

DMT GmbH & Co. KG**Civil & Mining Engineering**Geo Field Services &
Data ManagementAm TÜV 1
45307 Essen / Deutschland**Seismologisches Gutachten**

Zur Prognose der Einwirkung auf die seismologische Erdbeben-
messstation Kahler Asten (KAST) durch den Zubau von Wind-
energieanlagen

Sitz der Gesellschaft
DMT GmbH & Co. KG
Am TÜV 1
45307 Essen / Deutschland

Tel.: +49 201 172-01
Fax: +49 201 172-1462

Geschäftsführung:
DMT Verwaltungsgesellschaft mbH, Essen
Amtsgericht Essen HRB 20420
Vertreten durch die Geschäftsführer:
Dr. Maik Tiedemann (Vorsitzender)
Jens-Peter Lux

Vorsitzender des Aufsichtsrates:
Jürgen Himmelsbach

Amtsgericht Essen
HRA 9091



Bericht-Nr.	CME1-2024-76			
Datum	19.03.2024			
Anzahl Seiten	34			
Anlagen	-			
Aufgabenstellung	Gutachten zur Prognose der Einwirkung auf die seismologische Erdbebenmessstation Kahler Asten (KAST) durch den Zubau von Windenergieanlagen			
Auftraggeber	Grünwerke GmbH Flingern Süd Höherweg 200 40233 Düsseldorf			
Verfasser	Lorenz Marten			
Mitverfasser	Dr. Tobias Neuffer			
Weitere Verfasser	-			
Messzeiträume	29.03.2021 – 08.04.2021 01.02.2023 – 01.02.2024			
Messpersonal	Peter Meurer, Tobias Neuffer			
Dateiname	76_Gutachten Windenergie.pdf			
Revisionsübersicht	Version	Datum	Ersetzt Vers.	Beschreibung
	1.0	19.03.2024	-	Ersterstellung

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	4
2. Einleitung	5
3. Erdbebenmessstation Kahler Asten (KAST)	8
3.1 Standort	8
3.2 Status Quo der Rauschbelastung der Station KAST	11
3.3 Erdbebendetektionsfähigkeit Status Quo der Station KAST	13
4. Prognose der Einwirkung	17
4.1 Messung	17
4.2 Bestimmung des Quellsignals	20
4.3 Amplitudenabnahmebeziehungen	23
4.4 Prognose der Einwirkungen durch den Betrieb von zusätzlichen WEA	25
4.4.1 Szenario 1: Zubau von drei WEA	25
4.4.2 Szenario 2: Zubau von acht WEA	27
4.5 Erdbebendetektionsfähigkeit der Station KAST nach Zubau der WEA	28
5. Zusammenfassung	31
6. Empfehlungen / Ausblick	32
7. Literatur	33

1. Aufgabenstellung

Die Firma Grünwerke GmbH plant den Bau von drei Windenergieanlagen (WEA) in der Gemarkung Gellinghausen in einem Abstand von etwa 4,2 km zur Erdbebenmessstation Kahler Asten (KAST). Die Station KAST ist Teil des deutschen seismologischen Regionalnetzes der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und wird von der Universität Münster betrieben. Im Regionalplan Arnsberg ist für die Station KAST ein Ausschlussradius für Windenergiebereiche von 5 km vorgesehen. Bei den geplanten WEA handelt es sich um Anlagen vom Typ Vestas V150 mit einer Nabenhöhe von 169 m, einem Rotordurchmesser von 150 m und einer Nennleistung von 6,0 MW.

Inhalt dieser gutachterlichen Stellungnahme ist die Überprüfung einer Einschränkung der Leistungsfähigkeit der seismologischen Messstation. Hierzu wird zunächst das aktuelle Rauschniveau (Status Quo) an der Messstation KAST ermittelt und die daraus folgende Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Aufzeichnungsqualität von seismischen Ereignissen bewertet. Daraufgehend wird eine Prognose der zusätzlich an der Messstation zu erwartenden Rauschbelastung vorgenommen. Grundlage für die Prognose ist die Messung an zwei WEA des gleichen Typs zur Ermittlung einer Quellfunktion, die im März/April 2021 in Kröppen (Rheinland-Pfalz) durchgeführt worden ist, sowie die Verwendung von Amplitudenabnahmebeziehungen aus Literatur und weiteren Messungen. Die Ergebnisse der Prognose können so für den hier zu begutachtenden Fall verwendet werden. Abschließend wird eine Beurteilung der möglichen Störwirkung durch den Betrieb der geplanten WEA auf die Messstation KAST und daraus abgeleiteter möglicher Einschränkungen vorgenommen. Da durch die Firma ABO Wind AG im selben Windpark fünf weitere WEA des gleichen Typs geplant sind, werden zwei Szenarien betrachtet: Zum einen ein Windpark bestehend aus den drei von der Grünwerke GmbH geplanten WEA, zum anderen ein Windpark bestehend aus den insgesamt acht geplanten WEA.

2. Einleitung

In den letzten Jahren begannen Seismologinnen und Seismologen über negative Einflüsse durch den Betrieb von WEA auf die Standortqualität von seismologischen Stationen zu berichten (Schofield, 2001; Styles et al., 2005; Stammer & Ceranna 2016). Die Standortqualität einer seismologischen Messstation hängt stark vom Hintergrundrauschen ab, die Stationsstandorte werden daher vorzugsweise in abgelegenen Gebieten gewählt. Dieselben Standorte sind oft gut für Windkraftanlagen geeignet. Als Folge entstand ein Konflikt zwischen Seismologen und den Betreibenden von WEA, was zu einer erheblichen Verzögerung beim Ausbau von WEA führte. Die Betreibenden von seismologischen Messnetzen berichten, dass die erzeugten Vibrationen von Windturbinen von seismologischen Stationen aufgezeichnet und damit die Funktionalität und Aufgabenerfüllung ganzer seismischer Messnetze beeinträchtigen können. Der verantwortliche Mechanismus wird beschrieben als die Übertragung von durch den Wind erzeugten Schwingungen über den Turm und das Fundament in den Untergrund (Abbildung 1). Der dominierende Typ der sich ausbreitenden Wellen der erzeugten Vibrationen sind Oberflächenwellen in Form von Rayleigh- und Love-Wellen (Gasenmeier et al., 2014; Neuffer & Kremers, 2017; Westwood & Styles, 2017; Neuffer et al., 2021). Die erzeugten seismischen Wellen werden an seismologischen Messstationen aufgezeichnet und erzeugen dort eine Erhöhung des Rauschlevels.

Die an einer seismologischen Messstation vorherrschende Rauschbelastung ist grundsätzlich von einer Vielzahl von Parametern abhängig, zu nennen sind beispielsweise der Abstand zu Siedlungen, Straßen, Gewässern, Wald oder dem Schienenverkehr. Die Höhe des Hintergrundrauschens oder die Standortqualität einer seismologischen Messstation ist entscheidend für die Detektionsgrenze kleinster Erdbeben, also für die untere Grenze der Größe eines Erdbebens ab der es an einer bestimmten Entfernung gelegenen Messstation (automatisch) erkannt werden kann. Aus wissenschaftlicher Sicht liegt diese Grenze möglichst niedrig, sie ist in der Anwendung jedoch immer verbunden mit einer konkreten Aufgabenstellung. Hierbei ist anzumerken, dass eine einzelne Messstation (mit Ausnahme einer Messstation zur Beweissicherung in Gebäuden nach DIN 4150) keine eigenständige Funktionsbeschreibung besitzt, sondern diese immer für ein seismologisches Messnetz definiert ist. Das ist darin begründet, dass zur Detektion und Lokalisierung von Erdbeben immer mindestens drei (besser vier) Messstationen benötigt werden. Da sich die Standortqualitäten jeder seismologischen Messstation eines Messnetzes naturgemäß unterscheiden und zudem zeitlichen Variationen (tages- und jahreszeitlichen Schwankungen) unterliegen, ist eine Angabe von Grenzwerten im Hinblick auf die Standortqualität einzelner Messstationen zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe (z.B. Detektion aller Erdbeben ab einer Magnitude von $M_L = 1,0$) nicht möglich. Betrachtet werden muss hier immer die Funktionsweise des gesamten Messnetzes. Hieraus wird direkt ersichtlich, dass eine Verschlechterung der Standortqualität an einer einzelnen Messstation allein nicht zwangsläufig zu einer unzulässigen Störung im Hinblick auf die Aufgabenbeschreibung des gesamten Messnetzes führt.

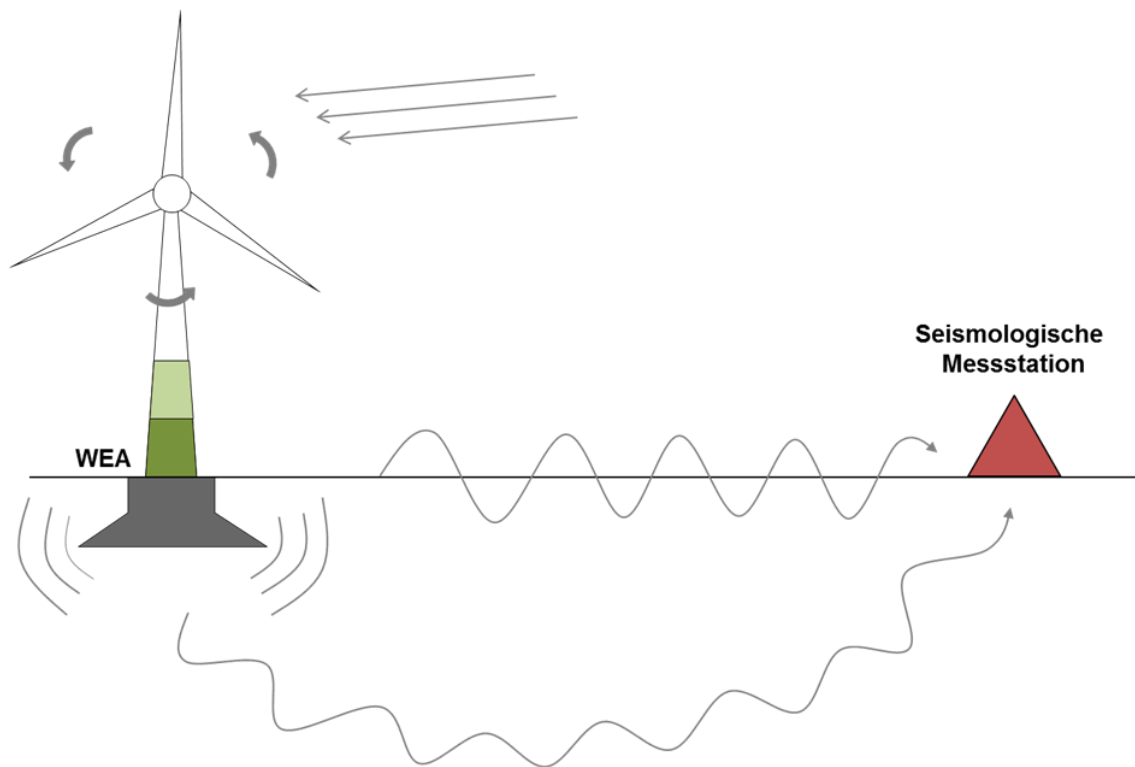


Abbildung 1: Skizze der Problemstellung beim Betrieb von WEA in der Nähe seismologischer Messstationen. Die Schwingungen der WEA koppeln über das Fundament in den Untergrund ein und werden hier als Raum- und Oberflächenwellen abgestrahlt, die an einer seismologischen Messstation als Erhöhung des Hintergrundrauschens aufgezeichnet werden.

In den vergangenen Jahren wurden bundeslandspezifische und nicht einheitliche Regelungen getroffen, um die Störung seismologischer Messstationen durch den Betrieb von WEA zu begrenzen. Grundlegende Ursache für die uneinheitlichen Regelungen ist, dass in der Fachliteratur nur wenige Studien zum Einfluss der durch WEA emittierten seismischen Wellen auf seismologische Messstationen existieren (Styles et al., 2005; Saccorotti et al., 2011; Xi Engineering Consultants, 2014; Stammer & Ceranna, 2016; Neuffer et al., 2019). Eine Ableitung allgemeingültiger Regelungen sowie die Identifizierung der wesentlichen Einflussparameter war so bislang nicht möglich. Aus diesem Grund wurde ein Landesgutachten durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie (MWIDE) NRW in Auftrag gegeben, um eine breitere Datenbasis zur Beurteilung der Einwirkungen durch den Betrieb von WEA zu erhalten sowie die dominanten Einflussgrößen zu charakterisieren (MWIDE, 2019). Die Ergebnisse zeigen, dass die Einwirkungen insbesondere von der Art der WEA, der lokalen Geologie sowie der Anzahl der WEA abhängig sind. So unterscheiden sich die Einwirkungen unterschiedlicher WEA-Hersteller und Bauweisen teils deutlich, die Einwirkungen auf Lockergestein liegen höher als auf Festgestein und die Einwirkungen von N WEA überlagern sich näherungsweise mit einem Faktor \sqrt{N} . Es konnte zudem gezeigt werden, dass das von der WEA ausgehende Quellsignal insbesondere die charakteristischen Eigenschwingungen des Turmes und deren jeweilige Harmonische (Obertöne) widerspiegelt. Die Höhe der Einwirkung korreliert dabei mit der Windgeschwindigkeit bzw. der Rotationsfrequenz der Rotorblätter.

Die bislang ermittelten Erkenntnisse aus den verschiedenen Studien sowie gesammelte Messdaten an WEA können verwendet werden, um die zusätzliche Rauschbelastung am Standort einer seismologischen Messstation in Abhängigkeit der Entfernung zu einer bzw. mehreren WEA abzuschätzen. Durch eine solche Prognose kann geprüft werden, ob eine mögliche Einschränkung einer Messstation durch die Errichtung von WEA eintritt.

3. Erdbebenmessstation Kahler Asten (KAST)

3.1 Standort

Die Erdbebenmessstation Kahler Asten (KAST) befindet sich ca. 7 km westlich des Ortes Winterberg am Rande eines Waldgebietes. Der Sensor der Messstation befindet sich an der Erdoberfläche. Die geplanten WEA befinden sich in Entfernungen von 3,8 – 4,8 km zur Messstation, wobei die mittlere Entfernung 4,333 km beträgt (Tabelle 1, Abbildung 2). Die oberflächennahe Geologie am Standort der Messstation kann als Ton- und Schluffstein des Mitteldevons beschrieben werden. Am Standort der geplanten WEA liegen Quarzit-, Sand- und Tonstein vor. Allgemein lässt sich die oberflächennahe Geologie als Festgestein kategorisieren (Abbildung 3).

Tabelle 1: Standorte der geplanten WEA (Koordinatensystem UTM Zone 32N) der Firmen Grünwerke GmbH und ABO Wind AG und die jeweilige Entfernung zu der Station KAST.

WEA Nr.	Firma	RW [m]	HW [m]	Entfernung zu KAST [m]
01	Grünwerke GmbH	455361	5675350	4775
02	Grünwerke GmbH	456335	5675226	3944
03	Grünwerke GmbH	456791	5675438	3785
Mittlere Entfernung Grünwerke GmbH WEA				4168
04	ABO Wind AG	455752	5675331	4453
05	ABO Wind AG	455927	5675823	4653
06	ABO Wind AG	456466	5676303	4668
07	ABO Wind AG	456435	5675665	4189
08	ABO Wind AG	456815	5675978	4200
Mittlere Entfernung aller WEA				4333

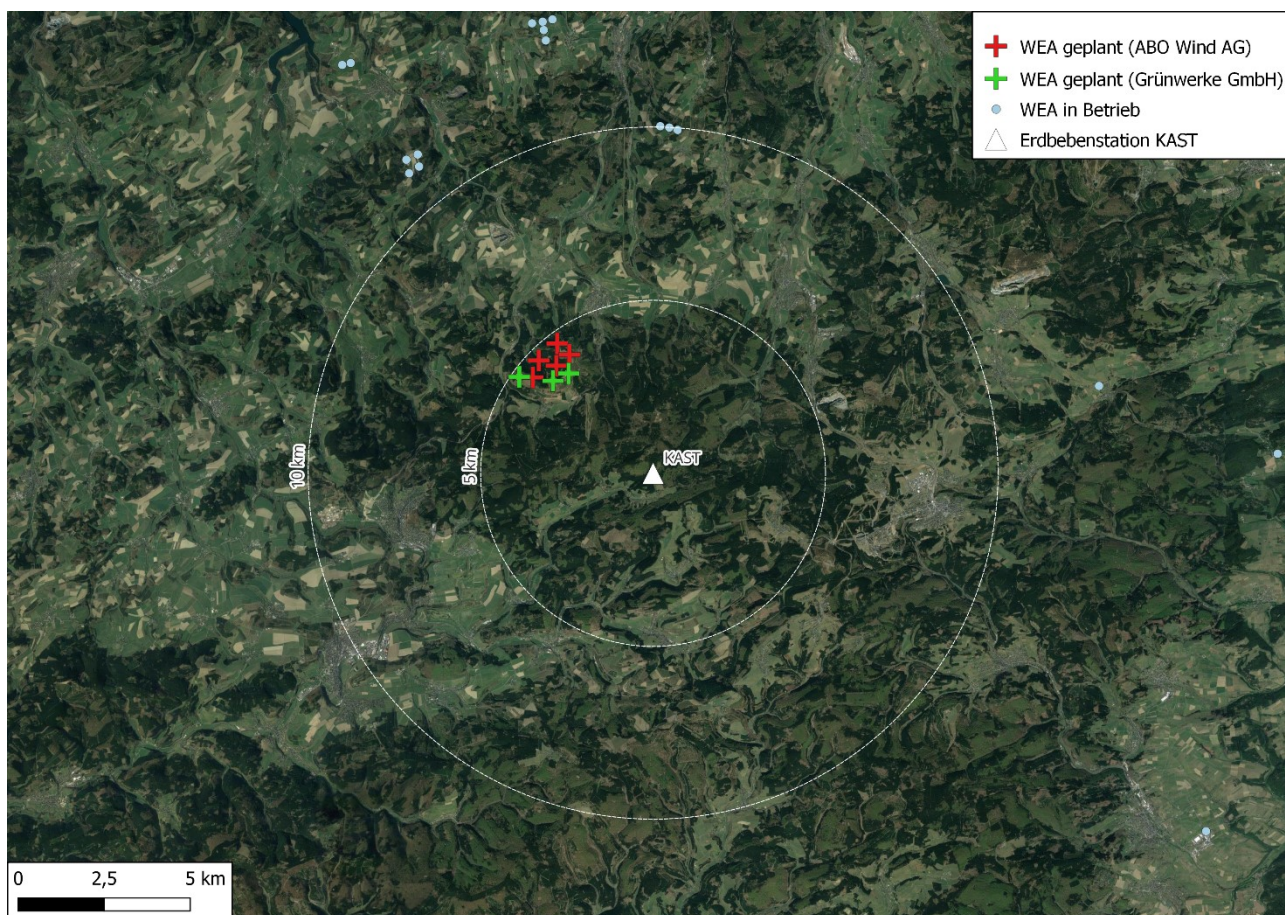


Abbildung 2: Lage der Erdbebenstation KAST (weißes Dreieck), der geplanten WEA (grüne, bzw. rote Kreuze) und der bereits installierten WEA (hellblaue Punkte). Die Ringe markieren einen 5 bzw. 10 km Radius um die Messstation.

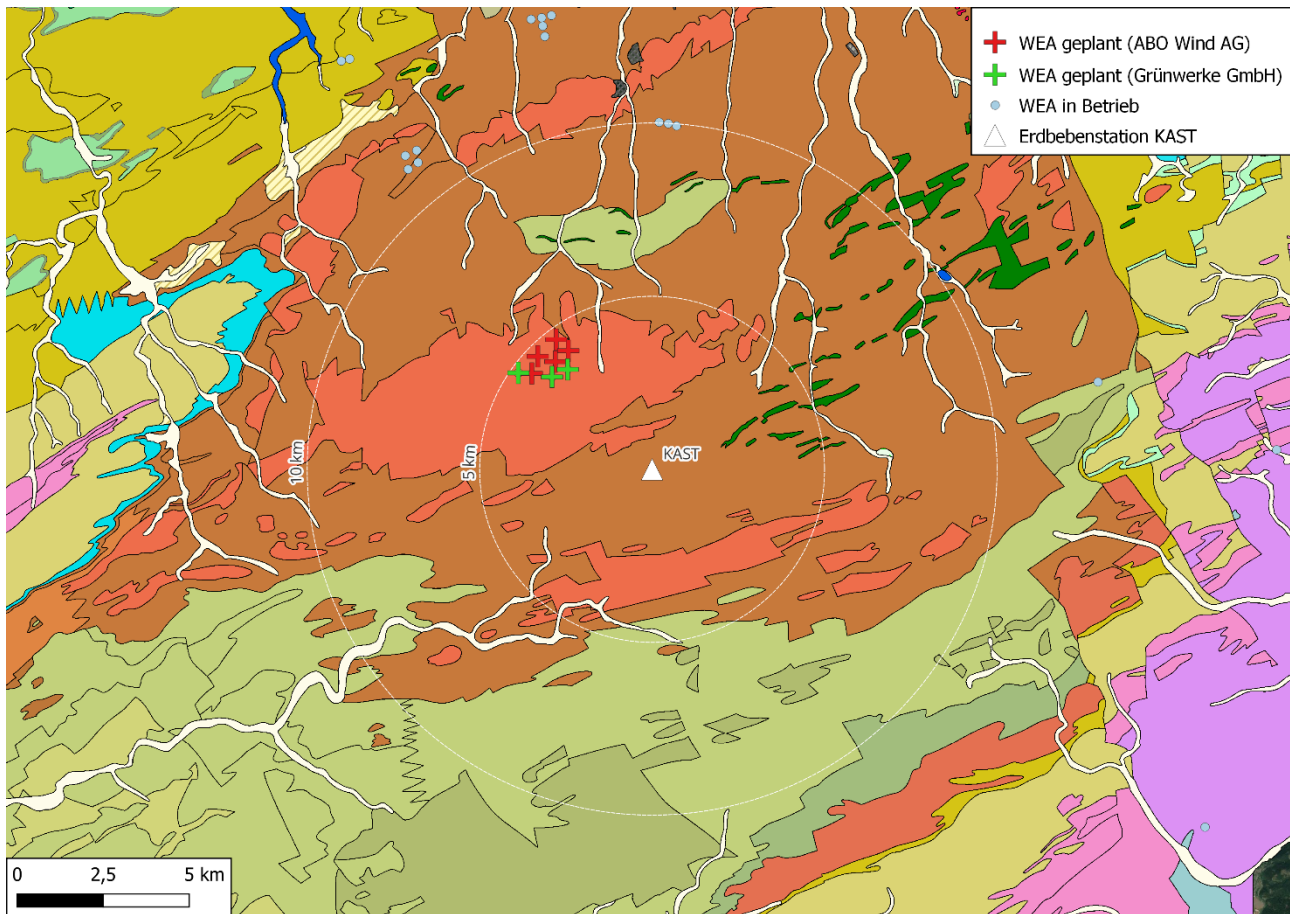


Abbildung 3: Lokale Geologie im Umfeld der Erdbebenstation KAST (weißes Dreieck) und der geplanten WEA (grüne, bzw. rote Kreuze). Die Schichten im Bereich der Station KAST können als Ton- und Schluffstein des Mitteldevons (braun) beschrieben werden. Im Bereich der geplanten WEA (Kreuze) sind diese Schichten durch Quarzit-, Sand-, und Tonsteinschichten (rot) überlagert. Insgesamt kann die Geologie als Festgestein klassifiziert werden.

3.2 Status Quo der Rauschbelastung der Station KAST

Die Erdbebenstation KAST wird im kontinuierlichen Messmodus betrieben. Zur Beurteilung des aktuell vorherrschenden Rauschniveaus am Stationsstandort in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit werden die kontinuierlichen Aufzeichnungen der Messstation über den Zeitraum 01.02.2023 bis 01.02.2024 mit lokalen Wetterdaten (Windgeschwindigkeit, Bereitstellung über open-meteo.com), die zur gleichen Zeit an der nächstgelegenen Wetterstation aufgezeichnet worden sind, korreliert. Grundsätzlich wird angenommen, dass je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto stärker ist der Vibrationseintrag von in der Nähe befindlichen WEA. Da im unmittelbaren Umfeld der Messstation aktuell keine WEA in Betrieb sind (nächste WEA in ca. 10 km Entfernung), werden sonstige windabhängige Störeinflüsse auf die Aufzeichnungen mit dieser Methode bewertet. Hierzu werden die seismischen Daten in 1-h Segmente unterteilt, für jedes Segment wird ein Spektrum der spektralen Leistungsdichte (power spectral density, PSD) berechnet und mit der gleichzeitig aufgetretenen Windgeschwindigkeit, verknüpft. Alle PSD-Spektren, die für Zeiten berechnet werden, in denen die gleiche Windgeschwindigkeit herrschte, werden zusammengefasst und der Median berechnet. Für jede Windgeschwindigkeit wird somit ein mittleres PSD-Spektrum erzeugt, welches durch die statistische Auswertung von Ausreißern (z.B. hervorgerufen durch singuläre Störsignale) befreit wurde und gleichzeitig eine möglichst gute Erhaltung der Charakteristik der standortabhängigen Störquellen abbildet. Zur genaueren Beschreibung der Methode verweisen wir auf Stammer & Ceranna (2016) und Neuffer & Kremers (2017).

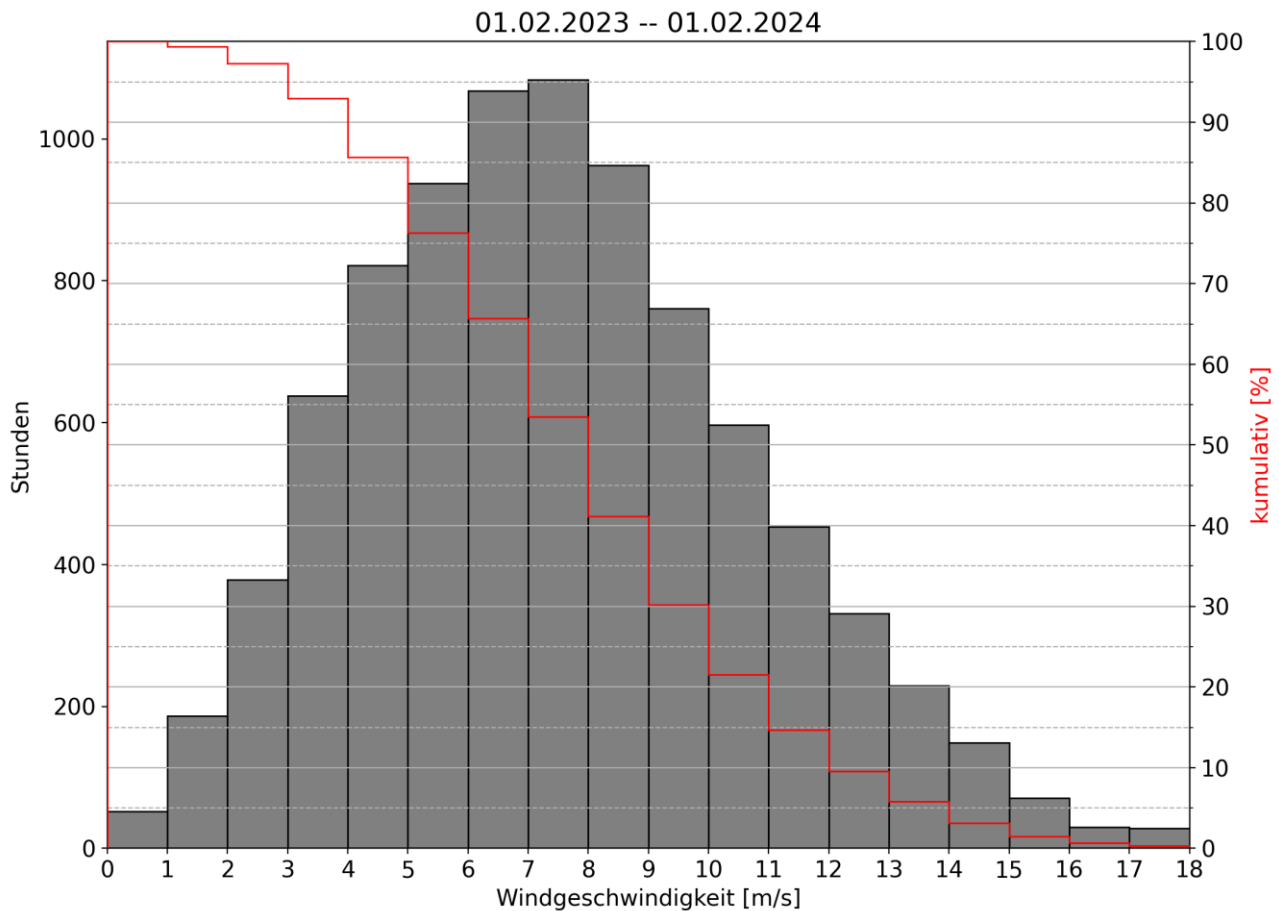


Abbildung 4: Verteilung der aufgezeichneten Windgeschwindigkeiten in Stunden an der nächstgelegenen Wetterstation zu KAST.

Abbildung 4 zeigt die Anzahl der Stunden, in denen die jeweiligen Windgeschwindigkeiten im gesamten Beobachtungszeitraum von Februar 2023 bis Februar 2024 gemessen worden sind. Die mittlere Windgeschwindigkeit lag bei 5 – 9 m/s, wobei Starkwindgeschwindigkeiten von über 12 m/s nur in etwa 10 % des Zeitraums aufgetreten sind.

Abbildung 5 zeigt das Rauschniveau als PSD-Spektren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der Erdbebenstation KAST im relevanten Frequenzbereich 1 – 10 Hz, bestimmt aus den kontinuierlichen Aufzeichnungen der Messstation im Zeitraum Februar 2023 bis einschließlich Januar 2024. Dunkle blaue Farben geben hohe Windgeschwindigkeiten an, helle gelbe Farben niedrige Windgeschwindigkeiten. Zur Einordnung der Amplituden der windabhängigen Rauschniveaus sind in der Abbildung die globalen Noise-Modelle (NHNM – hohes Noise, NLNM – niedriges Noise, nach Peterson 1993) als Vergleichswerte eingetragen.

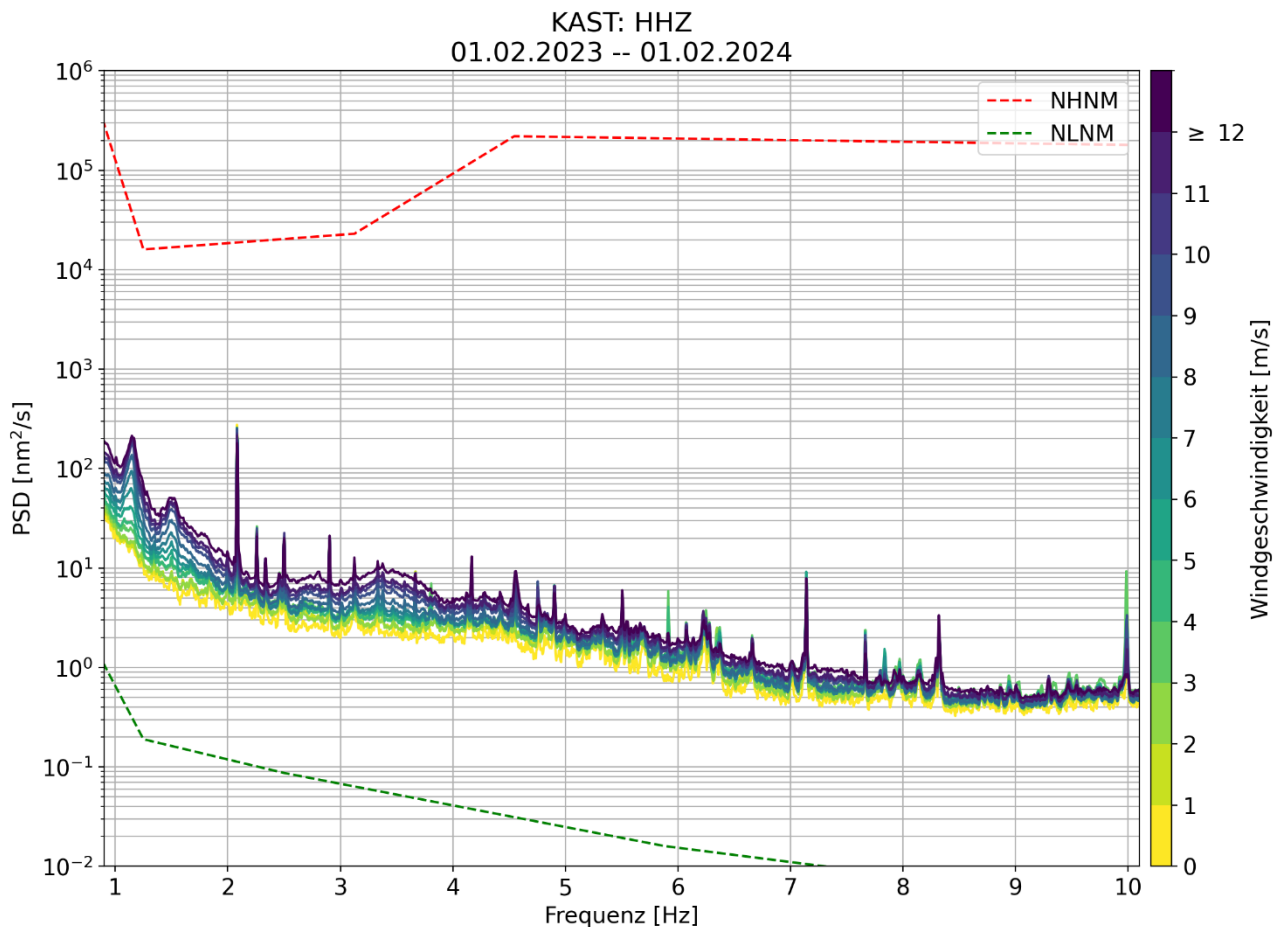


Abbildung 5: Gemittelte PSD-Spektren der Vertikalkomponente der aufgezeichneten seismischen Daten im Zeitraum 01.12.2022 – 01.02.2023 der Messstation KAST im Frequenzbereich 1 – 10 Hz. Farblich kodiert ist die gemessene Windgeschwindigkeit. Als Vergleichswerte dienen die globalen Modelle für hohes Noise (NHNM) und niedriges Noise (NLNM) nach Peterson (1993).

Es ist zu erkennen, dass am Stationsstandort KAST lediglich geringe Einwirkungen durch windabhängige Störquellen Einfluss auf das Rauschniveau haben (Abbildung 5). Für Frequenzen > 5 Hz ist mit zunehmender Windgeschwindigkeit kaum eine Zunahme des Rauschniveaus zu erkennen. Bei niedrigeren Frequenzen zeigt sich eine Zunahme des Rauschniveaus mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Insbesondere zwischen 1 – 2 Hz und 3 – 4 Hz sind windabhängige Frequenzspitzen zu erkennen, die typisch für den Einfluss von bereits in Betrieb befindlichen WEA auf die Erdbebenstation sind. Dennoch zeichnet sich die Station durch ein sehr niedriges Rauschniveau aus und der Standort ist als sehr ruhig mit minimalen Störungen einzustufen.

3.3 Erdbebendetektionsfähigkeit Status Quo der Station KAST

Zur Beurteilung der aktuellen Detektionsfähigkeit von seismischen Ereignissen der Messstation KAST wird aus den PSD-Spektren im Frequenzbereich 1 – 10 Hz bei höchster Windgeschwindigkeiten ein I95-Wert, wie in Neuffer & Kremers (2017) beschrieben, berechnet:

$$I95_{PSD} = 2 \sqrt{\sum_{f=f_{start}}^{f_{end}} PSD_f d_f} \quad (3.1)$$

Der I95-Wert beschreibt eine Bezugsgröße, die 95 % der auftretenden Amplitudenwerte des seismischen Rauschens enthält, und eignet sich daher als „Einwert“-Größe, um das Rauschniveau an der Messstation zu quantifizieren. Aus dem PSD-Spektrum ergibt sich folgender I95-Wert für den Frequenzbereich 1 – 10 Hz:

- I95 bei Windgeschwindigkeiten ≥ 12 m/s an Station KAST: 0,02 $\mu\text{m/s}$

Mit Hilfe der empirischen Beziehung zur Bestimmung der Lokalmagnitude M_L (Bormann et al., 2014):

$$M_L = \log_{10}(A) + 1,11 \log_{10}(R) + 0,00189 R - 2,09 \quad (3.2)$$

wobei A die Maximalamplitude und R die hypozentrale Distanz zwischen Beben und Station beschreibt, kann die Amplitude der Verschiebung an den Horizontalkomponenten (S-Welle) an der Station für ein mögliches seismisches Ereignis mit einer bestimmten Magnitude und Distanz abgeschätzt werden. Eine Umrechnung der Verschiebung in Bodenschwinggeschwindigkeit einer P-Welle bei einer dominierenden Frequenz f (hier: $f = 5$ Hz) kann unter Verwendung der Formel 3.2 und der Annahme einer um den Faktor 5 kleineren Amplitude der P-Wellen verglichen mit S-Wellen (FKPE, 2012) wie folgt vorgenommen werden (s. Ritter, 2021):

$$V_{maxP} = 10^{(M_L - 1,11 \log_{10}(R) - 0,00189 R + 2,09)} * 0,2 * 2\pi f \quad (3.3)$$

Ein deutlich identifizierbarer P-Wellen-Ersteinsatz in einer Aufzeichnung eines seismischen Ereignisses ist von entscheidender Bedeutung hinsichtlich der Detektion und Auswertung des aufgetretenen Erdbebens. Formel 3.3 kann dazu genutzt werden, um charakteristische Schwinggeschwindigkeiten einer P-Welle eines seismischen Ereignisses in Abhängigkeit von der lokalen Magnitude und der hypozentralen Entfernung an einem Einwirkungsort zu simulieren. Mit Hilfe der berechneten I95-Werte bei unterschiedlichen Windbedingungen und den zu erwartenden Schwinggeschwindigkeiten aus Formel 3.3 kann ermittelt werden, ob ein Erdbeben einer bestimmten Magnitude in einer bestimmten hypozentralen Entfernung an der Messstation erfasst werden kann. Als Bedingung für eine erfolgreiche Detektion eines Erdbebens gilt, dass das Verhältnis zwischen der maximalen Schwinggeschwindigkeit der P-Welle um den Faktor 3 größer sein muss als das Rauschniveau (I95-

Wert) an der Messstation (Signal-Rausch-Verhältnis, $SNR > 3$, s. FKPE 2012). Abbildung 6 zeigt die Detektionsfähigkeit als Magnituden-Entfernungsbeziehung an der Station KAST. Die y-Achse zeigt die Lokalmagnitude, die erreicht werden muss, damit ein Erdbeben in der jeweiligen hypozentralen Entfernung (x-Achse) erfolgreich detektiert werden kann. Die Farben der Kurven geben unterschiedliche theoretische Rauschniveaus zwischen $0,01 - 10 \mu\text{m/s}$ an einer Station an, um den Einfluss der Standortqualität auf die Detektionsfähigkeit darzustellen. Die rote Kurve beschreibt schließlich die Detektionsfähigkeit der Station unter Annahme eines Rauschlevels von $I95 = 0,02 \mu\text{m/s}$ bei Starkwindbedingungen von $\geq 12 \text{ m/s}$ an der Station KAST (Abbildung 6). Die Schnittpunkte dieser Kurve mit den Linien der Lokalmagnituden $M_L = 1,0$, $M_L = 1,5$ und $M_L = 2,0$ liegen bei entsprechenden Hypozentralentfernung wie in Tabelle 2 beschrieben. Das bedeutet, dass unter den o.g. getroffenen Annahmen zum Beispiel Erdbeben mit einer Magnitude $M_L = 1,0$ in hypozentralen Entfernungen von $\geq 62,3 \text{ km}$ an der Station KAST nicht mehr detektierbar sind. Tabelle 2 fasst die beschriebenen Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2: Theoretische Detektionsfähigkeit seismischer Ereignisse in Abhängigkeit vom Rauschniveau bei Starkwind-Bedingungen an der Station KAST.

		Max. Hypozentralentfernung [km] der Detektion eines Erdbebens der Stärke		
Zustand	Rauschniveau I95 [$\mu\text{m/s}$]	$M_L = 1,0$	$M_L = 1,5$	$M_L = 2,0$
Status quo	0,02	62,3	133,1	> 200

Im Folgenden wird die theoretische Detektionsfähigkeit an der Station KAST bei einem Rauschniveau von $0,02 \mu\text{m/s}$ unter Starkwindbedingungen als Status Quo angenommen. Im weiteren Verlauf beschreibt der hier angenommene Fall ein „worst case“-Szenario, da die Starkwindbedingungen an den Standorten der Erdbebenstationen, wie oben beschrieben, lediglich in ca. 10 % des Betrachtungszeitraumes auftreten und somit generell im Mittel zu anderen Zeiten von einem geringeren Rauschniveau auszugehen ist und dadurch eine niedrigere Vorbelastung und eine bessere Standortqualität zu erwarten ist.

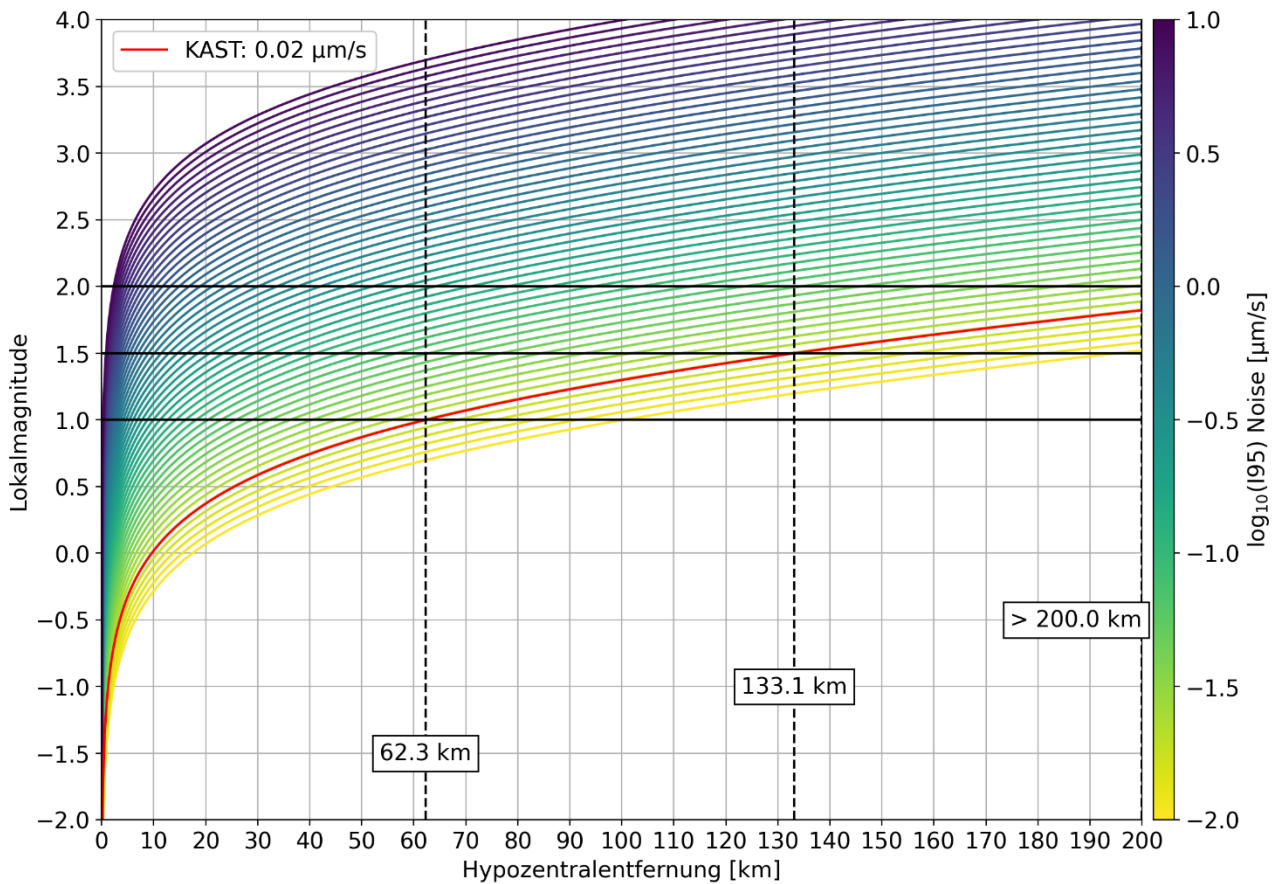


Abbildung 6: Detektionsfähigkeit von seismischen Ereignissen als Lokalmagnituden in Abhängigkeit von Hypozentralentfernung und dem I95-Wert an der Station KAST. Der Farbverlauf repräsentiert verschiedene Rauschniveaus zwischen 0,01 – 10 $\mu\text{m/s}$, die rote Kurve zeigt die Magnituden-Entfernungsbeziehung bei einem Rauschniveau von 0,02 $\mu\text{m/s}$ unter Windbedingungen von $\geq 12 \text{ m/s}$. Die gestrichelten vertikalen Linien geben die maximale hypozentrale Entfernung an, bei der seismische Ereignisse mit Magnituden von $M_L = 1,0$, $M_L = 1,5$ und $M_L = 2,0$ detektiert werden können.

4. Prognose der Einwirkung

4.1 Messung

Zur Prognose der Einwirkung durch den Betrieb der geplanten WEA auf die Messstation KAST muss der Schwingungseintrag in den Untergrund des zu installierenden WEA-Typs sowie das Abklingverhalten der abgestrahlten Wellen mit der Entfernung genutzt werden. Dazu werden Daten verwendet, die zwischen dem 29.03.2021 und dem 08.04.2021 an zwei WEA im Windpark Kröppen (Rheinland-Pfalz) aufgezeichnet wurden. Bei den untersuchten WEA handelt es sich um den gleichen Typ (Vestas V150), mit einer etwas geringeren Leistung (4,2 MW) als die geplanten Anlagen (6,0 MW). Ein Vergleich der schwingungsbestimmenden Parameter der untersuchten und geplanten WEA ist in Tabelle 3 zu finden. Da sich Rotordurchmesser, Gondel- und Blattgewicht zwischen den gemessenen und geplanten WEA nicht unterscheiden, und die Nabenhöhen vergleichbar sind, können die aufgezeichneten seismischen Signale der WEA als Quellsignal für die Prognose der zusätzlichen Rauschbelastung herangezogen werden. Die Geologie im Bereich der Messungen kann grob als Festgesteinsschichten klassifiziert werden.

Tabelle 3: Vergleich der Parameter der vermessenen WEA in Kröppen und der geplanten WEA

Parameter	Kröppen (Messung)	geplant
Hersteller	Vestas	Vestas
Bezeichnung	V150	V150
Nabenhöhe [m]	166/145	169
Turmtyp	Hybrid	Hybrid
Nennleistung [MW]	4,2	6,0
Nenndrehzahl [U/min]	12,6	9,87
Rotordurchmesser [m]	150	150
Gondelgewicht [t]	130	130
Blattgewicht [t]	25	25
Geologie	Festgestein	Festgestein

Zur Bestimmung des Quellsignals der Erschütterungen, die durch diesen WEA-Typ in den Untergrund abgestrahlt werden, wurden insgesamt fünf mobile seismische Messstationen in verschiedenen Entfernungen zur WEA installiert. (Abbildung 7,

Tabelle 4). Als seismische Sensoren wurden Standsensoren und flache Bohrlochsonden genutzt, die in ca. 0,5 bis 1 m Tiefe Löcher bzw. Handbohrungen eingelassen wurden (Abbildung 8).



Abbildung 7: Standorte der mobilen seismischen Stationen im Umfeld zu den WEA (rote Kreuze) im Windpark Kröppen.

Tabelle 4: Entfernungen zwischen der WEA und den mobilen seismischen Messstationen.

Messpunkt	Entfernung zur nächsten WEA [m]
01	69
02	498
03	1007
04	1524
05	2455



Abbildung 8: Messaufbau einer mobilen seismischen Messstation. links: Sensor auf Steinplatte in 50 cm Aushub. rechts: wettergeschützter Aushub und Digitalisierereinheit in Alukiste. unten: flache Bohrlochsonde und Digitalisierereinheit in Alukiste.

Die kontinuierliche Messung wurde mit dem kalibrierten Erschütterungsmesssystem Summit M^{Vipa} (Hersteller: DMT) durchgeführt. Das Messgerät entspricht den Anforderungen der DIN 45669 „Messung von Schwingungsimmissionen“, Teil 1. Die Amplitudenfrequenzgangabweichung beträgt daher geräteseitig höchstens 10 %. Aufgrund der volldigitalen Bearbeitung der Messdaten bei DMT addieren sich keine weiteren Fehler aus einer möglicherweise manuellen Ablesung oder Übertragung von Daten.

Aufgrund ihrer Möglichkeit, seismische Signale digital aufzuzeichnen und abzuspeichern, die GPS-Zeitbasis zu empfangen und ebenfalls mit zu registrieren, ist die o.g. Apparaturen gleichzeitig vollwertige Station für seismologische Anwendungen und Auswertungen.

Das Summit M^{Vipa} Messsystem verfügt insbesondere über:

- Eine interne Dynamik von 24bit
- Die Möglichkeit getriggert oder kontinuierlich aufzuzeichnen (Abtastrate von 100 Hz bis 10 kHz)
- Eine batteriegepufferte Stromversorgung (ca. 3 Tage autarker Betrieb möglich)

- Eine hochgenaue GPS Zeitbasis mit einer Genauigkeit $< 1 \mu\text{s}$
- Internen Speicher von 4 GB (über USB beliebig erweiterbar)
- Ein LTE-Modem zur Versendung von Daten und Alarmmeldungen
- Einen FTP-Client, der die Messdaten entweder automatisch oder auf Anforderung versendet

Die Datenübertragung erfolgte hierbei über das interne LTE-Modem der Summit M^{Vipa}. Die Registrierung erfolgte zum einen mit dem DMT-3D DIN Sensor, der aus drei orthogonalen 4,5 Hz Sensoren aufgebaut ist und zum anderen mit einem Lennartz LE-3Dlite MkIII, der aus orthogonalen 1 Hz Sensoren aufgebaut ist. Zusammen mit dem Messsystem Summit M^{Vipa} bilden die Sensoren ein Messsystem nach DIN 45669 mit einer geschwindigkeitsproportionalen Übertragungsfunktion zwischen 1 Hz und 315 Hz.

4.2 Bestimmung des Quellsignals

Zur Bestimmung des seismischen Quellsignals zur Abschätzung der möglichen Störwirkung hervorgerufen durch den Betrieb der drei, bzw. acht geplanten WEA werden die kontinuierlichen Aufzeichnungen der vertikalen Komponente der mobilen Messstationen in 10-min Segmente unterteilt und für jedes Segment ein power spectral density (PSD) Spektrum berechnet (vgl. Kapitel 3). Jedes Spektrum wird mit dem entsprechenden Betriebszustand (Umdrehungszahl) der WEA zur gleichen Zeit verknüpft. Auch hier werden alle PSD-Spektren, die für Zeiten mit der gleichen Rotationszahl berechnet wurden, zusammengefasst und der Median für die jeweilige Rotationsfrequenz berechnet. Für jeden Messpunkt ergeben sich charakteristische PSD-Spektren, die sowohl von der Entfernung zur WEA und vom jeweiligen Betriebszustand der WEA abhängen.

Abbildung 9 zeigt das Rauschniveau als PSD-Spektren in Abhängigkeit von der Rotationsfrequenz an der vertikalen Komponente des Messpunktes 02 in 498 m Entfernung zur nächsten WEA im relevanten Frequenzbereich 1 – 10 Hz, bestimmt aus den kontinuierlichen Aufzeichnungen des gesamten Messzeitraums. Analog zu Kapitel 3 geben dunkle blaue Farben hohe Umdrehungszahlen und helle gelbe Farben niedrige Umdrehungszahlen an. Analog zu Abbildung 9 zeigt Abbildung 10 das Rauschniveau korreliert mit der Rotationsfrequenz an den anderen Messpunkten (01, 03 – 05).

Die PSD-Spektren des Messpunktes 02 in 498 m Entfernung zu den WEA repräsentieren das charakteristische Quellsignal der beiden WEA in Abhängigkeit des Betriebszustandes am besten. Es ist zu erkennen, dass das Rauschniveau an diesem Standort deutlich durch die Erschütterungen der WEA dominiert wird sowie aufgrund der geringen Entfernung zur WEA weitere Störsignale zu vernachlässigen sind. Gleichzeitig kann die Gruppe aus zwei WEA als eine Quelle betrachtet werden. Die PSD-Spektren des nächstgelegenen Messpunktes (01) in 69 m Entfernung zur nächsten WEA eignen sich nicht als Quelfunktion für die Gruppe aus zwei WEA, da der Einfluss der dichteren WEA das Signal dominiert. Bei einer Verwendung als Quelfunktion für eine WEA würde das charakteristische Quellsignal und der Vibrationseintrag dieses WEA-Typs in der folgenden Prognose stark überschätzt werden, da die Abklingeffekte der Amplituden im Nahbereich der WEA (welche deutlich stärker sind als im Fernfeld, s. Kapitel 4.3) nicht berücksichtigt werden. Für die weitere Prognose wird schließlich das PSD-Spektrum bei höchster Umdrehungszahl ($\geq 10 \text{ U/min}$) am Messpunkt 02 in 498 m Entfernung zur WEA als für diesen WEA-Typ charakteristisches Quellsignal verwendet.

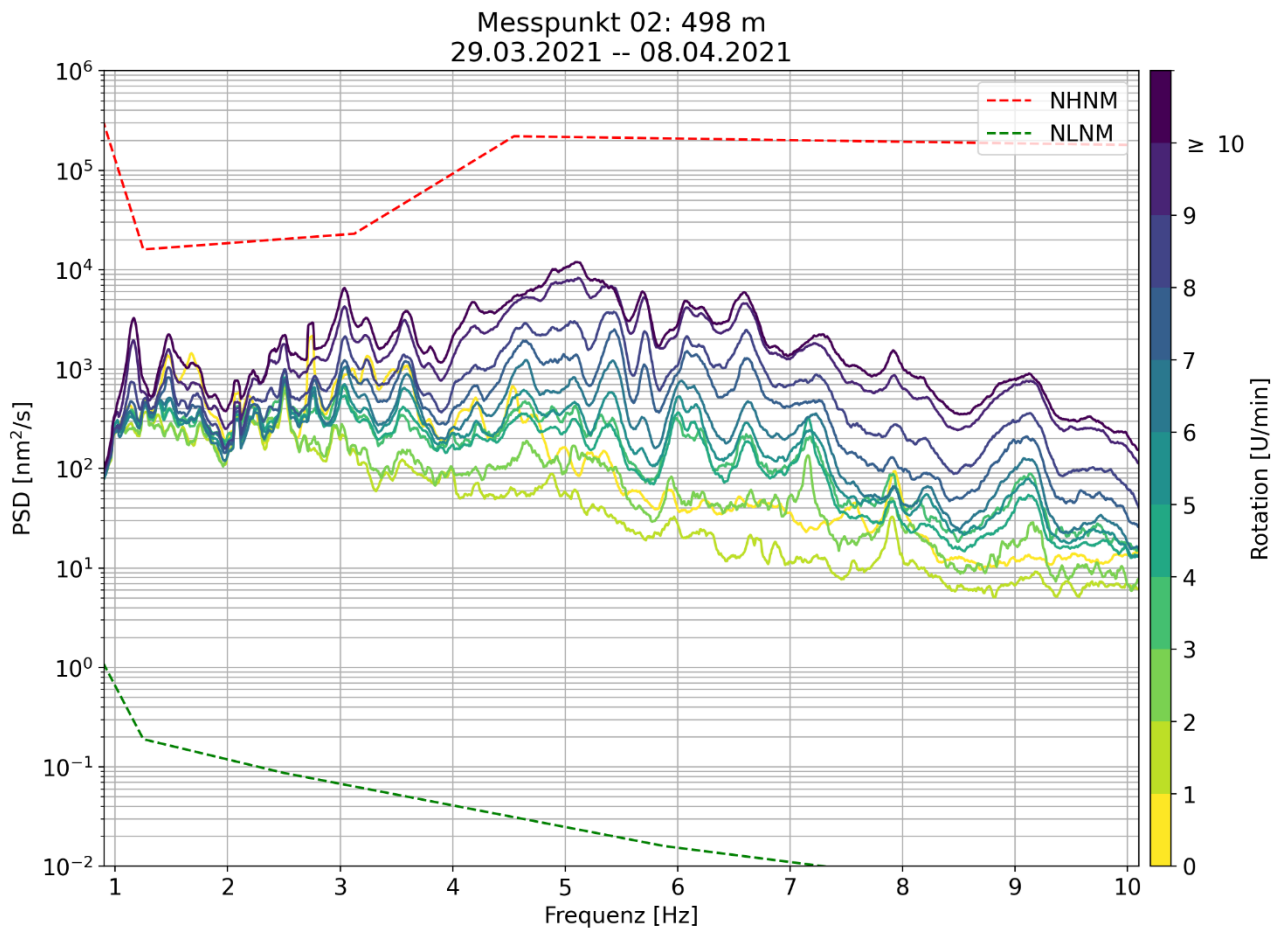


Abbildung 9: Gemittelte PSD-Spektren der Vertikalkomponente der aufgezeichneten seismischen Daten im gesamten Messzeitraum des Messpunktes 02 in 498 m Entfernung zu den WEA im Frequenzbereich 1 – 10 Hz. Farblich kodiert ist die gemessene Umdrehungszahl der WEA. Als Vergleichswerte dienen die globalen Modelle für hohes Noise (NHNM) und niedriges Noise (NLNM) nach Peterson (1993).

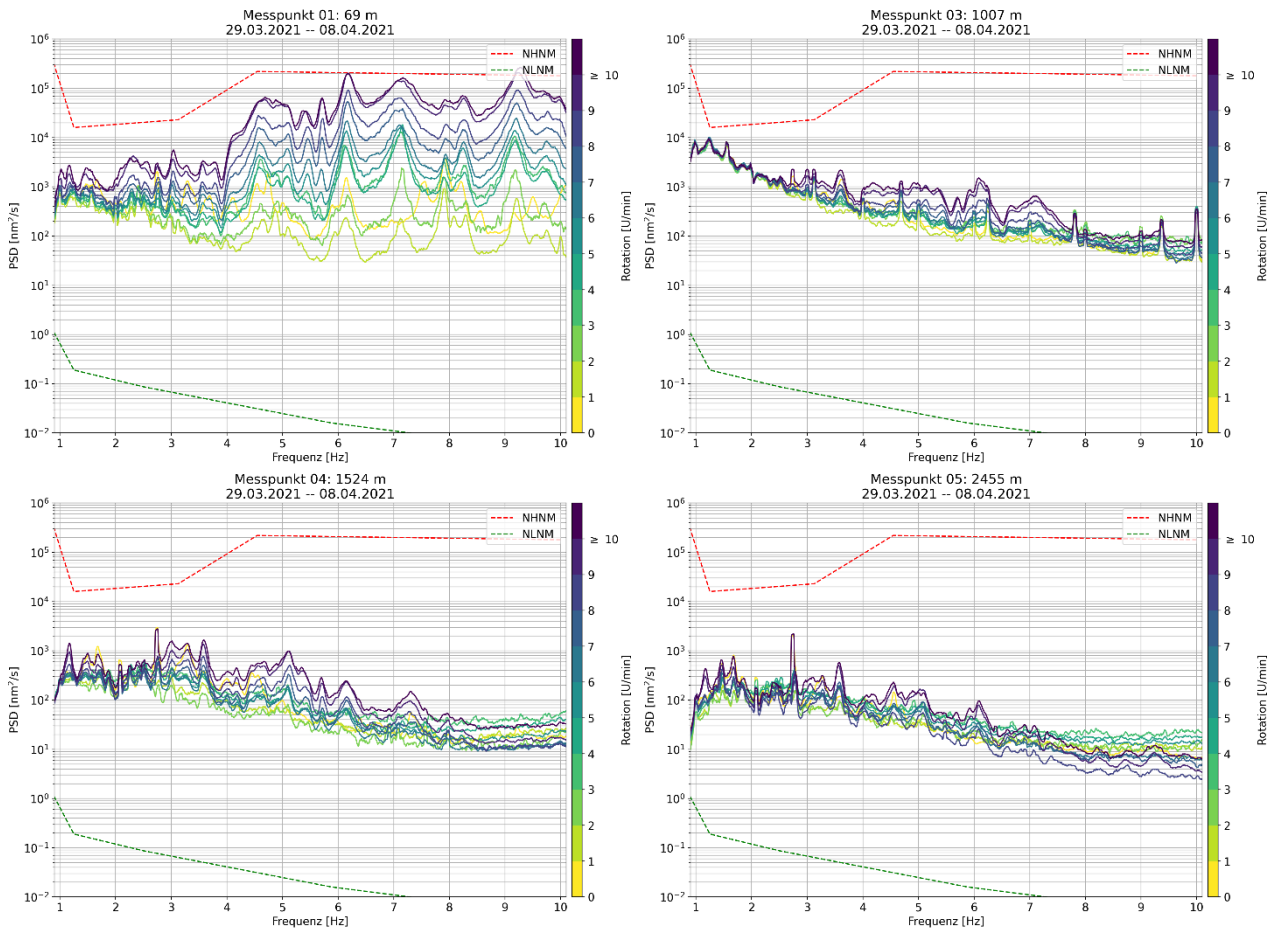


Abbildung 10: Gemittelte PSD-Spektren der Vertikalkomponente der aufgezeichneten seismischen Daten im gesamten Messzeitraum der Messpunkte 01, 03, 04 und 05 in den entsprechenden Entfernungen zur WEA im Frequenzbereich 1 – 10 Hz. Farblich kodiert ist die gemessene Umdrehungszahl. Als Vergleichswerte dienen die globalen Modelle für hohes Noise (NHNM) und niedriges Noise (NLNM) nach Peterson (1993).

4.3 Amplitudenabnahmebeziehungen

Die von den WEA in den Boden eingeleitete Schwingungsenergie breitet sich in Form verschiedener Wellenarten im Boden aus. Das von der WEA erzeugte Wellenfeld wird von Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen und Love-Wellen) dominiert (Styles et al. 2005, Neuffer et al. 2021). Daher erwartet man im Fernfeld, d. h. in Entfernungen von etwas mehr als einer Wellenlänge, eine Amplitudenabnahme der Form:

$$A = A_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-n} e^{\left[-\frac{\pi f}{Qv} (R - R_0) \right]} \quad (4.1)$$

Hierbei bezeichnen A die Amplitude in der Entfernung R , A_0 die Amplitude in einer Referenzentfernung R_0 . Q ist die seismische Wellendämpfung, f die Frequenz und v die Geschwindigkeit der Oberflächenwelle. Für reine Oberflächenwellen, die von einer punktförmigen harmonischen Quelle abgestrahlt werden, gilt $n = 0,5$. Aufgrund von Dispersions- und Fokussierungseffekten, einer Überlagerung von Raum- und Oberflächenwellen und einer nicht zu vernachlässigenden räumlichen Ausdehnung der Quelle können aber auch hiervon deutlich abweichende Werte auftreten. Falls nicht genügend Informationen zur Verfügung stehen, wird der exponentielle Dämpfungsterm häufig nicht separat bestimmt. Die Amplitudenabnahme mit der Entfernung wird in diesem Fall allein durch einen modifizierten Exponenten $a = \alpha \cdot n$ beschrieben. Hierbei gilt meist $\alpha > 1$. Bei linienförmigen Quellen, also in Entfernungen, die nicht deutlich größer als die Ausdehnung von Windparks sind, können auch Werte $\alpha < 1$ auftreten.

In den letzten Jahren sind vermehrt wissenschaftliche Studien veröffentlicht worden, die den Einfluss von WEA auf seismische Stationen untersuchen (Stammler & Ceranna 2016, Zieger 2019 & Neuffer et al. 2019). In allen Studien wurde einheitlich dargestellt, dass das Dämpfungsverhalten seismischer Signale, die von WEA ausgehen, im PSD-Bereich mit

$$r^{-b} \quad (4.2)$$

beschrieben werden kann, wobei r die Distanz zwischen seismischer Station und WEA und b den Dämpfungskoeffizienten bezeichnen. Der Dämpfungskoeffizient b ist hierbei abhängig von der betrachteten Frequenz. Zu beachten ist, dass sich der in den meisten Studien bestimmte b -Koeffizient auf den PSD-Bereich bezieht, d.h. für die spektrale Leistungsdichte, also das Quadrat des Amplitudenspektrums (der Parameter darf daher nicht mit dem Exponenten a verwechselt werden). Bei einer Ausbreitung von Oberflächenwellen ohne Dämpfung wäre daher ein Koeffizient von $b = 1$ (d.h. Abnahme $\sim (1/\sqrt{r})^2$) für das Fernfeld zu erwarten.

Für die Prognose des Störsignals durch die WEA in verschiedene Entfernungen werden frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizienten verwendet. Einige wissenschaftlichen Studien haben in den letzten Jahren bereits für verschiedenste Szenarien (Geologie, WEA-Typ, Entfernungen zur Erdbe-

benstation, etc.) die frequenzabhängigen b -Werte in peer-reviewed Publikationen veröffentlicht. Einen Überblick über die relevanten Studien und b -Werte geben Gaßner & Ritter (2023), welche auch für die hier dargestellte Prognose der Störsignale in verschiedene Entfernungen genutzt werden.

Mit Hilfe der b -Werte bei verschiedenen Frequenzen aus den bereits veröffentlichten Studien, lässt sich eine Beziehung zwischen den berechneten b -Werten und der Frequenz im PSD-Spektrum bestimmen. Abbildung 11 zeigt alle b -Werte aufgetragen gegen die entsprechende Frequenz aus Gaßner & Ritter (2023) und die sich daraus ergebende Abnahmebeziehung über das Frequenzband 1 – 10 Hz. Der Dämpfungskoeffizient ist dabei auf ≥ 1 fixiert, da von dominierenden Oberflächenwellen als abgestrahlten Typ vom Fundament der WEA auszugehen ist und b -Werte unter 1 laut Formel 4.1 im Fernfeld nicht zu erwarten sind.

Zur Bestimmung des prognostizierten PSD-Spektrums in angegebener Entfernung ergibt sich aus der Amplitudenabnahmebeziehung, der Beziehung aus b -Wert und Frequenz und dem Quellsignal folgende Formel

$$\text{PSD}(r, f) = A_0(f, r_0) r^{-b(f)}, \quad (4.3)$$

wobei A_0 das frequenzabhängige Quellsignal in einer Entfernung r_0 , r die Distanz zwischen WEA und seismischer Station und b den frequenzabhängigen Dämpfungsfaktor beschreiben.

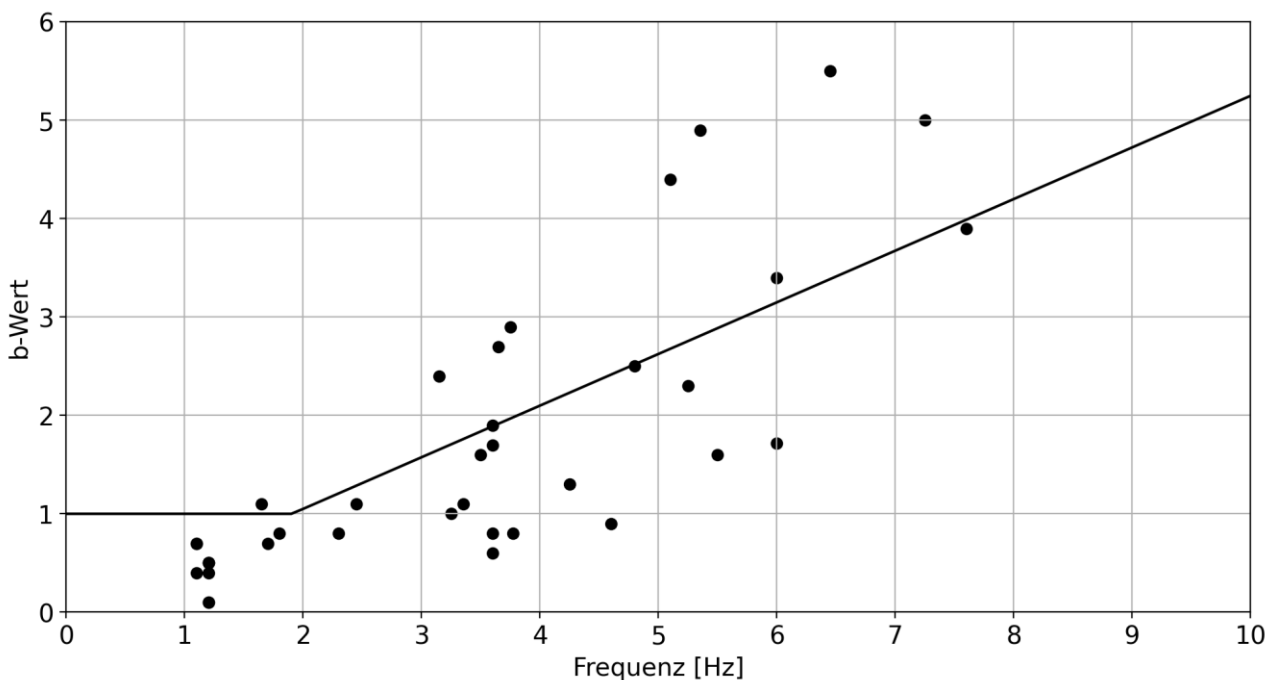


Abbildung 11: Beziehung zwischen b -Wert und Frequenz aller bisherigen peer-reviewed Publikationen (s. Gaßner & Ritter, 2023).

4.4 Prognose der Einwirkungen durch den Betrieb von zusätzlichen WEA

Ziel der Prognose der Einwirkungen durch den Betrieb der geplanten WEA ist die Abschätzung der Höhe des Einflusses auf die seismologischen Messstation KAST und die damit verbundene Fragestellung, ob und in welchem Maße die seismologische Messstation in ihrer Funktionsweise gestört ist. Die Prognose der zu erwartenden Einwirkung durch den Betrieb der WEA auf die Station KAST wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- Messung des Quellsignals an zwei WEA vom gleichen Typ im Windpark Kröppen. Da die vermessenen und die geplanten WEA bis auf die Leistung und Nabenhöhe die gleichen schwingungsbestimmenden Parameter aufweisen (Tabelle 3) kann das Quellsignal ohne Skalierung für die WEA höherer Leistung verwendet werden.
- Skalierung des Quellsignals zu größerer Anzahl an WEA mit dem Faktor N . Die Einwirkungen von N WEA überlagern sich näherungsweise mit einem Faktor \sqrt{N} im Zeitbereich, wodurch eine Überlagerung im PSD-Bereich mit dem Faktor N beschrieben werden kann (Neuffer et al., 2019).
- Bestimmung der frequenzbasierten Amplitudenabnahmebeziehungen zur entfernungsabhängigen Skalierung des Quellsignals aus Literaturwerten (Kapitel 4.3).
- Skalierung des Quellsignals in die mittlere Entfernung der geplanten WEA zu der Station KAST (4,168, bzw. 4,333 km).
- Ermittlung der Einwirkungen am Standort der seismologischen KAST durch den Betrieb von drei, bzw. acht WEA.

Zur Beurteilung der möglichen Störwirkung der geplanten WEA auf die Erdbebenmessstation KAST wird die Amplitudenabnahmebeziehung 4.3 genutzt. Als Quellsignal A_0 wird das PSD-Spektrum in 498 m bei Rotationsfrequenzen ≥ 10 U/min (dunkelblaue Kurve, Abbildung 9) genutzt und um den Faktor $N/2 = 3/2 = 1,5$, bzw. $N/2 = 8/2 = 4$ nach oben skaliert, um mit dem Quellsignal von zwei WEA den Einfluss von drei, bzw. acht WEA, die sich gleichzeitig in Betrieb befinden, zu modellieren. Das hier modellierte Szenario beschreibt den aus seismologischer Sicht ungünstigsten Fall, in dem alle geplanten WEA gleichzeitig betrieben werden und dass das bereits an den Standorten der Erdbebenstationen vorherrschende seismische Hintergrundrauschen maximal ist.

4.4.1 Szenario 1: Zubau von drei WEA

Abbildung 12 zeigt das Quellsignal $A_0(f, r_0)$ der WEA in 498 m Entfernung zur Quelle als PSD-Spektrum im Frequenzbereich 1 – 10 Hz um den Faktor $N/2 = 1,5$ (entspricht drei WEA) nach oben skaliert (blaue Kurve). Die orangene Kurve repräsentiert das prognostizierte PSD-Spektrum am Standort der seismologischen Messstation KAST in einer mittleren Entfernung von 4,168 km. Das Spektrum gibt also das zusätzliche Rauschen an der Messstation KAST an, welches durch den Zubau der drei geplanten WEA erzeugt wird. Aus der prognostizierten zusätzlichen Einwirkung der geplanten WEA auf die Messstation KAST und dem aktuellen Rauschniveau unter Starkwindbedingungen (Status Quo, grüne Kurve) lässt sich das zu erwartende Gesamtrauschniveau an der Messstation berechnen. Die rote Kurve zeigt schließlich das zu erwartende Gesamtrauschlevel an der Messstation. Hier ist erneut anzumerken, dass ein konservativer Fall betrachtet wird, da das Gesamtrauschniveau ein

Szenario beschreibt, bei dem Starkwindbedingungen vorherrschen und die geplanten WEA alle gleichzeitig unter gleichen Bedingungen betrieben werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das zu erwartende Gesamtrauschniveau an der Station KAST bei den genannten „worst case“-Bedingungen im Frequenzbereich < 8 Hz zu einer signifikanten Erhöhung des Rauschniveaus führt. Nichtsdestotrotz liegt das Rauschniveau weiterhin deutlich unterhalb des NHNM, so dass der Standort nach Zubau der WEA als ruhig bewertet werden kann.

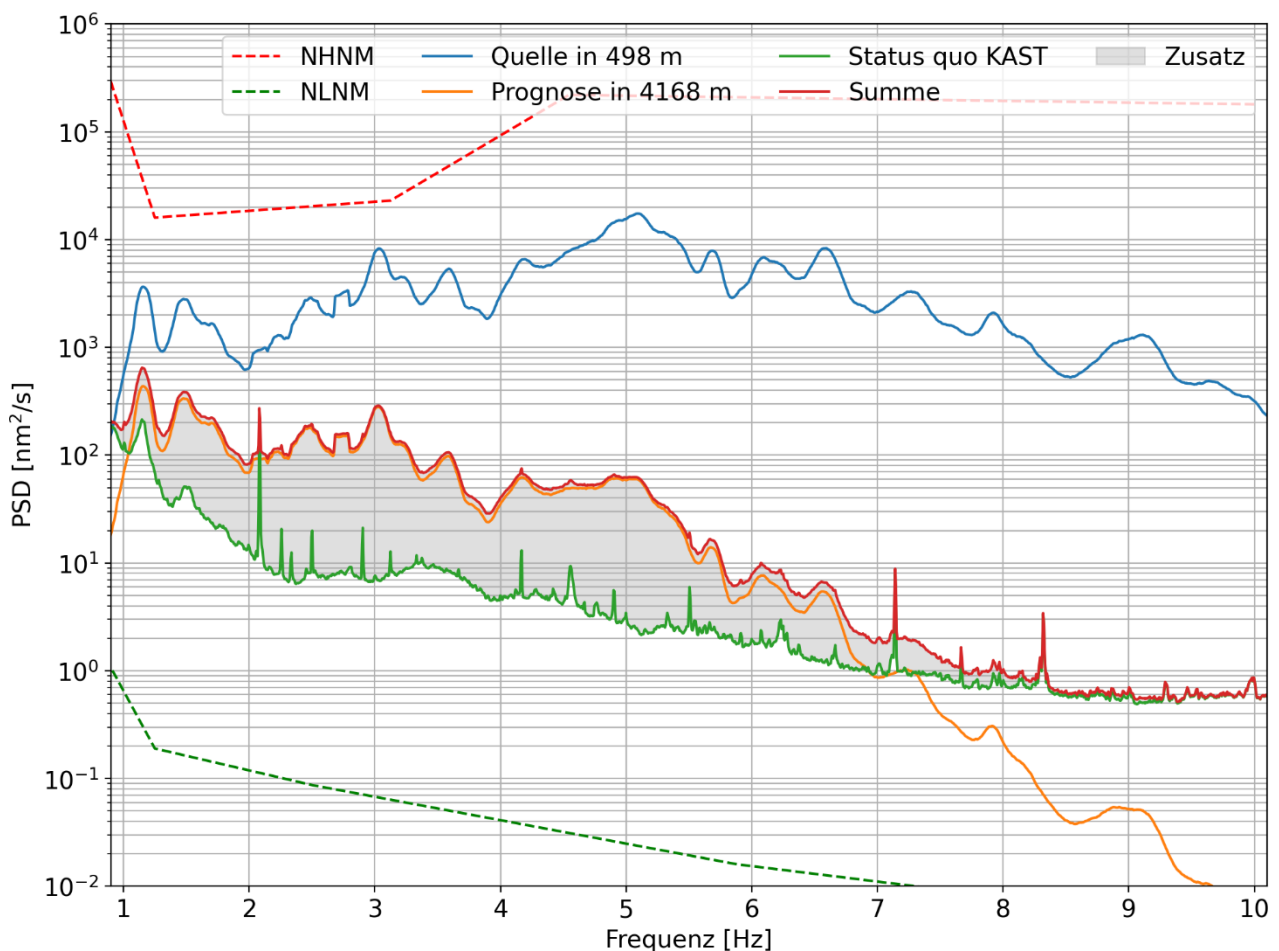


Abbildung 12: Prognostiziertes PSD-Spektrum in einer Entfernung von 4,168 km zu drei WEA (orange). Die blaue Kurve gibt das Eingangsspektrum in einer Entfernung von 498 m zu drei WEA ($N = 1,5$) an. Die grüne Kurve zeigt das aktuelle Rauschniveau an der Station KAST unter Starkwindbedingungen. Die rote Kurve zeigt die Summe aus dem Status quo des Rauschlevels (grün) und dem prognostozierten zusätzlichen Rauschen (orange) durch die geplanten WEA. Als Vergleichswerte dienen die globalen Modelle für hohes (NHNM) und niedriges (NLNM) Noise nach Peterson (1993).

4.4.2 Szenario 2: Zubau von acht WEA

Analog zu Abbildung 12 zeigt Abbildung 13 das prognostizierte Rauschniveau bei Zubau von acht WEA ($N/2 = 4$). In diesem Fall wird das Quellsignal auf die mittlere Entfernung aller acht WEA (4,333 km) skaliert.

Auch hier ist im Frequenzbereich < 8 Hz eine deutliche Zunahme des Rauschniveaus zu erkennen, im Vergleich zu dem ersten Szenario mit drei WEA ist eine deutliche Erhöhung des Rauschniveaus zu erkennen. Dennoch kann der Standort auch in diesem Szenario noch als ruhig bewertet werden kann.

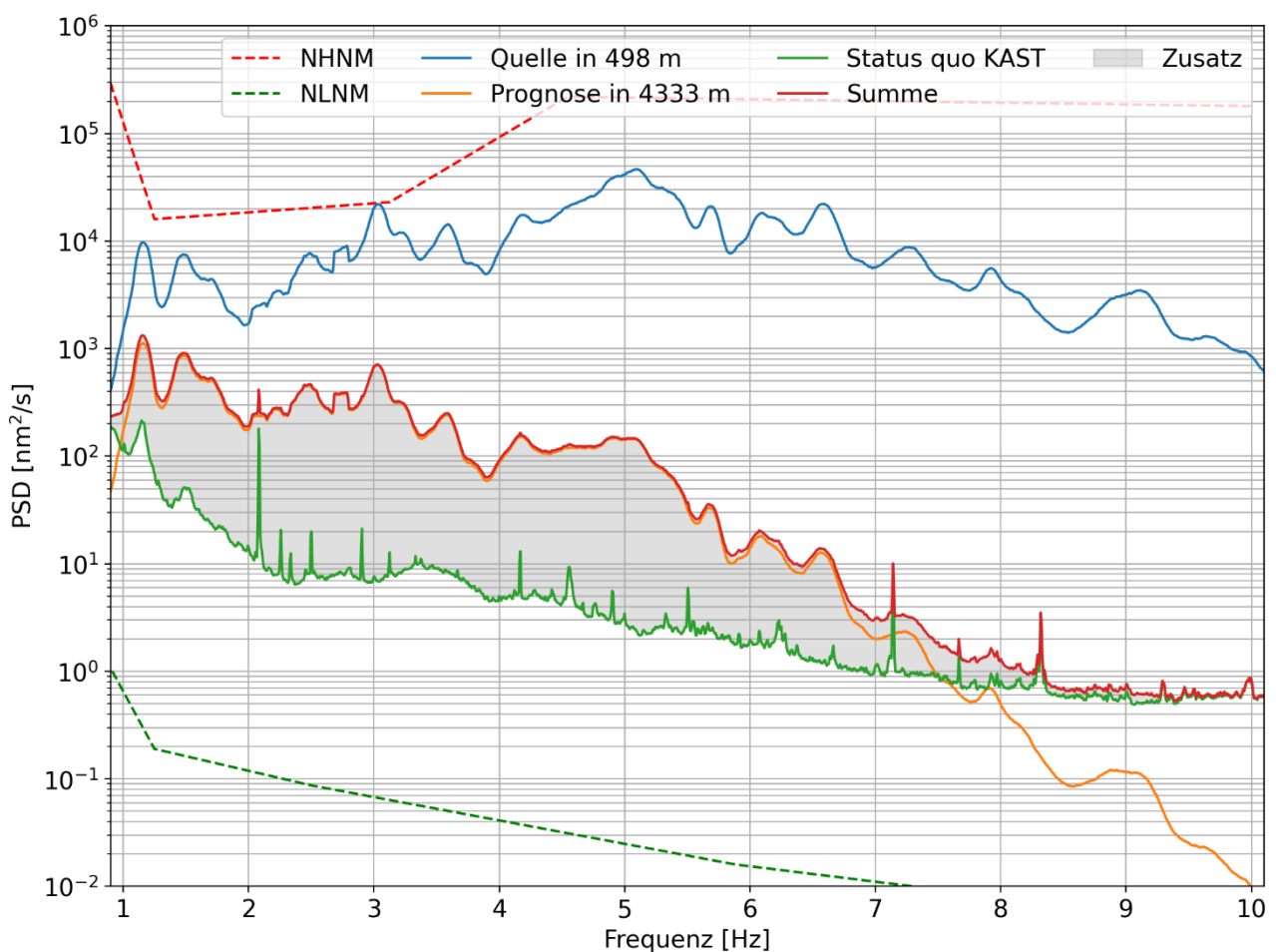


Abbildung 13: Prognostiziertes PSD-Spektrum in einer Entfernung von 4,333 km zu acht WEA (orange). Die blaue Kurve gibt das Eingangsspektrum in einer Entfernung von 498 m zu acht WEA ($N = 4$) an. Die grüne Kurve zeigt das aktuelle Rauschniveau an der Station KAST unter Starkwindbedingungen. Die rote Kurve zeigt die Summe aus dem Status quo des Rauschlevels (grün) und dem prognostozierten zusätzlichen Rauschen (orange) durch die geplanten WEA. Als Vergleichswerte dienen die globalen Modelle für hohes (NHNM) und niedriges (NLNM) Noise nach Peterson (1993).

4.5 Erdbebedetektionsfähigkeit der Station KAST nach Zubau der WEA

Zur Beurteilung der Detektionsfähigkeit von seismischen Ereignissen an der Messstation KAST nach dem geplanten Zubau von drei, bzw. acht WEA werden die Analysen analog zu Kapitel 3.3 mit den zu erwartenden Rauschniveaus aus Abbildung 12 und Abbildung 13 durchgeführt. Als I95-Wert für den Frequenzbereich 1 – 10 Hz ergibt sich aus den resultierenden PSD-Spektren für das erwartete Rauschniveau ein Wert von 0,05 $\mu\text{m/s}$ bei Zubau von drei WEA, bzw. 0,07 $\mu\text{m/s}$ bei Zubau von acht WEA. Für die Detektionsfähigkeit ergeben sich daraus die folgenden Ergebnisse.

Die roten Kurven in Abbildung 14 und Abbildung 15 beschreiben analog zu den Ergebnissen in Kapitel 3.3 der zu erwartenden Rauschlevel von I95 = 0,05 $\mu\text{m/s}$, bzw. 0,07 $\mu\text{m/s}$ eines maximal konservativen Szenarios, bei dem Starkwindbedingungen herrschen und alle geplanten WEA gleichzeitig mit Nennleistung betrieben werden. Die Schnittpunkte der Kurven mit den Linien der Lokalmagnituden $M_L = 1,0$, $M_L = 1,5$ und $M_L = 2,0$ ergeben die maximalen Hypozentralentfernungen (Tabelle 5), in denen Beben der entsprechenden Stärke noch detektiert werden können. Ein Vergleich mit den aktuellen maximalen Hypozentraldistanzen zeigt, dass sich durch den Zubau der WEA das Rauschniveau als I95-Wert in beiden Szenarien stark erhöht und sich die Detektionsfähigkeit deutlich verringert. Der Einfluss der geplanten WEA auf die Stationsqualität muss daher als signifikant bewertet werden.

Tabelle 5: Theoretische Detektionsfähigkeit seismischer Ereignisse in Abhängigkeit vom Rauschniveau an der Station KAST.

		Max. Hypozentralentfernung [km] der Detektion eines Erdbebens der Stärke		
Zustand	Rauschniveau I95 [$\mu\text{m/s}$]	$M_L = 1,0$	$M_L = 1,5$	$M_L = 2,0$
Status quo	0,02	62,3	133,1	> 200
Prognose 3 WEA	0,05	30,8	73,7	152,6
Prognose 8 WEA	0,07	23,4	57,9	125,3

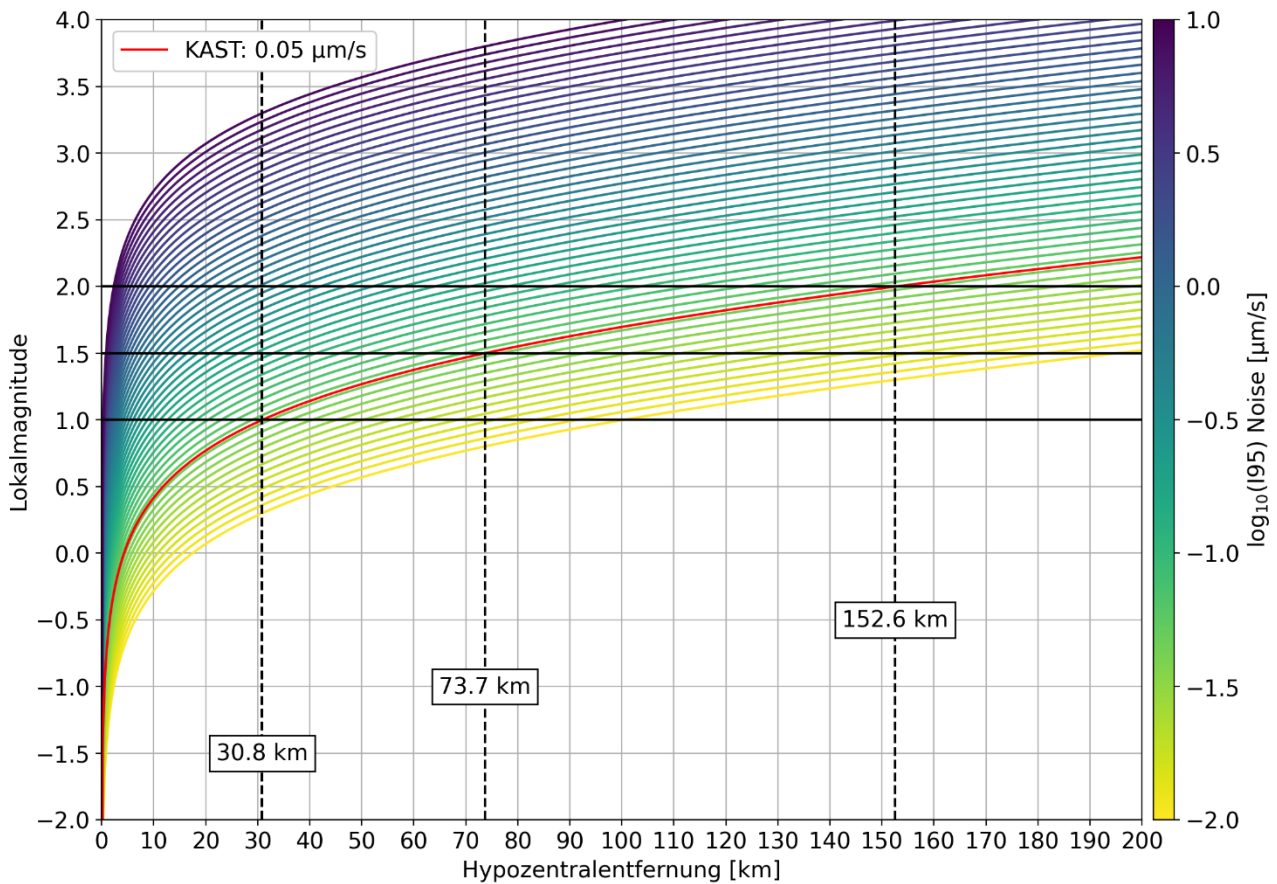


Abbildung 14: Detektionsfähigkeit von seismischen Ereignissen als Lokalmagnituden in Abhängigkeit von Hypozentralentfernung und dem I95-Wert an der Station KAST nach dem Zubau von drei WEA. Der Farbverlauf repräsentiert verschiedene Rauschniveaus zwischen 0,01 – 10 $\mu\text{m/s}$, die rote Kurve zeigt die Magnituden-Entfernungsbeziehung bei einem Rauschniveau von 0,05 $\mu\text{m/s}$ unter Starkwindbedingungen. Die gestrichelten vertikalen Linien geben die maximale hypozentrale Entfernung an, bei der seismische Ereignisse mit Magnituden von $M_L = 1,0$, $M_L = 1,5$ und $M_L = 2,0$ detektiert werden können.

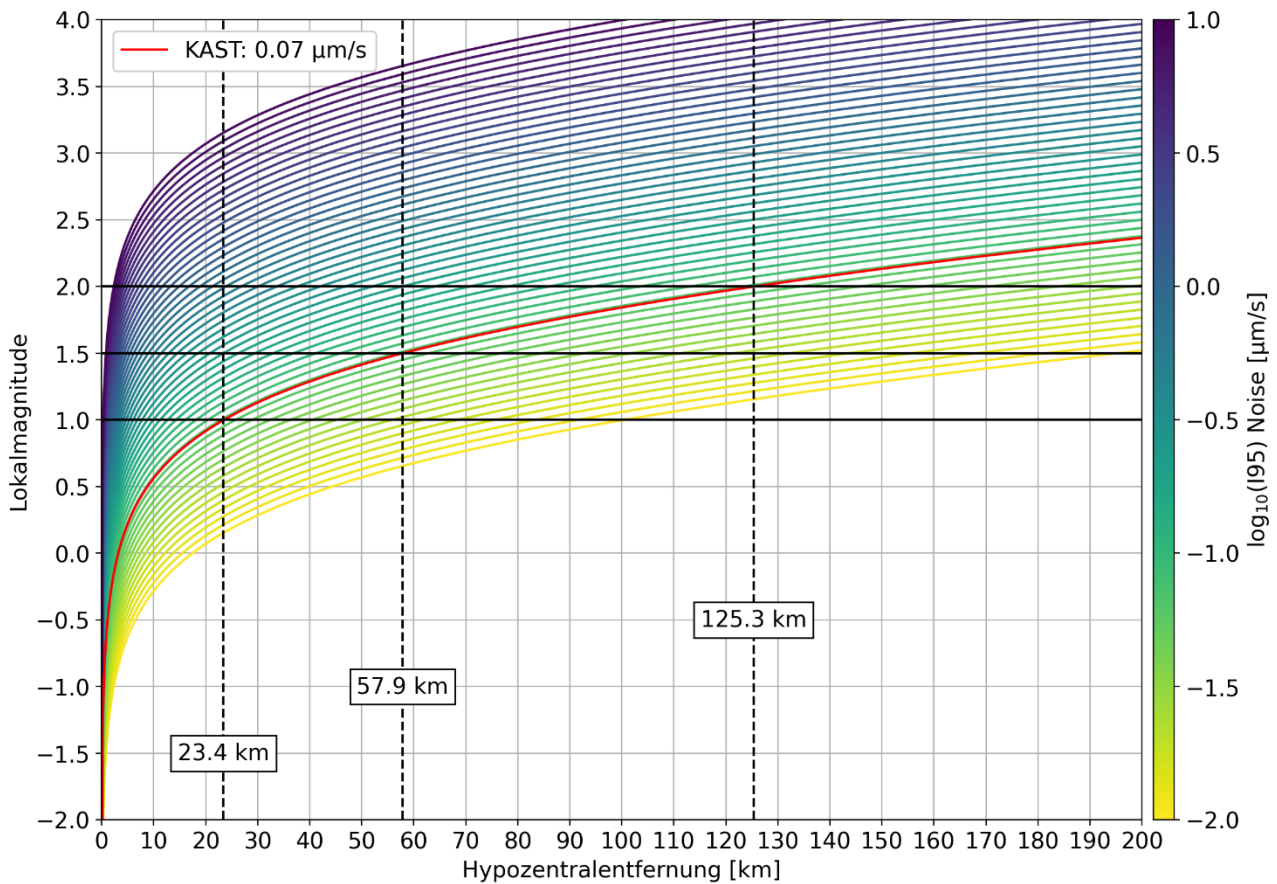


Abbildung 15: Detektionsfähigkeit von seismischen Ereignissen als Lokalmagnituden in Abhängigkeit von Hypozentralentfernung und dem I95-Wert an der Station KAST nach dem Zubau von acht WEA. Der Farbverlauf repräsentiert verschiedene Rauschniveaus zwischen 0,01 – 10 µm/s, die rote Kurve zeigt die Magnituden-Entfernungsbeziehung bei einem Rauschniveau von 0,07 µm/s unter Starkwindbedingungen. Die gestrichelten vertikalen Linien geben die maximale hypozentrale Entfernung an, bei der seismische Ereignisse mit Magnituden von $M_L = 1,0$, $M_L = 1,5$ und $M_L = 2,0$ detektiert werden können.

5. Zusammenfassung

Die Firma DMT GmbH & Co. KG wurde beauftragt den Einfluss von drei, bzw. acht geplanten WEA vom Typ Vestas V150 (6,0 MW) in der Gemarkung Gellinghausen auf das seismische Rauschniveau der seismologischen Messstation KAST zu prognostizieren und hinsichtlich einer möglichen Einschränkung der Aufzeichnungsqualität zu beurteilen. Prognose und Beurteilung erfolgen auf Basis von Messungen an WEA eines vergleichbaren Typs (Vestas V150, 4,2 MW) im Windpark Kröppen. Dabei werden konservative Annahmen im Sinne einer Überschätzung der Einwirkungen getroffen:

- Das aktuelle Rauschniveau (Status Quo) an der Erdbebenstation beschreibt den Zustand unter Starkwindbedingungen.
- Starkwindbedingungen treten am Standort der Station nur in etwa 10 % der Gesamtzeit des Jahres auf.
- Das beschriebene Rauschniveau an der Messstation nach Zubau der WEA beschreibt ein „worst-case“-Szenario, da Einwirkungen angenommen werden, die durch den gleichzeitigen Betrieb aller drei, bzw. acht geplanten WEA unter Starkwindbedingungen hervorgerufen werden, während gleichzeitig bereits das maximale Rauschniveau am Stationsstandort vorliegt.

Unter den getroffenen Annahmen führt die prognostizierte Einwirkung der WEA in beiden Szenarien (drei und acht WEA) dazu, dass das Rauschniveau an der Station KAST durch die Erschütterungen der WEA signifikant erhöht wird. Die zu erwartende Verschlechterung der Aufzeichnungsqualität der Station führt zu einem signifikanten Verlust an Erdbebenregistrierungen. Nichtsdestotrotz liegt das Rauschniveau auch nach Zubau der WEA innerhalb der Grenzen der globalen Noise-Modelle, so dass der Standort weiterhin als ruhig bewertet werden kann.

6. Empfehlungen / Ausblick

Aktuell ist von einer signifikanten Verschlechterung der Standortqualität am Standort KAST unter Annahme eines „worst-case“-Szenarios, dass sowohl die geplanten WEA gleichzeitig im gleichen Zustand betrieben werden und Starkwindbedingungen herrschen, die das bereits vorhandene Rauschniveau am Stationsstandort zusätzlich erhöhen, auszugehen.

Diese Bewertung beruht auf einer Prognose, die zum einen auf Messdaten und zum anderen auf fachlichen und wissenschaftlichen Publikationen basiert und dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Eine solche Modellierung beinhaltet immer eine gewisse Unsicherheit. Daher empfehlen wir nach Inbetriebnahme der WEA eine Verifizierung der hier durchgeführten Prognose und Bewertung der Störwirkung in Form einer technischen und fachlichen Überprüfung des Rauschniveaus an der Station KAST. Um den Fall einer signifikanten Verschlechterung der Standortqualität abzudecken, empfehlen wir im Voraus eine Einigung zwischen den Betreibern des Windparks und den Betreibern der Erdbebenmessstation (Universität Münster) über die Durchführung von Kompensationsmaßnahmen.

Als mögliche Kompensationsmaßnahme schlagen wir die Verdichtung des Messnetzes mit (einer) zusätzlichen Messstation(en) vor. Die Anzahl und Verteilung weiterer Messstationen sollte in einer Studie unter Berücksichtigung der Messung von Rauschniveaus potentieller Standorte und unter Hinzunahme der Messung der Standortqualitäten der anderen Erdbebenmessstationen des Gesamtnetzes vorab ermittelt werden.

7. Literatur

Bormann, P., Dewey, J. and IASPEI/CoSOI Working Group on Magnitude Measurement (2014). The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. – In: BORMANN, P. (Hrsg.): New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). Potsdam (GFZ German Research Centre for Geosciences).

FKPE (2012). Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE. DGG-Mitteilungen 3/2012.

Gaßner, L. and Ritter, J. (2023). Ground motion emissions due to wind turbines: observations, acoustic coupling, and attenuation relationships, *Solid Earth* 14(7):785-803, <https://doi.org/10.5194/se-14-785-2023>, 2023.

Gassenmeier, M., Sens-Schönfelder, C., Delatre, M. and Korn, M. (2014). Monitoring of environmental influences on seismic velocity at the geological storage site for CO₂ in Ketzin (Germany) with ambient seismic noise. *Geophysical Journal International* 200(1):524-533.

MWIDE (2019). Einwirkungen durch den Betrieb von Windenergieanlagen auf seismologische Messstationen in NRW. DMT – Fachstelle für Erschütterungsmessungen im Auftrag Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen.

Neuffer, T. and Kremers, S. (2017). How wind turbines affect the performance of seismic monitoring stations and networks. *Geophysical Journal International* 211(3):1319-1327

Neuffer, T., Kremers, S. and Fritschen, R. (2019) Characterization of seismic signals induced by the operation of wind turbines in North Rhine-Westphalia (NRW), Germany. *Journal of Seismology* 23(5):1161–1177

Neuffer, T., Kremers, S., Meckbach, P. and Mistler, M. (2021) Characterization of the seismic wave field radiated by a wind turbine. *Journal of Seismology* 25, 825–844

Peterson, J. (1993): Observation and modeling of seismic background noise, U.S. Geol. Survey Open file report 93 – 322, 95pp.

Ritter, J. (2021): Bericht zur Erarbeitung eines Prognosetools für seismische Immissionen an Erdbeben-Messstationen in Nordrhein-Westfalen (NRW), Karlsruher Institut für Technologie. Tech. rep.

Stammler, K. and Ceranna, L. (2016). Influence of Wind Turbines on Seismic Records of the Gräfenberg Array. *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No. 5, doi: 10.1785/0220160049.

Schofield, R. (2001) Seismic measurements at the stateline wind project. Rept No LIGO T020104-00-/, Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory available at URL <http://www.ligo.caltech.edu/docs>

Styles, P., Stimpson, I., Toon, S., England, R. and Wright, M. (2005). Microseismic and Infrasound Monitoring of Low Frequency Noise and Vibrations from Windfarms: Recommendations on the Siting of Windfarms in the Vicinity of Eskdalemuir, Scotland. Applied and Environmental Geophysics Research Group, Earth Sciences and Geography, School of Physical and Geographical Sciences, Keele University, Keele, Staffs ST5 5BG.

Westwood, R.F. and Styles, P. (2017). Assessing the seismic wavefield of a wind turbine using polarization analysis. Wind Energy 20(11):1841-1850

Xi Engineering Consultants (2014) Seismic vibration produced by wind turbines in the Eskdalemuir region. Release 2.0 of Substantial Research Project, Xi Engineering Consultants Conference House, 152 Morrison Street, Edinburgh, EH3 8EB, xiengineering.com.

Zieger, T. and Ritter, J.R.R. (2017) Influence of wind turbines on seismic stations in the upper rhine graben, SW Germany. Journal of Seismology 22(1): 105 – 122

Zieger, T. (2019) Experimental quantification of seismic signals induced by wind turbines. PhD thesis, Karlsruhe, URL <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000096453>