



Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



Landesamt für Umwelt,
Naturschutz und Geologie

Status der Erdbebenüberwachung für Mecklenburg-Vorpommern

Bericht zur Kooperation 2022

Dr. Christian Weidle[✉], Dipl.-Ing. Detlef Schulte-Kortnack, Prof. Dr. Thomas Meier
*Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel*

Dr. Karsten Obst
*Geologischer Dienst MV, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie,
Goldberger Straße 12b, 18273 Güstrow*

Beiträge zur seismologischen Überwachung in Norddeutschland

Nº 08, 2023

Weidle, C. et al.: Status der Erdbebenüberwachung für Mecklenburg-Vorpommern:
Bericht zur Kooperation 2022.

ISSN 3052-7236

DOI 10.38071/2025-00974-6

Herausgegeben von

Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Veröffentlicht am 4. Mai 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	2
2.1 Permanent-Stationen	2
2.1.1 Neue Permanentstationen Kühlungsborn und Schillersdorf	3
2.2 Das Rügen Array	8
2.2.1 Aufbau des Rügen-Arrays	8
2.2.2 Seismische Array-Verfahren	11
2.3 Testmessungen im Raum Werle	13
2.4 Arbeiten ausserhalb Mecklenburg-Vorpommerns	15
2.5 Ausblick	15
3 Status Datenzentrum - Erfassung und Auswertung seismologischer Daten	17
3.1 AD (<i>Amplitude Decay</i>) Detektor	18
4 Ereignisübersicht	21
4.1 Überregionale Seismizität	21
4.2 Seismische Ereignisse in M-V und Umgebung	22
4.3 Sprengungen an den Nord Stream-Pipelines	24
5 Zusammenfassung	28
Literatur	31
A Ereigniskatalog für 2022	32
B Abbildungsverzeichnis	47
C Tabellenverzeichnis	48

1 Einleitung

Im Rahmen der seit 2020 bestehenden Kooperationsvereinbarung zwischen dem Geologischen Dienst im LUNG M-V und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel wurde die Etablierung, Durchführung und Weiterentwicklung der regionalen, seismologischen Überwachung Mecklenburg-Vorpommerns vereinbart. Hierbei konnte das regionale Stationsnetz in M-V bereits von ursprünglich drei, auf mittlerweile sieben permanente seismologische Stationen ausgebaut werden.

Im Jahr 2022 konnten zwei neue Stationen von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Betrieb genommen werden. Darüberhinaus etablierte das IfG gemeinsam mit der Universität Hamburg ein seismisches Array auf Rügen, welches sowohl für die seismologische Überwachung der Küstenregion und der südlichen Ostsee, als auch für Untersuchungen der Meeresmikroseismik genutzt werden kann. Im Landesinneren wurde mit Testmessungen für einen neuen Standort im Raum Werle begonnen. Details zur Entwicklung des Stationsnetzes sind in Kapitel 2 zusammengefasst.

Den Grundpfeiler der seismologischen Überwachung bilden automatisierte Datenerfassungs- und -auswertesysteme, welche kontinuierlich überprüft und bei Bedarf angepasst werden müssen. So konnte ein neuer Detektionsalgorithmus, welcher an der BGR entwickelt wurde, am IfG etabliert und an die zur Verfügung stehenden Daten und die Zielregion angepasst werden. Dennoch bleibt zur vollständigen Erfassung schwacher Ereignisse eine tägliche, manuelle Datendurchsicht unverzichtbar (siehe Kapitel 3).

Im Jahr 2022 aufgetretene tektonische Ereignisse mit Relevanz für M-V sind zwei schwache Erdbeben mit Magnituden bis 1.7 in der Ostsee um Bornholm (DK), sowie ein potentiell tektonisches Ereignis mit einer Magnitude von etwa 1 in der Region Marlow. Die bedeutsamsten seismologischen Registrierungen stehen in Zusammenhang mit der Zerstörung der Nord Stream-Pipelines in der Region um die Insel Bornholm. Diese Ereignisse waren an den Stationen an der Küste von M-V mess- und detektierbar und unterstreichen die Wichtigkeit eines flächendeckenden seismologischen Messnetzes. Durch die Etablierung des Rügen-Arrays wird die Detektionsfähigkeit von schwachen seismischen Ereignissen an Land wie im marinen Bereich weiter erhöht. Dies konnte anhand verschiedenster akustischer Signale nachgewiesen werden. Details zum Ereigniskatalog 2022 sind in Kapitel 4) aufbereitet.

2 Status Stationsnetz

Das seismologische Stationsnetz umfasst in Mecklenburg-Vorpommern derzeit 17 permanente und temporäre Installationen. Die Permanentstationen werden vom IfG in Kooperation mit der BGR in Hannover bzw. dem GFZ Potsdam betrieben, die temporären Stationen auf Rügen im Rahmen einer Kooperation mit der Universität Hamburg.

2.1 Permanent-Stationen

Das permanente seismologische Netz mit sieben Stationen in Mecklenburg-Vorpommern bildet das Rückgrat der landesweiten seismologischen Überwachung. Es bestand im Jahr 2022 aus den Stationen KBON (Kühlungsborn, betrieben von der BGR), LNIZ (Löcknitz, BGR), MRLW (Marlow, IfG), PEEM (Peenemünde, IfG), RGN (Rügen, GFZ Potsdam), SCHI (Schillersdorf, BGR) und ZARR (Zarrentin, BGR) (Abb. 1). Ergänzt wird das Stationsnetz durch die Stationen GOIE (Greifswalder Oie) und NONN (Nonnendorf), welche vom IfG als lokales Netz um Lubmin betrieben werden. Seit Ende 2021 betreibt das IfG in Kooperation mit der Universität Hamburg ein lokales seismisches Array auf Rügen (s. Abschnitt 2.2).

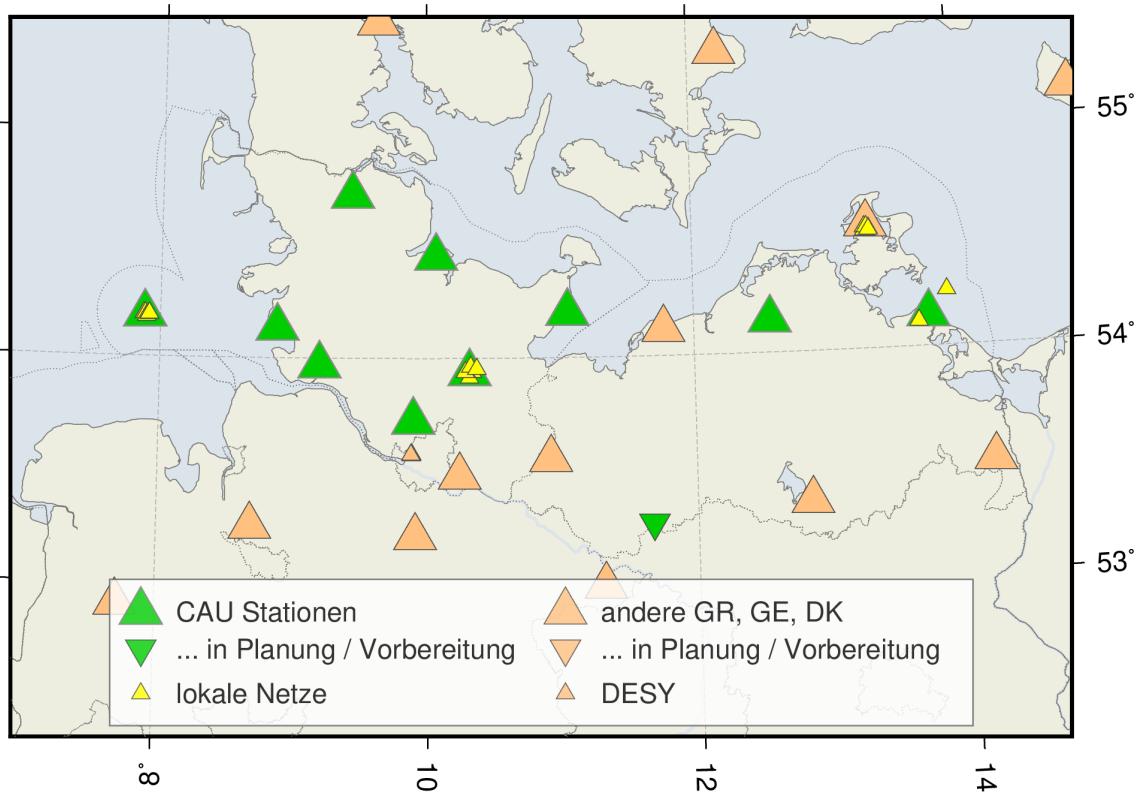


Abbildung 1: Übersicht seismologischer Stationen in Norddeutschland. Permanentstationen (Dreiecke) in SH und MV werden vom IfG (grün) und der BGR und GEOFON (GFZ Potsdam) (orange) betrieben. Das IfG betreibt zusätzliche lokale Netze (gelb) um Lubmin und auf Rügen (in Kooperation mit Universität Hamburg).

An den meisten Stationen lief der Betrieb das ganze Jahr über störungsfrei, die Datenvollständigkeit liegt, mit Ausnahme der Station GOIE, bei 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 LNIZ gab es gelegentliche, kurze Datenausfälle, hier liegt die Vollständigkeit bei 88%.

Station Greifswalder Oie - KQ.GOIE Die Station GOIE ist nicht ans Datenzentrum angebunden, da zum einen die Mobilfunkverbindung auf der Insel stark eingeschränkt ist, zum anderen die Stromversorgung mit Solarpanelen für einen kontinuierlichen Betrieb mit Datenübertragung nicht ausreicht. Dadurch kommt es in den Wintermonaten zu regelmäßigen Datenlücken, im Winter 2021/22 gar zu einem längeren Datenausfall. Die Station konnte bei einem Besuch vor Ort im Mai reaktiviert werden und die Station lief in den Sommermonaten 2022 bis zu einem zweiten Besuch im September unterbrechungsfrei. Im September wurde an der Station der Datenrekorder mit einem neueren Modell getauscht, was sich in den Wintermonaten durch eine höhere Datenvollständigkeit aufgrund eines deutlich reduzierten Stromverbrauchs bemerkbar machen sollte.

Darüberhinaus wurde bei einem Ortstermin im September 2022 mit Mitarbeiter*innen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) am Leuchtturm der Greifswalder Oie die Möglichkeit einer langfristigen seismologischen Installation im Bereich des Leuchtturms im Nordteil der Insel erörtert. Eine Installation im Freigelände um den Leuchtturm ist grundsätzlich vorstellbar, entweder in einem Bohrloch oder alternativ in einer Posthole-Installation in einem flachen, als Grube ausgehobenen Schacht. Aufgrund der abgeschiedenen Lage der Insel stellt eine dauerhafte Installation allerdings hohe logistische Anforderungen, welche derzeit intern diskutiert werden.

2.1.1 Neue Permanentstationen Kühlungsborn und Schillersdorf

Bereits zu Beginn der Kooperation zwischen IfG und LUNG M-V zum Ausbau der seismologischen Infrastruktur in M-V wurde seitens des IfG mit der BGR der Stationsausbau koordiniert. Im Zuge dessen erkundete die BGR zwei Standorte in M-V, in Kühlungsborn und in Schillersdorf, welche als Bohrlochstationen realisiert werden sollten. Pandemiebedingt verzögerte sich die Inbetriebnahme etwas, aber im Sommer 2022 konnten an beiden Standorten die Einrichtung einer seismologischen Station abgeschlossen werden. Die Daten stehen für die seismologische Auswertung am IfG in Echtzeit zur Verfügung.

Kühlungsborn - GR.KBON Die BGR betreibt auf dem Gelände des Instituts für Atmosphärenphysik der Universität Rostock (IAP) in Kühlungsborn, Lkr. Rostock, ein Infraschall-Array. Dieses wurde im Sommer 2022 mit einer seismologischen Breitbandstation ergänzt. Hierzu wurde auf dem Geländes des IAP eine Bohrung bis in 25 m Tiefe abgeteuft. Laut Schichtenverzeichnis einer nahegelegenen Erkundungsbohrung liegt in dieser Tiefe eine Wechsellsagerung von Feinsand und Schluff vor.

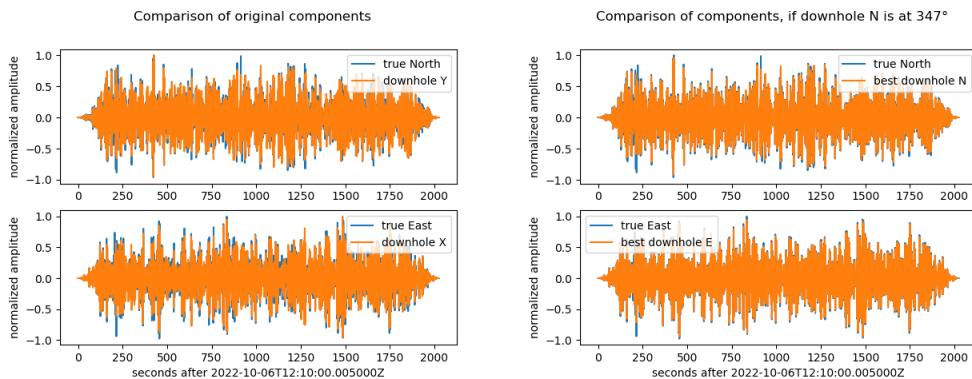


(a) Schacht mit Bohrlochkopf und Schaltschrank.

(b) Innenansicht Schaltschrank.

Abbildung 2: Die seismologische Station auf dem Gelände des IAP in Kühlungsborn. Fotos: BGR

Die seismologische Station wurde mit einem Posthole-Breitbandseismometer mit 120 s Eigenperiode und integriertem Digitalisierer (Modell Nanometrics Meridian) ausgestattet und verfügt über eine Datenverbindung in Echtzeit an das seismologische Datenzentrum der BGR in Hannover (Abb. 2). Von dort sind die Wellenformdaten frei verfügbar.



(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 KBON. Auswertung: BGR

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

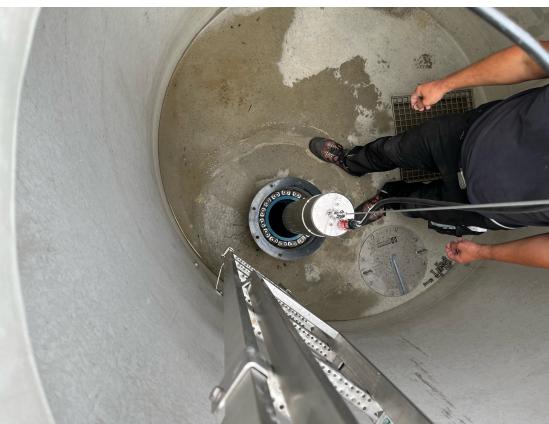
Vergleichsdaten die horizontale Orientierung des Bohrlochseismometers bestimmen zu können. In der Auswertung wird hierfür die horizontale Partikelauslenkung an der Oberfläche (Nord-Ost Koordinaten) mit der im Bohrloch (Y-X Koordinaten) verglichen und durch Rotation des Y-X Koordinatensystems der Rotationswinkel bestimmt, an dem das Skalarprodukt beider Auslenkungsvektoren maximal wird (Abb. 3). Die Software zur Auswertung der Orientierung wurde am IfG in einer modernen Implementierung weiterentwickelt (Weidle et al. [2022]) und von den Kollegen der BGR hier angewendet.

An der Station Kühlungsborn wurde im Ergebnis eine Verdrehung der Horizontalkomponenten um 347° gegen Nord festgestellt. Das Seismometer ist also im Bohrloch fast nach Norden ausgerichtet, weshalb die Darstellung der Vergleichsmessung in Abb. 3 visuell kaum zu unterscheiden ist. Die korrekte Horizontalorientierung 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.

Schillersdorf - GR.SCHI Die BGR konnte ebenfalls im Sommer 2022 eine neue seismologische Station in der Gemeinde Schillersdorf, Lkr. Mecklenburgische Seenplatte, einrichten. Das Seismometer ist in einem 28 m tiefen Bohrloch, welches laut Schichtenverzeichnis in dieser Tiefe eine Schlufflage erreicht, installiert. Der Aufbau und die Installation ist der Station Kühlungsborn sehr ähnlich. Auch hier wurde ein Posthole-Breitbandseismometer mit 120 s Eigenperiode und integriertem Digitalisierer (Modell Nanometrics Meridian) verbaut und die Station verfügt über eine Datenverbindung in Echtzeit an das seismologische Datenzentrum der BGR in Hannover (Abb. 4). Von dort sind die Wellenformdaten ebenfalls frei verfügbar.



(a) Übersicht des Schachts und Schaltschrank.

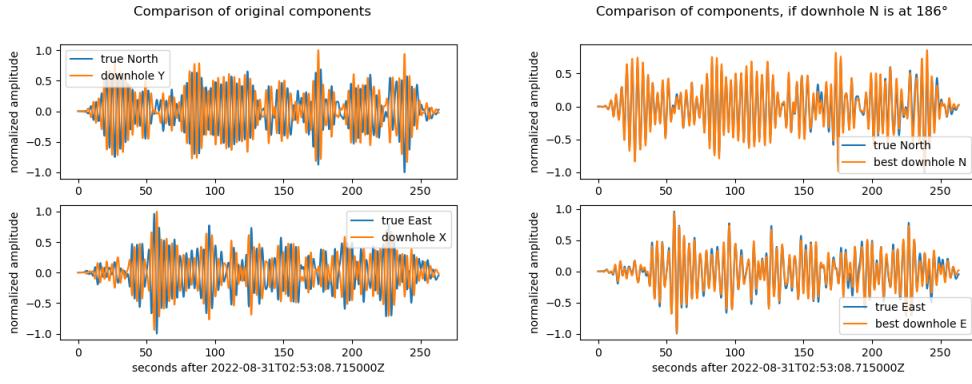


(b) Einbringung des Seismometers in das Bohrloch.

Abbildung 4: Die seismologische Station in Schillersdorf. Fotos: BGR

Die Orientierungsbestimmung des Bohrlochseismometers ergab eine Verdrehung der Horizontalkomponenten um 186° gegen Nord. Das Seismometer ist also im Bohrloch fast

nach Süden ausgerichtet, und der Unterschied der Y-X Komponenten im Bohrloch gegen die Nord-Ost Komponenten an der Oberfläche ist in Abb. 5a deutlich zu erkennen. Nach der Orientierungskorrektur (Abb. 5b) stimmen die Horizontalkomponenten im Bohrloch und an der Erdoberfläche nahezu perfekt überein. Auch in Schillersdorf wird die Korrektur der Horizontalorientierung im Digitalisierer der Station vorgenommen und die Wellenformdaten im Nord-Ost Koordinatensystem ans Datenzentrum übertragen.



(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 5: Bestimmung der horizontalen Orientierung des Bohrlochseismometers GR.SCHI. Auswertung: BGR

Rauschpegel der Stationen GR.KBON und GR.SCHI Ein Vergleich der Leistungsdichtespektren (PPSD, Abb. 6a, b) der beiden neu eingerichteten Stationen zeigt eine gute Datenqualität. Dies gilt sowohl für den langperiodischen Bereich oberhalb von 10 s Periode, welcher für die Beobachtung telesismischer Ereignisse relevant ist, als auch für den Frequenzbereich von 1-20 Hz, welcher zur Überwachung der lokalen und regionalen Seismizität von besonderer Bedeutung ist.

Der Vergleich der beiden neuen Stationen mit den bestehenden Stationen auf Rügen und in Peenemünde (Abb. 6c, d) zeigt eine hohe Ähnlichkeit des Rauschniveaus bei höheren Frequenzen, v.a. mit der Station Peenemünde. Die Station RGN des GEOFON-Netzwerks des GFZ Potsdam zeigt hingegen ein etwas erhöhtes Rauschniveau in diesem Frequenzbereich, worauf im Kontext des Rügen-Arrays (Abschnitt 2.2) näher eingegangen wird. Auffällig ist zudem ein erhöhter Rauschpegel an der Station Kühlungsborn bei Perioden um 2 s. Diese Spitze im Amplitudenspektrum steht im Zusammenhang mit der Meeresmikroseismik, der Anregung seismischer Wellen in der Ostsee, und wird an vielen küstennahen Stationen in S-H und M-V beobachtet.

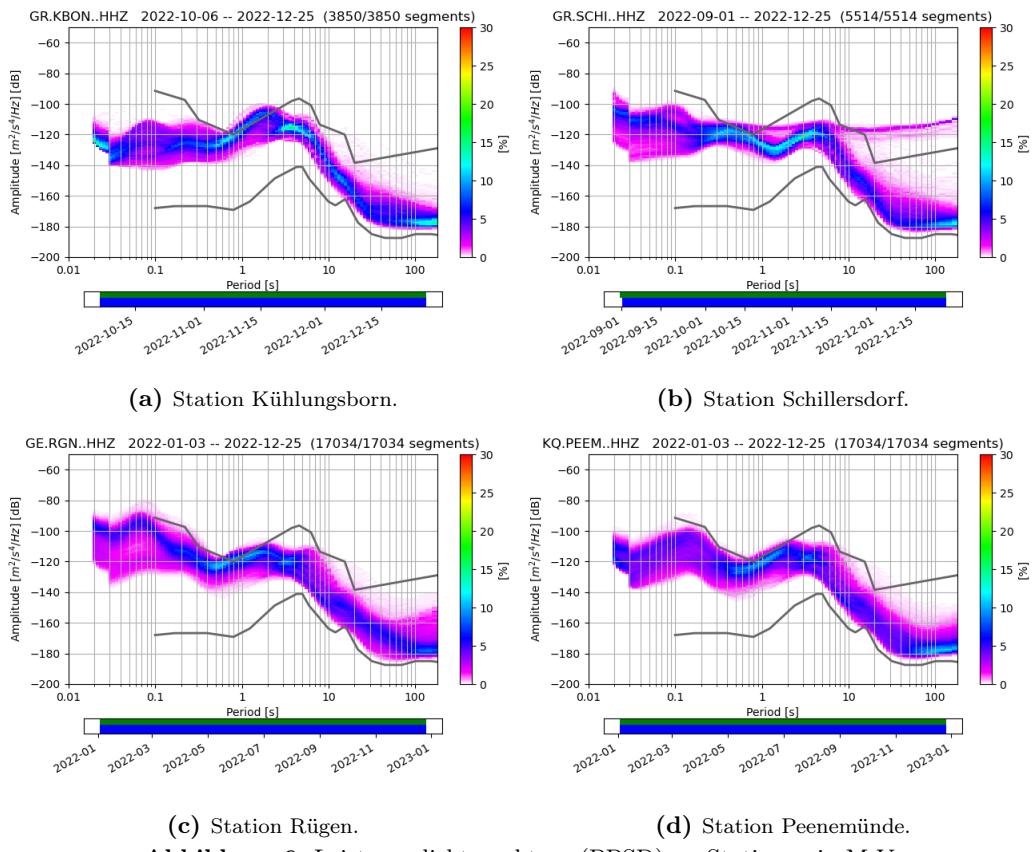


Abbildung 6: Leistungsdichtespektren (PPSD) an Stationen in M-V.

2.2 Das Rügen Array

Die vom GFZ Potsdam im Rahmen des globalen GEOFON-Netzwerks betriebene Station RGN auf Rügen ist die seismologische Station mit der längsten verfügbaren Datenreihe in M-V. Sie wurde im Dezember 1995 an ihrem jetzigen Standort nordwestlich von Neuenkirchen etabliert (Abb. 7). In der Küstenregion um Rügen und der südwestlichen Ostsee mit ihren vielen bekannten Störungssystemen, welche großräumig im Kontext mit der Plattengrenze zwischen Mitteleuropa und dem skandinavischen Kraton stehen, ist das Auftreten von natürlicher Seismizität sehr wahrscheinlich. In der Region um Bornholm und der dänischen Insel Seeland sind schwache tektonische Ereignisse bekannt (siehe auch Kap. 4). Ebenso weist der historische Erdbebenkatalog der BGR vereinzelte Erdbeben vor allem in der Küstenregion von M-V auf (siehe Weidle et al. [2021]).

Um die seismologische Überwachung dieser Region zu stärken, wurde in Weidle et al. [2022] die Einrichtung eines seismischen Arrays um die bestehende GEOFON-Station RGN vorgeschlagen. Der Standort um die Station RGN ist u.a. aufgrund der langen bestehenden Datenreihe seismologischer Aufzeichnungen auf Rügen vorteilhaft. Sollten zukünftig tektonische Ereignisse vom Array detektiert und mit dem Gesamtnetz lokalisiert werden, können durch einen Vergleich der Wellenformen mit Archivdaten der Station RGN frühere, bisher nicht bekannte Ereignisse nachträglich detektiert werden.

2.2.1 Aufbau des Rügen-Arrays

Für den Aufbau des Arrays konnte mit der Universität Hamburg (Prof. Céline Hadzioannou) ein Kooperationspartner gewonnen werden, der sich mit eigenen Seismometern am seismischen Array beteiligt. Neben der verbesserten Überwachung der lokalen Seismizität durch das seismische Array, kann dieses auch für Forschungsvorhaben eingesetzt werden. Ein Themengebiet hierfür ist die Untersuchung der Meeresmikroseismik, die Anregung seismischer Wellen durch dynamische Prozesse im Ozean. Untersuchungen zur Meeresmikroseismik sind sowohl an der Univ. Hamburg als auch am IfG Gegenstand aktueller Forschung. Neben drei Seismometern der Universität Hamburg wurden vier Seismometer aus dem Gerätbestand des IfG für das Rügen-Array bereitgestellt.

Nach einer ersten Standorterkundung im November 2021 konnten Mitte Dezember 2021 die ersten sechs Stationen etabliert werden (Abb. 7). Die Geometrie des Arrays orientiert sich an den primären geplanten Einsatzzwecken und erfolgt idealerweise in ringförmiger Anordnung, um azimuthale Vorzugsrichtungen des Arrays zu vermeiden (siehe Abschnitt 2.2.2 zur Methodik der Array-Auswertung). Ein äußerer Ring mit etwa 5 km Radius um die GEOFON-Station (Stationen B1-3) deckt den Frequenzbereich ab, welcher zur Beobachtung der Meeresmikroseismik relevant ist (Perioden 1-20 s). Der innere Bereich des Arrays (Stationen A1-4, LID) deckt den Frequenzbereich ab, welcher zur Überwachung lokaler und regionaler Seismizität besonders relevant ist (Frequenzen 1-20 Hz). Hierfür war eine Aper-

tur (Durchmesser) von ca. 2 km geplant. Aufgrund der kleineren Stationsabstände ist die Standortsuche für ein kleinräumiges Array grundsätzlich schwieriger, da für die einzelnen Standorte eine geringere räumliche Flexibilität möglich ist. Mit den Standorten A1-3 konnte im Dezember 2021 zunächst eine lineare, Ost-West ausgerichtete Konfiguration erreicht werden. Durch eine erweiterte Standortsuche im Frühjahr 2022 konnten mit den Standorten LID (installiert im Frühjahr 2022), A4 (seit November 2022) und A5 (Installation geplant Frühjahr 2023) weitere Standorte akquiriert werden, welche die Array-Geometrie des inneren Bereichs deutlich verbessern.

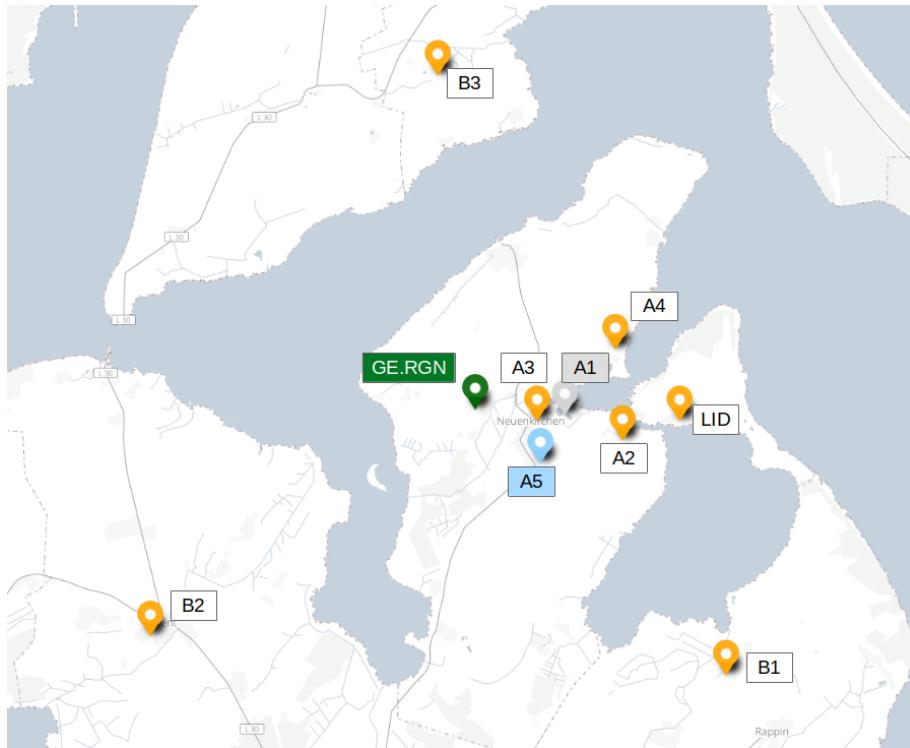


Abbildung 7: Seismologische Stationen des Rügen-Arrays. Die Station RGN (grün, der Netzwerkcode "GE" steht für den Betreiber GFZ Potsdam) wurde durch sieben Breitbandseismometer ergänzt. Die Station A1 (grau) wurde im November 2022 wieder abgebaut und soll im Frühjahr 2023 am Standort A5 (blau) wieder eingerichtet werden.

Die Standorte der seismologischen Stationen sind in Garagen oder Kellerräumen (A1, A2, B1, B2, B3), an der Station A4 wurde das Seismometer im November 2022 in Abstimmung mit dem Eigentümer, in etwa 60 cm Tiefe im Außenbereich des Privatgeländes vergraben. Eine Besonderheit stellt die Station LID dar, welche bereits in den 1980er Jahren vom Zentralinstitut der Physik der Erde (ZIPE), einem Vorgängerinstitut des GFZ Potsdam, als seismologische Warte eingerichtet wurde. Hierzu wurde auf dem Gelände des Guts Liddow eine "Betonneedle" 8 m tief in den Boden eingebrochen, welche die oberflächennahen, stark wassergesättigten Quartärschichten durchdringt und vermutlich darunterliegenden Geschiebemergel erreicht. Die Station wurde in den Jahren 1994-1995 kurzzeitig vom GFZ Potsdam und der BGR Hannover wieder betrieben, das GFZ zog dann aber 1995 an den Standort der jetzigen Station RGN um.

Die verbesserte Ankopplung an den Untergrund ist vermutlich der Grund für die deutlich niedrigeren Rauschpegel bei Frequenzen oberhalb von 1 Hz an der Station LID im Vergleich zu anderen Standorten des Rügen-Arrays (Abb. 8). Nur die Station A4 in Grubnow erreicht ein annähernd gutes Rauschniveau. Zu beachten ist der Vergleich der PPSD mit der GEOFON-Station RGN (Abb. 6c). Daraus ergibt sich zum einen, daß die Stationen des Rügen-Arrays im Durchschnitt qualitativ nahezu gleichwertig sind, zum anderen, daß der Standort LID gegenüber der Station RGN ein deutlich reduziertes Rauschniveau bei Frequenzen oberhalb 1 Hz aufweist.

Die Datenqualität an der Station RGN hat sich bei den höheren Frequenzen in den vergangenen Jahren leider etwas verschlechtert, wofür wahrscheinlich Bautätigkeiten und die Erschließung des umgebenden Geländes ursächlich sind. Zudem gibt es an der Station unregelmäßig auftretende transiente Störsignale, deren Ursache vom GFZ Potsdam bisher noch nicht identifiziert werden konnte. Die Wiedereinrichtung einer seismologischen Station am Standort LID bietet neben dem Einsatz als Element des Rügen-Arrays auch langfristig das Potential eine qualitativ hochwertige Station auf Rügen zu betreiben, falls sich die Probleme an der Station RGN nicht dauerhaft lösen lassen sollten. Der Eigentümer des Standorts LID hat bereits Bereitschaft signalisiert, den langfristigen Weiterbetrieb einer seismologischen Station zu unterstützen.

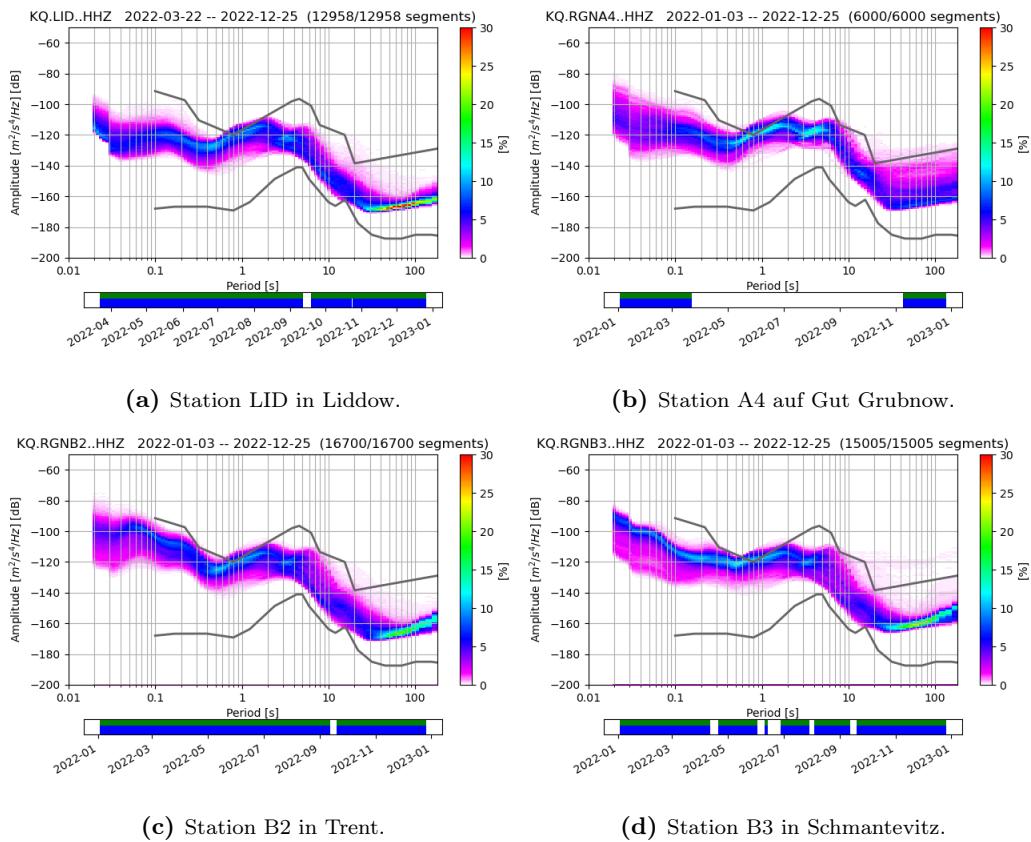


Abbildung 8: Leistungsdichtespektren (PPSD) an ausgewählten Stationen des Rügen-Arrays.

Die Wellenformdaten der Stationen des Rügen-Arrays werden in Echtzeit an das Datenzentrum des IfG in Kiel übertragen, dort in der routinemäßigen Auswertung berücksichtigt und archiviert. Aktuell werden die Daten der zusätzlichen Stationen exklusiv für die Nutzung durch die Projektbeteiligten vorgehalten, mittelfristig ist aber eine Veröffentlichung der Daten, entsprechend gängiger seismologischer Praxis, vorgesehen.

2.2.2 Seismische Array-Verfahren

Im Gegensatz zur herkömmlichen Detektion von seismischen Ereignissen an einem regionalen seismologischen Stationsnetz, bei dem im ersten Bearbeitungsschritt Signaldetektionen an jeder Station separat berechnet werden, ist eine Auswertung mittels Arrayanalyse ein Auswerteansatz, welcher alle verfügbaren Wellenformen simultan berücksichtigt. Das Array mit all seinen Stationen (Komponenten) kann somit als eine Antenne angesehen werden, welche die kontinuierlichen Wellenformdaten an allen Stationen erfasst. In der Auswertung wird dann nach kohärenten Signalanteilen im seismischen Wellenfeld an den Stationen des Arrays gesucht. Dies setzt eine räumliche Abtastung des Wellenfeldes im Bereich von 1-2 Wellenlängen voraus. Entsprechend ist die Arraygeometrie (Durchmesser und relativer Stationsabstand) in Abhängigkeit des gewünschten Einsatzzweckes zu planen.

Abb. 9 zeigt das Auswerteverfahren schematisch. Angenommen wird die Ausbreitung einer ebenen Welle (grün) in horizontaler Richtung über das seismische Array (blaue Punkte). Der Azimuth (Winkel Θ) bzw. der Backazimuth (Φ) beschreiben die Ausbreitungsrichtung der ebenen Welle und aus der Zeitdifferenz zwischen den Ankunftszeiten der Wellenfront an den Stationen ergibt sich eine horizontale *Scheingeschwindigkeit* in Ausbreitungsrichtung. Durch den typischerweise schräg vertikalen Einfall von P- oder S-Wellen bildet diese *Scheingeschwindigkeit* die horizontale Projektion der Wellenausbreitung und somit nicht die physikalische Ausbreitungsgeschwindigkeit ab. Letztere ist aber durch Standardmodelle seismischer Geschwindigkeiten mit hinreichender Genauigkeit bekannt und es kann aus der *Scheingeschwindigkeit* der vertikale Einfallswinkel abgeleitet und die Wellenfront einer seismischen Phase zugeordnet werden.

Breitet sich eine seismische Welle nun nach diesem Prinzip über das seismische Array aus, treten an den Komponenten des Arrays Wellenformen mit hoher Ähnlichkeit (Kohärenz) zu leicht versetzten Zeiten auf. Mittels einer Gittersuche werden die gemessenen Wellenformen um Kombinationen von Backazimuth (Φ) und Slowness (S , inverse horizontale *Scheingeschwindigkeit*) verschoben und aufsummiert ("Beam"). Die quadrierte spektrale Amplitude der Summenspur ergibt die "Beampower" für jede $\Phi - S$ -Kombination.

Dies ist in Abb. 10 beispielhaft für ein Ereignis bei Bornholm dargestellt. Die Wellenform des Ereignisses ist an allen Stationen des Rügen-Arrays deutlich sichtbar. Zum Zeitpunkt des Ereignisses waren die Stationen A1-3, sowie LID und RGN in Betrieb. Die Array-Geometrie ist somit annähernd linear in Ost-West Richtung. Die Gittersuche über alle

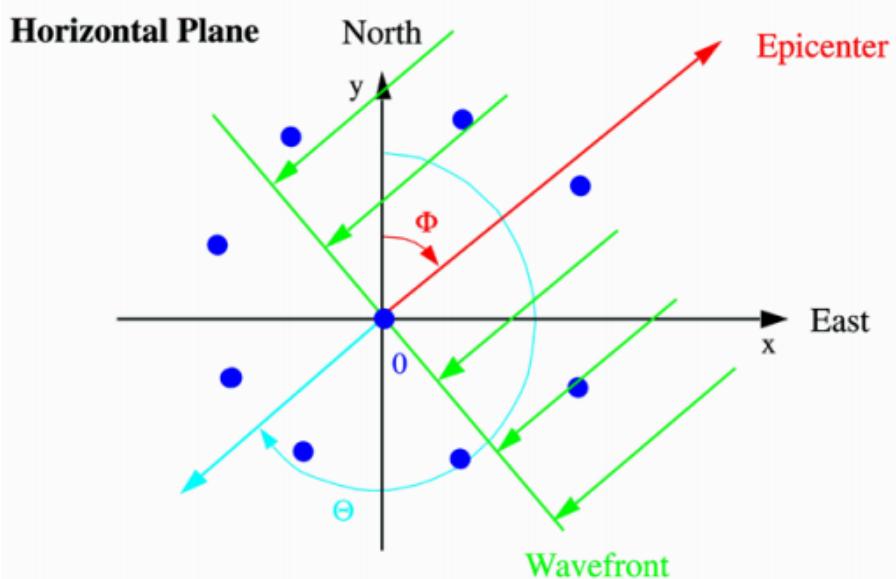
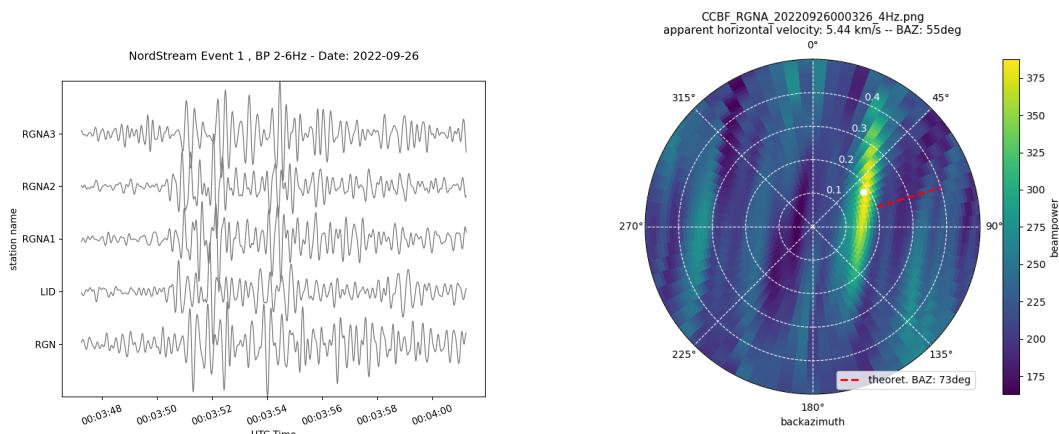


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines seismischen Arrays (Quelle: Bormann [2012])

$\Phi - S$ -Kombinationen ergibt ein Maximum bei Backazimuth 55° und einer horizontalen Scheingeschwindigkeit von 5.44 km/s (inverser Slowness-Wert). In dem Beispiel wird der Effekt des linearen, in Ost-West Richtung orientierten Arrays deutlich. Durch die Array-geometrie kommt es zu Verschmierungseffekten im $\Phi - S$ Bereich, welche annähernd senkrecht zur Orientierung des linearen Arrays auftreten. In Konsequenz ist der Backazimuth und/oder die Slowness von der Verschmierung betroffen, je nach Einfallsrichtung der seismischen Welle. Um eine azimuthale gleichmäßige Auflösung von $\Phi - S$ zu erreichen, ist eine kreisförmige, radialsymmetrische Geometrie des seismischen Arrays immer erstrebenswert. Um solche Verschmierungseffekte gering zu halten und eine gleichmäßige Parameterbestimmung für Wellenfronten aus allen azimuthalen Einfallsrichtungen zu gewährleisten, ist eine radialsymmetrische Anordnung der Array-Elemente erstrebenswert. Durch die Installation der Station A4 und der geplanten Station A5 wird sich die Array-Geometrie entsprechend verbessern und werden Verschmierungseffekte zukünftig reduziert.



(a) Wellenformen an den Stationen (Z-Komponente). (b) Beampower in Backazimuth-Slowness-Ebene.
Abbildung 10: Beispiel der Arrayanalyse für ein Ereignis bei Bornholm.

Für die kontinuierliche, automatisierte Auswertung wird die Beampower fortlaufend in definierten Zeitschritten und Fensterlängen berechnet. Tritt innerhalb eines Zeitfensters ein kohärentes Wellenfeld an den Stationen auf, addieren sich die Wellenformen konstruktiv in einer bestimmten $\Phi - S$ -Kombination und die Beampower nimmt einen hohen Wert an. Über die Zeit lässt sich somit die Beampower als Zeitreihe auftragen und hohe Werte als Detektion eines potentiellen seismischen Ereignisses markieren.

Das IfG betreibt seit 2017 ein seismisches Array auf Helgoland und konnte in den vergangenen Jahren die Bearbeitungsschritte und die Einstellung geeigneter Parameter für die kontinuierliche Datenbearbeitung und die Detektionsparameter bestimmen. Letztere sind zwar grundsätzlich von der jeweiligen Array-Geometrie, dem Rauschpegel der Array-Stationen und lokalen Ausbreitungseffekten abhängig, es zeigt sich aber, daß die Parameter des Helgoland-Arrays gute initiale Werte für das Rügen-Array darstellen. Im ersten Schritt wurden daher die Parameter des Helgoland-Arrays übernommen und diese werden sukzessive im Laufe des Jahres 2023 für das Rügen-Array evaluiert und gegebenenfalls angepasst.

2.3 Testmessungen im Raum Werle

Der Ausbau des regionalen Stationsnetzes in den letzten Jahren hat die Stationsabstände vor allem entlang der Ostseeküste verkürzt. Im Landesinneren, sowie entlang der südlichen Grenze von M-V bestehen aber weiterhin große Lücken im Stationsnetz. Für den weiteren Ausbau des Netzes in M-V ist ebenfalls zu berücksichtigen, daß es in Brandenburg bisher kein flächendeckendes seismologisches Stationsnetz gibt, welche für die Auswertung in M-V genutzt werden können. Daher wurde das Gebiet um den Salzstock Werle im Südwesten von M-V als wünschenswerter Standort für eine weitere seismologische Station identifiziert. Hintergrund ist zum einen, daß tektonische Ereignisse im Bereich der Salzstruktur eher wahrscheinlich sind. Zum anderen ist der Salzstock Werle nach dem Zwischenbericht Teilgebiete im Rahmen der Endlagersuche für radioaktive Abfälle als geologisch günstig eingestuft worden (BGE [2020]). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine mögliche tektonische Aktivität im Bereich des Salzstocks mit lokalen seismologischen Messungen zu überprüfen.

Im September 2022 wurden zunächst zwei potentielle Standorte mit Seismometern aus dem Gerätbestand des IfG für Testmessungen ausgestattet. Dank der freundlichen Unterstützung der Gemeinden Balow und Prischlich/Werle konnte je ein Breitbandseismometer im Gemeindezentrum Balow und im ehemaligen Feuerwehrhaus in Werle installiert werden (Abb. 11). Die Messgeräte registrieren nur lokal und im November 2022 wurden die ersten Daten ausgelesen.

Der Vergleich des Rauschniveaus an den beiden Stationen anhand von PPSD (Abb. 12) zeigt eine sehr hohe Ähnlichkeit an beiden Standorten. Im mittleren und langperiodischen Bereich sind beide Standorte sehr gut, der leichte Anstieg bei Perioden ab 100 s ist mit



(a) Gemeindezentrum Balow.



(b) Seismometer in Balow.



(c) altes Feuerwehrhaus Werle.



(d) Seismometer in Werle.

Abbildung 11: Standorte für Testmessungen im Raum Werle.

der fehlenden Abschirmung der Seismometer gegen Temperaturänderungen erklärbar. Der zur Erfassung lokaler seismischer Ereignisse wichtige Frequenzbereich oberhalb von 1 Hz ist an beiden Standorten zwischen -100 und -120 dB, tendenziell etwas besser am Standort Werle. Im Vergleich mit anderen Stationen in M-V (Abb. 6) und dem Rügen-Array (Abb. 8) liegen die beiden Standorte BALOW und WERLE im Bereich der qualitativ besseren Stationen.

Neben der Datenqualität am Standort spielen bei der Bewertung für eine längerfristige Einrichtung einer seismologischen Station auch logistische und administrative Aspekte eine wesentliche Rolle. Grundsätzlich ist eine längerfristige Installation an beiden Standorten möglich und wäre mit Unterstützung der Gemeinden wahrscheinlich auch realisierbar. Am Standort Balow müsste längerfristig auf eine Installation im Außenbereich (Bohrloch oder Posthole-Schacht) gesetzt werden, da sämtliche Räumlichkeiten des Gemeindezentrums genutzt werden. Die Testinstallation konnte in einem Lagerraum realisiert werden, langfristig ist dies aber nicht möglich.

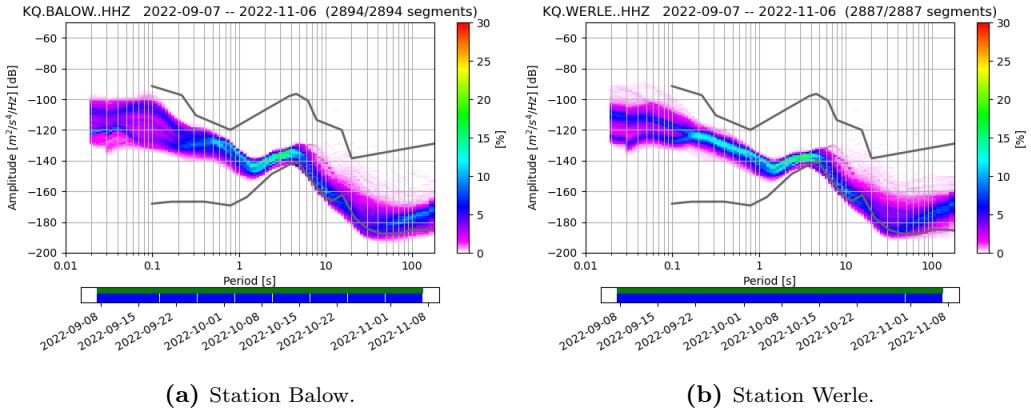


Abbildung 12: Leistungsdichtespektren (PPSD) an Stationen im Raum Werle.

Im ehemaligen Feuerwehrhaus in Werle hingegen scheint eine Verstetigung der Installation im jetzigen Zustand im nicht mehr genutzten Lagerraum des Feuerwehrhauses relativ einfach möglich. Hierzu sollen zeitnah mit der Gemeinde Gespräche aufgenommen werden, um einen längerfristigen Verbleib des Seismometers in Werle zu diskutieren. Aus logistisch-administrativer Sicht ist diese Option aktuell die einfacher zu realisierende Variante.

2.4 Arbeiten ausserhalb Mecklenburg-Vorpommerns

Neben der Betreuung der seismologischen Stationsnetze in M-V betreibt das IfG ebenfalls seismologische Stationen in S-H (Abb. 1). Das dortige Stationsnetz wurde im Jahr 2022 durch eine Bohrlochstation in Birkenmoor, nördlich von Kiel erweitert. Bereits seit 2019 betrieb das IfG an diesem Standort eine Teststation. Diese wurde nun durch eine Bohrlochinstallation in 23 m Tiefe ersetzt und dauerhaft etabliert.

Von dem durch das IfG koordinierten Ausbau der seismologischen Infrastruktur in M-V und S-H profitiert die seismologische Überwachung in ganz Norddeutschland. Die Kooperationen des IfG mit dem SGD in M-V und dem SGD in S-H ermöglichen einen effizienten Betrieb der seismologischen Netze, eine gemeinsame Auswertung und erlauben somit insgesamt eine effiziente seismologische Überwachung für M-V, S-H und die angrenzenden Randmeere.

2.5 Ausblick

Der Stationsausbau in M-V hat seit Aufnahme der Kooperation zwischen SGD und IfG zu einer deutlichen Verbesserung der seismologischen Überwachung in M-V beigetragen. Die seitdem eingerichteten Stationen MRLW, PEEM (2021), sowie KBON, SCHI (2022) sind technisch in hochwertigem Zustand und aktuell nur gering störungsanfällig. Mit der Installation des seismischen Arrays auf Rügen wird die seismologische Überwachung der Küstenregion und der südwestlichen Ostsee mit ihren vielfältigen Störungssystemen weiter gestärkt.

Neben der Konsolidierung und gegebenenfalls weiteren Optimierung der Stationen des Rügen-Arrays wird in 2023 die Etablierung einer seismologischen Station im Raum Werdle angestrebt. Erste Testmessungen lassen eine kurzfristige Realisierung in 2023 in dieser Region möglich erscheinen. Für die Station GOIE auf der Greifswalder Oie sollen die Möglichkeiten einer dauerhaften Etablierung mit Datenübertragung, möglicherweise im Bereich des Leuchtturms, weiterentwickelt werden. Darüberhinaus bestehen weiterhin Lücken in der seismologischen Abdeckung im Landesinneren von M-V. Hierzu sollen mögliche Zielregionen identifiziert und ggf. mit ersten Testmessungen potentielle Standorte für eine weitere Verdichtung des Stationsnetzes durchgeführt werden.

3 Status Datenzentrum - Erfassung und Auswertung seismologischer Daten

Das 2018 am IfG in Betrieb genommene seiscomp-System (GFZ Potsdam and Gempa GmbH [2008]) bildet die Grundlage der Erfassung, automatisierten wie auch manuellen Auswertung seismischer Ereignisse und der Archivierung der Wellenformdaten. Das System wird kontinuierlich gepflegt, 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. 13). 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 M-V 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.

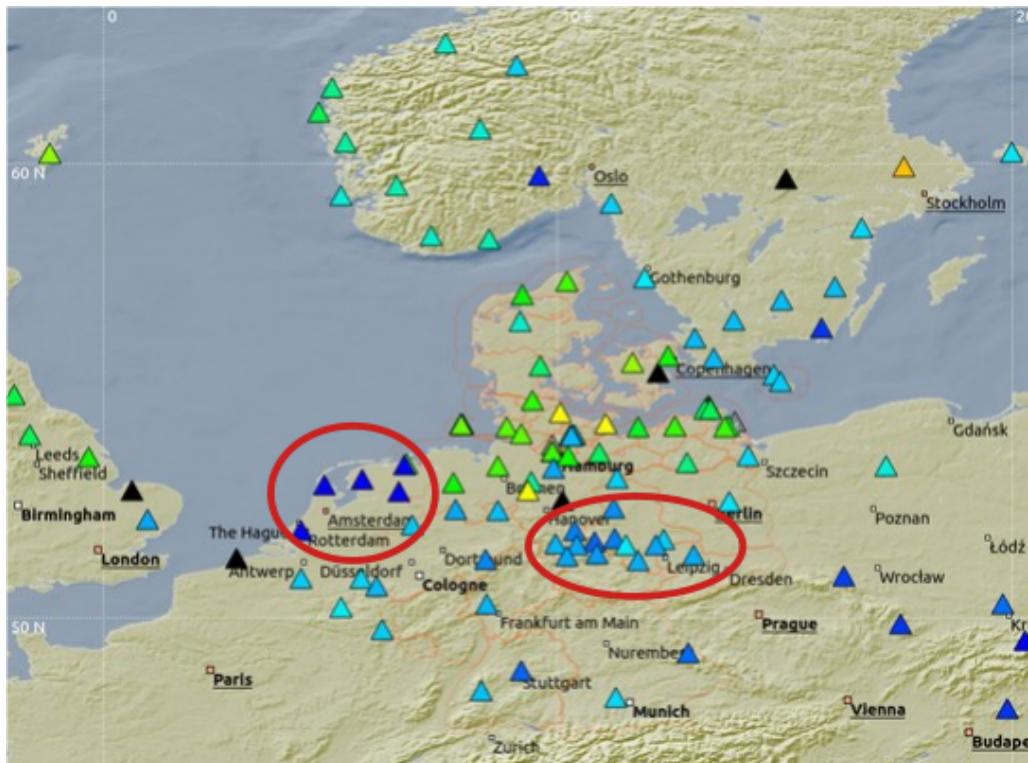


Abbildung 13: Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen in Norddeutschland und Umgebung. Rot markiert sind in 2022 neu aufgenommene Stationen in Sachsen, Thüringen und den Niederlanden.

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. 14). Die Erfassung global verteilter Wellenformdaten und die automatische Detektion und Lokalisierung global messbarer Ereignisse ist notwendig, um zwischen lokalen Ereignissen in Norddeutschland und teleseismischen Ereignissen unterscheiden zu können.

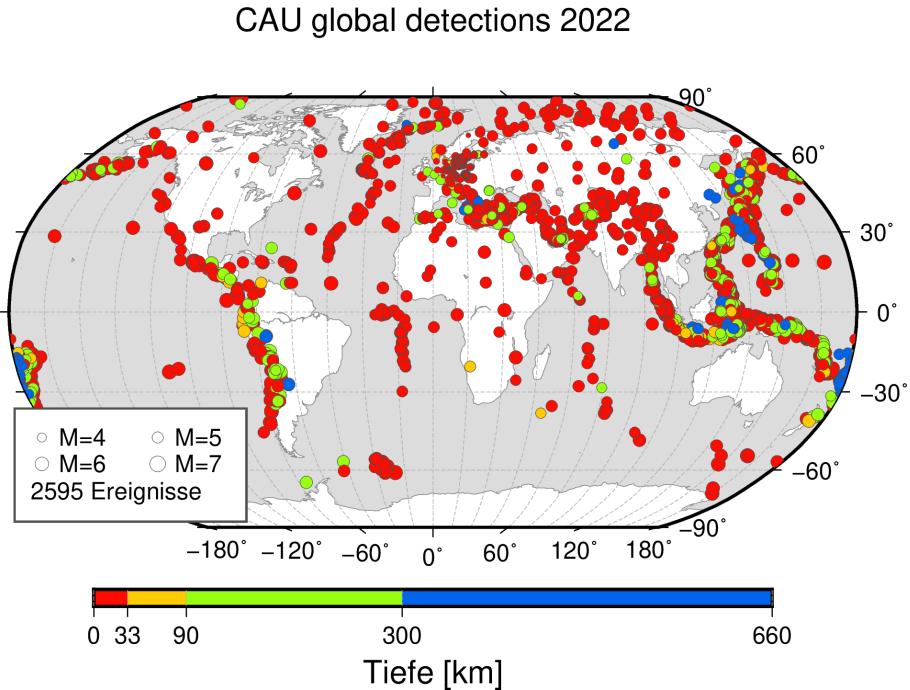


Abbildung 14: Verteilung aller in 2020 am Datenzentrum des IfG detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5 , welche vollautomatisch vom System prozessiert wurden.

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 Norddeutschland 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 Deutschland eingesetzt wird. Im Zuge des fachlichen Austauschs stellte sich heraus, daß dieser Ereignisdetektor, kurz AD Detektor für *Amplitude Decay* (K. Stammle, pers. Mitt.), 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 des IfG mit dem dänischen und schwedischen Erdbebendienst stehen dem IfG zusätzliche Echtzeitdaten aus dem Gebiet der südwestlichen Ostsee zur Verfügung, wodurch ein zuverlässige seismologische Überwachung von M-V und der angrenzenden Ostsee

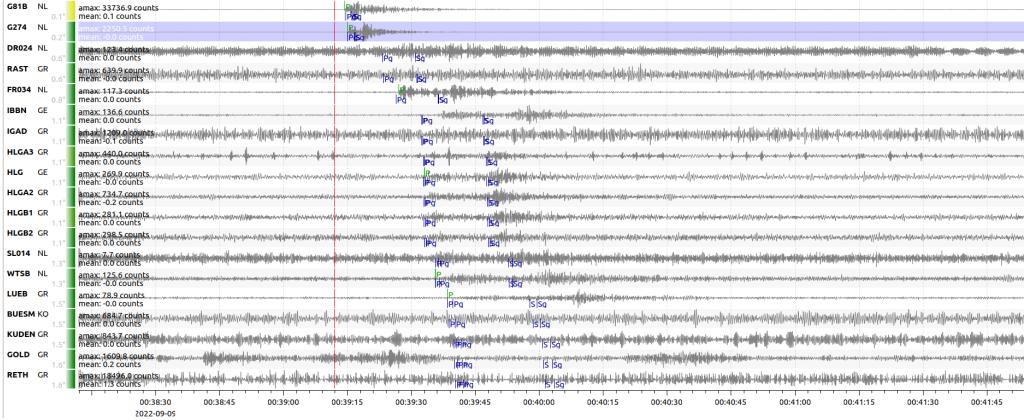
gewährleistet werden kann. K. Stammler (BGR) stellte uns freundlicherweise den Programmcode des AD Detektors zur Verfügung, um diesen am IfG eigenständig und an die verfügbaren Daten und die zu überwachende Zielregion angepasst, zu nutzen.

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. 15b) und für jede Kombination aus Gitterpunkt und Stationskoordinate eine theoretische Laufzeitkurve berechnet. Dieser rechenintensive Prozeß muss nur einmalig ausgeführt werden, die Laufzeitkurven werden abgespeichert.

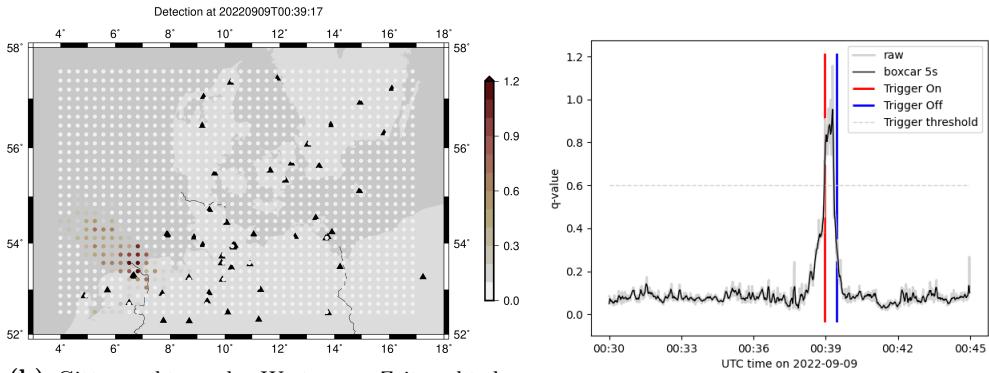
In Zeitschritten von 1 s werden nun sämtliche Wellenformen entlang dieser Laufzeitkurven für jeden Gitterpunkt gestapelt und über die Summenspur ein Qualitätswert (q -Wert) bestimmt. Dieser ergibt sich im Wesentlichen aus der Amplitude der gestapelten P- und S-Wellen-Zeitfenster und verschiedener Korrekturfaktoren, 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 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. 15c).

Am Beispiel eines Bebens bei Groningen (NL) mit Magnitude 2.3 sind die Schritte in Abb. 15 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. 15a) werden die Wellenformen für jeden Gitterpunkt (Abb. 15b) gestapelt. Zum Zeitpunkt der Detektion um 00:39:17 UTC ergibt die Stapelung für Gitterpunkte in der Region um Groningen erhöhte q -Werte (Abb. 15b). 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. 15c), 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 überwie-



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

gende 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 Fennoskandischen Schild zurückzuführen ist, werden dort Ereignisse mit Magnituden bis zu 1.3 recht zuverlässig detektiert. Aber auch Ereignisse in Norddeutschland werden vom Detektor zuverlässig erfasst, z.B. die Sprengungsergebnisse in Zusammenhang mit der Zerstörung der Nord Stream-Pipelines bei Bornholm (s. Kap. 4).

4 Ereignisübersicht

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. [2021]).

In der nördlichen Nordsee gab es einige Ereignisse mit Magnituden bis zu 3.6 (s. Abb. 16). Solche Ereignisse sind in der Nordsee nicht unüblich, 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 weiteren Stationen in S-H gut messbar waren.

EMSC Katalog 2022.01.01 - 2022.12.31

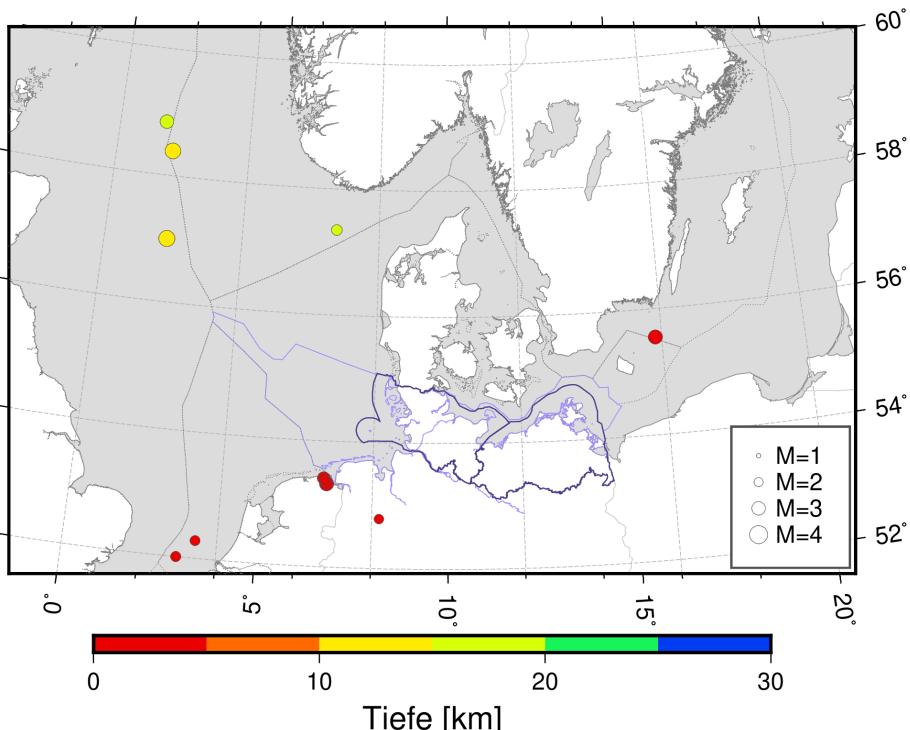


Abbildung 16: Ereignisse im Jahr 2022, Quelle: EMSC [2021]. Die Landesgrenzen von S-H und M-V (dunkelblau) sind ebenso dargestellt, wie die AWZ Grenzen in der Nord- und Ostsee (blau).

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. Hervorzuheben 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 Abschnitt 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, Quelle: EMSC [2021].

4.2 Seismische Ereignisse in M-V und Umgebung

Seit Beginn der Kooperation werden am IfG systematisch Wellenformen aus M-V und benachbarter Stationen nach seismischen Ereignissen ausgewertet. Neben der automatischen Detektion im Seiscomp-System, sowie dem neu etablierten AD-Detektor, erfolgt eine tägliche, manuelle Durchsicht der Wellenformen nach potentiellen Ereignissen (siehe Kapitel 3). Dies ist nach wie vor unabdingbar, da die Stationsdichte für eine zuverlässige und vollständige automatische Detektion schwächer Ereignisse mit Magnituden unter 2 nicht ausreicht. Abbildung 17 fasst den Katalog des Jahres 2022 mit 317 detektierten und manuell ausgewerteten seismischen Ereignissen zusammen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in Tabelle 2 alle tektonischen und ausgewählte nicht-tektonische Ereignisse gelistet. Der vollständige Katalog für das Jahr 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.

Der Katalog der seismischen Ereignisse 2022 des IfG enthält 317 manuell bearbeitete Ereignisse. Hierbei handelt es sich vor allem um eine Vielzahl nicht-tektonischer Ereignisse in der südwestlichen Ostsee, in M-V und S-H sowie in Süd-Skandinavien. Mit der Einrichtung des AD-Detektors (s. Kap. 3) 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

CAU Bulletin 2022 categorical

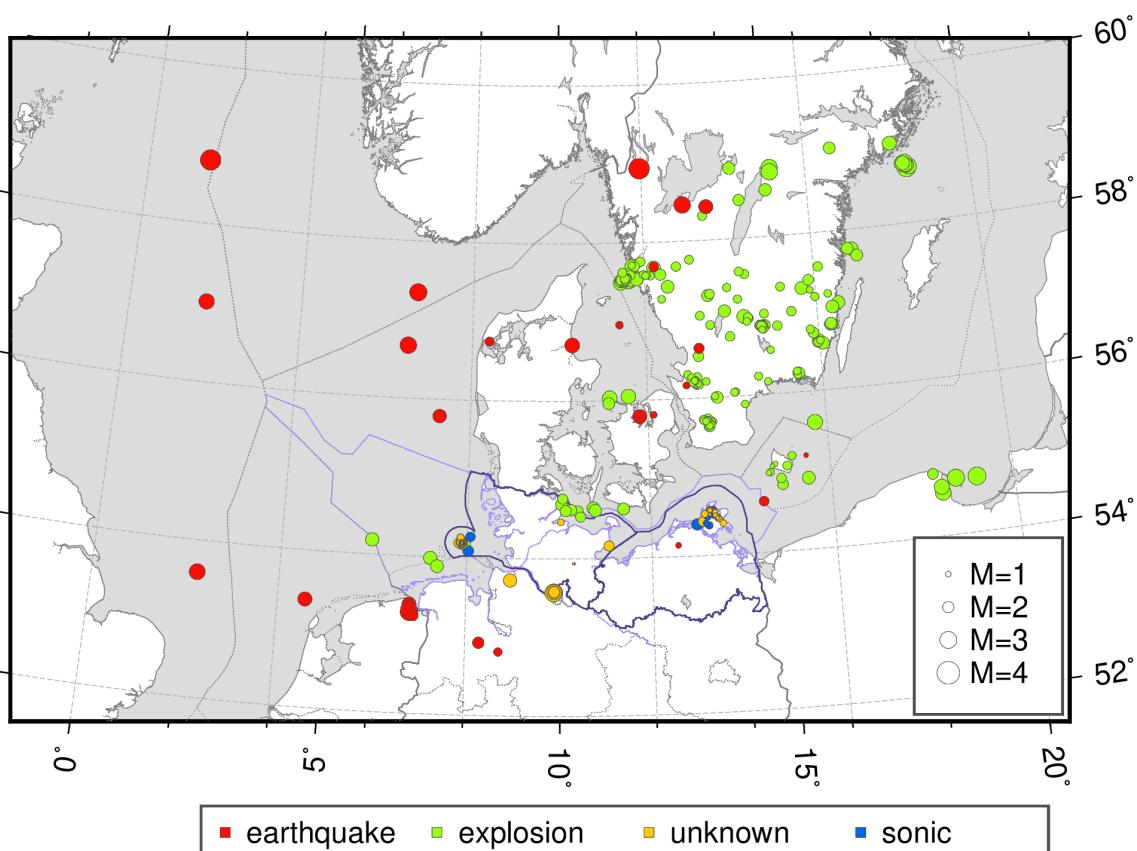


Abbildung 17: Übersichtskarte der in 2022 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Norddeutschland und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.

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.

Mit der Etablierung des seismischen Arrays auf Rügen (siehe Abschnitt 2.2) können an den dortigen Stationen registrierte potentielle Ereignisse besser und zuverlässiger charakterisiert werden. Hierdurch konnte auch eine nicht unerhebliche Anzahl an anthropogenen bzw. meteorologisch verursachten Ereignissen nachvollzogen werden. Neben Donner nach stärkeren Blitzschlägen wurden auch akustische Signale, vermutlich von Überschallflügen, sowie gelegentlich das Schlussfeuerwerk der Störtebeker Festspiele bei Ralswiek registriert. Allen Ereignissen ist gemein, dass die Wellenausbreitung über das Array mit Schallgeschwindigkeit erfolgt und somit leicht von seismischen Wellen separiert werden kann.

Ein potentiell tektonisches Ereignis wurde am 18.9.2022 um 2:05 Uhr (Ortszeit, 0:05 UTC, s. Tabelle 2) an der Station Marlow (MRLW) registriert. Sowohl die Wellenform als auch die Polarisationsanalyse lassen eine tektonische Ursache möglich erscheinen, sind aber nicht eindeutig. Da dieses Ereignis an keiner anderen Station in den Wellenformen sichtbar ist, ist eine genauere Charakterisierung gegenwärtig nicht möglich. Die in Tabelle 2 genannte Magnitude 1 entspricht der "Stationsmagnitude", welche stark vom Abstand der Station zum Quellort abhängt. Läge das Ereignis deutlich weiter von der Station MRLW entfernt, müsste die Ereignismagnitude größer und das Ereignis somit auch an anderen Stationen des regionalen Netzes erkennbar sein. Da dies nicht der Fall ist, ist eine Quelllokation in der Umgebung von Marlow und eine niedrige Magnitude in der Größenordnung um 1 eher wahrscheinlich. Die Lokalisierung dieses Ereignisses ist also nur eine ungefähre Angabe und das Ereignis wurde zum Zwecke der Dokumentation in den Katalog aufgenommen.

Zwei tektonische Ereignisse ereigneten sich am 8.9.2022 und am 20.11.2022 südlich bzw. nordöstlich von Bornholm mit Magnituden von 1.7 und 0.8. Deren Lokation setzt sich deutlich von bekannten Sprenglokalisationen auf und um die Insel Bornholm ab. Zudem deuten die Herdtiefen von bis zu 25 km auf eine tektonische Ursache hin, wobei die Tiefenbestimmung aufgrund der weit entfernten Stationen auf Bornholm und am Festland mit erhöhten Unsicherheiten behaftet ist. Neben der Herdtiefe deutet auch der Charakter der Wellenformen mit einem hohen Verhältnis der S- zu P-Wellenamplitude auf eine tektonische Ursache hin.

4.3 Sprengungen an den Nord Stream-Pipelines

Im Gebiet um die Insel Bornholm sind 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 Ostsee-Pipelines Nord Stream jedoch unerwartete Brisanz. Anhand der Wellenformen kann ein tektonisches Ereignis in beiden Fällen ausgeschlossen werden, vom Charakter ähneln die Wellenformen eher Sprengungseignissen

(Abb. 18). Beide Ereignisse wurden von dem AD-Detektor detektiert und auch die Array-Auswertung am Rügen-Array zeigt deutlich detektierbare Ereignisse (Abb. 10, 18d). Das zweite Ereignis nordöstlich von Bornholm ist von der Wellenformcharakteristik deutlich komplexer. Als Erklärung hierfür werden derzeit zum einen mehrere, zeitgleiche Sprengungen mit einem daraus resultierenden komplexeren Quellsignal, als auch eine komplexere Wellenausbreitung über die Tornquist-Zone diskutiert. Neben der Station Rügen und dem Rügen-Array bilden die anderen Stationen des IfG im Nordosten von M-V eine wichtige Datengrundlage für noch andauernde seismologische Auswertungen der beiden Ereignisse an verschiedenen Institutionen im In- und Ausland.

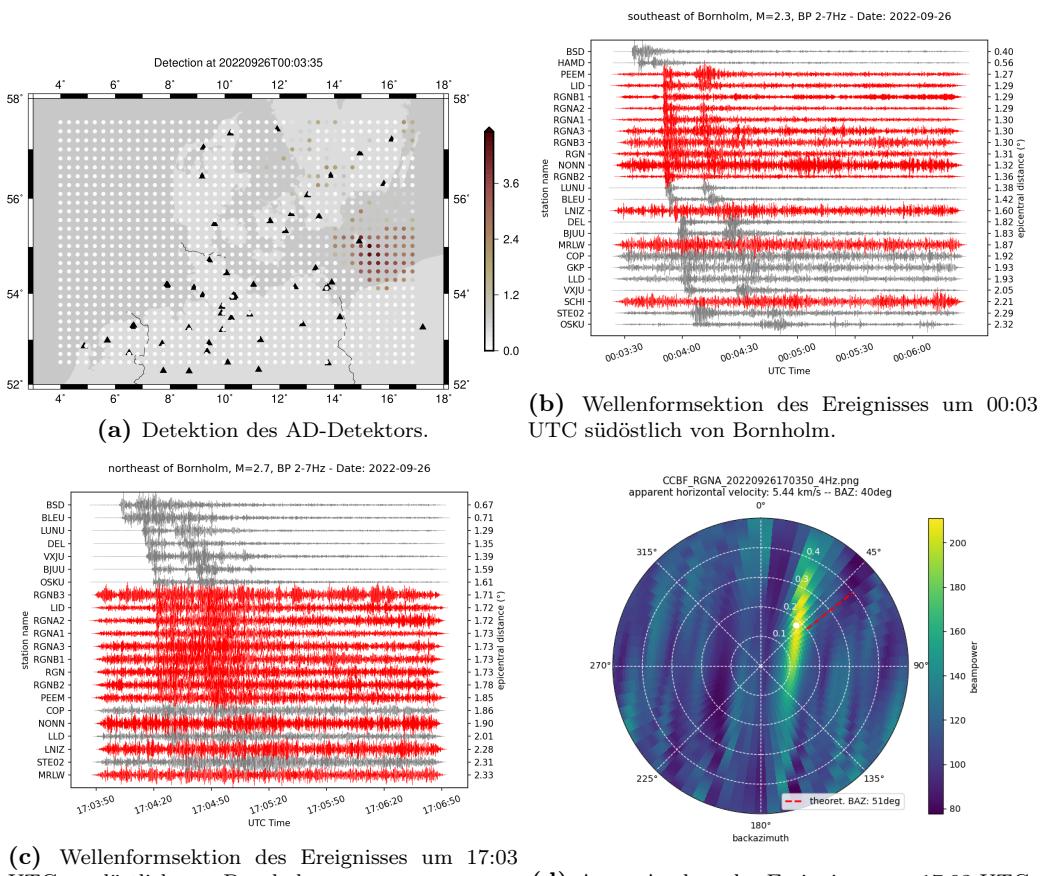


Abbildung 18: Die Ereignisse vom 26.9.2022 in Zusammenhang mit der Zerstörung der Nord Stream-Pipelines. Die Wellenformen von Stationen in M-V und S-H sind rot gezeichnet.

Tabelle 2: Tektonische und selektierte nicht-tektonische seismische Ereignisse im Jahr 2022 in M-V 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	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 Mecklenburg-Vorpommern 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	Denmark	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 Zusammenfassung

Die Zusammenarbeit zwischen dem Geologischen Dienst im LUNG M-V und dem Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel bildet die Grundlage für eine systematische Überwachung der Seismizität in Mecklenburg-Vorpommern. Hierzu zählen der Betrieb eines seismologischen Stationsnetzes, eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung seismologischer Daten und eine Evaluierung und Klassifizierung beobachteter Ereignisse. Seit Beginn der Zusammenarbeit in 2019 und der Etablierung der Kooperation in 2020 wurden sowohl das Messnetz als auch die Auswerteroutinen konsequent weiterentwickelt.

Das seismologische Stationsnetz in Mecklenburg-Vorpommern bestand im Jahr 2022 aus insgesamt sechzehn seismologischen Stationen, wobei sieben das landesweite Stationsnetz, zwei weitere ein lokales Netz um Lubmin und sieben zusätzliche Stationen auf Rügen ein seismisches Array bilden. Im Jahr 2022 konnten die Stationen Kühlungsborn und Schillersdorf von der BGR permanent etabliert werden. Die neuen Standorte wurden in Koordination mit dem IfG gewählt und verkürzen die Stationsabstände entlang der Ostseeküste bzw. entlang der südlichen Landesgrenze erheblich. In der Region Werle laufen derzeit Testmessungen zur Etablierung einer weiteren Station im Jahr 2023, um eine eventuelle tektonische Aktivität im Bereich des Salzstocks nachzuweisen und die Stationsabstände in den südlichen Landesteilen weiter zu reduzieren. Mit zunehmender Zahl an Stationen steigt auch der Aufwand für Betrieb und Wartung der Stationen, dieser zahlt sich aber durch eine sehr hohe Datenverfügbarkeit aus. Neben technischen Aspekten spielt auch die Qualitätskontrolle der seismologischen Daten eine wichtige Rolle im alltäglichen Betrieb des Messnetzes. In der Abdeckung seismologischer Stationen bestehen weiterhin große Lücken in zentralen Teilen von M-V. Hierzu wird die Prüfung weiterer Standorte empfohlen.

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. Stammel (BGR) entwickelt und am IfG an die zur Verfügung stehenden Echtzeitdaten und das zu überwachende Gebiet angepasst wurde. Der AD Detektor erkennt und lokализiert Ereignisse mit Magnituden oberhalb 2.5 sehr zuverlässig, im Bereich der südlichen Ostsee bereits ab Magnituden von etwa 1.5. Mit der Etablierung des Rügen-Arrays wurde zusätzlich ein array-basierter Detektor in die routinemäßige Auswertung integriert.

Trotz der zuverlässigen automatisierten Detektion bleibt eine manuelle Auswertung aber unabdingbar. Lokale, schwächere Ereignisse, welche meist auf anthropogene oder meteorologische Ursachen zurückzuführen sind, aber gelegentlich auch eine tektonische Ursache nahelegen könnten, werden nach wie vor überwiegend in der manuellen Durchsicht der

täglichen Wellenformen identifiziert. Es ist aber auch wichtig zu betonen, dass die Magnitudenschwelle der Vollständigkeit seismologischer Ereignisse - oberhalb derer alle Ereignisse erfasst werden - aufgrund der weiterhin bestehenden Lücken im Stationsnetz räumlich stark variabel ist. In Zukunft soll die Magnitude der Vollständigkeit regelmäßig quantifiziert und dessen Entwicklung durch den Ausbau des Stationsnetzes dargestellt werden.

Der Ereigniskatalog für Norddeutschland enthält einige tektonische Ereignisse aus bekannten Quellregionen, wie der zentralen Nordsee und den Gasfördergebieten in Niedersachsen und Groningen (NL), sowie schwacher tektonischer Ereignisse in der Region um Bornholm und auf Seeland (DK). Der überwiegende Anteil der bearbeiteten seismischen Ereignisse ist auf anthropogene Quellen zurückzuführen, v.a. Sprengungsergebnisse. Mit dem AD Detektor können im südkandinavischen Raum zuverlässig Sprengungen mit Magnituden von etwa 1.3 detektiert werden. Die Detektionsschwelle für seismische Ereignisse in M-V liegt aber aufgrund des höheren Rauschpegels an seismischen Stationen im Norddeutschen Becken grundsätzlich höher, ist aber zugleich durch die unregelmäßigen Stationsabstände auch räumlich variabel. Neben der eigenen Detektion von Ereignissen in M-V und angrenzenden Gebieten 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.

Literatur

- BGE. Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, 2020. URL <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>.
- P. Bormann. *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences. IASPEI, GFZ Potsdam, 2nd edition, 2012.
- 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.
- LBEG. Niedersächsischer Erdbebendienst. <https://www.lbeg.niedersachsen.de/erdbebendienst/niedersaechsischer-erdbebendienst-ned-112163.html>, 2013.
- C. Weidle, T. Meier, and K. Obst. Bericht zur Kooperation 2020 – Status der Erdbebenüberwachung für Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung. Technical report, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2021.
- C. Weidle, T. Meier, and K. Obst. Bericht zur Kooperation 2021 – Status der Erdbebenüberwachung für Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung. Technical report, 2022.

A Ereigniskatalog für 2022

Tabelle A.1: Tektonische und selektierte nicht-tektonische seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Norddeutschland und Nachbarregionen.
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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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	anthropogenic event
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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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	2.1	Helgoland Umgebung	acoustic noise
2022-11-02 09:30:18	54.6909	10.0429	0.0	1.2	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 Norddeutschland 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 Norddeutschland 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 Bonnholm	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 Norddeutschland 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 Bonnholm	explosion

Tabelle A.1: Seismische Ereignisse im Jahr 2022 in Norddeutschland 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. Das IfG betreibt zusätzliche lokale Netze (gelb) um Lubmin und auf Rügen (in Kooperation mit Universität Hamburg).	2
2	Die seismologische Station auf dem Gelände des IAP in Kühlungsborn. Fotos: BGR	4
3	Bestimmung der horizontalen Orientierung des Bohrlochseismometers KBON. Auswertung: BGR	4
4	Die seismologische Station in Schillersdorf. Fotos: BGR	5
5	Bestimmung der horizontalen Orientierung des Bohrlochseismometers GR.SCHI. Auswertung: BGR	6
6	Leistungsdichtespektren (PPSD) an Stationen in M-V.	7
7	Seismologische Stationen des Rügen-Arrays. Die Station RGN (grün, der Netzwerkcode "GE" steht für den Betreiber GFZ Potsdam) wurde durch sieben Breitbandseismometer ergänzt. Die Station A1 (grau) wurde im November 2022 wieder abgebaut und soll im Frühjahr 2023 am Standort A5 (blau) wieder eingerichtet werden.	9
8	Leistungsdichtespektren (PPSD) an ausgewählten Stationen des Rügen-Arrays.	10
9	Schematische Darstellung eines seismischen Arrays (Quelle: Bormann [2012])	12
10	Beispiel der Arrayanalyse für ein Ereignis bei Bornholm.	12
11	Standorte für Testmessungen im Raum Werle.	14
12	Leistungsdichtespektren (PPSD) an Stationen im Raum Werle.	15
13	Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen in Norddeutschland und Umgebung. Rot markiert sind in 2022 neu aufgenommene Stationen in Sachsen, Thüringen und den Niederlanden.	17
14	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.	18
15	Funktionsweise des AD Detektors am Beispiel eines Erdbebens bei Groningen (NL).	20
16	Ereignisse im Jahr 2022, Quelle: EMSC [2021]. Die Landesgrenzen von S-H und M-V (dunkelblau) sind ebenso dargestellt, wie die AWZ Grenzen in der Nord- und Ostsee (blau).	21
17	Übersichtskarte der in 2022 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Norddeutschland und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.	23

18	Die Ereignisse vom 26.9.2022 in Zusammenhang mit der Zerstörung der Nord Stream-Pipelines. Die Wellenformen von Stationen in M-V und S-H sind rot gezeichnet.	25
----	---	----

Tabellenverzeichnis

1	Signifikante Erdbeben im Jahr 2022 (EMSC)	22
2	Seismische Ereignisse in M-V und Umgebung (IfG)	26
A.1	Seismische Ereignisse in Norddeutschland und Nachbarregionen (IfG)	33