

## **Bericht zur**

# **Erarbeitung eines Prognosetools für seismische Immissionen an Erdbeben-Messstationen in Nordrhein-Westfalen (NRW)**

für das  
Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und  
Energie des Landes NRW

Ref. VIB2 - Bergbau, Geologischer Dienst  
Berger Allee 25, 40213 Düsseldorf

29. Januar 2021

Prof. Dr. Joachim Ritter  
Geophysikalisches Institut  
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

## **Aufgabenstellung**

1. Erarbeitung eines Prognosetools für seismische Immissionen an Erdbeben-Messstationen in Nordrhein-Westfalen (NRW)

a) Konzeption zur Immissionsabschätzung

b) Bestimmung der Rauschverhältnisse in Jahren 2018 und 2019 an 49 vorhandenen seismologischen Messstationen in NRW: Geologischer Dienst von NRW (13 Messstationen), Deutsches Seismologisches Regionalnetzwerk (6 Messstationen), Ruhr-Universität Bochum (17 Messstationen) und Universität zu Köln (13 Messstationen)

c) ggf. Beschreibung der notwendigen Daten für genauere Prognosen

2. Erstellung eines Berichts

a) Status Quo der Rauschbelastung seismischer Messstationen in NRW

b) Festlegung von Schutzradien für Erdbeben-Messstationen in NRW basierend auf derzeitigen Rauschpegeln und bekannten Emissionen, ggf. in Absprache mit den Stationsbetreibern

c) Weitere Empfehlungen

3. Ggf. Vorstellung der Ergebnisse in NRW im Rahmen einer Präsentation

## **Aufgabenerledigung**

Zu 1.: Es wurde ein neues Konzept der seismischen Immissionsabschätzung erstellt, das auf gemessenen Emissionen von Windenergieanlagen (WEA) mit 2 MW und 3 MW Leistung beruht. Emissionen größerer WEA ( $\geq 4$  MW) müssen abgeschätzt werden, da Messdaten fehlen. Die Rauschverhältnisse an den seismologischen Messstationen in NRW wurden bestimmt und bewertet.

Zu 2.: Im vorliegenden Bericht wird der Status Quo der Messnetze in NRW bzgl. ihrer Rauschbelastung beschrieben und es werden Schutzradien für seismologische Messstationen vorgeschlagen. Diese Schutzradien berücksichtigen eine Kategorisierung der Messstationen, eine gleichmäßige räumliche Überdeckung der seismologischen Überwachung und eine möglichst geringe Behinderung des Ausbaus der WEA. Es wurde mit den Stationsbetreibern des Geologischen Dienstes, der Ruhr-Universität Bochum und der Universität zu Köln mehrfach bzgl. der Messstationen und ihrer Eigenschaften gesprochen sowie das hier vorgelegte Konzept diskutiert.

Zu 3.: Erste Ergebnisse wurden am 23. 11. 2020 und 16. 12. 2020 online Vertretern des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes NRW vorgestellt.

## **Inhaltsverzeichnis:**

1. Einführung in die generelle Problematik	1
1.1 <i>Erdbebenmessung</i>	1
1.2 <i>Seismische Signale von Windenergieanlagen</i>	5
1.3 <i>Einflussfaktoren auf WEA-Emissionssignale an Erdbebenmessstationen und deren Prognose</i>	7
1.4 <i>Prognosemöglichkeiten für Emissionen an einem Standort</i>	10
2. Status Quo der Rauschbelastung seismischer Messstationen in NRW	13
3. Kategorisierung und Schutzradien für Erdbeben-Messstationen in NRW basierend auf den derzeitigen Rauschpegeln und der Netzwerkfunktionalität	20
3.1 <i>Kategorisierung</i>	20
3.2 <i>Festlegung der Schutzradien</i>	25
4. Zusammenfassung und weitere Empfehlungen	30
Referenzen	32
Anhang	

# 1 Einführung in die generelle Problematik

## 1.1 Erdbebenmessung

Im Land Nordrhein-Westfalen (NRW) können heftige Schadenserdbeben auftreten. Dies ist in der Vergangenheit bereits mehrfach geschehen (Leydecker, 2011 oder [https://www.gd.nrw.de/gg\\_le\\_erdbebenkatalog\\_600.htm](https://www.gd.nrw.de/gg_le_erdbebenkatalog_600.htm)), z.B.:

Düren, 1640: Intensität ~ VIII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 5,4

Verviers (Belgien), 1692: Intensität ~ VIII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 6,8

Düren, 1756: Intensität ~ VIII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 6,4

Herzogenrath, 1877: Intensität ~ VIII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 4,4

Tollhausen, 1878: Intensität ~ VIII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 5,6

Euskirchen, 1951: Intensität ~ VII-VIII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 5,7

Grenzgebiet Niederlande, Roermond, 1992: Intensität ~ VII, Lokalmagnitude  $ML$  ~ 5,9

Auch archäoseismologische (Hinzen & Schütte, 2003; Reicherter et al., 2011) und paläoseismologische (Vanneste et al., 1999; Skupin et al., 2008; Grützner et al., 2016) Studien deuten auf seltene aber sehr heftige Erdbeben in NRW. Es ist daher aufgrund der tektonischen Verhältnisse auch in der Zukunft zu erwarten, dass Erdbeben mit großer Schadenswirkung und Todesfällen auftreten werden (vgl. Camelbeeck et al., 2020 oder Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2019).

Der Geologische Dienst (GD) des Landes Nordrhein-Westfalen betreibt daher im Auftrag der Landesregierung einen Erdbebendienst. Der GD nutzt zu seiner Unterstützung im Bedarfsfall auch Daten der Erdbebendienste an den Universitäten Bochum und Köln. Dem GD sind u.a. die zwei folgenden Aufgaben zugeordnet sind (siehe Betriebssatzung für den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen, 2017): a) Betrieb des Erdbebenalarmsystems ab (Lokal-) Magnitude ( $ML$ ) 3 und b) Erfassung der Erdbeben ab  $ML = 1$  (Lokalmagnitude). Die Lokalmagnitude entspricht der bekannten Richter-Magnitude oder Richterskala und ist eine messtechnisch ermittelte Größe.

Zu a) Das Erdbebenalarmsystem (EAS NRW) muss vollautomatisch Erdbeben ab Magnitude  $ML = 3$  detektieren, erkennen, lokalisieren und eine Meldung erstellen. Ab  $ML = 3$  sind potenzielle Schäden zu erwarten, die Bevölkerung nimmt ein solches Ereignis wahr, und es müssen ggf. sicherheitsrelevante Entscheidungen getroffen werden. Für eine entsprechende vollautomatische Auswertung sind qualitativ sehr gute Registrierungen der Bodenbewegungen notwendig, d.h. Registrierungen mit einem sehr guten Signal-zu-Störung-Verhältnis. Dies betrifft besonders den Frequenzbereich von ca. 1-20 Hz.

Zu b) Die Detektion und Lokalisierung der Seismizität ab  $ML = 1$  ist eine sehr dringliche Aufgabe, um einen aussagekräftigen Überblick über seismische Aktivität zu erhalten und potenziell aktive tektonische Störungen im Untergrund für eine Gefährdungsabschätzung zu erkennen.

b1) Die Lokalisierung basierend auf Beobachtungen an mehreren Messstationen ist notwendig, um aktive tektonische Störungen geometrisch abzubilden. Somit können potenziell schadensrelevante Gebiete kartiert und ausgewiesen werden. Besonders neu entwickelte

Auswertemethoden mit Kreuzkorrelationsmessungen und Algorithmen basierend auf künstlicher Intelligenz können zusammen mit kontinuierlichen Registrierungen heutzutage erfolgreich verwendet werden, um (derzeit schwach) aktive Störungen sichtbar zu machen (z.B. Ross et al., 2019). Auf diese Weise kann die seismische Gefährdung deutlich besser abgeschätzt werden, als dies noch vor wenigen Jahren möglich war. Die Grundlage hierfür ist aber die möglichst störungsfreie Messung der Bodenbewegung an den Erdbebenmessstationen.

b2) Die Erfassung schwacher Erdbeben ist notwendig, um eine verlässliche Gutenberg-Richter-Verteilung bestimmen zu können (b-Wert des Gutenberg-Richter-Gesetzes). Diese Standardmethodik wird verwendet, um die Häufigkeit stärkerer Erdbeben zu prognostizieren und somit eine valide Gefährdungsabschätzung zu erreichen. Gefährdungsanalysen fließen dann wiederum in Risikoanalysen oder Baunormen ein.

b3) Je nach Untergrundbeschaffenheit und bei relativ flacher Herdtiefe ( $< 5$  km) können Erdbeben bereits ab  $ML \sim 1$  spürbar sein. Dies betrifft z.B. durch Bergbauaktivitäten ausgelöste seismische Ereignisse; aktuelle Beispiele ereignen sich derzeit bei Hamm. Solche Erschütterungen treten auch nach einer Betriebsstilllegung auf. Groos et al. (2013) zeigen eine Spürbarkeit ab  $ML = 1,3$  für flache Erdbeben. Potenziell spürbare Erdbeben sollten generell von einem Erdbebendienst erfasst werden, um betroffene Bürger\*innen und Behörden informieren zu können.

b4) Die Erfassung des Beginns einer schwachen Erdbebentätigkeit kann helfen, rechtzeitig den Beginn einer stärkeren Aktivität zu erkennen (Vorbeben).

b5) Die Erfassung schwacher Erdbeben nach einem stärkeren Ereignis ist wichtig, um die Bruchfläche zu bestimmen und beispielsweise zu erkennen, welche Teile einer Störung noch unter Spannung stehen (Nachbebenverteilung).

b6) Eine Änderung der Anforderung  $ML = 1,0$  zu höheren Werten führt zu einem deutlichen Beobachtungsverlust. Das logarithmische Gutenberg-Richter-Gesetz besagt, dass bei einer Grenzmagnitude von 1,5 statt 1,0 mehr als 60% aller bisher mit der Grenzmagnitude 1,0 erfassten Erdbeben kleiner  $ML = 2$  nicht mehr erfasst würden. Dieser Verlust würde die unter b1) bis b5) beschriebenen Aufgaben stark einschränken.

Neben den natürlichen Erdbeben sind auch zunehmend menschlich induzierte Erdbeben bzgl. Schadenswirkungen zu berücksichtigen. Als Beispiel sei hier genannt, dass Flutungen in aufgelassenen Bergwerken Spannungsänderungen hervorrufen, die Erdbeben auslösen können. (Gruben-) Flutungen werden daher meist seismologisch überwacht, um bei einer beginnenden Mikroseismizität und einer potenziell erheblichen Schadenswirkung eingreifen zu können. Ähnliches gilt für (tiefen-)geothermische Anlagen, die Erdbeben induzieren können. Geothermie-Anlagen und Grubenflutungen können z.B. mit seismologischen Ampelsystemen gesteuert werden, um Schäden zu vermeiden. Diese Ampelsysteme basieren auf der Beobachtung sehr schwacher Erdbeben ( $ML \ll 2$ ) bevor es zu einem größeren Bruchereignis ( $ML > 2$ ) kommt.

Diese Beispiele sollen zeigen, dass negative Einflüsse auf seismologische Messstationen von außen, welche die Datenqualität der Registrierungen beeinflussen, generell schädlich und zu vermeiden bzw. zu vermindern sind.

Die Erdbebenregistrierung in NRW ist durch zwei Faktoren intrinsisch negativ belastet:

- a) Die geologischen Voraussetzungen sind in vielen Landesteilen ungünstig, da besonders in der seismisch aktiven Region der Niederrheinischen Bucht und im Niederrheinischen Tiefland keine Festgesteine oberflächennah anstehen. Festgesteine mit günstigen Ankopplungseigenschaften für die Seismometer und mit geringen Dämpfungseigenschaften für die Erdbebensignale sind besonders auf dem Rheinischen Schiefergebirge sowie im Weser- und Osnabrücker Bergland vorhanden.
- b) Die hohe Bevölkerungsdichte mit einhergehenden seismischen Emissionen durch Verkehr und hoher industrieller Dichte (Emissionen von Maschinen) verursachen einen hohen seismischen Rauschpegel, besonders in der Niederrheinischen Bucht, im Niederrheinischen Tiefland und in Teilen der Westfälischen Bucht.

#### *Aufgaben der regionalen und überregionalen Erdbebendienste*

Die Erdbebenmessstationen des GD dienen der hoheitlichen Überwachung der Seismizität in NRW als Landeserdbebendienst, s.o. Ein Datenaustausch mit den Universitäten in Bochum und Köln erfolgt bisher nur bei Bedarf. Das vom GD betriebene seismologische Messnetzwerk ist vor allem um die Niederrheinische Bucht und in der nördlichen Eifel konzentriert (Abb. 1), wo historisch die stärksten Erdbeben aufgetreten sind.

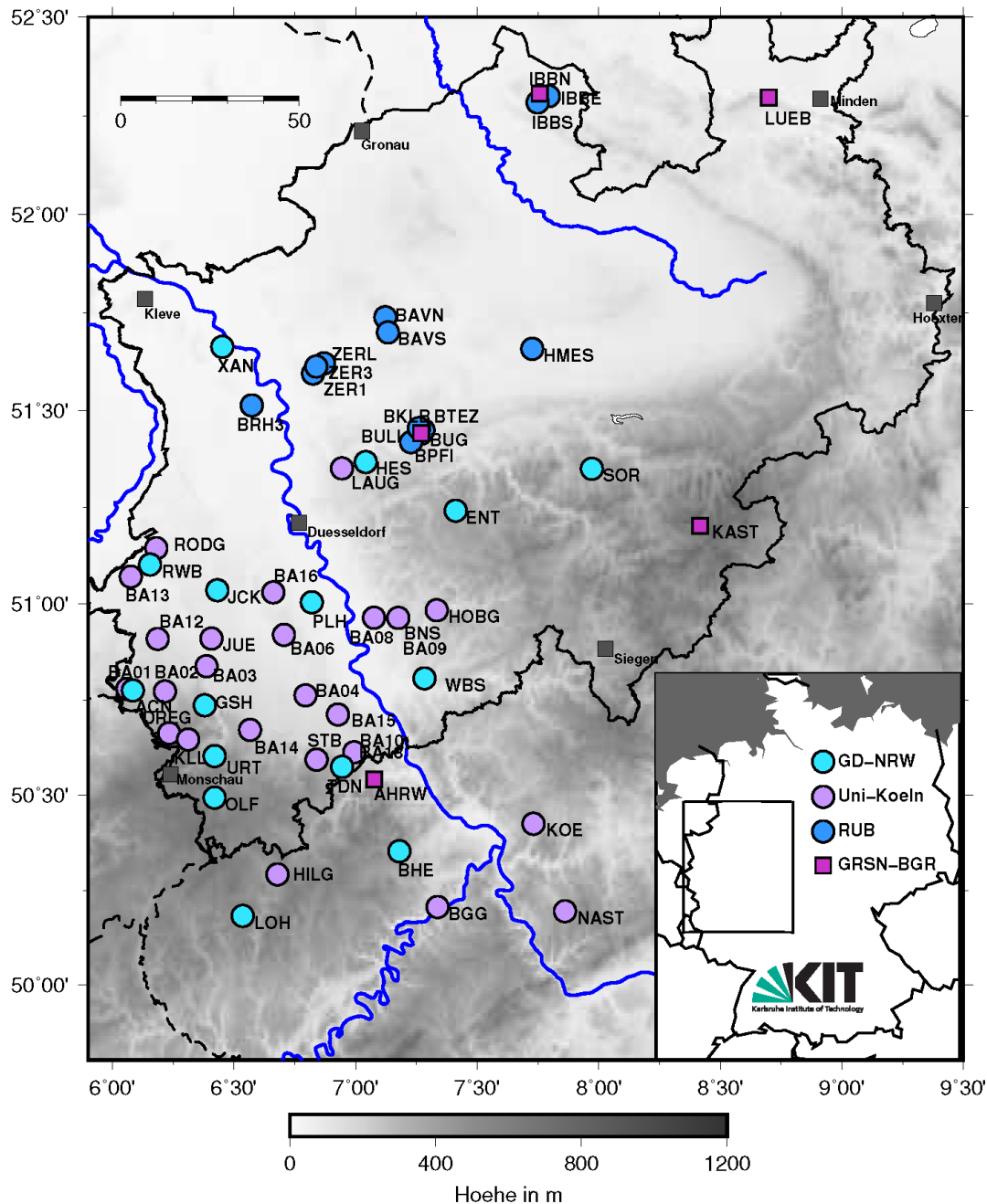
Die Erdbebenmessstationen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) dienen der deutschlandweiten Beobachtung der Seismizität und für Forschungszwecke, z.B. zur Überwachung des internationalen Kernwaffenteststopp-Abkommens. Diese hochwertigen, breitbandigen Messstationen bilden seit 1991 das Deutsche Seismologische Regionalnetz (GRSN – German Regional Seismic Network; Korn, 2002), und es wird in Zusammenarbeit mit lokalen Partnern (Universitäten und staatliche Erdbebendienste) betrieben. Die Daten sind über den EIDA-Knoten der BGR online verfügbar (Stammler et al., 2020).

Die Erdbebenmessstationen der Ruhr-Universität Bochum dienen vor allem der Überwachung von bergbaulich induzierten Erdbeben im Ruhrgebiet und bei Ibbenbüren. Sie stellen somit einen Erdbebendienst im Osten von NRW dar, wo der GD keine ausreichenden Beobachtungsmöglichkeiten hat (Abb. 1). Es wird seit 1983 kontinuierlich überwacht. Historisch sind Erdbeben östl. ca. 7,5° östlicher Länge bekannt, die derzeit nur vom Netzwerk der Ruhr-Universität Bochum adäquat registriert werden (z.B.  $M_L = 2,4 - 2,7$  am 16. Jan. 2019). Bedingt durch den Grubenwasseranstieg ist lokal induzierte Seismizität nicht auszuschließen, durch die ggf. Gebäudeschäden verursacht werden können. Die Daten sind online verfügbar (Ruhr-Universität Bochum, 2007; Stammler et al., 2020).

Die Erdbebenmessstationen der Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg, wurden nach der Einrichtung der Erdbebenstation im Nachgang des starken Erdbebens von Euskirchen 1951 installiert. Diese Messstationen erfassen die Erdbebentätigkeit in der Niederrheinischen Bucht und haben die Seismizität in der Niederrheinischen Bucht seit fast 70 Jahren dokumentiert (Hinzen & Reamer, 2007; Hinzen et al., 2020). Eine Besonderheit ist das Starkbebennetzwerk mit Beschleunigungssensoren (Hinzen & Fleischer, 2007), Messstationen BA01-BA18 in Abb. 1. Dieser Erdbebendienst stellt eine wichtige regionale Ergänzung zum GD dar. Weiterhin werden mögliche bergbaulich induzierte Erdbeben im rheinischen Braunkohlenrevier mit weiteren 10 Messstationen im Auftrag der RWE überwacht (hier nicht untersucht, da proprietäre Daten). Die Daten der Erdbebenstation Bensberg werden an der Universität zu Köln für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet, um die

tektonische Seismizität besser zu verstehen. Die Daten sollen zukünftig über EIDA verfügbar sein (Stammler et al., 2020), für die Echtzeit-Bereitstellung müssen noch dringende gerätetechnische Investitionen erfolgen.

Die Erdbebenmessstationen des GD, der Universitäten Bochum und zu Köln sowie des Deutschen Seismologischen Regionalnetzes (betrieben durch die BGR) sind bereits in den wenigen Lücken positioniert, wo eine geringe Störeinwirkung durch natürliche und anthropogene Signale zu erwarten ist. Dies bedeutet, dass Verlegungen von Messstationen regional sehr schwierig werden, wenn neue Störquellen hinzukommen. Abb. 1 zeigt den derzeitigen Stand der Erdbeben-Messung in NRW durch die verschiedenen o.g. Institutionen.



**Abb. 1: Erdbeben-Messstationen in NRW und im Norden von Rheinland-Pfalz, die von NRW Einrichtungen und in Kooperation mit der BGR betrieben werden. Die meisten dieser Messstationen wurden bzgl. ihrer lokalen Rauschpegel untersucht. Die Messstationen BRH3 und BAVS wurden inzwischen außer Betrieb genommen.**

## 1.2 Seismische Signale von Windenergieanlagen

Windenergieanlagen (WEA) sind physikalisch vereinfacht große mechanische Schwinger, die Bodenbewegungen anregen (Nagel et al., 2019; Zieger et al., 2020). Diese Bewegungen breiten sich als elastische Wellen im Erdboden aus und sie sind physikalisch äquivalent zu Erdbebenwellen bzw. seismischen Wellen (Stammler & Ceranna, 2016; Westwood & Styles, 2017; Friedrich et al., 2018). Diese Emissionen tragen daher zum seismischen Rauschen bei, und sie können mit den bekannten Verfahren zur Analyse von Erdbebenwellen untersucht werden (Stammler & Ceranna, 2016; Neuffer et al., 2019; Friedrich et al., 2018).

Wenn die emittierten elastischen Wellen als Immissionen an Erdbebenmessstationen registriert werden, dann erhöhen diese zunächst den lokalen Rauschpegel (Abb. 2). Wenn der erhöhte Rauschpegel die Detektion von Erdbeben oder die Analyse der Erdbebensignale beeinträchtigt oder verhindert, kann die Aufgabenstellung einer Erdbebenüberwachung beeinträchtigt oder verhindert werden (Stammler & Ceranna, 2016; Neuffer et al., 2017; Zieger & Ritter, 2018). Hierbei ist zu beachten, dass eine Erdbebenmessstation nicht isoliert, sondern als Teil eines Netzwerks betrachtet werden muss. Dies bedeutet, dass einerseits benachbarte Messstationen u.U. eine positive Kompensation bewirken oder andererseits die Funktionstätigkeit eines gesamten Netzwerks beeinträchtigt werden kann, wenn eine einzelne Messstation beeinträchtigt wird.

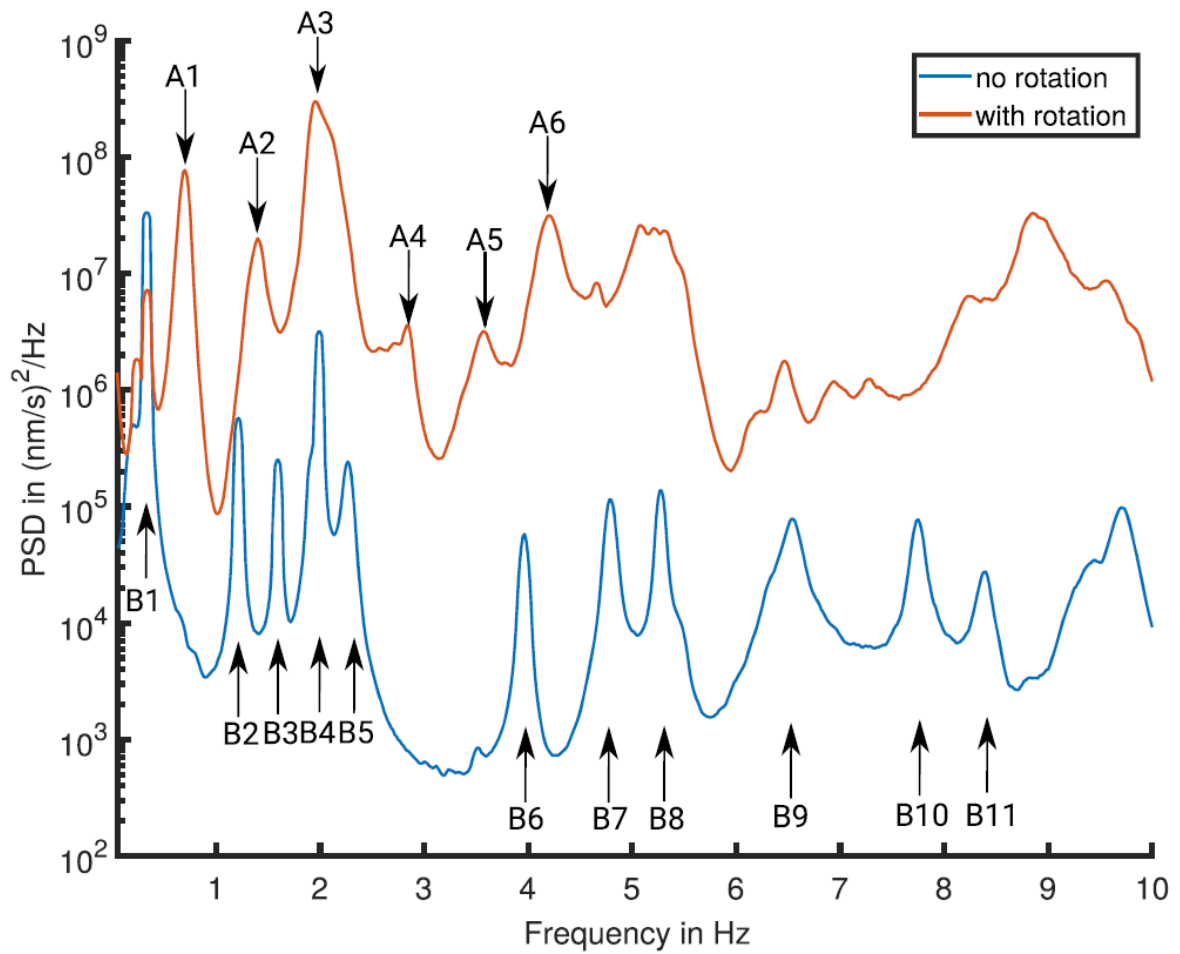
Die elastischen Schwingungen einer WEA bestehen aus zwei hauptsächlichen Anteilen (Nagel et al., 2019): a) Eigenschwingungen der Anlage (auch Eigenmoden, Eigenformen, Biegeeigenfrequenzen etc. genannt) z.B. durch Windlasten und b) Anregungen des WEA-Bauwerks durch die Rotorbewegung.

Zu a): Die Eigenschwingungen der WEA haben diskrete Frequenzen, die sich aus der Geometrie und Steifigkeit (Elastizitätsparameter etc.) der WEA-Bauteile berechnen lassen. Sie sind für typische WEA dominant im Frequenzbereich 0,3-10 Hz (Nagel et al., 2019).

Zu b): Die Anregungen durch die Rotorbewegung werden in zwei Arten unterscheiden: 1-P-Anregung durch *eine* komplette Rotordrehung und 3-P-Anregung durch die *drei* fache Rotordrehung, d.h. der Rotorblatt-Durchgangsfrequenz am WEA-Turm (mit typischer Weise 3 Rotorblättern). Diese Bewegungen einer WEA und ihre seismischen Emissionen sind frequenzmäßig fast diskret und erzeugen in Frequenzspektren der Bodenbewegung deutliche Spitzen (Abb. 2). Besonders sind diese Spitzen im Frequenzbereich von ca. 0,8 Hz bis ca. 10 Hz über größere Distanzen (>1 km) beobachtbar. Höhere Frequenzen werden meist stärker abgedämpft.

Das Frequenzband 0,25-10 Hz ist bei der lokalen Erdbebenbeobachtung wichtig, d.h. Störungen wirken sich unmittelbar auf die Detektion und Auswertung der Erdbebensignale aus (Stammler & Ceranna, 2016; Neuffer et al., 2017).



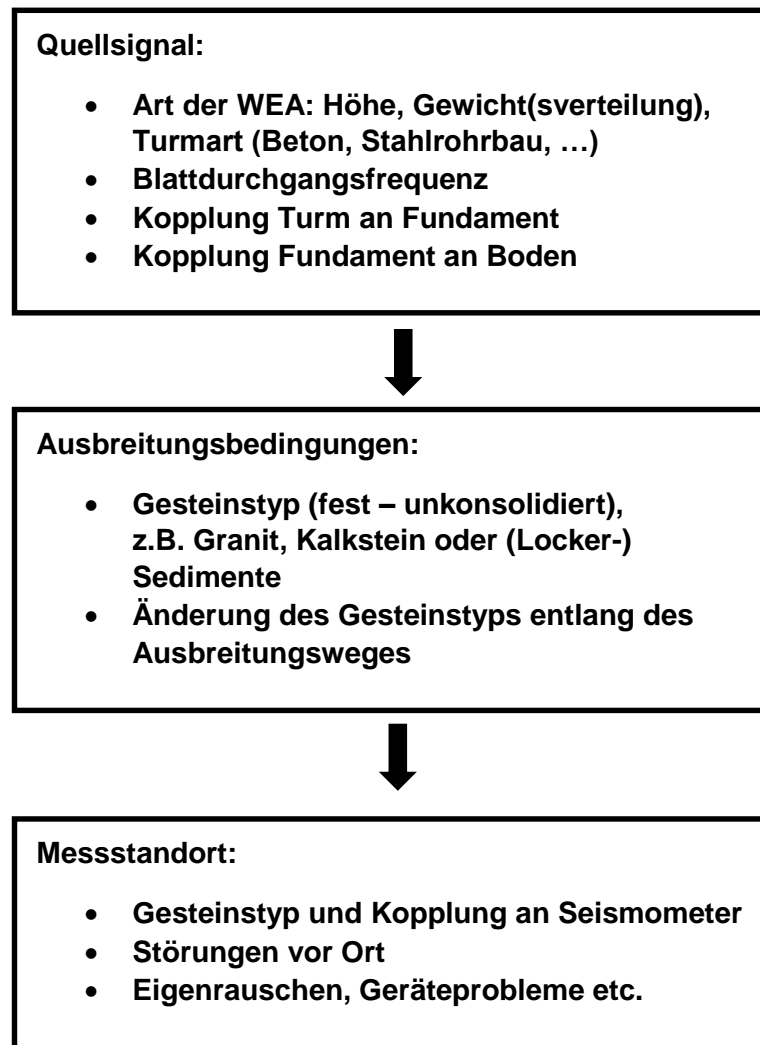


**Abb. 2:** Leistungsdichtespektrum (*power spectral density*) der Bodenbewegung (Schwinggeschwindigkeit) an einer Windenergieanlage. Die blauen Spitzen (B1-B11) entsprechen den Eigenmoden der Anlage, die ohne Rotation der Flügel auftreten. Die roten Spitzen (A1-A6) entsprechend den 3-P-Anregungen während des Rotationsbetriebs, aus Zieger et al. (2020).

### 1.3 Einflussfaktoren auf WEA-Emissionssignale an Erdbebenmessstationen und deren Prognose

Die emittierten und imitierten seismischen Signale von WEA hängen maßgeblich von drei Faktoren ab, die wiederum untergliedert werden können:

Quellsignal – Ausbreitungsbedingungen – Messstandort (Abb. 3).



**Abb. 3: Einflussfaktoren von WEA-Emissionen auf die gemessene Bodenbewegung.**

Eine rechnerische, deterministische Abschätzung der Störsignale (Verlauf, Frequenz und Amplitude) wäre eigentlich wünschenswert, um Bodenbewegungen genau zu prognostizieren. Theoretisch ist dies auch möglich: Es würde voraussetzen, man würde a) rechnerisch die Schwingungen der WEA als Quellsignal vollständig kennen (z.B. als Designspektrum), b) ihren Ausbreitungsmechanismus, d.h. die elastische Wellenausbreitung im Untergrund, vollständig simulieren können sowie c) die lokalen Rausch- und Ankopplungsbedingungen an einer Erdbebenmessstation kennen.

Zu a): Es gibt unterschiedlichste WEA-Bauarten (Leistungen, Höhen und Massen, mit und ohne Getriebe, verschiedene Fundamentarten usw.) verschiedenster Hersteller. Die Eigenschaften der WEA sind meist nicht im Detail bekannt, teilweise sogar Betriebsgeheimnisse. Eine Berechnung aller in Frage kommenden WEA-Emissionsanteile ist zudem numerisch sehr aufwendig daher fast unrealistisch. Zielführend ist die Verwendung von Näherungen, um die entscheidenden Effekte zu simulieren (z.B. Gortsas et al., 2017; Nagel et al., 2019). Zur Abschätzung von seismischen Emissionen (Bodenbewegungen) können u.U. gemessene Designspektren von häufig gebauten WEA ausreichen. Solche Spektren wurden bisher aber kaum publiziert (Zieger et al., 2020 u.a.), es gibt auch keine Vorgaben zur Messung eines Designspektrums (wo ? wie lange ? etc.). Besonders für neuartige große WEA mit über 3 MW Leistung sind Designspektren der Bodenbewegung nicht publiziert. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

Zu b): Entlang des Ausbreitungsweges hängen die Änderungen der Amplituden  $A$  der emittierten Wellen von der geometrischen Amplitudenabnahme der Wellenfront und den elastischen Eigenschaften des Gesteinsmaterials ab (Qualitätsfaktoren für anelastische Dämpfung und Streudämpfung). Die geologischen Verhältnisse sind an der Erdoberfläche meist sehr gut bekannt. Die elastischen Eigenschaften der tieferen Gesteinskörper sind dagegen oft nur grob schätzbar oder aufwendig messtechnisch zu erfassen. Eine Alternative ist die Bestimmung von mittleren frequenzabhängigen Amplituden-Abklingfunktionen für verschiedene Untergrundarten. Profilmessungen und entfernungsabhängige Amplitudendiagramme der spektralen Spitzen (siehe Abb. 2) zeigen oft ein angenähertes Abklingverhalten mit

$$A \sim r^{-b} \quad (\text{Gl. 1}),$$

wobei  $r$  die Entfernung von der WEA und  $b$  der Abkling- oder Dämpfungsfaktor ist. Hierfür gibt es wenige publizierte Ergebnisse. Tabelle 1 stammt aus Lerbs et al. (2020) und fasst verschiedene Ergebnisse für  $b$  zusammen. Abb. 4 zeigt frequenzabhängige  $b$ -Werte aus den Publikationen in Tab. 1 und Zieger (2019).

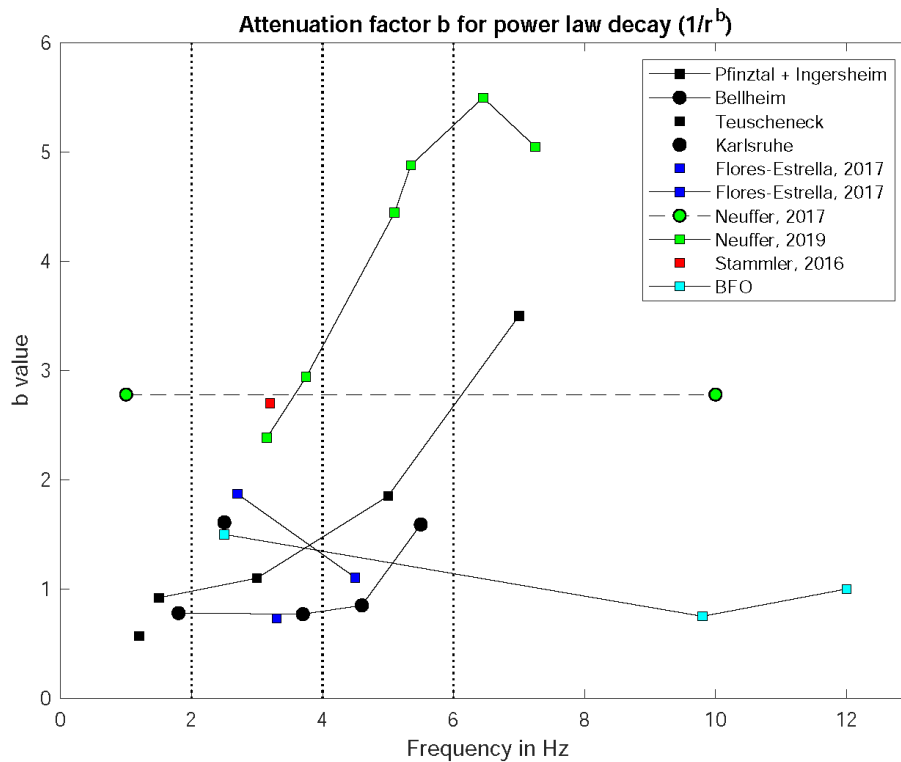
Bei Grenzen zwischen geologischen Einheiten, an denen starke lithologische bzw. petrophysikalische Kontraste auftreten, können laterale Variationen des  $b$ -Werts auftreten. Die damit verbundenen Änderungen der WEA-Emissionen sind noch nicht systematisch erforscht.

Zu c): Wenn die Messdaten der Erdbebenmessstationen über längere Zeiträume ( $> 1$  Jahr) vorliegen, dann können die lokalen Rauschbedingungen und Untergrundeffekte (ggf. lokale Abminderungs- oder Verstärkungseffekte bzgl. der Wellenamplituden, „*site effects*“) sehr gut bestimmt werden. Längerfristige Messungen können zusammen mit Winddaten verwendet werden, um windabhängige Störquellen (z.B. WEA) zu identifizieren (Stammler & Ceranna, 2016; Lott et al., 2017). Für Beispiele in NRW siehe Abbildungen in Anhang 2.

Oft erzeugen nicht nur WEA-Einzelanlagen die beobachteten seismischen Emissionen sondern Windparks mit mehreren WEA. Hierzu gibt es bisher wenige Erkenntnisse über die gemeinsame Fernwirkung der WEA an einem Immissionspunkt. Neuffer et al. (2019) finden eine Zunahme der Immissionen mit dem Faktor  $\sqrt[2]{N}$  für  $N$  einzelne WEA in einem Windpark. Zieger (2019) und eigene Untersuchungen zeigen zudem, dass die jeweilige Entfernung der einzelnen WEA eines Windparks zu einem Immissionspunkt wichtig sein kann, da die nächst gelegene WEA u.U. einen überproportionalen Einfluss wegen der geringeren Dämpfung entlang des Ausbreitungsweges hat.

**Tabelle 1: Vergleich von frequenzabhängigen Dämpfungsfaktoren. *f*: Frequenz, *b*: Dämpfungsfaktor. Flores Estrella et al. (2017) berechneten Dämpfungsfaktoren für zwei Windparks mit 2 WEA und 5 WEA. Aus: Lerbs et al. (2020).**

<i>f</i> < 3Hz							
Autoren	Anzahl WEA	<i>f</i> in Hz	<i>b</i>	<i>f</i> in Hz	<i>b</i>	<i>f</i> in Hz	<i>b</i>
Lerbs et al. (2020)	1	1.0-1.2	0.7	1.5-1.8	1.1	2.35-2.55	1.1
Flores Estrella et al. (2017)	2					2.7	1.87
Zieger & Ritter (2018)	3			1.8	0.78		
<i>f</i> > 3Hz							
Autoren	Anzahl WEA	<i>f</i> in Hz	<i>b</i>	<i>f</i> in Hz	<i>b</i>	<i>f</i> in Hz	<i>b</i>
Lerbs et al. (2020)	1	3.25-3.45	1.1	4.05-4.4	1.3	5.0-5.5	2.3
Flores Estrella et al. (2017)	5 & 2	3.3	0.73	4.5	1.104		
Zieger and Ritter (2018)	3	3.7	0.77	4.6	0.85	5.5	1.59
Neuffer et al. (2019)	5	3.0-3.3	2.384	3.5-4.0	2.941	5.0-5.2	4.444
		5.2-5.5	4.879	6.3-6.6	5.496	7.1-7.4	5.047



**Abb. 4: Dämpfungsfaktoren *b* für verschiedene Standorte; Quadrate: fester Gesteinsuntergrund, Kreise: unverbundener Gesteinsuntergrund. Die Werte von Neuffer (2017) sind über 1-10 Hz gemittelt.**

#### 1.4 Prognosemöglichkeiten für Emissionen an einem Standort

Eine Kombination der o.g. Einflussfaktoren (1) - (3) wird in Lerbs et al. (2020) vorgeschlagen, um abzuschätzen, ob eine (geplante) WEA den Rauschpegel einer seismologischen Messstation beeinflussen kann. Man kann mit diesem Verfahren auch abschätzen, wie weit eine WEA von einer Messstation entfernt sein sollte, um sie nicht zu stören (Lerbs et al., 2020). Man verwendet dabei ein gemessenes Quell- oder Designspektrum einer WEA und berechnet die Amplitudendämpfung zwischen WEA und Erdbebenmessstation mit Dämpfungskurven (vgl. Gl. 1 bzw. Abb. 4). Die berechneten Werte der Immissionen durch die WEA an einer Erdbebenmessstation vergleicht man dann mit den dortigen realen Rauschverhältnissen (zu Rauschspektren von Messstationen in NRW siehe auch Abschnitt 2). Ob ein Störeinfluss vorliegt, muss dann z.B. mit einem Schwellenwert festgelegt werden. Dieser Schwellenwert kann z.B. 95 % oder 99 % der üblicherweise auftretenden Rauschamplituden sein (zu I95- und I99-Grenz- oder Schwellenwerten siehe Groos & Ritter, 2010). Dieser Schwellenwert sollte dann durch Immissionen nicht überschritten werden.

Die Umsetzung der Methode von Lerbs et al. (2020) ist in NRW zzt. nur eingeschränkt möglich:

- Es gibt keine Designspektren für viele WEA-Typen, besonders für neuartige WEA, die 4 MW und mehr erzeugen.
- Eine Schwierigkeit der Bestimmung der Emissionswirkung besteht darin, dass die Kopplung WEA-Fundament mit dem Untergrund sehr unterschiedlich sein kann.
- Es gibt für viele geologische Untergrundarten keine Dämpfungskurven (bzw. b-Werte nach Gl. 1). Evtl. können gemessene Dämpfungskurven anderer Regionen mit ähnlicher Geologie als sinnvolle Schätzgrößen übernommen werden.
- Die Festlegung eines I99- oder I95-Grenzwertes aus den Rauschspektren einer Messstation ist nicht notwendiger Weise an die Aufgabenstellung einer Messstation gebunden.

Hier soll nun ein modifiziertes Verfahren nach Lerbs et al. (2020) vorgeschlagen werden, welches sich an der Aufgabenstellung einer Messstation orientiert, d.h. für den Fall, dass Erdbebenwellen einer bestimmten Magnitude gemessen und ausgewertet werden sollen. Dieses modifizierte Verfahren ergibt Schwellenwerte, die alternativ zu I95- oder I99-Grenzwerten in Lerbs et al. (2020) zu sehen sind.

Ausgangspunkt für das Folgende ist, dass Erdbeben einer vorgegebenen Magnitude in einer bestimmten Distanz detektiert werden sollen oder die Einsatzzeiten der zugehörigen Bebenphasen abgelesen werden sollen (z.B. für eine Lokalisierung des Erdbebens). Die Orientierung der Messeigenschaften eines Erdbebennetzwerks an einer Aufgabenstellung wird z.B. von Baisch et al. (2012) ähnlich für die Überwachung induzierter Erdbeben formuliert. Dieses Vorgehen definiert über die Magnitudengleichung (Gl. 2) die unverrauscht zu messenden Bodenbewegungsamplituden:

$$ML = \log_{10}(A) + 1,11 \log_{10}(R) + 0,00189 R - 2,09 \quad (\text{Gl. 2})$$

mit  $A$ : max. Amplitude in nm (standardisiertes Wood-Anderson-Seismometer) und  $R$ : Hypozentralentfernung in km. Gl. 2 entspricht den IASPEI-Empfehlungen und wird vom GD angewandt.

Die Umrechnung in Bodenschwing-Amplitude aus Gl. 2 ergibt:

$$A = 10^{(ML - 1,11 \log_{10}(R) - 0,00189 R + 2,09)} \quad (\text{Gl. 3}).$$

Tabelle 2 enthält beispielhaft Werte von Amplituden  $A$  in Abhängigkeit von der Entfernung  $R$ . Hierbei entspricht  $A_{S_{max}}$  der maximalen Scherwellen- oder S-Wellenamplitude (Bodenverschiebung), mit welcher die Magnitude nach Gl. 2 bestimmt wird.  $A_{P_{erst}}$  ist die Amplitude der Kompressions- oder P-Wellen (Verschiebung), die zuerst an einer Messstation ankommt (Ersteinsatz) und mit welcher ein Erdbeben lokalisiert wird.  $A_{P_{erst}}$  wird hier aus einem empirischen Faktor 0,2 relativ zu  $A_{S_{max}}$  abgeschätzt (vgl. Baisch et al., 2012), der dem mittleren Verhältnis von P- zu S-Wellenamplituden entspricht.

Zur Übertragung der Wellenamplitude  $A_{P_{erst}}$  in Größenordnungen der Rauschamplituden wird zur Veranschaulichung folgende Betrachtung gewählt: Wenn die P-Wellen des Ersteinsatzes mit einem Signal-Stör-Verhältnis von mindestens 2 bearbeitet werden soll, dann ist der maximale erlaubte Amplitudenwert des Rauschens ca. die Hälfte von  $A_{P_{erst}}$ . Da die Rauschamplituden für Messstationen in NRW in Abschnitt 2 in Bodenschwinggeschwindigkeiten angegeben sind, erfolgt zudem eine Umrechnung in Geschwindigkeit bei einer Frequenz von 5 Hz ( $v = d \cdot 2 \pi \cdot f$  mit  $v$ : Geschwindigkeit,  $d$ : Verschiebung). Diese maximal mögliche Rauschamplitude entspricht dem Wert  $A_{rausch_{max}}$  in Tabelle 2. Um weiterhin zu berücksichtigen, dass nur mittlere Rauschamplituden für die P-Wellen-Messung entscheidend sind, wird ein Faktor 0,33 zu  $A_{rausch_{max}}$  verwendet, um mittlere zulässige Rauschamplituden  $A_{rausch_{rms}}$  (Bodenschwinggeschwindigkeit) zu erhalten. Es wird empfohlen, dass die Werte  $A_{rausch_{rms}}$  als Schwellenwerte für das Rauschen bzw. Immissionen an Messstationen verwendet werden.

Man erkennt in Tabelle 2 deutlich die nichtlineare Abnahme der Amplituden der Bodenbewegungen mit der Entfernung vom Epizentrum. D.h. je weiter eine Messstation vom Epizentrum entfernt ist, desto empfindlicher muss sie die Bodenbewegungen messen können. Je mehr Messstationen flächenhaft zur Verfügung stehen, desto näher befinden sich diese an potentiellen Erdbebenherden und desto größer sind die entsprechenden Erdbebenwellenamplituden. Dadurch könnten beispielsweise höhere Schwellenwerte für störende Rauschsignale toleriert werden.

**Tabelle 2: Amplitudenwerte  $A_{s_{max}}$  und  $A_{p_{erst}}$  (Bodenverschiebung) in Abhängigkeit von der Magnitude  $ML$  eines Erdbebens und der Entfernung vom Epizentrum. Die Rauschamplituden sind in Bodenschwinggeschwindigkeit bei 5 Hz aus den Anforderungen zur P-Wellen-Messung abgeleitet (mittlere Frequenz im Bereich 1-10 Hz für die Bearbeitung der Nahbeben-Seismizität). Die mittlere Rauschamplitude  $A_{rausch_{rms}}$  sollte nicht ständig überschritten werden.**

$ML$	$R$ in km	$A_{s_{max}}$ in nm	$A_{p_{erst}}$ in nm	$A_{rausch_{max}}$ in nm/s @ 5 Hz	$A_{rausch_{rms}}$ in nm/s @ 5 Hz
1	10	90	18	280	95
1	15	55	11	170	60
1	20	40	8	125	40
1	30	25	5	80	25
1	40	17	3	50	15
1	50	13	2	30	10
3	10	9140	1830	28745	9580
3	20	4050	820	12880	4290
3	30	2480	500	7855	2620
3	40	1720	340	5340	1780
3	50	1280	250	3930	1310

## 2. Status Quo der Rauschbelastung seismischer Messstationen in NRW

Es wurden folgende Erdbeben-Messstationen untersucht (siehe Tabelle 3) (Stationen in Klammern sind außerhalb NRW installiert):

### 1. Stationen des Geologischen Diensts, NRW (GD-NRW):

ACN, (BHE), ENT, GSH, HES, JCK, (LOH), OLF, PLH,  
RWB, SOR, TDN, URT, WBS, XAN

2. Stationen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), welche zusammen mit lokalen Partnern (z.B. Universität Münster, Ruhr-Universität Bochum) als hochwertiges breitbandiges Deutsches Regionalnetz (GRSN) betrieben werden:

AHRW, BUG, IBBN, KAST, LUEB, (TNS)

### 3. Stationen der Ruhr-Universität Bochum (RUB):

BAVN, BAVS\*, BKL B, BPFI, BRH3\*, BTEZ, BULI, HMES, IBBE,  
IBBS, ZERL, ZERL1, ZERL3

### 4. Stationen der Universität zu Köln (Uni Köln), Erdbebenstation Bensberg (BNS):

(BGG), BNS, DREG, (HILG), HOBG, JUE, KLL, (KOE), LAUG,  
RODG, STB, (NAST), BA01, BA03\*, BA04, BA06, BA08, BA09,  
BA10, BA13, BA14, BA15, BA16, BA18.

\* inzwischen außer Betrieb genommen

Es wurden zwei Analysen für die seismologischen Messstationen in NRW durchgeführt, a) standardisierte Frequenzspektren der Leistungsdichte und b) windabhängige Leistungsspektren.

Zu a): Die standardisierten Leistungsdichtespektren sollen zeigen, welches generelle Rauschniveau an den Messstellen auftritt und ob durch typische Störsignale von WEA ein deutlich sichtbarer Einfluss auf die Detektion von Erdbebensignalen zu erwarten ist. In den Diagrammen ist die jeweilige I99-Linie der Messdaten eingezeichnet. Dies ist die Obergrenze der Bodenbewegungen (Schwinggeschwindigkeit), welche 99 % aller bestimmten Rauschspektren enthält, d.h. der frequenzabhängige I99-Wert an der betreffenden Messstation (Groos & Ritter, 2010). Als Referenz sind die globalen New High Noise Model- (NHNM) und New Low Noise Model- (NLNM) Grenzwerte nach Peterson (1993) enthalten. Diese Modelllinien werden in der Seismologie als Anhaltswerte zur Beurteilung des Rauschens an einer Messstation verwendet. Der untere Wert (NLNM) zeigt die weltweit ruhigsten Messstationen an, der obere Wert (NHNM) die verrauschtesten Messstationen.

Zu b): Die windabhängigen Spektren sollen zeigen, ob bereits typische Signale von WEA an den Messstellen registriert werden. Solche WEA-Signale haben typische Eigenschaften: Sie treten erstens bei diskreten Frequenzen auf (Abb. 2), die von den



Schwingungseigenfrequenzen der WEA und der Rotationsgeschwindigkeit stammen. Zweitens nehmen sie in ihrer Amplitude mit der Windgeschwindigkeit zu.

Winddaten: Es werden die Winddaten des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)) verwendet, speziell der ERA5-Land Datensatz (Muñoz Sabater, 2019). Dieses Modell gibt die Winddaten als Nord-Süd- und Ost-West-Komponenten in 10 m Höhe und 1-Stunden-Auflösung sowie 9 km räumlicher Auflösung an. Für die seismischen Messstationen wird der räumlich nächste verfügbare Wert verwendet.

Die Analyse der derzeitigen Rauschverhältnisse (2018-2019, soweit Daten vorliegen) ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Im Anhang 1 sind die Spektren der Leistungsdichte und in Anhang 2 die windabhängigen Spektren dargestellt. Zur schnellen Übersicht werden hier drei Klassifizierungen in Tabelle 3 verwendet, wobei der Frequenzbereich 1-10 Hz entscheidend ist:

- ruhige Messstation: typische Rauschleistung weniger als ca. -160 dB relativ zu  $1 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \text{ Hz})$  ). Dies entspricht ca. 20 dB oberhalb des NLNM.
- unruhige Messstation: typische Rauschleistung erreicht ständig -140 dB relativ zu  $1 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \text{ Hz})$  ),
- gestörte Messstation: typische Rauschleistung erreicht ständig -120 dB relativ zu  $1 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \text{ Hz})$  ), d.h. die Rauschleistung entspricht dem NHHM oder schlechter.

Diese Werte sind angelehnt an die Anforderung, mikroseismische Ereignisse zu erfassen und lokalisieren zu können.

Folgende Messstationen werden als gestört eingeschätzt:

GD-NRW <sup>4</sup>	Stark gestört: RWB, XAN <sup>1</sup> WEA-Einfluss sichtbar: GSH, OLF, PLH <sup>6</sup> , RWB, SOR <sup>6</sup>
BGR-GRSN	Keine Störungen, AHRW wird umgebaut WEA-Einfluss: IBBN
RUB	Stark gestört: BAVN, BAVS <sup>5</sup> , BRH3 <sup>5</sup> , HMES, ZERL, ZER1, ZER3 <sup>2</sup> WEA-Einfluss: BAVN, BAVS, BRH3, IBBS, ZERL, ZER3
Bensberg	Stark gestört: JUE, RODG, BA04-BA18 <sup>3</sup>
	WEA-Einfluss: DREG, KLL, RODG, BA13, BA03,

<sup>1</sup> XAN ist neu, und es standen nur wenige Daten zur Verfügung, der Standort ist problematisch wg. des Untergrunds und evtl. anthropogener Rauschquellen, d.h. die Region ist allgemein schwierig bzgl. des Rauschens aber wichtig bzgl. der seismischen Überwachung.

<sup>2</sup> Diese Messstationen dienen der Überwachung alter Bergwerke bzw. Gruben, ihre Standorte sind vor allem ortsbezogen gewählt und nicht nach standardmäßigen seismologischen Kriterien.

<sup>3</sup> Die Messstationen BA01-BA18 sind Beschleunigungsmesssysteme, die vor allem große Bodenbewegungen von starken Erdbeben ohne Übersteuerung registrieren sollen. Sie sind teilweise direkt an potentiell aktiven Störungen platziert, wo Spitzenbeschleunigungen erwartet werden.

<sup>4</sup> An mehreren Messstationen des GD wurden Spitzen in den Rauschspektren gefunden, welche von den Messgeräten selbst stammen (Kennzeichnung Instrumenten-Problem, Instr.-Prob., in Tabelle 3). Laut GD ist die Fehlerquelle gefunden worden (Rückkopplung des Meinberg-GPS-Boards) und es wird eine Fehlerbeseitigung erarbeitet.

<sup>5</sup> Inzwischen außer Betrieb.

<sup>6</sup> An PLH und SOR wurden im Untersuchungszeitraum (2019) keine starken Beeinträchtigungen gefunden. Allerdings berichtet der GD von WEA-Signalen basierend auf längerfristigeren Beobachtungen.

**Tabelle 3: Seismologische Messstationen NRW – Rauschpegel und Immissionen von Windenergieanlagen**

Rauschpegel: grün: ruhige Messstation, blau: unruhige Messstation, rot: gestörte Messstation, siehe Text.

Wind- / WEA-Einfluss: Grün / -: nicht sichtbar, blau / +: evtl. oder teilweise sichtbar, rot / +: Einfluss deutlich, ?: teilweise unklar oder wenig Daten

Betreiber	Kenn.	Standort	Rauschpegel allge. 1-10 Hz laut Standard-PSD		Wind- / WEA-Einfluss	
GD NRW	ACN	Aachen, Dom	1.1.-31.12.19 -140 dB	▶	-	▲
GD NRW	BHE	Schloss Bürresheim - RLP	1.1.-31.12.19 -140 bis knapp -150 dB (Z)	▶	- Inst.-Prob ?	▲
GD NRW	ENT	Ennepetalsperre	1.1.-31.12.19 --150 bis -160 dB	▲	- Inst.-Prob ?	▲
GD NRW	GSH	Grosshau	1.1.-31.12.19 --150 bis -160 dB	▲	- Inst.-Prob ?	▶
GD NRW	HES	Velbert-Hespertal	1.1.-31.12.19 ca. -140 bis -150 dB	▶	- Inst.-Prob ?	▲
GD NRW	JCK	Jackerath	Keine Daten verfügbar	-		-
GD NRW	LOH	Wallersheim-Loch - RLP	1.1.-31.12.19 ca. -150 dB	▶	- Inst.-Prob ?	▲
GD NRW	OLF	Oleftalsperre	1.1.-31.12.19 ca. -150 dB	▶	+ Inst.-Prob ?	▶
GD NRW	PLH	Pulheim	1.1.-31.12.19 knapp unter -140 dB	▶	? Inst.-Prob ?	▶
GD NRW	RWB	Wassenberg	1.1.-31.12.19 knapp unter -120 dB	▼	- Inst.-Prob ?	▶
GD NRW	SOR	Sorpetalsperre	1.1.-31.12.19 ca. -150 dB, teilweise Ausreißer	▲	? Inst.-Prob ?	▶
GD NRW	TDN	Todenfeld	1.1.-31.12.19 ca. -150 dB	▶	- Inst.-Prob ?	▲
GD NRW	URT	Urfttalsperre	Keine Daten verfügbar	-		-
GD NRW	WBS	Wahnbachtalsperre	1.1.-31.12.19 ca. -145 dB	▶	-	▲
GD NRW	XAN	Xanten, Dombauhütte	20.7-31.8.20 ca. -120 dB	▼	Keine Winddaten	-
BGR/LGB	AHRW <sup>1</sup>	Ahrweiler - RLP	1.1.-20.9.18 -150 bis knapp -170 dB	▲	?	▲
BGR/RUB	BUG	Ruhr-Uni Bochum	1.1.18-31.12.19 -150 bis -160 dB	▶	-	▲
BGR/RUB	IBBN	Ibbenbüren	2.1.18-31.12.19 -150 dB	▶	+	▼
BGR/UniMüst.	KAST	Kahler Asten	1.1.18-31.12.19 unter -150 bis knapp -170 dB	▲	-	▲
BGR	LUEB	Lübbecke	26.2.-31.12.19 -150 dB	▲	-	▲
BGR/UniFr	TNS	Taunus / Hessen	1.1.-31.12.19 ca. -160 bis -170 dB	▲	-	▲

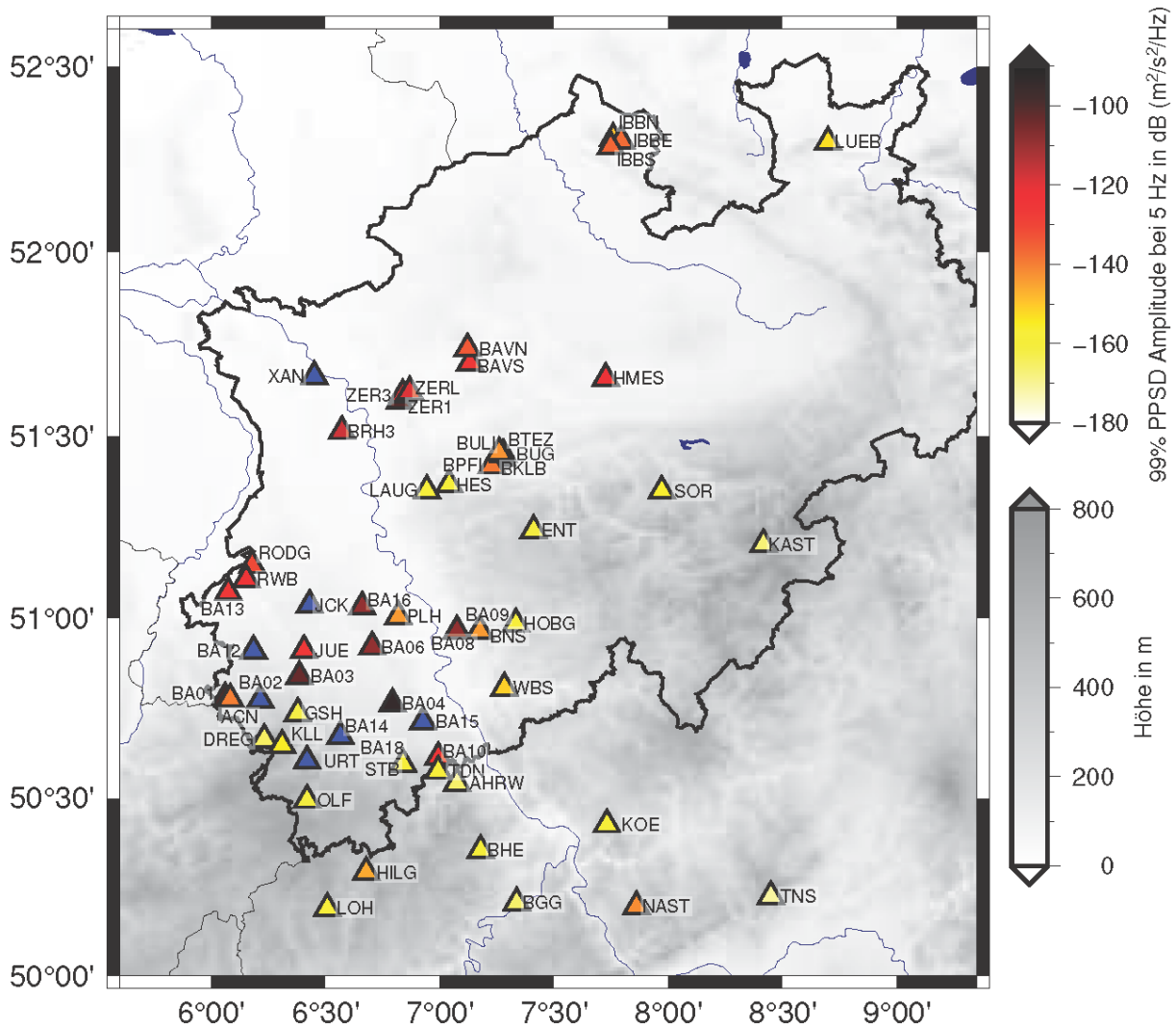
Betreiber	Kenn.	Standort	Rauschpegel allge. 1-10 Hz laut Standard-PSD		Wind- / WEA-Einfluss	
RUB	BAVN	Haltern am See	1.1.-18.5.18 -130 dB, teilweise über NHNM	▼	+	▼
RUB	BAVS	Marl	1.1.-31.12.18 -120 dB bis -130 dB, über NHNM	▼	?, <2 Hz, 3 Hz ?, hohes Grundrauschen	▶
RUB	BKLB	Boch. Zeche Klosterbusch	1.1.18-31.12.19 -150 dB (nur Z)		-	▲
RUB	BPFI	Boch. Zeche Pflingstblume	1.1.-10.10.18 -145 dB (ZNE) 21.2.-31.12.19 -140 dB (Z)		?	?
RUB	BTEZ	Boch. Technisches Zentrum	1.1.18-31.12.19 -150 dB (nur Z)		-	▲
RUB	BULI	Boch. Landesspracheninst.	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -145 dB		-	▲
RUB	HMES	Hamm	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -120 dB, 2019 sehr verrauscht	▼	- hohes Grundrauschen	▲
RUB	IBBE	Ibbenbüren-Ost	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -140 dB	▶	?	?
RUB	IBBS	Ibbenbüren-Süd	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -130 dB, Z besser -140dB	▶	? evtl., hohes Grundrauschen	▶
RUB	ZERL	Hünxe	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -120 dB, sehr verrauscht	▼	<2 Hz ?, hohes Grundrauschen	▶
RUB	ZER1	Hünxe	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -100 dB, sehr verrauscht	▼	?	?
RUB	ZER3	Hünxe	1.1.18-31.12.18 (ZNE), 2019 nur Z, ca- -125 dB, sehr verrauscht	▼	<2 Hz ?, hohes Grundrauschen	▶
RUB	BRH3		1.1.-31.12.18 -115 dB	▼	? hohes Grundrauschen	▶
UniKöln, BNS	BGG	Burg Eltz - RLP	15.10.-31.12.19 knapp unter -160 dB (Z, N, E)	▲	-	▲
UniKöln, BNS	BNS	Bensberg	1.8.-31.12.2019 unter -140 bis 150 dB (Z, N, E))	▶	-	▲
UniKöln, BNS	DREG	Dreilegerbach	1.1.18-31.12.19 knapp unter -160 dB (Z, N, E)	▲	+ Entfernung 3,2 km !!	▼
UniKöln, BNS	HILG	Hillesheim - RLP	1.8.-31.12.19 -140 bis -150 dB	▶	-	▲
UniKöln, BNS	HOBG	Hobusch	1.8.-31.12.19 -155 dB	▲	-	▲
UniKöln, BNS	JUE	Jülich	1.8.-31.12.19 -120 bis -140 dB, teilweise über NHNM	▼	-	▲
UniKöln, BNS	KLL	Kalltalsperre	1.1.18-31.12.19 -150 dB	▲	+ 700 m	▼
UniKöln, BNS	KOE	Köppel - RLP	1.8.-31.12.19 -140 bis -150 dB, Z teilweise besser	▲	?	▲

Betreiber	Kenn.	Standort	Rauschpegel allge. 1-10 Hz laut Standard-PSD	Wind- / WEA-Einfluss
UniKöln, BNS	LAUG	Laupendahl	1.8.-31.12.19 -150 dB	▲ - ▲
UniKöln, BNS	RODG	Dahlheim Rödgen	1.8.-31.12.19 -130 dB, am NHNM	▼ + 2 km ►
UniKöln, BNS	STB	Steinbachtalsperre	1.1.18-31.12.19 -150 bis -160 dB	▲ - ▲
UniKöln, BNS	NAST	IGS Nastätten - RLP	1.8.-31.12.19 -130 bis -150 dB, Unruhe nimmt mit Frequenz zu	► - ▲
UniKöln, BNS	BA04	Friesheim	21.7.-31.12.19 -110 dB, teilweise auch verrauschter	▼ - ▲
UniKöln, BNS	BA10	Klein Altendorf	21.7.-31.12.19 -130 dB, teilweise auch verrauschter	▼ - ▲
UniKöln, BNS	BA13	Heinsberg	21.12.-31.12.19 -125 dB, kurzer Zeitraum	▼ + ▼
UniKöln, BNS	BA14	Wollersheim	Keine Daten verfügbar	- -
UniKöln, BNS	BA15	Heimerzheim	Keine Daten verfügbar	- -
UniKöln, BNS	BA01	Aachen	21.7.-31.12.19 -120 dB, teilweise auch verrauschter	▼ - ▲
UniKöln, BNS	BA03	Weisweiler	21.7.-31.12.19 -110 dB, teilweise auch verrauschter	▼ +? Entfernung ? ▼
UniKöln, BNS	BA06	Horem	21.7.-31.12.19 -120 dB, teilweise auch verrauschter	▼ - ▲
UniKöln, BNS	BA08	Dellbrück	21.7.-31.12.19 -130 dB, teilweise auch verrauschter	▼ - ▲
UniKöln, BNS	BA09	Bensberg	21.7.-31.12.19 -140 dB, teilweise auch verrauschter	► - ▲
UniKöln, BNS	BA16	Vanikum	28.10.-31.12.19 -115 dB, teilweise auch verrauschter	▼ ? ▲
UniKöln, BNS	BA18	Steinbach	1.11.-31.12.19 über und knapp unter NHNM, ca. -120 bis -140 dB	► - ▲
Grau: Stationen in Rheinland-Pfalz und Hessen				

AHRW<sup>1</sup> sollte bzgl. Windenergieanlagen auch untersucht werden, weil es nahe der Grenze zu NRW ist und daher große Bedeutung für NRW hat.

Inst.-Prob ? : An mehreren Messstationen des GD treten schmalbandige Amplitudenerhöhungen auf, die sehr wahrscheinlich auf Instrumentenprobleme zurück zu führen sind (Rückkopplung des Meinberg-GPS-Boards, Mitteilung des GD).

In Abb. 5 werden die 199-Werte der Messstationen zusammengefasst. Diese Karte soll ein Anhalt sein, wie stark die seismologischen Stationen im Mittel durch Rauschen beeinträchtigt sind (2018-2019). Die Verteilung spiegelt gut die geologischen Untergrundverhältnisse wieder: Geringe Rauschpegel in Regionen mit festen Gesteinen (Rheinisches Schiefergebirge sowie Weser- und Osnabrücker Bergland sowie Teile der Westfälischen Bucht) und hohe Rauschpegel in der Niederrheinischen Bucht und dem Niederrheinischen Tiefland).



**Abb. 5: 199-Rauschwerte der untersuchten seismologischen Messstationen. Es wird pro Messstation der Grenzwert gezeigt, der 99 % der Amplituden der Leitungsdichtespektren (probabilistic power spectral density, PPSD) bei 5 Hz enthält. Diese Werte beschreiben die langfristigen Rauschverhältnisse am Messpunkt. Rote Messstationen haben einen hohen Rauschpegel, gelbe einen geringen Rauschpegel. Blaue Symbole: Keine oder zu wenige Messdaten verfügbar.**

### 3. Kategorisierung und Schutzradien für Erdbeben-Messstationen in NRW basierend auf den derzeitigen Rauschpegeln und der Netzwerkfunktionalität

#### 3.1 Kategorisierung

Um die Erdbebendetektion und -lokalisierung in NRW ab einer Magnitude  $ML = 1,0$  auf der Richterskala flächendeckend im Land zu gewährleisten und die sicherheitsrelevanten Aufgaben des Erdbebendienstes funktionstüchtig zu erhalten, werden hier Maßnahmen vorgeschlagen, die unbedingt notwendige Schutzbereiche für diese Aufgaben konkret definieren. Gleichzeitig soll dem Ausbau der Windenergienutzung in angemessener Weise Rechnung getragen werden, indem die Schutzradien auf die notwendigsten kleinsten Radien minimiert werden. Durch Datenaustausch von benachbarten Messstationen soll vermieden werden, dass z.B. überlappende oder zu nahe liegende Schutzbereiche ausgewiesen werden. Damit dieses Konzept umgesetzt werden kann, wird vorgeschlagen, die seismologischen Messstationen in drei Schutzkategorien einzuordnen und ausgewählte Messstationen der verschiedenen Betreiber virtuell und online (Echtzeit) zusammen zu führen. D.h. die Datenströme sollen in Echtzeit ausgetauscht werden.

Um eine optimale landesweite Erdbebenregistrierung zu ermöglichen, sollen die Messstationen in drei (Schutz-) Kategorien eingeordnet werden, die lokale Überschneidungen vermeiden (Abb. 6). Dadurch werden Schutzradien in der Fläche reduziert, da lokal Präferenzen festgelegt werden. Die ausgewählten Messstationen der verschiedenen Betreiber sollten als gemeinsames Messnetz angesehen werden, das möglichst landesweit eine gleichmäßige Erfassung der Seismizität erlaubt (Abb. 6). Durch den offenen Datenaustausch entsteht ein Mehrwert für die verschiedenen Erdbebendienste: Der GD wird besser an den östlichen Landesteil angeschlossen und die Datenredundanz erhöht sich durch die Echtzeit-Einbindung von zusätzlichen Messstationen. Durch den direkten (Echtzeit-) Zugriff auf die Daten des GD haben die Universitäten einen einfachen Zugang zu hochwertigen Messdaten, um mit ihren Forschungsarbeiten neue Entwicklungen bzgl. Erdbebenforschung und Monitoring voranzutreiben. Ähnlich Modelle der seismologischen Kooperation sind in anderen Ländern (z.B. Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Bayern, Thüringen, Sachsen, Schweiz oder Belgien) bereits erfolgreich umgesetzt, vgl. auch Stammler et al. (2020).

Es wird daher empfohlen

- die Registrierungen möglichst vieler Messstationen für die Erdbebenüberwachung und -analyse zu verwenden und dafür zwischen den verschiedenen Messnetzen (GD, BGR und Universitäten) die Daten (Kategorie 1 und Kategorie 2) in Echtzeit gegenseitig auszutauschen,
- besonders wichtige Messstationen zu definieren und diese konsequent vor negativen Einflüssen zu schützen (**Kategorie 1**),
- weitere Messstationen so zu schützen, dass sie zumindest im lokalen Rahmen (Epizentraldistanzen bis ca. 10-15 km) schwache Beben ab  $ML = 1.0$  relativ ungestört registrieren können (**Kategorie 2**),
- grenznahe Messstationen (Rheinland-Pfalz, Belgien und Niederlande) in Echtzeit einzubinden,
- dem GD auf Grund veränderter Randbedingungen (WEA-Neuinstallationen) Sach- und Personalmittel bereitzustellen, um in kritischen Regionen neue (Bohrloch-) Messstationen einzurichten und um verbesserte Online-Tools (IT-Technik) zu implementieren,

- den beteiligten Universitäten auf Grund veränderter Randbedingungen (WEA-Neuinstallationen) für zusätzliche Aufwendungen für Erdbebenregistrierungen finanzielle Unterstützungen zu gewähren,
- verbindliche Vereinbarungen bzw. vertragliche Voraussetzungen zwischen den Landeseinrichtungen als Träger der Erdbebendienste in NRW zu schaffen, um den Betrieb der Stationen, die gegenseitige Datenbereitstellung sowie die Stationswartung für Stationen der höchsten Kategorie zu priorisieren.

Eine Bewertung von WEA-Emissionen an Messstationen mit speziellen Aufgabenstellungen, z.B. an Bergbaubetrieben oder Beschleunigungsmessstellen an Störungen, und damit verbundenen ungünstigen lokalen Rauschbedingungen, ist hier nicht durchführbar. Meist sind für solche Standorte i.a. zusätzliche negative Beeinflussungen durch WEA als gering einzuschätzen, da bereits hohe Rauschpegel vorhanden sind (Tab. 3). Zudem betreibt die Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg, 10 weitere Messstationen für die RWE, welche hier nicht im Detail untersucht werden konnten. Solche Standorte werden hier daher der **Kategorie 3** zugeordnet. Konflikte zwischen Stationsbetreibern und WEA-Betreibern sollten ggf. lokal gelöst werden. Hierfür sollten u.U. Verlegungen dieser Messstationen oder lokale Verdichtungen der Messnetze in Betracht gezogen werden. Bei Mikroerdbeben, die bei hohen Rauschpegeln nur in kurzen Epizentralentfernungen sichtbar sind, sollten die Daten von Messstationen der **Kategorie 3** mit in Auswertungen einbezogen werden, um azimutale Beobachtungslücken zu füllen.

Bzgl. (zukünftiger) kritischer Regionen (Geothermie, Grubenflutungen, Staudämme etc.), an denen mit induzierter Seismizität und dessen Monitoring (z.B. als behördliche Auflage) zu rechnen ist, sollten die zuständigen Behörden rechtzeitig einzuhaltende Grenzwerte für Bodenbewegungs-Beobachtungen festlegen, bevor WEA geplant und errichtet werden. Es ist auch zu prüfen, ob von solchen lokalen Messnetzen nicht jeweils eine Messstation in Echtzeit Daten an den GD übermittelt, um lokale Mikroseismizität erfassen zu können, vgl. auch Ritter (2011).

Vorgeschlagene Messstationen der **Kategorie 1**:

- GD NRW: ENT, GSH, JCK, OLF, PLH, RWB, SOR, WBS, XAN
- BGR-GRSN: AHRW, BUG, IBBN, KAST, LUEB
- Ruhr-Universität Bochum: -
- Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg: DREG, HOBG, LAUG, STB

Die Messstationen des GD haben meist ruhige Messstandorte, lange Messreihen und tragen das Erdbebenalarmsystem NRW. Diese Messstationen sind zudem die Basis für die Erfassung und Lokalisierung der Seismizität bis  $ML = 1.0$ . Die neue Messstation XAN wird derzeit als kritisch angesehen, da sie einen hohen Rauschpegel hat. XAN ist im Nordwesten des Landes die einzige Messstation und sollte daher sehr gute Registrierungen der Bodenbewegung erfassen. Da dort generell ein hohes Rauschniveau vorherrscht (ungünstige Geologie und anthropogene Einflüsse), wird vorgeschlagen dort dringend eine geeignete tiefe Bohrlochmessstation einzurichten.



Die BGR-Messstationen (GRSN-Stationen) haben i.a. sehr geringe Rauschpegel (Anlage A1 und Tabelle 3), sie sind ein wichtiger Beitrag zur deutschlandweiten Erdbebenmessung und sie stellen auch ein international bedeutendes Messnetz mit langen Messreihen für Forschungsarbeiten inkl. der Kernwaffentest-Überwachung dar. Die BGR/GRSN-Messstationen BUG, IBBN, KAST und LUEB decken zudem allein den östlichen Landesteil von NRW ab. Es sollte überlegt werden, die Messstation DREG ins GRSN aufzunehmen, da diese einen sehr geringen Rauschpegel hat und sehr gute Beobachtungen im Westen des Landes erlaubt.

Die Messstationen der Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg, haben teilweise sehr niedrige Rauschpegel und lange Zeitreihen. Besonders hervorzuheben ist DREG, welche ein mittleres Rauschniveau unterhalb -160 dB (zu 1 m/s) aufweist, siehe Anhang 1-04. Hier wird vorgeschlagen, die Datenerfassung an den Messstellen der Kategorie 1 aufzurüsten, um die Echtzeitübertragung zu verbessern.

Ein Messnetz aus den Messstationen der Kategorie 1 (rot in Abb. 6) sollte in der Lage sein, die wichtigsten Aspekte der Seismizität in NRW abzubilden sowie die notwendigen Daten für das Erdbebenalarmsystem ( $ML \geq 3$ ) zu liefern. Die Konfiguration der Messnetze (Abb. 1) zeigt, dass ein zu lokalisierendes Erdbeben der Magnitude  $ML = 1$  bis in ca. 30 km Entfernung registriert werden muss. Auf diese Weise sind die 3-4 notwendigen P-Wellen-Registrierungen zur Lokalisierung zu erwarten.

#### Vorgeschlagene Messstationen der **Kategorie 2**:

- GD NRW: ACN, HES, TDN, URT
- BGR-GRSN: -
- Ruhr-Universität Bochum: BAVN, ZER3, HMES
- Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg: BA02, BA12, BA15, BNS, JUE, KLL, RODG

Die Messstationen der Kategorie 2 (grün in Abb. 6) schließen Lücken im Netzwerk aus den Messstationen der Kategorie 1. Die Hinzunahme der Messstationen der Kategorie 2 erlaubt, im überwiegenden Teil des Landes NRW die Beben bis Magnitude  $ML \sim 1$  zu beobachten und lokalisieren. Hierfür ist es erforderlich, dass P-Wellen von  $ML = 1$  Erdbeben bis in ca. 15 km Entfernung registriert werden, siehe Messgeometrie in Abb. 1.

Die Messstationen BAVN und ZERL3 der Ruhr-Universität Bochum schließen hierbei regionale Lücken und sollten vor einem direkten Einfluss durch WEA geschützt werden. Die Messstation HMES (Hamm) der Ruhr-Universität Bochum schließt eine große regionale Lücke. Dort treten zudem spürbare Ereignisse auf, die störungsfrei beobachtet werden sollten. Es sollte deshalb überlegt werden, eine Kategorie 2 zu erreichen, z.B. durch Installation des Seismometers in einem (flachen) Bohrloch.

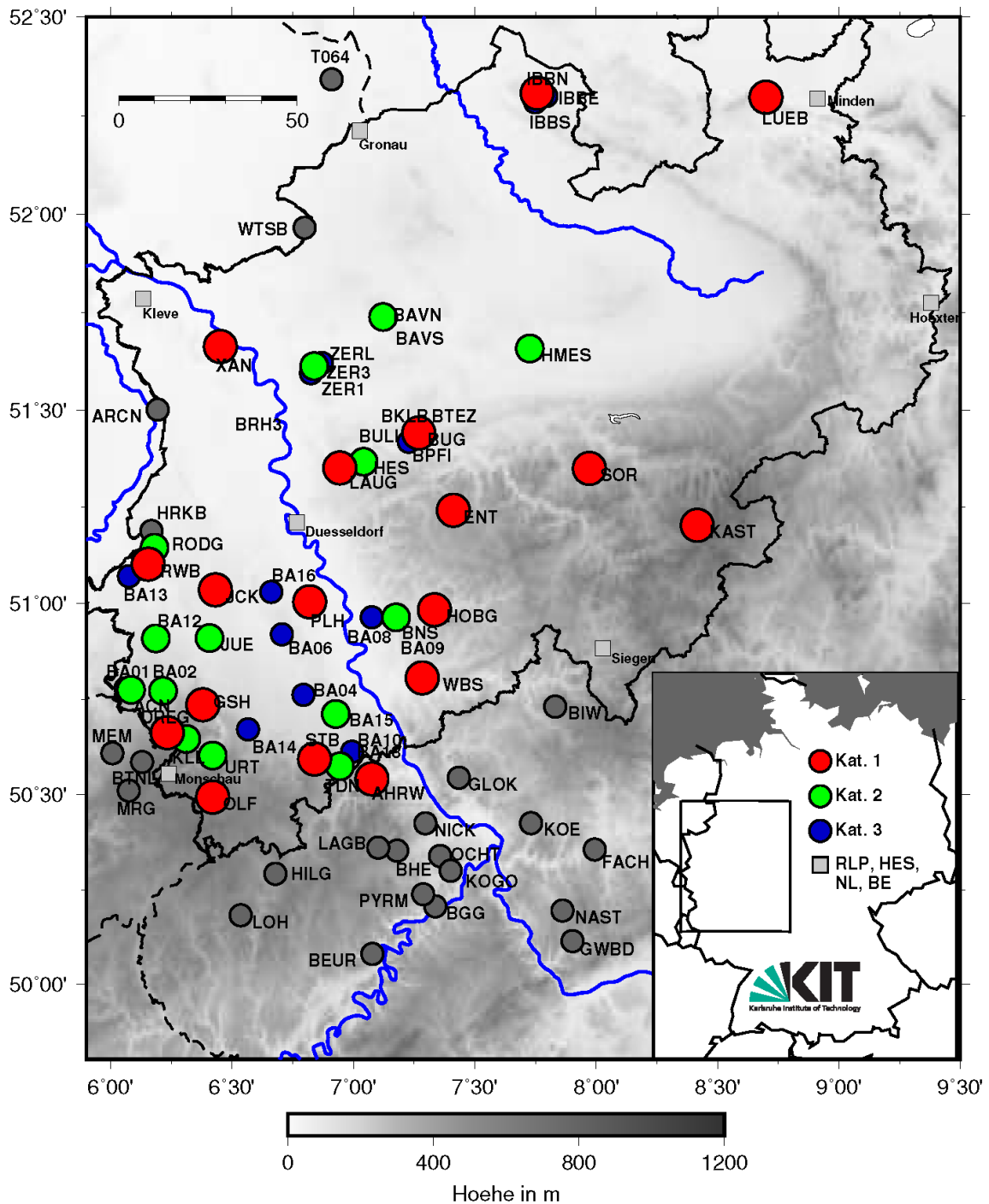
Die Messstationen BA02, BA12 und BA15 (Beschleunigungsmessung) der Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg, haben in der Vergangenheit lokal schwache Seismizität gut beobachtet und erlauben eine bessere Lokalisierung durch ihre jeweiligen Standorte. Sie sind daher geeignet, Beobachtungslücken zu schließen. Eine Aufrüstung mit Seismometern zur empfindlichen Messung der Bodenschwinggeschwindigkeit wäre daher sinnvoll.

Vorgeschlagene Messstationen der **Kategorie 3**:

- GD NRW: -
- BGR-GRSN: -
- Ruhr-Universität Bochum: BKLB, BPFI, BTEZ, BULI, IBBE, IBBS, ZERL, ZERL1
- Universität zu Köln, Erdbebenstation Bensberg: BA01, BA03, BA04, BA06, BA08, BA09, BA10, BA13, BA14, BA16, BA18

Die Messstationen der Kategorie 3 haben bereits deutliche Störsignale von verschiedensten Quellen. Ihre Sensibilität bzgl. Magnitude  $ML \leq 1$  ist daher nur auf kleine Epizentraldistanzen begrenzt. Sie können aber in diesen Gebieten einen weiteren Beitrag zur Erfassung der landesweiten Seismizität leisten. Manche dieser Messstationen füllen zudem Lücken zwischen den Messstationen der Kategorie 1 und Kategorie 2.

Die Messstationen BA01 – BA18 der Universität zu Köln sind Beschleunigungsmesssysteme und sie sind wegen ihrer speziellen Standorte (erwartete Spitzenbeschleunigungen bei Starkbeben) meist bereits mit hohem Rauschen belastet. Diese Daten sind neben der Registrierung von großen Bodenbewegungen auch geeignet für weitere seismologische Untersuchungen, z.B. zur Lokalisierung lokaler Seismizität oder zur Abschätzung von lokalen Verstärkungsfaktoren der Bodenbewegung während Erdbeben etc.



**Abb. 6: Kategorisierte seismologische Messstationen, die als virtuelles Gesamtnetzwerk (Kategorie 1 und Kategorie 2) eine landesweite Überwachung in NRW in Echtzeit leisten sollen. Die Messstationen der Kategorie 3 und die Messstationen im anliegenden Grenzbereich sollen zur Verbesserung der Auswertungen einbezogen werden.**

### 3.2. Festlegung der Schutzradien:

Wie in Abschnitt 1.3 dargelegt, sind die Einflussfaktoren für WEA-Emissionen sehr komplex und meist nicht vollständig bekannt. Es werden hier daher Schutzradien für die Kategorie 1 und Kategorie 2 vorgeschlagen, die nach dem modifizierten Verfahren in Abschnitt 1.4 abgeleitet werden.

Die Schutzradien basieren somit auf

- der störungsfreien Erkennung der seismischen Wellen gemäß den Aufgaben des Erdbebendienstes (Abschnitt 1.1), d.h. auf den Erdbebenwellenamplituden gemäß Tab. 2,
- Abklingraten der WEA-Emissionen gemäß Tab. 1 und Abb. 4 und deren Mittelung (Abb. 7) und
- Extrapolationen für Anlagen mit mehr als 3 MW Leistung.

Die zu erkennende Amplitude der Bodenbewegung des P-Wellenersteinsatzes ( $A_{p_{erst}}$ ) eines Erdbebens der Magnitude  $ML \sim 1,0$  in 30 km Entfernung an Messstationen der **Kategorie 1** ist  $\sim 5$  nm Bodenverschiebung (Tabelle 2) oder  $\sim 157$  nm/s Schwinggeschwindigkeit bei ca. 5 Hz. Die maximalen Rauschamplituden  $A_{rausch_{max}}$  sollten nur die Hälfte dieses Wertes betragen, d.h. (80 nm/s), und die mittlere Rauschamplitude  $A_{rausch_{rms}}$  darf nur ca. ein Drittel davon erreichen (25 nm/s). Dies entspricht in dB in den Leistungsspektren ungefähr dem Wert -155 dB zu  $1 \text{ (m}^2/\text{s}^2) / \text{Hz}$ . Dieser Schwellen- oder Grenzwert wird somit mit den WEA-Emissionen verglichen, um Abstandsradien zu finden (Abb. 7).

Als Unterscheidung bzgl. des geologischen Untergrunds und seiner Eigenschaften auf die Wellendämpfung der WEA-Emissionen werden zwei Kriterien verwendet:

- nichtverfestigte, meist quartäre Sedimente (Niederrheinische Bucht und Niederrheinisches Tiefland sowie Teile der Westfälischen Bucht) und
- festgesteinsartiger Untergrund, meist paläozoische und mesozoische Gesteine (Rheinisches Schiefergebirge sowie Weser- und Osnabrücker Bergland).

Für nichtverfestigte Gesteine wird eine höhere Dämpfung ( $b = 2$ , vgl. Gl. 1) als für festgesteinsartige Untergrundverhältnisse ( $b = 1$ ) angenommen (Abb. 4 und Tab. 1). Diese Mittelung über verschiedene Gesteins- bzw. Untergrundverhältnisse erlaubt eine einfache Umsetzung der Abstandsberechnung, ohne aufwendige geophysikalische Detailuntersuchungen vor Ort an jedem WEA-Standort. Die Frequenzabhängigkeit des  $b$ -Werts wird vernachlässigt und es wird der Frequenzbereich bei ca. 1-5 Hz verwendet, in welchem der  $b$ -Wert noch nicht zu sehr zunimmt (Abb. 4). Bohrlochmessstationen, deren Seismometer in einer festen Gesteinsformation an das Gebirge gekoppelt sind, sollen mit  $b = 1$  bewertet werden, da die Emissionen von WEA auch in Bohrlöchern gut sichtbar sind (Zieger & Ritter, 2018).

Es werden Amplitudendämpfungen für Anlagen mit 2-3 MW berechnet, deren Emissionsspektrum in ca. 100 m Entfernung ungefähr bekannt ist. Dieser Abstand von den WEA eliminiert die Effekte der komplexen Kopplung des WEA-Turms mit dem Fundament sowie des komplexen Übergangs vom Fundament in den Untergrund. Entsprechend gemessene Amplitudenspektren in ca. 100 m Entfernung für Einzelanlagen auf Festgestein werden gemittelt. Repräsentativ wird in Abb. 7 eine Frequenz von 3-4 Hz Frequenz verwendet, bei welcher häufig WEA-Emissionen bei Messungen gefunden wurden. Die berechneten Emissionsamplituden nehmen für  $b = 2$  deutlich stärker ab als für  $b = 1$  (Abb. 7). Diese Prognose für  $b = 2$  deckt sich qualitativ mit Beobachtungen im Oberrheingraben (Zieger, 2019) und WEA auf Halden im Ruhrgebiet (unveröffentlicht). Aus Abb. 7 ergeben sich direkt die

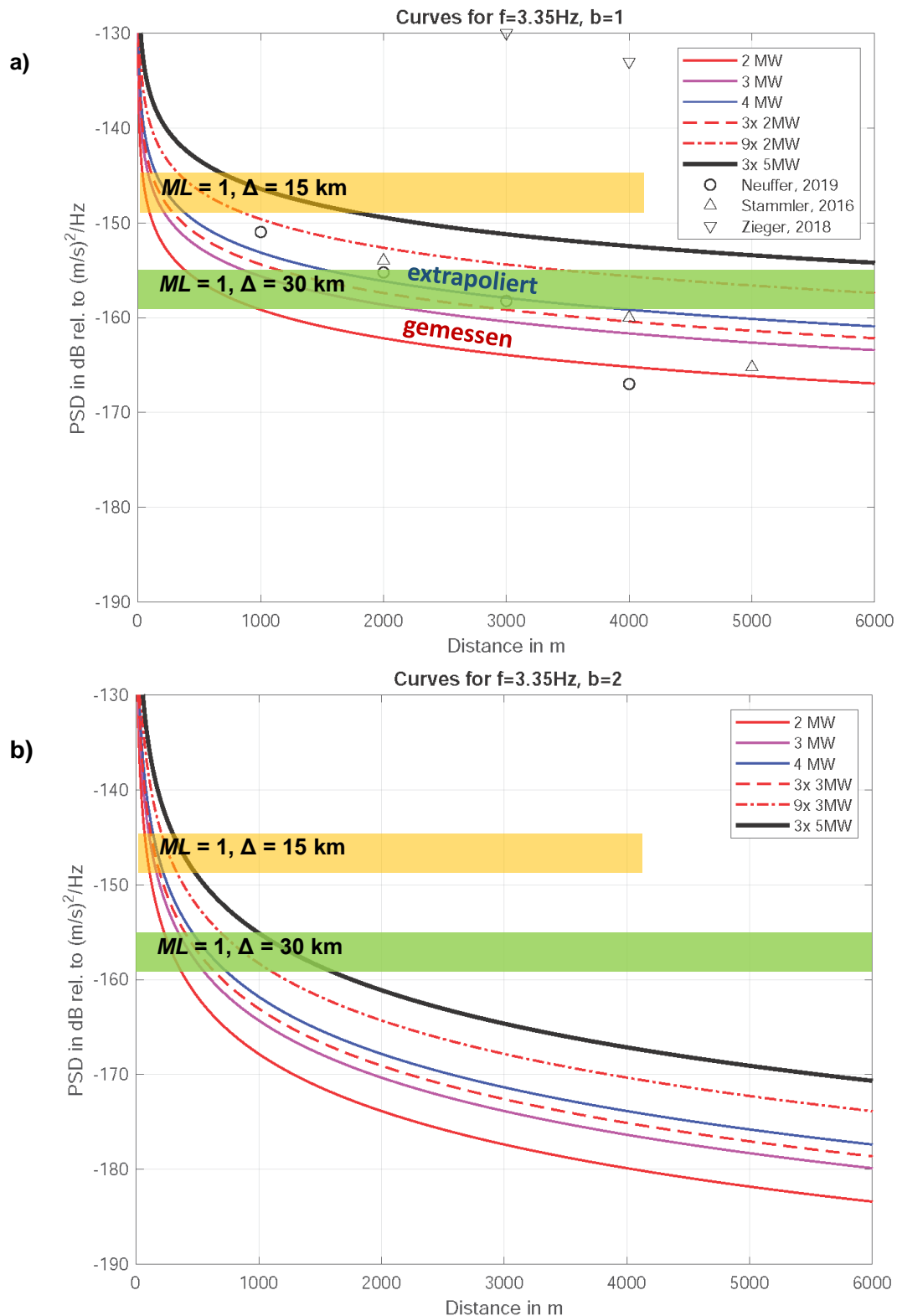
Schutzradien für Erdbebenmessstationen unter der Vorgabe, dass sie ihre o.g. Aufgaben erfüllen können. Für **Kategorie 1** ist dies als grüner Balken (Messung eines Bebens mit  $ML = 1$  in 30 km Entfernung) in Abb. 7 eingetragen. Die Breite des grünen Balkens stellt die Unsicherheit wegen der angewandten Approximationen dar. Da die Abnahmekurven teilweise sehr flach verlaufen, d.h. über eine gewisse Entfernung nur wenig Änderung der Amplituden auftritt, wird im Grenzbereich -155 dB bis -159 dB aus Erfahrungswerten interpoliert. Da bis in 1 km Entfernung von einer WEA mit stark nichtlinearen Nahfeldeffekten der emittierten Wellen zu rechnen ist, wird diese Entfernung als Mindestabstand festgelegt.

Für Messstationen der **Kategorie 2** wird angesetzt, dass für ein Erdbeben der Magnitude  $ML = 1$  in ca. 15 km Entfernung der P-Welleneinsatz mit ca. 350 nm/s noch beobachtbar ist, d.h.  $A_{rms} \sim 60$  nm/s. Dies entspricht einem Grenzwert von ca. -145 dB zu  $1 \text{ (m}^2/\text{s}^2) / \text{Hz}$  in den Rausch- bzw. Emissions-Leistungsspektren. Die daraus abgeleiteten Schutzradien sind in Tabelle 4 aufgeführt. Da bis in 1 km Entfernung von einer WEA mit stark nichtlinearen Nahfeldeffekten der emittierten Wellen zu rechnen ist, wird diese Entfernung als Mindestabstand festgelegt.

Die Emissionsamplituden von 2 MW-WEA und 3 MW-WEA in Abb. 7 sind aus Messungen abgeleitet. Die Werte für 4 MW-WEA und 5 MW-WEA sind linear zunehmend abgeschätzt. Besonders für neuartige 5 MW-WEA oder noch größere Anlagen ist dies mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher wird vorgeschlagen, die entsprechenden Werte in Tabelle 4 nur vorläufig zu verwenden und Verbesserungen mit Messexperimenten an WEA mit  $\geq 4$  MW zu erreichen.

**Tabelle 4: Vorgeschlagene minimale Schutzradien um seismologische Messstationen der Kategorie 1 und Kategorie 2 zu einer einzelnen WEA. Die Werte für 4 MW WEA sind linear extrapoliert von 2 MW WEA und 3 MW WEA. Die Werte für 5 MW WEA sind mangels Messdaten grob geschätzt.**

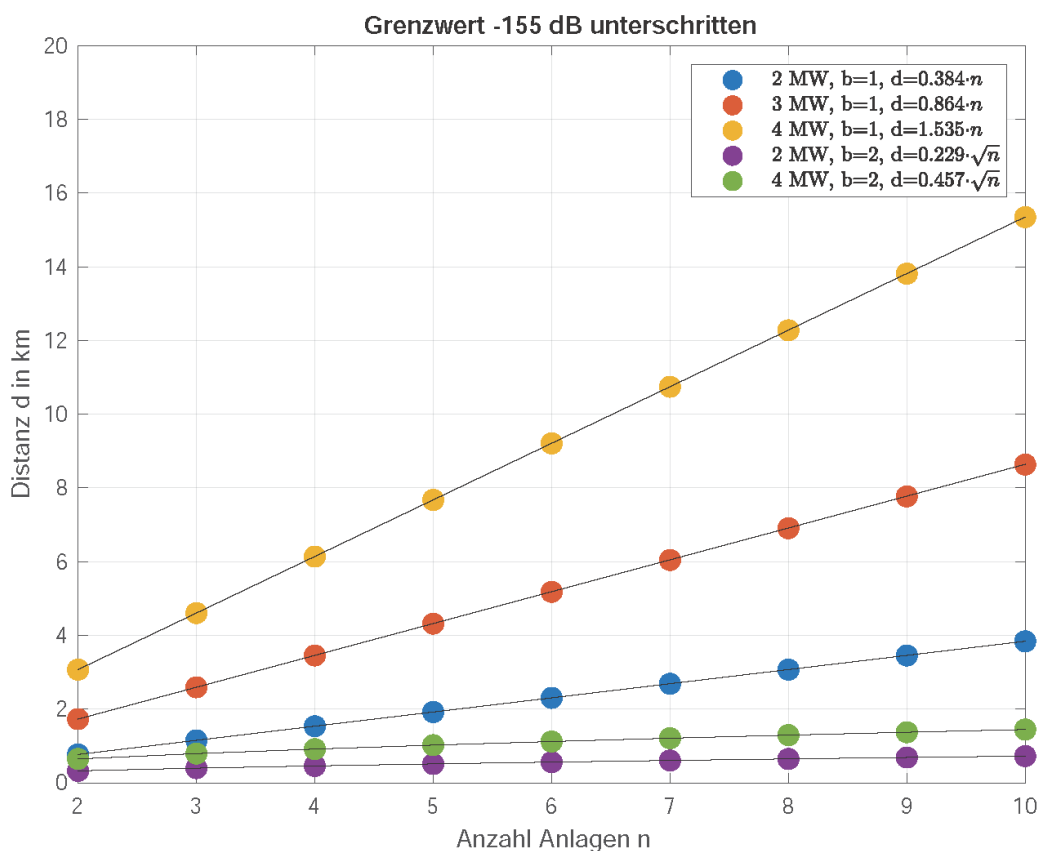
Kategorie	b-Wert	2 MW Radius	3 MW Radius	4 MW Radius	5 MW Radius
1	1 (fest)	1,2 km	2,2 km	3,0 km	3,5 km ?
1	2 (unverf.)	1,0 km	1,0 km	1,0 km	1,5 km ?
2	1 (fest)	1,0 km	1,0 km	1,5 km	2,0 km ?
2	2 (unverf.)	1,0 km	1,0 km	1,0 km	1,5 km ?



**Abb. 7: Abklingkurven für Emissionen von WEA. a) Die Kurven für 2 MW und 3 MW Einzelanlagen sind gemittelt aus Messungen unter Berücksichtigung von  $b = 1$  berechnet worden. Dies passt sehr gut zu Beobachtungen (Symbole) an Standorten mit festgesteinsartigem Untergrund. Die Abklingkurve für eine 4 MW Einzelanlage wurde linear extrapoliert (Faktor 2 relativ zu einer 2 MW Anlage). Die Kurve für drei 5 MW Anlagen wurde grob geschätzt (2,5-fach zu 2 MW und Faktor  $3^{1/2}$ ) und sollen ein mögliches Szenario zeigen. Die Kurven für drei bzw. neun 3 MW Anlagen entsprechen Faktoren  $3^{1/2}$  bzw.  $9^{1/2}$  ( $=3$ ) für eine 3 MW-Einzelanlage (Wurzel-N Relation siehe Text). b) Anpassung der Abklingkurven an  $b = 2$  (unverfestigte Gesteine, z.B. Sedimente).**

Die in Tabelle 4 aufgelisteten Schutzradien beziehen sich zunächst auf Einzelanlagen. Bei mehreren WEA nehmen die Emissionen durch Überlagerung der emittierten seismischen Wellen zu, wofür ein Wurzel-N-Gesetz für die Amplitudenverstärkung beobachtet wird (Neuffer et al., 2019). D.h. für N identische Anlagen in ungefähr derselben Entfernung zu einem Immissionspunkt nimmt dort die Bodenbewegung ungefähr mit dem Faktor Wurzel-N (bzw.  $N^{1/2}$ ) zu.

Diese Wurzel-N Relation sollte für mehrere WEA und den WEA-Zubau bei bestehenden WEA im Umfeld einer seismologischen Messstation berücksichtigt werden. In Abb. 8 wird gezeigt, wie N WEA mit ähnlicher Emission und in ähnlichem Abstand theoretisch einen Schwellenwert von -155 dB zu  $1 \text{ (m}^2/\text{s}^2) / \text{Hz}$  in verschiedenen Entfernungen erreichen. Die Berechnungen der Emissionswerte der WEA entsprechen denjenigen wie für Abb. 7. Es wird empfohlen, den Abstand zur nächstgelegenen WEA von der seismologischen Messstation zu verwenden, da diese WEA i.a. den stärksten Einfluss hat.



**Abb. 8: Theoretischer Zusammenhang zwischen der Anzahl an WEA und der Entfernung, in welcher ein Rauschpegel (Grenzwert) von ca. -155 dB erreicht wird. Es werden 2 MW, 3 MW und 4 MW WEA für  $b = 1$  (festgesteinsartiger Untergrund) und  $b = 2$  (unverfestigter Untergrund) betrachtet. Die Werte für 4 MW WEA wurden von 2 MW und 3 MW Anlagen extrapoliert. Dieses Diagramm enthält zur Übersichtlichkeit keine Unsicherheiten, d.h. es sind Minimalwerte der Entfernung gezeigt.**

Abb. 8 zeigt, dass für  $b = 2$  (unverfestigter Untergrund) die Schutzradien nur wenig zunehmen, wenn mehrere WEA installiert werden. Es ergibt sich für die Abstände ein Wurzelgesetz für N (WEA-Anzahl) mit einem Vorfaktor 0,229 für 2 MW-WEA und einem Vorfaktor 0,447 für 4 MW-WEA. Die Vorfaktoren ergeben sich aus der Anpassung an das Wurzelgesetz für N. Wegen

der starken nichtlinearen Nahfeldeffekte der emittierten Wellen wird ein Mindestabstand von 1,0 km dringend empfohlen.

Für festen Untergrund ( $b = 1$ ) ergibt sich eine lineare Beziehung zwischen der Anzahl an WEA und der Entfernung, bis zu welcher ein gewisser Rauschpegel erreicht wird. Zur Erreichung des -155 dB Schwellenwertes wird ein Vorfaktor 0,384 für 2 MW WEA und ein Vorfaktor 1,535 für 4 MW WEA prognostiziert. Die Vorfaktoren ergeben sich aus der linearen Anpassung.

Für den Fall, dass mehrere WEA mit unterschiedlichen Leistungen im Umfeld einer seismologischen Messstation errichtet werden sollen, ist eine einfache tabellarische bzw. graphische Prognose der Immissionen schwierig, da sehr viele Parameterkombinationen berücksichtigt werden müssen: Anzahl der WEA, Emissionsverhalten der WEA, Entfernungen zwischen WEA und Messstation und ggf. Untergrundvariationen ( $b$ -Werte). Für solche Fälle muss ein separates Verfahren zur Rauschbudgetierung entwickelt werden, für welches zudem Messungen an bestehenden WEA zur Validierung empfohlen werden.



#### 4. Zusammenfassung und weitere Empfehlungen

Es wurden die Rauschverhältnisse an den seismologischen Messstationen in NRW für die Jahre 2018 und 2019 analysiert sowie bzgl. Signalen von Windenergieanlagen (WEA) untersucht. Hierbei zeigt sich, dass an einigen Messstationen Signale von WEA registriert werden. Dies kann zu einer Einschränkung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Messstation oder auch des zugehörigen Messnetzes der Erdbebendienste (Geologischer Dienst, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Ruhr-Universität Bochum und Universität zu Köln) führen. Nach Gesprächen mit Betreibern von Messstationen wurde der Eindruck erlangt, dass Beteiligungsradien zu einer beträchtlichen Mehrarbeit führen, da Stellungnahmen verfasst werden müssen, wobei teilweise die Wirkungen der WEA nicht eindeutig bekannt sind. Dies betrifft vor allem neuartige WEA mit großer Leistung ( $\geq 4$  MW).

Um die Funktionsfähigkeiten der Erdbebendetektion und -lokalisierung aufrecht zu erhalten und gleichzeitig den Windenergieausbau nicht zu sehr einzuschränken, wird vorgeschlagen in NRW ein virtuelles Messnetz in Echtzeit zu betreiben und die einzelnen Messstationen zu kategorisieren. Das Ziel ist hierbei, eine landesweit gleichmäßige Erdbebenbeobachtung zu erreichen, wobei die Seismizitätsrate und der Untergrund (Festgestein, unverfestigte Sedimente) berücksichtigt werden sollen. Die Kategorien werden mit untergrundsabhängigen Schutzradien belegt, die zudem von der Leistung der WEA abhängen.

Folgende Punkte sollten besonders berücksichtigt werden:

- Für die Messstationen der Kategorie 1 und Kategorie 2 sollten schnellst möglich die Schutzradien aus Tabelle 4 und Abbildung 8 offiziell ausgesprochen werden.
- Es sollten dringend Messungen der seismischen Emissionen von WEA mit mehr als 4 MW durchgeführt werden, um deren Emissionen einschätzen zu können und ggf. Tabelle 4 anzupassen. Hier könnte es eventuell ausreichen, die Bodenbewegungen in ca. 50-100 m Entfernung von einer WEA zu ermitteln und dann mit den bekannten b-Werten für die Amplitudenabnahme weiter zu arbeiten.
- Die Datenströme der Messstationen der Kategorie 1 und Kategorie 2 sollten zwischen den kooperierenden Erdbebendiensten in Echtzeit ausgetauscht werden. Dies sollte schrittweise schnellst möglich beginnen, um Erfahrungen zu sammeln.
- Bestehende messtechnische Verbesserung, z.B. die Beseitigung von Spikes durch GPS-Boards, sollten schnell beseitigt werden.
- An der stark verrauschten Messstation XAN (Geologischer Dienst) sollte eine Bohrlochinstallation in Betracht gezogen werden, um den Nordwesten von NRW adäquat überwachen zu können.
- An der stark verrauschten Messstation HMES (Ruhr-Universität Bochum) sollte eine Bohrlochinstallation in Betracht gezogen werden.
- Im östlichen Landesteil sollte eine neue Messstation der Kategorie 1, z.B. in Zusammenarbeit des Geologischen Diensts mit der Ruhr-Universität Bochum, installiert werden, um eine große Lücke im Beobachtungsnetz zu schließen. Lage: ca. zwischen LUEB und KAST (Abb. 6).
- Die Datenerfassung der Messstationen der Universität zu Köln / Erdbebenstation Bensberg, sollte hardwaremäßig verbessert werden, um die Datenströme per SEED-Link versenden zu können.

- Es sollten vom Land NRW dem Geologischen Dienst und den Universitäten schnell die notwendigen Mittel zur Verfügung gestellt werden, um die o.g. Maßnahmen umsetzen zu können. Der Windenergieausbau schafft veränderte Rahmenbedingungen für die Erdbebendienste, die adäquat und zeitnah kompensiert werden müssen.
- Es sollten verbindliche Vereinbarungen zwischen den Landeseinrichtungen als Träger der Erdbebendienste in NRW getroffen werden, um die o.g. Maßnahmen zeitnah umsetzen zu können.

Weitere Empfehlungen:

- Man sollte mögliche zukünftige Messstandorte und deren Schutz überlegen, wo eine seismische Überwachung notwendig werden kann (tiefe Geothermie, Grubenflutungen etc.).
- Die Auswirkungen dieser Empfehlungen sollten nach ca. 5 Jahren evaluiert und ggf. modifiziert werden.

## Referenzen

- Baisch, S., Fritschen, R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, T., Plenkers, K., Ritter, J. & Wassermann, J., 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE, *Mitteil. Deut. Geophys. Gesell.*, 3/2012, 17-31.
- Bensberg Earthquake Network, <https://doi.org/10.7914/SN/BQ>.
- Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2019. Unterrichtung durch die Bundesregierung, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/23825 (Vorabfassung), <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/238/1923825.pdf>.
- Betriebssatzung für den Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb – (BS GD NRW), 2017. Runderlass des Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk vom 26. April 2017.
- Camelbeeck, T., Vanneste, K., Verbeek, K., Garcia-Moreno, D., van Noten, K. & Lecocq, T., 2020. How well does known seismicity between the Lower Rhine Graben and southern North Sea reflect future earthquake activity? In: Kaiser, D. (editor), *Historical Earthquakes, Paleoseismology, Neotectonics, and Seismic Hazard: New Insights and Suggested Procedures*. Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, 53-72.
- Flores Estrella, H., Korn, M. & Alberts, K., 2017. Analysis of the influence of wind turbine noise on seismic recordings at two wind parks in Germany. *J. Geoscience Environm. Protec.*, 5. 76-91. 10.4236/gep.2017.55006.
- Friedrich, T., Zieger, T., Forbriger, T. & Ritter, J.R.R., 2018. Locating Wind Farms by Seismic Interferometry and Migration in the Upper Rhine Graben, SW Germany. *J. Seismology*, 22, 1469–1483.
- Gortsas, T.V., Triantafyllidis, T., Chrisopoulos, S. & Polyzos, D., 2017. Numerical modelling of micro-seismic and infrasound noise radiated by a wind turbine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99, 108-123.
- Groos, J. & Ritter J.R.R., 2010. Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas. In: Ritter, J. & Oth, A. (eds.), *Induced Seismicity, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 30, 87-97.
- Groos, J.C., Fritschen, R. & Ritter, J.R.R., 2013. Untersuchung induzierter Erdbeben hinsichtlich ihrer Spürbarkeit und eventuellen Schadenswirkung anhand der DIN 4150. *Bauingenieur*, 88, 374-384.
- Grützner, C., Fischer, P. & Reicherter, K., 2016. Holocene surface ruptures of the Rurrand Fault, Germany—insights from palaeoseismology, remote sensing and shallow geophysics. *Geophys. J. Int.*, 204, 1662–1677, doi: 10.1093/gji/ggv558 .
- Hinzen, K.-G. & Schütte, S., 2003. Evidence for earthquake damage on roman buildings in Cologne, Germany. *Seismol. Res. Lett.*, 74, 124–140.
- Hinzen, K.-G. & Fleischer, C., 2007. A strong-motion network in the Lower Rhine Embayment (SeFoNiB), Germany. *Seismol. Res. Lett.*, 78 (5), 502-511.
- Hinzen, K.-G. & Reamer, S.K., 2007. Seismicity, seismotectonics, and seismic hazard in the Northern Rhine Area. In book: *Special Paper 425: Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*, Geological Society of America 425:225-242, DOI: 10.1130/2007.2425(15).
- Hinzen, K.-G., Reamer, S.K. & Fleischer, K., 2020 (online). Seismicity in the Northern Rhine Area (1995–2018). *J. Seismol.*, <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09976-7>
- Korn, M., 2002. Ten Years of German Regional Seismic Network (GRSN). DFG Senate Commission for Geosciences, Report 25, Wiley-VCH, Weinheim, 276 Seiten.

- Lerbs, N., Zieger, T., Ritter, J. & Korn, M., 2020. Wind turbine induced seismic signals: the large-scale SMARTIE1 experiment and a concept to define protection radii for recording stations. *Near Surface Geophysics*, 18, 467-482, doi: 10.1002/nsg.12109 .
- Leydecker, G., 2011. Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. *Geologisches Jahrbuch, Reihe E, Heft 59*. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Lott, F.F., Ritter, J.R.R., Al-Qaryouti, M. & Corsmeier, U., 2017. On the analysis of wind-induced noise in seismological recordings. *Pure Appl. Geophys.*, 174, 1453-1470, doi: 10.1007/s00024-017-1477-2 .
- Muñoz Sabater, J., 2019. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (1. 10. 2020), 10.24381/cds.e2161bac .
- Nagel, S., Zieger, T., Luhmann, B., Knödel, P., Ritter, J. & Ummenhofer, T., 2019. Erschütterungsemissionen von Windenergieanlagen, *Stahlbau*, 88, 559-573.
- Neuffer, T. & Kremers, S., 2017. How wind turbines affect the performance of seismic monitoring stations and networks. *Geophys. J. Int.*, 211, 1319–1327.
- Neuffer, T., Kremers, S. & Fritschen, F., 2019. Characterization of seismic signals induced by the operation of wind turbines in North Rhine-Westphalia (NRW), Germany. *Journal of Seismology*, 23, 1161-1177.
- Peterson, J., 1993. Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey, Open-File report 93-322, 95 pp.
- Reicherter, K., Schaub, A., Fernández-Steeger, T., Grützner, C. & Kohlberger-Schaub, T., 2011. Aquisgrani terrae motus factus est (part 2): Evidence for medieval earthquake damage in the Aachen Cathedral (Germany). *Quaternary International*, 242, 149-157.
- Ritter, J.R.R., 2011. Konzeptionelle Ansätze zur Überwachung induzierter Seismizität im Oberrheingraben, Rheinland-Pfalz, *Mainzer geowiss. Mitt.*, 39, 157-176.
- Ross, Z.E., Trugman, D.T., Hauksson, E. & Shearer, P.M., 2019. Searching for hidden earthquakes in Southern California. *Science*, 364, 767-771.
- Ruhr University Bochum (Germany), 2007. RuhrNet - Seismic Network of the Ruhr-University Bochum [Data set]. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR, Germany). <https://doi.org/10.7914/SN/RN>
- Skupin, K., Buschhüter, K., Hopp, H., Lehmann, K., Pelzing, R., Prüfert, J., Salamon, M., Schollmayer, G., Techmer, A. & Wrede, V., 2008. Paläoseismische Untersuchungen im Bereich der Niederrheinischen Bucht. *Scriptum 17*, 72 S., Krefeld (Geologischer Dienst NRW).
- Stammler, K. & Ceranna, L., 2016. Influence of wind turbines on seismic records of the Gräfenberg array. *Seismol. Res. Lett.* 87(5), 1075-1081.
- Stammler, K., Bischoff, M., Brüstle, A., Ceranna, L., Donner, S., Fischer, K., Gaebler, P., Friederich, W., Funke, S., Hartmann, G., Homuth, B., Knapmeyer-Endrun, B., Korn, M., Megies, T., Pilger, C., Plenefisch, T., Pustal, I., Rappsilber, I., Schmidt, B., Sonnabend, L., Stange, S., Wassermann, J. & Wegler, U., 2020. German seismic and infrasound networks contributing to the European Integrated Data Archive (EIDA). *Seismol. Res. Lett.*, submitted
- Vanneste, K., Meghraoui, M. & Camelbeeck, T., 1999. Late Quaternary earthquake-related soft-sediment deformation along the Belgian portion of the Feldbiss Fault, Lower Rhine Graben system. *Tectonophysics*, 309, 57-79.
- Westwood, R.F. & Styles, P., 2017. Assessing the seismic wavefield of a windturbine using polarization analysis. *Wind Energy*, doi:10.1002/we.2124.

- Zieger, T., 2019. Experimental quantification of seismic signals induced by wind turbines. Dissertation, KIT-Fakultät für Physik. Verfügbar unter: Repository KITopen, DOI: 10.5445/IR/1000096453, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000096453>
- Zieger, T. & Ritter, J.R.R., 2018. Influence of wind turbines on seismic stations in the upper rhine graben, SW Germany. *J. Seismology*, 22, 105-122, doi: 10.1007/s10950-017-9694-9.
- Zieger, T., Nagel, S., Lutzmann, P., Kaufmann, I., Ritter, J., Ummenhofer, T., Knödel, P. & Fischer, P., 2020. Simultaneous identification of wind turbine vibrations by using seismic data, elastic modeling and laser Doppler vibrometry. *Wind Energy*, 23, 1145–1153, <https://doi.org/10.1002/we.2479>.