FACHAGENTUR
WINDENERGIE AN LAND

HINTERGRUNDPAPIER

Windenergieanlagen und seismologische Netze

Beeinflussung der Performance seismologischer Netze durch Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen

Windenergieanlagen und seismologische Netze

Beeinflussung der Performance seismologischer Netze durch Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen

Dr. Tobias Neuffer, Dr. Simon Kremers (DMT GmbH & Co. KG)
Prof. Dr. Horst Rüter (HarbourDom GmbH)

Herausgegeben von der Fachagentur Windenergie an Land e. V.

Gefördert durch:

EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum und Beschäftigung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Leitmarkt Agentur.NRW

EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Vorwort

Dr. Antje Wagenknecht ist Geschäftsführerin der Fachagentur Windenergie an Land.

Windenergieanlagen erzeugen Schwingungen, die über das Fundament auf den Boden übertragen und von Erdbebenmessstationen registriert werden. Die von den Geologischen Diensten, Universitäten und anderen Einrichtungen betriebenen Erbebenmessnetze dienen insbesondere der Überwachung der Erdbebentätigkeit. Daher sind die Messnetze in erdbebengefährdeten Gebieten meist dichter als in anderen Regionen. In der Regel sind diese Netze historisch gewachsen und bei Bedarf einem Wandel unterworfen.

Die von den Windenergieanlagen ausgehenden Schwingungen können die Signale von Erdbeben überlagern. So kommt es stellenweise zu einem Konflikt zwischen dem dringend notwendigen Ausbau der Windenergienutzung und der Funktionalität der Erdbebenmessnetze.

In dieser Publikation werden Maßnahmen aufgezeigt, die seitens des Messnetzbetreibers zusammen mit dem Planer einer neuen Windenergieanlage ergriffen werden können, um die Leistungsfähigkeit der Messnetze trotz der Zunahme von Störsignalen erhalten zu können. Die als Kompensationsmaßnahme vorgeschlagenen Versetzungen oder zusätzlichen Messstellen sollten vorausschauend geplant werden, beispielsweise auf Grundlage einer Potentialstudie für die Windenergienutzung, wie sie derzeit für Nordrhein-Westfalen vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) erarbeitet wird. Durch eine solche vorausschauende Herangehensweise lassen sich absehbare Herausforderungen mit der notwendigen Bereitstellung von Flächen für den Windenergieausbau vermeiden.

Die vorliegende Publikation fasst die Ergebnisse des Arbeitspakets „Organisatorische Maßnahmen“ des Forschungsprojekts „MISS - Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen“ zusammen, das von der Energieagentur.NRW initiiert wurde. Gefördert wurde das Projekt durch die Europäische Union - Investitionen in unsere Zukunft - Europäischer Fond für Regionale Entwicklung und durch EFRE.NRW - Investition in Wachstum und Beschäftigung.

Ich danke den Autoren ganz herzlich für diese Ausarbeitung, die das Ziel hat, die Ergebnisse dieses Teilprojektes aus der seismologischen Fachwelt heraus den Akteuren im Bereich der Windenergie zugänglich zu machen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Ihre

Antje Wagenknecht

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 5

Tabellenverzeichnis 5

Zusammenfassung 6

1 Einleitung 7

2 Erdbebenmagnituden 8

3 Rauschbelastung einer seismologischen Station 10

4 Amplituden-Entfernungsbeziehungen von Erdbeben 12

5 Signal-Rausch-Verhältnis 13

6 Kartographische Erfassung von lokalen Vollständigkeitsmagnituden – Netzperformance 14

7 Änderung der Netzperformance durch Änderung der Rauschbelastung an einer Einzelstation 17

8 Ausgleichsmaßnahmen (Kompensation) 19

8.1 Karten der Rauschbelastung 19

8.2 Änderung der Netzperformance durch zusätzliche Messstationen 20

Abkürzungsverzeichnis 23

Danksagung 24

Literatur- und Quellenverzeichnis 25

Impressum 26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erdbebenzonen und Bergbaugebiete in NRW nach DIN EN 1998 sowie die Standorte der seismologischen Stationen des GD NRW. 9

Abbildung 2: Seismogramm einer 1-stündigen Rauschaufzeichnung an einer Bohrlochmessstation eines Netzwerkes zur Überwachung induzierter Seismizität. 11

Abbildung 3: Abnahme der relativen Schwingamplituden eines Bebens (GMPE, s. Formel im Text) mit der Hypozentralentfernung R. 14

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Rasterung (250 m x 250 m) und Erzeugung der Knotenpunkte als synthetische Erdbebenherde innerhalb des Betrachtungsgebiets NRW. 15

Abbildung 5: Netzperformance des Netzes des GD NRW. 16

Abbildung 6: Netzperformance nach Erhöhung der Rauchbelastung um den Faktor 10 an der Station PLH durch bspw. die Inbetriebnahme einer zusätzlichen WEA im unmittelbaren Umfeld 17

Abbildung 7: Differenzen der örtlichen Vollständigkeitsmagnituden durch Verschlechterung des Rauschlevels an der Station PLH 18

Abbildung 8: Rauschbelastung in NRW. 20

Abbildung 9: Netzperformance nach Erweiterung des Messnetzes um eine weitere Messstation. 21

Abbildung 10: Netzperformance nach Erweiterung des Messnetzes um zwei weitere Messstationen. 21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rauschquellen mit Gewichtungsfaktoren 19

Zusammenfassung

Die Erdbebentätigkeit in einer vorgegebenen Region (z. B. in Nordrhein-Westfalen) wird mit seismologischen Netzen beobachtet und überwacht. Diese Netze bestehen aus einer Zahl einzelner seismologischer Stationen, die an geeigneten Standorten installiert wurden. Die Netze werden von unterschiedlichen Institutionen betrieben und unterliegen zudem verschiedenen Aufgaben. Netze der geologischen Dienste oder der Erdbebendienste der Länder dienen meist hoheitlichen Aufgaben, Netze der Universitäten dienen der Forschung und Lehre, privatrechtlich betriebene Netze haben meist Sonderaufgaben wie die Überwachung von Bergbauaktivitäten. Die Einzelstationen sind mit hochempfindlichen Schwingungssensoren ausgestattet, die kleinste Bodenbewegungen im Nanometer-Bereich erfassen. All diese Geräte arbeiten volldigitalisiert und senden die aufgezeichneten Daten in Quasi-Echtzeit an zentrale Datenserver, wo anschließend sowohl automatische als auch manuelle Auswertungen durchgeführt werden.

Die Sensoren der seismologischen Stationen können durch Bodenerschütterungen jeglicher Art gestört werden, wobei die standort- und zeitabhängigen Rauschbelastungen sowohl natürlichen als auch künstlichen Ursprungs sein können. Windenergieanlagen (WEA) sind neben vielen anderen technischen Einrichtungen Quellen jener Störungen. Insgesamt beeinträchtigen diese Störungen die Netzperformance, die ansonsten durch die Anzahl der Einzelstationen und die geometrische Konfiguration des Netzes vorgegeben ist. Üblicherweise wird die Netzperformance über die so genannte ortsabhängige Vollständigkeitsmagnitude definiert, die angibt, ab welcher Magnitude[1] alle Ereignisse mit einer vorgegebenen Herdlokation erfasst werden. Die Vollständigkeitsmagnitude für eine gesamte Region ergibt sich letztendlich aus der maximalen Vollständigkeitsmagnitude einer Region, also der Magnitude, die an allen möglichen Ereignisorten innerhalb des Betrachtungsgebiets auftreten kann und gleichzeitig vom Gesamtnetz mit vordefinierten Kriterien detektiert werden kann.

Unter Zugrundelegung einiger weniger Annahmen lassen sich genaue Karten der lokalen Vollständigkeitsmagnituden eines vorgegebenen Netzes erarbeiten. Sie erlauben eine Diskussion der Netzperformance in Relation zu vorgegebenen Aufgaben des Netzes. Wiederholungen dieser Berechnungen mit angenommenen höheren Rauschbelastungen einzelner Stationen beispielsweise durch zusätzliche Windenergieanlagen erlauben es, darzustellen, wie sich z. B. die Errichtung einer neuen Windenergieanlage auf das Netz auswirkt und ob und wie sie die Aufgaben des Netzes beeinträchtigt. Dabei werden Vorbelastungen aller Stationen bspw. durch bereits existierende Windenergieanlagen automatisch berücksichtigt.

Durch weitere Berechnungen lässt sich die Wirkung von Kompensationsmaßnahmen, wie z. B. die Einrichtung zusätzlicher Stationen oder die Verlegung von Stationen in ein Bohrloch mit dadurch verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio, SNR) prognostizieren. Kartographische Darstellungen der generellen Rauschbelastung können die Planung von Kompensationsmaßnahmen nachhaltig erleichtern.

Das Finden geeigneter Lokationen für zusätzliche Stationen, z. B. im Rahmen einer Kompensationsmaßnahme, kann durch die Hinzunahme von landesweiten Landnutzungsdaten, die eine Einschätzung hinsichtlich lokaler Rauschniveaus erlauben, erleichtert werden. Messungen der tatsächlichen lokalen seismischen Rauschbelastung an Neustandorten werden dadurch jedoch nicht überflüssig.

[1] Maß für die Stärke des Erdbebens.

1 Einleitung

Seismologische Netze, also Netze zur Überwachung der Erdbebenaktivität einer Region, sind wichtig als Risikovorsorge (Erdbebenalarmsysteme) aber auch notwendig für die wissenschaftliche Beschäftigung mit natürlichen und induzierten (menschgemachten) Erdbeben. Ein seismologisches Netz besteht aus einer gewissen Anzahl an in der Region verteilter seismologischer Stationen, die die Erderschütterungen mit Seismometern aufzeichnen und zur Weiterverarbeitung und Auswertung in (nahezu) Echtzeit an Zentralen übermitteln. Während eine seismologische Station Schwingungen an der Messstelle aufzeichnet, kann mit einem seismologischen Netz über die Ausbreitung der Erdbebenwellen im ganzen Netz (oder in Teilbereichen) der Ursprung des Erbebens (Erdbebenherd) lokalisiert werden. Sowohl die Ausgestaltung der Einzelstationen als auch das Design der Netze ist dabei den jeweiligen Aufgabenstellungen des Gesamtnetzes angepasst. Globale Netze z. B. zur Überwachung des Atomwaffen-Teststoppabkommens unterscheiden sich von Netzen zur Überwachung einer regional begrenzten seismisch aktiven Region wie bspw. der Schwäbischen Alb. Solche wiederum unterscheiden sich von lokalen Netzen zur Überwachung von z. B. Bergbaubetrieben.

Die unterschiedlichen Anforderungen an die Netze ergeben sich also aus den unterschiedlich definierten Aufgaben der Überwachung, wobei grundsätzlich mehrere Aufgaben einem einzigen Netz zugeordnet werden können. So stellt sich das Netz des Geologischen Dienstes (GD) in Nordrhein-Westfalen (NRW) beispielsweise gleichzeitig eine Aufgabe als Erdbebenalarmsystem (EAS) und als Netz zur generellen Überwachung der Erdbebentätigkeit der Erdbebengebiete am Niederrhein und in der Eifel. Letztlich werden in diesen Fällen die Anforderungen an das Netz durch die anspruchsvollste der gestellten Aufgaben vorgegeben.

Die Leistungsfähigkeit eines solches Netzes ergibt sich nicht nur aus dessen Konfiguration, also aus der Anzahl und den Standorten der Einzelstationen, sondern auch aus den Rauschbelastungen der Einzelstationen. Da diese Messstationen sehr kleine Erschütterungen als Schwinggeschwindigkeiten im Bereich einiger Nanometer pro Sekunde aufzeichnen müssen, können sie durch kleinste Fremdeinflüsse unterschiedlichster Quellen gestört werden. Diese können sowohl Quellen natürlichen Ursprungs wie Wind, Regen, Meeresbrandung sein oder durch künstliche Quellen wie Straßen, Bahnlinien, Industrie hervorgerufen werden. Auch Windenergieanlagen zählen zu solchen Störquellen, wobei der massive weitere geplante Zubau ohne die Durchführung von geeigneten Gegenmaßnahmen die Leistungsfähigkeit seismologischer Netze negativ beeinflussen kann. Zur quantitativen Beurteilung dieser Auswirkungen wird ein Tool zur Quantifizierung der Netzperformance vorgestellt. Dies eignet sich, Einflüsse auf das Netz zu diskutieren und bspw. geeignete Kompensationsmaßnamen zu erarbeiten, zu bewerten und vorzuschlagen.

2 Erdbebenmagnituden

Die Stärken von Erdbeben am Entstehungsort (Erdbebenherd) werden üblicherweise in Magnituden angegeben. Diese werden nach vorgegebenen Verfahren aus den Messwerten einer größeren Zahl von seismologischen Stationen (mindestens drei) ermittelt. Dazu ist vorab die Lokation des Erdbebenherdes inklusive dessen Tiefe zu bestimmen. Das seismologische Netz muss in der Lage sein diese Auswertungen, also sowohl die Lokalisierung als auch die nachfolgende Magnitudenbestimmung, für alle Beben mit einer Magnitude oberhalb eines vorgegebenen Wertes und für alle Herdlokationen für ein vorgegebenes Gebiet (dessen äußere Umfassung als Perimeter bezeichnet wird) zu ermöglichen. Die Magnitude ab der dies möglich ist wird als Vollständigkeitsmagnitude bezeichnet.

Eine Beziehung zu den Aufgaben des Netzes lässt die lokale Vollständigkeitsmagnitude (completenes magnitude, M_c) zu. Sie ist ein Maß dafür, ab welcher Magnitude alle Erdbeben, die ihren Herd an einem vorgegebenen Betrachtungspunkt haben, vollständig und mit Sicherheit erfasst werden und gleichzeitig auswertbare Aufzeichnungen gewährleistet sind. Im Beispiel des Erdbebennetzes des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen (GD NRW) würde diese Vollständigkeitsmagnitude nach eigenen Angaben für das Erbebenalarmsystem (EAS) bei $M_c = 3$ und für die allgemeine Bearbeitung der regionalen Seismizität[2] bei $M_c = 1$ liegen.

Da vorab nicht bekannt ist, wo ein Beben stattfinden wird, müssen die lokalen Vollständigkeitsmagnituden für eine ganze Region, also für alle möglichen Herdlokationen innerhalb eines vorgegebenen Perimeters, welches durch die Aufgabenstellung vorgegeben ist, betrachtet werden. Daher wird üblicherweise von einer lokalen zu einer regionalen Vollständigkeitsmagnitude übergegangen, welche als die größte lokale Vollständigkeitsmagnitude in dem betrachteten Gebiet definiert ist. Das betrachtete Gebiet sollte durch ein Perimeter abgegrenzt sein. Im Falle natürlicher (tektonischer) Seismizität bieten sich hier die Gebiete der Erdbebenzonen 0 - 3 nach DIN EN 1998 an (von 0 nach 3 steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens stärkerer Erbeben an). Im Fall z. B. der Überwachung eines Bergbaubetriebs würde der Perimeter die Region möglicher Einwirkungsbereiche nach Bergrecht (EinwirkBergV) umfassen. Als Beispiel für mögliche Perimeter in NRW sind die Umrisse der Erdbebenzonen 0 - 3 (farbliche Flächen) sowie der Bergbaugebiete (schraffierte Flächen) und der Stationsstandorte des Messnetzes des GD in Abbildung 1 dargestellt.

[2] Räumliche und zeitliche Verteilung sowie Energie der auftretenden Erdbeben in einem Gebiet.

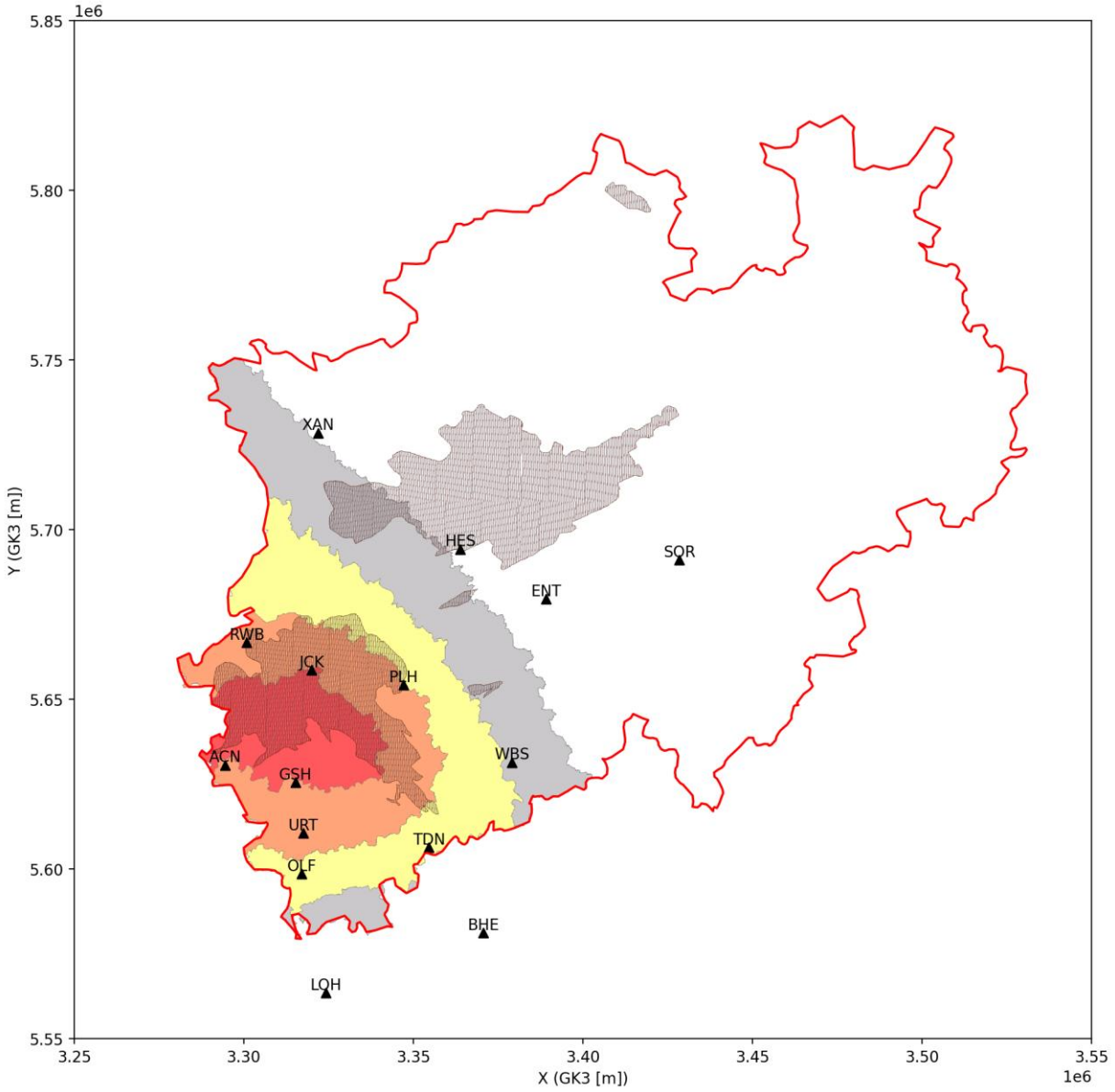

Abbildung 1: Erdbebenzonen und Bergbaugebiete in NRW nach DIN EN 1998 sowie die Standorte der seismologischen Stationen des GD NRW. Die Erdbebenzonen werden in die Kategorien 0 (grau) bis 3 (rot) eingeteilt. Straffiert sind die Flächen in denen induzierte Ereignisse des Stein- bzw. Braunkohlenbergbaus auftreten können. Quelle: GD NRW

3 Rauschbelastung einer seismologischen Station

Die Einzelstationen eines seismologischen Netzes bestehen aus hochempfindlichen Geräten zur Erfassung und Aufzeichnung von kleinsten Bodenbewegungen. In der Regel werden die Schwinggeschwindigkeiten der Bodenteilchen durch ein Seismometer erfasst, wobei diese oft im Bereich von µm/s oder sogar nm/s auftreten. Schwinggeschwindigkeiten können bei Bedarf in andere Schwingungsgrößen (Verschiebung oder Schwingbeschleunigung) umgerechnet werden. Da Bodenschwingungen nicht nur durch Erdbeben verursacht werden, sondern eine Vielzahl anderer natürlicher und künstlicher Quellen, wie z. B. Verkehr, Industrie, Wind und Meeresbrandung als Ursache in Frage kommen, liegt es auf der Hand, dass die Erdbebenaufzeichnungen durch Störsignale beeinträchtigt oder gar gestört werden können. Auch Windenergieanlagen können eine derartige Störquelle darstellen. So ist es durch den regional teilweise großen Zubau an Windenergieanlagen in den letzten Jahren zu einem ernsthaften Konflikt zwischen Planenden/Betreibenden von Windenergieanlagen und Betreibenden seismologischer Stationen gekommen, welcher zu gravierenden Auswirkungen hinsichtlich der Genehmigung neuer Windenergieanlagen, aufgrund des angestrebten Schutzes von Erdbebenstationen, führt.

Ob die Summe der Rauschbelastungen an einer Station deren Funktion und dann auch die Funktion des Netzes beeinflusst hängt nicht nur von der Größe dieser Rauschbelastung ab, sondern von ihrer relativen Größe bezogen auf die Signale eines möglichen Erdbebens. Hier wird üblicherweise von dem Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio, SNR) gesprochen.

Um dieses zu berechnen, wird ein Maß für die Rauschbelastung am Standort einer Erdbebenmessstation benötigt. Üblicherweise kann hier ein Wert im Zeitbereich (Schwinggröße aufgetragen gegen die Zeit) oder im Frequenzbereich (Schwinggröße aufgetragen gegen die Frequenz) gefunden werden. Da die wesentlichen Auswertungen der Erdbebenaufzeichnungen (Seismogramme) wie die oben erwähnten Methoden zur Lokalisierung und Magnitudenbestimmung eines seismischen Ereignisses im Zeitbereich erfolgen, empfiehlt sich die Betrachtung eines Wertes zur Quantifizierung der Rauschbelastung ebenfalls im Zeitbereich. Üblich ist hier nun der sog. I95-Wert[3], der angibt, dass 95 % aller aufgezeichneten absoluten Amplituden in einem definierten Zeitbereich unterhalb dieses I95-Wertes liegen, wobei dieser außerdem nahezu die doppelte Standardabweichung einer Gaußverteilung einer betrachteten Zeitreihe beschreibt (Abbildung 2). Das Forschungskollegium Physik des Erdkörpers (FKPE) bzw. der Bundesverband Geothermie[4] fordern für lokale seismische Netze zur Überwachung von Bergbaubetrieben I95-Werte der Schwinggeschwindigkeit von kleiner 2 µm/s.

[3] Groos,Ritter (2009); Baisch et al. (2012); GTV 1101 Richtlinie (2011).

[4] GTV 1101 Richtlinie (2011).

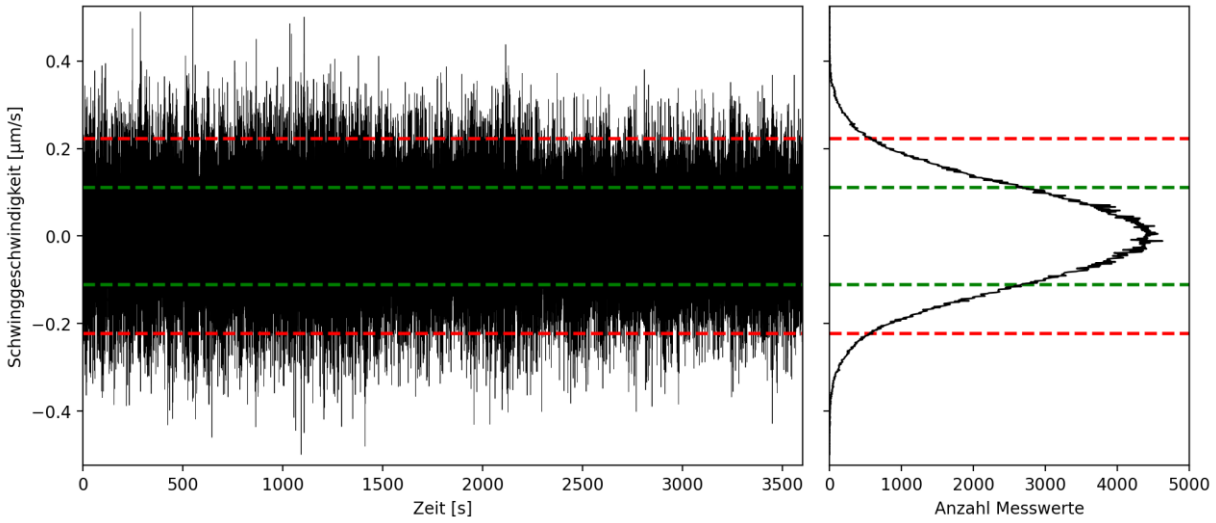

Abbildung 2: Seismogramm einer 1-stündigen Rauschaufzeichnung an einer Bohrlochmessstation eines Netzwerkes zur Überwachung induzierter Seismizität. Die Histogramme zu der Zeitreihe zeigen eine Gaußverteilung, wobei die grünen Linien den RMS (root mean square, eine Standardabweichung) und die roten Linien den I95 (doppelte Standardabweichung) beschreiben. I95 liegt hier deutlich unterhalb der lokal geforderten ±2 µm/s. Quelle: Neuffer, Kremers (2017) nach Groos, Ritter (2009)

4 Amplituden-Entfernungsbeziehungen von Erdbeben

Zur Diskussion des SNR muss neben dem Rauschen auch das auszuwertende Signal betrachtet werden. Die Größe der von einem Erdbeben verursachten Schwingungen an einem Einwirkungsort (z. B. an einer seismologischen Station) hängt nicht nur von der Magnitude des Bebens, sondern von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen wie z. B. von der Epizentralentfernungen[5] und der Herdtiefe aber auch der lokalen Geologie ab. Um mit Hilfe des hier vorgestellten Tools standardisierte Betrachtungen zu ermöglichen, kann beispielsweise von einer empirisch erzeugten gemittelten Amplituden-Entfernungs-Verteilung (z. B. ground motion prediction equation, GMPE[6]) ausgegangen werden. Des Weiteren wird für das gesamte Betrachtungsgebiet eine mittlere Herdtiefe aller möglichen Erdbebenherde für die Bewertung der Netzwerkperformance festgelegt. Wichtig dabei ist, dass eine Amplituden-Entfernungsbeziehung verwendet wird, die sich auf den betrachteten Entfernungsbereich bezieht. Grundsätzlich sind diese sind diese Beziehungen für Fernbeben anders als für Nahbeben, bei denen oft von Epizentralentfernungen kleiner als 1.000 km ausgegangen wird.

In der Realität ist die Amplitudenverteilung rund um einen Erdbebenherd aufgrund komplexer Abstrahlcharakteristiken, die durch die Bruchvorgänge und deren Orientierung am Bebenherd bestimmt werden, und der Geologie auf dem Wellenausbreitungsweg wesentlich komplizierter. Zur modellhaften Beschreibung der zu erwartenden Amplituden seismischer Ereignisse wird jedoch eine radialsymmetrische GMPE unterstellt, da detaillierte Parameter der auftretenden Beben vorab nicht bekannt sind.

[5] Entfernung zwischen der Lage des Epizentrums an der Erdoberfläche und dem Einwirkungsort.

[6] Douglas et al. (2013).

5 Signal-Rausch-Verhältnis

Wenn nun die (für vorgegebene Magnituden) zu erwartenden Signalamplituden in mm/s bekannt sind (basierend auf der verwendeten Beziehung zur Magnitudenberechnung) und auch die I95-Werte (ebenfalls in mm/s) für das Rauschen, kann diskutiert werden welches Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) als Quotient dieser beiden Werte notwendig ist, damit die Seismogramme im Sinne der Aufgabenstellung ausgewertet werden können. Hier wird oft ein Verhältnis von 3 als ausreichend angesehen.[7] Die Signale der Erdbebenwellen sollten also dreimal so groß sein wie das Rauschen an der Station, wo die Erdbeben aufgezeichnet werden. Die größten Amplituden in einem Seismogramm weisen in der Regel meist die Scherwellen (sekundäre Wellen, S-Wellen) auf. Sie werden auch zur Magnitudenbestimmung genutzt und durch die GMPE vorgegeben, wobei die Magnitudenbestimmung eine Lokalisierung des Bebenherdes voraussetzt. Diese erfolgt meist anhand der Ersteinsätze der Kompressionswellen (primäre Wellen, P-Wellen), deren Amplituden etwa um den Faktor 5 kleiner sind als die Amplituden der S-Wellen. Zur erfolgreichen Lokalisierung (und Detektion) eines seismischen Ereignisses gelten in der Regel die Voraussetzungen, dass 3 (besser 4) Stationen des Gesamtnetzes (vorgegebene Koinzidenz) die P-Wellenersteinsätze mit einem SNR ≥ 3 aufgezeichnet haben müssen.

[7] Baisch et al. (2012); GTV 1101 Richtlinie (2011)

6 Kartographische Erfassung von lokalen Vollständigkeitsmagnituden – Netzperformance

Zur Erarbeitung und Darstellung der Leistungsfähigkeit eines Netzes sind einige Vorabinformationen oder Annahmen notwendig. Hier wird die Netzperformance an der Detektionsschwelle oder genauer an der Vollständigkeitsmagnitude an jedem Betrachtungspunkt in einem vorgegebenen Gebiet gemessen. Es wird beispielhaft die Fläche von ganz NRW als Beobachtungsgebiet betrachtet. Die Vollständigkeitsmagnitude ist dabei definiert als die Magnitude, deren Signale an mindestens 4 (Koinzidenz 4) Stationen mit einem Signal-Rausch-Verhältnis ≥ 3 für den P-Wellen-Einsatz registriert werden. Dabei berechnet sich die Signalamplitude einer P-Welle in Schwinggeschwindigkeiten mit Hilfe der Magnitudenformel nach Bormann & Dewey[8]

$$M_L = \log10(A) + 1{,}11\ \log10(R) + 0{,}00189\ R - 2{,}09$$

wie folgt:

$$A = 10^{(ML - 1{,}11\ \log10(R) - 0{,}00189\ R + 2.09)} * 2\pi f * 0{,}2.$$

Wobei R die Hypozentralentfernung[9] in km, M_L die lokale Magnitude und f die Zentralfrequenz, bei der die Hauptenergie des Erdbebens zu finden ist, angibt. Im Folgenden werden für alle angenommenen Erdbeben eine Herdtiefe von 10 km und eine Zentralfrequenz von 5 Hz angenommen. Diese Werte sind für die Beben in NRW typisch.

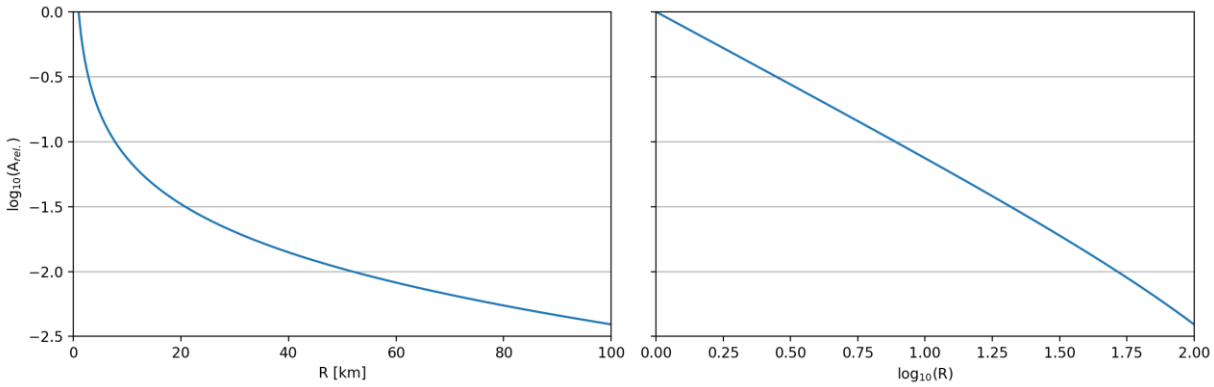

Abbildung 3: Abnahme der relativen Schwingamplituden eines Bebens (GMPE, s. Formel im Text) mit der Hypozentralentfernung R. Links: die logarithmischen relativen Amplituden gegen Entfernung R [km]. Rechts: die logarithmischen relativen Amplituden gegen die logarithmischen Entfernungen

Im Beispiel wird das Messnetz des GD NRW zugrunde gelegt und das Rauschen der Einzelstationen als I95-Wert angenommen. Die I95-Werte ergeben sich aus den ermittelten Rauschwerten in Ritter (2021), wobei angenommen wird, dass die Amplituden der Rauschwerte konstant im Frequenzbereich von 1 - 10 Hz auftreten.

Zur kartographischen Erfassung wurde das Betrachtungsgebiet quadratisch in Abständen von 250 m gerastert, wobei jeder Knotenpunkt des Rasters einen möglichen Erdbebenort beschreibt (siehe Abbildung 4). Für die hier dargestellte Vorgehensweise ergeben sich knapp 1,5 Millionen gleichmäßig verteilte Knotenpunkte, die bei der Modellierung der Netzperformance als synthetische Ereignislokationen dienen.

[8] Bormann, Dewey (2014).

[9] Entfernung zwischen Erdbebenherd und dem Einwirkungsort

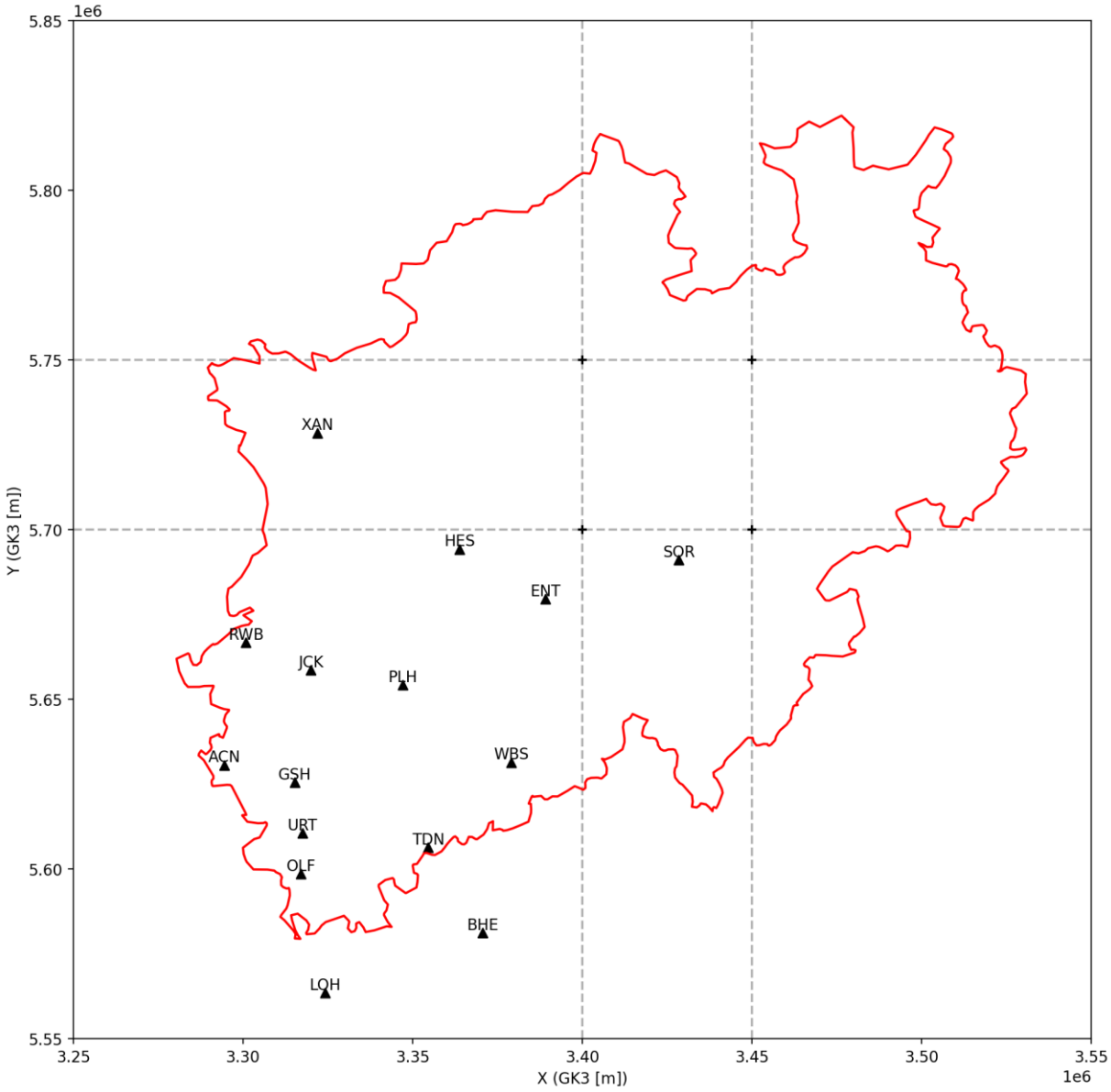

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Rasterung (250 m x 250 m) und Erzeugung der Knotenpunkte als synthetische Erdbebenherde innerhalb des Betrachtungsgebiets NRW (rote Grenze). Eingezeichnet sind die seismologischen Stationen des GD NRW mit ihren Kurzbezeichnungen.

Mit Hilfe der Formel zur Bestimmung der Signalamplitude und den ermittelten I95-Werten als Rauschbelastung der einzelnen Messstationen des Messnetzes des GD NRW wird für jeden synthetischen Erdbebenherd (Knotenpunkt) über 15 Iterationen mit Hilfe der mathematischen Näherungsmethode „Intervallhalbierungsverfahren" die minimale Magnitude bestimmt, die das Erdbeben erreichen muss, damit die Signalamplituden mit einem SNR ≥ 3 für die P-Einsätze an mindestens 4 Stationen aufgezeichnet werden können. Für das Messnetz des GD NRW und bezogen auf die Gesamtfläche des Landes ergeben sich die örtlichen Vollständigkeitsmagnituden und damit die Netzperformance wie in Abbildung 5 dargestellt. Es zeigt sich, dass in den relevanten Gebieten, also in den bekannten Erdbebenzonen (vgl. Abbildung 1), die angestrebte Vollständigkeitsmagnitude von $M_L = 1$ in großen Teilen des Betrachtungsgebiets nicht erreicht wird. In anderen Landesteilen, die seismologisch weniger oder nicht interessant sind, liegen die lokalen Vollständigkeitsmagnituden noch deutlich höher.

Eine Vollständigkeitsmagnitude für ein gesamtes Betrachtungsgebiet wäre der Höchstwert der lokalen Vollständigkeitsmagnitude innerhalb dieses Gebietes. Dieser Wert hängt naturgemäß sehr stark von der Festlegung des Betrachtungsgebietes (Perimeter) ab, könnte in NRW beispielsweise für die Gebiete der Erdbebenzonen 0 - 3 betrachtet werden. Diese Werte können der Karte entnommen werden, für Gesamt-NRW wird dieser Wert deutlich über $M_L = 2$ liegen.

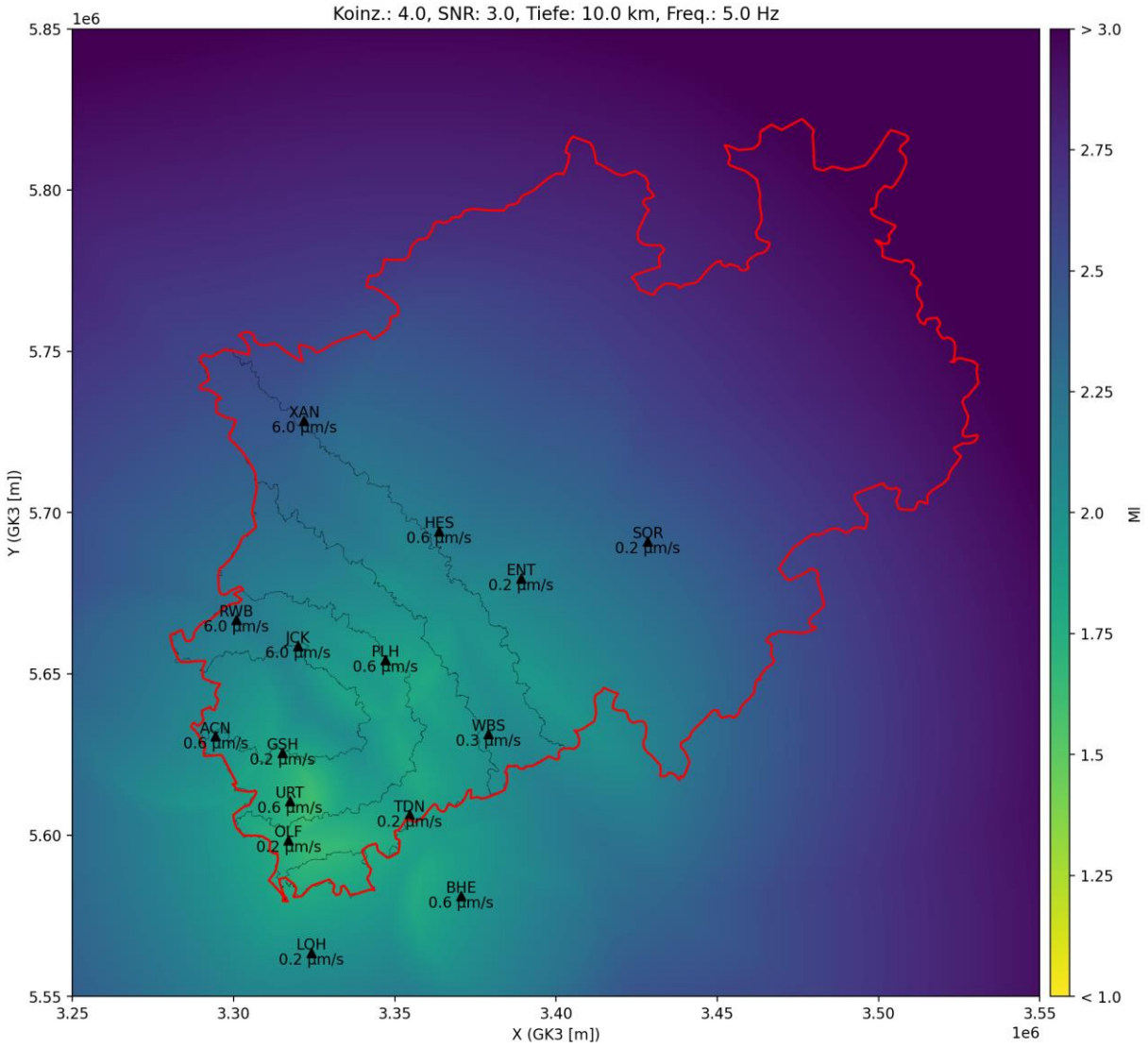

Abbildung 5: Netzperformance des Netzes des GD NRW. Die Farbskala gibt die lokale Vollständigkeitsmagnitude an unter den im Text genannten Annahmen.

7 Änderung der Netzperformance durch Änderung der Rauschbelastung an einer Einzelstation

Da Windenergieanlagen an nahegelegenen seismologische Stationen ein hohes Rauschsignal verursachen können, soll betrachtet werden, wie sich diese Belastung auf die Netzperformance auswirken. Hierzu wird nun beispielhaft die Station PLH (im Zentrum des Messnetzes) näher betrachtet. Sie hat derzeit eine Rauschbelastung von I95 = 0.6 µm/ s (siehe Abbildung 5). Es wird unterstellt, dass sich z. B. durch eine neue oder geplante WEA diese Rauchbelastung um den Faktor 10 auf I95 = 6.0 µm/s erhöht. Die sich dann ergebenden örtlichen Vollständigkeitsmagnituden für ganz NRW basierend auf der erneuten Durchführung der Modellierung unter gleichbleibenden Annahmen der synthetischen Erdbeben sind in Abbildung 6 dargestellt.

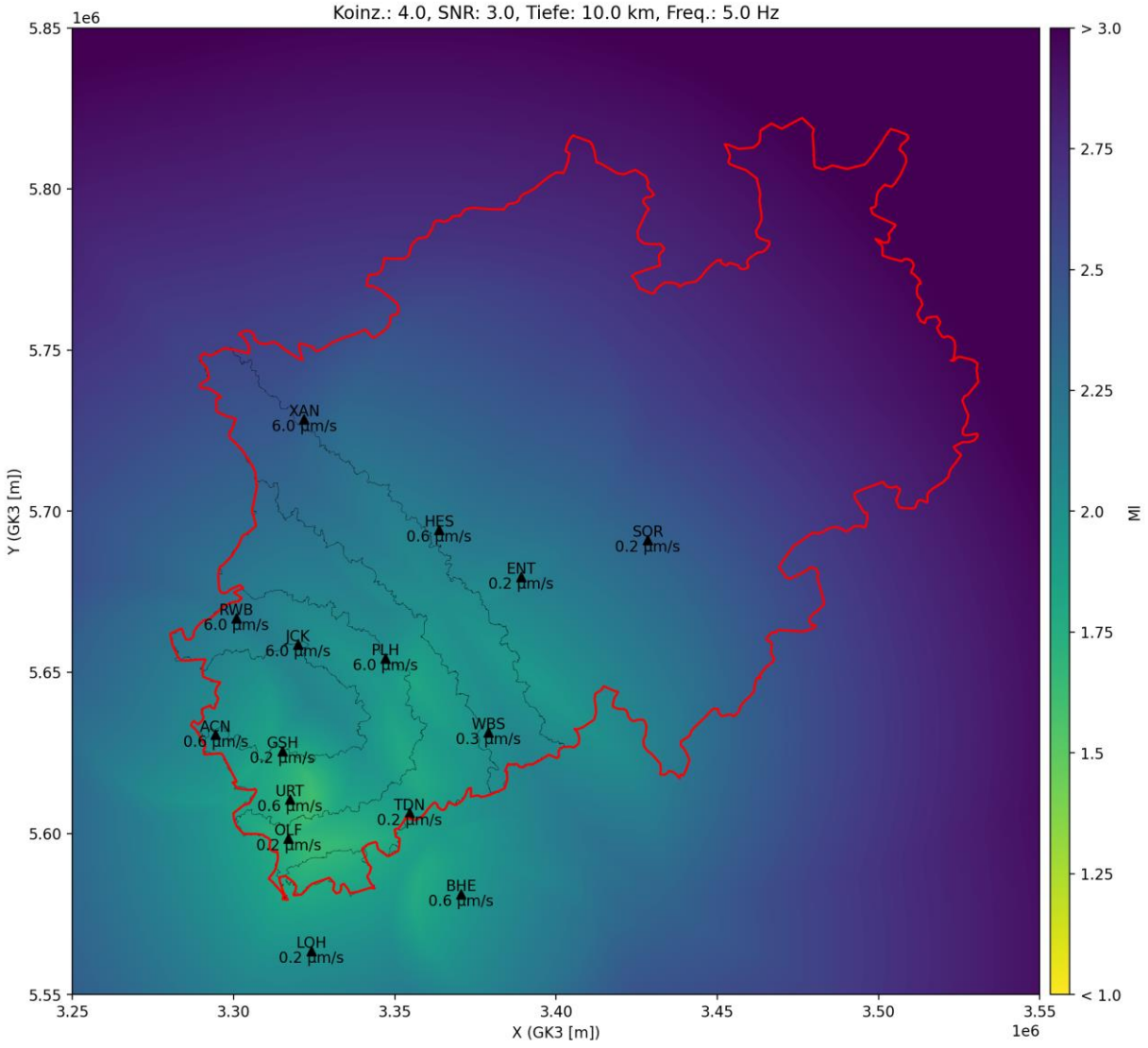

Abbildung 6: Netzperformance nach Erhöhung der Rauchbelastung um den Faktor 10 an der Station PLH durch bspw. die Inbetriebnahme einer zusätzlichen WEA im unmittelbaren Umfeld

Die Verschlechterung der Stationsqualität resultiert in einer nur geringen Änderung der Gesamtnetzwerkperformance auch in der näheren Umgebung, die in der Gesamtübersicht nur schwer zu erkennen ist, weshalb eine Darstellung der sich ergebenden Differenzen in Abbildung 7 erfolgt. Es zeigt sich, dass in vereinzelten lokalen Bereichen im Umfeld der gestörten Station die Vollständigkeitsmagnitude um bis zu 0,25 Magnitudeneinheiten erhöht sein kann. Im weiteren regionalen Umfeld ergeben diese Berechnungen keine merklichen Verschlechterungen der Netzperformance.

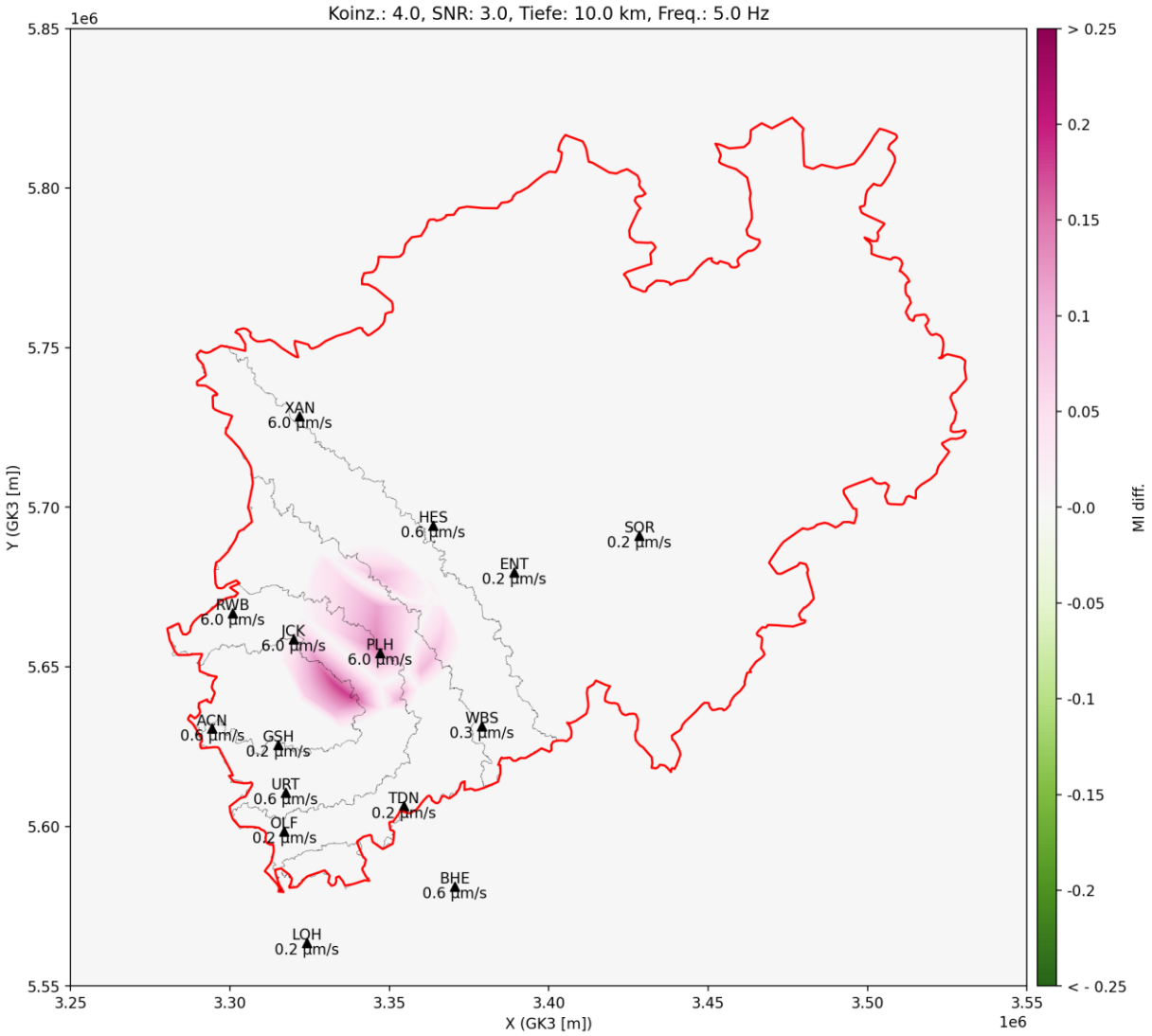

Abbildung 7: Differenzen der örtlichen Vollständigkeitsmagnituden durch Verschlechterung des Rauschlevels an der Station PLH

Ähnliche Berechnungen wie sie hier für die Verschlechterung einer seismologischen Station durchgeführt wurden, können auch für den Wegfall bzw. den Zubau einer Station durchgeführt werden. Insgesamt liefert diese Berechnungsmethode ein Tool für die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der Messnetze trotz ständig steigender Belastung z. B. durch den Ausbau der Windenergie an Land.

8 Ausgleichsmaßnahmen (Kompensation)

In Kapitel 6 wurde dargelegt, wie numerisch und kartographisch die Veränderungen der Performance eines Netzes erfasst und dargestellt werden können, die sich durch Veränderungen der Rauschbelastung an Stationsstandorten ergeben. Generell ist der Zubau von zusätzlichen Messstationen die geeignetste Maßnahme, um die Auswirkungen einer erhöhten Rauschbelastung an einer Einzelstation auf die Netzperformance zu kompensieren. Im Umweltrecht sind derartige Kompensationsmaßnahmen in vielerlei Zusammenhängen üblich. Insofern könnte auch die Möglichkeit eröffnet werden, den Zubau einer weiteren Messstation, möglicherweise vom Windenergieanlagenbetreiber finanziert oder anderweitig unterstützt, als Kompensation für die Beeinträchtigung des Netzwerks zuzulassen.

In Einzelfall geht es schließlich darum, einen geeigneten Standort für eine dahingehende Maßnahme zu finden. Nach den Berechnungen und Darstellungen in den Kapiteln 5 und 6 lässt sich der Nutzen einer weiteren Station für die Netzperformance quantitativ bewerten. Der Nutzen einer neuen Messstation richtet sich danach, ob in einem geeigneten Gebiet ein geeigneter Standort zur Installation gefunden werden kann, der sich insbesondere durch eine geringe Rauschbelastung auszeichnet und bestenfalls auch zukünftig eine hohe Aufzeichnungsqualität aufweist.

Das Messen der Rauschbelastung durch mobile, zeitlich begrenzte Messungen ist bei der Standortauswahl unerlässlich. Wenn jedoch viele Standorte als zusätzliche Lokationen zur Installation einer weiteren Messstation in Frage kommen, kann dies unzumutbar aufwändig sein. Es empfiehlt sich also auf der Basis vorhandener Informationen eine Vorauswahl zu treffen.

8.1 Karten der Rauschbelastung

Zur Ermittlung der Rauschbelastung an beliebigen Punkten eines Betrachtungsgebiets wird das Gebiet ebenfalls gerastert (s. Abbildung 4), wobei jeder Knotenpunkt in diesem Fall einen möglichen Standort zur Installation einer Messstation darstellt. Für jeden Knotenpunkt wird anschließend das relative Rauschniveau mit Hilfe von GIS-Datensätzen, die Informationen über Landnutzung, Infrastruktur und weiteren Einflussfaktoren, die die Rauschbelastung eines Standortes definieren, bestimmt. Hier werden auch alle bekannten Windenergieanlagen berücksichtigt (Vorbelastung durch Windenergieanlagen). Jedem Knotenpunkt wird dann je nach Nutzung der unmittelbar umliegenden Flächen (250 m x 250 m um Knotenpunkt) der jeweilige Gewichtungsfaktor (Tabelle 1) bzw. die Summe der Gewichtungsfaktoren zugeordnet. Durch die Überlagerung der Rauschbeiträge ergibt sich eine Karte (Abbildung 8), die die relative Rauschbelastung an jedem möglichen Standort zur Installation einer weiteren Messstation beschreibt. Mit Hilfe dieser Karte kann eine Vorauswahl möglicher Standorte für weitere Stationen bzw. für Kompensationsmaßnahmen gefunden werden.

Tabelle 1: Rauschquellen mit Gewichtungsfaktoren, nach Kraft et al. (2013)

Kategorie	Typ	Gewichtungsfaktor
Landnutzung	Gewerbegebiet, Industriegebiet, Wohngebiet, Militärgebiet, Steinbruch	150
	Kleingärten, Friedhof, Park, Bauernhof, Erholungsgebiet	50
	Wald, Naturschutzgebiet, Heide, Wiese, Feld	20
Infrastruktur	Autobahn, Bundesstraße	150
	Bahnlinie	130
Sonstige	Gewässer	255
	Windenergieanlage	150

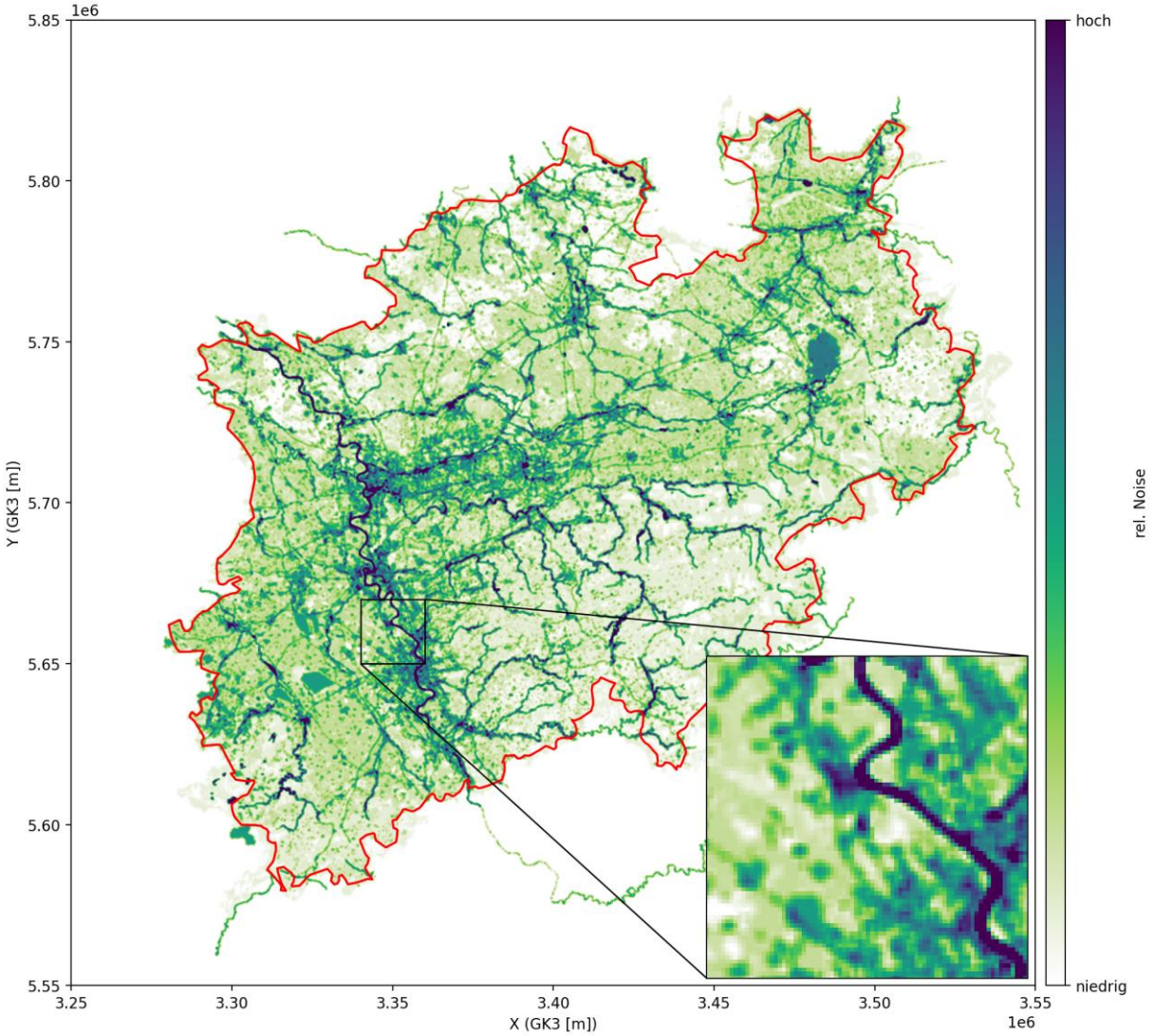

Abbildung 8: Rauschbelastung in NRW. Farbcodiert ist das normierte relative seismische Rauschniveau nach Überlagerung der Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 1.

8.2 Änderung der Netzperformance durch zusätzliche Messstationen

Mit Hilfe der Karte der Rauschbelastung können Standorte identifiziert werden, die aufgrund eines niedrigen Rauschlevels als mögliche Standorte zur Installation einer weiteren Messstation in Frage kommen. Abbildung 9 zeigt die Karte der lokalen Vollständigkeitsmagnituden (links analog zu Abbildung 5 und Abbildung 6) bzw. die Differenz (rechts analog zu Abbildung 7) zu der Ausgangssituation in Abbildung 5 unter Annahme einer zusätzlich installierten Messstation (ZUSATZ1) mit einem Rauschlevel von I95 = 0,6 µm/s südwestlich der gestörten Station PLH. Eine deutliche Verbesserung der lokalen Vollständigkeitsmagnitude um ≤ -0,25 im Bereich der Erdbebenzone der höchsten Kategorie (Kategorie 3) im Vergleich zur Ausgangssituation eines ungestörten Messnetzes (Abbildung 5) und dementsprechend auch im Vergleich zum Szenario einer starken Störung der Station PLH ohne Kompensationsmaßnahme (Abbildung 6) ist durch die Inbetriebnahme einer weiteren Messstation (ZUSATZ1, gleiches Rauschniveau wie PLH in der Ausgangssituation), zu erreichen. Eine vollständige Kompensation der Verschlechterung der lokalen Vollständigkeitsmagnituden insbesondere im nördlichen Gebiet der gestörten Station PLH ist durch den Zubau von nur einer Messstation in diesem Fall nicht zu erreichen.

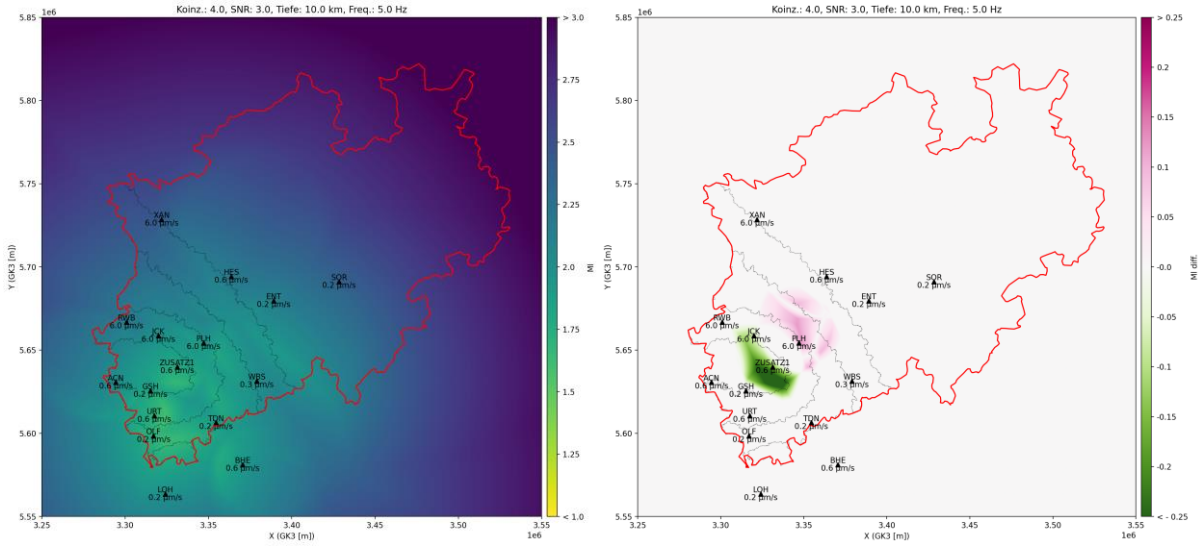

Abbildung 9: Netzperformance nach Erweiterung des Messnetzes um eine weitere Messstation (ZUSATZ1). Links: absolute lokale Vollständigkeitsmagnituden. Rechts: Differenz der lokalen Vollständigkeitsmagnituden zum Ausgangsszenario eines ungestörten Messnetzes (Abbildung 5)

Ist dieses Ergebnis unbefriedigend und wird daher ein weiterer Standort mit einer akzeptablen Rauschbelastung (ZUSATZ2, I95 = 0,6 µm/s) im nördlichen Bereich der Messstation PLH mit Hilfe der Rauschkarten gefunden, kann dieser Bereich ebenfalls hinsichtlich einer Verbesserung der örtlichen Vollständigkeitsmagnituden kompensiert werden. Abbildung 10 zeigt die Netzperformance nach dem Zubau von zwei zusätzlichen Messstationen, wobei zu erkennen ist, dass die Verschlechterung der Aufzeichnungsqualität an der Station PLH durch zwei zusätzliche Stationen mit Rauschniveaus, die ähnlich sind zu dem ursprünglichen Rauschniveau der Station PLH, nahezu überall vollständig kompensiert werden kann und die Gesamtperformance des Netzes sogar in großen Bereichen verbessert wird.

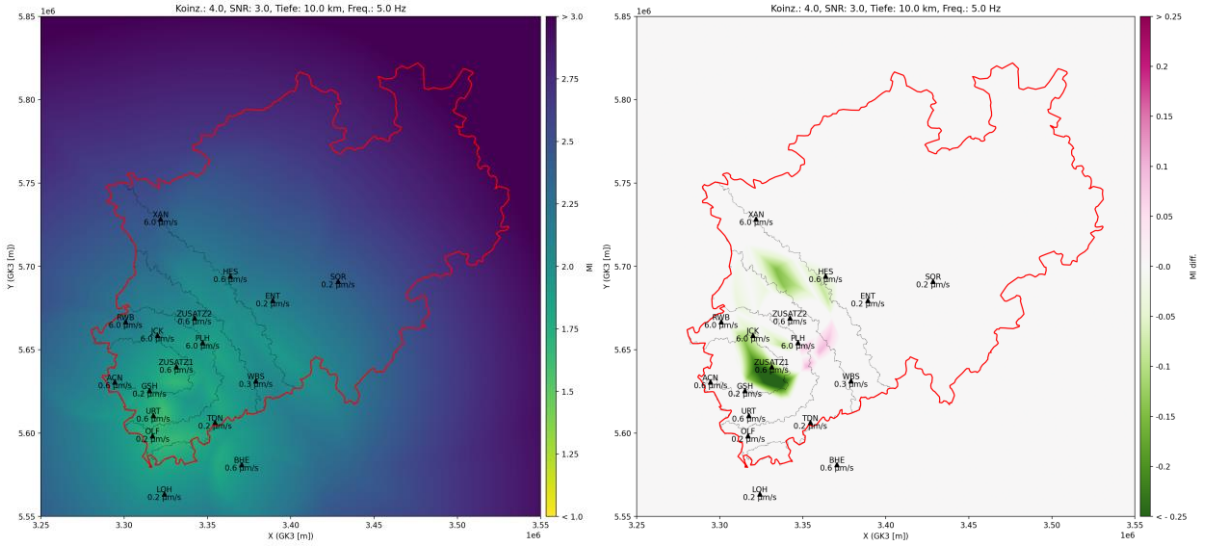

Abbildung 10: Netzperformance nach Erweiterung des Messnetzes um zwei weitere Messstationen (ZUSATZ1, ZUSATZ2). Links: absolute lokale Vollständigkeitsmagnituden. Rechts: Differenz der lokalen Vollständigkeitsmagnituden zum Ausgangsszenario eines ungestörten Messnetzes (Abbildung 5)

Die hier präsentierten Beispiele zeigen, dass mit Hilfe von erarbeiteten Rauschkarten Modellierungen gelingen können, die Kompensationsmöglichkeiten aufzeigen, die letztlich zu Verbesserungen der Netzperformance führen können, auch bei einem weiteren Ausbau der Windenergienutzung. Auch wenn die Verwendung von Rauschkarten die Findung geeigneter Lokationen für neue Stationen wesentlich erleichtert, ersetzt es nicht komplett die Durchführung von zeitlich befristeten Messungen mit Mobilstationen, um letztlich die tatsächliche Rauschbelastung an einem möglichen neuen

Stationsstandort zu bestimmen. Außerdem ist hier anzuraten mehrere Standorte als Kompensationslokationen zu überprüfen und die finale Entscheidung zur Installation einer weiteren Messstation vorwiegend auf der Basis der Messergebnisse und nicht auf den numerischen Vorüberlegungen zu treffen.

Bei der Findung geeigneter Standorte für eine oder mehrere zusätzliche Stationen sind neben seismologischen Parametern auch solche zu beachten, die mit einem zukünftigen Ausbau der Windkraft zu tun haben. Es geht darum, Lokationen zu finden, die nicht in absehbarer Zeit wieder von neuen Windenergieanlagen bedroht werden. Dies können Gebiete sein, die aus anderen Gründen (z. B. Naturschutz) für Windenergieanlagen nicht in Frage kommen oder Gebiete mit unzureichender Windhöffigkeit.

Abkürzungsverzeichnis

NRW	Bundesland Nordrhein-Westfalen
WEA	Windenergieanlage
GD NRW	Geologischer Dienst NRW
EAS	Erdbeben Alarmsystem
SNR	*Signal to noise ratio*
EinwirkBergV	Einwirkungsbereichs Bergverordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung
FKPE	Forschungskollegium Physik der Erde e. V.
GTV	Geothermische Vereinigung (heute Bundesverband Geothermie e. V.)
GMPE	*Ground motion prediction equation*
M_L	Lokalmagnitude
M_c	Vollständigkeitsmagnitude
PLH	Seismologische Station Pulheim
I95	Statistischer Bereich für 95% (2σ) einer Größe
GIS	Geo-Informationssystem

Danksagung

Es wird vorwiegend über Ergebnisse berichtet, die im Projekt „MISS - Minderung der Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen“ erarbeitet wurden. Dieses Projekt wurde gefördert durch die Europäische Union - Investitionen in unsere Zukunft - Europäischer Fond für Regionale Entwicklung und durch EFRE.NRW - Investition in Wachstum und Beschäftigung. Es wurde initiiert durch die EnergieAgentur.NRW.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Baisch, S., Fritschen, R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, T., Plenkers, K., Wassermann, J. (2012), Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität - Positionspapier des FKPE. DGG Mitteilungen, (3), 17-31.

Bormann, P., Dewey, J. W. (2014), The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. In Bormann, P., Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ (Hrsg.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), S. 1–44.

Douglas, J., Edwards, B., Convertito, V., Sharma, N., Tramelli, A., Kraaijpoel, D., Cabrera, B.M., Maercklin, N., Troise, C., (2013), Predicting Ground Motion from Induced Earthquakes in Geothermal Areas. Bulletin of the Seismological Society of America 103, S. 1875–1897. https://doi.org/10.1785/0120120197

Groos, J. C., Ritter J. R. R. (2009), Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. Geophysical Journal International 179(2), S. 1213-1231. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04343.x

GTV 1101 Richtlinie (2011), Seismizität bei Geothermieprojekten.

Neuffer, T., Kremers, S. (2017), How wind turbines affect the performance of seismic monitoring stations and networks. Geophysical Journal International 211(3), S. 1319-1327. https://doi.org/10.1093/gji/ggx370

Ritter, J. R. R. (2021), Bericht zur Erarbeitung eines Prognosetools für seismische Immissionen an Erdbeben-Messstationen in Nordrhein-Westfalen (NRW). Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes NRW. Ref. VIB2 - Bergbau, Geologischer Dienst

Impressum

© FA Wind, Juli 2021

Herausgegeben von
Fachagentur Windenergie an Land
Fanny-Zobel-Straße 11 | 12435 Berlin

www.fachagentur-windenergie.de
post@fa-wind.de

V. i. S. d. P.: Dr. Antje Wagenknecht

Die Fachagentur zur Förderung eines natur- und umweltverträglichen Ausbaus der Windenergie an Land e.V. ist ein gemeinnütziger Verein. Er ist eingetragen beim Amtsgericht Charlottenburg, VR 32573 B

Autorenschaft
Dr. Tobias Neuffer, DMT GmbH & Co. KG
Dr. Simon Kremer, DMT GmbH & Co. KG
Prof. Dr. Horst Rüter, HarbourDom GmbH

Redaktion
Dr. Dirk Sudhaus

Zitiervorschlag
FA Wind (2021), Windenergieanlagen und seismologische Netze. Beeinflussung der Performance seismologischer Netze durch Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen.

Haftungsausschluss
Die in dieser Broschüre enthaltenen Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt.

Eine Haftung für unvollständige oder unrichtige Angaben, Informationen und Empfehlungen ist ausgeschlossen, sofern diese nicht grob fahrlässig oder vorsätzlich verbreitet wurden.

Fachagentur Windenergie an Land e. V.

Fanny-Zobel-Straße 11 I 12435 Berlin
T +49 30 64 494 60-60
post@fa-wind.de I www.fachagentur-windenergie.de