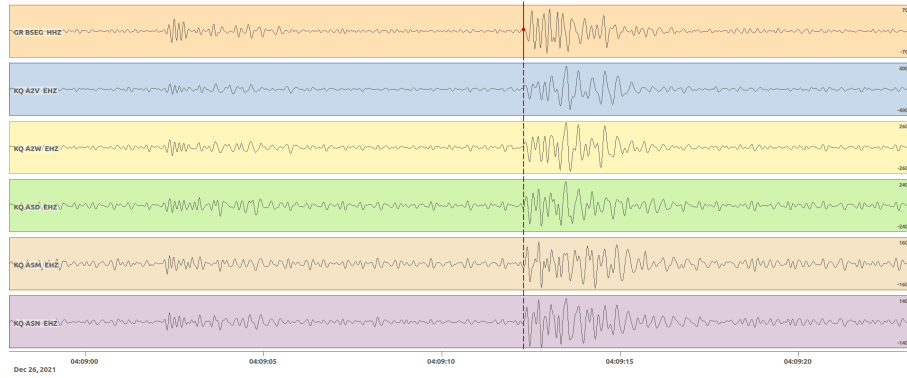


Abbildung 20: Wellenform eines Ereignisses am 26.12.2021 um 4:09 UTC während einer Periode starken Frosts, aufgezeichnet an den Stationen in der Segeberger Kalkberghöhle.

Fazit Durch das passive seismologische Experiment in der Segeberger Kalkberghöhle im Winter 2020/21 steht ein bisher ungekannter Datensatz für eine Präzisierung seismisch beobachtbarer Ereignisse zur Verfügung. In der ersten Auswertung zeigen sich eine Vielzahl von Detektionen, welche auf eine hohe Vielfalt an möglichen, sowohl natürlichen als auch anthropogenen Signalquellen hindeuten.

In der weiteren Auswertung sollen die Detektionen in verschiedene Typklassen gruppiert werden, um für jede Klasse repräsentative Ereignisse für detailliertere Untersuchungen zu selektieren. Relative Unterschiede in den Ankunftszeiten an den Stationen, die Identifizierung von Wellentypen (P-, S-, Oberflächenwellen) sowie die Bestimmung der Einfallsrichtung der seismischen Wellen werden dabei helfen, die Quelllokation und den Quellmechanismus dieser Ereignisse einzugrenzen. Ein besseres Verständnis der im Bereich der Höhle registrierten Ereignisse erlaubt schließlich eine gezielte Reevaluierung des Datenarchivs der permanenten seismologischen Station und bietet somit einen gezielteren Überblick vergangener seismischer Ereignisse und deren Ursachen.

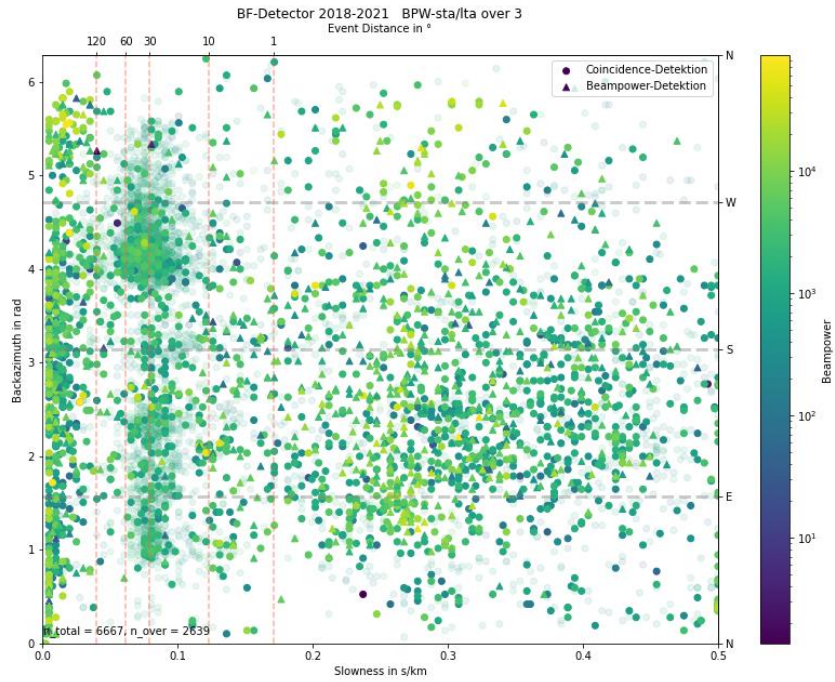
6 Auswertung des Helgoland Array

Das 2017 installierte Helgoland Array (HELGA) umfasst neben der permanenten Station in der Erdbebenwarte der CAU Kiel fünf weitere temporäre Stationen (Abb. 21). In 2020 wurden die Daten des Helgoland-Arrays erstmals mit Array-Verfahren ausgewertet (Weidle et al. [2021]). In 2021 wurde die Array-Auswertung automatisiert und in die routinemäßige Auswertung mit eingebunden (Weidle et al. [2022]).

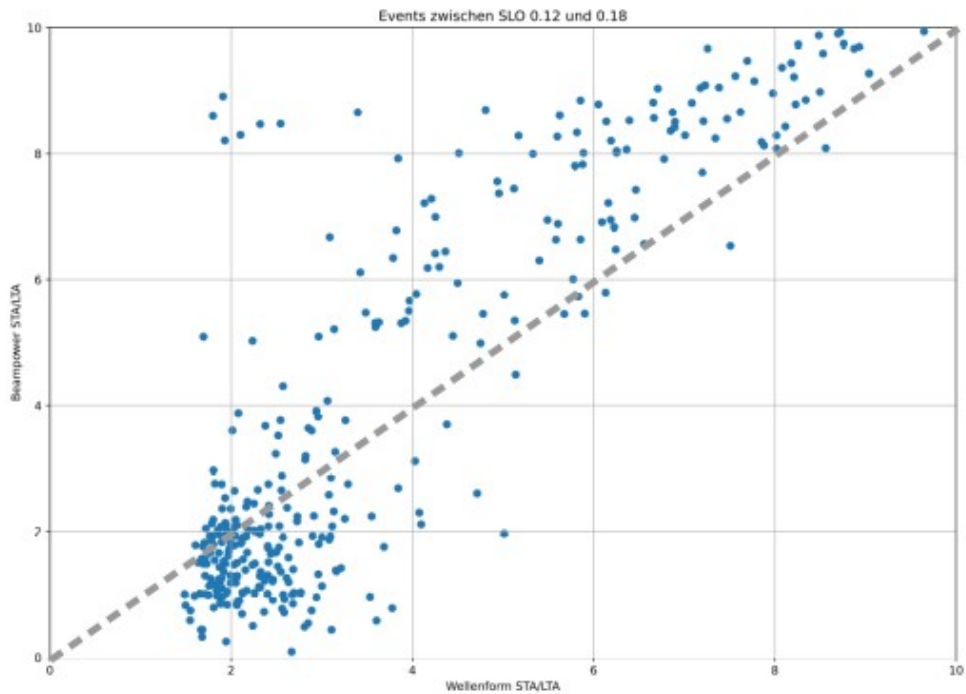


Abbildung 21: Karte des Helgoland Arrays (HELGA)

In Weidle et al. [2021] sowie Weidle et al. [2022] 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, 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. Die Auswertung der Jahre 2018 - 2021 zeigt eine Vielzahl an Detektionen, welche aufgrund der sehr empfindlichen Parameterwahl sehr häufig eine niedrige absolute Beampower aufweisen (Abb. 22a). Die Detektionsschwelle wurde derart gewählt, daß zum einen die Vollständigkeit in der Detektion seismischer Ereignisse gewährleistet werden kann, zum anderen die Zahl der, im Mittel, täglich auftretenden Detektionen in der manuellen Auswertung in handhabbarer Größenordnung verbleibt. Diese Strategie erlaubt es, über die Zeit Erfahrungswerte betreffend der vielen Detektionen in unterschiedlichen Bereichen der slowness-backazimuth-Ebene zu sammeln.



(a) Detektionen am Helgoland-Array nach Slowness und Backazimuth, farbkodiert nach absoluter Beampower.



(b) STA/LTA der Wellenform vs. STA/LTA der Beampower.

Abbildung 22: Detektionen am HELGA-Array 2018 - 2021.

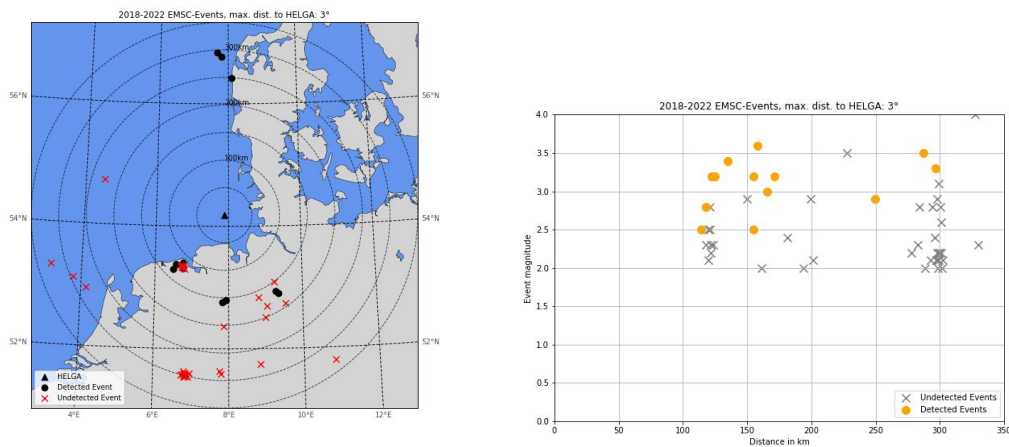
Detektionen im slowness-Bereich 0,12 - 0,18 s/km Für die Erfassung von seismischen Ereignissen im Umfeld von Helgoland, in der Deutschen Bucht und der südöstlichen Nordsee ist zuvorderst der slowness-Bereich von ca. 0,12 bis 0,18 s/km relevant. Daher werden, in Fortführung der bisherigen Betrachtungen in Weidle et al. [2021] und Weidle et al. [2022] diese Detektionen im Folgenden etwas genauer bewertet.

Die absolute Beampower kann als Amplitude der gestapelten Wellenform verstanden werden, berücksichtigt aber per se keine Änderungen des generellen Rauschniveaus. Daher ist gerade bei niedrigen Wellenformamplituden oftmals keine kohärente Wellenform zu erkennen und die Detektion wird ausschließlich durch eine Koinzidenz in der Stabilität des Rauschens in der slowness und des Backazimuths ausgelöst. Als Ergänzung wird deshalb auch das STA/LTA Verhältnis sowohl der Wellenform als auch der Beampowerspur betrachtet, welches das Signal-Rausch-Verhältnis mit abbildet. Abb. 22b zeigt den STA/LTA Wert der Wellenform (Mittelwert aller Stationen) gegen denselbigen der Beampower für alle Detektionen im slowness-Bereich 0,12 - 0,18 s/km.

Bei niedrigen STA/LTA-Werten $\lesssim 4$ der Wellenform ergibt sich überwiegend ein noch niedrigerer STA/LTA-Wert der Beampower. Dies bestätigt, daß diese Detektionen eher durch die Koinzidenz von slowness- und backazimuth-Stabilität getriggert werden. Vereinzelte Detektionen oberhalb der Diagonalen deuten auf transiente Signale hin, welche an mehreren Stationen zu beobachten, deren Ursachen aber nicht identifizierbar sind. Für natürliche Ursachen liegen keine Hinweise vor, die Wellenform legt anthropogene Aktivitäten als Ursache nahe. STA/LTA-Werte > 8 in der Beampower und $\lesssim 4$ in der Wellenform sind Fehldetektionen, welche gelegentlich um 0:00 UTC auftreten und auf das tageweise Zuschneiden der Wellenformdaten in der Datenverarbeitung zurückzuführen sind.

Für STA/LTA-Werte $\gtrsim 4$ in der Wellenform zeigt der STA/LTA-Wert der Beampower nahezu ausschließlich höhere Werte auf. Eine manuelle Durchsicht dieser Detektionen zeigt, daß transiente Wellenformen durchgehend erkennbar sind und die Mehrheit der Detektionen kann anhand des Wellenformcharakters als anthropogenen Ursprungs klassifiziert werden. Einzelne Detektionen in diesem Bereich stehen aber auch in Zusammenhang mit regionalen tektonischen Ereignissen in der Nordsee, auf den Britischen Inseln, in den Niederlanden, sowie in Niedersachsen. Für die routinemäßige Auswertung wird daher abgeleitet, daß mindestens alle Detektionen mit einem STA/LTA-Wert ≥ 2 in der Beampower einer manuellen Prüfung unterzogen werden müssen. Von den insgesamt knapp 800 Detektionen in den Jahren 2018 - 2021 im slowness-Bereich 0,12 - 0,18 s/km haben ca. 450 einen STA/LTA-Wert ≥ 2 in der Beampower. Dies entspricht im Mittel zwei Detektionen pro Woche. Darüberhinaus werden in der täglichen Auswertung aber auch weiterhin andere Detektionen stichpunktartig überprüft.

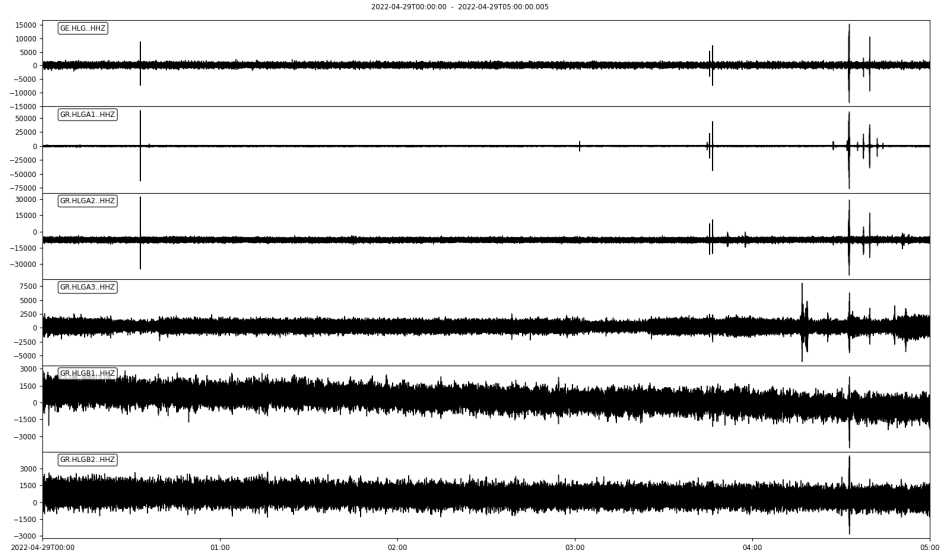
Detektionen bekannter Ereignisse Um die Detektionsfähigkeit von vergangenen Erdbeben im Bereich und Umfeld der südöstlichen Nordsee mit dem HELGA-Array zu betrachten, wurden alle Erdbeben im Zeitraum 2018 - 2021 (EMSC [2021]) in der Region manuell nachprozessiert (Abb. 23). Alle Erdbeben haben eine Magnitude von mindestens 2. In Entfernungen bis 100 km um Helgoland traten in diesem Zeitraum keine Ereignisse auf, von den Ereignissen bis 200 km Entfernung wurde etwa die Hälfte detektiert - oberhalb Magnitude 2.5 fast alle. In größeren Entfernungen wurden nur wenige Ereignisse mit Magnituden von 2.9 und höher detektiert. Daß vereinzelt Ereignisse mit Magnituden über 3 vom Array nicht detektiert werden, kann u.a. auf das stark variable, vorwiegend wetterabhängige Rauschniveau auf der Hochseeinsel zurückgeführt werden. Zudem ist die Detektionsfähigkeit des Arrays auch stark von der Verfügbarkeit aller Stationen abhängig. Fallen eine oder mehrere Stationen vorübergehend aus, reduziert sich die absolute Beampower und die Schwellwerte des Detektors liegen zu hoch. Dies könnte zukünftig durch eine adaptive Anpassung der Detektionsparameter an die zur jeweiligen Zeit zur Verfügung stehenden Stationen verbessert werden. Auch wenn bislang Ereignisse im näheren Umfeld um Helgoland nicht bekannt sind, ist anhand dieser Auswertung davon auszugehen, daß zumindest Ereignisse mit Magnituden ab 2.5 in der Deutschen Bucht zuverlässig detektiert werden sollten.



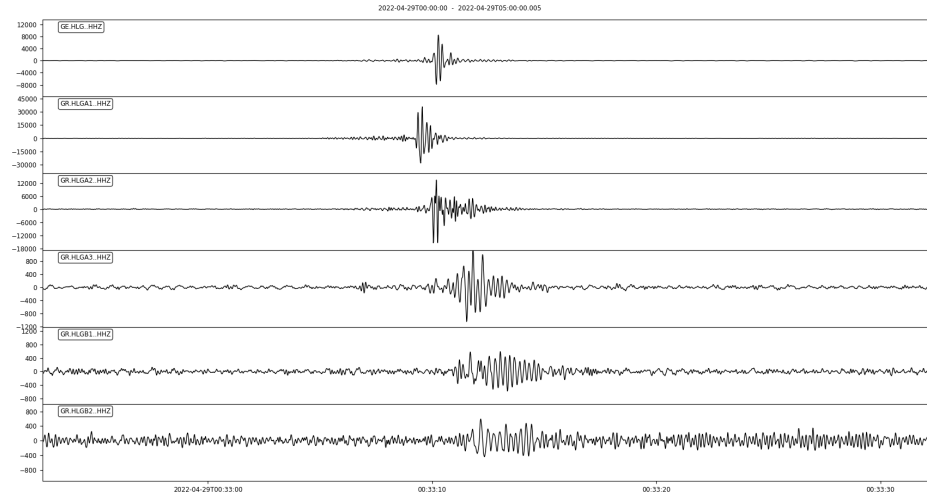
(a) Betrachtete Ereignisse (EMSC [2021]). (b) Epizentralentfernung von Helgoland vs. Magnitude.
Abbildung 23: Detektionen am HELGA-Array von regionalen Erdbeben im Zeitraum 2018 - 2021.

6.1 Felsabbrüche auf Helgoland

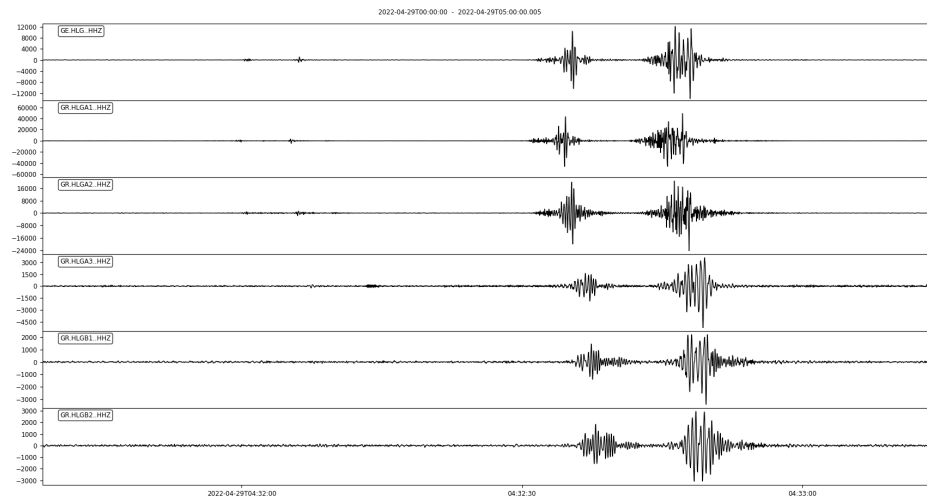
Am frühen Morgen des 29. April 2022 kam es zu einem größeren Felsabbruch an der Nordspitze Helgolands, in unmittelbarer Nähe zur Station HLG A1 (Abb. 21), bei dem glücklicherweise niemand zu Schaden kam. Das Ereignis wurde an den Stationen des Helgoland-Arrays registriert und die Aufzeichnungen zeigten schnell, daß der Felsabsturz kein singuläres Ereignis, sondern eine Abfolge von Ereignissen mit variabler Stärke in derselben Nacht war (Abb. 24).



(a) Wellenformen von 0:00 - 5:00 UTC, ungefiltert.



(b) Ereignis um 0:33 UTC, Bandpassfilter 2-8 Hz.



(c) Ereignisse ab 4:32 UTC, Bandpassfilter 2-8 Hz.

Abbildung 24: Wellenformen der Felsabbrüche am 29.4.2022, aufgezeichnet am Helgoland-Array.

In der nachträglichen Auswertung wurden in den Morgenstunden des 29.4.2022 zwölf Ereignisse identifiziert, welche mit dem Felsabbruch in Zusammenhang stehen (Tabelle 3). Darüberhinaus wurden bereits am 17.4. zwei Ereignisse registriert, welche aufgrund ihrer Charakteristik den Ereignissen vom 29.4. sehr ähneln. Weitere vier ähnliche Ereignisse im Februar und März 2022, sowie das in Weidle et al. [2022] diskutierte Ereignis vom 24.12.2021, sind in der Nachbetrachtung ebenfalls als mögliche Felsabbrüche zu bewerten.

Origin Time (UTC)	Magnitude	Origin Time (UTC)	Magnitude
2022-02-26 20:06:39	1.2	2022-04-29 04:31:57	1.1
2022-02-26 23:44:37	1.3	2022-04-29 04:32:28	2.0
2022-03-11 00:53:48	1.6	2022-04-29 04:35:34	0.8
2022-03-17 22:05:06	2.1	2022-04-29 04:37:28	1.1
2022-04-17 21:24:47	0.5	2022-04-29 04:39:32	1.7
2022-04-17 21:27:48	2.1	2022-04-29 04:42:08	0.7
2022-04-29 00:33:05	1.4	2022-05-12 20:36:00	1.0
2022-04-29 03:01:32	0.7	2022-05-17 04:37:20	1.0
2022-04-29 03:45:24	1.4	2022-06-08 16:54:54	1.3
2022-04-29 03:46:29	1.5	2022-08-17 21:43:38	1.8
2022-04-29 03:44:39	0.9	2022-09-28 01:21:14	1.0
2022-04-29 04:27:15	0.8		

Tabelle 3: Am Helgoland-Array detektierte und als Felsabbruch klassifizierte Ereignisse im Jahr 2022.

Das abgebrochene Volumen des Felsabbruchs am 29.4.2022 wird laut Medienberichten auf mehrere hundert Kubikmeter Fels geschätzt (z.B. NDR). Generell ist eine Ableitung des abgebrochenen Volumens aus seismologischen Aufzeichnungen denkbar, benötigt aber eine detaillierte Kalibrierung mit bekannten Ereignissen und deren, zuverlässig bestimmter, Felsvolumina. Eine einfache Relation "seismische Amplitude (Magnitude) -> Felsvolumen" ist nicht ausreichend, da die Wellenformcharakteristik und Maximalamplitude der Wellenform stark von der Art des Abbruchs abhängt. Diese kann in einem breiten Spektrum erfolgen, von lawinenartig, mit einer länger andauernden Anregung von Wellen niedriger Amplitude, bis hin zum Absturz und impulsiven Einschlag eines größeren Felsblockes, mit entsprechend kurzer Wellenform mit hoher Amplitude. Die Beispiele in Abb. 24b, c) zeigen die Variabilität der registrierten Ereignisse. Entsprechend sind die in Tabelle 3 genannten Magnituden keine Quantifizierung des jeweiligen Ereignisses, sondern beschreiben "nur" die Maximalamplitude. Daß eine Kalibrierung seismischer Daten auf Abbruchvolumina grundsätzlich möglich ist, wurde bspw. anhand von Kalbungseignissen an Gletschern in der Arktis bereits nachgewiesen (z.b. Köhler et al. [2019]).

Durchsicht von Archivdaten nach potentiellen Abbruchereignissen Die stärkeren Ereignisse am Morgen des 29.4.2022 übersteigen in der Amplitude das Rauschniveau bei weitem (Abb. 24a), nicht nur an der Station HLGA1 in wenigen 10er m Abstand zur Abbruchstelle, sondern auch an der Permanentstation HLG in der James-Krüß-Schule. Daten der Station HLG liegen seit 2001 digital vor und eine manuelle Durchsicht von Ta-

gesplots der Wellenform an dieser Station ergab etwa 200 potentielle Ereignisse, welche auf Felsabbrüche hindeuten könnten. Vor 2017 ist diese Einschätzung mit größeren Unsicherheiten versehen, da anhand der variablen Signalcharakteristik und der mangelnden Bestätigung durch weitere Beobachtungen andere Ursachen nicht ausgeschlossen werden können.

Seit der Installation des Helgoland-Arrays in 2017, ist die Bewertung solcher Ereignisse aber relative zuverlässig möglich und in diesem Zeitraum wurden etwa 50 solcher Ereignisse identifiziert. Die Gemeinde Helgoland wurde über die seismischen Beobachtungen vom 29.4.2022 in Kenntnis gesetzt. In einem persönlichen Gespräch konnten einige Daten von bekannten Felsabbrüchen in der jüngeren Vergangenheit in Erfahrung gebracht werden, welche sich in den meisten Fällen mit seismischen Registrierungen in Verbindung bringen lassen. Das Helgoland-Array bietet also die Möglichkeit, erosive Prozesse an der Helgoländer Steilküste kontinuierlich passiv seismisch zu überwachen. Bereits anhand der Archivdaten besteht die Möglichkeit, durch weitere Untersuchungen das Prozeßverständnis und die Klassifizierung der seismischen Wellenformen auf Abbrucharten und ungefähre Abbruchvolumina zu verbessern. Darüberhinaus ist auch eine Anpassung eines separaten Detektors für die Stationen des Helgoland-Arrays denkbar, ähnlich wie er am Bad Segeberg Netz eingesetzt wird. Der bereits etablierte Array-Detektor ist hierfür nicht geeignet, da Arrayverfahren nur für Ereignisse außerhalb des Stationsnetzes geeignet sind.

7 Zusammenfassung

Das seismologische Stationsnetz bestand im Jahr 2022 aus insgesamt 18 seismologischen Stationen, wobei acht das landesweite Stationsnetz und jeweils fünf zusätzliche Stationen auf Helgoland und um Bad Segeberg mit den jeweiligen Permanentstationen lokale Netze bilden. Aufgrund regelmäßiger Wartungen - sowohl vor Ort, als auch per Fernzugriff - liegt die Datenvollständigkeit an fast allen Stationen bei über 95%. Die Station Birkenmoor wurde im vergangenen Jahr als Bohrlochstation etabliert und stärkt die seismologische Überwachung im zentralen und östlichen Landesteil, sowie in der Kieler Bucht. An der Station Quickborn wurde der Ausbau der Stromversorgung vorbereitet, um einen kontinuierlichen Betrieb, sowie eine Echtzeitdatenübertragung ganzjährig gewährleisten zu können. Der Umbau wurde Anfang des Jahres 2023 vollzogen. Um die bestehende Lücke im Stationsnetz im Nordwesten von SH zu schließen, sollen mögliche Standorte für eine weitere Station identifiziert und Testmessungen durchgeführt werden.

Die Erfassung und initiale Auswertung der seismologischen Daten erfolgt weitestgehend automatisiert, erfordert aber kontinuierliche Aufsicht, um technische Probleme frühzeitig erkennen und beheben zu können. Neben den bisher etablierten Detektionsverfahren wurde ein wellenformbasierter *amplitude decay* (AD) Detektor in Betrieb genommen, welcher von K. Stammler (BGR) entwickelt und am IfG an die zur Verfügung stehenden Echtzeitdaten und das zu überwachende Gebiet angepasst wurde. Der AD Detektor erkennt und lokalisiert Ereignisse mit Magnituden oberhalb 2.5 sehr zuverlässig, im Bereich der südlichen Ostsee bereits ab Magnituden von etwa 1.5. Trotz der zuverlässigen automatisierten Detektion bleibt eine manuelle Auswertung aber unabdingbar. Lokale, schwächere Ereignisse, welche im Allgemeinen auf anthropogene oder meteorologische Ursachen zurückzuführen sind, werden nach wie vor überwiegend in der manuellen Durchsicht der täglichen Wellenformen identifiziert.

Der Ereigniskatalog für Schleswig-Holstein enthält einige tektonische Ereignisse aus bekannten Quellregionen, wie der zentralen Nordsee und den Gasfördergebieten in Niedersachsen und Groningen (NL). Dazu enthält der Katalog auch eine Vielzahl von anthropogen verursachten Ereignissen, v.a. Sprengungen. Hervorzuheben sind die seismischen Ereignisse im Zusammenhang mit der Zerstörung der Nord Stream Pipelines, welche am IfG zuverlässig detektiert wurden. Neben der eigenen Detektion von Ereignissen in SH und Umgebung wird der Ereigniskatalog regelmäßig mit veröffentlichten Katalogen der Nachbarländer abgeglichen. Er liefert somit 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.

Am lokalen Bad Segeberg Netz kam es im Dezember 2021 zum wiederholten Male zu seismischen Ereignissen während einer Periode starken Frosts. Um diese Ereignisse, aber auch andere, welche in der Wellenform dem Erdbeben von 1997 ähneln, weitergehend zu untersuchen, wurde im Winter 2021/22 ein temporäres, passiv seismisches Experiment in der Kalkberghöhle durchgeführt. Zur Bestimmung von, für die Auswertung wichtiger Parameter, wurde dieses mit einem aktiv seismischen Experiment ergänzt. Die Auswertung des aktiven Experiments half dabei, Ungenauigkeiten in der Geofonlokation untertage zu reduzieren und ergab einen Richtwert für die Scherwellengeschwindigkeit im Bereich der Kalkberghöhle von 1000 m/s bzw. 400 m/s für die oberflächennahe Schicht. Diese Erkenntnisse sollen im nächsten Schritt für die Auswertung des passiven seismischen Experiments genutzt werden. Eine vorläufige Bewertung zeigte eine hohe Anzahl an Detektionen, wobei die Detektionsparameter aufgrund der verhältnismäßig kleinskaligen Geometrie eine Anpassung erfordern. Die Vielzahl an Detektionen soll nach typischen Signalmustern in Ereignisklassen kategorisiert und anschließend repräsentative Ereignisse dieser Klassen auf den Quellmechanismus und die Quelllokation genauer untersucht werden. Eine Kategorisierung von Ereignissen um den Kalkberg eröffnet schließlich die Möglichkeit, 25 Jahre seismologischer Aufzeichnungen an der Permanentstation zu reevaluieren.

Das lokale Netz auf Helgoland wird in der automatisierten Auswertung vorwiegend als seismisches Array verwendet. Eine detaillierte Untersuchung von Detektionen im, für die Detektion von Ereignissen in der Deutschen Bucht relevanten, slowness-Bereich von 0,12 bis 0,18 s/km im Zeitraum 2018-2021 ergab, daß Ereignisse ab Magnitude 2.5 vom Array zuverlässig detektierbar sind. Allerdings fehlen bisher Referenzereignisse im Umkreis von 100 km um Helgoland, um diese untere Magnitudenschwelle genauer präzisieren zu können. Im April 2022 kam es zu einem größeren Felsabbruch an der Nordküste der Hochseeinsel, welcher an den seismologischen Stationen auf Helgoland sehr deutlich registriert wurde. In der nachträglichen Auswertung konnten in der betreffenden Nacht 12, im Jahr 2022 insgesamt 23 Ereignisse identifiziert werden, welche als Abbruchereignisse klassifiziert wurden. Im Archiv der seismologischen Daten der Station HLG wurden seit 2001 ca. 200 potentielle Abbruchereignisse identifiziert und dieser Katalog kann als Basis für weitergehende Untersuchungen genutzt werden. So ist es z.B. vorstellbar, die seismischen Beobachtungen mit Felsvolumina zu kalibrieren, wofür aber die Einbindung von zusätzlichen Daten notwendig wäre.

Literatur

- Deutscher Wetterdienst. Climate Data Center. <http://www.dwd.de/cdc>. Zuletzt abgerufen am 17.2.2023.
- EMSC. European-Mediterranean Seismological Centre. <https://www.emsc-csem.org>, 2021.
- GFZ Potsdam and Gempa GmbH. The SeisComP seismological software package. <http://www.seiscomp.de>, 2008. Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH.
- Kachelmann GmbH. kachelmannwetter.de. <https://kachelmannwetter.com/de/>. Zuletzt abgerufen am 16.2.2023.
- A. Köhler, M. Petlicki, P.-M. Lefeuve, G. Buscaino, C. Nuth, and C. Weidle. Contribution of calving to frontal ablation quantified from seismic and hydroacoustic observations calibrated with lidar volume measurements. *The Cryosphere*, 13(11):3117–3137, nov 2019. doi: 10.5194/tc-13-3117-2019.
- LBEG. Niedersächsischer Erdbebendienst. <https://www.lbeg.niedersachsen.de/erdbebendienst/niedersaechsischer-erdbebendienst-ned-112163.html>, 2013.
- 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.
- 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, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2021.
- C. Weidle, H. Sudhaus, T. Meier, and A. Omlin. Bericht zur Kooperation 2021 - Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung. Technical report, CAU Kiel, 2022.

A Ereigniskatalog für 2022

Tabelle A.1: Tektonische und selektierte nicht-tektonische seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein und Umgebung. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-01-27 18:56:31	54.1591	11.0700	10.0	1.8	Schleswig-Holstein	other
2022-02-26 20:06:39	54.2567	7.8569	10.0	1.2	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-02-26 23:44:37	54.2567	7.8569	10.0	1.3	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-03-11 00:53:48	54.1907	7.8864	10.0	1.6	Helgoland Umgebung	rock burst
2022-03-12 03:45:40	58.9386	11.9622	0.0	3.6	Sweden	earthquake
2022-03-16 11:18:52	56.6709	6.5198	3.5	2.9	North Sea	earthquake
2022-03-17 22:05:06	54.1882	7.8646	10.0	2.1	Helgoland Umgebung	rock burst
2022-03-28 07:23:12	54.1884	7.8698	10.0	1.2	Helgoland Umgebung	controlled explosion
2022-04-01 17:11:09	53.3855	6.7978	3.5	2.5	The Netherlands	earthquake
2022-04-02 10:06:10	54.4646	10.0311	10.0	1.2	Rendsburg-Eckernförde	other
2022-04-02 13:42:23	54.6411	10.7392	18.3	2.3	Danmark	explosion
2022-04-04 04:48:49	55.7944	11.8136	11.8	2.5	Danmark	earthquake
2022-04-14 08:58:56	54.5471	13.3581	10.0	1.3	Vorpommern-Rügen	sonic boom
2022-04-14 09:07:21	54.5467	13.3577	10.0	1.1	Vorpommern-Rügen	sonic boom
2022-04-17 21:24:47	54.1882	7.8703	0.0	0.5	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-17 21:27:48	54.1882	7.8703	0.0	2.1	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-18 10:19:02	54.1712	7.8945	10.0	0.6	Helgoland	anthropogenic event
2022-04-21 00:53:17	53.5953	2.2515	7.2	2.8	North Sea	earthquake
2022-04-21 22:20:38	54.1780	7.8884	10.0	0.5	Helgoland	anthropogenic event
2022-04-25 04:08:04	54.1780	7.8884	10.0	0.4	Helgoland	anthropogenic event
2022-04-26 13:30:56	54.5478	13.3580	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	sonic blast

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-04-26 17:14:30	54.1780	7.8884	10.0	0.4	Helgoland	anthropogenic event
2022-04-27 15:23:52	54.1850	7.8884	10.0	0.4	Helgoland	anthropogenic event
2022-04-29 00:33:05	54.1885	7.8704	0.0	1.4	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 03:01:32	54.1885	7.8704	0.0	0.7	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 03:45:24	54.1885	7.8704	0.0	1.4	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 03:46:29	54.1885	7.8704	0.0	1.5	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 03:44:39	54.1885	7.8704	0.0	0.9	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:27:15	54.1885	7.8704	0.0	0.8	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:31:57	54.1885	7.8704	0.0	1.1	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:32:28	54.1885	7.8704	0.0	2.0	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:35:34	54.1885	7.8704	0.0	0.8	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:37:28	54.1885	7.8704	0.0	1.1	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:39:32	54.1885	7.8704	0.0	1.7	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-04-29 04:42:08	54.1885	7.8704	0.0	0.7	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-05-02 05:52:43	54.1903	7.8862	10.0	0.4	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-05-02 15:49:59	54.1827	7.8894	10.0	0.6	Helgoland	anthropogenic event
2022-05-03 10:13:30	54.1827	7.8894	10.0	0.8	Helgoland	anthropogenic event
2022-05-04 14:15:20	54.1737	7.9412	0.0	2.2	Helgoland Umgebung	explosion
2022-05-05 13:18:18	54.5500	13.3638	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-05-05 19:27:58	54.1790	7.8974	10.0	0.5	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-05-09 05:38:26	54.1752	7.8939	10.0	1.0	Helgoland	anthropogenic event
2022-05-10 09:44:50	56.0362	11.1436	0.0	2.6	Danmark	explosion
2022-05-11 16:55:22	54.5000	13.2327	10.0	1.4	Vorpommern-Rügen	sonic boom

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-05-11 17:12:13	54.4000	13.0000	10.0	2.0	Vorpommern-Rügen	sonic boom
2022-05-12 20:36:00	54.1752	7.8939	10.0	1.0	Helgoland	rock burst
2022-05-14 10:18:06	54.1752	7.8939	10.0	1.3	Helgoland	anthropogenic event
2022-05-14 20:42:36	54.5477	13.3214	10.0	1.1	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-05-17 04:37:20	54.1875	7.8736	0.0	1.0	Helgoland	rockslide
2022-05-17 19:46:26	54.1752	7.8939	0.0	0.7	Helgoland	anthropogenic event
2022-05-25 10:26:09	58.8022	1.4715	74.8	3.6	North Sea	earthquake
2022-05-30 16:15:38	57.0142	1.7842	10.0	2.7	North Sea	earthquake
2022-06-05 19:40:39	54.5152	13.3743	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	sonic boom
2022-06-08 16:54:54	54.1945	7.8406	0.1	1.3	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-06-09 19:25:45	54.5152	13.3743	10.0	1.4	Vorpommern-Rügen	sonic boom
2022-06-12 04:42:44	54.1752	7.8939	10.0	1.2	Helgoland	anthropogenic event
2022-06-15 10:18:49	54.5754	13.3527	10.0	1.4	Vorpommern-Rügen	sonic boom
2022-06-15 17:29:14	54.1673	7.8920	10.0	0.9	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-06-19 03:30:21	54.1800	7.8920	10.0	1.4	Helgoland	acoustic noise
2022-06-19 03:37:14	54.1875	7.8736	10.0	1.6	Helgoland	acoustic noise
2022-06-25 19:06:49	54.5724	13.2854	10.0	0.9	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-06-26 14:29:53	54.5724	13.2854	10.0	1.4	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-06-26 21:00:43	54.5724	13.2854	10.0	0.8	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-07-03 08:04:32	54.1785	7.9084	0.0	0.9	Helgoland Umgebung	sonic blast
2022-07-03 23:27:17	54.5724	13.2854	10.0	1.2	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-07-03 23:40:11	54.5724	13.2854	10.0	1.2	Vorpommern-Rügen	acoustic noise
2022-07-10 01:16:13	56.7095	10.3013	29.9	2.6	Danmark	earthquake

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-07-14 19:01:46	54.2675	8.0696	9.6	1.7	Schleswig-Holstein	sonic blast
2022-07-15 21:30:35	54.0859	8.0300	3.6	1.9	Schleswig-Holstein	sonic blast
2022-07-15 21:35:29	54.1846	7.8982	0.7	1.4	Helgoland Umgebung	sonic blast
2022-07-18 08:28:52	56.7510	8.3928	76.9	1.6	Region_Nordjylland	earthquake
2022-07-18 14:18:10	54.1783	7.9047	0.0	1.4	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-07-20 11:31:32	56.6324	13.2160	0.1	1.8	Sweden	earthquake
2022-07-21 17:00:02	57.7057	11.7085	0.4	2.3	Sweden	explosion
2022-07-28 19:19:09	55.8330	11.7531	5.0	1.2	Danmark	earthquake
2022-07-30 22:14:26	54.1839	7.8993	0.0	1.4	Helgoland Umgebung	sonic blast
2022-08-01 10:58:21	56.5325	13.1992	0.0	1.9	Sweden	explosion
2022-08-02 15:05:32	58.8159	15.1389	0.0	2.9	Sweden	explosion
2022-08-03 04:00:26	58.8680	15.1457	0.0	2.9	Sweden	explosion
2022-08-04 08:05:23	54.1827	7.8963	0.0	1.2	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-08-05 10:59:40	56.1757	13.1301	0.0	1.8	Sweden	explosion
2022-08-06 05:45:11	54.1834	7.8941	0.0	1.4	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-08-06 07:39:30	54.1838	7.8933	0.0	1.5	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-08-07 15:07:28	54.1842	7.8983	0.0	1.1	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-08-07 15:46:29	54.1839	7.8990	0.0	1.1	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-08-09 09:36:59	57.0440	16.3626	0.0	2.3	Sweden	explosion
2022-08-09 11:05:17	57.2946	13.4763	0.0	2.1	Sweden	explosion
2022-08-10 07:32:00	54.5481	13.3964	0.0	0.9	Mecklenburg-Vorpommern	acoustic noise
2022-08-10 11:00:01	57.5342	11.8262	10.0	2.3	Sweden	explosion
2022-08-11 12:59:20	57.0929	16.5152	0.0	2.3	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-08-11 17:54:13	54.1833	7.8936	0.0	0.8	Helgoland Umgebung	acoustic noise
2022-08-15 10:31:07	56.5953	16.0688	1.4	2.3	Sweden	explosion
2022-08-17 07:58:05	54.4105	13.1969	0.0	1.1	Mecklenburg-Vorpommern	sonic boom
2022-08-17 10:24:56	56.8773	14.7628	0.0	2.0	Sweden	explosion
2022-08-17 11:56:44	56.2237	13.0335	3.0	2.0	Sweden	explosion
2022-08-17 13:00:06	57.4292	12.5512	4.9	2.3	Sweden	explosion
2022-08-17 20:11:18	54.4834	13.4510	0.0	1.1	Mecklenburg-Vorpommern	anthropogenic event
2022-08-17 21:09:34	54.2077	7.8718	0.0	1.7	Helgoland Umgebung	thunder
2022-08-17 21:43:38	54.1872	7.8248	0.0	1.8	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-08-18 04:52:20	53.5702	9.8736	0.0	3.2	Hamburg	cavity collapse
2022-08-18 20:17:44	54.4850	13.4410	0.0	1.1	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-08-19 09:18:48	55.6341	13.3725	3.3	1.9	Sweden	explosion
2022-08-19 13:16:06	57.0891	13.8488	0.0	2.2	Sweden	explosion
2022-08-19 20:16:45	53.9400	10.3164	0.0	0.5	Segeberg	anthropogenic event
2022-08-20 00:36:44	54.5336	13.3134	0.0	1.1	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-08-20 20:16:01	53.9351	10.3016	0.0	0.4	Segeberg	anthropogenic event
2022-08-21 13:57:16	58.4600	12.9758	0.0	2.9	Sweden	earthquake
2022-08-22 20:10:52	54.4720	13.4556	1.9	1.2	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-08-23 11:49:40	57.3133	15.6807	3.4	2.3	Sweden	explosion
2022-08-23 12:00:22	56.6271	15.9890	0.0	2.4	Sweden	explosion
2022-08-23 12:25:18	57.6729	12.2335	0.0	2.5	Sweden	explosion
2022-08-23 20:12:13	54.4567	13.4906	0.0	1.1	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-08-24 10:34:32	56.2400	15.4625	1.8	2.1	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-08-24 11:37:14	57.0044	14.2953	0.0	2.5	Sweden	explosion
2022-08-24 13:43:27	57.6641	17.0515	0.0	2.1	Baltic Sea	explosion
2022-08-24 15:38:57	57.6258	11.4927	2.2	1.6	Sweden	explosion
2022-08-24 20:09:54	54.4008	13.5646	0.0	1.2	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-08-25 12:05:09	55.9994	13.5749	1.5	2.1	Sweden	explosion
2022-08-25 13:11:38	57.5409	11.5964	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-08-26 09:06:52	57.1899	15.9802	2.9	1.5	Sweden	explosion
2022-08-26 18:17:05	57.6872	12.2397	0.0	1.7	Sweden	earthquake
2022-08-27 05:35:35	57.6049	11.6500	1.2	2.0	Sweden	explosion
2022-08-27 11:30:39	57.5261	11.5551	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-08-27 18:19:41	57.5255	11.4544	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-28 19:14:37	57.5553	11.5212	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-28 21:35:32	57.5447	11.5056	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-29 01:52:16	57.5278	11.4535	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-29 05:56:03	57.5344	11.5013	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-29 09:08:55	57.5467	11.5529	0.3	1.6	Sweden	explosion
2022-08-29 16:27:06	57.5097	11.4894	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-29 18:07:59	57.5492	11.5889	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-29 21:48:34	57.5087	11.4426	0.0	1.9	Sweden	explosion
2022-08-29 22:48:34	57.5249	11.4841	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-08-30 04:59:32	57.5390	11.5205	0.0	1.8	Sweden	explosion
2022-08-30 09:59:31	55.7132	13.3481	1.7	1.5	Sweden	explosion
2022-08-30 18:39:27	57.5347	11.6859	10.0	2.6	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-08-30 20:12:00	54.4716	13.4526	0.0	0.7	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-08-30 20:21:16	57.5225	11.4763	0.0	2.5	Sweden	explosion
2022-08-31 07:03:05	57.5286	11.4986	0.0	2.5	Sweden	explosion
2022-08-31 08:38:52	57.4949	11.4491	0.0	2.6	Sweden	explosion
2022-08-31 10:13:30	56.0508	11.5679	0.0	2.6	Danmark	explosion
2022-08-31 11:00:00	57.5927	11.9793	2.5	1.4	Sweden	explosion
2022-08-31 11:30:32	56.0522	13.9711	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-08-31 12:03:27	56.1849	13.1686	0.0	1.2	Sweden	explosion
2022-09-01 20:11:49	54.5086	13.3987	0.0	0.8	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-09-02 10:34:11	55.6428	13.3764	0.8	1.2	Sweden	explosion
2022-09-05 08:32:05	54.1816	7.8994	0.0	1.2	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-09-05 10:08:18	52.9245	8.2884	7.5	2.0	Niedersachsen	earthquake
2022-09-06 00:14:50	55.8116	12.1229	19.7	1.2	Region_Hovedstaden	earthquake
2022-09-06 09:52:32	57.2804	15.8696	0.5	1.2	Sweden	explosion
2022-09-07 08:43:33	57.5532	11.5906	0.3	1.7	Sweden	explosion
2022-09-07 10:33:03	56.6332	16.0198	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-09-07 11:00:00	57.5871	12.0335	3.6	1.5	Sweden	explosion
2022-09-07 12:00:48	56.2108	13.1238	0.8	1.3	Sweden	explosion
2022-09-08 05:27:47	57.5158	11.6382	1.7	2.7	Sweden	explosion
2022-09-08 12:05:38	56.8433	14.7222	0.0	1.9	Sweden	explosion
2022-09-08 21:47:12	54.6496	14.4834	2.1	1.7	Baltic Sea	earthquake
2022-09-09 00:39:11	53.2465	6.8869	0.0	1.9	The Netherlands	earthquake
2022-09-09 09:17:52	55.6531	13.4198	0.0	1.2	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-09-09 15:08:56	57.5904	11.6785	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-09-09 17:03:06	54.4343	13.1235	0.0	1.7	Mecklenburg-Vorpommern	thunder
2022-09-10 08:14:44	54.1873	7.9017	0.0	1.0	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-09-10 20:12:23	54.4684	13.4628	0.0	1.0	Vorpommern-Rügen	anthropogenic event
2022-09-11 00:06:57	57.3474	6.6945	71.6	3.0	North Sea	earthquake
2022-09-13 09:24:05	54.1836	7.8990	0.0	0.8	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-09-14 11:12:00	58.4229	13.5453	0.0	2.5	Sweden	earthquake
2022-09-15 11:49:47	55.7344	13.3448	2.4	1.7	Sweden	explosion
2022-09-18 00:05:09	54.1440	12.5720	10.0	1.0	Vorpommern-Rügen	earthquake
2022-09-19 12:25:42	56.1641	14.7523	0.5	1.3	Sweden	explosion
2022-09-19 12:34:29	56.6107	15.9663	0.4	1.6	Sweden	explosion
2022-09-20 00:01:26	54.5282	13.1716	0.0	1.2	Vorpommern-Rügen	thunder
2022-09-20 13:12:02	57.3515	15.1856	4.7	1.6	Sweden	explosion
2022-09-21 10:32:16	55.6679	13.4013	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-09-21 11:00:01	57.5857	12.0709	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-09-21 12:46:07	56.9394	14.3571	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-09-22 11:07:51	57.3846	13.9330	0.0	1.5	Sweden	explosion
2022-09-22 11:43:24	56.9768	14.4002	2.3	1.6	Sweden	explosion
2022-09-22 12:20:34	57.2725	12.3987	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-09-24 10:20:40	53.3363	6.8187	5.0	2.4	The Netherlands	earthquake
2022-09-25 20:24:24	56.1666	12.8907	9.6	1.2	Sweden	earthquake
2022-09-26 00:03:26	54.9048	15.4992	0.0	2.3	Baltic Sea	explosion
2022-09-26 17:03:50	55.6027	15.7353	0.0	2.7	Baltic Sea	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-09-28 01:21:14	54.1896	7.8363	0.0	1.0	Helgoland Umgebung	rockslide
2022-09-28 10:58:48	56.7826	15.8084	0.0	1.5	Sweden	explosion
2022-09-28 11:00:18	56.7372	15.8760	0.0	1.9	Sweden	explosion
2022-09-28 12:14:50	55.6928	13.4482	3.6	1.5	Sweden	explosion
2022-09-29 12:08:17	56.2260	13.0837	0.0	1.3	Sweden	explosion
2022-09-29 14:11:47	54.1772	7.9055	0.0	1.8	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-09-30 13:29:33	56.8722	14.7012	2.5	1.9	Sweden	explosion
2022-10-04 10:06:37	57.0443	13.2725	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-10-04 11:10:16	57.0297	15.4033	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-10-05 12:00:23	56.5594	14.8593	1.8	1.3	Sweden	explosion
2022-10-05 12:03:26	55.0048	14.6267	0.0	1.0	Greater Bornholm	explosion
2022-10-06 11:38:38	54.1805	7.8969	0.0	1.3	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-10-07 10:28:58	54.7964	18.2225	7.0	1.9	Poland	explosion
2022-10-08 02:17:17	53.2917	6.8091	6.3	3.1	The Netherlands	earthquake
2022-10-11 11:31:47	55.7180	13.3157	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-10-12 09:59:59	54.6226	18.3840	3.7	2.7	Poland	explosion
2022-10-13 13:02:59	56.8589	15.0521	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-10-13 15:21:36	54.5497	18.3998	12.3	2.8	Poland	explosion
2022-10-14 11:02:34	55.6351	13.3510	0.0	1.3	Sweden	explosion
2022-10-15 19:13:29	55.7450	11.8168	12.4	1.3	Danmark	earthquake
2022-10-17 13:03:57	54.6266	11.4012	1.2	2.1	Danmark	explosion
2022-10-18 10:42:58	56.8245	16.2907	0.0	2.3	Sweden	explosion
2022-10-18 11:45:29	57.5667	16.1077	0.0	1.7	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-10-19 11:58:30	56.2171	13.0853	1.3	1.7	Sweden	explosion
2022-10-19 12:03:30	55.0862	14.7137	1.2	0.8	Bornholm	explosion
2022-10-20 12:43:33	56.8746	14.6693	0.3	1.8	Sweden	explosion
2022-10-20 13:03:14	57.6816	12.7633	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-10-22 10:14:06	53.3247	6.7486	0.0	2.0	The Netherlands	earthquake
2022-10-24 10:35:18	56.8269	16.3122	0.0	2.1	Sweden	explosion
2022-10-24 12:02:48	57.0258	14.7628	2.8	1.6	Sweden	explosion
2022-10-24 19:14:11	54.1779	7.8937	1.0	1.2	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-10-25 10:05:49	57.7528	16.9427	0.0	2.4	Sweden	explosion
2022-10-25 11:32:50	56.1664	13.1437	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-10-26 06:40:56	53.7245	8.9406	0.0	2.4	Niedersachsen	not locatable
2022-10-27 10:05:15	55.6487	13.3583	0.7	1.3	Sweden	explosion
2022-10-27 10:59:36	56.2061	13.3444	2.4	1.4	Sweden	explosion
2022-10-28 11:05:36	55.7107	13.2459	1.2	1.3	Sweden	explosion
2022-11-01 09:54:57	54.6208	10.2545	0.0	2.0	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-01 11:01:29	55.7012	13.2964	2.2	1.2	Sweden	explosion
2022-11-01 13:10:57	59.0279	18.1368	0.0	2.5	Sweden	explosion
2022-11-01 13:35:26	56.2643	13.1445	1.4	1.7	Sweden	explosion
2022-11-01 18:58:12	54.1803	7.8961	0.0	1.2	Helgoland Umgebung	acoustic noise
2022-11-02 09:30:18	54.6909	10.0429	0.0	2.1	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-02 12:00:03	57.5749	12.1514	0.0	1.5	Sweden	explosion
2022-11-02 12:01:12	57.4098	15.8555	0.0	1.9	Sweden	explosion
2022-11-02 12:19:47	56.2672	15.4280	0.0	1.4	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-11-02 15:00:22	54.6078	10.1355	0.0	2.0	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-03 09:38:18	54.6024	10.3977	9.0	2.0	Germany	explosion
2022-11-03 11:49:59	57.5784	14.2379	1.7	1.6	Sweden	explosion
2022-11-03 14:00:09	56.8231	14.6972	3.8	1.2	Sweden	explosion
2022-11-04 08:29:53	54.7586	10.0710	0.0	1.8	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-04 13:59:55	54.5304	10.4595	0.0	1.8	Schleswig-Holstein	explosion
2022-11-05 19:36:55	54.3968	13.2150	1.0	1.1	Mecklenburg-Vorpommern	meteorite
2022-11-09 12:02:46	56.0148	13.5294	0.0	1.3	Sweden	explosion
2022-11-09 13:06:19	58.4835	14.3463	0.0	2.0	Sweden	explosion
2022-11-10 11:08:01	57.5434	14.3609	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-11-10 12:43:23	56.9811	14.3969	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-11-11 14:09:10	56.0584	14.0069	2.9	1.4	Sweden	explosion
2022-11-14 09:27:57	54.1786	7.8947	1.0	0.8	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-11-14 12:32:31	57.3125	13.5215	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-11-15 09:24:23	54.9269	14.8958	0.0	1.7	Greater Bornholm	explosion
2022-11-15 10:54:17	54.8479	14.9219	0.0	1.9	Greater Bornholm	explosion
2022-11-15 12:13:13	55.9680	11.1220	5.0	2.1	Danmark	explosion
2022-11-15 12:42:31	55.0807	15.0466	0.4	1.6	Bornholm	explosion
2022-11-15 14:53:14	56.8783	14.6566	2.4	1.9	Sweden	explosion
2022-11-18 10:47:22	56.1769	13.1117	0.4	1.4	Sweden	explosion
2022-11-18 21:12:48	53.5785	9.8841	10.0	2.7	Hamburg	cavity collapse
2022-11-18 21:35:25	53.5785	9.8841	10.0	2.1	Hamburg	cavity collapse
2022-11-18 23:48:45	53.5785	9.8841	10.0	2.0	Hamburg	cavity collapse

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-11-19 04:53:43	56.9611	11.3990	7.4	1.3	Denmark	earthquake
2022-11-19 14:39:29	54.1798	7.8948	0.0	1.0	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-11-20 14:38:34	55.1924	15.4775	12.2	0.8	Greater Bornholm	earthquake
2022-11-23 07:47:35	58.7132	18.5332	0.0	2.8	Baltic Sea	explosion
2022-11-23 07:59:33	58.7402	18.4494	0.0	2.6	Baltic Sea	explosion
2022-11-23 08:15:18	58.7323	18.4718	0.0	2.7	Baltic Sea	explosion
2022-11-23 11:36:16	58.7597	18.4011	0.0	2.5	Baltic Sea	explosion
2022-11-23 11:44:16	57.2154	16.2833	1.7	1.4	Sweden	explosion
2022-11-23 12:02:30	58.7543	18.3968	4.4	2.9	Baltic Sea	explosion
2022-11-23 12:25:15	58.7754	18.4548	0.0	2.6	Baltic Sea	explosion
2022-11-23 12:30:33	56.2377	14.5432	6.4	1.5	Sweden	explosion
2022-11-23 12:52:39	56.8785	14.7061	0.0	1.9	Sweden	explosion
2022-11-23 13:03:44	55.1102	14.7806	2.4	1.0	Bornholm	explosion
2022-11-23 13:15:08	56.3032	12.9315	0.5	1.5	Sweden	explosion
2022-11-23 13:30:22	54.7149	18.7169	0.0	3.0	Poland	explosion
2022-11-24 11:12:30	57.2300	14.1693	0.0	1.5	Sweden	explosion
2022-11-25 11:15:05	53.3731	4.5888	0.0	2.5	North Sea	earthquake
2022-11-25 11:25:50	55.6969	13.4165	2.2	1.5	Sweden	explosion
2022-11-25 12:17:14	56.6307	15.9893	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-11-28 02:06:14	54.1831	7.8830	0.0	1.0	Helgoland	acoustic noise
2022-11-28 12:14:37	58.8953	14.1601	0.0	2.2	Sweden	explosion
2022-11-28 12:27:34	54.1827	7.8926	0.0	0.9	Helgoland Umgebung	acoustic noise
2022-11-29 11:14:17	57.7618	13.0823	0.0	1.6	Sweden	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-11-29 12:49:07	57.7621	16.8417	0.0	2.1	Sweden	explosion
2022-11-30 13:03:53	56.2227	13.0813	0.0	1.2	Sweden	explosion
2022-11-30 18:20:02	54.3810	13.2585	0.0	1.3	Mecklenburg-Vorpommern	sonic boom
2022-12-01 09:55:04	58.5897	15.0038	0.0	2.2	Sweden	explosion
2022-12-01 11:37:01	56.2656	13.0200	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-12-01 11:59:46	56.9200	13.5014	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-12-01 12:00:01	57.5800	12.0363	0.0	1.3	Sweden	explosion
2022-12-01 14:17:31	57.7575	11.9241	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-12-02 12:27:00	56.1605	13.1986	2.4	1.2	Sweden	explosion
2022-12-05 11:44:28	56.7621	13.9480	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-12-05 13:03:35	55.0099	14.6657	0.0	1.3	Greater Bornholm	explosion
2022-12-06 11:16:32	55.7242	13.2513	0.2	1.6	Sweden	explosion
2022-12-06 12:58:04	55.8953	14.1998	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-12-07 09:23:44	54.7033	19.1804	0.0	3.2	Poland	explosion
2022-12-07 11:00:50	55.7099	13.3315	0.0	1.3	Sweden	explosion
2022-12-07 11:45:05	56.8379	16.2983	0.0	2.0	Sweden	explosion
2022-12-07 12:49:01	56.9910	14.3847	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-12-07 13:03:04	59.0511	16.6575	1.1	2.1	Sweden	explosion
2022-12-07 19:25:39	52.8124	8.7039	24.5	1.5	Niedersachsen	earthquake
2022-12-08 10:09:48	54.6096	10.7811	0.0	2.2	Germany	explosion
2022-12-08 12:18:26	58.3086	13.4443	0.0	1.6	Sweden	explosion
2022-12-08 12:57:48	56.2141	13.1057	3.2	1.2	Sweden	explosion
2022-12-08 13:03:38	55.2016	15.1646	0.0	1.5	Greater Bornholm	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (Fortsetzung). Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Origin Time (UTC)	Latitude (North)	Longitude (East)	Depth (km)	Magnitude	Region	Event Type
2022-12-08 14:10:00	57.6963	11.7863	0.0	1.7	Sweden	explosion
2022-12-09 12:07:17	56.2180	15.4434	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-12-11 13:00:13	53.8838	7.3649	0.0	2.3	Niedersachsen	explosion
2022-12-12 12:30:01	53.9837	7.2150	0.0	2.4	Germany	explosion
2022-12-13 12:24:20	56.8704	14.6920	0.7	1.7	Sweden	explosion
2022-12-13 22:01:17	54.1779	7.8941	1.0	0.8	Helgoland Umgebung	acoustic noise
2022-12-16 14:18:45	56.6106	15.9498	0.0	1.8	Sweden	explosion
2022-12-16 18:00:25	57.7134	11.7150	2.6	1.3	Sweden	explosion
2022-12-17 19:48:42	54.1776	7.8936	1.0	1.0	Helgoland Umgebung	acoustic noise
2022-12-17 23:17:51	55.7879	7.3038	27.8	2.4	North Sea	earthquake
2022-12-19 22:05:56	54.1781	7.8944	1.0	0.9	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-12-19 22:09:57	54.1785	7.8938	1.0	1.0	Helgoland Umgebung	anthropogenic event
2022-12-20 11:02:16	57.5856	12.3836	0.0	2.0	Sweden	explosion
2022-12-21 11:36:55	56.2440	13.0508	0.0	1.4	Sweden	explosion
2022-12-21 12:04:12	55.6833	13.3829	0.0	1.3	Sweden	explosion
2022-12-23 09:10:13	58.6955	18.4787	0.0	3.3	Baltic Sea	explosion
2022-12-23 11:55:47	56.2005	13.0423	0.8	1.3	Sweden	explosion
2022-12-23 13:00:01	54.1837	5.9453	0.0	2.4	North Sea	explosion
2022-12-29 11:46:37	54.1806	7.8967	0.0	1.2	Helgoland Umgebung	acoustic noise

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht seismologischer 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 SGD. Lokale Netze des IfG (gelb) werden in Kooperation mit dem SGD (Bad Segeberg) und der BGR (Helgoland) betrieben.	3
2	Installation der Station Birkenmoor.	5
3	Bestimmung der horizontalen Orientierung des Bohrlochseismometers. . . .	6
4	Leistungsdichtespektren (PPSD) an der Station Birkenmoor.	6
5	Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen in SH und Umgebung. Rot markiert sind in 2022 neu aufgenommene Stationen in Sachsen, Thüringen und den Niederlanden.	9
6	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.	10
7	Funktionsweise des AD Detektors am Beispiel eines Erdbebens bei Groningen (NL).	12
8	Ereignisse um Schleswig-Holstein im Jahr 2022, Quelle: EMSC [2021]. Die Landesgrenzen von SH und MV (dunkelblau) sind ebenso dargestellt, wie die AWZ Grenzen in der Nord- und Ostsee (blau).	13
9	Übersichtskarte der in 2022 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.	15
10	Das Ereignis vom 26.9.2022 um 00:03 UTC südöstlich von Bornholm. . . .	17
11	Status Bad Segeberg Netz 2021.	20
12	Detektionen am lokalen Bad Segeberg Netz. Histogramme mit Schrittweite 3 Tage.	21
13	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).	23
14	Installation des untertägigen Experiments in der Kalkberghöhle am 21.9.2021. 24	
15	Übersichtskarte des vibrationsseismischen Experiments mit Schusspunkten und Index der P- bzw. S-Wellen-Anregung (blau). Die angeregten Sweeps wurden sowohl untertägig (gelbe Punkte, "HH" ist die Permanentstation), als auch an der Oberfläche (gelbe Marker) registriert.	26
16	Wellenform und Spektrogramm des Schusses P4 (Abb. 15).	26
17	Laufzeiten für P- und S-Wellenschüsse, ungefilterte Daten, mit angepassten Laufzeitgeraden. Die Farben bezeichnen unterschiedliche Schusspunkte (s. Abb. 15).	28

18	Laufzeiten für S-Wellenschüsse, gefilterte Daten, mit angepassten Laufzeitgeraden.	29
19	Detektionen am Höhlennetz im Segeberger Kalkberg. Histogramme mit Schrittweite 1 Tag.	30
20	Wellenform eines Ereignisses am 26.12.2021 um 4:09 UTC während einer Periode starken Frosts, aufgezeichnet an den Stationen in der Segeberger Kalkberghöhle.	31
21	Karte des Helgoland Arrays (HELGA)	32
22	Detektionen am HELGA-Array 2018 - 2021.	33
23	Detektionen am HELGA-Array von regionalen Erdbeben im Zeitraum 2018 - 2021.	35
24	Wellenformen der Felsabbrüche am 29.4.2022, aufgezeichnet am Helgoland-Array.	36

Tabellenverzeichnis

1	Signifikante Erdbeben im Jahr 2022 (EMSC)	14
2	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung (IfG)	18
3	Felsabbrüche 2022	37
A.1	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung (IfG)	43