Forschungsvorhaben dbMISS - Schaffung einer Datengrundlage zur Minderung des Konflikts zwischen Windenergieanlagen und seismologischen Stationen

Rafael Abreu[2], Sebastian Busch[4], Luca De Siena[2], Heiko Endrich[1], Katja Essen[4], Martina Rische[6], Janis Heuel[6], Wolfgang Friederich[6], Jona Irle[7], Nasim Karamzadeh[2], Maryam Khal[4], Lorenz Marten[7], Sarah Moser[5], Tom Niggemann[3], Joachim Ritter[5], Horst Rüter[1], Achim Stahl[3], Christine Thomas[2]

[1] Harbordom GmbH

[2] Universität Münster

[3] RWTH Aachen

[4] Geologischer Dienst NRW

[5] Karlsruher Institut für Technology (KIT)

[6] Ruhruniversität Bochum (RUB)

[7] DMT GmbH & Co. KG

Förderung

Das Projekt wurde vom Land NRW und der EU unter progress.nrw - Innovation gefördert (Förderkennzeichen: EFO 0157A)

Vorhabensbeschreibung

Zusammenfassung

Windenergieanlagen können Bodenerschütterungen verursachen, die hochempfindliche Erdbebenmessstationen stören können. Im Zuge der behördlichen Genehmigung neuer Windenergieanlagen (WEA) sind, diese Erschütterungsimmissionen, zuverlässig in zwei Schritten zu prognostizieren:

1. Abschätzung der Erschütterungsleistung der geplanten WEA durch Vergleich mit ähnlichen Anlagen, deren Erschütterungsleistung bekannt ist, und

2. Abschätzung der Dämpfung der Erschütterung auf dem Wellenweg zwischen Quelle und Einwirkungsort aufgrund der geologischen Gegebenheiten. Diese Abschätzungen sind gegebenenfalls durch Profilmessungen zu validieren.

Einzubeziehen ist eine mögliche Minderung des Konfliktes durch die Anwendung intelligenter Datenfilterung. Prognosen mit und ohne Datenfilterung sind gegenüberzustellen.

Ziel des Vorhabens dbMISS ist es, eine belastbare nachhaltige und öffentlich zugängliche Datenbasis zu schaffen sowie Filterverfahren in der Praxis zu testen. Notwendig sind hierzu:

- Reihenuntersuchungen der Erschütterungsleistung an aktuellen WEA-Typen. Detailliertere Untersuchungen an Anlagen größerer Leistung (>4 MW).
- Eine homogenisierte Auswertung vorhandener Daten zur Dämpfung von Oberflächenwellen. Validierung durch Profilmessungen. Sicherung eines öffentlichen Datenzugangs.
- Fortschreibung des KIT-Prognosetools.
- Weiterentwicklung intelligenter Datenfilter. Einbindung in die Routinedatenerfassung.
- Theoretische Erörterung von möglichen realistischen Maßnahmen an WEA zur Minderung der Erschütterungsleitungen.

Ausgangslage und Projektziele

Windenergieanlagen (WEA) können Bodenerschütterungen verursachen, die zwar im Allgemeinen nicht spürbar sind, aber dennoch hochempfindliche Erdbebenmessstationen in einem größeren Umfeld stören können. Durch die Vielzahl der Erdbebenmessstationen (seismologischen Stationen) in Deutschland und der Größe der angedachten Betrachtungsradien um diese Messstationen ist der Konflikt zwischen WEA und seismologischen Messstationen zu einem wesentlichen Hinderungsgrund beim Ausbau der Windenergie an Land geworden (Abbildung 1). Immer mehr Planer und Projektierer, aber auch Genehmigungsbehörden sind mit dieser Problematik konfrontiert und stehen vor der Aufgabe, die Störwirkung geplanter WEA auf vorhandene Messstationen abzuschätzen, zu quantifizieren und zu beurteilen.

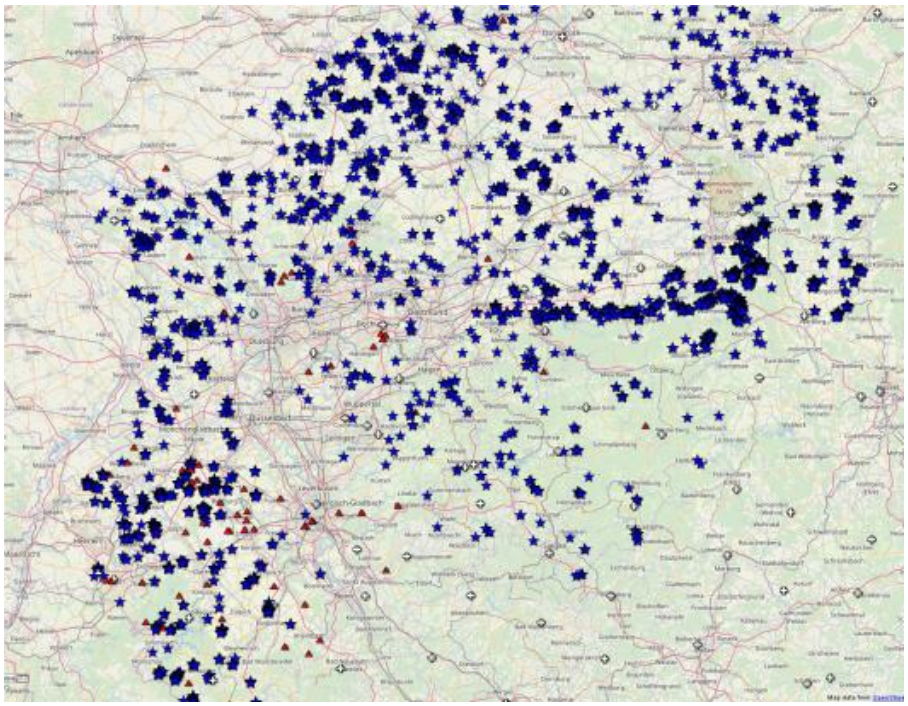


Abbildung 1: Windenergieanlagen in NRW (2024). Die Dichte ist inzwischen so groß, dass in der Nachbarschaft nahezu jeder Erdbebenstation Windenergieanlagen zu finden sind. Der Maßstab ergibt sich aus der hinterlegten geographischen Karte von NRW. Quelle: RUB © dbMISS.

Im Zentrum dieser Aufgabe stehen oft sogenannte ‚Prognosetools', also Anweisungen, wie aus vorhandenen Daten und Informationen der jeweilige Störeinfluss einer projektierten WEA oder eines

Windparks abgeschätzt werden kann. Dies ist dann die Voraussetzung dazu, ob und wie die Zulassungsstelle feststellen kann, ob eine Störung noch zulässig oder schon unzulässig sein wird. Dies kann die Genehmigung eines WEA-Neubaus nachhaltig verhindern, wenn keine Einigung auf Ausgleichsmaßnahmen gefunden wird, die beide Seiten befriedigt.

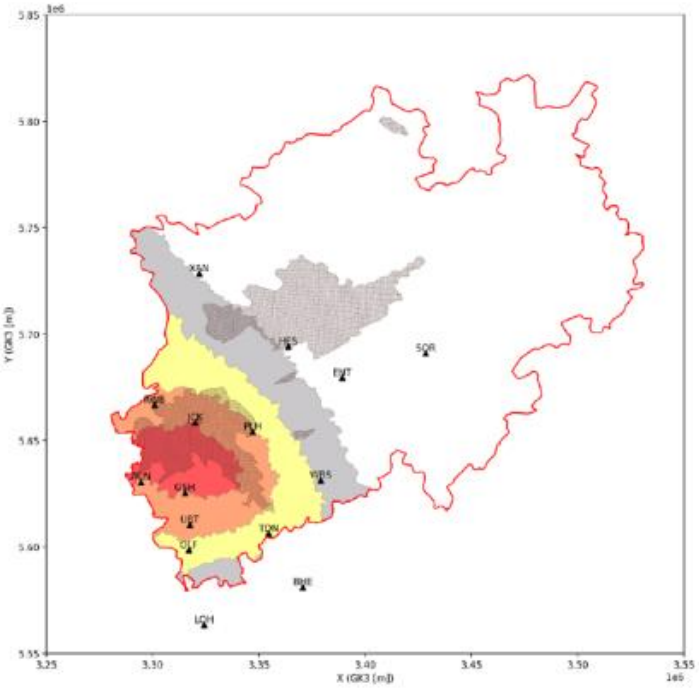


Abbildung 2: Erdbebenzonen nach DIN 4149 und Bergbaugebiete in NRW sowie die Standorte der seismologischen Stationen des GD NRW. Die Erdbebenzonen werden in die Kategorien 0 (grau) bis 3 (rot) eingeteilt. Straffiert sind die Flächen in denen induzierte Ereignisse des Stein- bzw. Braunkohlenbergbaus auftreten können. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

Die angesprochene Prognose leidet an mehreren Stellen an einer unzureichenden Datenlage, besonders für große moderne WEA (>4 MW). Zudem stammen die verfügbaren Daten meist aus isolierten Forschungsvorhaben und sind dementsprechend heterogen, sowohl im Hinblick auf die Datengewinnung (Messung) als auch im Hinblick auf die Datenauswertung und Ergebnisdarstellung. Sie können nur eingeschränkt homogenisiert und so einer einheitlichen Verwendung zugeführt werden, oft besteht, besonders international, kein Zugriff auf die Originalmessdaten.

Das Projekt dbMISS hat zum Ziel, eine ausreichend große homogene, nachhaltige und öffentlich verfügbare Datenbasis zu schaffen, um in Zukunft zuverlässige, wissenschaftsbasierte Prognosen allein auf der Basis vorhandener Daten und Informationen zu ermöglichen und so aufwendige Zusatzmessungen im Einzelfall zu vermeiden. Die wissenschaftliche Entwicklung von Prognoseverfahren umfasst im Wesentlichen vier voneinander getrennte größere Bereiche:

1. Erarbeitung der Erschütterungsleistung für eine repräsentative Zahl moderner WEA auf typischem Baugrund (Emissionen). Darüberhinausgehende Detailuntersuchungen an WEA höherer Leistung (über 4 MW).

2. Erarbeitung einer repräsentativen Zahl von Werten für die Güte *Q* (Kehrwert der Dämpfung) für eine Vielzahl typischer lokaler oberflächennaher geologischer Gegebenheiten (Transmissionsweg). Hier ist ein Bezug zu allgemein verfügbaren geologischen Kartenwerken (GIS)

anzustreben. Aus der Erschütterungsleistung und dem Dämpfungswert sollen die Immissionen am Einwirkungsort bestimmt werden. Die Ergebnisse der Wellendämpfung und Immission sind durch Profilmessungen und andere Messdaten zu validieren.

3. Fortschreibung des KIT-Prognosetools insbesondere für WEA höherer Leistung (über 4 MW) aber auch mit Berücksichtigung weiterer Projektergebnisse.

4. Bei der Prognose ist die Möglichkeit der Anwendung intelligenter Datenfilter (Denoising) einzubeziehen. Hierzu ist nicht nur diese Art der Datenfilterung weiterzuentwickeln, sondern auch ihre Praxistauglichkeit für Erdbebendienste zu testen. Immissionsprognosen sind dementsprechend mit und ohne Anwendung von erfolgreich getesteten Datenfiltern zu vergleichen.

Die im Projekt zu erarbeitende Datenbasis kann ein Ausgangspunkt für eine zukünftige routinemäßige Datenerhebung sein, so dass die Datenbasis auch nach Projektende stetig weiterwachsen kann. Endziel ist eine Datenbasis, die wesentlich zuverlässigere und besser standortangepasste Immissionsprognosen ermöglicht, als dies heute auf der Basis spärlicher und zu heterogener Daten möglich ist.

Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

Der Eintrag von Erschütterungen durch Windenergieanlagen in den Untergrund wird seit einigen Jahren auch international in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht (DMT, 2017, Neuffer, 2020, WINSENT, 2026). Die Ergebnisse sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen in Fachzeitschriften verfügbar. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand meist der mögliche Störeinfluss auf Erdbebenmessstationen und weniger die Möglichkeiten, diesen Störeinfluss zu mindern. Ist der Abstand von einer oder mehreren WEA zu einer Messstation ausreichend klein, kann die Messstation so gestört sein, dass ihr Nutzen für das seismologische Netzwerk, deren Bestandteil sie ist, nicht mehr gegeben ist. Dies ist weitgehend unstrittig. In diesem Fall kann entweder der Bau weiterer WEA untersagt werden, oder die Messstation ist zu verlegen oder durch den Zubau weiterer Messstationen in ihrer Funktionalität abzusichern. In jedem Fall ist die Funktionalität des Netzes zu erhalten.

Auch andere Ausgleichmaßnahmen, wie die Verlegung der Messstation in ein Bohrloch (mindestens 300 m tief) oder der Ersatz eines Einzelsensors durch eine Sensorgruppe (Array, Bohrlocharray) werden diskutiert. Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung intelligenter Filtermethoden auf die Messdaten (englisch: *denoising*) und die Anwendung robusterer Auswertemethoden.

Die Erschütterungsemissionen einer WEA werden zunächst durch die Einwirkung des Windes auf den Turm und die Rotorblätter der Anlage verursacht. Die Umströmung des Turmes und der Blätter erfolgt, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, meist turbulent, wobei es zu komplizierten Ablösungswirbeln kommt.

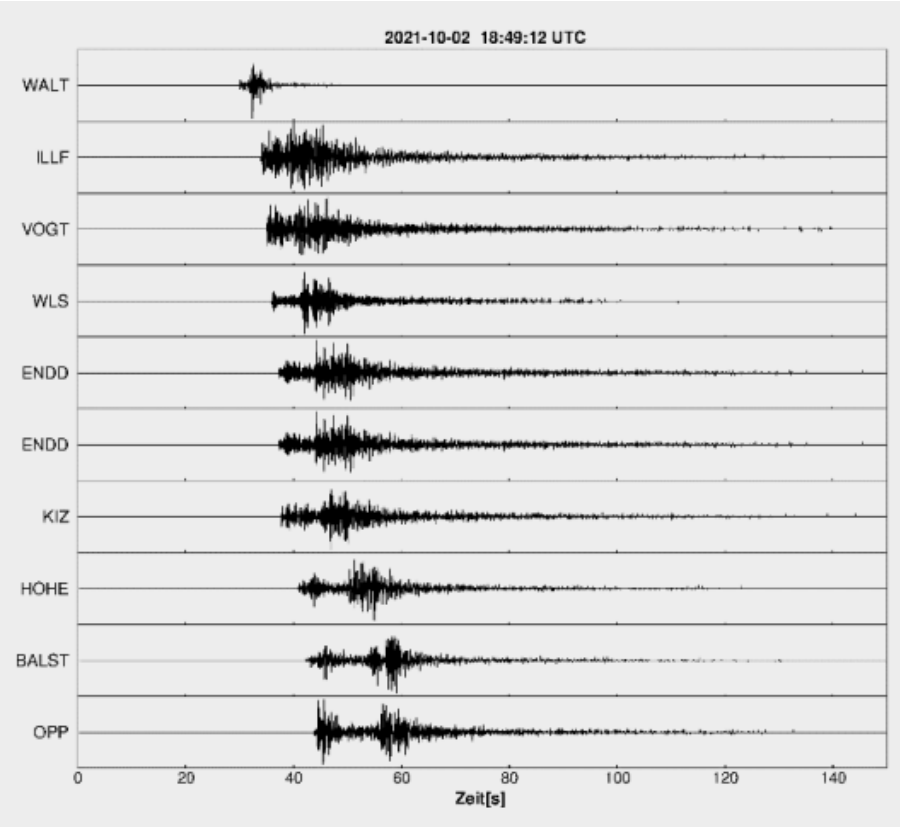


Abbildung 3: Aufzeichnung eines lokalen Bebens (Pfälzerwald) an verschiedenen rauscharmen Stationen. Deutlich sind die Einsätze der zuerst ankommenden P-Wellen und die der etwas später ankommenden S-Wellen zu erkennen. Derartige rauscharme Aufzeichnungen werden von den Betreibern seismologische Netze gewünscht. Quelle: LED-BW. © dbMISS.

Durch diese Angriffskräfte wird der Turm zum Schwingen in verschiedenen Modalformen bzw. Eigenfrequenzen angeregt (Abbildung 5). Diese Frequenzen liegen bei der Grundmode meist unterhalb von 1 Hz und bei den höheren Moden in einem Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 10 Hz. Im Einzelnen sind diese Frequenzen neben der Nabenhöhe auch von der Bauform des Turmes und der Gondelmasse abhängig.

Neben diesen Schwingungen, die durch den Angriff des Windes auf den Turm angeregt werden, werden auch Schwingungen angeregt, wenn ein Rotorblatt am Turm vorbeistreicht und so den unmittelbaren Windangriff kurzzeitig unterbricht. Hier entstehen Schwingungen mit der dreifachen Drehfrequenz der Rotorblätter (englisch *blade passing frequency*) und Vielfache davon

In welchem Umfang diese vielfältigen Schwingungen in den Untergrund eingetragen werden, hängt von der Fundamentierung und dem Untergrund im Nahbereich der WEA ab. In dem Mai 2021 abgeschlossenen Forschungsvorhaben MISS (MISS, 2021) wurde als Maß für den Erschütterungseintrag die Erschütterungsleistung vorgeschlagen (Rüter, 2026). Dies wurde auch in Analogie zum Lärmschutz gewählt, wo entsprechende Größen (Schalleistung) zur Quantifizierung der Schallemissionen einer Schallquelle üblich sind.

Es wird meist davon ausgegangen, dass Erschütterungsemissionen einer WEA deutlich von der Leistung (also der Größe) einer Anlage abhängen und leistungsstärkere Anlagen eben auch größere Erschütterungen verursachen. Quantitativ sind diese Zusammenhänge insbesondere für größere Anlagen mit Leistungen größer 4 MW nicht ausreichend untersucht. Da aber heute (2022) fast nur noch diese großen Anlagen errichtet werden, sind detaillierte Untersuchungen derartiger Anlagen überfällig. Sie

sollten in diesem Projekt die Reihenuntersuchungen an Anlagen aller Leistungsklassen ergänzen. Die Ergebnisse sind insbesondere wichtig für die angedachte Fortschreibung des KIT-Prognosetools.

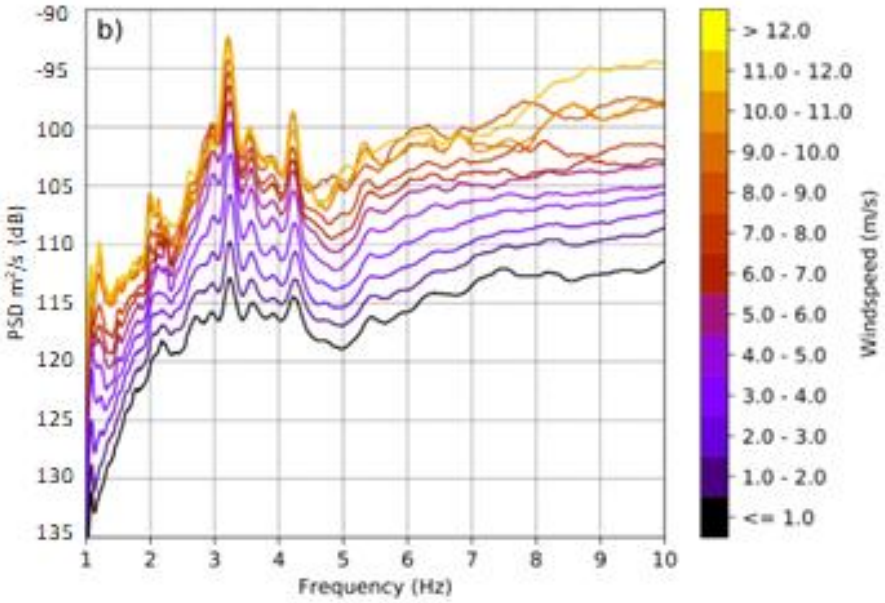


Abbildung 4: Logarithmische Leistungsdichtespektren (LDS) als Maß für die von einer Windenergieanlage ausgehenden Erschütterungsimmissionen an der Erdbebenmessstation mit der typischen Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Farbskala). Zu sehen sind auch, besonders im linken Teil der Spektren, die dominanten tonalen(harmonischen) Anteile als Amplituden-Spitzen. Quelle: RUB, Projekt MISS, © dbMISS.

Abbildung 5: Modalformen der Schwingungen eines Turmes einer Windenergieanlage. Üblicherweise werden die Moden nummeriert, so dass hier die Moden 1 - 4 zu sehen sind. Die zugehörigen Frequenzen der Schwingungen liegen zwischen 0,5 Hz und 10 Hz. Quelle: BHM, Projekt MISS, © dbMISS.

Zur Abschätzung der Erschütterungsimmissionen an einem Einwirkungsort, z.B. dem Standort einer seismologischen Messstation (Immissionspunkt), ist neben der Kenntnis der Emission der Quelle eine

Abschätzung des Abklingens der Erschütterungswellen bei ihrer Ausbreitung von der Quelle (WEA) zum Einwirkungsort (Erdbebenstation) notwendig. Hier gibt die DIN 4150-Teil (DIN, 2001) eine Handhabe.

Die Erschütterungen, die sich von der WEA ausgehend im Untergrund ausbreiten, sind ihrem physikalischen Charakter nach vor allem sogenannte Oberflächenwellen, also Wellen deren Energietransport entlang der Erdoberfläche konzentriert ist. Diese Oberflächenwellen haben die größten Amplituden nahe der Erdoberfläche und nehmen mit der Tiefe stark (exponentiell) und frequenzabhängig ab. Die Bodenbewegungen verteilen sich auf die Mantelfläche eines Zylinders mit senkrechter Achse im Quellpunkt, also an der WEA.

Da die Mantelfläche mit zunehmendem Quellabstand linear wächst, nehmen die Erschütterungsamplituden demensprechend ab. Dies ist die sogenannte geometrische Amplitudenabnahme (englisch: *geometrical spreading*). Sie ist frequenzunabhängig und durch die Geometrie bzw. Entfernung vom Quellpunkt vorgegeben. Sie folgt einem Potentialgesetz, wobei der Exponent für Oberflächenwellen fest, nämlich -0,5 ist.

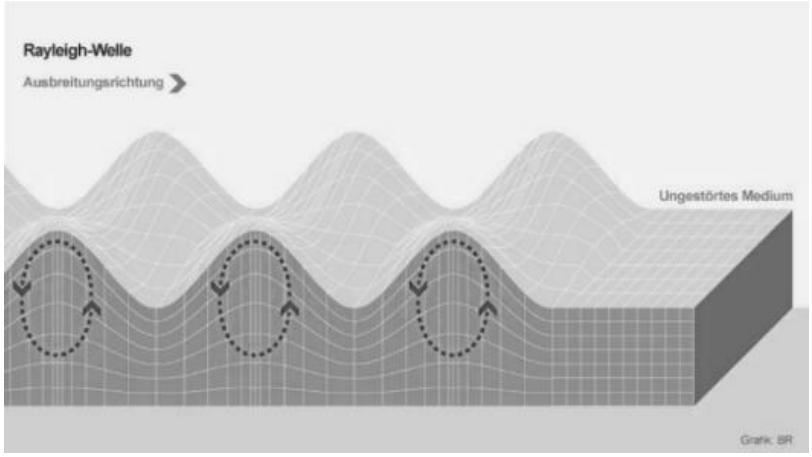


Abbildung 6: Oberflächenwellen vom Typ Rayleigh. Zu sehen ist, wie die Amplituden der Schwingungen mit der Tiefe abnehmen. Die eingezeichneten Ellipsen charakterisieren die retrograde Bewegung eines Bodenteilchens beim Durchgang der Welle. Quelle: BR-Wissen, © dbMISS.

Neben dieser geometrisch bedingten Abnahme nehmen die Amplituden der Erschütterungen zusätzlich durch Dämpfung (anelastische Absorption, intrinsische Dämpfung, Umwandlung in Wärme) und durch Streuung an im Untergrund immer vorhandenen Streukörpern ab. Hierdurch erfolgt, in beiden Fällen, die Abnahme nach einem frequenzabhängigen Exponentialgesetz.

In den Geowissenschaften ist es üblich, die Frequenzabhängigkeit zunächst als linear anzunehmen. Dies führt dann zu dem Dämpfungsgrad *D* und dessen Kehrwert, der Güte *Q* (englisch: *Q-factor* oder *quality factor*). Zu der mit der Ausbreitung von Oberflächenwellen verbundenen Güte *Q* gibt es umfangreiche Literatur (Gao, 2018). In der Literatur werden *Q*-Werte mit verschiedenen Methoden aus seismologischen Aufzeichnungen abgeleitet. Diese werden im Projekt getestet und geeignete Verfahren ausgewählt. Die erhaltenen *Q*-Werte liegen in der Erdkruste meist zwischen 20 und 200. Die DIN 4150 - 1 hat für den Fall, dass keine weiteren Erkenntnisse vorliegen, *Q* = 100 vorgegeben, wobei man in der DIN 4150 -1 allerdings einen höheren Frequenzbereich betrachtet.

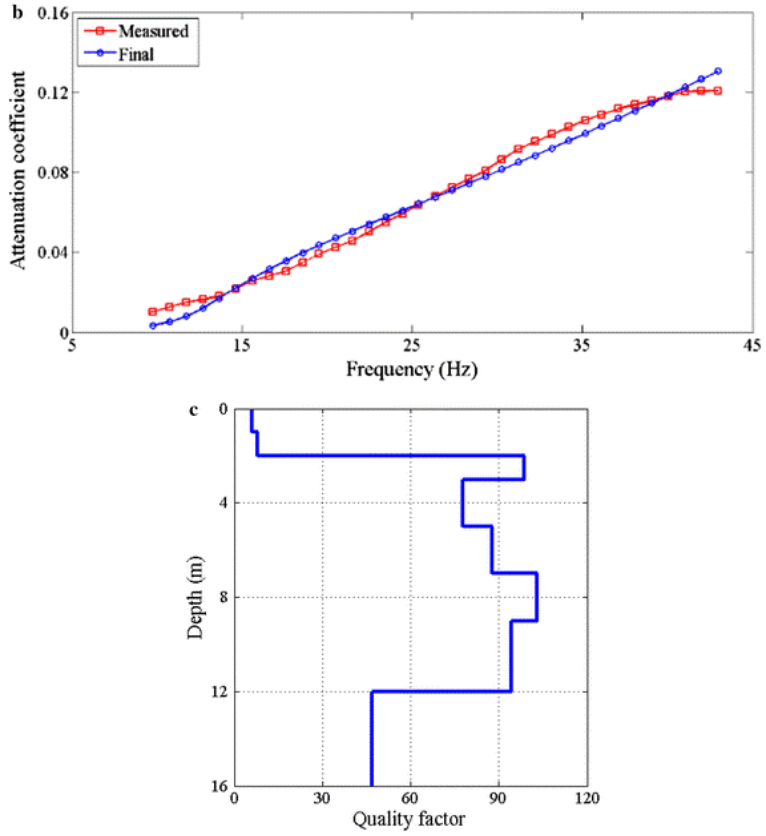


Abbildung 7: Oben: Zusammenhang zwischen Frequenz und Absorption, unten: Abhängigkeit der Güte Q (quality factor) von der Tiefe. Der obere Teil der Abbildung zeigt die lineare Frequenzabhängigkeit der Absorption. Quelle: Gao, © dbMISS.

Im Zuge des hier angestrebten Aufbaus einer Datenbank ist die Erarbeitung von *Q*-Werten für unterschiedliche geologische oberflächennahe Gegebenheiten ein zentrales Thema. Auch wenn die gefundenen Werte nur zwischen 20 und 200 variieren, kann dies dennoch einen Einfluss auf die Immissionsprognosen haben. *Q*-Werte stehen oft in einem engen, nachweisbaren Zusammenhang mit den Scherwellengeschwindigkeiten (v_s) in den betrachteten Gesteinsformationen. Scherwellengeschwindigkeiten und deren Tiefenverteilung lassen sich oft aus Dispersionskurven von Oberflächenwellen ableiten, die ihrerseits aus den Messdaten extrahiert werden können. Diese Methoden müssen auf die tonal dominierten Erschütterungen, wie sie von WEA ausgehen, angepasst werden. Oft wird ein Verfahren mit mehreren Schritten notwendig sein

- Erarbeitung von Dispersionskurven, Scherwellengeschwindigkeiten
- Umrechnung in *Q*-Werte
- Inversionsprozesse
- Numerische Modellierung der Dämpfung

Dementsprechend kann auch die Erarbeitung von Scherwellengeschwindigkeiten einen indirekten Zugang zu *Q*-Werten darstellen. Die Extraktion von Scherwellengeschwindigkeiten aus Seismogrammen kann u. U. methodisch einfacher sein als die direkte Extraktion von *Q*-Werten. Auf dem Umweg über Scherwellen kann es auch leichter sein, eine Beziehung zu den in allgemein verfügbaren geologischen Karten oder auch in 3-D-Modellen ausreichender Tiefe dargestellten Größen herzustellen. Dies würde das Verwenden derartiger Karten bei den Immissionsprognosen im Einzelfall erleichtern. Vergleichbar ist dies mit dem Geothermieportal des Geologischen Dienstes, in dem oberflächennahe Geologieinformationen und Tausende von Bohrungen aufgearbeitet wurden. Ein Beispiel ist hier auch das Tool 3D

Ruhr-Marie. Der räumlichen Auflösung wird bei diesem Vorgehen durch die Wellenlängen der Erschütterungen eine Grenze gesetzt.

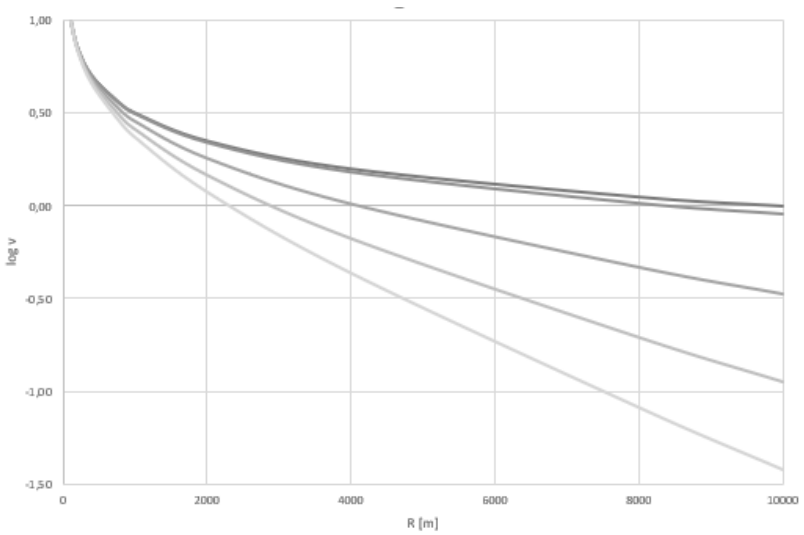


Abbildung 8: Abklingkurve einer Erschütterungsimmission durch Geometrie, Dämpfung und Streuung in Abhängigkeit von der Frequenz, niedere Frequenz: dunkel, hohe Frequenz: hell. Quelle: Rüter, © dbMISS.

Intelligente Filter (*denoising*) werden derzeit von Erdbebendiensten nicht routinemäßig eingesetzt. Die Messdaten werden allenfalls bezüglich ihres Frequenzinhalts durch Bandpass-Filterung beschränkt. Dies hilft bei WEA-Emissionen aber nicht viel, weil die Erdbebensignale in demselben Frequenzbereich wie die Störsignale liegen. Es bestehen Vorbehalte gegenüber Denoising-Filtern, da diese auch die Signalform der Erdbebenwellen beeinträchtigen. Die WEA-Störschwingungen unterscheiden sich aber in anderen Charakteristika deutlich von den Erdbebensignalen unter anderem durch ihre Tonalität. Diese Eigenschaft macht die WEA-Signale hochgradig vorhersagbar (für die nächsten 20 - 30 Sekunden). Diese Eigenschaft kann nun für intelligente Filterverfahren (*denoiser, prediction error filter* und Ähnliches) genutzt werden.

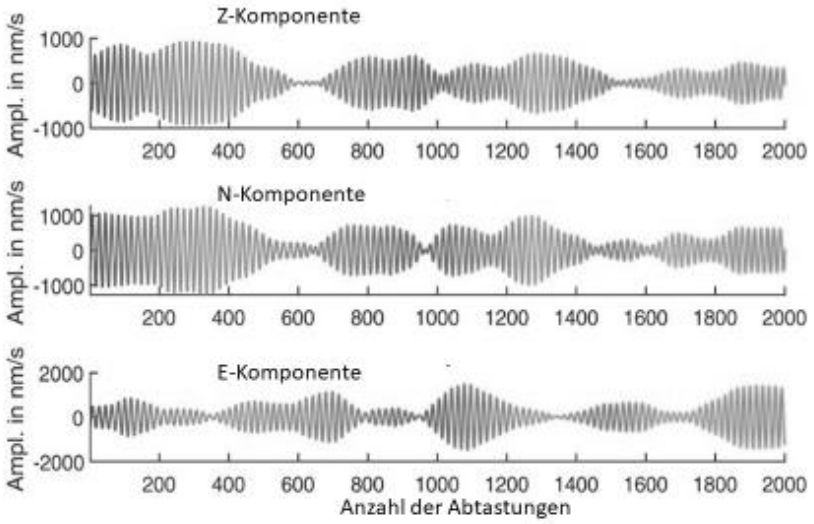


*Abbildung 9: Typische Schwingungsform der von einer WEA emittierten Erschütterungen in 3 Komponenten mit 100 Abtastungen pro Sekunde. Deutlich ist die Dominanz der tonalen Anteile zu sehen, ein wesentlicher Unterschied zu einer Erdbebenaufzeichnung. Diese Schwingungen sind hochgradig vorhersagbar, solange es sich um eine einzelne WEA als Störquelle handelt. Quelle: Lerbs et al. (2020) *12, © dbMISS.*

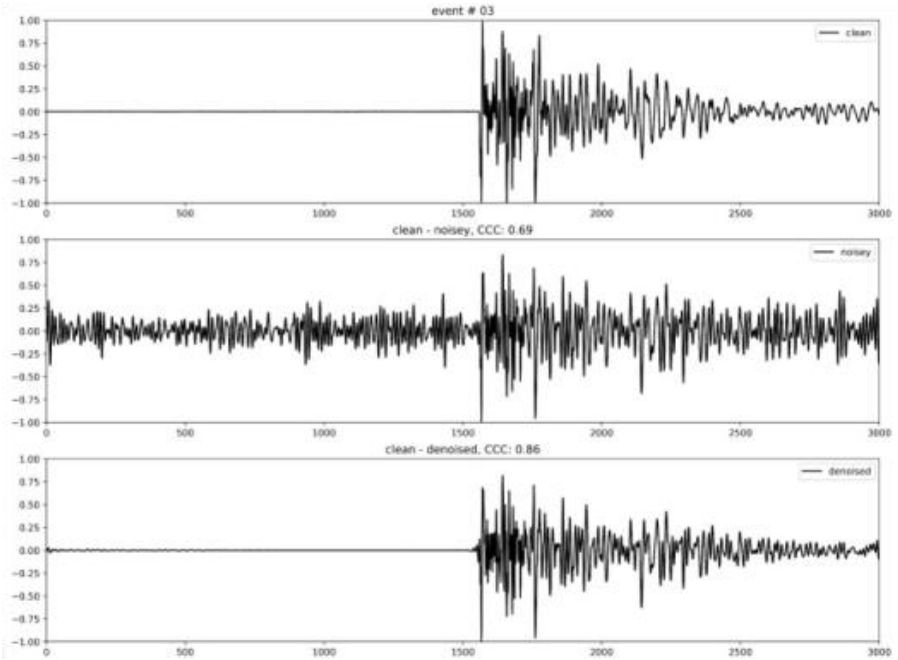


Abbildung 10: Anwendung intelligenter Filter. Oben: Signal eines Erdbebens, Mitte: Aufzeichnung dieses Signals mit überlagertem Rauschen, unten: Ergebnis nach Filterung. Quelle: RUB, © dbMISS.

Die Filteroperatoren können auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt werden, beispielsweise durch klassische *least-square*-Verfahren (Wiener Filter) aber auch mit heute oft üblichen Verfahren der künstlichen Intelligenz (AI, *denoising autoencoder*, DAE), also ein Operatorbestimmung durch Training an entsprechenden Trainings-Seismogrammen.

Derartige Filter haben sich bei Einzelversuchen schon bewährt, eine Einbindung in den Datenstrom einer Dauerregistrierung und somit eine Praxiserprobung steht aber noch aus. Diese wird erfahrungsgemäß noch Anpassungen des Filterprozesses notwendig machen. Zu erproben sind verschiedene Alternativen der Realisierung derartiger Filter.

Technologische und wissenschaftliche Innovation des Vorhabens

Da sowohl zur Bestimmung der Erschütterungsimmissionen als auch zu Bestimmung der Dämpfungswerte Q die entsprechenden Verfahren und Messvorschriften schon in dem Projekt MISS erarbeitet wurden, scheint die technologische und wissenschaftliche Innovation des Vorhabens dbMISS zunächst gering. Es ist jedoch zu erwarten, dass bei der routinemäßigen Anwendung der vorgeschlagenen Verfahren vielfältige weitere Gesichtspunkte auftreten und geklärt werden müssen und daher einer erneuten wissenschaftlichen Bearbeitung bedürfen. Das Projekt MISS hat hier zwar die Grundlagen gelegt, aber eine Anwendungspraxis wurde noch nicht erreicht.

Vollständiges Neuland ist der auszuarbeitende Bezug des Dämpfungsmaße *Q* zu in Karten verfügbaren geologischen Daten. In der Literatur wurden diese Zusammenhänge erwähnt, gelegentlich wird ein Bezug zwischen *Q* und der Scherwellengeschwindigkeit gesehen, den dann seinerseits wieder einen Bezug zur oberflächennahen Geologie hat. Es soll versucht werden, diese Beziehungen auch tiefenabhängig zu erarbeiten, wobei wegen der großen Wellenlängen der tieffrequenten Signale auch größere Tiefen interessant sind. Ebenso fehlt noch eine datenbasierte Validierung der vorhergesagten Immissionen.

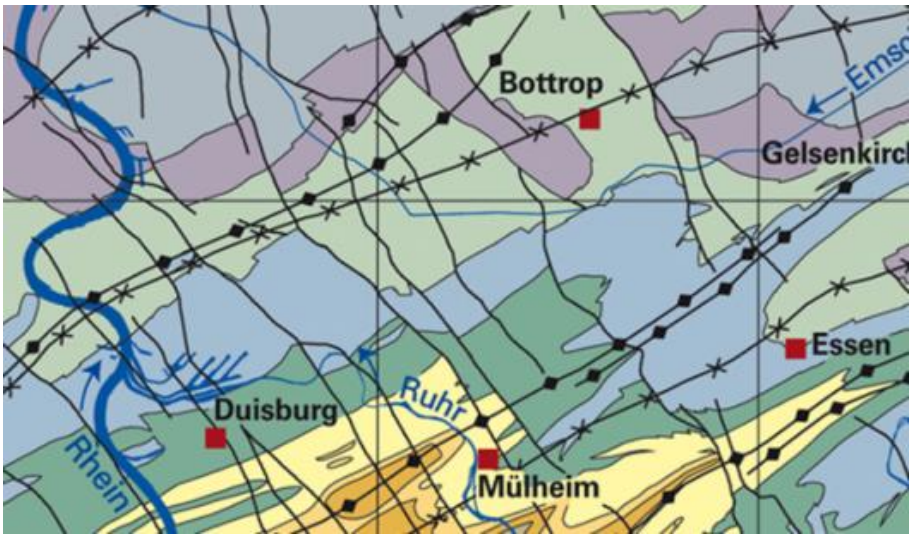


*Abbildung 11: Geologische Karte im Maßstab 1:50.000. Ein Projektziel ist es, eine Beziehung der Dämpfung bei der Ausbreitung der Erschütterungsimmissionen zu derartigen Karten zu erarbeiten, wobei verschiedene Karten des GD berücksichtigt werden können. Die einzelnen Symbole haben die in geologischen Karten übliche Bedeutung. Quelle: GD NRW *13., © dbMISS.*

Das Gesamtpaket des Projektes hat in jedem Fall einen hohen Anteil an technologischer und wissenschaftlicher Innovation, der dringend für den Ausbau der Windkraft benötigt wird. Diese Fortschritte werden allerdings verknüpft mit einer ersten Anwendung gefundener Methoden auf eine größere Zahl von Anwendungsfällen. Gerade bei der Vielfalt sowohl der Typen und Ausführungen der WEA einschließlich deren Gründung als auch der Vielfalt der in NRW angetroffenen Gegebenheiten der oberflächennahen Geologie ist diese Vielzahl der Anwendungen unerlässlich. Nur so lässt sich die notwendige statistische Zuverlässigkeit erreichen, die eine Grundvoraussetzung für eine spätere Routineanwendung ist. Unabhängig davon wird eine gewisse Konzentration auf Anlagen höherer Leistung angestrebt, da hier die Datenlage noch dünn ist.

In Bezug auf Filtertechnik wird Neuland beschritten. Zwar wurden auch schon im Projekt MISS verschiedene Filterverfahren entwickelt, teilweise auch mit Verfahren der künstlichen Intelligenz. Alle diese Verfahren zielen darauf ab, besondere Eigenschaften der Störschwingungen (z.B. ihre Tonalität) zu

erkennen und sie dann auf Basis dieser Kenntnisse abzuschwächen. Diese Verfahren befinden sich alle noch im Versuchsstadium. Sie müssen weiterentwickelt werden, Alternativen müssen gesucht und gefunden werden und insbesondere steht eine Langzeit-Praxiserprobung durch Erdbebendienste an.

Arbeitsplan

Arbeitspaket 1: Wissenschaftliche Koordination

Beteiligte Partner: HD

Die wissenschaftliche Koordination umfasst die bei Verbundvorhaben übliche Koordination zwischen den Projektpartnern, aber auch mit dem Projektträger. Darüber hinaus ist der permanente Kontakt zum wissenschaftlichen Umfeld und zur Öffentlichkeit zu pflegen. Insbesondere Reihenuntersuchungen an Windkraftanlagen und die Detailuntersuchungen an Anlagen größerer Leistung setzen eine gewisse Mitarbeit von Herstellern und Betreibern der WEA voraus. Hier wird die Projektkoordination mit einer Reihe von Partnern aus der Windbranche abstimmen.

Ein weiteres Koordinationsfeld ist die Datenbeschaffung zu AP 3 insbesondere von Daten aus der Explorationsseismik. Die langjährigen Aktivitäten von HD auf diesem Gebiet sind hier hilfreich.

Arbeitspaket 2: Reihenuntersuchung zur Ermittlung der Erschütterungsleistung verschiedener Windenergieanlagen. Detailuntersuchungen an Anlagen höherer Leistung (größer 4 MW)

Beteiligte Partner: DMT, KIT

Das AP 2 ist ein zentrales Anliegen dieses Projektes. Die große Zahl unterschiedlicher Windenergieanlagen, beschrieben u.a. durch Nennleistung, Nabenhöhe, Gondelmasse, Turmkonstruktion, Fundament und Untergrund, bedingt die Notwendigkeit einer größeren Zahl von Messungen (50 - 100). Somit können für neu projektierte WEA ausreichend Messergebnisse an realen WEA bereitgehalten werden, die mit geplanten WEA vergleichbar sind. Diese Messungen sind nach einer einheitlichen Messvorschrift (Rüter, 2026) durchzuführen, um vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Die im MISS-Projekt erarbeitete Messvorschrift ist so gestaltet worden, dass mit vertretbarem Aufwand für die Einzelmessung durchgeführt werden kann.

WEA mit Leistungen von 4 MW oder mehr werden erst seit relativ kurzer Zeit gebaut, sind aber heute schon fast die Regel. An diesen Anlagen sind ausführlichere Untersuchungen der Erschütterungsemissionen, auch mit längeren Messzeiten nötig. Hier sollten so auch Aussagen zu weiteren Einflussfaktoren (über die Leistung hinaus) möglich werden.

Es ist vorgesehen, dass diese Untersuchungen durch die Mitarbeitenden der DMT, geplant, vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden. Die verwendeten Messgeräte werden ebenfalls von DMT zur Verfügung gestellt, teilweise im Rahmen des Forschungsvorhabens angeschafft.

Auch die Auswertung der Messungen, insbesondere also die Ermittlung von Erschütterungsleistungen liegt in der Verantwortung der DMT, wird aber von HD mit betreut. Die Assoziierten Partner aus der Windbranche bei der Beschaffung und Bewertung von Kenndaten der WEA und auch bei der Auswahl der WEA mitwirken.

Arbeitspaket 3: Homogenisierte Erarbeitung von Dämpfungswerten (Güte *Q*) aus vorhandenen Daten insbesondere der Explorationsseismik

Beteiligte Partner: Universität Münster, DMT, GD

Voraussetzung dieses AP 3 ist die Verfügbarkeit von Daten. Dies können Daten der Explorationsseismik oder anderer seismologischer Messungen sein, aber auch andere Daten, bei denen Oberflächenwellen in verschiedenen Quellentfernungen aufgezeichnet wurden. Da diese Daten unterschiedliche Frequenzbereiche überdecken können, die nicht immer dem hier hauptsächlich angesprochenen Frequenzbereich von 0,3 - 10 Hz entsprechen, muss darauf geachtet werden, dass die Ergebnisse hier brauchbar sind.

Es ist vorgesehen, dass die Bearbeitung (Processing) dieser Daten durch die wissenschaftlichen Mitarbeitenden der Universität Münster durchgeführt werden. DMT exportiert und führt ein Vorab-Processing der möglichen vorhandenen Datensätze, beispielsweise aus der Explorationsseismik, durch und stellt diese der Universität Münster zur Verfügung. Des Weiteren ist vorgesehen, dass synthetische Wellenformdaten in die Erarbeitung der Dämpfungswerte mit einbezogen werden, um eine Bewertung der Ergebnisse der Auswertungen der Explorationsseismikdaten durchführen zu können. Außerdem sollen hier auch Noise-Aufzeichnungen seismologischer Stationen, die über Kreuzkorrelationen ausgewertet werden (*ambient noise interferometry*), herangezogen werden, insbesondere um die Extrapolation zu niedrigeren Frequenzen abzusichern.

Da die in AP 3 gewonnen Daten in AP 4 weiterverwendet, werden sind Fachleute des GD auch in AP 3 zu beteiligen. In AP 5 wird die Ergebnis-Validierung am KIT durchgeführt.

Arbeitspaket 4: Bezug der Dämpfungswerte (*Q*) zu verfügbaren Daten (Karten) der lokalen oberflächennahen Geologie

Beteiligte Partner: GD, Universität Münster

Einen Bezug zwischen Dämpfungswerten und kartierten geologischen Gegebenheiten herzustellen ist in erster Linie eine geologische Aufgabe. Hierbei spielt es eine entscheidende Rolle, die Verfügbarkeit und Relevanz geologischer, meist in Karten vorliegender Informationen, einzuordnen. Dies ist eine Aufgabe, die der GD übernimmt. Ein Bezug zu den Arbeiten des AP 3 wird dadurch hergestellt, dass auch hier ein Theoretiker der Universität Münster mitarbeitet.

Endziel dieses AP 4 ist eine Verfahrensbeschreibung, in dem beschrieben wird, wie man in einem konkreten Einzelfall, also bei der Vorgabe einer Position für eine (neue) WEA und der Position einer seismologischen Messstation unter Zuhilfenahme geologischer Karten und Profile zu einer Abschätzung

der lokalen Dämpfung kommt. Damit kann dann das Abklingen der Erschütterungen mit der Entfernung für einen konkreten Fall bestimmt werden. Dies kann ein wesentlicher Bestandteil einer Erschütterungs-Immissionsprognose sein. In diesem AP 4 arbeiten Geophysiker und Geologen von Universität Münster und GD zusammen. In AP 5 wird die Validierung am KIT durchgeführt.

Arbeitspaket 5: Validierung der Ergebnisse der AP 3 und 4 durch Profilmessungen (Langprofile), Fortschreibung des KIT-Prognosetools

Beteiligte Partner: KIT

In diesem AP sollen die Messungen aus AP 2 (Erschütterungsleistungen von WEA), AP 3 (Erarbeitung von Dämpfungswerte) und AP 4 (Dämpfungswerte und lokale oberflächennahe Geologie) zusammengeführt und mit Profilmessungen validiert werden. Es soll speziell untersucht werden, ob das theoretische Zusammenwirkungen der Einzeldaten (Erschütterungsleistung, Dämpfungswerte und lokale Geologie) den Realfall ausreichend widerspiegelt, oder ob zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden müssen. Hierbei sollen auch die Unsicherheitsbereiche der Einzeldaten berücksichtigt werden. Das KIT wird in ausgewählten Regionen mit verschiedenen zu erwartenden Dämpfungswerten Profile vermessen. Als Messgeräte sind Seismometer einzusetzen, die den angesprochenen Frequenzbereich abdecken, vorzugsweise solche, die in 3 Komponenten registrieren

Dabei sind unverfestigtes bis verfestigtes Gestein und verschiedene lithologische Schichtungen zu berücksichtigen. Diese Profile beginnen an der WEA, erreichen mehrere Kilometer Entfernung zur WEA und können auch in unterschiedliche Richtungen gehen. Es werden dort experimentell Abklingkurven bestimmt und mit den Prognoseergebnissen aus AP 2 - AP 4 verglichen. Weiterhin werden vorhandene Profilmessungen für Vergleichsanalysen verwendet. Basierend auf den Profilmessungen können die Prognose-Eingabedaten validiert oder ggf. verbessert werden. So kann das vorhandene KIT-Prognosetool fortgeschrieben werden.

Unter Zusammenfassung aller Projektergebnisse wird das KIT das 2020 eingeführte KIT-Prognosetool fortschreiben. Dies wird nicht erst zu Projektende erfolgen, Zwischenergebnisse schon während der Projektlaufzeit werden angestrebt. Insbesondere wird dabei eine Erweiterung für WEA mit Leistungen von 4 MW und mehr von Bedeutung.

Arbeitspaket 6: Nachhaltige Archivierung aller Original-Daten. Sicherung eines öffentlichen Zugangs

Beteiligte Partner: GD

Die im Projekt vorgesehene Bereitstellung umfangreicherer Daten zur Erschütterungsleistung und zur Dämpfung stellen einen Anfang dar zur weiteren Entwicklung derartiger Datenbanken in der Zukunft. Es muss vorgesehen werden, dass diese Datenbanken auch nach Projektende weiterbetrieben werden und weiterwachsen. Die inneren Strukturen der Datenbanken müssen für diesen Zuwachs ausgelegt sein. Neben Auswertedaten müssen Originaldaten (meist Seismogramme) sicher vorgehalten werden. Ein freier Zugang (*open access*) zu diesen Daten ist langfristig sicherzustellen. Während der Projektlaufzeit ist dies durch den GD gewährleistet. Gegen Projektende ist zu besprechen und festzulegen, wie mit

diesen Datenbanken weiter verfahren wird. Hierbei sind länderübergreifende, teilweise durch die BGR koordinierte Möglichkeiten und Regelungen aufzugreifen.

Arbeitspaket 7: Weiterentwicklung und Praxiserprobung intelligenter Filter (denoising)

Beteiligte Partner: DMT, GD, RUB

Im Projekt MISS wurden sowohl von der DMT als auch von der RUB funktionsfähige Datenfilter erarbeitet, erprobt und vorgestellt. Diese Filter beruhen darauf, dass die von tonalen Anteilen dominierten Störschwingungen der Windenergieanlagen hochgradig voraussagbar sind, währen seismische Ereignisse (Erdbeben) völlig unerwartet auf der Station eintreffen. Entsprechende numerische Filteroperatoren können entweder klassisch durch *least-square*-Verfahren (Wiener Filter) erarbeitet werden oder aber durch moderne Verfahren der künstlichen Intelligenz. Dabei lernt ein Autoencoder anhand eines Trainingsdatensatzes zwischen Störsignal und Erdbebensignal zu unterscheiden. Der trainierte Operator kann anschließend auf die Registrierdaten der Station angewendet werden.

Derartige Datenfilter sind in der Praxis zu erproben und zu verbessern, und in den Datenstrom eines seismologischen Netzes einzubinden. Eine besondere Beachtung muss Veränderung des Nutzsignals durch das Filter finden, und zwar in Hinblick auf die vorgesehenen Auswerteschritte (Magnitudenbestimmung, Ortung, Herdlösungen).

Die Entwicklung der Filter wird von der DMT und der RUB durchgeführt werden, die Praxiserprobung beim GD und der RUB, was erfordert, dass diese beiden Partner zu diesem Thema eng zusammenarbeiten.

Arbeitspaket 8: Einstein-Teleskop

Beteiligte Partner: HD, RWTH

Dieses Arbeitspaket adressiert die Auswirkungen der Bodenerschütterungen, die von Windenergieanlagen (WEA) ausgehen, aus einer anderen Blickrichtung als die übrigen Arbeitspakete. Gesucht wird nach Möglichkeiten die Bodenerschütterung durch technische Maßnahmen direkt an den Windenergieanalagen zu reduzieren. Dabei eröffnen sich drei mögliche Ansätze:

- die Anregung der Turmschwingungen der WEA zu reduzieren,
- die Schwingungen zu dämpfen und damit in ihrer Amplitude zu reduzieren oder
- die Übertragung in den Boden zu reduzieren.

Um eine zügige Realisierung der Maßnahmen zu ermöglichen, sollten diese zu einer signifikanten Reduktion der Bodenerschütterungen führen, technisch ausgereift sein, mit den TÜV-Zulassungen der WEA in Einklang stehen und die Kosten einer WEA nur wenig erhöhen. Im Vorfeld des Projekts konnten bereits einige potenzielle Maßnahmen identifiziert werden. Diese sind:

- Vergrößerung des Fundaments der WEA, was zu einer höheren Standfestigkeit führt und die Übertragung der Erschütterungen in den Boden reduziert.

- Einbau von passiven Schwingungsdämpfern, die die Energie aus der Schwingungsmode, auf die sie zugeschnitten sind, absorbieren und damit die Schwingungen dämpfen.
- Eine aktive Kompensation der Schwingungen, um den Schwerpunt der WEA zu stabilisieren und damit die Übertagung in den Boden zu reduzieren.
- Eine Optimierung der individuellen Pitch-Regelung der Rotorblätter, um die Anregung der Turmschwingungen zu reduzieren.
- Ein Übergang zu Gittermasten, die aufgrund ihrer Winddurchlässigkeit weniger stark zu Schwingungen angeregt werden, eventuell in Kombination mit Holz als Baumaterial, was aufgrund seiner elastischen Eigenschaften zu einer starken Dämpfung der Schwingungen führt.

Im Rahmen des Arbeitspakets sollen diese Maßnahmen von professionellen Ingenieursbüros durchgerechnet werden, um die Wirksamkeit der Maßnahmen zu bestimmen und die Kosten abschätzen zu können. Nach detaillierter Bewertung der Ergebnisse wird daraus ein Gesamtkonzept erstellt.

Ergebnisse

Vorbemerkung

Die Darstellung der Forschungsergebnisse erfolgt gegliedert nach 1) den Arbeitspaketen (AP) und 2) den beteiligten Projektpartnern.

Arbeitspaket 1: Wissenschaftliche Koordination

Partner HD:

Die Koordination erstreckt sich auf die wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern und die Kommunikation mit dem Projektträger. Zusätzlich wurde vorrangig die Zusammenarbeit mit den kooperierenden Windenergieanlagenbetreibern sichergestellt. Die angesprochenen Betreiber verfügen über mehrere hundert WEA in NRW, wenn auch nur eingeschränkt in den höchsten Leistungsklassen. Dementsprechend konnten die ‚Reihenuntersuchungen' seitens DMT und auch die ‚Profilmessungen' des KIT weitgehend erfolgreich durchgeführt werden.

Mit der Universität Münster (UM) und dem GD wurden wissenschaftliche Möglichkeiten zur *Q*-Ermittlung diskutiert, einschließlich der Suche nach geeigneten Daten und geeigneter Software. Da es bei der Erarbeitung der *Q*-Werte offensichtlich wurde, dass es in NRW-Regionen mit nur wenigen Stationen gibt, wurde mit der Universität Münster vereinbart, dass diese einige (7) mobile Stationen befristet betreibt. Von diesen Stationen werden insbesondere die Noise-Daten und deren Dämpfung bearbeitet. Dies führte zu einer NRW-weiten Darstellung der *Q*-Wert-Verteilung durch den GD-NRW.

Von der UM wurde und wird die Projektwebseite https://www.uni-muenster.de/Physik.GP/dbMISS/project.html gehostet und gepflegt. Insbesondere werden so aktuelle Zwischenergebnisse, wie sie bei Projekttreffen vorgestellt wurden, öffentlich zugänglich gemacht.

Das Projekt wurde um ein Arbeitspaket (AP 8, Einstein) ergänzt, in dem verschiedene Maßnahmen zur Minderung der Erschütterungsemissionen von WEA theoretisch untersucht wurden. Hierzu wurde das Projekt als Ganzes bis zum 08.09.2026 (Durchführungszeitraum) verlängert.

Arbeitspaket 2: Reihenuntersuchung zur Ermittlung der Erschütterungsleistung verschiedener Windenergieanlagen. Detailuntersuchungen an Anlagen höherer Leistung (größer 4 MW)

Partner DMT:

Es wurden Messungen an 28 unterschiedlichen WEA durchgeführt. Die unterschiedlichen WEA-Typen nach Hersteller und Nennleistung sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt. Es wurden vorrangig Anlagen mit relativ hohen Nennleistungen ausgewählt. Die Durchführung und Organisation der Messungen gestalteten sich erheblich umfangreicher als zu Projektbeginn angenommen. Weiterhin liegen zu den meisten der Messungen keine Betriebsdaten der WEA vor. Tabelle 1 listet die Windenergieanlagen die im Rahmen des Forschungsprojekts vermessen wurden auf.

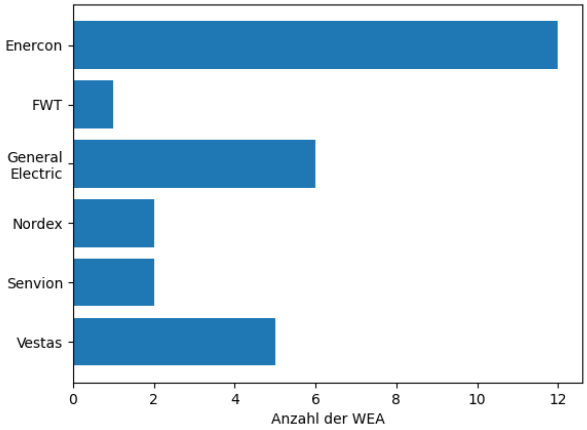


Abbildung 12: Hersteller der in den Reihenuntersuchungen erfassten WEA. Quelle: DMT, © dbMISS.

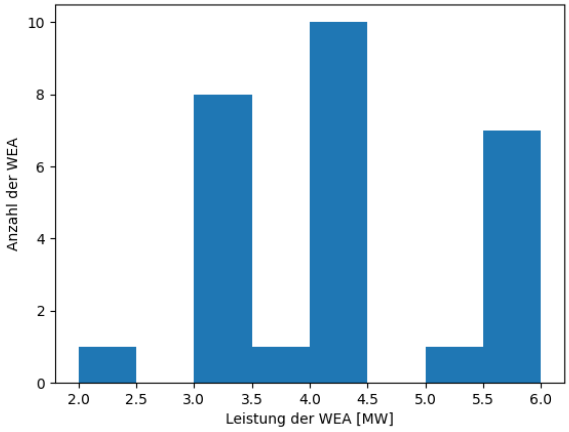


Abbildung 13: Leistungen der in den Reihenuntersuchungen erfassten WEA. Quelle: DMT, © dbMISS.

Tabelle 1: Im Rahmen des Forschungsprojekts vermessene Windenergieanlagen. Quelle: DMT, © dbMISS

Ort	**Hersteller**	**Typ**	**Nennleis-tung [MW]**	**Naben-höhe [m]**	**Rotor-durch-messer {m]**	**Erschüt-terungs-leistung [W]**
Hämelhausen	Enercon	E-160 EP5 E3	5,5	166	160	9,24
Tönisvorst	Enercon	E-126 EP3 MST	4,2	136	126	16,31
Hüttersdorf	Nordex	N131	3,3	164	131	6,05
Amelsbüren	Enercon	E-141	4,2	129	141	3,04
Haskenau	Enercon	E-141	4,2	159	141	3,31
Hönninghausen	Enercon	E-115	3	135	115	7,24
Wessel	Enercon	E-141 EP4	4,2	160	141	5,32
Bottrop	FWT	FWT 3000	3	100	120	4,58
Haard/Oer-Erken-schwick	Enercon	E-101	3,05	135	101	5,19
Bracht (Brüggen)	Enercon	E-138 EP3 E2	4,2	160	138	8,38
Polsum	Senvion	3.2M114	3,2	143	114	10,15
Brock Nord	General Electric	GE 3.2-130	3,2	134	130	4,66
Brock Süd	General Electric	GE 5.3-158	5,3	161	158	5,00
Marl	Enercon	E101-3050	3,05	135	101	1,36

Haltern	Vestas	V150-4.0	4	166	150	2,69
Ennenberg	General Electric	GE 5.5-158	5,5	161	158	4,08
Ennenberg	General Electric	GE 5.5-158	5,5	161	158	7,52
Haltern	Vestas	V150 4.0	4	166	150	1,77
Ennenberg	Senvion	3 M122	3	139	122	5,74
Haunetal	Vestas	V150 4.2	4,2	166	150	8,21
Tungerloh	Vestas	V150 5.6	5,6	148	150	6,99
Tungerloh	Vestas	V150 5.6	5,6	148	150	5,32
Tungerloh	Vestas	V126	3,5	137	126	8,23
Hochmoor	Enercon	E-141 EP4	4,2	159	141	8,2
Hochmoor	Enercon	E-141 EP4	4,2	159	141	5,5
Tungerloh	Enercon	E-141 EP4	4,2	129	141	4,38
Jülich	GE Wind Energy	GE 5,5 158	5,5	121	158	6,84
Jülich	GE Wind Energy	GE 5.5-158	5,5	121	158	5,41

Zusätzlich werden in der Auswertung Messungen an WEA, die im Rahmen anderer Projekte an verschiedenen Standorten durchgeführt wurden, hinzugezogen. Die Messgeometrie dieser Messungen weicht deutlich von der Messvorschrift zur Bestimmung der Erschütterungsleistung ab, ein direkter Vergleich der Messdaten ist daher nicht immer möglich. Allerdings liegen zu diesen Messungen Betriebsdaten der Windenergieanlagen vor. Somit konnte für Messpunkte im Nahfeld der WEA untersucht werden, inwiefern sich die Drehzahl bzw. die Windgeschwindigkeit auf die Erschütterungsleistung auswirkt.

Betrachtet man die Leistung von WEA in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, so lässt sich der resultierende Graph in vier Zonen unterteilen (Abbildung 14). In Zone 1 reicht die Windstärke nicht aus, Energie zu erzeugen. Überschreitet die Windgeschwindigkeit die „cut-in"-Geschwindigkeit (Zone 2), so kann die WEA Energie produzieren. Je höher die Windgeschwindigkeit, desto höher die Leistung der WEA. Erreicht die Leistung der WEA die Nennleistung führt ein weiterer Anstieg der Windgeschwindigkeit nicht mehr zu einer höheren Leistung der WEA (Zone 3). Überschreitet die Windgeschwindigkeit die maximale Windgeschwindigkeit, für die ein Betrieb der WEA vorgesehen ist („$v_{cut\text{-}off}$") so wird die Anlage abgeschaltet (Zone 4). Unabhängig von der Windgeschwindigkeit kann es zudem zu Abschaltungen der WEA zu Wartungszwecken oder aus anderen Gründen kommen.

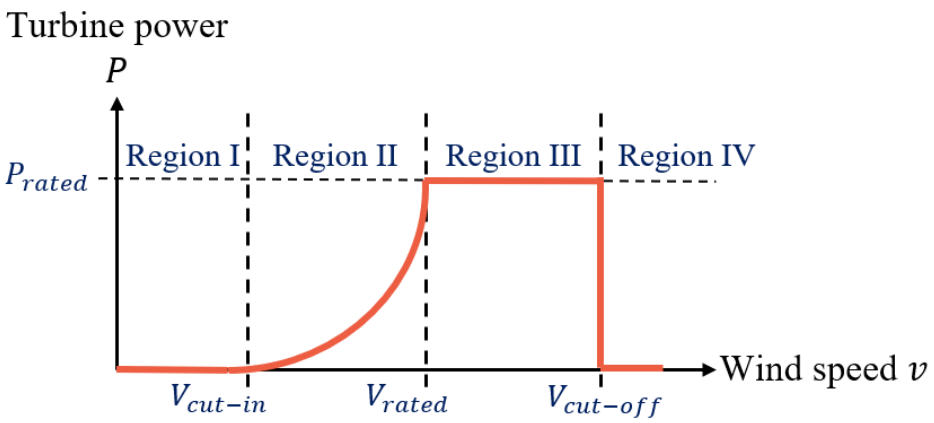


Abbildung 14: Betriebsbereiche von Windenergieanlagen. (Didier et al., 2024).

Die Messungen, zu denen Betriebsdaten vorliegen, enthalten größtenteils Zeiträume, in denen die WEA unter Teil- oder Volllast liefen (Zone 2 und 3). Darüber hinaus liegen aber auch Messdaten aus Zeiträumen vor, in denen die WEA stillstanden. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die Erschütterungsleistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für eine der zusätzlich ausgewerteten Messungen. Jeder Punkt steht für ein 10-Minuten-Intervall, für das die Erschütterungsleistung bestimmt wurde. Die Farbe der Punkte steht dabei für die Drehzahl der WEA zu dem entsprechenden Zeitpunkt. Dunkle Farben entsprechen niedrigen Drehzahlen, helle Farben hohen Drehzahlen. Zu erkennen ist, dass bei Windgeschwindigkeiten unterhalb von ca. 2 m/s die Drehzahl der WEA minimal ist (dunkle Farben) und die Erschütterungsleistung ebenfalls gering ist (Zone 1). Erst ab ca. 2 m/s Windgeschwindigkeit nimmt die Drehzahl der WEA zu und die Erschütterungsleistung der WEA steigt (Zone 2). Dies setzt sich bis ca. 10 m/s fort, bei höheren Windgeschwindigkeiten steigen Erschütterungsleistung und Drehzahl nicht weiter an. Dieser Plateaubereich entspricht Zone 3. Zone 4 wurde während der Messung nicht erreicht, es finden sich aber über alle Windgeschwindigkeitsbereiche Zeitintervalle, in denen die WEA stillstand.

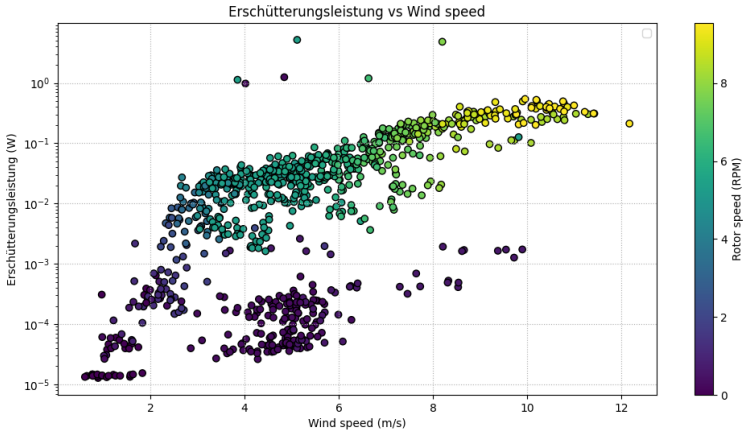


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung der Erschütterungsleistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Farblich codiert wird die Drehzahl der WEA dargestellt. Quelle: DMT, © dbMISS.

Da für viele der Reihenmessungen keine Betriebsdaten der WEA vorliegen und nicht sichergestellt ist, dass die Anlagen zum Zeitpunkt der Messung unter Volllast liefen, wird versucht eine Korrektur der Messdaten anhand von öffentlich verfügbaren Winddaten durchzuführen. Dazu wird auf die Messungen zu denen Betriebsdaten vorliegen zurückgegriffen. Zwar liegen hier die meisten Messpunkte in zu großer Entfernung um Erschütterungsleistungen zu bestimmen, allerdings liegen einzelne Messpunkte nahe an den WEA. Für diese Messpunkte werden Zeiträume betrachtet in denen der Betriebszustand Zone 3 entspricht, die WEA also mit ausreichender Drehzahl lief, die Erschütterungsleistung jedoch noch nicht den Plateaubereich erreicht. Für jede Messung wurde eine Exponentialfunktion der Form

$$P_{\text{Ersch}} = e^{v_{\text{Wind}} * \alpha} \tag{1}$$

angepasst, die den Anstieg der Erschütterungsleistung mit zunehmender Windgeschwindigkeit beschreibt. Der Faktor α liegt dabei bei allen ausgewerteten Messungen zwischen 0,2 und 0,7, mit einem Mittelwert von 0,479. Wir schlagen daher für Messungen, bei denen die Windgeschwindigkeit unter 10 m/s lag eine Korrektur der gemessenen Erschüttterungsleistungen zu einer Referenzwindgeschwindigkeit v_{Ref} = 10 m/s vor:

$$P_{\text{Ref}} = P_{\text{gemessen}} * e^{\Delta v * \alpha} \tag{2}$$

Mit $\Delta v = v_{\text{Ref}} - v_{\text{Messung}}$ und α = 0,479.

Partner KIT:

In den Jahren 2022 bis 2025 wurden sieben Messkampagnen durchgeführt (Abbildung 16, siehe auch Berichte auf dbMISS Homepage). Hierbei konnten erfolgreich ca. fünf Kilometer lange Profile beginnend an einer WEA mit mindestens 4 MW Leistung vermessen werden. Die Details zu den Messungen (Messpunkte, Geräte etc.), alle Metadaten und die Messreihen selbst werden über das GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung in Potsdam (GEOFON und Gerätepool) frei zur Verfügung gestellt (Umsetzung ist derzeit (August 2026) noch in Arbeit). Das GFZ hatte für die Messungen auch freundlicherweise Geräte des Geophysikalischen Instrumentenpools zur Verfügung gestellt. Im System der International

Federation of Digital Seismograph Networks sind die Messungen für dbMISS unter dem Netzcode 1P geführt: https://www.fdsn.org/networks/detail/1P_2022/

Die zu den Messkampagnen gehörenden verfügbaren WEA-Daten werden im OpenGeodata.NRW/GEOportal.NRW Portal des Landes NRW veröffentlicht (siehe AP6).

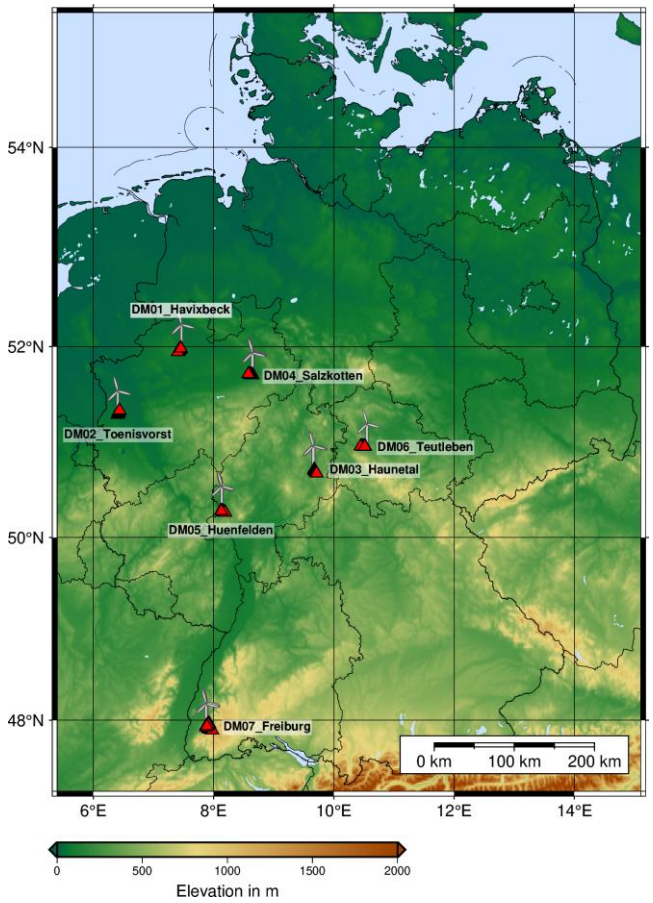


Abbildung 16: Lokationen der Messkampagnen des KIT an WEA mit Leistungen größer 4 MW. Quelle: KIT, © dbMISS.

Arbeitspaket 3: Homogenisierte Erarbeitung von Dämpfungswerten (Güte Q) aus vorhandenen Daten insbesondere der Explorationsseismik

Partner UM:

Untersuchung der seismischen Dämpfung in Nordrhein-Westfalen (NRW)

Eine vergleichende Analyse der Dämpfungseigenschaften in Nordrhein-Westfalen (NRW) und angrenzenden Gebieten wurde auf Grundlage lokaler Erdbeben- und Steinbruchsprengungsdaten durchgeführt. Explorationsdaten wurden wegen des generell höheren Frequenzbereichs (über 10 Hz) nicht genutzt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

Die Studie untersucht die frequenzabhängige Dämpfung und Wellenformverbreiterung in Westdeutschland (speziell Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz) unter Verwendung dieser beiden seismischen Quelltypen. Drei komplementäre Parameter wurden im Frequenzbereich von 1 - 20 Hz analysiert: die Peak-Delay-Analyse (PD) (Sato, 1989), die Dämpfung mittels Coda-Normalisation (Q_{CN}) (Aki, 1980) sowie der Coda-Qualitätsfaktor (Q_c) (Anderson und Minster, 1979), berechnet mit dem Matlab-Paket MuRAT (De Siena et al., 2014).

Der Wellenformdatensatz wurde aus regionalen seismologischen Katalogen und Datenarchiven zusammengestellt und umfasst Aufzeichnungen von Breitband- und Kurzperiodenstationen, die von regionalen seismologischen Überwachungsinstitutionen betrieben werden, darunter der Geologische Dienst Nordrhein-Westfalen sowie das seismische Netzwerk der Ruhr-Universität Bochum (RUB). Zusätzlich wurden Wellenform- und Katalogdaten aus Monitoring-Aktivitäten im Rahmen des Hochwasserüberwachungsprojekts an der RUB integriert (Rische et al., 2023; Friederich et al., 2020). Ein wesentlicher Teil des Steinbruchsprengungsdatensatzes basiert zudem auf relokalisierten Ereignissen, die am Seismologischen Observatorium Bensberg zusammengestellt wurden.

Nach Anwendung von Qualitätskriterien, basierend auf der Wellenformqualität, dem Signal-Rausch-Verhältnis der P-Phase sowie der Verfügbarkeit von P- und S-Phasen-Picks, umfasst der finale Datensatz 1.562 lokale Erdbeben (14.166 horizontale Komponenten) und 1.627 Steinbruchsprengungen (5.804 horizontale Komponenten). Die zugehörige Strahlenabdeckung für beide Datensätze und Methoden ist in Abbildung 17 dargestellt und veranschaulicht die räumliche Verteilung und Dichte der verwendeten Strahlenwege.

Die Kombination aus Erdbeben- und Sprengungsdaten ermöglicht eine Untersuchung unterschiedlicher Krustentiefen. Steinbruchsprengungen erfassen überwiegend die oberflächennahe Kruste, während Erdbeben tiefere und regional weiter verteilte Ausbreitungswege abbilden. Dieser komplementäre Datensatz erlaubt somit eine tiefenabhängige Analyse der Dämpfungsprozesse. Allerdings ist die Strahlenabdeckung im Untersuchungsgebiet räumlich nicht homogen. Steinbruchsprengungen liefern eine dichtere Abtastung in lokal begrenzten, oberflächennahen Bereichen, vor allem im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets, während Erdbebenstrahlen großräumiger verteilt sind und tiefere Strukturen erfassen. Infolgedessen variiert die räumliche Auflösung der tomographischen Modelle und der abgeleiteten Dämpfungsparameter sowohl im Raum als auch mit der Frequenz und unterscheidet sich zwischen den beiden Datensätzen.

Die final gemittelten Ergebnisse zeigen systematische und intern konsistente Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen. Steinbruchsprengungen weisen größere Peak-Delay-Werte sowie niedrigere Dämpfungsparameter (Q_{CN} und Q_c) im Vergleich zu Erdbeben auf, was auf eine stärkere Dämpfung und ausgeprägtere Wellenformverbreiterung entlang oberflächennaher Ausbreitungswege hinweist. Die Peak-Delay-Trends (Abbildung 18) bestätigen verstärkte Streueffekte in der oberflächennahen Kruste und zeigen eine klare Frequenzabhängigkeit.

Der Steigungsparameter (Abbildung 18, links), der die Distanzabhängigkeit des Peak Delay beschreibt, variiert systematisch mit der Frequenz für beide Datensätze. Für Erdbeben nimmt die Steigung im Allgemeinen mit zunehmender Frequenz zu. Für Steinbruchsprengungen ist die Frequenzabhängigkeit bei niedrigen Frequenzen weniger ausgeprägt, nähert sich jedoch bei höheren Frequenzen dem Verhalten der Erdbebendaten an. Die Ergebnisse bei 1 Hz sind weniger stabil und werden aufgrund eines

geringeren Signal-Störverhältnisses sowie möglicher instrumenteller Einschränkungen mit Vorsicht interpretiert. Der Referenzparameter (Abbildung 18, rechts) zeigt ebenfalls eine systematische Frequenzabhängigkeit und unterscheidet sich konsistent zwischen den beiden Quelltypen. Da Steinbruchsprengungen sehr flache Quellen sind und überwiegend die oberste Kruste erfassen, während Erdbeben tiefere und regional verteilte Strukturen abbilden, sind diese Unterschiede konsistent mit stärkerer Dämpfung und intensiverer Streuung entlang oberflächennaher Pfade.

Die frequenzabhängige Analyse unter Verwendung optimierter Coda-Fenster (5 - 15 s) zeigt, dass beide Dämpfungsparameter einer Potenzfunktion folgen ($Q(f) = Q_0 f_n$; Abbildung 19). Dabei weist *Qc* eine stärkere Frequenzabhängigkeit (n ≈ 0,9 - 1,0) und durchgehend höhere Werte als Q_{CN} (n ≈ 0,6 - 0,8) auf, was die stärker diffusive Natur der späten Codawellen widerspiegelt. Dieses Verhalten zeigt, dass hochfrequente seismische Wellen weniger stark gedämpft werden als niederfrequente Wellen, was typisch für eine heterogene Kruste ist, in der Streuung eine dominante Rolle spielt.

Erdbebendaten liefern höhere *Q*-Werte aufgrund tieferer Quellen und längerer Ausbreitungswege durch konsolidierte Kruste, während Steinbruchsprengungen eine stärkere Dämpfung und Streuung in oberflächennahen Sedimenten widerspiegeln. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine klare frequenz- und tiefenabhängige Dämpfungsstruktur in NRW. Die oberste Kruste ist durch stärkere Heterogenität, erhöhte Streuung und stärkere Dämpfung gekennzeichnet, während tiefere kristalline Bereiche höhere *Q*-Werte, d.h. niedrigere Dämpfung, aufweisen.

Diese Ergebnisse liefern konsistente Einschränkungen für die Dämpfungsstruktur des Untersuchungsgebiets und unterstreichen die Bedeutung von Steinbruchsprengungen als realistische Repräsentanten oberflächennaher seismischer Quellen. Sie sind daher besonders geeignet für Untersuchungen der Wellenausbreitung im Nahbereich sowie für die Verbesserung von Dämpfungsmodellen in Bezug auf anthropogene seismische Quellen und oberflächennahe Prozesse und liefern Parameter, die in andren Arbeitspaketen genutzt wurden. Eine Inversion für Dämpfung und seismische Geschwindigkeit wird im Moment noch durchgeführt.

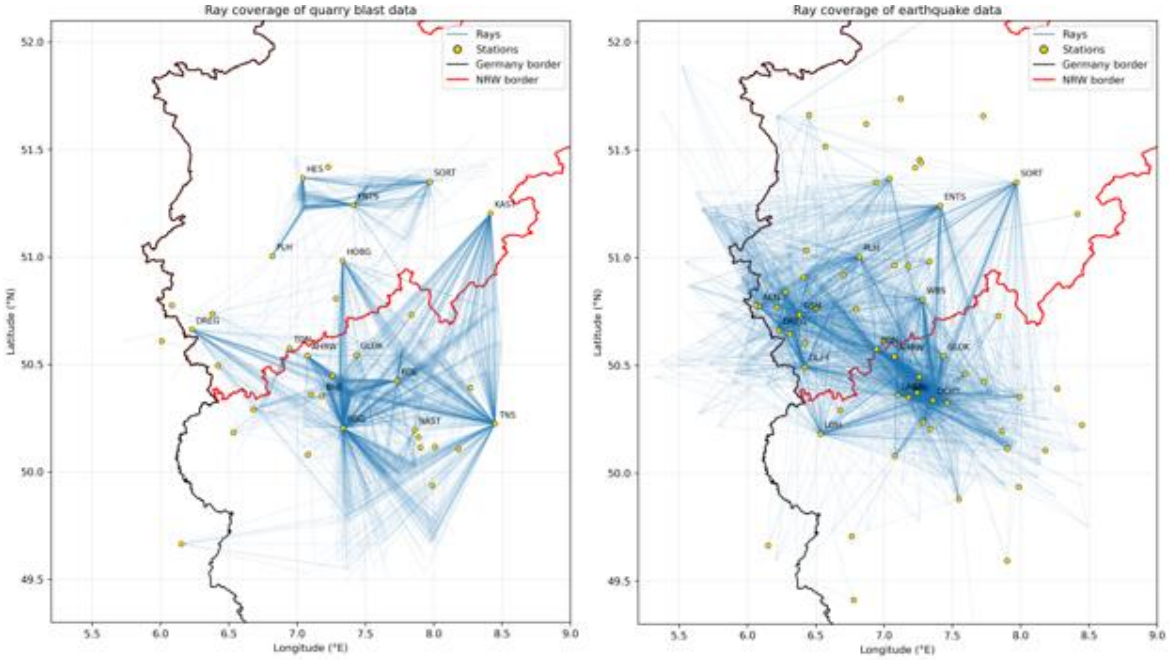


Abbildung 17: Strahlenabdeckung für (links) Steinbruchsprengungen und (rechts) Erdbeben. Kreise kennzeichnen die Position der seismologischen Stationen, Quelle: Uni Münster, © dbMISS.

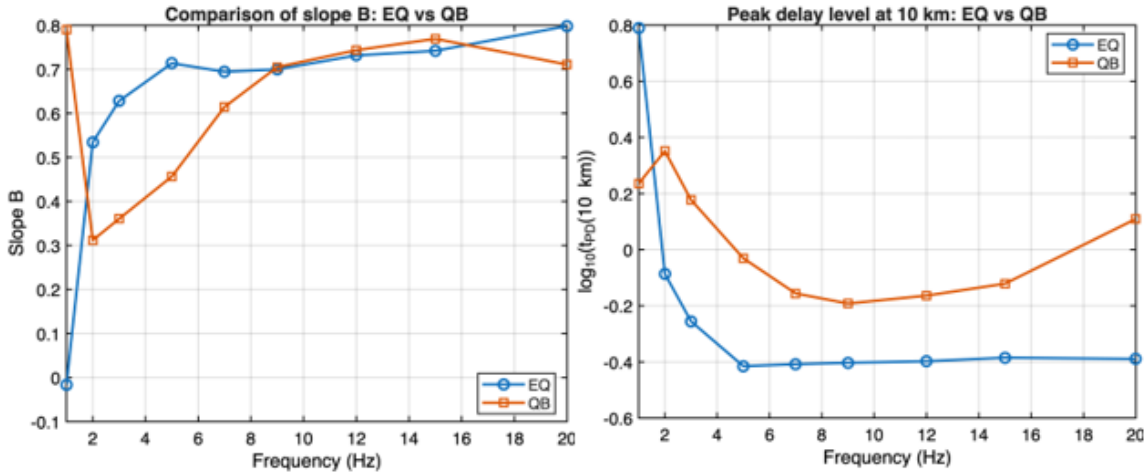


Abbildung 18: Frequenzabhängige Parameter des Peak Delay. Steigung (links) und Referenzniveau (rechts) für Erdbeben (orange Quadrate) und Steinbruchsprengungen (blaue Kreise), Quelle: Uni Münster, © dbMISS.

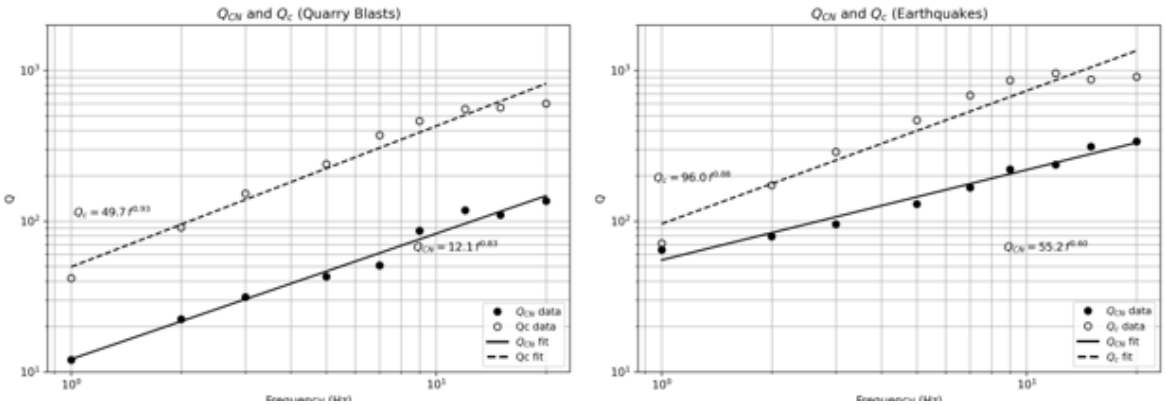


Abbildung 19: Frequenzabhängige Dämpfungsparameter, abgeleitet aus Steinbruchsprengungen (links) und Erdbeben (rechts). Gefüllte Symbole stellen QCN dar, offene Kreise Qc; durchgezogene und gestrichelte Linien kennzeichnen die entsprechenden Potenzgesetz-Anpassungen. Beide Parameter nehmen mit der Frequenz zu, wobei Q_c für beide Quelltypen durchgehend höher ist als Q_{CN}. Quelle: Uni Münster, © dbMISS.

Partner DMT:

Die archivierten Daten der seismischen Messungen in NRW wurden an die Universität Münster übergeben. Sie wurden aber wegen des zu hohen Frequenzbereichs (über 10 Hz) nicht weiter berücksichtigt.

Partner GD NRW:

Geologie

Der reale geologische Bezug von *Q* aus den Messdaten wurde vom GD NRW untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf geologischen und geophysikalischen Parametern, insbesondere der Lithologie und der seismischen Geschwindigkeit des Untergrundes. Diese Parameter sind von zentraler Bedeutung, um die für die Wellenausbreitung relevanten Untergrundparameter in der Umgebung von Erdbebenmessstationen in NRW präzise zu erfassen. Als Eingangsdaten wurden Geodaten aus dem Geothermie-Portal NRW für oberflächennahe und mitteltiefe Geothermie verwendet (https://www.geothermie.nrw.de/; Abbildung 20).

Die besondere Eignung dieser Datengrundlage liegt in der systematischen Verknüpfung von Bohrdaten, lithologischen Beschreibungen und stratigraphischen Modellen über unterschiedliche Tiefenniveaus hinweg, wodurch eine konsistente Parametrisierung des Untergrundes ermöglicht wird.

Im Tiefenbereich bis 100 m basiert die Datengrundlage primär auf einer hohen Dichte an Bohrungen mit geologischen, hydrogeologischen und ingenieurgeologischen Fragestellungen. Diese liefern detaillierte lithologische Informationen, insbesondere für die quartären Lockergesteinsabfolgen, die in Nordrhein-Westfalen großräumig verbreitet sind. Die lithologische Variabilität ist hier infolge komplexer glazialer, fluviatiler und äolischer Ablagerungsprozesse stark ausgeprägt und zeigt sich in kleinräumigen Fazieswechseln sowie heterogenen Wechsellagerungen von Kiesen, Sanden, Schluffen und Tonen.

Im Tiefenbereich bis 1000 m erweitert sich die Datengrundlage um tiefreichende Bohrungen, die eine systematische Zuordnung zu regional stratigraphischen Einheiten ermöglichen. Dies umfasst insbesondere paläozoische Einheiten wie devonische und karbonische Gesteinsfolgen sowie mesozoische Sedimente in den Beckenstrukturen Nordrhein-Westfalens.

Geschwindigkeits-Dämpfungs-Modell

Die Datengrundlage der oberflächennahen Geologie liegt als Shape-Datei vor und beinhaltet Flächen in Form von Polygonen mit den Angaben über die unterschiedlichen lithologischen und regionalstratigraphischen Einheiten, deren Mächtigkeit und Tiefenlage. Im Gegensatz dazu liegt die Datengrundlage der mitteltiefen Geothermie in Form von modellierten Horizonten als Rasterdatei im XYZ-Ascii-Format vor. Um das Datenformat zu vereinheitlichen, wurden die Daten aus dem Geothermie-Portal zunächst mit dem digitalen Geländemodell des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit einer Gitterweite von 200 m (DGM200) und 1000 m (DGM1000) verschnitten. In einem Gitterabstand von wahlweise 200 oder 1000 m liegen somit virtuelle Bohrprofile für ganz NRW mit Tiefen von 100 bzw. 1000 m vor. Für die weitere Verwendung wurde die komplexe Lithologie in den Bohrprofilen homogenisiert und zu einem geologischen Modell mit zwei lithostratigraphischen Einheiten als Hauptbestandteil und einer regionalstratigraphischen Einheit vereinfacht.

Als Eingangsinformationen wurden rund 175 geophysikalische Bohrlochmessungen (*Sonic-Logs*) verwendet, um den lithologischen Einheiten im Umfeld der Bohrlochmessungen Intervallgeschwindigkeiten der Kompressionswelle (V_P) zuzuordnen. Zusätzlich wurden Intervallgeschwindigkeiten aus den reflexionsseismischen Messungen Dekorp (1986) sowie aus den Seismiken Münsterland (2021), Rheinland (2022), Niederrhein (2023) und Ostwestfahlen-Lippe (2024) aus dem Explorations- und Bohrprogramm des Landes NRW verwendet (Abbildung 20). Für eine vergleichbare Handhabung der seismischen Messungen zu den geophysikalischen Bohrlochmessungen, wurden die jeweiligen 2D-Profile der Intervallgeschwindigkeiten (preSDM) in virtuelle Bohrlochmessungen in einem Abstand von 200 m entlang der Messprofile unterteilt. Den so entstandenen Geschwindigkeits-Tiefeninformationen wurden die geologischen Informationen der nächstgelegenen virtuellen Bohrprofile (*nearest neighbor*-Methode) zugeordnet. Fehlende Geschwindigkeitsinformationen für litho- und regionalstratigraphische Einheiten, die sich nicht aus den geophysikalischen Messungen ergaben, wurden nach Verfügbarkeit durch Literaturwerte sinnvoll ergänzt.

Für die Bestimmung der Dämpfungswerte *Q* wurden in einem vereinfachten Ansatz die Schwerwellengeschwindigkeiten V_S und die Geschwindigkeit der Oberflächenwellen V_R (Rayleigh-Wellen) nach Bormann et al. (2012) aus der *Slowness* S der *Sonic-Logs* mit:

$$V_P = \frac{1}{S * 10^{-6}} \tag{3}$$

bzw. den V_P-Geschwindigkeiten der reflexionsseismischen Messungen mit:

$$V_S = \frac{V_P}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

und

$$V_R = 0{,}92 \cdot V_S. \tag{5}$$

bestimmt. Die zugehörigen Qualitätsfaktoren *Q* (Q_P, Q_S, Q_R) wurden anschließend anhand empirischer Beziehungen geschätzt (Olsen et al., 2003; Brocher, 2005; Taborda, 2015). Für Abschätzung der

Qualitätsfaktoren aus seismischen Geschwindigkeiten wurde die empirische Beziehung von Olsen et al. (2003) verwendet und an die Locker-Festgesteinsgrenze in NRW angepasst (Abbildung 21):

$$Q_S(V_S) = m(V_S) \cdot V_S \tag{6}$$

mit $m(V_s) = 20$ für $V_S < 1100$ m/s und $m(V_s) = 100$ für $V_S > 1900$ m/s.

Zur Vermeidung von numerischen Diskontinuitäten wurde eine sigmoidal gewichtete Interpolation verwendet:

$$S(V_S) = \frac{1}{1 + exp\big(-k(V_S - X_0)\big)}. \tag{7}$$

Der Übergang erfolgt zwischen den Geschwindigkeiten $V_{s,min} = 1100$ m/s (75 %-Quantil der V_S-Geschwindigkeiten im Lockergestein) und $V_{s,max} = 1900$ m/s (25 %-Quantil der V_S-Geschwindigkeiten im Festgestein), wobei der Mittelpunkt des Übergangs bei

$$x_0 = \frac{V_{S,max} + V_{S,min}}{2} \tag{8}$$

liegt. Die Steilheit der Sigmoidfunktion wird so gewählt, dass die Gewichtung am unteren bzw. oberen Rand des Übergangsbereichs näherungsweise 0,01 bzw. 0,99 beträgt. Daraus ergibt sich der Parameter

$$k = \frac{\ln(99)}{\frac{V_{S,max} - V_{S,min}}{2}}. \tag{9}$$

Damit ergibt sich der schrittlose Übergang zu:

$$Q_S(V_S) = \big(1 - S(V_S)\big) \cdot 20V_S + S(V_S) \cdot 100V_S. \tag{10}$$

Die Ableitung des Qualitätsfaktors Q_P für Kompressionswellen ergibt sich aus Olsen et al. (2003) über das Verhältnis:

$$Q_P = 1{,}5 \cdot Q_S. \tag{11}$$

Der Dämpfungsfaktor Q_R für die Rayleigh-Wellen ergibt sich nach Udía (1999) aus:

$$a = \left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2, \tag{12}$$

$$b = \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2, \tag{13}$$

$$m = \frac{(2-b)(1-b)}{(2-b)(1-b) - \frac{b}{a(1-a)(2-3b)}}, \tag{14}$$

$$Q_R = \frac{1}{\left(m\frac{1}{Q_P}\right) + (1-m)\left(\frac{1}{Q_S}\right)}. \tag{15}$$

Um ein abschließendes, umfassendes Geschwindigkeits-Dämpfungs-Modell für NRW zu erhalten, wird ein mehrstufiges, prioritätsgesteuertes Verfahren angewandt. Abhängig von der Datenverfügbarkeit aus den Eingangsinformationen, werden die Geschwindigkeits- und Dämpfungsinformationen den jeweiligen litho- und regionalstratigraphischen Einheiten des abschließenden Modells entsprechend folgender Priorisierung zugeordnet:

Verwendung der Geschwindigkeits- und Dämpfungsinformationen aus

- Schritt 1: *Sonic-Logs* bei vollständiger Übereinstimmung der litho- und regionalstratigraphischen Einheiten
- Schritt 2: reflexionsseismischen Messungen bei vollständiger Übereinstimmung der litho- und regionalstratigraphischen Einheiten
- Schritt 3: *Sonic-Logs* und reflexionsseismischen Messungen bei einer Teilübereinstimmung der lithostratigraphischen Einheiten und vollständigen Übereinstimmung der regionalstratigraphischen Einheiten. Einheiten, die sich nicht aus den geophysikalischen Messungen ergeben, werden, soweit verfügbar durch Literaturwerte ergänzt.
- Schritt 4: *Sonic-Logs*, reflexionsseismischen Messungen und Literaturwerten bei vollständiger Übereinstimmung ausschließlich lithostratigraphischer Einheiten.
- Schritt 5: *Sonic-Logs*, reflexionsseismischen Messungen und Literaturwerten bei Teilübereinstimmungen ausschließlich lithostratigraphischer Einheiten.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Übertragung von V_P-Geschwindigkeiten aus lokal begrenzten geophysikalischen Messungen auf ein flächenhaftes, schichtäquivalentes Modell der Geologie in Nordrhein-Westfalen mit mehreren grundlegenden Unsicherheiten behaftet ist. So erfassen geophysikalische Messungen nur kleinräumige Eigenschaften, während die geologischen Einheiten lateral stark variieren können. Lithologische Heterogenität, Fazieswechsel und strukturelle Diskontinuitäten (z. B. Störungen) führen dazu, dass gleiche stratigraphische Horizonte unterschiedliche elastische Eigenschaften aufweisen. Für die Herleitung des Geschwindigkeitsmodells wurden diese Unsicherheiten jedoch bewusst in Kauf genommen.

Nach der Zuordnung werden die Geschwindigkeits- und Dämpfungsinformationen der jeweiligen Einheit statistisch untersucht (insbesondere arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Quantile für die einzelnen Einheiten bestimmt).

Abbildung 22 zeigt einen Ausschnitt des Geschwindigkeits-Dämpfungs-Modells am Beispiel der verwendeten *Sonic-Logs*. Es veranschaulicht die Variation von V_P und Q_R in Abhängigkeit von der Lithologie und Regionalstratigraphie, wobei konsolidierte Gesteine (z. B. Kalkstein, Sandstein) höhere Geschwindigkeiten und Lockersedimente (z. B. Sand, Schluff) niedrigere Werte aufweisen. Zudem ist die Streuung

der Werte dargestellt, die die Heterogenität der geophysikalischen Eigenschaften innerhalb der lithologischen/stratigraphischen Einheiten widerspiegeln.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass Q_R im Gegensatz zu Q_P und Q_S keine intrinsische dreidimensionale Materialeigenschaft darstellt. Die im Modell angegebenen Q_R-Werte werden über empirische Beziehungen aus den lokalen Materialparametern berechnet. Jeder Modellpunkt erhält somit den Q_R-Wert, den ein homogener Halbraum mit genau diesen Materialeigenschaften besitzen würde. Die dargestellte 3D-Verteilung beschreibt daher nicht die tatsächliche räumliche Verteilung der Rayleigh-Wellendämpfung, sondern eine aus den lokalen Materialeigenschaften abgeleitete Näherung.

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden die Dämpfungsfaktoren Q als frequenzunabhängige Größe beschrieben (*constant Q-material*). Diese Annahme stellt eine Vereinfachung dar, da die Dämpfung seismischer Wellen in realen Medien eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit aufweist. Insbesondere in heterogenen und viskoelastischen Gesteinen variiert Q häufig systematisch mit der Frequenz, was auf komplexe dissipative Mechanismen zurückzuführen ist.

Die Verwendung empirisch bestimmter Q-Werte führt dazu, dass frequenzabhängige Dämpfungsprozesse nicht explizit erfasst werden. Dies hat zur Folge, dass sowohl die Amplitudenabnahme als auch die Phasenverschiebung seismischer Signale nur näherungsweise beschrieben werden. Dispersionsphänomene sowie die frequenzabhängige Wellenausbreitung können nur unzureichend abgebildet werden.

Die getroffene Annahme eines frequenzunabhängigen Q-Wertes ist somit als pragmatische Näherung zu verstehen, deren Gültigkeit auf den betrachteten Frequenzbereich und die zugrunde liegenden geophysikalischen Rahmenbedingungen beschränkt ist.

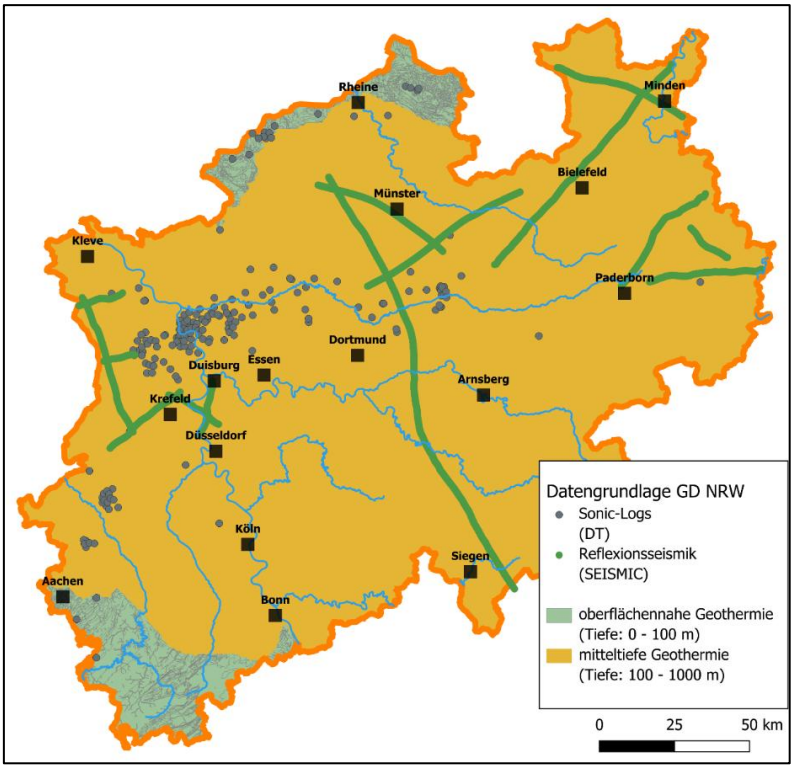


Abbildung 20: Verwendete Datengrundlage zur Erstellung des Geschwindigkeitsmodells. Dargestellt sind Daten für die oberflächennahe und mitteltiefe Geothermie aus dem Geothermie-Portal NRW sowie geophysikalische Bohrlochmessungen (Sonic-Logs, DT) und reflexionsseismische Messungen (SEISMIC) in Nordrhein-Westfalen. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

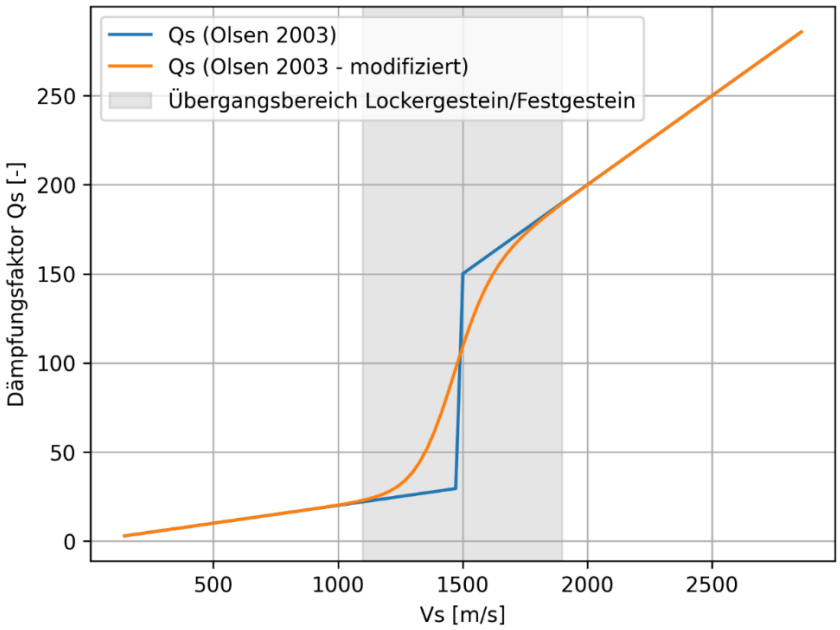
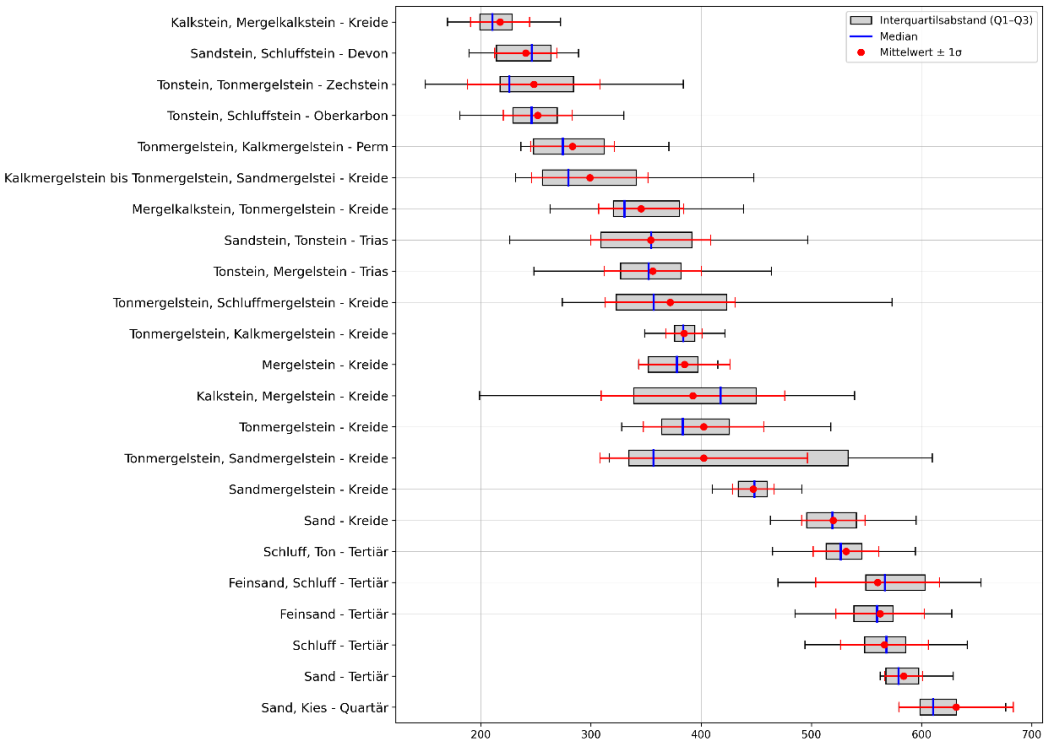


Abbildung 21: Dämpfungsmodell nach Olsen et al. (2003) sowie das für Nordrhein-Westfalen modifizierte Dämpfungsmodell mit einer kontinuierlichen Anpassung der Qualitätsfaktoren im Übergangsbereich vom Locker- zum Festgestein (VS = 1100 bis 1900 m/s) mittels einer Sigmoidfunktion. Der Übergangsbereich ergibt sich aus dem 75 %-Quantil der VS-Geschwindigkeiten im Lockergestein als Untergrenze und dem 25 %-Quantil der VS-Geschwindigkeiten im Festgestein als Obergrenze. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

a)



b)

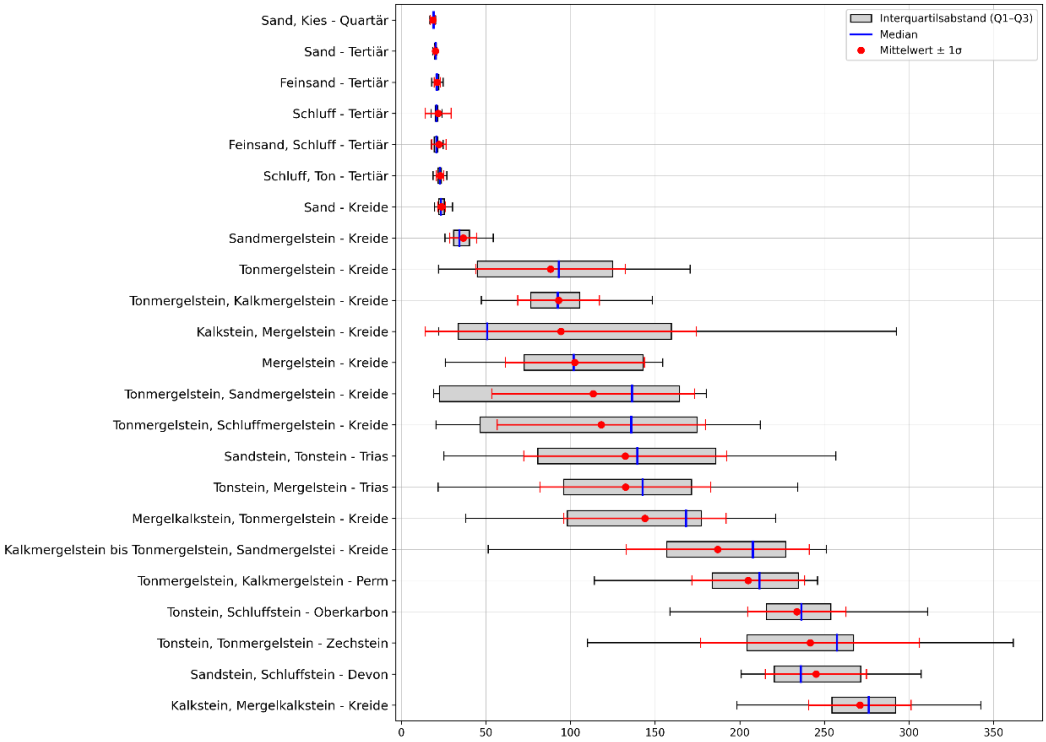


Abbildung 22: Ausschnitt des Geschwindigkeits-Dämpfungs-Modells für NRW am Beispiel der Slowness-Werte (a) und Dämpfungswerte QR (b) der verwendeten Sonic-Logs in NRW. Dargestellt sind der Median (blau) und der Intervallabstand zwischen dem ersten (Q1) und dritten Quantil (Q3) in schwarz. In Rot dargestellt ist der Mittelwert und die entsprechende Standardabweichung. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

Arbeitspaket 4: Bezug der Dämpfungswerte (Q) zu verfügbaren Daten (Karten) der lokalen oberflächennahen Geologie

Partner GD NRW:

Um zusammenfassende Kartendarstellungen der Geschwindigkeiten und Dämpfungswerten zu erhalten, wurden die Werte in den Tiefen von 0 bis 100 m, von 0 bis 500 m und von 0 bis 1000 m gemittelt. Für die Mittelung werden die vorkommenden Werte (Geschwindigkeiten V_i / Qualitätsfaktoren Q_i) in den jeweiligen Tiefenintervallen mit den Mächtigkeiten der jeweiligen geologischen Schicht gewichtet (D_i^{eff}):

$$\bar{V} = \left(\frac{\sum_i V_i \cdot D_i^{eff}}{\sum_i D_i^{eff}} \right) \tag{16}$$

bzw.

$$\bar{Q} = \left(\frac{\sum_i Q_i \cdot D_i^{eff}}{\sum_i D_i^{eff}} \right). \tag{17}$$

Die Schichten, welche die 100 m, 500 bzw. 1000 m Tiefe überschreiten, werden nur entsprechend der Tiefendifferenz zwischen Schichtoberkante und der Unterkannte des betrachteten Tiefenintervalls gewichtet. So wird sichergestellt, dass nur die Anteile der Schichten berücksichtigt werden, die tatsächlich innerhalb des Tiefenbereichs bis 100 m, 500 m bzw. 1000 m liegen.

Die Untersuchung der Oberflächenwellen am Beispiel für den Bereich Havixbeck (TK25 4010) zeigt anhand der räumlichen Verteilung der mittleren V_P-Geschwindigkeit und des Q_R-Faktors eine signifikante räumliche Variabilität auf regionaler Ebene. Die Werte sind in m/s angegeben und stellen Mittelwerte bis zu einer Tiefe von maximal 1000 Metern dar. Im Gebiet von Havixbeck sind die hohen Geschwindigkeiten in kompakten Kreideformationen zu finden, während die niedrigen Geschwindigkeiten mit lockeren quartären Ablagerungen korrespondieren (Abbildung 23). Der Q_R-Faktor weist eine Verteilung auf, die mit dieser Beobachtung übereinstimmt: niedrige Werte (starke Dämpfung) in Gebieten mit lockeren Sedimenten und hohe Werte (geringe Dämpfung) in Gebieten mit konsolidierten Gesteinen. Das Vorhandensein ausgeprägter Gradienten bei den Q_R-Werten deutet auf schnelle Übergänge zwischen verschiedenen Lithologien hin, die möglicherweise mit geologischen Strukturen wie Verwerfungen oder stratigraphischen Kontakten in Verbindung stehen.

Für NRW betrachtet zeigt der Dämpfungsfaktor Q_R deutliche regionale Unterschiede (Abbildung 24), welche die Unterschiede in der Zusammensetzung und Struktur des Untergrunds widerspiegelt. Die Dämpfungsfaktoren Q_R variieren im Lockergestein des Niederrheinischen Tieflands sowie der Niederrheinischen und Westfälischen Bucht zwischen etwa 10 und 35. Im Festgestein des Rheinischen Schiefergebirges sowie des Weser- und Osnabrücker Berglands liegen sie hingegen deutlich höher und erreichen Werte zwischen etwa 155 und 270.

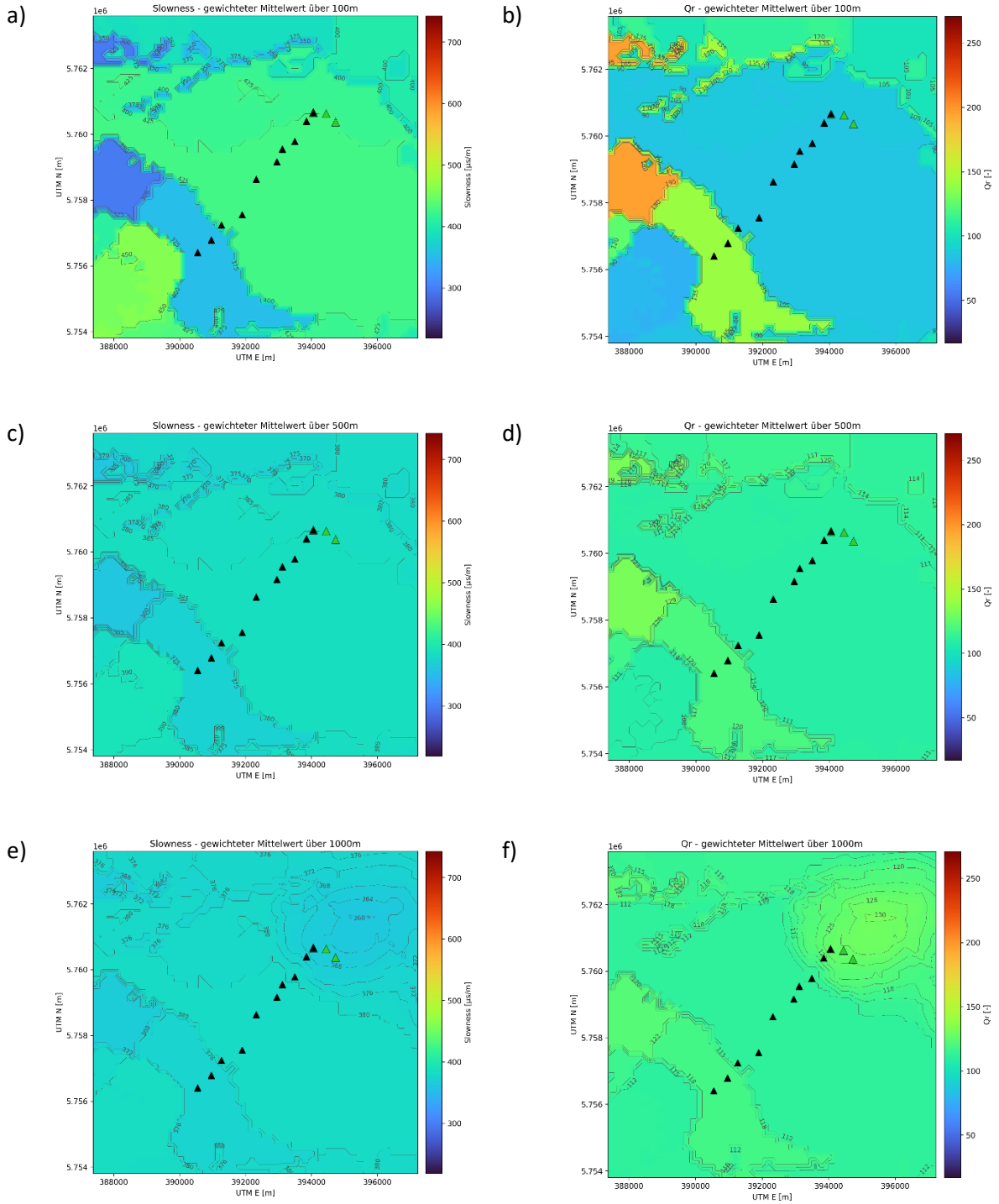


Abbildung 23: Karte der mittleren Slowness S und des mittleren Dämpfungsfaktor QR bis zu einer Tiefe von 100 m (a, b), 500 m (c, d) und 1000 m (e, f) in der Region Havixbeck (TK25 4010). Eingezeichnet ist auch die Lage des Messprofils des KIT sowie die Lage der gemessenen WEA. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

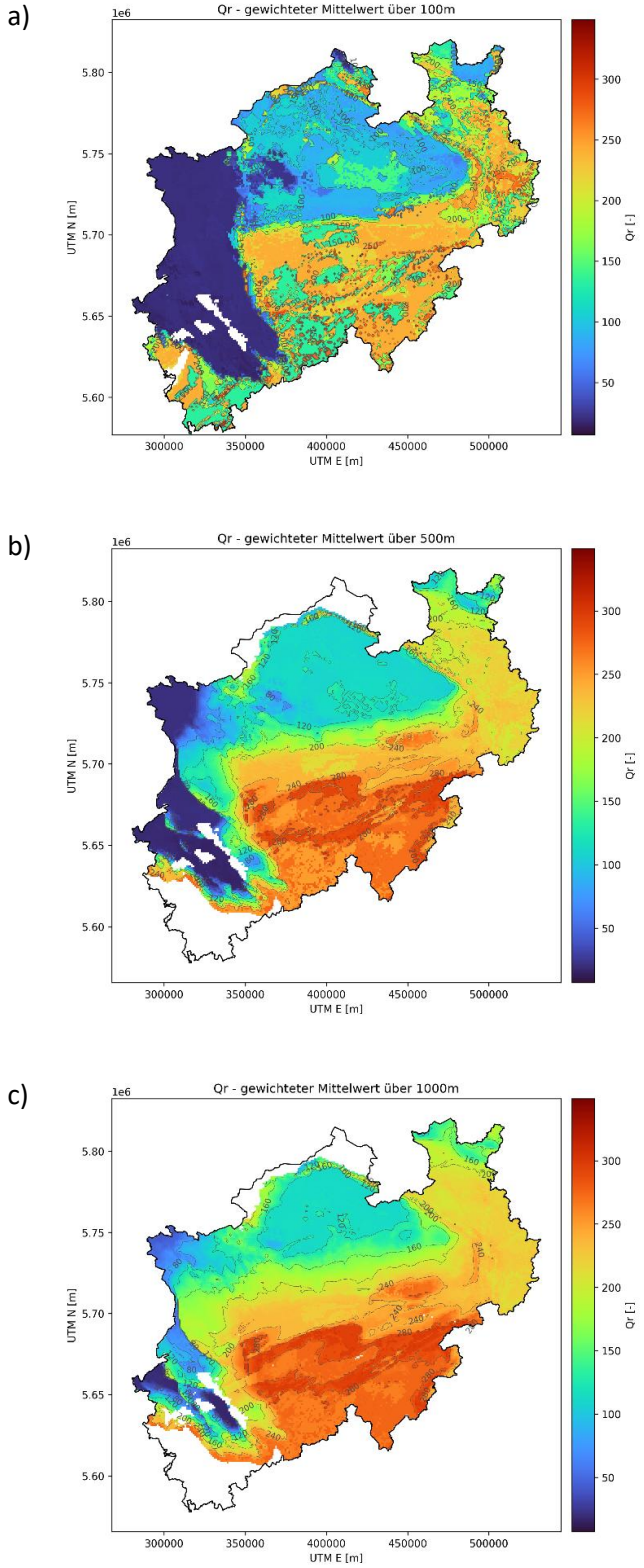


Abbildung 24: Karte für den mittleren Dämpfungsfaktor QR bis zu einer Tiefe von 100 m (a), 500 m (b)und 1000 m (c) in NRW. Für NRW betrachtet zeigt QR deutliche regionale Unterschiede. Im Lockergestein des Niederrheinischen Tieflands sowie der Niederrheinischen und Westfälischen Bucht liegen die Werte zwischen etwa 10 und 35, während sie im Festgestein des Rheinischen Schiefergebirges sowie des Weser- und Osnabrücker Berglands etwa 155 bis 270 erreichen. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

Arbeitspaket 5: Validierung der Ergebnisse der AP 3 und 4 durch Profilmessungen (Langprofile), Fortschreibung des KIT-Prognosetools

Partner KIT:

Für die Messlinien des KIT (Abbildung 16) wurden die registrierten Bodenbewegungen bzgl. Amplitude, Frequenzgehalt und Dämpfungsverhalten untersucht. Die Amplitudenwerte sind entlang den einzelnen Messlinien meist konsistent, allerdings treten auch lokale Verstärkungseffekte auf, die zu unrealistisch hohen *Q*-Werten führen können ($Q > 200$). Da die emittierten Oberflächenwellen frequenzabhängige Wellenlängen und somit verschiedene Eindringtiefen aufweisen, wurden auch Frequenzabhängigkeiten der Dämpfung analysiert. Hierbei wurde der b-Wert aus den Leistungsspektren bestimmt ($A \sim r^{-b}$), welcher eine gemittelte Amplitudenabnahme (Summe aus geometrischer Amplitudenabnahme, anelastischer Dämpfung und Streudämpfung) beinhaltet (Abbildung 25), wobei *r* die Entfernung zur WEA ist.

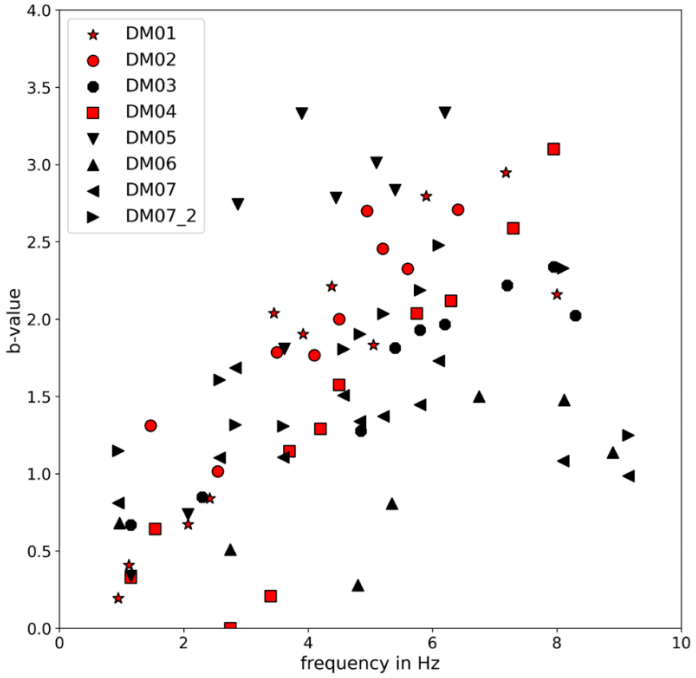


Abbildung 25: Zusammenstellung aller b-Werte aus den Messungen DM01 – DM07 im Rahmen von dbMISS. Rot: Untergrund besteht vorwiegend aus Sedimentgesteinen; schwarz: Messungen auf Festgestein. Quelle: KIT. © dbMISS.

Die Bestimmung von *Q*-Werten wurde durch die hierfür notwendige Kenntnis der zunächst unbekannten Oberflächenwellengruppengeschwindigkeit (*vr*) erschwert. Da *vr* mangels aktiver Quellen nicht bestimmt werden konnte, wurde versucht, Rauschdaten und seismische Interferometrie zu verwenden. Für stabile *vr* Ergebnisse waren die Registrierzeiten meist zu kurz, so dass auch Literaturwerte bzw. Daten des GD-NRW verwendet wurden (Oberflächenwellenphasengeschwindigkeit). Die berechneten *Q*-Werte und ihre Unsicherheiten sind in Abbildung 26 zusammengestellt. Sie entsprechen größenordnungsmäßig publizierten Messungen (Gaßner & Ritter, 2023) und Modellierungen (Gaßner et al., 2023).

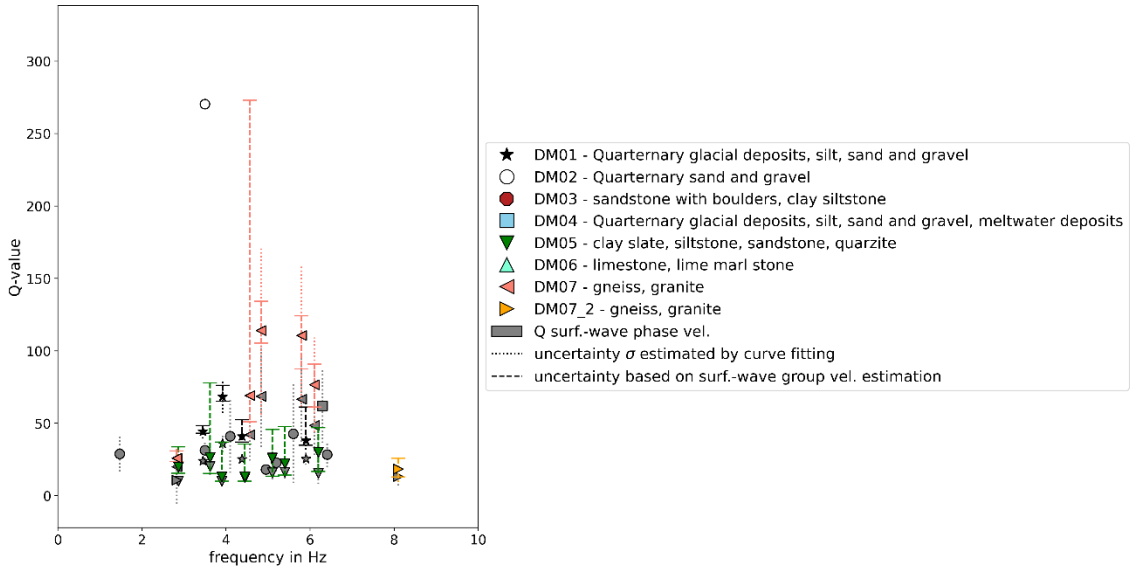


Abbildung 26: Zusammenstellung aller Q-Werte aus den Messungen DM01 – DM07 im Rahmen von dbMISS. Man beachte die teilweise großen Unsicherheiten aufgrund von lateralen Heterogenitäten und Unsicherheiten in vr. Es werden ausschließlich Q-Werte gezeigt, die gut bestimmt sind. Quelle: KIT. © dbMISS.

Die bestimmten Q-Werte streuen zwar, aber sie liegen bis auf einen Wert ($Q > 250$) in einem petrophysikalisch sinnvollen Bereich. Ein mittlerer Wert von $Q = 50$ hätte aber für kleine Frequenzen (<5 Hz) keinen deutlichen Einfluss auf die Amplitudenwerte bis in ca. 6-7 km Entfernung von einer WEA.

Arbeitspaket 6: Nachhaltige Archivierung aller Original-Daten. Sicherung eines öffentlichen Zugangs

Partner GD:

Im Rahmen der verfügbaren Ressourcen wird vom GD NRW ein strukturierter Projektordner im OpenGeodata.NRW/GEOportal.NRW Portal des Landes NRW bereitgestellt, in dem die im Projekt erarbeiteten Daten und Ergebnisse zentral abgelegt und öffentlich zugänglich gemacht werden. Damit ist eine transparente und nachvollziehbare Bereitstellung der vorhandenen Daten im Sinne eines Open-Access-Ansatzes gewährleistet.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeitspakete sind als Metadatensatz unter der URL:

https://geoportal.nrw/?activetab=map#/datasets/iso/1eef0cb9-0ad1-4dad-b756-37076bedf51a

oder über die Suche mit dem Stichwort „DB MISS“ im Geoportal abrufbar. Der XML-Metadatensatz selbst ist über den Link:

https://registry.gdi-de.org/id/de.nw/DBMISSDS

abrufbar.

Während des Projektes registrierte Wellenformdaten (KIT, DMT) werden dokumentiert über einen EIDA-Knoten (GFZ Potsdam, BGR Hannover) gespeichert, um das Datenvolumen im OpenGeodata.NRW/GEOportal.NRW so gering wie möglich zu halten. EIDA (European Integrated Data Center)

ist eine Datenbank, die seismologische Daten von verschiedenen Messstationen in Europa und darüber hinaus speichert und zugänglich macht. EIDA stellt eine zentrale Infrastruktur für die Archivierung, Verwaltung und Bereitstellung von seismischen Messdaten zur Verfügung, die von seismologischen Observatorien in Europa und von internationalen Projekten gesammelt werden. Es ermöglicht den Zugriff auf eine Vielzahl von seismischen Daten für Forschungszwecke und die Überwachung von Erdbebenaktivitäten.

Arbeitspaket 7: Weiterentwicklung und Praxiserprobung intelligenter Filter (denoising)

Partner DMT:

Neben den bereits getesteten und angewendeten Filtern, die auf Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) basieren und das seismische Hintergrundrauschen unterdrücken (Denoising Autoencoder), wurden weitere Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens (ML) untersucht. Unter anderem wurden Algorithmen zur automatischen Klassifizierung von seismischen Signalen in bestimmten Zeitfenstern geschrieben. Hierbei wird angestrebt, dass seismische Aufzeichnungen, welche Charakteristika von Erdbebensignalen aufweisen, automatisiert und sogar unter stark verrauschten Bedingungen durch eine KI identifiziert werden können. Somit soll eine weiterhin stabile Detektionsfähigkeit an Standorten von Erdbebenstationen trotz starkem Hintergrundrauschen (u.a. hervorgerufen durch WEA) erzielt werden. Zurzeit befindet sich die automatische Klassifizierung DMT-intern im Testbetrieb, zudem wird die Anwendbarkeit der Methode auf weitere Datensätze untersucht.

Partner RUB:

Die Arbeiten bauen auf dem bereits in Projekt MISS entwickelten Denoising-Auto-Encoder (DAE) auf, der nach kleinen Verbesserungen unter https://github.com/JanisHe/seismic_denoiser veröffentlicht wurde. Der Code erlaubt, Daten seismologischer Stationen in nahezu Echtzeit zu bearbeiten. Während in der Anfangsphase des Projekts beim Partner GD NRW noch Umstellungen am IT-System durchgeführt werden mussten, um einen Zugriff auf Echtzeitdaten zu ermöglichen, wurde der Denoiser an Daten von 142 Stationen in und um Deutschland aus dem Jahr 2020 getestet. Hier zeigte sich, dass im Vergleich zu den Rohdaten nach Anwendung des Denoisers mehr als doppelt so viele Erdbeben detektiert werden konnten.

Nach den Umstellungen im IT-System des GD konnte der Denoiser in nahezu Echtzeit angewendet und die kontinuierlichen seismologischen Daten des GD in SeisComp ausgewertet werden. SeisComp wird in der Seismologie zur automatischen und manuellen Auswertung von Erdbeben verwendet. Vor Anwendung des Denoisers wurden für jede Station des GD NRW einzeln Modelle trainiert. Dazu wurden zufällig ca. 200.000 Rauschzeitfenster aus dem kontinuierlichen seismologischen Daten ausgeschnitten, mit denen der Filter anschließend trainiert wurde.

Automatische Detektion und Identifikation von Ereignissen

Es zeigte sich, dass der Denoiser die kontinuierlichen Daten stark verändert. Bei Anwendung eines klassischen STA-LTA-Detektors zur Identifizierung seismischer Ereignisse kam es zu deutlich mehr Detektionen als bei den Rohdaten, von denen sich viele nach manueller Durchsicht als Fehldetektionen

erwiesen. Ein ähnlicher Befund ergab sich bei Anwendung des Denoisers auf Daten der seismischen Netzwerke Thüringen (TH) und Sachsen (SX). Auch durch Anwendung von KI-gestützten Methoden zur Detektion und Assoziierung von Ereignissen konnten die Fehldetektionen nicht automatisch eliminiert werden. Konkret fand die automatische Auswertung der Daten beider Netzwerke aus den Monaten Januar bis März 2020 in den Rohdaten 402 Ereignisse und in den entrauschten Daten 2110 Ereignisse. Eine manuelle Kontrolle an Daten von 6 Tagen aus diesem Zeitraum ergab 24 Ereignisse in den Rohdaten und 47 verifizierte Ereignisse in den entrauschten Daten. Zum Vergleich lieferte die automatische Auswertung 28 Ereignisse in den Rohdaten und 127 Ereignisse in den entrauschten Daten. Das deutet daraufhin, dass die automatische Auswertung bei den Rohdaten zuverlässig arbeitet, bei den entrauschten Daten zwar etwa doppelt so viele echte Ereignisse detektiert werden, aber leider sehr viele Fehldetektionen enthalten sind. Versuche, durch Veränderungen in den Einstellungen der Detektionsverfahren die Zahl der Fehldetektionen zu verringern, waren nicht erfolgreich. Auffällig war, dass bei vielen Fehldetektionen das Signal-Rausch-Verhältnis in den Rohdaten sehr niedrig ist. Auf dieser Grundlage könnten Fehldetektionen eliminiert werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass Fehldetektionen weiterhin vorkommen werden, die bisher nur durch eine manuelle Auswertung aussortiert werden können.

In der Folge dieses anfänglichen Befunds wurde das Problem der Fehldetektionen in verschiedene Richtungen weiterverfolgt. Verschiedene KI-gestützte Verfahren zur Identifikation von Ereignissen (PhaseNet, EQTransformer, GaMMA) wurden ausprobiert. Sie schneiden zwar besser ab, insbesondere bei S-Phasen, können die Fehldetektionen aber nicht so weit eindämmen, dass eine automatische Auswertung der entrauschten Daten nützlich wäre. Auch eine Variante des Denoisers selbst, bei der in der Eingangsschicht alle drei Komponenten enthalten sind, wurde erfolglos ausprobiert.

Verbesserung des Signa-Rausche-Verhältnisses durch den Denoiser

Eine weitere Fragestellung war, inwieweit die entrauschten Daten für eine Magnitudenbestimmung geeignet sind. Um dies zu untersuchen, wurden Daten der seismischen Netzwerke in Thüringen (TH) und Sachsen (SX) von Schwarmbeben in den Jahren 2011, 2014 und 2018 in der Region Luby / Novy Kostel (Tschechien) herangezogen. Für diese Beben gibt es manuell bestimmte Einsatzzeiten für P- und S-Wellen vom Institut für Geowissenschaften der Universität Jena (https://www.igw.uni-jena.de/1606/tsn), die auf Anfrage zur Verfügung gestellt wurden. Auf Grundlage der Einsatzzeiten wurden für 1900 Ereignisse im Magnitudenbereich M_L zwischen -0,7 und 4,2 an unterschiedlichen Stationen in verschiedenen Herdentfernungen Amplituden bestimmt, und zwar für das Rauschen kurz vor einem Ereignis sowie für die P- und S- Phase des Ereignisses. Daraus wurde das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der unterschiedlichen Phasen berechnet. Alle Größen wurden sowohl auf allen Komponenten der Orginalwellenformen und gefilterten Spuren (Bandpass 1 - 45 Hz 3. Ordnung), als auch auf den mit dem Denoiser erstellten entrauschten Spuren berechnet.

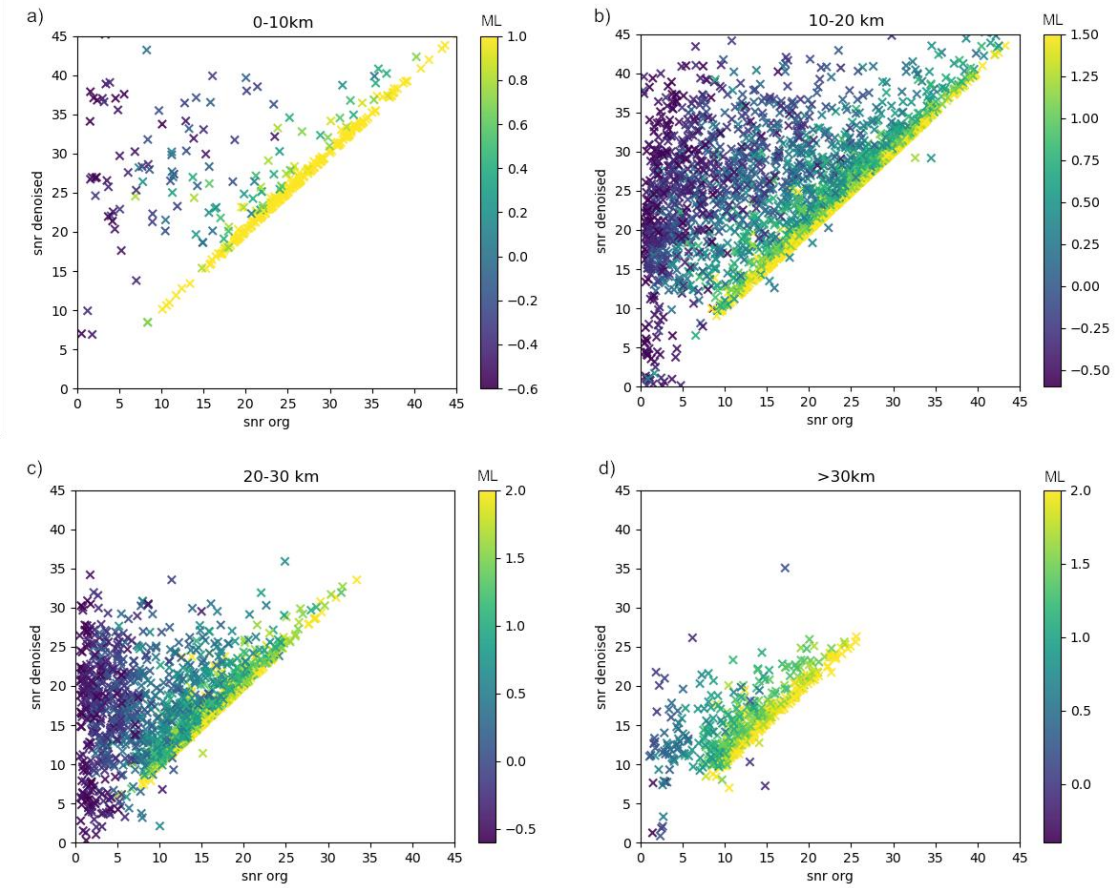


Abbildung 27: Signal-Rausch-Verhältnis der Originalwellenform zu Signal-Rausch-Verhältnis der mit dem Denoiser berechneten Spuren in unterschiedlichen Herdentfernungen (a-c). Quelle: © dbMISS.

Abbildung 27 zeigt eine Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses an den Stationen für die S-Welle vor und nach Anwendung des Denoisers aufgegliedert nach Herdentfernung. Das SNR nach dem Entrauschen ist durchgehend größer als das der Originalwellenformen, bei sehr schwachen Ereignissen um bis zu einem Faktor von 40. Es existiert eine Grenzmagnitude zwischen 1 und 2 abhängig von der Herdentfernung, über der das SNR durch das Entrauschen nicht mehr verbessert wird, weil in der Originalwellenform die Qualität des Signals schon sehr hoch ist. Die Analyse zeigt, dass der Denoiser durchgehend seinen Zweck erfüllt, nämlich schwache Ereignisse deutlich besser erkennbar zu machen.

Magnitudenbestimmung

Für die Magnitudenbestimmung ist die Amplitude im S-Wellenfenster relevant. Der Denoiser hat per Konstruktion die Eigenschaft, die Amplituden im Vergleich zu den Originalwellenformen generell zu verringern. Das ist sinnvoll, weil das Noise sich dem Nutzsignal überlagert. Wird das Noise entfernt, sollte sich die Amplitude und damit auch die Magnitude verringern. Allerdings kann es durch konstruktive Interferenz von Nutzsignal und Noise theoretisch auch zu Erhöhungen der Amplituden kommen, die vom Denoiser aber nicht abgebildet werden können.

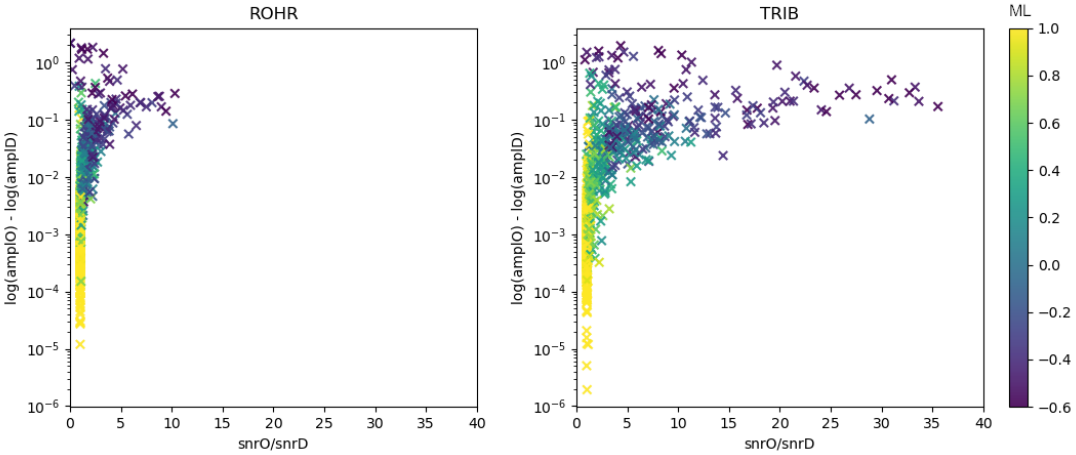


Abbildung 28: Logarithmus zur Basis 10 des Amplitudenverhältnisses von Original- und entrauschten Wellenformen aufgetragen gegen das SNR-Verhältnis von entrauschten und Originalwellenformen für zwei Herdentfernungen (ROHR: 10 km und TRIB: 20 km). Bei starken Ereignissen bleibt die Amplitude erhalten, bei schwachen kann sie bis um einen Faktor 10 zurückgehen. Quelle: © dbMISS.

Abbildung 28 zeigt eine Analyse der Amplitudenreduktion durch den Denoiser. Bei starken Ereignissen ist das Amplitudenverhältnis zwischen Original- und entrauschter Wellenform sehr nahe 1, kann aber bei schwachen Ereignissen bis um einen Faktor 10 zurückgehen. Die Häufung der schwachen Ereignisse in der Abbildung tritt bei Amplitudenverhältnissen um 2 auf. Das entspräche einer Magnitudenverringerung um 0,3. Es bestand die Hoffnung, dass die Verringerung der Magnitude systematisch mit der aus den Originalwellenformen bestimmten Magnituden einhergeht. Detaillierte Analysen zeigen, dass dies aber nicht der Fall ist. Es ist nicht gelungen, eine stabile Relation zwischen der Magnitude aus Original- und aus entrauschten Wellenformen zu finden. Berücksichtigt man zum einen, dass die Magnitude aus Originalwellenformen wegen des überlagerten Rauschens zufälligen Fluktuationen unterliegt (d.h. zwei identische Ereignisse zu unterschiedlichen Zeiten bekämen verschieden Magnituden) und zum anderen, dass der Denoiser das Rauschen nicht vollständig entfernt und eventuell auch Anteile des Nutzsignals entfernt, und dies abhängig vom zufälligen, echten Rauschen, ist dieser Befund nicht verwunderlich, da sich zwei Zufallsprozesse überlagern. Die erhoffte Rückrechnung der aus entrauchten Daten bestimmten Magnituden ist damit nicht möglich. Es ist davon auszugehen, dass die Magnituden aus Originalwellenformen generell zu hoch ausfallen und zufälligen Schwankungen unterliegen, während Magnituden aus entrauschten Daten vermutlich tendenziell etwas niedrig liegen, ebenfalls zufälligen Schwankungen unterliegen und je nach Design des Denoisers variieren.

Implementierung in SeisBench

Um den *DenoisingAutoEncoder* (DAE) breiter verfügbar zu machen, wurde er in das Programmpaket SeisBench (Woollam et al. 2022) eingebunden. SeisBench ist ein auf Python basiertes open source Projekt, welches dazu entwickelt wurde, um maschinelles Lernen (*machine learning*) in der Seismologie einfacher zugänglich zu machen und zu verbreiten. Die Implementierung des Denoisers bietet zum einen den Vorteil, dass dieser durch die bereits hohe Nutzerzahl von SeisBench weiterverbreitet wird, zudem ist eine einfache Kopplung von verschiedenen auf KI basierten Auswertungsmethoden möglich. SeisBench bietet einfachen Zugriff auf viele unterschiedliche Datensätze sowie einige trainierte Modelle, die bislang meist zur Detektion von Erdbeben und der Phasenbestimmung dienen.

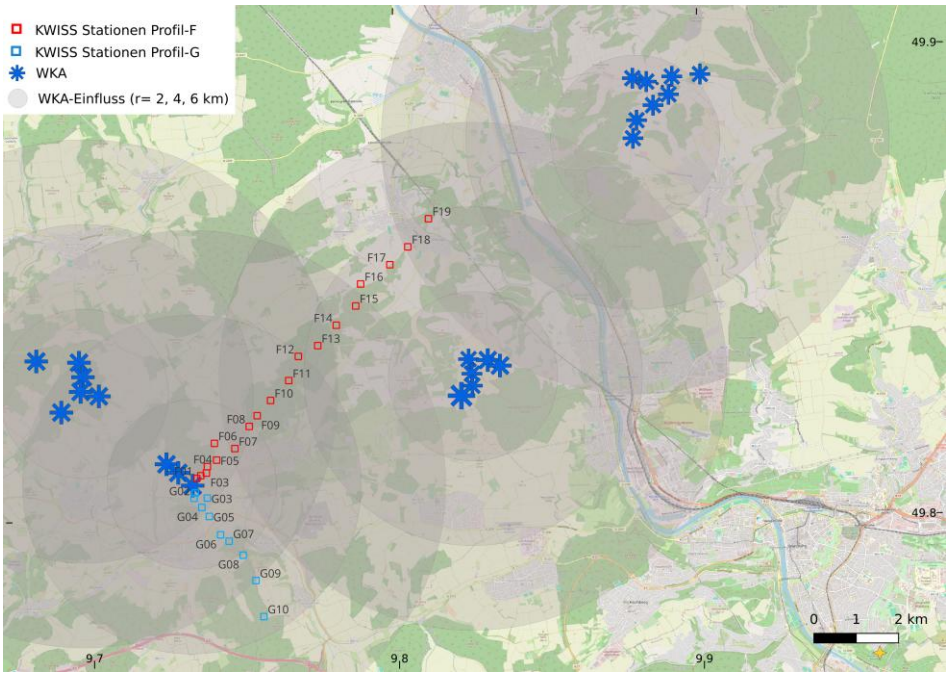


Abbildung 29: Lage der Stationen in den Profilen des KWISS Datensatzes im Vergleich zu den umgebenen Windkraftanlagen (Energie-Atlas Bayern, 2025) und deren Einflussbereichen. Quelle: RUB, © dbMISS.

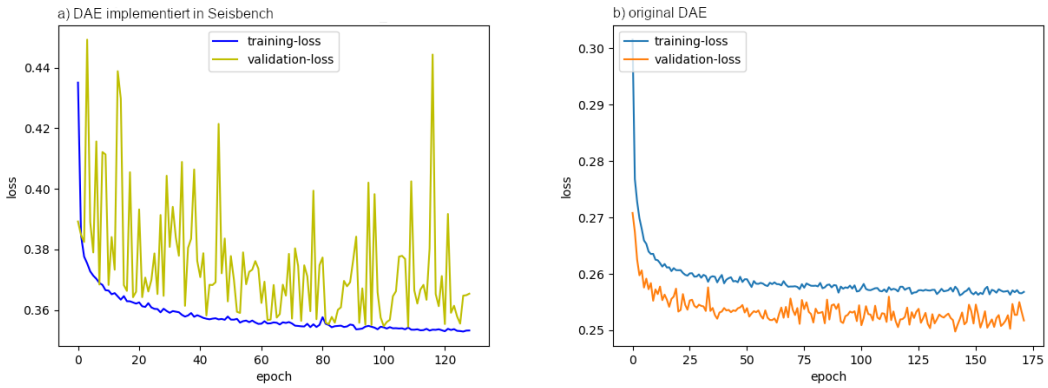


Abbildung 30: Vergleich der Fehlerreduktion während des Trainings und der Validierung zwischen Seisbench (links, a) und original DAE (rechts, b). Quelle: RUB, © dbMISS.

Zum Test der Performance der neuen Applikation wird das Modell soweit möglich mit den gleichen Parametern und Datensätzen trainiert, um mit dem Original DAE vergleichen zu können. Der verwendete Datensatz KWISS (Limberger et al, 2021) besteht aus kontinuierlichen Wellenformdaten, die auf zwei Profilen (19 + 10 Stationen) in der Umgebung eines Windparks über bis zu 2 Jahre aufgezeichnet worden sind (Abbildung 29). Der Datensatz wurde auch dazu verwendet, um herauszufinden, inwieweit der Denoiser Erdbebensignale, die in der Nähe von Windenergieanlagen aufgezeichnet werden, besser sichtbar machen kann.

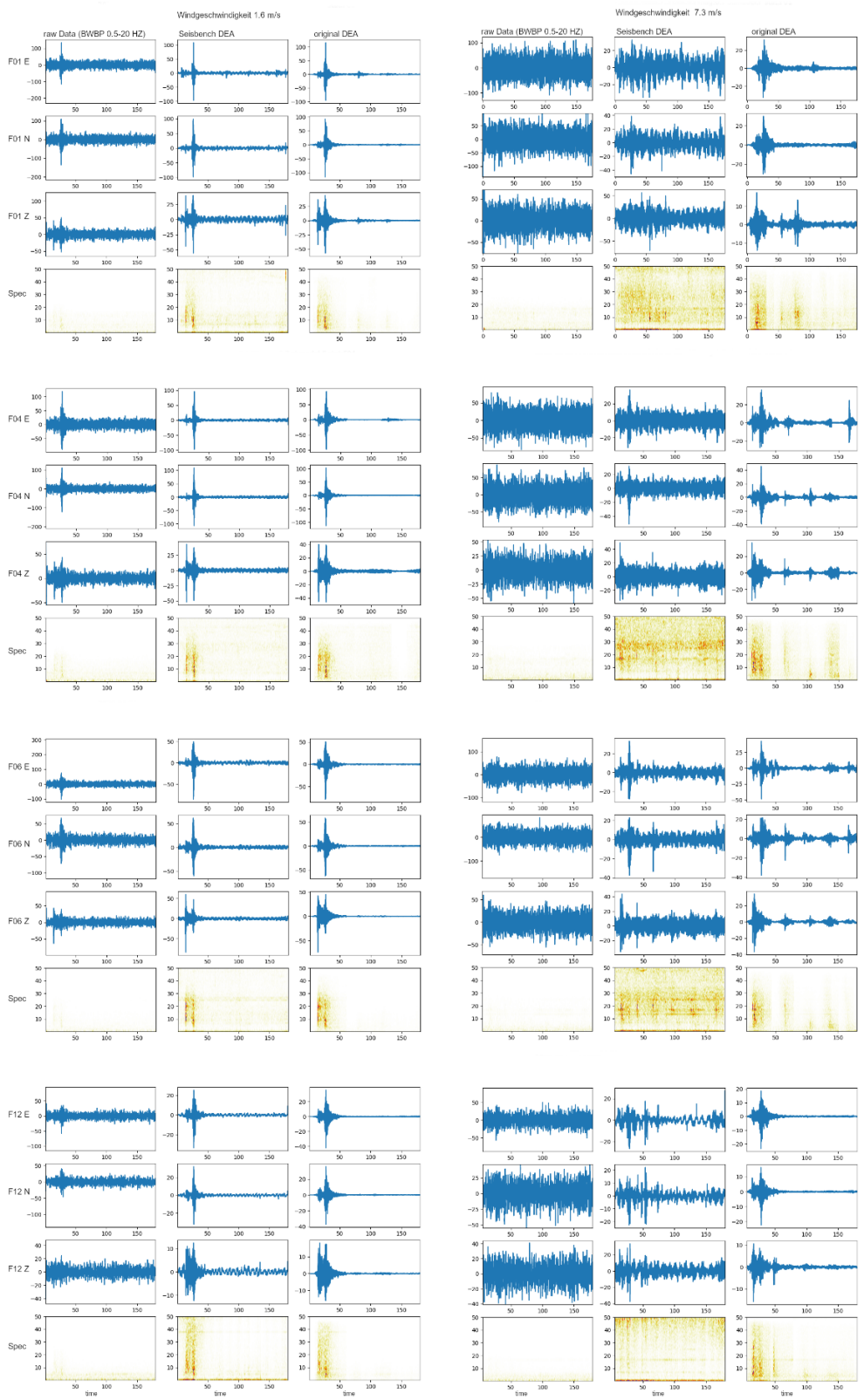


Abbildung 31: Vergleich von gefilterten Rohdaten sowie entrauschten Daten mit SeisBench und den original DAE für zwei Ereignisse M 0.7 aus der gleichen Herdregion ~93 km Entfernung (zu F01) bei unterschiedlichen Windbedingungen 1.6 m/s und 7.3 m/s. Quelle: RUB, © dbMISS.

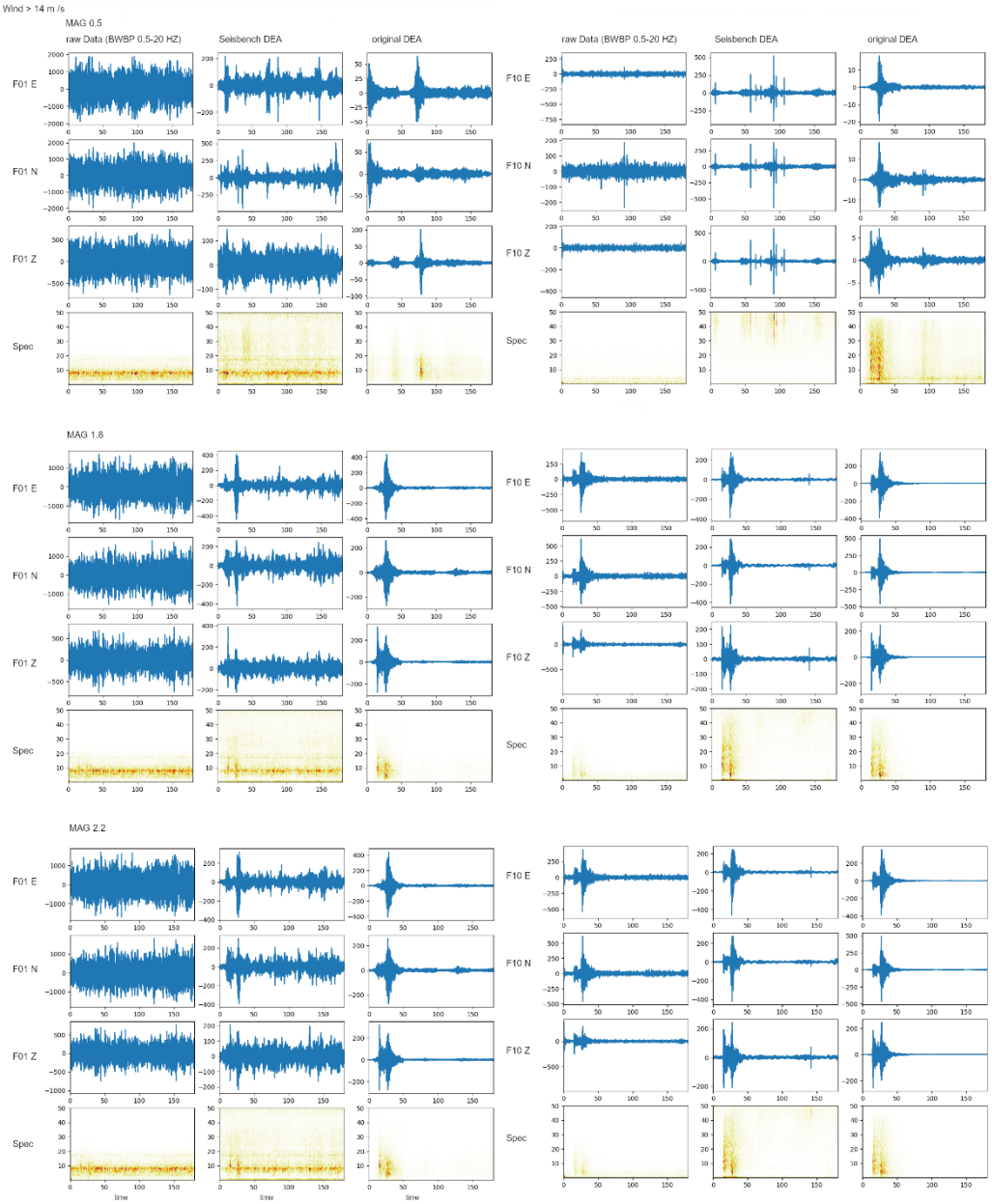


Abbildung 32: Ergebnisse des Entrauschens bei hohen Windgeschwindigkeiten > 14 m/s, angewandt auf Wellenformen von Ereignissen unterschiedlicher Magnitude bei gleicher Herdentfernung an den Stationen F01 (190 m von WEA) und F10 (2730 m von WEA). Quelle: RUB, © dbMISS.

Beim Training der neuen Version des DenoisingAutoEncoders in SeisBench (Abbildung 30a) lassen sich Performancedefizite gegenüber der Originalversion (Abbildung 30b) feststellen.

Auch ein Vergleich von entrauschten Wellenformen in Abbildung 31 von zwei Ereignissen mit einer Magnitude 0.7 aus einer Herdregion (Entfernung ~93 km) bei unterschiedlichen Windbedingungen an unterschiedlichen Stationen auf dem Profil zeigt eine bessere Rauschunterdrückung bei dem Original. In Abbildung 32 sind die Wellenformen und Spektren von 3 Ereignissen mit unterschiedlichen Magnituden in ca. 93 km Herdentfernung, gemessen bei hohen Windgeschwindigkeiten an einer Station F01 in unmittelbarer Nähe (190 m) der WEA und an F10 in 2.7 km Entfernung gezeigt. Für alle Beben zeigt sich an F01 ein starkes, die Signalform überlagerndes Rauschen. Dieses kann für die beiden Ereignisse mit höherer Magnitude mit dem Original-DEA gut entfernt werden, so dass klare P und S Einsätze zu erkennen sind. Bei der 2.7 km von der WEA entfernten Station ist das Ereignis bereits in den Rohdaten

erkennbar und das Ereignis mit Magnitude 0.5 lässt sich nach dem Entrauschen mit dem Original-DEA in der Wellenform erkennen.

Verbesserung der Sichtbarkeit von Ereignissen in der Nähe von Windkraftanlagen

Die Verbesserung der Sichtbarkeit der Ereigniswellenform wird in Abbildung 33 in Abhängigkeit von Ereignismagnitude und Windstärke für verschiedene Stationen mit einem Abstand zur WEA in F01- 190 m, F02- 300 m, F04- 570 m, F06- 1120 m, F08- 1935 m und F10- 2730 m dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass bei Magnituden über 1.7, bei Windgeschwindigkeiten unter 6 m/s das Signal bereits in den Originaldaten gut erkennbar ist und das Entrauschen keinen Vorteil bringt. Für kleinere Magnituden können mit zunehmender Entfernung von den WEA immer mehr Signalwellenformen durch den Einsatz des DEA sichtbar gemacht werden. In der hier untersuchten Konfiguration sind mithilfe des Original-DEA ab ca. 300 m Entfernung von der WEA alle Ereigniswellenformen zu identifizieren.

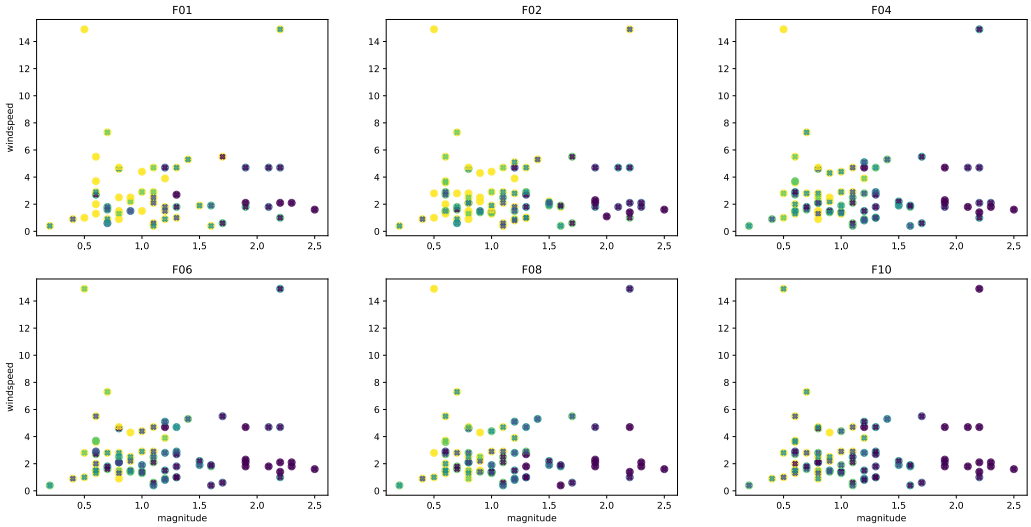


Abbildung 33: Darstellung der Verbesserung der Sichtbarkeit von Ereignissen in bis zu 100 km Herdentfernung abhängig von Magnitude und Windgeschwindigkeit. Die Farben (gelb - schlecht bis blau - gut) sind ein Maß für die Sichtbarkeit des Ereignisses in der Wellenform. Dabei stehen die Kreise für die gefilterten Rohdaten und die Kreuze (X) für die entrauschten Wellenformen. Quelle: RUB, © dbMISS.

Fazit

Der Denoising-Auto-Encoder (DAE) entfernt zuverlässig Rauschen aus seismischen Wellenformen und verbessert die Sichtbarkeit von schwachen Erdbeben signifikant, und dies unabhängig von der Ursache des Rauschens. Beim Denoising entstehen aber auch schwache impulsive Signale, die von automatischen Detektionsalgorithmen als Ereignisse fehlinterpretiert werden und dadurch zu einer hohen Zahl von automatischen Fehldetektionen führen. KI-gestützte Identifikationsverfahren schneiden bei der automatischen Detektion besser als klassische Verfahren ab. Der Denoiser reduziert die Signalamplituden per Konstruktion. Magnituden aus entrauschten Wellenformen sind daher logischerweise gleich oder kleiner als Magnituden aus verrauschten Originalwellenformen. Eine deterministische Relation zwischen beiden Magnituden konnte nicht abgeleitet werden.

Partner GD:

Integration des Seismic Denoiser in den Workflow unter SeisComP

Eine modifizierte Version des Seismic Denoisers von Heuel (2024) wird beim GD in nahezu Echtzeit eingesetzt, um die kontinuierlichen Originaldaten aus verschiedenen seismologischen Netzen zu filtern und in die Auswertung unter SeisComP zu integrieren. SeisComP ist eine etablierte Software zur Detektion und Auswertung seismischer Ereignisse, die in vielen Einrichtungen verwendet wird. Die routinemäßige Auswertung mit SeisComP befindet sich im GD NRW derzeit noch im Aufbau.

Neben der Möglichkeit, den Seismic Denoisers zur Unterstützung der Routineauswertung mit dem bisher verwendeten Programm SeiSan einzusetzen, wurde ein Workflow entwickelt, der es ermöglicht, den Seismic Denoiser kontinuierlich und automatisiert im Ablauf der Seismologischen Auswertung unter SeisComP zu integrieren (Abbildung 34a):

- Die an den Erdbebenstationen registrierten Daten werden aus dem seedlink-Buffer (Zwischenspeicher der ankommenden Wellenformdaten mithilfe des sogenannten seedlink-Protokolls) als Input für das Denoising gelesen. Hierzu wurde ein Python-Skript entwickelt, dass das Einlesen aus der speziellen Datenstruktur des Buffers, die Filterung unter Anwendung des Seismic Denoisers und das formatierte Schreiben in einen Zwischenordner organisiert. Mit Hilfe eines Cronjobs wird das Skript und somit das Denoising regelmäßig ausgeführt. Da aufgrund von Sicherheitsvorkehrungen der Datentransfer in das Landesnetz nicht per seedlink möglich ist, wurde neben dem Einlesen aus dem seedlink-Buffer auch das Lesen aus einer weiteren Datenstruktur ermöglicht.
- Da eine Mindestlänge des Seismogramms nötig ist und der Buffer nur abschnittsweise gefüllt wird, muss man eine gewisse zeitliche Verzögerung der mittels Denoiser gefilterten Daten akzeptieren. Es ist aber mit der Methode möglich, das Denoising alle zwei Minuten zu durchlaufen. Somit liegen die gefilterten Daten bereits nach einer geringen Verzögerung von wenigen Minuten vor.
- Gefilterte Daten werden anschließend unter Verwendung des mseedscan-Moduls wieder in das Processing mit SeisComP integriert. Die Inventory-xml Datei mit den Stations-Metadaten muss dafür zunächst um die Datenkanäle der gefilterten Daten erweitert werden.
- Das SeisComP Pipeline Konzept wird verwendet, um die Auswertung der gefilterten Daten in einem gesonderten Ablauf zu testen. Neben der Pipeline für das Picken und Lokalisieren auf Originaldaten, wurde eine Pipeline erstellt, die sowohl Picks auf Originaldaten als auch Picks auf per Seismic Denoiser gefilterten Daten verwendet. Die STA/LTA Filter und andere Einstellungen für das SeisComP scautopick und scautoloc model wurde entsprechend für die gefilterten Daten angepasst. Automatisch lokalisierte Events werden als eigene Origin einem Event zugeordnet. Das heißt, Auswertungen der gefilterten Daten sind separat, aber direkt neben den ggf. vorhandenen Auswertungen auf Basis herkömmlicher Daten verfügbar.

Der Vergleich der gefilterten Daten (Denoiser) mit den Originaldaten zeigt eine Vielzahl von Picks, hervorgerufen durch unregelmäßig auftretende Störsignale. Dies hat anfangs zu Fehllokalisierungen geführt. Durch Optimierung der Pickereinstellungen konnte die Anzahl der Fehllokalisierungen jedoch vermindert werden. Eine weitere Optimierung der Einstellungen könnte mit zunehmender Erfahrung in der Routine-Arbeit möglich sein.

Dadurch, dass das Denoising im GD mit dem beschriebenen Verfahren kontinuierlich ausgeführt wird, stehen gefilterte Daten auch für die weitere manuelle Bearbeitung unter SeisComP Archiv zu Verfügung.

Modelltraining für die jeweiligen Stationen (GD und andere)

Für die Erdbebenstationen des GD NRW werden individuell trainierte Modelle verwendet, die anfangs von der RUB berechnet wurden. Für Daten aus anderen Netzen wurde zunächst das von der RUB zur Verfügung gestellte allgemeine Modell verwendet.

Durch Einbinden einer NVIDIA-Umgebung unter der Linux-Maschine und entsprechende Anpassungen des Systems kann das Modelltraining mittlerweile beim GD selbständig und in akzeptabler Zeit durchgeführt werden.

Es ist zu erwarten, dass ein verbessertes Modelltraining ungewünschten Noise besser unterdrücken kann und dass im Fall einer dauerhaften, routinemäßigen Anwendung des Denoisers die Modelle regelmäßig nachtrainiert werden müssen, insbesondere an den Stationen, an denen durch bauliche Maßnahmen in der Umgebung neue charakteristische Störsignale hinzukommen. Dies können zum einen zusätzliche Windräder, aber auch andere Baumaßnamen oder Veränderungen sein. Auch saisonale Einflüsse können über regelmäßiges Retraining berücksichtigt werden. Letztere sind vor allem bei unseren Stationen im Bereich von Talsperren oder Wasserbehältern zu vermuten.

Für die Verwendung des Seismic Denoisers im Routinebetrieb sollte das Retraining mit möglichst wenig zusätzlichem Aufwand ablaufen. Hierzu wurde ein automatisiertes Retraining der Modelle in den Workflow unter SeisComP integriert (Abbildung 34b):

- Hierzu werden Daten aus dem SeisComP Archiv genutzt, die für einen festgelegten Zeitraum dort vorgehalten werden.
- Das entwickelte Skript extrahiert Noisefenster aus dem SeisComP Archiv in einem gewünschten Zeitraum und speichert diese in ein Zwischenverzeichnis. Es wird auf das gleiche csv-File (mit den Kontrollparametern für die jeweiligen Datenkanäle) zurückgegriffen, welches auch vom automatischen Denoising verwendet wird. Auf diese Weise wird der Aufwand für die Organisation des Ablaufs bei sich ändernden oder zusätzlichen Stationen möglichst geringgehalten. Auch hier wird über einen Cronjob die regelmäßige Ausführung des Skripts organisiert.
- Das Retraining wird anschließend für alle verwendeten Modelle ausgeführt.
- Nach Prüfung der Ergebnisse können die alten Modelle überschrieben und von da an für das Denoising verwendet werden.
- Um saisonale Schwankungen am Stationsstandort berücksichtigen zu können, wird das Retraining zunächst einmal im Monat ausgeführt.
- Auch neue Stationen können in den Ablauf eingebunden werden, in dem man das Denoising mit dem allgemeinen Modell startet. Durch regelmäßigen Durchlauf des Retrainings wird das Modell mit der Zeit auf die neue Station angepasst.
- Allerdings fehlt für das Retraining bisher der Nachweis, dass dieses die Rauschunterdrückung effektiv verbessert. Durch Anwendung der Methode über einen längeren Zeitraum wird erwartet, dass der Nutzen des stationsspezifische Retrainings überprüft werden kann. Gegebenenfalls sind hierzu weitere Testungen nötig. Hier sind insbesondere solche Stationen von Interesse, deren Stationsqualität sich durch den Zubau von Rauschquellen verschlechtert.

Ergebnisse Denoising

Der Seismic Denoiser wurde erfolgreich in die zukünftigen Auswerteroutinen des seismologischen Regelbetriebs im Geologischen Dienst NRW integriert. Hierbei wurde die Denoiser Version (Stand Ende 2023) genutzt, die bisher ohne das erweiterte Modelltraining (s.u.) umgesetzt ist. Mit der Integration des Denoisers können voraussichtlich auch zukünftige Versionen des Filters auf die seismologischen Daten angewandt werden.

Bisher werden die Ergebnisse des Denoising ergänzend beim automatischen Picken und bei der Eventlokalisierung genutzt. Gute Ergebnisse sind beim automatischen Picken auf den mit dem Denoiser gefilterten Spuren erkennbar. Ein beobachteter Vorläufereffekt bei den Phaseneinsätzen, speziell vor dem P-Einsatz, konnten durch eine geänderte Schwellwertsetzung und Zeitkorrektur (scautopick) beim STA/LTA Filter unter Kontrolle gebracht werden. Sprünge in den Zeitreihen, wie anfangs beim Autodenoiser der RUB beobachtetet, konnten aufgrund einer veränderten Vorgehensweise nicht bzw. nur im geringen Ausmaß in den Daten des GD beobachtet werden. Vor dem Denoisen der Daten werden mehrere Zeitabschnitte (abhängig von der Zeiteinstellung des Cronjob) aus dem Buffer zusammengesetzt und gemeinsam denoised. Anschließend wird nur noch das neu hinzugekommene Zeitsegment per mseedscan in SeisComP eingelesen. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist auch, dass die Daten im Buffer früher zur Verfügung stehen als SDS-Archivdaten, für die der Autodenoiser ausgelegt ist. Auf diese Weise ist es möglich, die gefilterten Daten quasi in Echtzeit für die Bearbeitung in SeisComP bereit zu stellen.

Automatische Lokalisierungen mithilfe der Pipelines liefern sehr gute Ergebnisse. Manuelle Relokalisierungen führen oft nur zu kleinen Verschiebungen der bestimmten Hypozentren. Auch gibt es einige Events, die nur über die denoised SeisComP Pipeline gefunden wurden.

Die Magnitudenbestimmung ist laut Bericht der RUB noch nicht zuverlässig und daher für den Routinebetrieb in der Form nicht nutzbar. Auch die vom GD NRW durchgeführten Auswertungen (Abbildung 35) zeigen an der Erdbebenstationen Großhau (GSH), Pulheim (PLH), Todenfeld (TDN) und Bürresheim (BHE) eine systematisch zu niedrige Magnitudenbestimmung auf Grundlage der mit dem Denoiser gefilterten Daten. Hier müssen weitere Untersuchungen zum Algorithmus unternommen werden. Zurzeit können für eine zuverlässige Magnitudenbestimmung ausschließlich Originaldaten genutzt werden.

Um zukünftige Weiterentwicklungen des Seismic Denoisers nutzen zu können und um zukünftige Veränderungen im Messnetz zu beachten, müssen im Regelbetrieb Parameterdateien betreut sowie evtl. die programmierten Routinen angepasst werden. Neben der Software muss ebenfalls zusätzliche Hardware (insbesondere CUDA) gewartet/betreut werden. In der manuellen Auswertung sind die zusätzlichen Zeitreihen zu beachten.

Anhand einiger Beispielen wurde gezeigt, dass nach einer Anwendung des Denoisers vielfach mehr Phaseneinsätze und Wellenformen von Erdbeben zu erkennen sind als ohne Anwendung des Denoisers. Jedoch liegt momentan keine Quantifizierung von detektierten Events (einschließlich Fehldetektionen) auf Basis gefilterter Daten im Vergleich zu detektierten Events auf Basis ungefilterter Daten vor. Inwieweit die Einwirkungen von WEA auf die Messungen von Erdbebenmessstationen kompensiert werden können, ist bisher nicht erfasst. Dabei ist auch weiterhin unklar, inwieweit Amplitude und Wellenform nach Anwendung des Filters korrekt sind.

Eine routinemäßige Verwendung der gefilterten Daten in der manuellen Auswertung mit der aktuell verwendeten Software Seisan hat sich nicht durchgesetzt, da die gefilterten Daten die Originaldaten nicht ersetzen können.

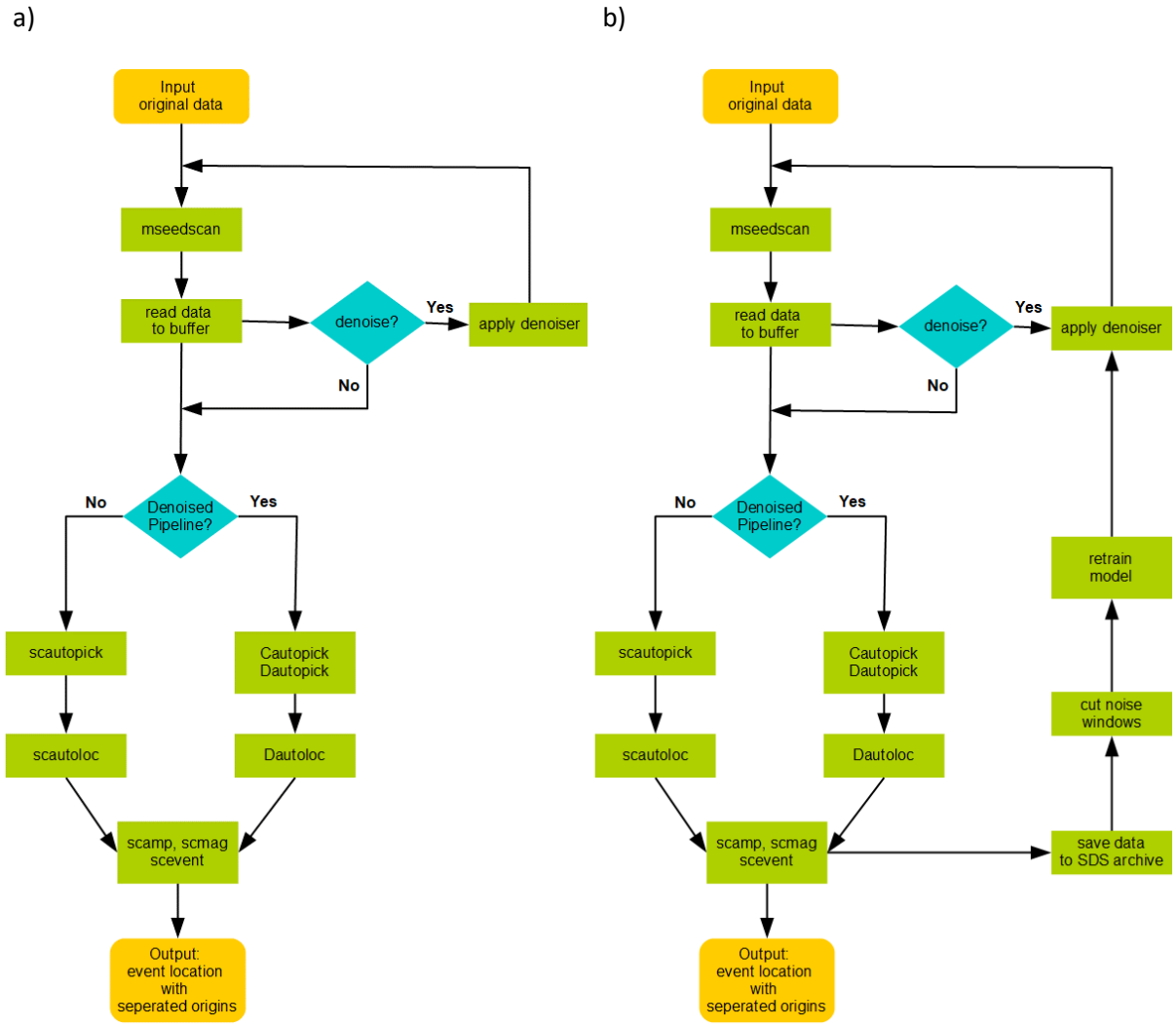


Abbildung 34: Flowchart für die Integration des Seismic Denoisers in das Processing unter SeisComP (a) und inklusive Retraining der Modelle (b). Quelle: GD NRW, © dbMISS.

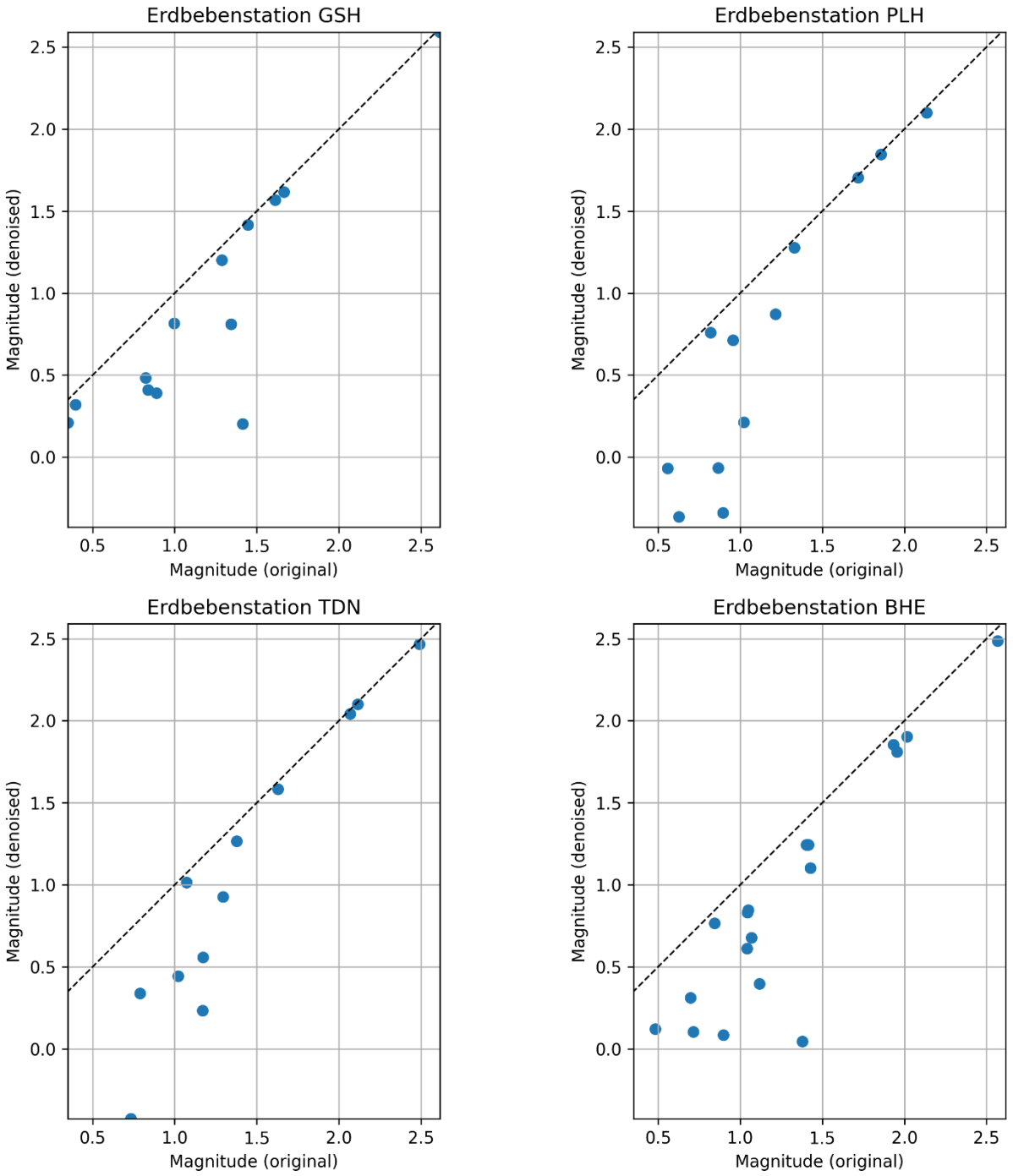


Abbildung 35: Auswertungen ausgewählter seismischer Ereignisse in Nordrhein-Westfalen zeigen, dass an den Erdbebenmessstationen des GD NRW (GSH, PLH, TDN und BHE) die auf den mit dem Denoiser gefilterten Daten basierende Magnitudenbestimmung systematisch niedrigere Werte liefert. Für eine zuverlässige Magnitudenbestimmung können daher ausschließlich die Originaldaten herangezogen werden. Quelle: GD NRW, © dbMISS.

Arbeitspaket 8: Einstein-Teleskop

Partner RWTH:

Ausgangslage und Zielsetzung

Das Arbeitspaket WP 8 ist in fünf Maßnahmen untergliedert:

a) Vergrößerung des Fundaments

b) Pitch-Regelung

c) Passive Schwingungsdämpfer

d) Aktive Schwingungsdämpfung

e) Aufbau der Windturbinen auf durchbrochenen Masten (Gittermasten)

Die Arbeiten in allen Maßnahmen konnten weitgehend abgeschlossen werden.

a) Vergrößerung des Fundaments

Ziel der Arbeiten zum Fundament war es, ein generisches Modell (Mehrkörpersystem (MKS)) einer typischen Onshore-WEA auszuarbeiten, verschiedene Fundamentvarianten zu entwickeln und anschließend in einer umfangreichen Parameterstudie deren Einfluss auf die Schwingungseinwirkung zu quantifizieren.

Modellierung der Windenergieanlage

Die WEA wurde als generisches Modell auf Basis einer Vestas V112 ausgearbeitet (3,3 MW, 112 m Rotordurchmesser, 140 m Nabenhöhe). Rotorblätter, Turm, Triebstrang und Controller wurden aus bestehenden Modellen übernommen und an die Zielanlage skaliert.

Wesentliche Punkte:

- Rotorblätter wurden nach bekannten Skalierungsgesetzen angepasst.
- Der Turm ist ein 138 m hoher Stahlrohrturm mit variabler Wanddicke.
- Der Triebstrang wurde vereinfacht, da seine Eigenfrequenzen oberhalb des relevanten Bereichs liegen.
- Der ROSCO-Controller wurde integriert und an die Anlage angepasst.

Damit lag ein vollständiges MKS-Modell vor, das als Grundlage für die Simulationen diente.
Fundamentauslegung und Varianten

Das Bodengutachten beschreibt den Untergrund als sehr tragfähig. Besonders relevant ist Schicht 3 („Vaalser Grünsand“), die laut Bericht eine „setzungs- und verdrehungsfreie Gründung“ ermöglicht.

Das Referenzfundament wurde nach DIN EN 61400-6 ausgelegt. Geometrie: Zylinder + Kegelstumpf, Durchmesser 23 m, Tiefe 3,5 m. Alle ULS- und SLS-Kriterien wurden erfüllt.

Fundamentvarianten:

Auf Basis des Referenzfundaments wurden fünf Varianten erzeugt, deren Masse schrittweise bis zum Faktor 2,0 erhöht wurde. Die Massen reichen von 2174 t (Referenz) bis 4348 t (2×). Für alle Varianten wurden Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen nach Gazetas (1991) berechnet.

Die Kosten skalieren linear mit der Fundamentmasse. Für das Referenzfundament ergeben sich 138.600 €, für die doppelte Masse 277.200 €.

Simulationen

Für jede Fundamentvariante wurden 232 Simulationen durchgeführt – insgesamt 1160 Simulationen. Die berücksichtigten Lastfälle (DLC) enthalten neben dem Produktionsbetrieb auch den Anlauf, die Abschaltung und Parken/Stillstand.

Die Auswertung erfolgte im Frequenzraum (2–10 Hz). Die betrachteten Bewertungsgrößen umfassen die Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fundaments sowie die am Fundament wirkenden Kräfte und Momente. Außerdem werden noch die Energie (Integral der spektralen Leistungsdichte) und die Peak-Amplituden bei den Eigenfrequenzen 3,3 Hz und 6,6 Hz untersucht.

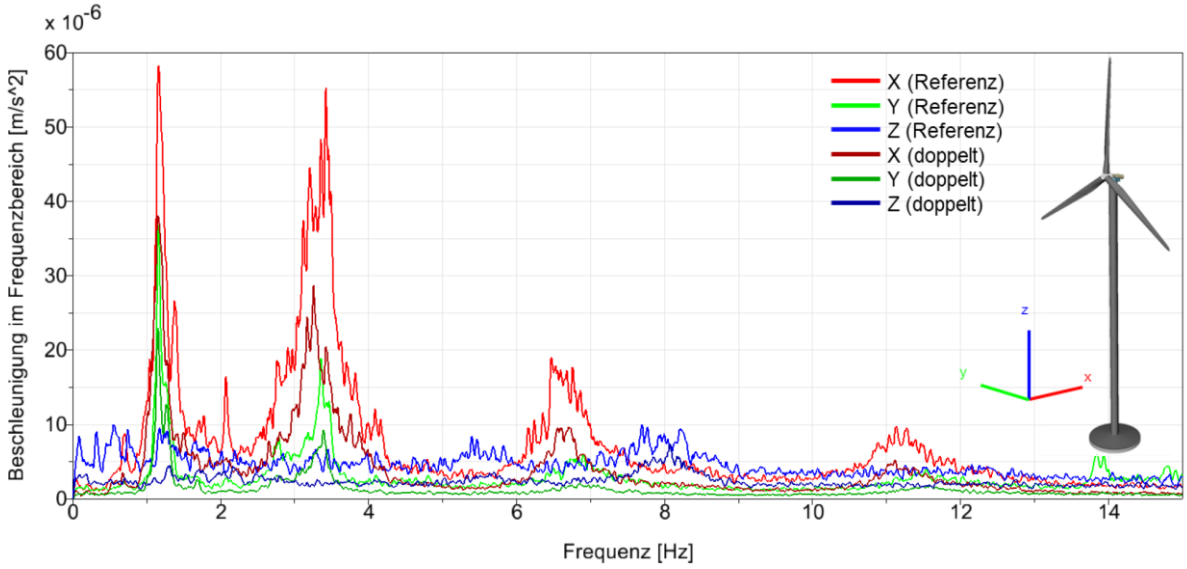


Abbildung 36: Die Fundamentbeschleunigung im Frequenzbereich für das Referenzfundament und das Fundament mit doppelter Masse. Quelle: © dbMISS.

Ergebnisse

Einfluss der Fundamentmasse auf Bewegungen:

Die Ergebnisse zeigen einen klaren dämpfenden Effekt größerer Fundamentmassen auf die Bewegung des Fundaments:

- Beschleunigung: bis -6,3 dB bei doppelter Masse
- Geschwindigkeit: bis -5,6 dB
- Energie sinkt nahezu linear mit der Fundamentmasse
- Die Eigenfrequenzen der Anlage bleiben unverändert

Einfluss auf Kräfte und Momente:

Interpretation und Grenzen:

Die Fundamentbewegung wird durch größere Massen deutlich reduziert. Allerdings gilt:

- Die gemessenen Größen beziehen sich nur auf das Fundament, nicht auf die tatsächlichen Bodenwellen.
- Größere Fundamente verteilen die Lasten auf eine größere Fläche – dies könnte den Eintrag in den Boden zusätzlich reduzieren, wurde aber nicht simuliert.
- Für eine endgültige Bewertung ist eine geophysikalische Modellierung der Wellenausbreitung notwendig.

Die Ergebnisse liefern eine solide Grundlage für die weitere Bewertung der Schwingungseinwirkung von Windenergieanlagen auf empfindliche Messinfrastruktur.

b) Pitch-Regelung

Die sogenannte Pitch-Regelung („Pitch Control“) beeinflusst durch die gezielte Regelung der Blattwinkel die aerodynamischen Kräfte am Rotor und damit die Anregung des Turms einer Windkraftanlage. Wenn man daher die Pitch-Regelung nicht primär auf maximale Leistung, sondern auf mechanische Lastreduktion optimiert, kann man gezielt bestimmte Frequenzbereiche dämpfen. Ziel der Machbarkeitsstudie, war die Erstellung einer Simulation des Schwingungsverhaltens einer generischen WEA unter dem Einfluss der Pitch-Regelung. Durchgeführt wurde die Studie von der W2E Wind to Energy GmbH in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik der Universität Rostock.

Die Simulation der WEA konnte erfolgreich aufgesetzt werden. Es wurde ein mechanisches und ein aerodynamisches Modell aufgebaut, um das Schwingungsverhalten der WEA zu untersuchen. Mit dem mechanischen Modell wurden die Auswirkung auf das Turmfußmoment um die y-Achse eines am Turmkopf angreifenden Moments oder einer am Turmkopf angreifende Kraft simuliert. Das aerodynamische Modell, zeigt welche Pitchregelung notwendig ist, um die dämpfenden Kräfte und Momente am Turmkopf zu realisieren. Weiter wurde ein DT2-Filter etabliert, um mögliche Lastamplituden zu verringern.

Aus dem mechanischen Modell geht hervor, dass sich im Frequenzbereich von 0 Hz bis 10 Hz 38 Eigenschwingformen der Anlage befinden. Weiter finden sich vier unterschiedliche Eigenschwingformen des Turms in diesem Bereich. Die Analysen haben gezeigt, dass sich durch eine Kraft am Turmkopf vor allem die erste Schwingform des Turms bei circa 0,6 Hz dämpfen lässt. Die Auswirkungen auf den Frequenzbereich von 2 Hz bis 10 Hz sind allerdings verschwindend.

Weiter hat sich gezeigt, dass durch ein Moment am Turmkopf vor allem die zweite Eigenfrequenz des Turmes bei circa 2 Hz dämpfen lässt. Dadurch konnte auch ein wesentlicher Effekt auf den

Frequenzbereich von 2 Hz bis 10 Hz des Turmfußmoments erreicht werden. Allerdings verschwindet der Effekt, wenn man sich den Frequenzbereich von 4 Hz bis 10 Hz anschaut.

Die Schwingungen konnten in keinem Fall so gedämpft werden, dass ihr Amplituden um Größenordnungen verringert werden.

Das Aerodynamische Modell legt die Grenzen fest, welche Kraft- und Momentenamplituden mit dem

Rotor erzeugt werden können. Weiter zeigt das aerodynamische Modell, wie sich eine mögliche Pitch-Regelung auf die Leistung der Anlage und die Lasten am Turmkopf auswirkt. Dabei zeigt sich, dass eine oszillierende Kraft zur Dämpfung des Turmfußmoment auch zu einer starken Schwankung der Leistung der Anlage beitragen würde. Weiter wären die notwendigen Pitchgeschwindigkeiten und -beschleunigungen, um überhaupt einen Effekt zu erzielen, um das bis zu 20-fache höher als die gegebenen Grenzen einer typischen Anlage. Demgegenüber sorgt ein oszillierendes Moment für eine gleichbleibende Leistung des Rotors und der Anlage und ist damit einer Kraft vorzuziehen. Allerdings können die notwendigen Pitchgeschwindigkeiten und -beschleunigungen auch in diesem Fall nicht erreicht werden.

Fazit

Der gewählte Ansatz der Einzelblattregelung ist nicht geeignet die Turmschwingungen einer Windenergieanlage im Bereich von 2 Hz bis 10 Hz wesentlich zu dämpfen. Es können lediglich die erste und zweite Turmeigenschwingung durch eine am Turmkopf angreifende Kraft bzw. angreifendes Moment gedämpft werden. Allerdings konnten unter Verwendung der beschriebenen Methode keine Effekte erzielt werden, die die Amplituden der Turmschwingungen um größere Ordnungen reduzieren. Die zweite Turmeigenfrequenz bei 2 Hz konnte maximal um circa 50% reduziert werden. Dieser Effekt wird aber weiter geschmälert durch die Limitierung der Pitchregelung in Bezug auf ihre technischen Grenzen. Eine Reduktion der Turmeigenfrequenzen von 5 Hz und 8,6 Hz war kaum möglich auch ohne eine technisch begrenzte Pitchregelung.

c) Passive Schwingungsdämpfer

Ziel des Auftrags ist die Untersuchung, inwieweit sich die Turmschwingungen einer Windturbine durch einen passiven Schwingungsdämpfer (TMD = *tuned mass damper*) reduzieren lassen. Die Studie wurde von der Baudynamik Heiland und Mistler GmbH durchgeführt. In der Studie wird die Effektivität eines TMD zur Reduzierung der Schwingungsemissionen von Windenergieanlagen in Bezug auf die dritte Eigenfrequenz untersucht und bewertet. Es wurde eine Parameterstudie mithilfe eines FE-Modells durchgeführt und die vertikale Anregbarkeit (Admittanz) der Fundamentaußenkante im Hinblick auf eine horizontale harmonische Systemanregung am Kopfpunkt ausgewertet. Die Effektivität des Tilgersytems wurde für jeden Einzelfall unter Bezugnahme auf das ungedämpfte Referenzmodell bestimmt. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Die durch die dritte Eigenfrequenz verursachten Schwingungsanteile an den gesamten Erschütterungsemissionen einer WEA können durch den Einsatz eines TMD wirksam reduziert werden. In Abhängigkeit der Systemparameter können unter optimalen Bedingungen Reduktionen von etwa 80 % bis 90 % erreicht werden. Der angegebene Wert basiert auf einer Worst-Case-Betrachtung und bezieht sich auf den Fall, dass eine Oberharmonische der 3P-Anregung die 3. Eigenfrequenz exakt trifft (Resonanz). Für

alle anderen Fälle ist der Schwingungstilger zwar nicht so wirksam, gleichzeitig sind die Schwingamplituden wegen geringerer Resonanzüberhöhung wesentlich kleiner.

Dabei zeigt sich, dass die Wahl der Tilgerposition ein effektives Mittel ist, um die Kosten-Nutzen-Rechnung zu optimieren. Ein TMD auf Höhe der oberen Maximalauslenkung der 3. Eigenform reduziert deutlich besser die Erschütterungen als in der unteren Position und nur geringfügig schlechter als bei der Kombination beider Tilgerpositionen. Die maximale Kosten-Nutzen-Effektivität wird demzufolge durch die Positionierung eines Tilgersystems in der oberen Maximalauslenkung erreicht.

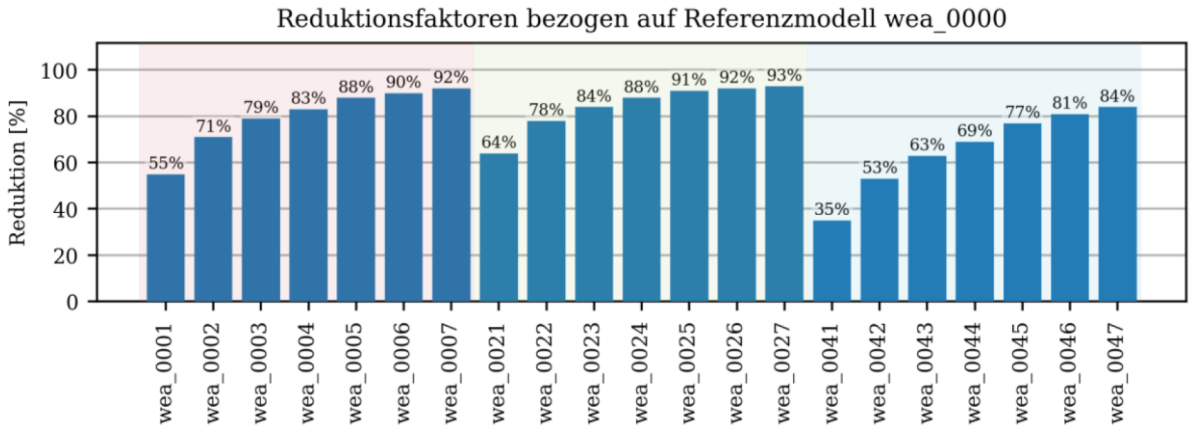


Abbildung 37: Reduktionsfaktoren für unterschiedliche Position (rot hinterlegt, Tilger im unteren Schwingungsmaximum; grün hinterlegt: zwei Tilger in beiden Positionen; blau hinterlegt: Tilger im oberen Schwingungsmaximum) und unterschiedlichen Tilgermassen (von links nach rechts: 0.5 % bis 10% der Modalmasse). Quelle: © dbMISS.

Darüber hinaus lassen sich die höchsten Erschütterungsreduktionen – unabhängig von der Bodensteifigkeit und Strukturdämpfung des Turms – durch die Optimierungskriterien nach den Gleichungen (1) und (2) bestimmen. Die optimale Tilgermasse liegt zwischen 3 % und 5 % und muss entsprechend des individuellen Platzangebots gewählt werden. Eine geringere Tilgermasse reduziert die Effektivität stark, eine höhere führt nur zu vernachlässigbar besseren Effektivitäten.

d) Aktive Schwingungsdämpfung

Unter einer aktiven Schwingungsdämpfung versteht man einen Regelmechanismus, bei dem die Bewegung des Turms der WEA gemessen und dann eine der Bewegung entgegenwirkende Kraft oder ein entgegenwirkendes Drehmoment auf den Turm ausgeübt wird, um so die Bewegung des Turms zu reduzieren. Eine aktive Regelung benötigt folglich drei Elemente:

1. Die Messung der Bewegung des Turms: Diese kann durch Beschleunigungssensoren erreicht werden, die an den Positionen der maximalen Bewegung des Turms in den einzelnen Schwingungsmoden angebracht werden. Eine kleine Marktstudie hat gezeigt, dass Beschleunigungssensoren mit ausreichender Auflösung zu erschwinglichen Preisen kommerziell verfügbar sind. Darüber hinaus könnte die Turmbewegung auch mittels Dehnungsstreifen, die die Deformation des Turms messen, bestimmt werden.
2. Ein Regelalgorithmus: Die aktive Dämpfung der Turmschwingungen stellt keine besonderen Anforderungen an den Regelalgorithmus. Eine auf Standardalgorithmen beruhende Regelung sollte in der Lage sein die aktive Dämpfung zu steuern.
3. Die Erzeugung einer ausreichenden Gegenkraft / eines ausreichenden Gegendrehmoments: Hier liegt das eigentliche Problem einer aktiven Dämpfung. Gemeinsam mit dem

Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen haben wir unterschiedliche Ansätze durchdiskutiert und überschlagsmäßig bewertet. Zwar wurden Ansätze gefunden, die im Prinzip die notwendigen Kräfte und Drehmomente erzeugen können, z.B. durch das Verschieben von Wassermassen von einer Seite des Fundaments zu einer anderen, aber in allen Fällen zeigte sich, dass noch erheblicher Aufwand an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sein wird, um eine aktive Regelung zu realisieren.

Somit erfüllt der Ansatz, die Schwingungen einer WEA durch aktive Dämpfung zu verringern, unser Kriterium der technischen Verfügbarkeit nicht. Die noch notwendigen F&E Arbeiten würden den Rahmen dieses Projekts sprengen.

e) Aufbau der Windturbinen auf durchbrochenen Masten (Gittermasten)

Ein Gittermast ist weitgehend durchlässig für den Wind. Dadurch entfällt die Hauptanregung der Turmschwingungen durch die Abschattung des Turms vom Druck des Winds beim Durchgang eines Rotors vor dem Turm.

Zunächst hat uns allerdings die Frage interessiert, ob dich ein Gittermast von einem Rundturm in Bezug auf die Übertragung von Schwingungen in den Untergrund unterscheidet, denn ein Gittermast ist auf vier relativ tiefen Punktfundamenten aufgebaut, während ein Rundturm auf einem flachen Tellerfundament steht. Die Firma Baudynamik Heiland & Mistler GmbH hat in unserem Auftrag eine Studie hierzu durchgeführt. Die Studie hat gezeigt, dass zwar die Größe der Fundamente (Durchmesser des Tellerfundaments bzw. Abstand der Punktfundamente zueinander) einen gewissen Einfluss auf die Emissionen in den Untergrund hat, sich aber Punktfundamente und Tellerfundament sich nur unwesentlich in der Emission unterscheiden, so lange die Frequenzen nicht so hoch werden, dass die Wellenlängen unterhalb der Dimensionen der Fundamente zu liegen kommen. Diese Grenze liegt allerdings oberhalb des anvisierten Frequenzbereichs von 2 Hz bis 10 Hz.

Zurückkommend auf den Einsatz von Gittermasten, zeigte sich schon zu Beginn der Studie, dass kein Anbieter von WEA auf Stahlgittermasten mehr im Markt hist. 2006 war im brandenburgischen Laasow mit 160 m Turmhöhe die damals höchste WEA in Deutschland von der Firma Fuhrländer auf einem Stahlgittermast errichtet worden. Aber die Firma Fuhrländer stellt keine WEA mehr her. Andere Anbieter konnten wir nicht finden, so dass dieser Ansatz nach einer Sackgasse aussah.

Schließlich konnten wir die Firma Hasslacher Green Towers als neuen Anbieter von Gittermasten identifizieren, die aktuell versucht, sich im Markt der WEA zu etablieren. Die Gittermasten von Hasslacher sind allerdings nicht aus Stahl gebaut, sondern aus Holz. Dies hätte zwei zusätzliche Vorteile in Bezug auf das Schwingungsverhalten der Türme.

Die Dämpfung von Holz ist erheblich höher als von Stahl, was die Amplitude der Turmschwingungen reduzieren sollte. Der Effekt an sich, wurde von Hasslacher bereits vor diesem Projekt an einer kleineren Anlage auf einem Holzturm bei Hannover im Vergleich zu einer ähnlichen Anlage auf einem Stahlturm nachgewiesen. Bei einem Notstopp des Rotors werden massiv Turmschwingungen angeregt, deren Abklingen man nach dem Stopp mittels Beschleunigungssensoren im Turm vermessen kann. Es zeigt sich, dass die Schwingungen des Holzturms mehr als eine Größenordnung schneller abklingen als beim Stahlturm.

Ferner hat Holz eine geringere Elastizität, so dass sich die Eigenfrequenzen der Turmschwingungen nach unten verschieben, größtenteils in einen Bereich, wo sie das Einstein-Teleskop nicht mehr stören würden, und wo auch andere empfindliche Instrumente weniger betroffen wären. Die Firma Hasslacher hat in privater Kommunikation diese Vermutung bestätigt. Wegen mangelnder Kapazitäten war die Firma Hasslacher leider nicht bereit, eine Studie über die Emission seismischer Wellen von ihren Türmen durchzuführen. Die Durchführung einer Studie ohne Beteiligung von Hasslacher erschien uns nicht zielführend, so dass dieser Ansatz leider unvollendet bleiben wird.

Uns erscheint es am sinnvollsten die Markteinführung eines solchen Holzturms abzuwarten und dann statt einer Studie Messungen an den ersten erbauten Anlagen durchzuführen. Die Firma Hasslacher hat Kooperationsbereitschaft angedeutet.

Zusammenfassung

- Vergrößerung des Fundaments: Durch eine Verdopplung des Fundaments lassen sich die Amplituden der Turmschwingungen im gesamten relevanten Frequenzbereich um 60% bis 70% verringern. Die Mehrkosten liegen bei 3% bis 5% der Kosten einer WEA. Allerdings muss diese Maßnahme bereits beim Bau der WEA umgesetzt werden.
- Pitch-Regelung: Es stellt sich heraus, dass eine Reduktion der Schwingungen des Turms durch eine Optimierung der Pitch-Regelung zwar für Frequenzen bis etwa 1 Hz möglich ist, nicht aber im hier relevanten Frequenzbereich von 2 Hz bis 10 Hz.
- Passive Schwingungsdämpfer: Sie haben sich als wirksame Methode zur Reduktion der Turmschwingungen um 80% bis 90% in der Amplitude herausgestellt, bei Kosten im Prozentbereich einer WEA. Eine Nachrüstung der WEA im Betrieb ist möglich. Allerdings ist zu beachten, dass ein passiver Schwingungsdämpfer jeweils nur eine Eigenfrequenz des Turms dämpft.
- Aktive Schwingungsdämpfung: Sie erscheint als interessanter Lösungsansatz, allerdings besteht noch ein erheblicher Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die im Rahmen dieses Projekts nicht durchgeführt werden konnten, bevor eine abschließende Bewertung dieses Ansatzes möglich wird.
- Gittermasten: Insbesondere der Einsatz von Holzgittermasten erscheint als vielversprechende Methode zur Reduktion der Turmschwingungen. Allerdings war aufgrund der Marktlage die Durchführung der notwendigen Studie in Rahmen dieses Projekts nicht möglich.

Zusammenfassung der Projektergebnisse

Katalog von Erschütterungsleistungen

Die Reihenuntersuchungen an bestehenden WEA unterschiedlicher Bauart haben sich als komplexer dargestellt als angedacht. Eine statistisch auswertbare Datenbasis für verschiedene Hersteller, Leistungsklassen, Gründungen (Fundamente), Turmhöhen und Turmkonstruktionen und verschiedene geologische Gegebenheiten würde hunderte von Bestimmungen der Erschütterungsleistung erfordern. Im Projekt konnte hier nur ein Anfang gemacht werden. Diese Datenbasis ist kontinuierlich mit Praxisergebnissen aufzufüllen, um dann gegebenenfalls Grundlage für Prognosen werden zu können.

Die Linienmessungen an WEA mit Leistungen größer 4 MW haben belastbare b-Werte ergeben, die jedoch lokal ebenfalls variieren, da Anlagentypen, Anzahl der WEA, geologischer Untergrund und

Ankopplung WEA-Boden viele Beeinflussungsgrößen darstellen. Laterale Variationen im Untergrund können zudem unerwartete Bodenbewegungsamplituden hervorrufen.

Ausbreitung der Erschütterungen, Abklingkurven

Alle erreichbaren Daten zur Ausbreitung von Bodenerschütterungen im Umfeld von Windenergieanlagen und Windparks haben ergeben, dass diese Daten außerordentlich stark streuen. Zur Ergänzung wurden daher Daten von lokalen Erdbeben und Steinbruchsprengungen mit herangezogen. Zur Aufbereitung der Daten wurden parallel zwei Wege verfolgt: Bestimmung der mathematischen Beschreibung der Abklingkurven durch b-Werte und die mehr physikalisch begründete Beschreibung durch geometrisches Abklingen und Dämpfung (einschließlich Streuung) durch Dämpfungs-Werte (Q). Für die Q-Werte wurde eine Verbreitung in NRW erarbeitet. Dabei wurden sowohl lokale Beben als auch Steinbruchsprengungen genutzt, und damit unterschiedliche Tiefen betrachtet. Inwieweit diese Ergebnisse bei der Prognose in zukünftigen Einzelfällen eine Rolle spielen können, muss sich noch zeigen.

Digitale Signalbearbeitung

Im Vordergrund möglicher Signalbearbeitung standen KI-basieret sogenannte Denoiser. Diese haben sich in der Praxis insofern bewährt, dass sie die Detektion kleiner seismischer Ereignisse deutlich verbessert haben. Unsicherheiten traten dagegen bei den Magnitudenbestimmungen auf. Hier führten die mit dem Denoiser gefilterten Daten zu abweichenden Ergebnissen als die Auswertung der unbearbeiteten Signale, weil der Denoiser die Wellenformen deformiert. Aus diesem Grund werden die Originaldaten auch künftig die maßgebliche Grundlage für seismologische Auswertungen bleiben. Vor diesem Hintergrund ist nicht zu erwarten, dass der Verweis auf eine Denoising-Bearbeitung bei der Bewertung der Erschütterungseinwirkungen auf seismologische Stationen eine wesentliche Rolle spielen wird.

Fortschreibung des Prognosetools

Es konnten erstmals Messlinien zur Erschütterungsmessung an WEA mit mindestens 4 MW Leistung durchführt und ausgewertet werden. Die Ergebnisse von acht Messungen sind sehr heterogen, da die Bodenbewegungsamplituden stark von sehr lokalen Heterogenitäten im Untergrund sowie bei kleinen Frequenzen (<5 Hz) von den Nahfeldtermen der anregenden Quelle beeinflusst werden. Eine starke Zunahme der Bodenbewegungsamplituden mit zunehmender Leistung der WEA (z.B. 4 – 6 MW) konnte nicht eindeutig gefunden werden, da zu viele Parameter die Emissionsamplituden beeinflussen: Anlagentyp (Leistung, Design und Fundament der WEA), Untergrund, umliegende Störquellen inkl. benachbarter WEA. Daher werden derzeit keine großen Ausweitungen der Abstandsradien empfohlen, da zudem die Dämpfung hierbei keine große Rolle spielt (<5 Hz). Eine genauere Empfehlungsanweisung kann erst nach einer externen Begutachtung (peer-review im Rahmen einer Veröffentlichung) formuliert werden.

Technische Maßnahmen an den WEA

Im Projekt konnten technische Maßnahmen zur Minderung der Erschütterungsemissionen von WEA nur theoretisch untersuchet werden (Simulationen). Die Ergebnisse zeigen, dass technische Maßnahmen zur Reduzierung von Schwingungen unter den getroffenen Randbedingungen

erfolgversprechender sind als Prognosen auf Grundlage von *Q*-Werten. Dies gilt insbesondere unter der Annahme, dass die Maßnahmen die Gesamtkosten um höchstens 10% erhöhen dürfen. Als besonders vielversprechend haben sich größere Fundamente, der Einsatz passiver Schwingungsdämpfer sowie gegebenenfalls Gittertürme erwiesen.

Ob und in welchem Umfang diese Möglichkeiten künftig bei der Kompromissfindung zwischen Anlagenplanern und den Betreibern seismologischer Stationen Berücksichtigung finden, wird sich erst in der praktischen Umsetzung zeigen. Erst die Realisierung konkreter Projekte wird belastbar belegen können, welche Maßnahmen technisch, wirtschaftlich und im jeweiligen Einzelfall tatsächlich geeignet sind.

Literatur

Abreu Rafael, Christine Thomas, Daniel Peter (2022), Reduction of windturbine generated seismic noise with structural measures, European Academy of Wind Energy - Wind Energy Science, https://doi.org/10.5194/wes-7-1227-2022

Abreu, Rafael und Christine Thomas (aufgerufen 2026), Einfluss von Windparks auf Bodenschwingungen, Fachagentur Windenergie, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Seismologische_Netze/FA_Wind_Hintergrundpapier_Windparks_Bodenschwingungen_12-2021.pdf

Abreu, Rafael und Christine Thomas (aufgerufen 2026), Minderung seismischer Wellen von Windenergieanlagen-Strukturelle Maßnahmen auf dem Wellenweg, Fachagentur Windenergie, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Seismologische_Netze/FA_Wind_Hintergrundpapier_Minderung_seismischer_Wellen_12-2021.pdf

Aki, K. (1980), Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 21: 50–60, (1980).

Bensberg Seismological Observatory (University of Colone), seismic network data and quarry blast catalog.

Anderson, D. L. and Minster, J. B. (1097), The frequency dependence of Q in the Earth and implications for mantle rheology and Chandler wobble, Geophysical Journal International, Volume 58, Issue 2, August 1979, Pages 431–440, DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1979.tb01033.x

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

Bormann, P., et al. (2012). Seismic Wave Propagation and Earth Models. In: Bormann, P. (Ed.), *NMSOP-2*. GFZ, S. 1–105. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch2

Bormann, P., Wylegalla, K. and Klinge, K. (1997). Analysis of broadband seismic noise at the German Regional Seismic Network and search for improved alternative station sites. Journal of Seismology 1:

357–380, 1997.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (Hrsg.): Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m (DGM200), Stand: 31.12.2019. Frankfurt am Main: Geodatenzentrum (GDZ). URL: https://gdz.bkg.bund.de/ [21.11.2024]

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (Hrsg.): *Digitales Geländemodell Gitterweite 1000 m (DGM1000)*, Stand: 31.12.2019. Frankfurt am Main: Geodatenzentrum (GDZ). URL: https://gdz.bkg.bund.de/ [21.11.2024]

Brocher, T. M. (2005). Compressional and shear wave velocity versus depth in the San Francisco Bay Area, California: Rules for USGS Bay Area Velocity Model 05.0.0 (Open-File Report 2005-1317). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr20051317

De Siena, L., Thomas, C., and Aster, R. (2014) Multi-scale reasonable attenuation tomography analysis (MuRAT): An imaging algorithm designed for volcanic regions. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 277:22-35. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2014.03.009

DIN 4150-1:2001-06 (2001). Erschütterungen im Bauwesen. Beuth-Verlag. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-4150-1/34299674

Didier, F.; Liu, Y.-C.; Laghrouche, S.; Depernet, D. (2024) A Comprehensive Review on Advanced Control Methods for Floating Offshore Wind Turbine Systems above the Rated Wind Speed. Energies, 17, 2257. https://doi.org/10.3390/en17102257

DMT - Fachstelle für Erschütterungsmessungen, GEE3-2016-825 Teilbericht Arbeitspaket 1 Datum Seite 21.12.2017, 104/134 noise radiated by a wind turbine. Soil Dyn Earthq Eng 99:108–123

Energie-Atlas Baye (aufgerufen 2016) Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung, www.energieatlas.bayern.de

FA Wind an Land Hintergrundpapier (2021), Richtlinie zur Ermittlung der Erschütterungsleistung bzw. des Erschütterungsleistungspegels einer Windenergieanlage, https://ww.fachagentur-windenergie.de/themen/seismologische-stationen/

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

Gao, L., Pan, Y., Tian, G. et al. (2018) Estimating Q Factor from Multi-mode Shallow-Seismic Surface Waves. Pure Appl. Geophys. 175(6), DOI: 10.1007/s00024-018-1828-7

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

Gaßner, L. and Ritter, J.R.R. (2023a) Wind turbine emissions – ground motion observations, acoustic coupling, and attenuation relationships. Solid Earth, 14, 785–803, https://doi.org/10.5194/se-14-785-2023

Gaßner, L., Gärtner, M. and Ritter, J.R.R. (2023b) Simulation of ground motion emissions from wind turbines in low mountain ranges: implications for amplitude decay prediction. J. Seismology, 27, 933–952, https://doi.org/10.1007/s10950-023-10172-6.

Geologischen Dienst NRW (aufgerufen 2026), Bericht 2025/1, https://www.gd.nrw.de/zip/gd_gdreport_2501s.pdf

Heuel, J. (2024). *Deep Learning for Improving the Reliability and Efficiency of Seismic Data Analysis* [Dissertation, Ruhr-Universität Bochum].

Heuel Janis, Prof. Wolfgang Friederich, Tobias Neuffer, Horst Rüter (aufgerufen 2026), Filtermethoden an Erdbebenmessstationen, Fachagentur Windenergie, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Seismologische_Netze/FA_Wind_Hintergrundpapier_Filtermethoden_2-2022.pdf

Lerbs, N., Korn, M. (2020), Definition von Schutzradien um seismologische Messeinrichtungen bei der Errichtung von Windkraftanlagen, Schriftenreihe des LfULG, Heft 13/2020|2 https://www.gd.nrw.de/pr_kd_geologische-karte-50000.php

Limberger, F., Lindenfeld, M., Deckert, H., and Rümpker, G. (2021): Seismic radiation from wind turbines: observations and analytical modeling of frequency-dependent amplitude decays. Solid Earth, 12, 1851–1864, doi:10.5194/se-12-1851-2021

MISS - Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen : Sachbericht zum Projekt (Deutsch), HarbourDom Geophysikalische Forschungs- und Beratungsgesellschaft / Baudynamik Heiland & Mistler / DMT GmbH & Co. KG / Ruhr-Universität Bochum / Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2021

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

Nagel, S., Zieger, T., Luhmann, B., Knödel, P., Ritter, J. and Ummenhofer, T., (2019). Erschütterungsemissionen von Windenergieanlagen, Stahlbau, 88, 559-573. DOI: https://doi.org/10.1002/stab.201900039

Neuffer, T. (2020). Microseismic Noise Induced by Wind Turbines. PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum.

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

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

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

Neuffer, Tobias, Simon Kremers, Horst Rüter (2021), Windenergieanlagen und seismologische

Netze - Beeinflussung der Performance seismologischer Netze durch Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen, Fachagentur Windenergie, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Seismologische_Netze/FA_Wind_Hintergrundpapier_Seismologische_Netze_07-2021.pdf

Neuffer, Thobias, Simon Kremers, Philipp Meckbach, Michael Mistler (aufgerufen 2026), Characterization of the seismic wave field radiated by a wind turbine, Journal of Seismology, 2020, https://doi.org/10.1007/s10950-021-10003-6

Neuffer, Thobias, Simon Kremers, Ralf Fritschen (aufgerufen 2026), Characterization of seismic signals induced by the operation of wind turbines in North Rhine-Westphalia (NRW), Germany, Journal of Seismology, 2019, https://doi.org/10.1007/s10950-019-09866-7

Olsen, K. B., Day, S. M., & Bradley, C. R. (2003). Estimation of Q for Long-Period (>2 sec) Waves in the Los Angeles Basin. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(2), 627–638. doi.org

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

Rische, Martina, Kasper D. Fischer, and Wolfgang Friederich (2022). "FloodRisk–Induced seismicity by mine flooding–Observation, characterisation and relation to mine water rise in the eastern Ruhr area (Germany)." Journal of Applied & Regional Geology/Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (ZDGG) 173.4.

Ruhr University Bochum (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

Rüter, Horst (aufgerufen 2026),, Erschütterungsleistung einer Windenergieanlage - Vorschlag zur messtechnischen Erfassung dieser Kenngröße, Fachagentur Windenergie, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Seismologische_Netze/FA_Wind_Hintergrundpapier_Erschuetterungsleistung_07-2021.pdf

Rüter, Horst, Tobias Neuffer, Simon Kremers (aufgerufen 2026), Erschütterungsimmissionen von Windenergieanlagen, Fachagentur Windenergie, https://www.fachagentur-wind-solar.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Wind/Seismologische_Netze/FA_Wind_Hintergrundpapier_Erschuetterungsleistung_07-2021.pdf

Sato, H. (1989). Broadening of seismogram envelopes in the randomly inhomogeneous lithosphere based on the parabolic approximation: Southeastern Honshu, Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B12), 17735-17747. DOI: https://doi.org/10.1029/JB094iB12p17735

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

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

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

Taborda, R. (2015). Evaluation of Attenuation Models (Q-Vs Relationships) used in Physics-Based Ground-Motion Earthquake Simulation through Validation with Data and Comparisons with NGA (SCEC Annual Report, Project No. 14022). Southern California Earthquake Center. https://central.scec.org/proposal/report/14022

Udías, A. (1999). Anelasticity and anisotropy. In: Principles of Seismology. Cambridge University Press., S. 253–273

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

WINSENT (aufgerufen 2026): https://www.zsw-bw.de/forschung/systemanalyse/themen/windenergie-forschung.html

Wolfgang Friederich, Kasper David Fischer, Martina Rische, Christoph Hilgers, & Ruhr University Bochum. (2020). FloodRisk Seismic Network [Data set]. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR, Germany). https://doi.org/10.7914/SN/YD_2020

Woollam, J., Münchmeyer, J., Tilmann, F., Rietbrock, A., Lange, D., Bornstein, T., Diehl, T., Giunchi, C., Haslinger, F., Jozinović, D., Michelini, A., Saul, J., Soto, H. (2022), SeisBench - A Toolbox for Machine Learning in Seismology. Seismological Research Letters 2022; 93 (3): 1695–1709, DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00786

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

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

Zieger, T. and Ritter, J.R.R. (2017) Influence of wind turbines on seismic stations in the upper rhine graben, SW Germany. Journal of Seismology 22(1): 105 – 122, DOI: 10.1007/s10950-017-9694-9.