



Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



Landesamt für Umwelt,
Naturschutz und Geologie

Status der Erdbebenüberwachung für Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung

Bericht zur Kooperation 2020

Dr. Christian Weidle^{ID}, 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 04, 2021

Weidle, C. et al.: Status der Erdbebenüberwachung für Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung: Bericht zur Kooperation 2020.

ISSN 3052-7236

DOI 10.38071/2025-00970-4

Herausgegeben von

Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Veröffentlicht am 20. Mai 2021,
... online am 11. August 2025



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

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Hintergrund und Vorarbeiten | 3 |
| 2.1 Hintergrund | 3 |
| 2.2 Standorterkundung im Jahr 2019 | 5 |
| 2.2.1 Teststandorte im Raum Marlow | 6 |
| 2.2.2 Teststandorte im Raum Lubmin | 8 |
| 2.3 Auswertung der Testmessungen | 12 |
| 2.3.1 Standortwahl Raum Marlow | 12 |
| 2.3.2 Standortwahl Raum Lubmin | 13 |
| 3 Status Stationsnetz 2020 | 16 |
| 3.1 Permanent-Stationen | 16 |
| 3.1.1 Ausbau des Stationsnetzes | 17 |
| 4 Auswertung Datenzentrum | 19 |
| 5 Ereignisübersicht 2020 | 23 |
| 5.1 Überregionale Seismizität | 23 |
| 5.2 Seismische Ereignisse in MV | 25 |
| 6 Zusammenfassung | 31 |
| 6.1 Ausblick | 32 |
| Literatur | 35 |
| A Abbildungsverzeichnis | 37 |
| B Tabellenverzeichnis | 38 |

1 Einleitung

Norddeutschland gilt als allgemein seismisch ruhige Region und schadensbringende Erdbeben sind in den letzten 50 Jahren äusserst selten aufgetreten. Entsprechend war die seismologische Überwachung in den nördlichen Bundesländern lange Zeit wenig im Fokus der Geologischen Dienste, obwohl spürbare und auch schadensbringende seismische Ereignisse in Mecklenburg-Vorpommern und dem südwestlichen Ostseeraum aus historischen Aufzeichnungen bekannt sind und seit den 1970er Jahren auch instrumentell erfasst werden. Aufgrund der Suche nach Endlagern für radioaktive Stoffe und die zunehmende Nutzung des Untergrundes z.B. zur Gewinnung geothermischer Energie oder zur untertägigen Energiespeicherung, erlangt die seismische Überwachung aktuell auch in Norddeutschland an Bedeutung.

Der Geologische Dienst Mecklenburg-Vorpommern (GD) ist die einzige Fachbehörde im Land, die seismische Ereignisse im Landesgebiet sowie dem angrenzenden südlichen Ostseeraum erfasst und bewertet. Insbesondere wurden in der Vergangenheit die Beobachtungsmeldungen über makroseismische Erschütterungen und Schäden nach Erdbeben in der Nähe von Wittenburg (2000) und Rostock (2001) sowie im Bereich von Kaliningrad (2004) und Südschweden (2008) seitens der Bevölkerung vom GD gesammelt und ausgewertet. Im Zuge dieser, durch tektonische Bewegungen verursachten Ereignisse, mussten auch fachliche Maßnahmen zur Sicherheit kerntechnischer Anlagen (z.B. Zwischenlager Nord in Lubmin) für das Innenministerium M-V erarbeitet werden. Bereits damals wurde auf die im Untergrund des Standortes befindlichen Störungen aufmerksam gemacht, deren potenzielle Aktivität nur durch mikroseismische Überwachung eingeschätzt werden kann.

Auch im Zuge der Endlagersuche ist die Bewertung aktiver Störungszonen ein wichtiges Ausschlusskriterium nach §22 Standortauswahlgesetz (StandAG). Das Vorpommern-Störungssystem im Nordosten des Landes, sowie viele Störungen im Bereich von Salzstrukturen im Westen und Süden Mecklenburgs entstanden im Mesozoikum und wurden mehrfach reaktiviert. Aufgrund der quartären Überdeckung mit Lockersedimenten ist die Feststellung von Bewegungen entlang dieser Störungen während der letzten 32 Millionen Jahre nur vereinzelt mittels Bohrungen oder seismischen Messungen möglich. Alternativ dazu können mit Hilfe der seismologischen Überwachung jüngste Bewegungen detektiert werden. Dies ist allerdings mit der aktuell geringen Anzahl permanenter seismologischer Stationen in Mecklenburg-Vorpommern nicht hinreichend möglich. Gleichermaßen trifft für die Erfassung und Ortung von Rutschungen oder Küstenabbrüchen zu. Deren Bestimmung dient der Abwehr von Geohazards, wie sie im Geologiedatengesetz (GeolDG) gefordert werden, welches Mitte letzten Jahres in Kraft getreten ist und für dessen Umsetzung der GD im LUNG M-V verantwortlich sein wird.

Um die Ursachen und letztlich die Wiederkehrswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse besser einschätzen zu können, ist es daher zwingend notwendig, das seismologische Überwachungsnetz zu verdichten. Nur so können schwächere, nicht spürbare seismische Ereignisse verlässlich erfasst und ggf. aktive Störungszonen in Hinblick auf die Erdbebengefährdung genauer bewertet werden.

Der GD ist ebenfalls einbezogen in die Abstimmungs- bzw. Konsultationsprozesse europäischer Nachbarländer bezüglich der Errichtung von Endlagern für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Beispielsweise wurden 2015 die Unterlagen zu sechs potenziellen Standorten in Dänemark (u.a. auf der Ostseeinsel Bornholm) und ihr Gefährdungspotenzial für Mecklenburg-Vorpommern geprüft.

Seit dem Sommer 2020 arbeiten der GD und das Institut für Geowissenschaften (IfG) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung an einer grundsätzlichen Verbesserung der seismologischen Überwachung MVs. Hierbei sollen u.a. das seismologische Überwachungsnetz ausgebaut und eine routinemässige Auswertung seismischer Ereignisse in MV und Umgebung etabliert werden. Beides bildet die Grundlage für eine fortlaufende Bewertung der seismischen Aktivität und Gefährdung. Bereits nach Aufnahme der ersten Gespräche im Jahr 2019 wurde vom IfG durch Vorleistungen ein "fliegender Start" in die Kooperation ermöglicht. Dieser bildet die Grundlage für eine zeitnahe Erweiterung der seismologischen Infrastruktur in MV (s. Kapitel 2).

Das seismologische Stationsnetz in Mecklenburg-Vorpommern umfasst aktuell nur drei Permanentstationen. Durch die Kooperation zwischen IfG und GD und in enger Abstimmung mit Aktivitäten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), welche ihrerseits ein deutschlandweites seismologisches Netz betreibt, wird dieses Netz bereits im Jahr 2021 um vier weitere permanente Seismometer erweitert. Darüberhinaus betreibt das IfG noch weitere temporäre Seismometer in MV im Rahmen der Standortsuche (siehe Kapitel 3).

Neben dem Ausbau des seismologischen Stationsnetzes ist die Erfassung und Auswertung der seismologischen Daten das zweite wesentliche Element der Kooperation IfG-GD. Hierzu betreibt das IfG ein lokales Echtzeit-Monitoring System zur Erdbebenüberwachung. Dieses bildet das Rückgrat der kontinuierlichen seismischen Überwachung, erfordert aber speziell zur Detektion von schwachen Ereignissen, eine zusätzliche manuelle Auswertung. Dies gilt besonders für schwach instrumentierte Regionen wie MV (siehe Kapitel 4).

Für das Jahr 2020 wurden erstmalig lokale seismische Ereignisse in Mecklenburg-Vorpommern ausgewertet und ein lokaler Erdbebenkatalog für Norddeutschland erstellt. Die Detektion und Lokalisierung von beobachteten Sprengungsergebnissen in MV profitiert dabei bereits sehr von den zusätzlichen, temporären lokalen Stationen (siehe Kapitel 5).

2 Hintergrund und Vorarbeiten

2.1 Hintergrund

Die norddeutschen Bundesländer sind im Allgemeinen Gebiete mit geringer natürlicher Seismizität und entsprechend geringem seismischen Gefährdungspotential. In der jüngeren Vergangenheit gab es dennoch wiederholt seismische Ereignisse, welche von der Bevölkerung gespürt wurden, z.B. am 19.5.2000 bei Wittenburg oder auch am 21.7.2001 bei Rostock, beides Ereignisse mit Magnituden über 3 (Abb. 1). Hinzu kommen weitere Ereignisse in der angrenzenden Ostsee, in Dänemark oder Schweden, welche in Mecklenburg-Vorpommern spürbar waren, z.B. das Erdbeben bei Malmö (Schweden) am 16.12.2008 (Voss et al. [2009]). Darüberhinaus sind wiederkehrende seismische Ereignisse v.a. im südwestlichen Ostseeraum, in der Lübecker Bucht, aber auch entlang der Oder in historischen Quellen belegt (Leydecker [2011], Grünthal et al. [2007]). Gerade im Bereich der Tornquist-Zone in der südwestlichen Ostsee sind somit signifikante seismische Ereignisse zu erwarten (Woessner et al. [2015]). Für den Westen MVs sind ebenfalls seismische Ereignisse im Bereich der Gasfördergebiete in Niedersachsen relevant, welche gelegentlich mit Magnituden bis etwa 3 auftreten aber auch deutlich stärker sein können, wie z.B. das Ereignis von Rottenburg vom 20. Oktober 2004 mit einer Magnitude von 4,4 (z.B. Grünthal et al. [2007]).

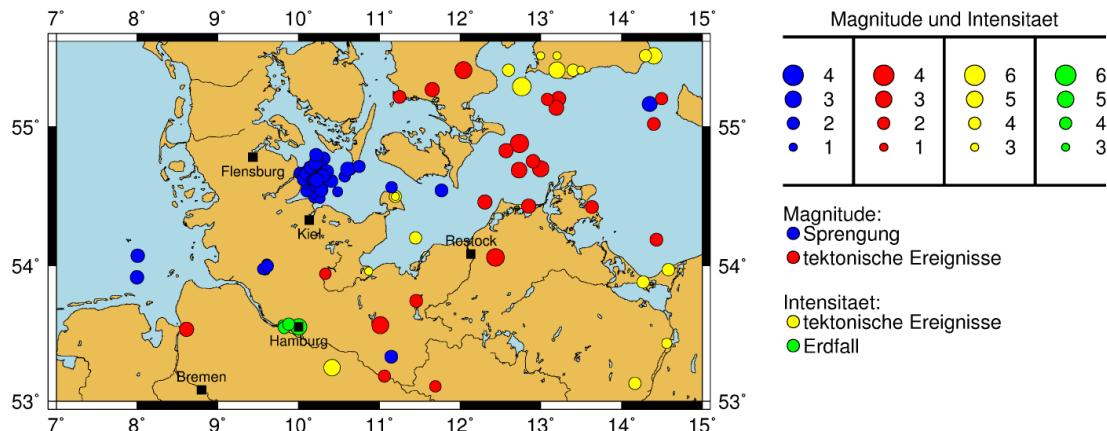


Abbildung 1: Seismische Ereignisse im Norddeutschland und angrenzenden Regionen nach Leydecker [2011]. Instrumentell erfasste Ereignisse (blau, rot) werden von historisch, makroseismisch erfassten (gelb, grün) unterschieden.

Die Ursachen der seismischen Aktivität in Mecklenburg-Vorpommern sind weitgehend unbekannt, v.a. da die rezente Aktivität von Störungen, welche sich typischerweise durch schwache seismische Ereignisse abbilden lassen, nicht durch Messungen nachgewiesen ist. Ein wesentlicher limitierender Faktor hierbei ist das sehr dünne Netz an seismologischen Stationen in MV. Dadurch können seismische Ereignisse mit Magnituden kleiner 2,5 nicht zuverlässig erfasst und schwächere Ereignisse im Allgemeinen nicht detektiert werden. Er schwerend kommt hinzu, dass das seismische Rauschen im Bereich von Sedimentbecken erhöht ist, was zu einer schlechteren Detektierbarkeit kleinerer Ereignisse führt.

Zu Beginn des Jahres 2019 gab es in MV drei permanente seismologische Stationen. Auf Rügen betreibt das GFZ Potsdam seit 1995, in Zarrentin und Löcknitz die BGR seit 2011 bzw 2014 seismologische Stationen (Abb. 2). In den Nachbar(bundes)ländern gibt es in Schleswig-Holstein und Hamburg seismologische Stationen, welche für die Überwachung der westlichen Landesteile von MV nutzbar sind. Im Norden, Süden und Osten von MV ist die Datenabdeckung ähnlich spärlich wie in MV selbst. Ein Ausbau des seismischen Überwachungsnetzes ist daher der erste wesentliche Schritt, um das seismologische Gefährdungspotential in MV zu analysieren.

Seismische Stationen in und um MV

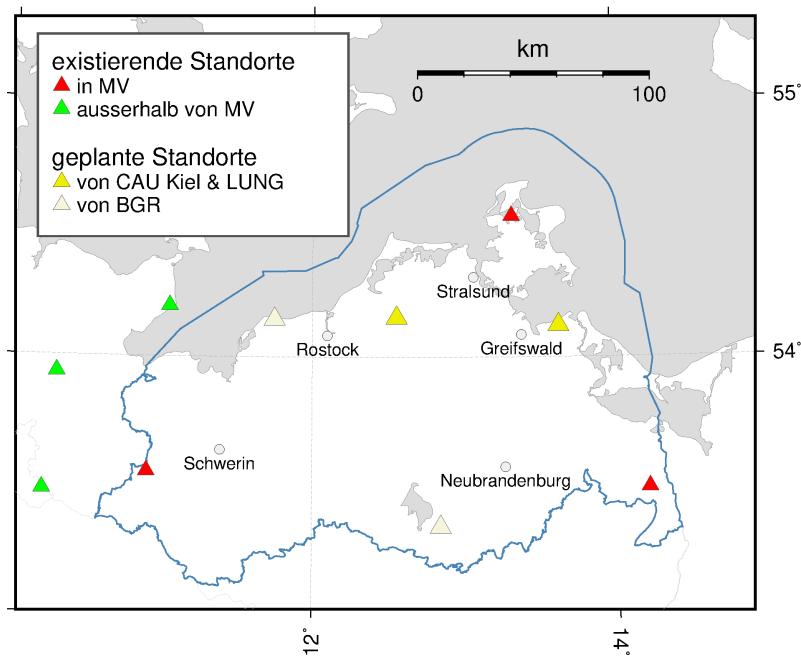


Abbildung 2: Übersichtskarte existierender und geplanter seismologischer Stationen in MV und Umgebung

2.2 Standorterkundung im Jahr 2019

Das Institut für Geowissenschaften (IfG), Abt. Geophysik der CAU Kiel und der Geologische Dienst (GD) des Landesamts für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) in Mecklenburg-Vorpommern (MV), kooperieren im Bereich der seismischen Überwachung für MV bereits seit dem Frühjahr 2019 in informeller Vereinbarung. Hierbei wurden von Seiten des IfG in Eigenleistung erste Schritte unternommen, um den Ausbau des seismologischen Überwachungsnetzes zügig voranzubringen. Das IfG arbeitet hierbei in enger Koordination mit dem Erdbebendienst des Bundes an der Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR) in Hannover zusammen, welcher ebenfalls seismologische Stationen in MV betreibt und weitere plant.

Als erste Zielgebiete für neue seismologische Stationen in MV wurden die Region Lubmin, Landkreis Vorpommern-Greifswald, aufgrund der bekannten, möglicherweise aktiven Störungen in diesem Gebiet, und die Region Marlow, Landkreis Vorpommern-Rügen, aufgrund der Lage zum Epizentrum des Erdbebens von 2001, ausgewählt (Abb. 2). Die BGR bereitet parallel dazu neue Installationen in Kühlungsborn (Lkr. Rostock) und Schillersdorf (Lkr. Mecklenburgische Seenplatte) vor.

Im ersten Schritt wurden Testmessungen an verschiedenen Standorten durchgeführt, um eine langfristig gute Datenqualität an den zu errichtenden Stationen zu gewährleisten. Hierfür wurden zunächst großräumig Gebiete mit hohen zu erwartenden Störsignalen und somit schlechter seismologischer Datenqualität (z.B. Nähe zu Verkehrsinfrastruktur, Windkraftanlagen, industrielle Anlagen) ausgeschlossen. In einer Internetrecherche wurden anschliessend potentielle Standorte in Zielgebieten identifiziert, welche zum einen ruhige Aufzeichnungsbedingungen, zum anderen hinreichende Energie- und Dateninfrastruktur (v.a. Stromanschluss) erwarten liessen und daraufhin Kontakt zu den Eigentümern aufgenommen.

Im Juli 2019 konnte das IfG zunächst ein Seismometer in Marlow und zwei Seismometer im Raum Lubmin installieren und einen weiteren Standort vorerkunden. Im Herbst 2019 folgten zwei weitere Standorte bei Lubmin und ein weiterer im Raum Marlow. Es konnten somit Testmessungen an 6 Standorten durchgeführt werden, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden:

2.2.1 Teststandorte im Raum Marlow

Marlow Am 1.8.2019 konnten wir mit Unterstützung des Vogelpark Marlow ein Seismometer in einer im Sommer ungenutzten Wintervoliere installieren (Abb. 3). Da die Voliere nur über ein Glasdach verfügt, war eine Außeninstallation der GPS Antenne nicht notwendig, da der Empfang innerhalb der Voliere ausreichend ist. Es wurde auch eine Datenübertragung mit LTE Modem eingerichtet. Aufgrund eines technischen Defekts fiel die Aufzeichnung wenige Tage nach der Installation aus. Dies erforderte einen neuerlichen Besuch der Station Mitte September, bei dem das Problem behoben werden konnte.

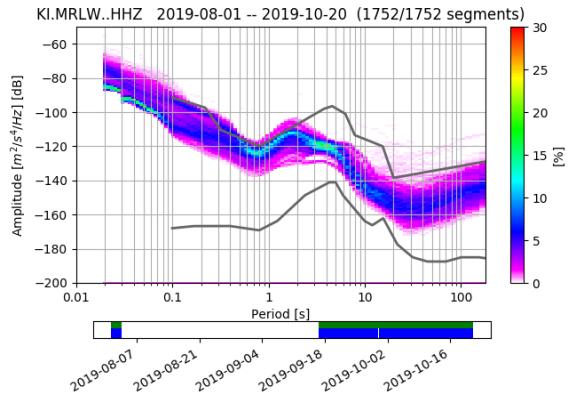


(a) Aussenansicht der Wintervoliere.

(b) In der Wintervoliere.



(c) Datenrekorder (links), Pufferbatterie (Mitte) und LTE Modem (vorne mittig)



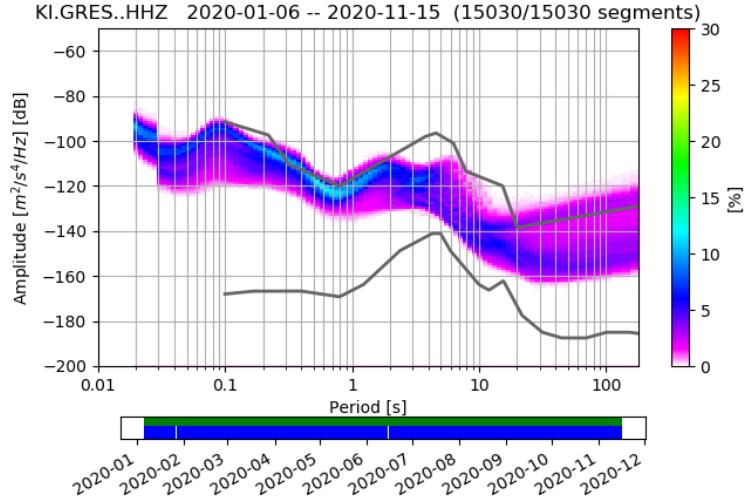
(d) PPSD (s. Abschnitt 2.3)

Abbildung 3: Installation im Wirtschaftsbereich des Vogelparks Marlow.

Gresenhorst Am 21.10.2019 konnten wir die im Vogelpark abgebaute Station mit Unterstützung der Gemeinde Marlow in der ehemaligen Schule von Gresenhorst, etwa 10 km westlich des Vogelparks umgehend wieder in Betrieb nehmen (Abb. 4). Das wegen Baumängeln aufgelassene Schulgebäude verfügt über einen Kriechkeller, in dem das Seismometer installiert wurde. Die GPS Antenne konnte innerhalb des Gebäudes an einem Fenster platziert werden und die Daten werden per LTE Modem in Echtzeit an die CAU übertragen.



(a) Aussenansicht der ehemaligen Grundschule.
(b) Blick in den Kriechkeller der Grundschule.

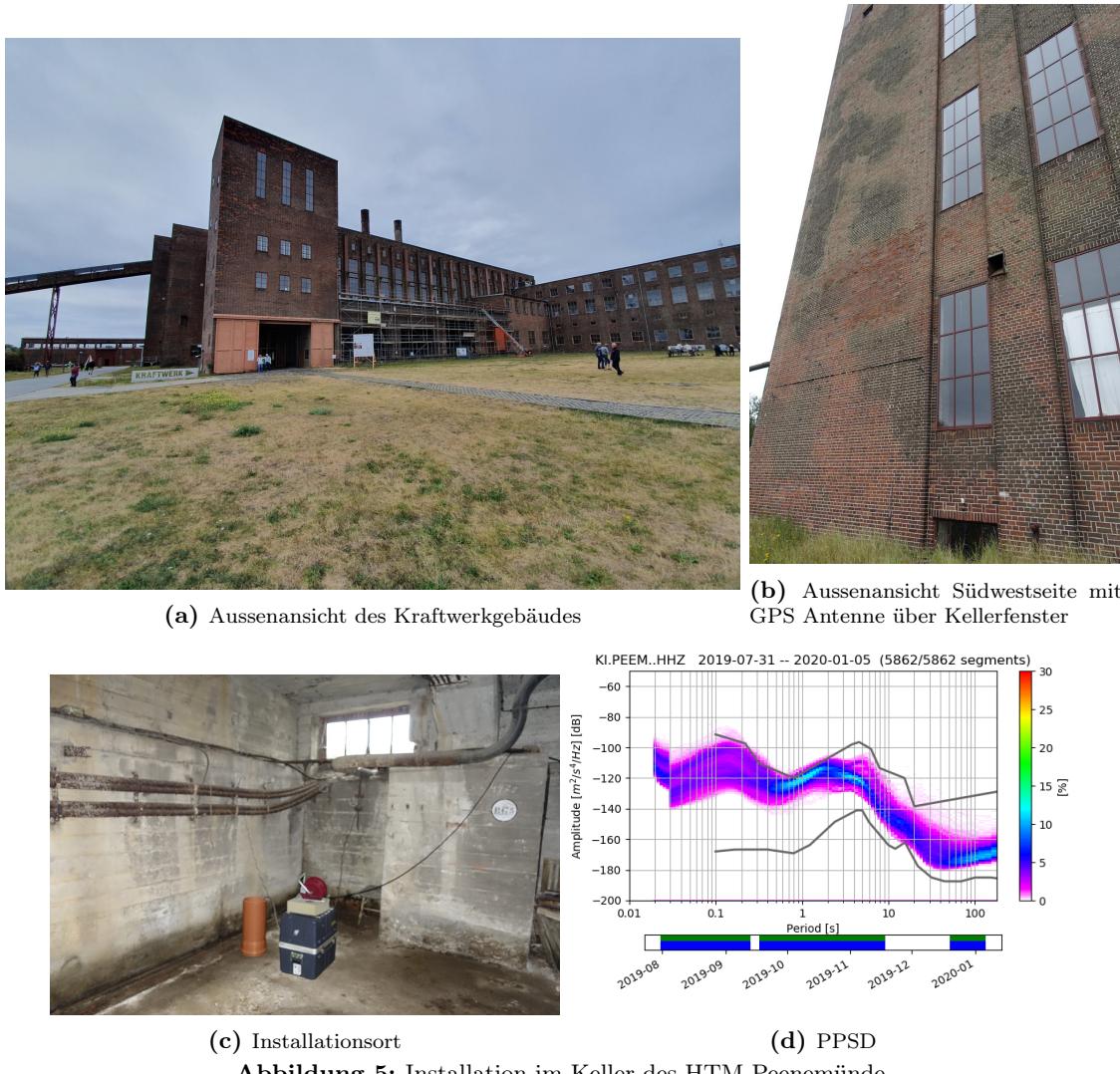


(c) PPSD

Abbildung 4: Installation im Kriechkeller der ehemaligen Grundschule Gresenhorst.

2.2.2 Teststandorte im Raum Lubmin

Peenemünde Am 31.7.2019 konnten wir mit Unterstützung des Historisch-Technischen Museums Peenemünde ein Seismometer im Keller unter dem Depot des Kraftwerks Peenemünde installieren (Abb. 5). Der Standort im Keller ist an der südwestlichen Seite des Gebäudes. Die Stromversorgung erfolgt über ein 25m Kabel aus dem Erdgeschoß. In der Nähe des Seismometers befindet sich ein Kellerfenster, durch welches das GPS Kabel nach außen geführt wird, die GPS Antenne wurde oberhalb des Fensters befestigt. Die Datenübertragung zur CAU Kiel erfolgt in Echtzeit mittels eines LTE-Modems.



Ludwigsburg/Loissin Mit Unterstützung des Fördervereins Schloss- und Gutshofanlage Ludwigsburg e.V. konnten wir am 31.7.2019 im alten Rinderstall des Gutshofes in Ludwigsburg ein Seismometer installieren. Da in dem Gebäude kein Stromanschluß liegt, erfolgt die Stromversorgung hier mit zwei Solarpanelen. Das Seismometer steht an der südwestlichen Außenmauer, die Solarpanele und die GPS Antenne sind südwestseitig an der Außenwand ausgerichtet. Die Kabeldurchführung erfolgt durch eine alte Stalltür. Eine Datenübertragung in Echtzeit ist prinzipiell möglich, aufgrund des erhöhten Stromverbrauchs verzichteten wir bei Betrieb mit Solarpaneelen aber darauf und zeichneten die Daten nur lokal im Rekorder auf.



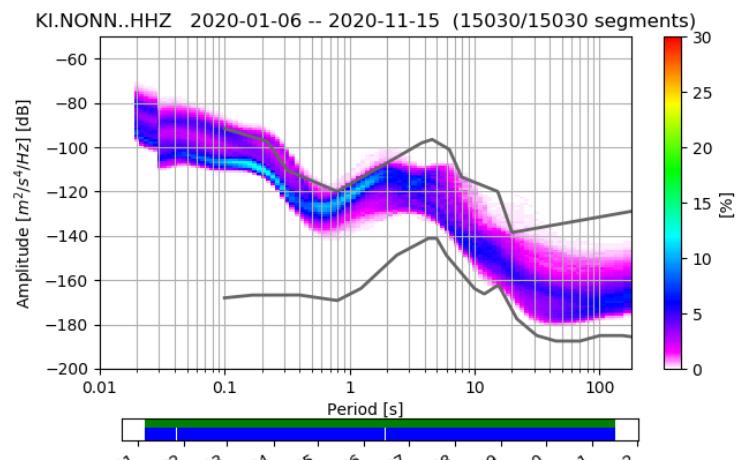
Abbildung 6: Installation im ehemaligen Rinderstall von Schloss Ludwigsburg.

Nonnendorf Am 18.9.2019 konnten wir im Agrarhof Nonnendorf einen weiteren Teststandort in der Nähe von Lubmin in Betrieb nehmen. Das Instrument steht in einem leerstehenden, ehemaligen Bürogebäude des Hofgeländes und die Daten werden per LTE Modem in Echtzeit nach Kiel übertragen. Der Agrarhof selbst ist in Betrieb und daher sind die aufgezeichneten Wellenformen vor allem in den Tagstunden von Signalen des Landmaschinenbetriebs gestört. Nichtsdestotrotz zeigen die PPSD, dass der Standort auf dem Agrarhof insgesamt doch vergleichsweise gut geeignet ist als Ergänzung des lokalen Netzes um Lubmin.



(a) Aussenansicht

(b) Innenansicht



(c) PPSD

Abbildung 7: Installation im ehemaligen Bürogebäude des Agrarhofs Nonnendorf.

Greifswalder Oie Mit Unterstützung des Vereins Jordsand, welcher auf der Greifswalder Oie den Inselhof betreibt, erhielten wir die Erlaubnis, im Keller des Inselhofes ein Seismometer zu installieren. Beim Ortstermin Ende Juli 2019 stellte sich heraus, daß im Keller keine dauerhafte Stromversorgung zur Verfügung steht, so daß eine Installation zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war. In Absprache mit der Stationsleitung haben wir die Aufstellung von Solarpanelen im hinteren Gartenbereich des Hauses vereinbart, um eine autarke Stromversorgung für das Seismometer einzurichten. Dies konnte im Oktober 2019 erfolgen (Abb. 8).

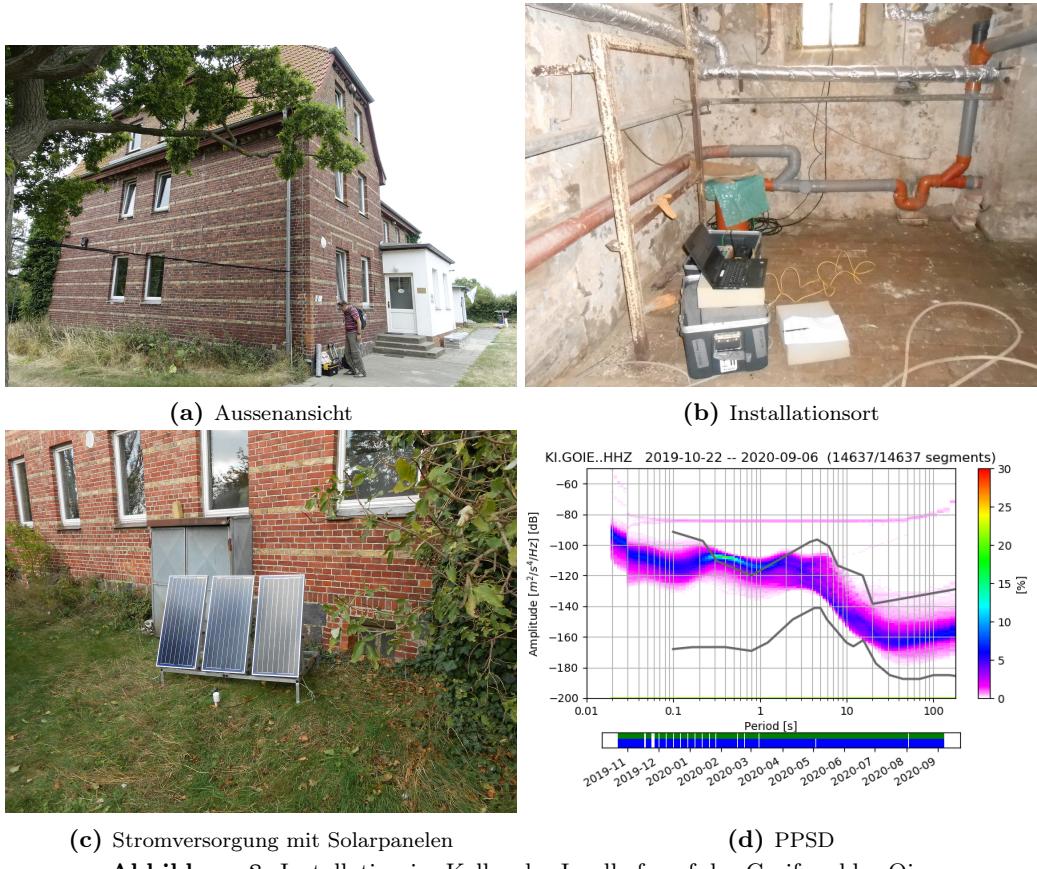


Abbildung 8: Installation im Keller des Inselhofes auf der Greifswalder Oie.

2.3 Auswertung der Testmessungen

Die Standortqualität einer seismologischen Station lässt sich durch das Amplitudenspektrum der kontinuierlich aufgezeichneten Wellenform und dessen zeitlichem Verhalten bewerten. Hierbei werden für die kontinuierlichen Daten in Zeitfenstern von 1 h Leistungsspektren der jeweiligen Wellenform berechnet und das Ensemble der erhaltenen Spektren über die Spektrendichte dargestellt. Die Abbildungen 3 - 8 zeigen jeweils das Leistungsdichtespektrum (engl. "probabilistic power spectral densities" (PPSD)) der Vertikalkomponente. Hierbei ist die Häufigkeit des Vorkommens eines bestimmten Leistungspegels als Funktion der Frequenz farbkodiert. Somit lässt sich das Rauschniveau an einer Station generell charakterisieren. Die beiden eingezeichneten grauen Kurven sind globale Referenzkurven für seismologische Stationen mit sehr niedrigem (engl. "New Low Noise Model" (NLNM)) und hohem ("New High Noise Model" (NHNM)) Rauschniveau (Peterson [1993]). Je niedriger das generelle Rauschniveau, desto besser sind die Standortbedingungen.

Für die Überwachung lokaler Seismizität ist vor allem der Periodenbereich von etwa 0.05 bis 1 s (Frequenzbereich 1 - 20 Hz) relevant, da schwache seismische Ereignisse den Grossteil ihrer Energie in seismische Wellen dieser Frequenzen freisetzen. Generell sind in diesem Frequenzbereich vor allem anthropogen verursachtes Rauschen zu beobachten, weshalb ein ruhiger Standort mit Abstand zu verkehrlicher und wirtschaftlicher Infrastruktur grundsätzlich zu erstreben ist. Andererseits müssen bei der Standortauswahl auch logistische und administrative Aspekte berücksichtigt werden, welche einen langfristigen Betrieb einer seismologischen Station ermöglichen.

2.3.1 Standortwahl Raum Marlow

Vogelpark Marlow Die Lokation der Testinstallation am Vogelpark liegt etwa 400 m von der nächsten Kreisstrasse entfernt und ausser den Bewirtschaftungsaktivitäten des Vogelparks selbst fernab sonstiger Verkehre. Die Testinstallation in Marlow zeichnet sich durch einen relativ hohen Rauschpegel unterhalb von 2 s Periode aus (Abb. 3d). Unterhalb von etwa 0.5 s Periode bildet die PPSD zwei Äste aus, was ein Anzeichen für Tag-Nacht-Variationen ist. Dies ist auf die Aktivität auf dem Wirtschaftshof des Vogelparks zurückzuführen. Als weitere Ursache für das relative hohe Rauschniveau muss die Installation der Teststation selbst berücksichtigt werden. Das Gebäude ist "nur" auf dem lockeren Quartärsandboden aufgesetzt und besitzt kein eigenes Fundament. Dadurch ist die Ankopplung an den Untergrund reduziert. Für die Testmessung ist dieses Vorgehen dennoch hilfreich, da eine Verbesserung der Rauschbedingungen allein dadurch erreicht werden kann, dass eine langfristige Installation des Seismometers in einem ausgehobenen Schacht, oder besser in einem Bohrloch erfolgen sollte. Entsprechend wird die Datenqualität am Standort Vogelpark als gut bewertet. Hinzu kommen sehr günstige logistische und administrative Randbedingungen durch die Unterstützung des Vogelparks selbst, welcher der Einrichtung eines Bohrlochs für eine Seismometerinstallation positiv gegenübersteht.

Schule Gresenhorst Nach der planmässigen Deinstallation der Teststation im Vogelpark konnte mit Unterstützung der Gemeinde Marlow eine weitere Testmessung in der leerstehenden Schule in Gresenhorst, etwa 10 km westlich von Marlow eingerichtet werden (Abb. 4). Die PPSD weist einen ähnlichen Charakter wie am Standort Marlow auf, mit einem hohen Rauschniveau bei Frequenzen oberhalb von 2 Hz. Dies ist zum einen auf Verkehr entlang der nur etwa 150 m entfernten Ortsdurchfahrt und die umliegenden Kreisstrassen zurückzuführen. Zum anderen ist die Testinstallation im Kriechkeller durch mässige Ankopplung an den Untergrund und starken Luftzug beeinträchtigt. Wie in Marlow liesse sich somit der hochfrequente Rauschpegel durch das Verbauen des Seismometers in einem Schacht oder Bohrloch grundsätzlich verbessern. In Gresenhorst sind allerdings die Rahmenbedingungen unklarer, da das Schulgelände mittelfristig wieder instandgesetzt und in Betrieb genommen werden soll.

Fazit Die Datenqualität an den Standorten Marlow und Gresenhorst ist anhand der erhobenen Testdaten zunächst ähnlich zu bewerten. Der Einfluss von verkehrlichen Störfaktoren ist am Standort Gresenhorst etwas stärker ausgeprägt und könnte sich bei einer zukünftigen Wiederaufnahme des Schulbetriebs weiter erhöhen. Am Standort Marlow ist auf dem Gelände des Vogelparks ein langfristiger Abstand zu externen Einflüssen, v.a. der Kreisstrassen sichergestellt. Zudem ist die Einrichtung eines Bohrloches auf dem Parkgelände für eine langfristige Installation möglich, was die Aufzeichnungsbedingungen gerade im hochfrequenten Bereich deutlich verbessern sollte. Eine langfristige Installation soll daher in Marlow umgestzt werden. Erste Schritte hierzu werden in Kapitel 3.1.1 dargestellt.

2.3.2 Standortwahl Raum Lubmin

Peenemünde Das ehemalige Kraftwerksgebäude auf dem Gelände des HTM Peenemünde besitzt aufgrund seiner enormen Dimension auch ein massives Fundament, welches eine hohe Ankopplung des Gebäudes an den Untergrund gewährleistet. Insofern ist es nicht überraschend, dass die PPSD (Abb. 5d) bei Frequenzen oberhalb von 2 Hz deutlich unterhalb des NNM liegt. Zwei Zweige im hochfrequenten Bereich deuten auch hier auf Tag-Nacht-Variationen hin, was sich v.a. durch Bautätigkeiten an dem denkmalgeschützten Gebäude erklären lässt. Hinzu kommen auch Einflüsse des Schiffsverkehrs am nur etwa 100 m entfernten Anleger von Peenemünde. Da der durch anthropogene Aktivitäten beeinflusste Zeitraum weniger als ein Drittel der kontinuierlichen Datenerfassung betrifft (8 h werktags, Sonn- und Feiertage typischerweise ruhig), ist das generelle Rauschniveau durch den niedrigen Pegel nachts als sehr gut zu bewerten. Aufgrund der sehr guten Ankopplung des Gebäudes an den Untergrund würde eine Bohrlochinstallation an diesem Standort keine signifikante Verbesserung der Datenqualität erwarten lassen.

Ludwigsburg Der ehemalige Rinderstall des Schlosses Ludwigsburg ist ein denkmalgeschützter, sanierungsbedürftiges Gebäude, welches nicht öffentlich zugänglich ist. Da auch kein Strom zur Verfügung steht, wurde die Testinstallation mit Solarpanelen realisiert. Dies ist in den Sommermonaten praktikabel, für einen Betrieb im Winter wäre eine grössere Anlage als die verwendete (Abb. 6) nötig. Die PPSD ist bei hohen Frequenzen ähnlich wie in Peenemünde, wobei die Schwankungen bei Frequenzen oberhalb von 2 Hz hier vor allem auf Luftzug in dem offenen Rinderstall zurückzuführen ist, welche das freistehende Seismometer anregt. Insofern ist der Standort grundsätzlich als gut einzustufen, allerdings ist eine dauerhafte Installation in einem Bohrloch auf dem Gelände schwierig. Zum einen sind die Eigentumsverhältnisse des Schlossgeländes "in Bewegung", zum anderen sind umfangreiche Sanierungsmassnahmen geplant, welche zu langfristigen Einschränkungen eines Betriebs führen würden.

Nonnendorf Der Standort auf dem Agrarhof bei Nonnendorf liegt zwar direkt an der wenig befahrenen Zufahrtsstrasse nach Nonnendorf, aber rund 1 km von der belebten Kreisstrasse zwischen Rubenow und Wusterhusen, einer Nebenstrecke zwischen Wolgast und Greifswald. Die PPSD (Abb. 7) zeigen auch hier bei hohen Frequenzen zwei Äste, welche auf den werktäglichen Betrieb auf dem Agrarhof zurückzuführen ist. Die Nachbedingungen sind akzeptabel und zum Teil auf Einflüsse der Installation innerhalb des Bürogebäudes zurückzuführen. Das Gebäude ist nicht unterkellert und daher nur mässig an den Untergrund angekoppelt. Eine Bohrlochinstallation sollte die Datenqualität hinreichend verbessern, inwieweit dies auf dem Gelände des Agrarhofs möglich wäre, ist offen.

Greifswalder Oie Die Greifswalder Oie ist eine als Naturschutzgebiet ausgewiesene Insel ca 15 km nordöstlich von Peenemünde. Sie ist auch als "Vogelinsel" bekannt und wird vom Verein *Jordsand zum Schutz der Seevögel und der Natur e. V.* betreut. Neben der biologischen Station des Vereins betreibt die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) den Leuchtturm und die Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger (DGzRS) eine Rettungsstation.

Die Datenqualität an der Testinstallation im Keller der biologischen Station ist aufgrund des hohen Rauschniveaus bei Frequenzen zwischen 1 und 5 Hz zunächst überraschend. Dies ist allerdings durch den nur etwa 200 m entfernten Dieselgenerator zu erklären, welcher vom WSV v.a. zur Stromversorgung des Leuchtturms betrieben wird. Abgesehen davon gibt es auf der Insel keine weiteren nennenswerten Störquellen, weshalb die Insel, nicht zuletzt auch wegen ihrer Lage abseits des Festlandes ein interessanter Standort ist. Für eine langfristige Installation sollte eine Installation in einem Schacht oder Bohrloch in der Nähe des Leuchtturms angedacht werden. Dieser ist über 1,2 km von dem Generator entfernt und die seismologische Aufzeichnung sollte dort von diesem nicht mehr allzu stark beeinflusst werden. Kombiniert mit einer Bohrung in idealerweise kretazische Ablagerungen unterhalb des Quartärs könnte die Signalqualität deutlich verbessern.

Fazit Die vier getesteten Standorte im Raum Lubmin sind aufgrund der Datenqualität grundsätzlich alle für eine langfristige Einrichtung einer seismologischen Station geeignet. Die logistisch, administrativ einfachste Umsetzung ist in Peenemünde möglich, dort hat bereits die Testinstallation im Keller des Kraftwerksgebäudes eine sehr gute Datenqualität. An den Standorten Nonnendorf, Ludwigsburg und Greifswalder Oie wäre eine Installation in einem Schacht oder Bohrloch zu empfehlen, wobei eine Anbindung an das Stromnetz in allen Fällen geprüft werden muss.

3 Status Stationsnetz 2020

Das seismologische Stationsnetz umfasst zu Beginn des Jahres 2021 in Mecklenburg-Vorpommern drei permanente und vier temporäre Installationen (Abb. 2). Die Permanentstationen werden von der BGR (Hannover) bzw. dem GFZ Potsdam betrieben, die temporären Stationen vom IfG im Rahmen der Kooperation mit dem LUNG.

3.1 Permanent-Stationen

Seit 1995 betreibt das GFZ Potsdam im Rahmen seines globalen seismologischen Überwachungsnetzes GEOFON (GEOFON [2000]) eine Station auf Rügen in einer ehemaligen Bunkeranlage bei Neuenkirchen (Abb. 9). Die BGR (Hannover) installierte im Rahmen des Deutschen Regionalen Seismischen Netzes (GRSN) zwei weitere Stationen in MV, zum einen in Zarrentin (Lkr. Ludwigslust-Parchim) im Keller des dortigen Bürgerbüros (in Betrieb seit 2011, Abb. 10), zum anderen in Löcknitz (Lkr. Ludwigslust-Parchim) in einer alten Bunkeranlage (Abb. 11).

Die Daten dieser drei Stationen gehen in die routinemässige Auswertung u.a. des Erdbebendienstes des Bundes an der BGR ein, sind aber frei verfügbar und somit auch von anderen Institutionen ohne Einschränkung nutzbar.

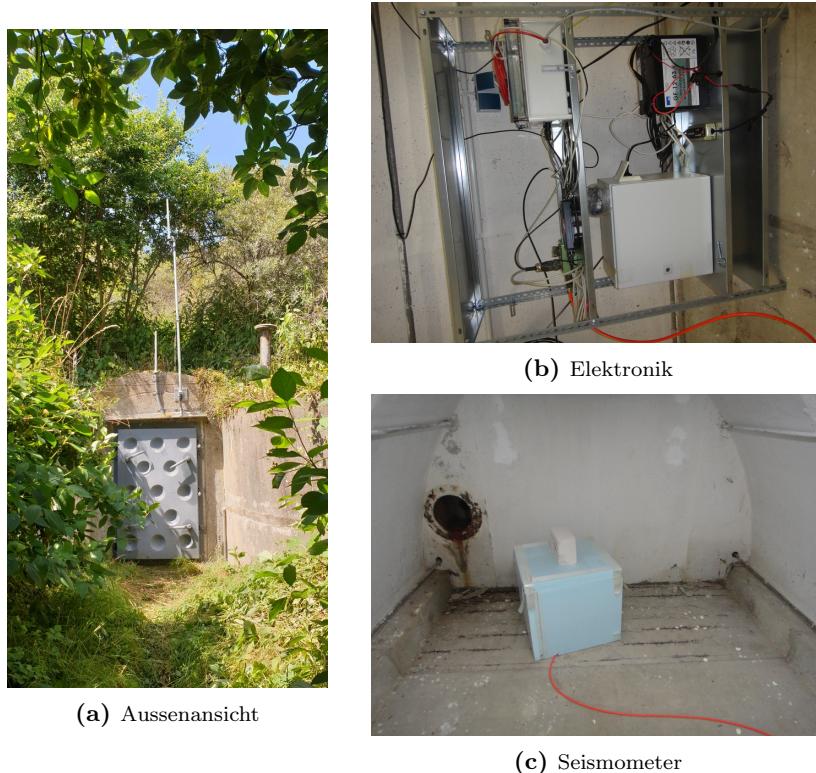


Abbildung 9: Eindrücke der Station Rügen (RGN), betrieben vom GFZ Potsdam (Fotos: T. Zieke (GFZ)).



(a) Aussenansicht

(b) Innenansicht

Abbildung 10: Eindrücke der Station Zarrentin (ZARR), betrieben von der BGR (Fotos: E. Wetzig(BGR)).



(a) Aussenansicht

(b) Innenansicht

Abbildung 11: Eindrücke der Station Löcknitz (LNIZ), betrieben von der BGR (Fotos: E. Wetzig(BGR)).

3.1.1 Ausbau des Stationsnetzes

Die BGR hat im Jahr 2020, in enger Koordination mit dem IfG, die Einrichtung zweier Bohrlöcher in Kühlungsborn und Schillersdorf vorgenommen. Die Instrumentierung steht noch aus, soll aber im Jahr 2021 erfolgen.

Aufgrund der in Kapitel 2 vorgestellten Vorarbeiten zur Kooperation IfG - LUNG, konnten unmittelbar nach Projektbeginn für die beiden Untersuchungsräume Marlow und Lubmin jeweils ein Standort identifiziert werden, welcher langfristig als seismologische Station genutzt werden soll. Trotz der pandemiebedingten Einschränkungen im Jahr 2020 konnte die Einrichtung der beiden Standorte wesentlich vorangetrieben werden.

Raum Marlow

In Marlow wurde hierzu im Sommer 2020, unmittelbar nach Beginn der formellen Kooperation IfG - LUNG, zwischen der CAU Kiel und dem Vogelpark Marlow eine Gestattungsvereinbarung geschlossen, welche die Einrichtung und den Betrieb einer seismologischen Station auf dem Parkgelände formell regelt. Entsprechend wurde umgehend die Bohrung eines 30 m tiefen Bohrlochs auf dem Gelände des Vogelparks beauftragt, welches im November 2020 fertiggestellt wurde. Für die Instrumentierung von langfristigen Installationen

arbeiten das IfG und die BGR seit vielen Jahren bereits im Zusammenhang mit dem Stationsausbau in Schleswig-Holstein erfolgreich zusammen. Entsprechend soll an der Station Marlow unter Verantwortung der CAU ein Seismometer samt Aufzeichnungseinheit und Datenübertragung von der BGR installiert werden. Dies ist aus zweierlei Hinsicht vorteilhaft, da zum einen eine Instrumentierung aus aktuellen Projektmitteln der Kooperation nicht realisierbar wäre, zum anderen sichert die Kooperation mit der BGR auch den langfristigen Betrieb der Station unabhängig von zusätzlichen Investitionen seitens des IfG oder des LUNG.

Trotz der pandemiebedingten Einschränkungen wird die Inbetriebnahme der Station voraussichtlich im ersten Halbjahr 2021 erfolgen.

Raum Lubmin

Im Raum Lubmin erschien der Standort im HTM Peenemünde als sinnvollste und am schnellsten zu realisierende Option unter den getesteten Standorten. Die aktuell noch vorhandene Testinstallation im Keller des Kraftwerkgebäudes kann im Wesentlichen in dieser Form als langfristige Station erhalten bleiben. Hierzu wurde zwischen dem HTM und der CAU eine Gestattungsvereinbarung geschlossen, welche den dauerhaften Betrieb einer seismologischen Station gewährleistet. Auch in Peenemünde soll die Instrumentierung durch Geräte der BGR getauscht werden, voraussichtlich ebenfalls im ersten Halbjahr 2021.

Die aktuell noch laufenden Messungen an den Standorten Nonnendorf und Greifswalder Oie sollen bis auf weiteres fortgeführt und auf eine eventuelle Verstetigung geprüft werden. Die Station Greifswalder Oie erfordert gegenwärtig wegen der autarken Stromversorgung, der lokalen Registrierung ohne Datenübertragung und der isolierten Lage - die Insel ist nur in den Sommermonaten mit öffentlichem Schiffsverkehr zu erreichen - einen relativ hohen Wartungsaufwand. Dieser könnte bereits durch die Einrichtung einer Echtzeitdatenübertragung deutlich reduziert werden, da nicht nur die Daten, sondern auch der Status der Installation kontinuierlich übermittelt würden und so eine Wartung bedarfs- und zielgerichtet erfolgen kann.

4 Auswertung Datenzentrum

Neben dem Ausbau des seismologischen Stationsnetzes ist die Erfassung und Auswertung der seismologischen Daten das zweite wesentliche Element, um die seismologische Überwachung von Mecklenburg-Vorpommern zu verbessern.

Hierzu betreibt das IfG ein lokales Echtzeit-Monitoring System zur Erdbebenüberwachung. Als Software kommt *seiscomp* zum Einsatz (GFZ Potsdam and Gempa GmbH [2008]), welches vorwiegend am GFZ Potsdam entwickelt wurde, mittlerweile aber von vielen, v.a. europäischen Datenzentren routinemäig zur Datenerfassung und Detektion von seismischen Ereignissen verwendet wird. Das System ist für jeden Einsatzzweck individuell konfigurierbar und wurde am IfG für die Erfassung seismologischer Echtzeitdaten aus Norddeutschland und angrenzenden Gebieten optimiert. Hierzu gehört auch die Optimierung der Detektionsalgorithmen für Ereignisse in derselben Region.

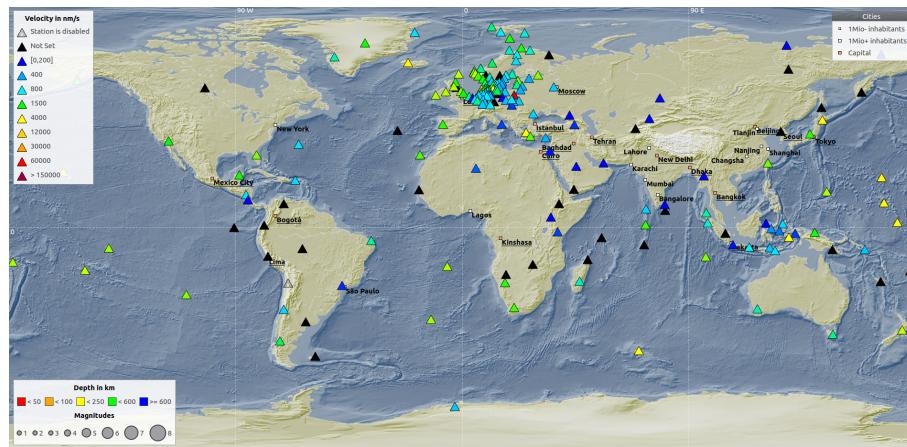
Das System wird bereits seit 2019 routinemäig für die Auswertung seismischer Ereignisse in Norddeutschland genutzt und erfasst aktuell Daten von 213 Stationen weltweit in (naher) Echtzeit (Abb. 12a).

Den aktuellen Status visualisiert der integrierte Datenmonitor (Abb. 12b). Die Dreiecke markieren die konfigurierten Stationen wobei Wellenformdaten der farbigen Stationen in Echtzeit erfasst werden, bei schwarzen Dreiecken liegen aktuell keine Echtzeitdaten vor. Die Farbe gibt dabei den aktuellen Pegel des Rauschens (mittlere Amplitude der Wellenform) an der jeweiligen Station an und ist somit zugleich ein Hilfsmittel zur Qualitätskontrolle der eingehenden Daten (Legende in Abb. 12b).

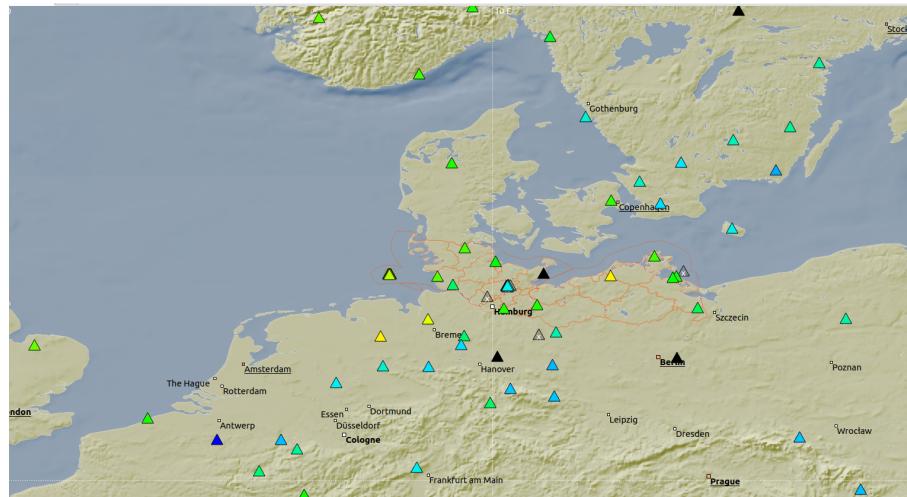
Eine Erfassung der global verteilten Daten ist wichtig und nützlich, um telesismische Ereignisse, welche regional in MV detektierbar sind, als Fernbeben zu identifizieren und näherungsweise ein Hypozentrum zu bestimmen. Mit einem regionalen Netz allein könnten viele solcher Ereignisse fälschlicherweise innerhalb des Netzes lokalisiert werden. Es werden somit eine Vielzahl von unnötigen Fehldetections innerhalb des Netzes vermieden.

Die Notwendigkeit hierfür wird deutlich, wenn man die Anzahl der in einem Jahr mit dem Seiscomp-System detektierten seismischen Ereignisse berücksichtigt. Insgesamt 1783 Ereignisse wurden im Laufe des Jahres 2020 detektiert und lokalisiert, der weit überwiegende Anteil davon sind telesismische Ereignisse mit Magnituden > 4.5 (siehe Abb. 13).

Neben der Nutzung von frei verfügbaren Wellenformen, übrigens seit langem ein Standard in der globalen Seismologie, konnte ein bilateraler Datenaustausch mit den Datenzentren in Dänemark (GEUS, Kopenhagen) und Schweden (Swedish National Seismic Network, Uppsala) vereinbart werden. Speziell in Südschweden können wir auf sieben seismische Stationen in Echtzeit zugreifen, welche über internationale Datenzentren nicht zur Verfügung gestellt werden. Dies stärkt die Überwachung im südwestlichen Ostseeraum und auch Mecklenburg-Vorpommern erheblich (siehe auch Kapitel 5).



(a) globale Ansicht



(b) regionale Ansicht

Abbildung 12: Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen.

CAU global detections 2020

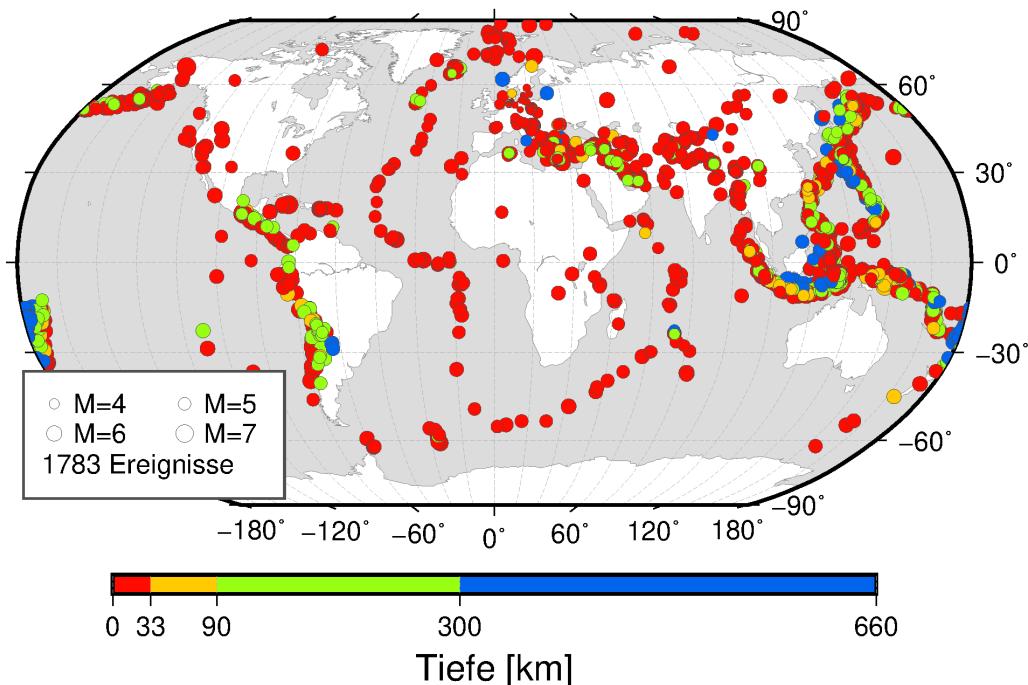


Abbildung 13: Verteilung aller in 2020 am IfG im seiscomp-System detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5 , welche vollautomatisch vom seiscomp-System prozessiert wurden.

Das IfG betreibt aktuell 4 temporäre Seismometer in Mecklenburg-Vorpommern, davon sind 3 online angebunden und gehen in die routinemässige Auswertung mit ein. Um die selbst erhobenen Daten langfristig referenzierbar und auch im internationalen Austausch nutzbar machen zu können, wurde bei der "Federation of Digital Seismic Networks" (FDSN) ein exklusiver Netzwerkcode für die vom IfG, auch im Rahmen der Kooperation mit dem LUNG, betriebenen Stationen beantragt. Durch einen von der FDSN zugewiesenen Netzwerkcode, können die Metadaten der erhobenen Wellenformen mit einer global eindeutigen Stationskennung gezeichnet werden. Im Rahmen des seiscomp-Systems können die selbst erhobenen Daten nun über eine global standardisierte Schnittstelle anderen einfach zugänglich gemacht werden. Dariüberhinaus wird mit dem Netzwerkcode ein "digital object identifier" (DOI) zugeteilt, welcher bei Datennutzung durch Dritte als Referenz für den Datenbereitsteller einfach genutzt werden kann. Das erhöht die Anerkennung der Netzwerkbetreiber, welche Daten öffentlich bereitstellen, wie es in der Seismologie unabdinglich ist.

Das seiscomp-System wurde im Herbst 2020 auf die aktuelle Version 4 aktualisiert. Das Upgrade von der ursprünglich genutzten Version seiscomp3 auf seiscomp4 enthielt signifikante softwareseitige Änderungen, u.a. die Umstellung von der Programmiersprache Python2, welche seit Januar 2020 nicht mehr offiziell unterstützt wird, auf Python3.

Für den internen Gebrauch wurde ein automatisiertes "Alert"-System eingerichtet, welches bei der automatischen Detektion von Ereignissen eine email an Mitarbeiter des IfG versendet. Diese email wird für alle Ereignisse global mit Magnituden grösser 6, für regionale Ereignisse bis zu 27° Epizentraldistanz und Magnituden grösser 5, und alle Ereignisse in einer Epizentraldistanz kleiner gleich 11° ausgelöst. Bei Ereignissen im Umkreis von weniger als 8° Epizentraldistanz, verschickt das System auch SMS-Textnachrichten. Im Jahr 2020 wurden so etwa 170 "alert"-emails und etwa 25 SMS Nachrichten versendet, u.a. für das Magnitude 3.5 Ereignis in der Nordsee vor Jütland (Dänemark) am 30.9.2020 (siehe Kapitel 5).

Manuelle Auswertung Aufgrund der nach wie vor relativ geringen Stationsdichte in MV und Umgebung werden die meisten, im folgenden Kapitel ausführlich diskutierten Ereignisse durch die Automatik nicht erfasst. Grund hierfür ist, daß die Ereignisse im Allgemeinen zu schwach sind, um an mindestens vier Stationen vom Algorithmus detektiert werden zu können. Um die Detektionsschwelle zu senken, wurde ein auf den in Echtzeit erfassten Wellenformdaten basierendes, separates Prozessing aufgesetzt, welches Übersichtsdarstellungen der 24 h Wellenformen aller Permanentstationen in MV erstellt. Dabei werden mit einem separaten, für Mecklenburg-Vorpommern angepassten Detektionsalgorithmus mögliche seismische Ereignisse markiert. Diese tageweisen Übersichtsdarstellungen erleichtern die manuelle Durchsicht der Wellenformdaten und ermöglichen eine manuelle Betrachtung aller Wellenformdaten mit vertretbarem zeitlichem Aufwand. Wird in der manuellen Durchsicht ein mögliches Ereignis erkannt, wird es im seiscomp-System unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Wellenformen manuell ausgewertet und in den eigenen Ereigniskatalog aufgenommen.

5 Ereignisübersicht 2020

5.1 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. Das *European-Mediterranean Seismological Centre* (EMSC) ist eine internationale, nicht-Regierungs- und nicht-profitorientierte Organisation, welche unter anderem Erdbebenkataloge aller relevanten europäischen seismologischen Organisationen abgleicht und vereinheitlicht. Der EMSC-Katalog ist daher geeignet, die regionale seismische Aktivität im Umkreis von einigen 100 km um Mecklenburg-Vorpommern abzubilden, welche ggf. von unterschiedlichen nationalen Agenturen (v.a. in Deutschland, Dänemark, Schweden, Polen) detektiert und lokalisiert wurden.

Abb. 14 zeigt diesen Katalog für das Jahr 2020 in dem dargestellten Kartenausschnitt. In der westlichen Nordsee, vor der Küste Jütlands gab es am 30. September 2020 ein Erdbeben der Magnitude 3.5. Solche Ereignisse sind in der Nordsee nicht unüblich, werden aber nur selten von der Bevölkerung an Land wahrgenommen. Im Mai und Juli 2020 gab es zwei stärkere Ereignisse im Bereich der Gasfelder um Groningen (NL), welche zumindest auf Helgoland deutlich messbar waren. Das Ereignis vom 17. Dezember 2020 im Landkreis Diepholz (NDS) mit Magnitude 2.4 steht vermutlich ebenfalls in Zusammenhang mit der Erdgasförderung in der Region und ist durch seine Nähe für die westlichen Landesteile MVs nicht unerheblich.

EMSC Katalog 2020.01.01 – 2020.12.31

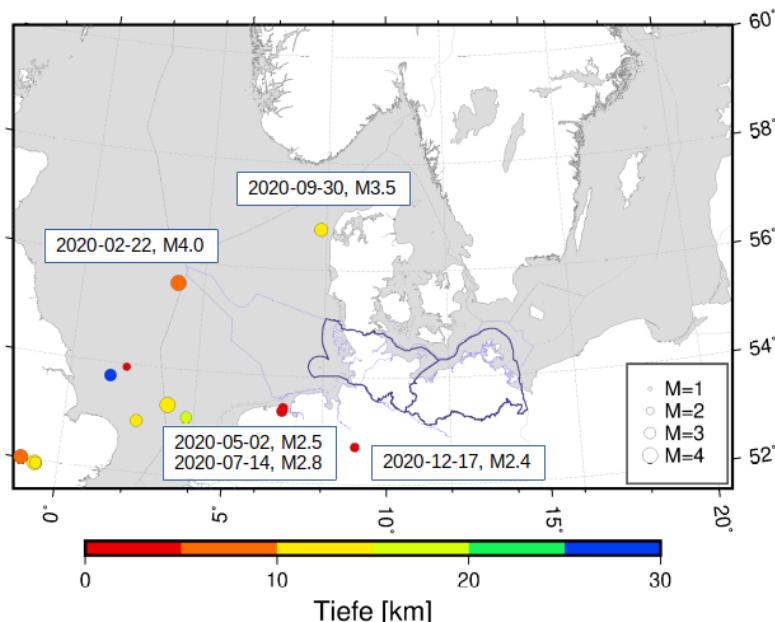


Abbildung 14: Ereignisse um Mecklenburg-Vorpommern im Jahr 2020, Quelle: EMSC [2021]. Landesgrenzen von SH und MV sind dunkelblau, AWZ Grenzen in Nord- und Ostsee blau gezeichnet.

Das Ereignis vom 20. Februar 2020 mit Magnitude 4 in der zentralen Nordsee ist zwar über 300 km vom Festland entfernt, aber dennoch von genereller Bedeutung, da es im Grenzbereich der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) auftrat (s. Abb. 14). Die AWZ, auch 200-Meilen-Zone genannt, ist das Seengebiet, in dem der angrenzende Staat „souveräne Rechte und Hoheitsbefugnisse wahrnehmen“ kann (Wikipedia [2021]). Obgleich die AWZ eine Angelegenheit des Bundes ist, so ist deren Überwachung v.a. ein Anliegen der Länder SH, NDS (Nordsee) und MV (Ostsee) und wird daher im Rahmen der routinemässigen Auswertung am IfG berücksichtigt.

| Herdzeit (UTC) | Länge (Ost) | Breite (Nord) | Tiefe (km) | Magnitude |
|-----------------------------|-------------|---------------|------------|-----------|
| 2020-02-01T01:19:39.000000Z | 3.16 | 53.31 | 10 | 4.0 |
| 2020-02-22T18:42:57.700000Z | 3.14 | 55.60 | 5 | 4.0 |
| 2020-03-27T03:25:29.400000Z | 3.77 | 53.11 | 19 | 2.9 |
| 2020-04-04T15:28:17.000000Z | -1.13 | 52.01 | 5 | 3.7 |
| 2020-04-23T05:30:47.200000Z | 2.24 | 52.96 | 10 | 3.2 |
| 2020-05-02T03:13:15.000000Z | 6.77 | 53.40 | 3 | 2.5 |
| 2020-06-01T07:23:34.000000Z | 1.76 | 53.94 | 0 | 2.0 |
| 2020-07-14T15:18:47.000000Z | 6.74 | 53.34 | 3 | 2.8 |
| 2020-07-29T23:15:55.600000Z | 3.99 | 60.94 | 19 | 3.2 |
| 2020-09-30T04:57:34.200000Z | 7.80 | 56.76 | 10 | 3.5 |
| 2020-10-16T05:42:24.000000Z | 3.28 | 61.64 | 15 | 3.0 |
| 2020-12-17T04:11:01.800000Z | 9.03 | 52.70 | 3 | 2.4 |
| 2020-12-20T21:13:24.700000Z | 1.28 | 53.75 | 40 | 3.1 |

Tabelle 1: Erdbeben im Jahr 2020 in der Umgebung von Mecklenburg-Vorpommern, Quelle: EMSC [2021].

5.2 Seismische Ereignisse in MV

Neben der automatischen Detektion im Seiscomp-System erfolgt eine manuelle Durchsicht der Wellenformen nach potentiellen Ereignissen (siehe Abschnitt 4). Dies ist nach wie vor unabdingbar, da die Stationsdichte für eine zuverlässige automatische Detektion schwacher Ereignisse mit Magnituden unter 2 bei weitem nicht ausreicht. Tabelle 2 und Abbildung 15 fassen den Katalog des Jahres 2020 zusammen. Die Herdtiefe eines Ereignisses kann nur bei sehr guter Datenabdeckung präzise bestimmt werden und wurde daher in den meisten Fällen bei der Lokalisierung fixiert.

CAU Bulletin 2020 categorical

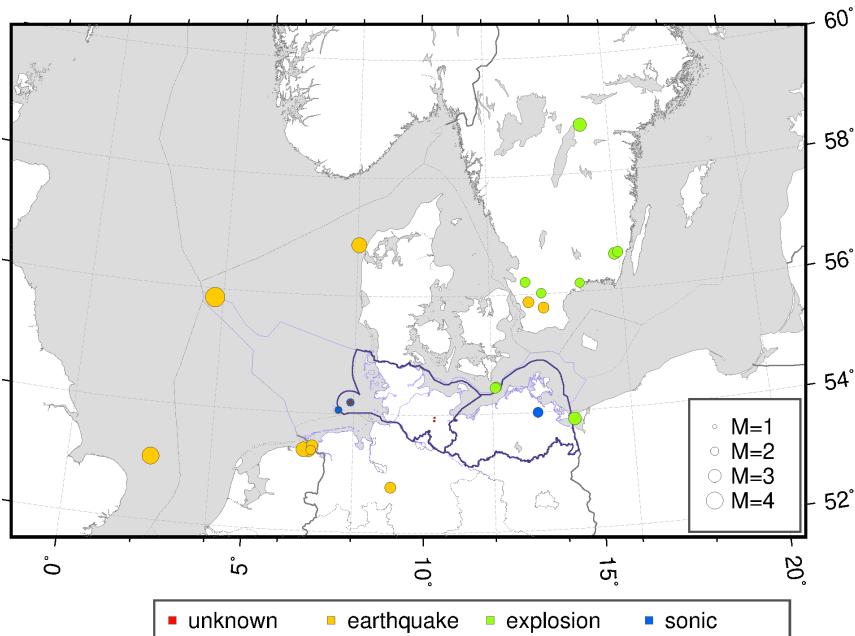


Abbildung 15: Übersichtskarte der in 2020 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp.

In MV gab es im Jahr 2020 keine seismischen Ereignisse welche auf natürliche Ursachen zurückzuführen wären. Der Katalog der seismischen Ereignisse 2020 des IfG weicht aber dennoch vom EMSC Katalog durch einige, v.a. Sprengereignisse in der südwestlichen Ostsee und in Südschweden ab. Durch die zusätzlichen Stationen in Südschweden werden auch vereinzelt Ereignisse in dieser Region automatisch detektiert (s. Kapitel 4).

Besonders nennenswert sind die beiden Sprengungen in der Kadetrinne bei Rostock am 25. und 27. November 2020 und die Sprengung am 13. Oktober 2020 in Swinemünde an der deutsch-polnischen Grenze. Bei allen drei Sprengungen handelt es sich um Kampfmittelvernichtung, wobei in der Kadetrinne nach Medienberichten je etwa 425 kg, in Swinemünde etwa 2500 kg Sprengstoff gezündet wurden. Entsprechend unterscheiden sich die, v.a. mit Stationen in MV bestimmten Lokalmagnituden von 2.5 (Kadetrinne) und 3.0 (Swinemünde).

Die Sprengungen in der Kadetrinne konnten in MV an der Station GRES, v.a. aber an Stationen in SH und Dänemark gut identifiziert werden (Abb. 16). Typisch für schwache bis moderate Ereignisse in Norddeutschland ist auch, dass relativ nahe gelegene Stationen die Wellenformen häufig nicht abbilden - das Ereignis ist weder auf Rügen, noch in Nonnendorf oder Peenemünde sichtbar - dafür ist es in grösseren Epizentraldistanzen in Skandinavien wieder deutlich zu erkennen (Station DEL, Delary in Südschweden, ca 250 km Epizentralentfernung). Dies liegt zuvorderst an den regionalen, geologischen Bedingungen. In Skandinavien sind seismologische Stationen auf anstehendem Festgestein installiert, was ein grundsätzlich geringeres Rauschniveau mit sich bringt. Sedimentären Gebiete, dazu zählt auch das Norddeutsche Becken, haben aufgrund der niedrigen seismischen Geschwindigkeiten in den Sedimenten ein generell erhöhtes Rauschniveau. Dies hat zur Folge, dass die geologischen Rahmenbedingungen für die seismische Überwachung in Norddeutschland besonders herausfordernd sind.

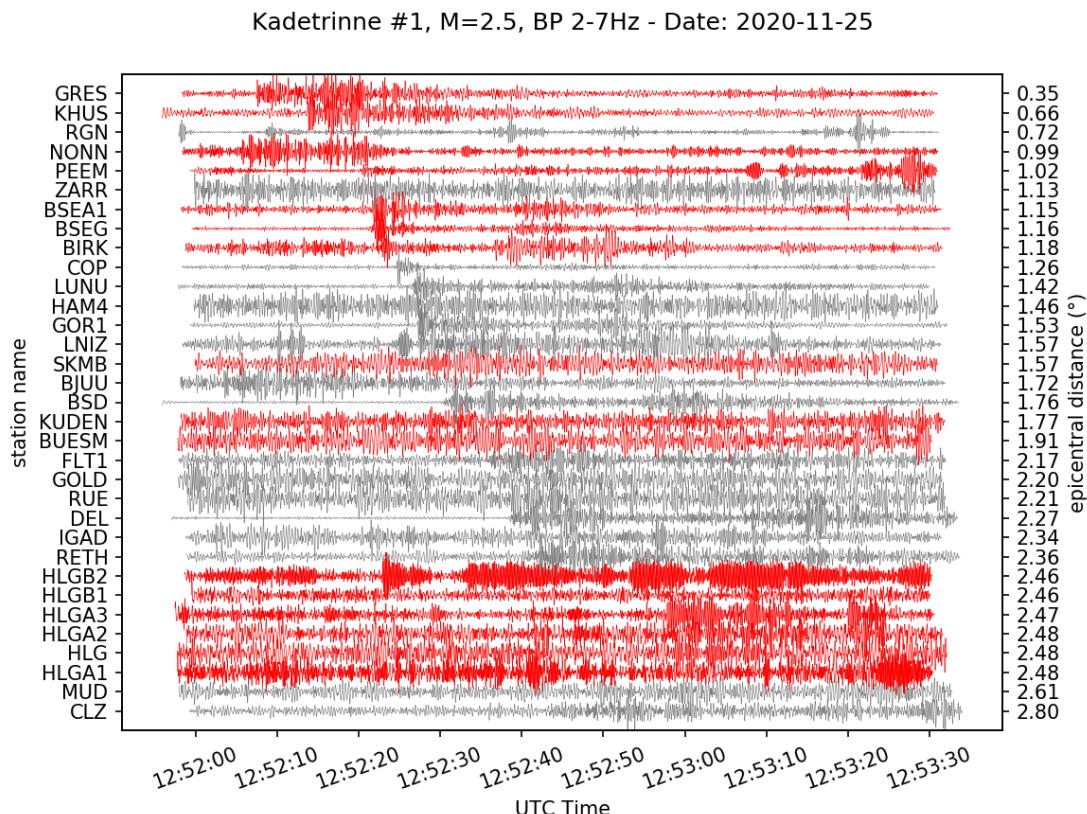


Abbildung 16: Wellenformsektion der Sprengung in der Kadetrinne am 25.11.2020 um 12:52 UTC. Rote Spuren sind Stationen in MV und SH, graue Spuren andere. Neben der Station Gresenhörst (GRES) ist das Ereignis in SH (Stationen KHUS, BSEA1, BSEG, BIRK), Dänemark (COP, BSD) und Schweden (LUNU, DEL) gut zu erkennen.

Das Ereignis von Swinemünde ist für die seismische Überwachung in MV ein Glücksfall. Zum einen ist es das erste bedeutsame Ereignis seit Etablierung der Testinstallationen durch das IfG in MV, zum anderen kann es aufgrund der genau bekannten Quelllokation

als Referenzereignis für weitere Auswertungen genutzt werden. Zunächst einmal war das Ereignis an den nächstgelegenen Stationen in Löcknitz und Peenemünde, beide weniger als 50 km entfernt sehr deutlich zu messen (Abb. 17). Interessant ist dementgegen, dass das Ereignis in Nonnendorf und auf Rügen, nur wenige Kilometer weiter nicht mehr eindeutig zu erkennen ist. Auf Bornholm ca 150 km nördlich von Swinemünde ist das Ereignis sehr deutlich zu sehen, ein weiterer Beleg für die oben angesprochene Problematik der generell schwierigen Aufzeichnungsbedingungen in Norddeutschland. An keiner Station im norddeutschen Becken ist das Ereignis klar erkennbar (z.B. GRES, RUE, ZARR, BSEG, HAM4), erst an der Station Falkenstein (FALKS) am Nordostrand des Harzes kann das Ereignis in den Wellenformen wieder identifiziert werden. Ansonsten ist das Ereignis in der Sektion von Abb. 17 generell in Südschweden in bis zu 600 km Entfernung (LUNU, BLEU, DEL, OSKU, ONAU, VIKU, STRU) gut zu erkennen.

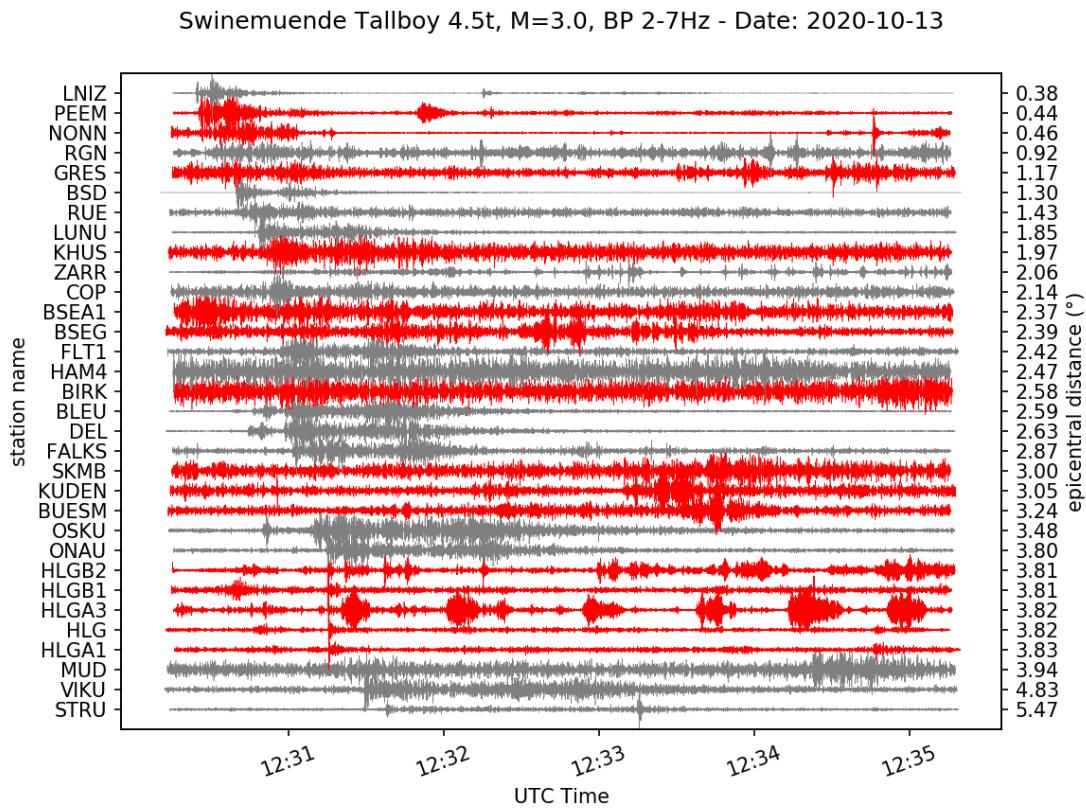


Abbildung 17: Wellenformsektion der Sprengung in Swinemünde am 13.10.2020 um 12:30 UTC. Rote Spuren sind Stationen in MV und SH, graue Spuren andere. Bemerkenswert sind die impulsartigen Einsätze an den Stationen auf Helgoland (HLG*, Epizentraldistanz $3,8^\circ$) zur Zeit 12:31:15. Im Epizentralbereich von ca. $2,6^\circ$ ist an den Stationen BLEU und DEL in Südschweden ein weiteres, schwaches Sprengungsergebnis in einem schwedischen Steinbruch als Vorläufer zu den grössten Amplituden der Wellenform erkennen.

Die gezeigten Beispiele unterstreichen die Wichtigkeit eines möglichst dichten seismologischen Überwachungsnetzes vor allem in Gebieten mit stark sedimentärer Geologie. Nur durch ein dichtes Netz mit Stationsabständen von maximal etwa 50 km können schwache lokale seismische Ereignisse mit Magnituden unter 2,5 zuverlässig detektiert und lokalisiert werden. Darüberhinaus verdeutlichen die Beispiele die Wichtigkeit der Berücksichtigung von seismologischen Stationen in den Nachbar(bundes)ländern.

Am 8. Dezember 2020 konnte an den Stationen Nonnendorf und Peenemünde ein kohärentes Signal beobachtet werden, welches aber nicht genau lokalisiert werden konnte. Aufgrund der Signalcharakteristik und der Differenz in der Ankunftszeit der Welle an den beiden Stationen handelt es sich dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein akustisches Signal. Neben einem möglichen Sprengereignis kommen für solche Signale auch Überschallflüge als mögliche Ursache in Betracht.

Tabelle 2: Seismische Ereignisse im Jahr 2020 in Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung, detektiert und bearbeitet am IfG. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

| Herdzeit (UTC) | Breite (Nord) | Länge (Ost) | Tiefe (km) | Magnitude | Region | Typ |
|---------------------|---------------|-------------|------------|-----------|-----------------|--------------------|
| 2020-01-01 19:36:00 | 55.7669 | 13.6175 | 1.7 | 2.6 | Sweden | earthquake |
| 2020-01-13 12:18:54 | 56.5992 | 15.8771 | 4.8 | 2.8 | Sweden | explosion |
| 2020-01-27 18:01:12 | 58.8142 | 15.1189 | 0.0 | 3.1 | Sweden | explosion |
| 2020-02-22 18:43:01 | 55.8474 | 3.7398 | 3.0 | 4.6 | North Sea | earthquake |
| 2020-02-24 13:10:37 | 56.6223 | 15.9816 | 0.0 | 2.5 | Sweden | explosion |
| 2020-02-28 11:42:53 | 56.0108 | 13.5716 | 2.4 | 2.3 | Sweden | explosion |
| 2020-03-04 11:12:18 | 56.2075 | 13.0976 | 1.7 | 2.4 | Sweden | explosion |
| 2020-03-22 19:33:13 | 53.4475 | 6.8410 | 99.5 | 2.7 | The Netherlands | earthquake |
| 2020-04-23 05:30:46 | 53.0740 | 2.3195 | 10.0 | 4.0 | North Sea | earthquake |
| 2020-05-02 03:13:15 | 53.3811 | 6.7461 | 10.0 | 3.5 | The Netherlands | induced earthquake |
| 2020-05-15 04:57:35 | 53.9014 | 10.3189 | 0.0 | 0.5 | Germany | rock burst |
| 2020-05-21 12:44:04 | 54.2000 | 7.9000 | 0.0 | 0.5 | North Sea | sonic boom |
| 2020-06-08 05:23:45 | 54.0655 | 7.5618 | 0.0 | 1.3 | North Sea | sonic boom |
| 2020-06-10 03:40:55 | 54.0655 | 7.5618 | 0.0 | 1.7 | North Sea | sonic boom |
| 2020-06-23 02:23:30 | 54.2000 | 7.9000 | 10.0 | 1.0 | North Sea | not locatable |
| 2020-06-23 22:44:34 | 53.9536 | 10.3272 | 10.0 | 0.4 | Germany | rock burst |
| 2020-07-14 15:18:46 | 53.3783 | 6.6047 | 3.0 | 3.5 | The Netherlands | induced earthquake |
| 2020-07-19 02:07:54 | 53.3728 | 6.8121 | 5.0 | 2.3 | The Netherlands | earthquake |
| 2020-09-01 22:07:00 | 54.2000 | 7.9000 | 0.0 | 1.2 | North Sea | explosion |
| 2020-09-27 07:37:34 | 55.8699 | 13.1720 | 10.6 | 2.6 | Sweden | earthquake |
| 2020-09-30 04:57:37 | 56.8619 | 8.0387 | 55.5 | 3.6 | Denmark | earthquake |
| 2020-10-13 12:30:15 | 53.8628 | 14.3475 | 0.0 | 3.0 | Poland | explosion |
| 2020-10-13 12:30:25 | 56.1491 | 14.7500 | 0.0 | 2.2 | Sweden | explosion |

Tabelle 2: Tektonische Ereignisse im Jahr 2020 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 |
|---------------------|------------------|------------------|------------|-----------|-----------|-------------|
| 2020-10-17 16:17:51 | 54.2000 | 7.9000 | 10.0 | 1.0 | North Sea | sonic boom |
| 2020-11-06 20:55:58 | 54.2000 | 7.9000 | 10.0 | 1.0 | North Sea | sonic boom |
| 2020-11-09 08:42:53 | 54.2000 | 7.9000 | 10.0 | 1.1 | North Sea | sonic boom |
| 2020-11-09 13:25:41 | 54.2000 | 7.9000 | 10.0 | 1.0 | North Sea | sonic boom |
| 2020-11-25 12:52:00 | 54.4404 | 12.0975 | 0.0 | 2.5 | Germany | explosion |
| 2020-11-27 10:07:07 | 54.4518 | 12.1223 | 0.0 | 2.5 | Germany | explosion |
| 2020-12-08 17:27:46 | 54.0000 | 13.3000 | 20.0 | 2.4 | Germany | sonic blast |
| 2020-12-17 04:11:02 | 52.7695 | 9.0797 | 8.7 | 2.6 | Germany | earthquake |
| 2020-12-30 13:27:11 | 54.2000 | 7.9000 | 0.0 | 1.8 | North Sea | sonic blast |

6 Zusammenfassung

Der Norden Deutschlands ist allgemein eine seismisch ruhige Region, obwohl spürbare und auch schadensbringende Ereignisse historisch dokumentiert sind und seit den 1970er Jahren auch instrumentell erfasst werden. In Mecklenburg-Vorpommern erfasst und bewertet der Geologischen Dienst am LUNG M-V seismische Ereignisse in M-V und dem angrenzenden südlichen Ostseeraum. Grossräumige Störungssysteme sind im Landesgebiet zwar gut bekannt, aufgrund der grossflächigen Überdeckung mit quartären Lockersedimenten ist die aktuelle tektonische Aktivität dieser Störungen aber nicht systematisch feststellbar.

Die Erfassung von Geogefahren ist lt. Geologiedatengesetz vom Geologischen Dienst als zuständiger Fachbehörde vorzunehmen und schliesst in M-V insbesondere die Bewertung aktiver Störungszonen, u.a. zur Beurteilung der Standortsicherheit kerntechnischer Anlagen und im Zuge der Endlagersuche für radioaktive Abfälle, sowie die Erfassung und Ortung von Rutschungen und Küstenabbrüchen ein. Eine flächendeckende seismische Überwachung von M-V und der südlichen Ostsee ist mit der bestehenden seismologischen Infrastruktur allerdings nur begrenzt möglich.

Um die seismologische Überwachung in M-V grundsätzlich zu verbessern wurde im Sommer 2020 eine Kooperationsvereinbarung zwischen dem Geologischen Dienst am LUNG-MV und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel geschlossen. Die bereits 2019 vom IfG aufgenommenen Vorarbeiten zur Verdichtung des bestehenden seismologischen Überwachungsnetzes ermöglichten schon zu Projektbeginn im Sommer 2020 die Festlegung auf je einen neuen Standort im Raum Marlow und im Raum Lubmin. Mit den jeweiligen Eigentümern konnten Gestattungsvereinbarungen geschlossen werden, welche einen langfristigen Betrieb an diesen Standorten erlauben. Am Standort Marlow wurde im Rahmen des Projekts ein Bohrloch erstellt, in dem zeitnah die seismologische Datenerfassung aufgenommen werden soll. An beiden Standorten unterstützt die BGR die neuen Installationen durch ihre Infrastruktur. Darüberhinaus plant die BGR selbst die Installation von zwei weiteren Seismometern in M-V.

Neben dem Ausbau der seismologischen Infrastruktur wurde am IfG die Erfassung und Auswertung der seismologischen Daten aus M-V eingerichtet. Zusätzlich zu der weitgehend automatisierten Datenerfassung und -archivierung werden die Wellenformdaten aus M-V manuell nach schwachen Ereignissen ausgewertet. Für das Jahr 2020 wurden so erstmals lokale seismische Ereignisse in Mecklenburg-Vorpommern detektiert, lokalisiert und in einem Ereigniskatalog für M-V zusammengestellt. Die Detektion und Lokalisierung dieser Ereignisse profitiert dabei bereits von den aktuell noch temporären lokalen Stationen.

6.1 Ausblick

Die beobachteten Sprengungsergebnisse verdeutlichen, dass die Wartung und der weitere Ausbau der seismologischen Infrastruktur, sowie die kontinuierliche Auswertung der erhobenen Registrierungen unerlässlich sind, um die seismologische Überwachung von M-V nachhaltig zu verbessern. Hierbei sind sowohl die generelle, flächendeckende Überwachung im gesamten Landesgebiet, als auch die höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens von seismischen Ereignissen im Nordosten von M-V zu berücksichtigen. Letztere begründet sich in den weitreichenden Störungssystemen in der südwestlichen Ostsee, deren tektonische Aktivität aber weitgehend unbekannt ist. Hierzu wurde durch die Instrumentierung in der Region Lubmin lokal bereits eine Verbesserung erzielt.

Darüberhinaus sind aber auch lokale, nicht-tektonische Prozesse, wie bspw. Kliffabbrüche und Rutschungen im Bereich der Rügener Steilküste (z.B. Dietze et al. [2020]), als seismische Ereignisse zu berücksichtigen. Solche Ereignisse können allerdings nur durch ein lokales Überwachungsnetz beobachtet werden. Um diese vielfältigen Aspekte der seismischen Überwachung praktikabel erfüllen zu können, wird neben dem Weiterbetrieb des lokalen Netzes um Lubmin die Installation eines seismischen Arrays auf Rügen empfohlen.

Ein seismisches Array, bestehend aus mehreren Seismometern in einem Gebiet von wenigen Quadratkilometern, erlaubt einerseits die lokale Überwachung von seismischen Ereignissen, kann andererseits aber auch schwache bis moderate, regionale seismische Ereignisse zuverlässig detektieren und lokalisieren. Somit können auch nicht-instrumentierte Gebiete im Umkreis von mehreren hundert Kilometern zuverlässig überwacht werden. Am IfG wird dieses Verfahren bereits für den südöstlichen Nordseeraum erfolgreich eingesetzt. Abb. 18 zeigt das Helgoland-Array, bestehend aus 6 Seismometern auf einer Fläche von ca. 2,5 x 2 km². Mit diesem Array können Ereignisse wie das beispielhaft gezeigte Ereignis von Groningen/Niederlande (Magnitude 3.2), zuverlässig detektiert und lokalisiert werden.

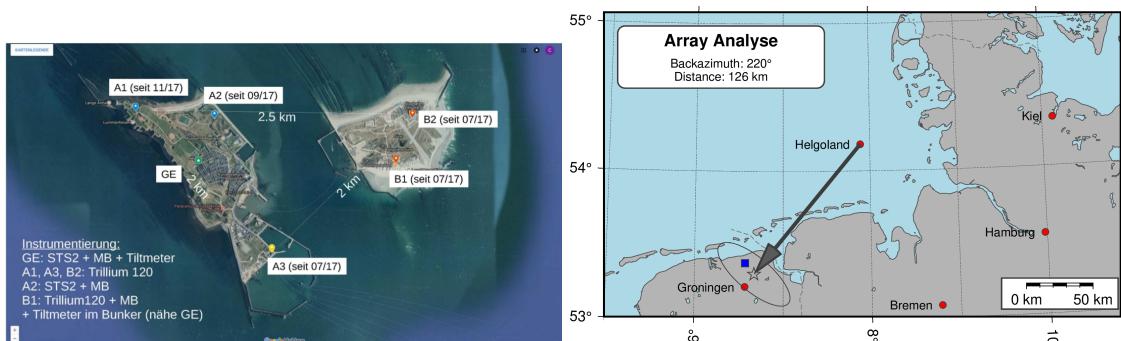


Abbildung 18: Beispiel für die Lokalisierung von regionalen seismischen Ereignissen mit einem seismischen Array. (links) Karte des Helgoland Arrays, (rechts) Lokalisierung eines Ereignisses bei Groningen mit Array-Analyse (Sternsymbol) im Vergleich zum Epizentrum laut EMSC Katalog (blaues Quadrat, EMSC [2021]). Die angegebene Fehlerellipse ist empirisch geschätzt.

Neben der Einrichtung eines "Rügen-Arrays" wird eine mittelfristige Verstärkung der Station Greifswalder Oie empfohlen. Durch die exponierte Lage, fernab von anthropogenen Störeinflüssen bietet die Ostseeinsel einen idealen Standort um die seismologische Überwachung der südlichen Ostsee mit hoher Datenqualität langfristig zu verbessern. Eine hohe Datenqualität könnte v.a. durch eine Bohrlochinstallation in wenigen 10er Metern Tiefe, unter dem Quartär in kretazischen Ablagerungen, erreicht werden. Im Südwesten von M-V soll ein Ausbau der seismologischen Infrastruktur um den Salzstock Werle - ein untersuchungswürdiges Teilgebiet für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle lt. BGE [2020] - durch Testmessungen geprüft werden.

Zur Bewertung der historischen Seismizität im südwestlichen Ostseeraum wird in Deutschland regelmäßig der sog. "Leydecker-Katalog" (nach Leydecker [2011]) verwendet. In den Nachbarländern Dänemark und Schweden werden hingegen eigene historische Erdbebenkataloge geführt. Alle genannten Kataloge haben gemein, dass der südwestliche Ostseeraum jeweils in Randlage der betrachteten Regionen liegt und die Kataloge daher im Übergangsbereich nur teilweise konsistent sind. Um die Einschätzung des seismischen Gefährdungspotentials für M-V im Umfeld der südwestlichen Ostsee zu verbessern, ist ein Austausch mit den Nachbarländern erforderlich, um eine einheitliche Bewertung der historisch aufgezeichneten Erdbeben zu erreichen.

Die Kooperation zwischen Geologischem Dienst und IfG hat im Jahr 2020 - trotz pandemiebedingter Einschränkungen - bereits grosse Fortschritte in der seismischen Überwachung von M-V ermöglicht. In der aktuellen Projektphase liegt der Schwerpunkt auf dem Ausbau des seismologischen Stationsnetzes und dem Aufbau einer regelmässigen Auswertung seismischer Ereignisse am IfG. Basierend auf dem Bericht und dem Stand der laufenden Arbeiten werden die Schwerpunkte der Kooperation für die kommende Projektphase ab 2022 zusammen mit dem Geologischen Dienst festgelegt und in dem Arbeitsplan zur Verlängerung des Kooperationsvertrags festgehalten.

Literatur

- BGE. Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, 2020. URL <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>.
- M. Dietze, K. L. Cook, L. Illien, O. Rach, S. Puffpaff, I. Stodian, and N. Hovius. Impact of nested moisture cycles on coastal chalk cliff failure revealed by multiseasonal seismic and topographic surveys. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(8), aug 2020. doi: 10.1029/2019jf005487.
- EMSC. European-Mediterranean Seismological Centre, 2021. URL <https://www.emsc-csem.org>.
- GEOFON. Erdbebeninformationen des GEOFON Programms des GeoForschungsZentrums Potsdam, 2000. URL <https://geofon.gfz-potsdam.de>.
- GFZ Potsdam and Gempa GmbH. The SeisComP seismological software package, 2008. URL <http://www.seiscomp.de>. Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH.
- G. Grünthal, D. Stromeyer, K. Wylegalla, R. Kind, R. Wahlström, X. Yuan, and Bock. Die Erdbeben mit Momentmagnituden von 3,1-4,7 in Mecklenburg-Vorpommern und im Kaliningrader Gebiet in den Jahren. *Z. geol. Wiss.*, 35(1/2):63–86, 2007.
- G. Leydecker. Erdbebenkatalog fuer Deutschland mit Randgebieten fuer die Jahre 800 - 2008 (Earthquake catalogue for Germany and adjacent areas for the years 800 to. *Geologisches Jahrbuch*, E 59, 2011.
- J. Peterson. Observations and Modeling of Seismic Background Noise. Technical Report 93-322, USGS, Albuquerque, New Mexico, 1993.
- P. H. Voss, T. B. Larsen, L. Ottemöller, and S. Gregersen. Earthquake in southern Sweden wakes up Denmark on 16 December 2008. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 17:9–12, 2009.
- Wikipedia. Ausschließliche Wirtschaftszone, 2021. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Ausschlie%C3%9Fliche_Wirtschaftszone.
- J. Woessner, D. Laurentiu, D. Giardini, H. Crowley, F. Cotton, G. Grünthal, G. Valensise, R. Arvidsson, R. Basili, M. B. Demircioglu, S. Hiemer, C. Meletti, R. W. Musson, A. N. Rovida, K. Sesetyan, and M. Stucchi. The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(12):3553–3596, jul 2015. doi: 10.1007/s10518-015-9795-1.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Seismische Ereignisse im Norddeutschland und angrenzenden Regionen nach Leydecker [2011]. Instrumentell erfasste Ereignisse (blau, rot) werden von historisch, makroseismisch erfassten (gelb, grün) unterschieden. | 3 |
| 2 | Übersichtskarte existierender und geplanter seismologischer Stationen in MV und Umgebung | 4 |
| 3 | Installation im Wirtschaftsbereich des Vogelparks Marlow. | 6 |
| 4 | Installation im Kriechkeller der ehemaligen Grundschule Gresenhorst. | 7 |
| 5 | Installation im Keller des HTM Peenemünde. | 8 |
| 6 | Installation im ehemaligen Rinderstall von Schloss Ludwigsburg. | 9 |
| 7 | Installation im ehemaligen Bürogebäude des Agrarhofs Nonnendorf. | 10 |
| 8 | Installation im Keller des Inselhofs auf der Greifswalder Oie. | 11 |
| 9 | Eindrücke der Station Rügen (RGN), betrieben vom GFZ Potsdam (Fotos: T. Zieke (GFZ)). | 16 |
| 10 | Eindrücke der Station Zarrentin (ZARR), betrieben von der BGR (Fotos: E. Wetzig(BGR)). | 17 |
| 11 | Eindrücke der Station Löcknitz (LNIZ), betrieben von der BGR (Fotos: E. Wetzig(BGR)). | 17 |
| 12 | Stationskarte der in der automatischen Echtzeit-Überwachung verwendeten Stationen. | 20 |
| 13 | Verteilung aller in 2020 am IfG im seiscomp-System detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5, welche vollautomatisch vom seiscomp-System prozessiert wurden. | 21 |
| 14 | Ereignisse um Mecklenburg-Vorpommern im Jahr 2020, Quelle: EMSC [2021]. Landesgrenzen von SH und MV sind dunkelblau, AWZ Grenzen in Nord- und Ostsee blau gezeichnet. | 23 |
| 15 | Übersichtskarte der in 2020 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung. Farblich markiert ist der vom Analysten bestimmte Quelltyp. | 25 |
| 16 | Wellenformsektion der Sprengung in der Kadetrinne am 25.11.2020 um 12:52 UTC. Rote Spuren sind Stationen in MV und SH, graue Spuren andere. Neben der Station Gresenhorst (GRES) ist das Ereignis in SH (Stationen KHUS, BSEA1, BSEG, BIRK), Dänemark (COP, BSD) und Schweden (LNU, DEL) gut zu erkennen. | 26 |

| | | |
|----|--|----|
| 17 | Wellenformsektion der Sprengung in Swinemünde am 13.10.2020 um 12:30 UTC. Rote Spuren sind Stationen in MV und SH, graue Spuren andere. Bemerkenswert sind die impulsartigen Einsätze an den Stationen auf Helgoland (HLG*, Epizentraldistanz $3,8^\circ$) zur Zeit 12:31:15. Im Epizentralbereich von ca. $2,6^\circ$ ist an den Stationen BLEU und DEL in Südschweden ein weiteres, schwaches Sprengungsereignis in einem schwedischen Steinbruch als Vorläufer zu den grössten Amplituden der Wellenform erkennen. | 27 |
| 18 | Beispiel für die Lokalisierung von regionalen seismischen Ereignissen mit einem seismischen Array. (links) Karte des Helgoland Arrays, (rechts) Lokalisierung eines Ereignisses bei Groningen mit Array-Analyse (Sternsymbol) im Vergleich zum Epizentrum laut EMSC Katalog (blaues Quadrat, EMSC [2021]). Die angegebene Fehlerellipse ist empirisch geschätzt. | 32 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Signifikante Erdbeben im Jahr 2020 (EMSC) | 24 |
| 2 | Seismische Ereignisse in Mecklenburg-Vorpommern und Umgebung (IfG) . . | 29 |