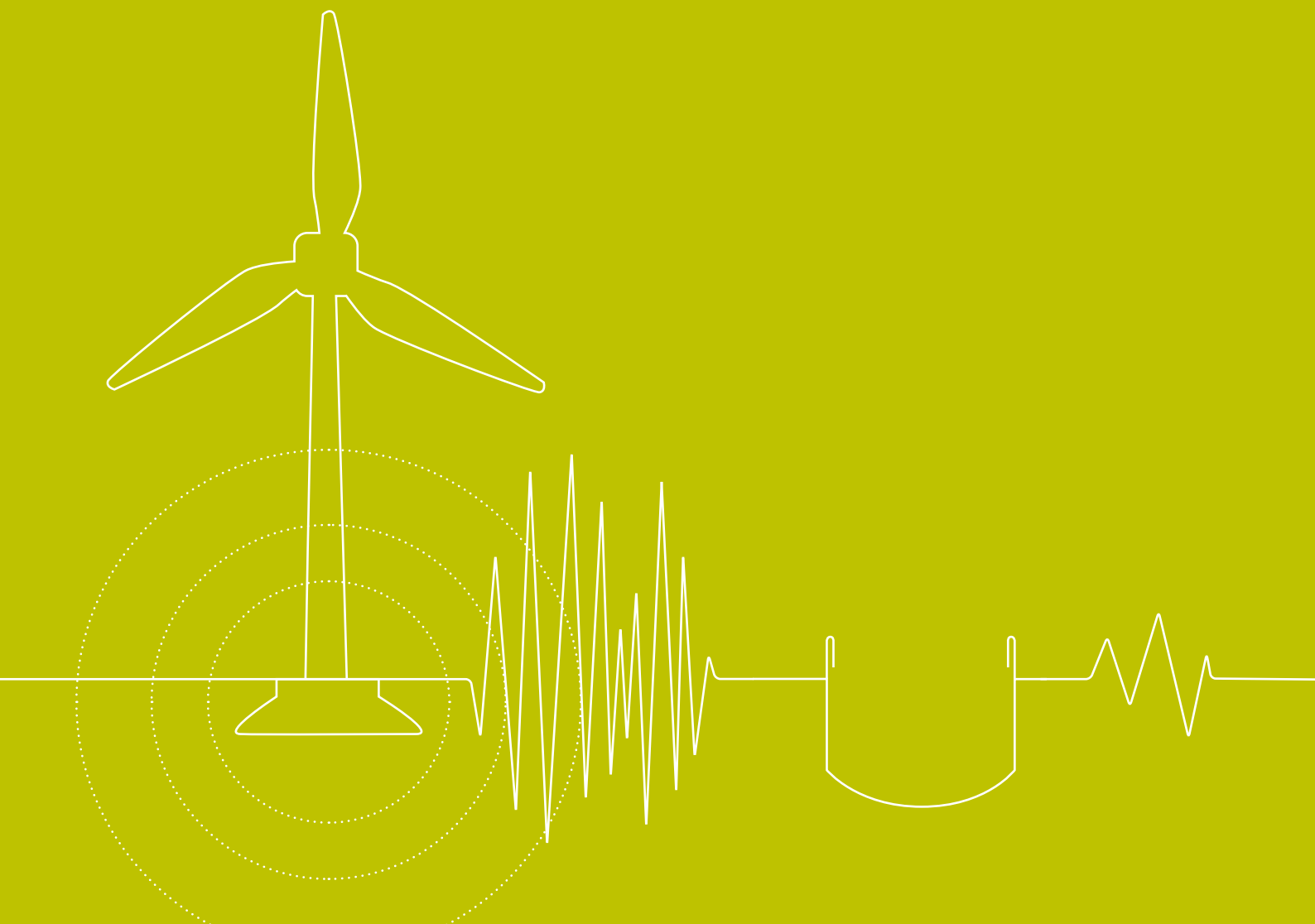
FACHAGENTUR
WINDENERGIE AN LAND

HINTERGRUNDPAPIER

Minderung seismischer Wellen von Windenergie-anlagen

Strukturelle Maßnahmen auf dem Wellenweg



Minderung seismischer Wellen von Windenergie-anlagen

Strukturelle Maßnahmen auf dem Wellenweg

Rafael Abreu und Prof. Dr. Christine Thomas (Universität Münster)

Herausgegeben von der Fachagentur Windenergie an Land e. V.

Gefördert durch:

EFRE.NRW Investitionen in Wachstum und Beschäftigung

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

Leitmarkt Agentur.NRW

EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 4

Zusammenfassung 5

1 Einführung 6

2 Numerische Experimente 7
- 2.1 Kreuzförmige bauliche Einbauten 7
- 2.2 Halbkreisförmige Gräben 9
- 2.3 Halbkreisförmige Gräben mit realistischer Quellfunktion der Erschütterungen 12
- 2.4 Einfluss der Topographie auf die Ausbreitung der Erschütterungen 14

Abkürzungsverzeichnis 20

Danksagung 21

Literatur- und Quellenverzeichnis 22

Impressum 23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: a) Numerischer Aufbau für den vorgeschlagenen seismischen Schutzschild um Gebäude unter Verwendung von Metamaterialien; b) Kreuzartige Hohlraum-Einheitszelle als Teil der Metamaterialien 7

Abbildung 2: Netzbeispiele der Metamaterialien, bestehend aus kreuzförmigen Einheitszellen, die für die verschiedenen numerischen Simulationen verwendet wurden. 8

Abbildung 3: Simulationsergebnisse für die kreuzförmigen Metamaterialien für eine 5 Hz Quelle.. 9

Abbildung 4: Netzbeispiele von Modellen mit kreisförmigen Gräben unterschiedlicher Breite und Tiefe, die leer oder mit Wasser gefüllt sind 10

Abbildung 5: Darstellung der vertikalen Komponente der seismischen Registrierung für die Simulationsergebnisse der leeren Gräben unter Verwendung einer bei 5 Hz zentrierten Ricker-Quellzeitfunktion.....11

Abbildung 6: Darstellung der vertikalen Komponente der seismischen Registrierungen für die Simulationsergebnisse der mit Wasser gefüllten Gräben unter Verwendung einer bei 5 Hz zentrierten Ricker-Quellzeitfunktion.....12

Abbildung 7: Netzbeispiel der acht großformatigen Modelle, die mit leeren Gräben unterschiedlicher Breite und Tiefe erstellt wurden.....13

Abbildung 8: Simulationsergebnisse für die Ausbreitung des seismischen Rauschens mit kreisförmigen Gräben unterschiedlicher Abmessungen 14

Abbildung 9: a) Netzbeispiele von Modellen mit topographischen Variationen von 33,5 m, 67 m, 100 m, 153 m und 200 m; b) Für jedes topographische Modell wird eine Zunahme der P- und S-Geschwindigkeit mit der Tiefe angenommen und eine zusätzliche Geschwindigkeitsstörung in der topographischen Höhe berücksichtigt (hier eine Hochgeschwindigkeitszone). c) und d) zwei verschiedene Modelle mit komplexeren Topographien.....15

Abbildung 10: Simulationsergebnisse für die Ausbreitung des seismischen Rauschens bei topographischen Variationen 15

Abbildung 11: Wie Abbildung 10, jedoch für die Quelle auf dem höchsten Punkt des Hügels 16

Abbildung 12: Wie Abbildung 11, aber für komplexere Topographien (Abbildung 9c und d) 16

Abbildung 13: Wie Abbildung 11, aber für langsame seismische Geschwindigkeiten mit einer zufälligen Streuverteilung innerhalb der Topographie 17

Abbildung 14: Wie Abbildung 11, jedoch ist die Geschwindigkeit gleichmäßig die der obersten Schicht im Modell und die Streuer sind zufällig in der Topographie verteilt 17

Abbildung 15: Wie Abbildung 12, aber mit einer schnellen Geschwindigkeit in der Topographie und einer zufälligen Streuverteilung.....18

Zusammenfassung

Das seismische Rauschen, welches von Windenergieanlagen (WEA) ausgeht und an seismischen Stationen aufgezeichnet wird, kann ein Problem für die Nutzung dieser Stationen werden. Daher werden neue Wege gesucht, das von WEA ausgehende seismische Rauschen zu verringern. Die Minderung von seismischem Rauschen ist heute ein aktives Forschungsgebiet. Dies zeigt der jüngste Anstieg der Anzahl von Studien, die eine Nutzung von Metamaterialien für die Minderung von seismischen Wellen vorschlagen.[1] Motiviert durch das Studium von Colombi et al.[2] wurden für diese Untersuchungen Metamaterialien in numerische Modelle eingebaut und getestet, wie diese die Ausbreitung der von WEA ausgehenden Bodenwellen beeinflussen. Ziel war, die beste Lösung für eine Abschwächung des Wellenfeldes durch bauliche Maßnahmen zu finden. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 39 verschiedene komplexe numerische Netze erstellt, verteilt auf vier verschiedene Szenarien. Die in der Literatur[3] beschriebenen Metamaterialien (kreuzförmige Einheitszellen) sind aufgrund ihrer Komplexität und Größe nicht geeignet, das Rauschen in dem von den WEA angeregten Frequenzbereich von 1 bis 10 Hz zu unterdrücken.

Zur Vereinfachung und um Baukosten zu reduzieren, wurden halbkreisförmige Gräben 10 m vor der Quelle eingebaut, welche den Frequenzbereich von 1 - 10 Hz beeinflussen. Hierbei zeigt sich, dass die Gräben als Blockade für die seismische Energie wirken, wenn sie mit Luft gefüllt sind. Andere Materialien erhöhen die Energie in vielen Fällen durch das Überlagern von Multiplen von den Grenzflächen der baulichen Maßnahme. Daher ist das Füllen der Gräben nicht sinnvoll. Generell lässt sich sagen, dass tiefere, leere Gräben die Energie am effektivsten verringern. Die Breite der Gräben spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle.

Die numerischen Simulationen zeigen einen Einfluss der Topographie auf die Ausbreitung der von WEA ausgehenden Wellen. Stehen WEA auf einer Erhöhung oder befindet sich diese auf dem Wellenweg, kann dies das an seismologischen Stationen aufgezeichnete Rauschen mildern, wobei die Höhe der Erhebung ausschlaggebend ist. Die Abmilderung des Rauschens tritt vor allem bei komplexeren Topographien sowie bei Erhebungen auf, die mit einem streuenden Material gefüllt sind, welches höhere seismische Geschwindigkeiten aufweist. Das Beispiel des Energiebergs in Karlsruhe[4] zeigt, dass diese mit Müll gefüllte Erhebung (als eine Form von Metamaterialien) die Energie der von den WEA ausgehenden Wellen effektiv abmildert.

Der Einfluss der Geologie konnte in den hier vorgestellten Modellen nicht untersucht werden. Da sich bei gemessenen Daten zeigt, dass die Wellenausbreitung stark von der Geologie abhängt, sollten sich zukünftige Untersuchungen dieses Themas annehmen.

[1] Colombi et al., (2016a), (2016b), (2020); Palermo et al. (2016); Zeighami et al., (2021).

[2] Colombi et al. (2016a).

[3] Miniaci et al. (2016).

[4] Ritter (2020).

1 Einführung

Durch die Eigenschwingungen von Windenergieanlagen (WEA) werden Bodenbewegungen über das Fundament in den Erdboden übertragen. Diese Bodenbewegungen laufen als seismische Wellen durch die Erdkruste und werden von Seismometern an Erdbebenmessstationen registriert. Die Frequenzen der seismischen Wellen liegen im Bereich von 1 - 10 Hz, einem Frequenzbereich, in dem auch Erdbeben und andere seismische Registrierungen liegen. Um die seismologischen Stationen in ihrer Funktion nicht einzuschränken, wird angestrebt, den Einfluss ungewollter Signalanteile in diesen Messungen (als Rauschen bezeichnet) möglichst niedrig zu halten.

Im Rahmen des Forschungsprojektes MISS (Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen) wurden numerische Untersuchungen zur Wirkung baulicher Maßnahmen auf die Ausbreitung der von WEA ausgehenden seismischen Wellen durchgeführt. In der Literatur wurden Möglichkeiten zum Schutz von Gebäuden vor Erbebenwellen mit Hilfe von sogenannten Metamaterialien aufgezeigt. Diese fangen Schwingungen im Vorfeld von zu schützenden Gebäuden ab. Hier wird das umgekehrte Szenario betrachtet: Die Quelle des seismischen Rauschens, also die WEA, wird isoliert und damit soll die Wellenausbreitung gemindert werden.

In einem numerischen Experiment wurden bauliche Strukturen in ein homogenes Untergrundmodell eingebaut. Mittels 3D Wellenfeldsimulation wurde die Wellenausbreitung untersucht. Zu den baulichen Strukturen gehören in diesem Fall in der Literatur beschriebene Metamaterialien[5] und vereinfachte Maßnahmen, wie z. B. halbkreisförmige Gräben.

Die Wellenausbreitung wurde berechnet und die Wellen wurden an einem Array[6] von seismischen Stationen analysiert. Dabei wurden vor allem die Amplitude und das Frequenzverhalten der Wellen untersucht, um zu verstehen, welche Maßnahmen zu einer Reduktion des Wellenfeldes führen. Das Modell ist auf einen homogenen Untergrund mit tiefenabhängig zunehmender Geschwindigkeit limitiert. Eine Abhängigkeit der Wellen von unterschiedlicher lateraler Geologie kann daher nicht betrachtet werden.

[5] z. B. Miniaci et al., (2016).

[6] Eine Anordnung von mehreren Seismometern.

2 Numerische Experimente

Um die Auswirkung einer WEA auf seismologische Stationen abzuschwächen, wurden numerische 3D-Simulationen der Ausbreitung elastischer Wellen mit dem frei verfügbaren Code specfem3d-cartesian[7] durchgeführt. Der Code verwendet die Spektralelementmethode, um die elastischen/akustischen 3D-Bewegungsgleichungen im Zeitbereich aufzulösen. Das Berücksichtigen der korrekten geometrischen Ausbreitung der Wellenformen in den 3D-Modellen ermöglichte die hier wesentlichen Oberflächenwellen vollständig zu modellieren. Für jedes Modell wurde ein komplexes hexaedrisches Netz generiert. Dieser Vernetzungsprozess ist ein kritischer Schritt im Modellierungsverfahren, dem besondere Aufmerksamkeit zu widmen war, denn ein gutes numerisches Netz garantiert die gute Konvergenz der numerischen Methode. Mit Hilfe verschiedener Szenarien wurde versucht, den effizientesten Weg zur Minderung des seismischen WEA-Rauschens durch bauliche Maßnahmen auf dem Wellenpfad zu ermitteln. Dieses Vorgehen ist in den nächsten Abschnitten dargestellt.

2.1 Kreuzförmige bauliche Einbauten

Zunächst wurden kreuzförmige Metamaterialien, wie sie in der Literatur beschrieben sind[8] und in Abbildung 1 gezeigt werden, betrachtet. Die vorgeschlagenen kreuzförmig geformten, leeren Einheitszellen haben die Abmessungen a = 10 m, b = 9 m, c = 2,5 m und H = 10 m (siehe Abbildung 1b). Für diese werden mehrere Frequenzbandlücken zwischen 2 Hz und 6 Hz vorausgesagt,[9] d. h. in dem Frequenzbereich, bei dem starke Frequenzspitzen durch WEA erzeugt werden[10]. Ausgehend von den Literaturangaben wurde getestet, welche Anzahl der einzelnen Einheitszellen sowie welche Anordnung erforderlich ist, um die gewünschte Frequenzbandlücke zu erhalten. Für die in Abbildung 1 dargestellten Anordnungen wurde aufgezeigt, dass mit diesen Gebäude vor dem Einfluss seismischer Wellen geschützt werden können.[11] Untersucht wurde die Möglichkeit, diese Materialien einzusetzen, um das von der WEA ausgesendete Rauschen an der Quelle abzufangen, so dass das restliche seismische Wellenfeld an der Messstation unbeeinflusst bleibt.

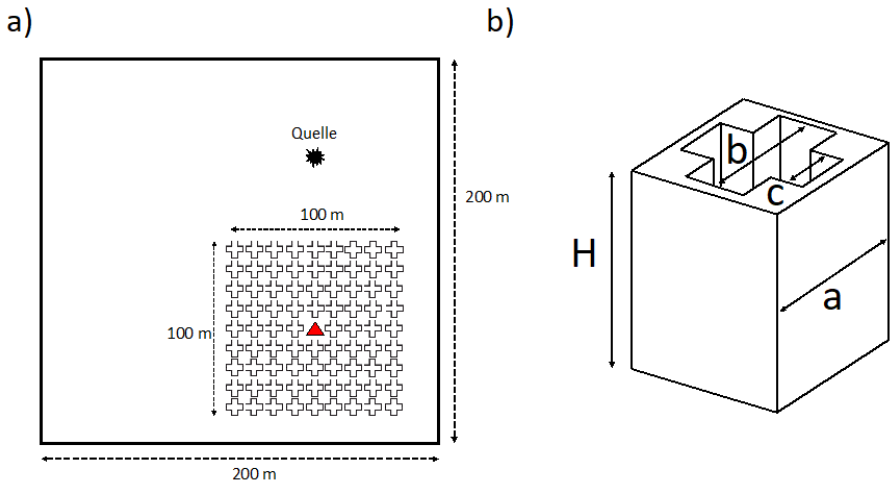


Abbildung 1: a) Numerischer Aufbau für den vorgeschlagenen seismischen Schutzschild um Gebäude unter Verwendung von Metamaterialien (hier als kreuzförmige Einheitszellen mit einer Ausdehnung von 100 m mal 100 m); nach Miniaci et al. (2016); b) Kreuzartige Hohlraum-Einheitszelle als Teil der Metamaterialien in a); H: Höhe, b und c: Abmessungen an der Oberfläche und a: Breite der Einheitszelle

[7] Komatitsch, Tromp (1999).

[8] Miniaci et al. (2016).

[9] Kittel et al. (1996).

[10] Neuffer (2020).

[11] Miniaci et al. (2016).

Obwohl die in Abbildung 1 dargestellte Anordnung für diese Zwecke zu extrem ist, konnten die Auswirkungen der Metamaterialien auf die Wellenausbreitung durch das Ändern der Anzahl der Einheitszellen und ihrer Anordnung aufgezeigt werden. Ziel war dabei, die Anzahl der Einheitszellen möglichst niedrig zu halten, was die Kosten und die benötigte Fläche um die WEA beeinflusst. Getestet wurden zwölf verschiedene numerische Modelle, die durch unterschiedliche Anordnungen einzelner kreuzförmiger Einheitszellen gebildet werden (siehe Abbildung 2). Jedes Modell wurde mit einer Anordnung von 5 × 5 kreuzförmigen Einheitszellen mit den in Abbildung 1b dargestellten Abmessungen betrachtet. Erstellt wurden auch Modelle, in denen die eingebauten kreuzförmigen Einheitszellen gegeneinander verschoben sind (siehe Abbildung 2b und d). In zwei weiteren Modellen wurde die Verteilung kreuzförmiger Einheitszellen halbkreisförmig um die WEA angeordnet (siehe Abbildung 2e und f). Die Gesamtabmessungen der Modelle betragen 800 × 800 × 400 m (L/B/T). Die seismische Energie wurde in einem Frequenzbereich zwischen 1 und 10 Hz mit einem bei 5 Hz zentrierten Ricker-Wavelet[12] als Quellzeitfunktion eingestellt. Ein Ricker-Wavelet ist ein in der Exploration genutztes, einfaches Eingangssignal, dessen Eigenschaften gut bekannt sind. Die Randbedingungen wurden als absorbierend festgelegt und am oberen Rand die freie Oberfläche generiert. Die seismische P- und S-Wellengeschwindigkeit[13] nimmt mit der Tiefe zu (v_p = 1.500 – 3.200 m/s und 1,7 v_s = v_p, mit einer konstanten Dichte von ρ = 2.300 kg/m³).

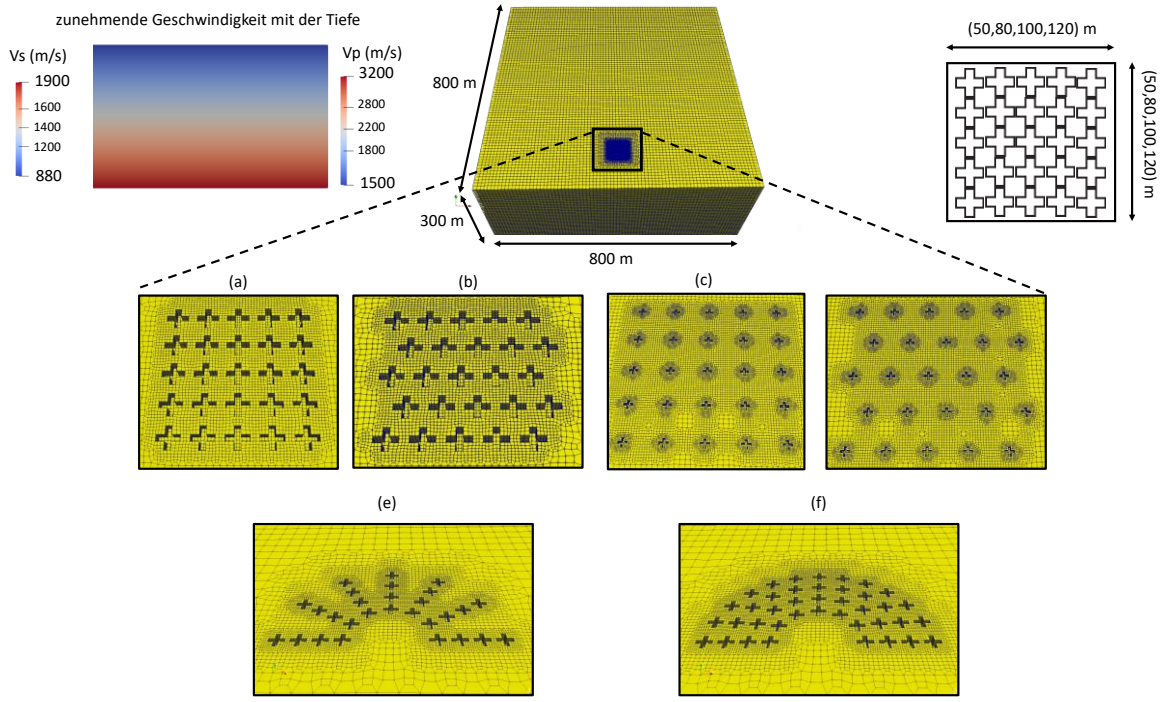


Abbildung 2: Netzbeispiele der Metamaterialien, bestehend aus kreuzförmigen Einheitszellen, die für die verschiedenen numerischen Simulationen verwendet wurden. a) Gitter aus 5 × 5 Einheitszellen, verteilt auf einer Fläche von 50 m × 50 m. b) Wie a), jedoch mit zwei verschobenen Linien von Metamaterialien. c) Wie a), jedoch auf einer Fläche von 150 m × 150 m verteilt. d) Wie c), jedoch mit zwei verschobenen Linien von Metamaterialien. e) und f) halbkreisförmig angeordnete, kreuzförmige Metamaterialien

Die Ergebnisse für das seismische Wellenfeld, registriert auf der vertikalen Komponente eines Seismometers, sind in Abbildung 3 dargestellt. Zu beobachten ist, dass für die genutzte seismische Quelle mit einer dominanten Frequenz von 5 Hz keines der Modelle die seismische Energie abschwächt. Im Gegenteil erhöht sie sich, vermutlich durch Überlagerung und Streuung an den Einheitszellen. Die zunehmende Entfernung scheint wenig bis gar keine Auswirkung auf das seismische Wellenfeld zu haben. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Wellenlänge der sich ausbreitenden Welle an der Oberfläche etwa 1.500 m s^{-1} / 5 Hz = 300 m beträgt, d. h. fast die Hälfte der Gesamtlänge unserer Modelle. Die Effekte der Metamaterialien wurden auch für Quellen mit höheren Frequenzen (15 - 25 Hz) getestet und

[12] Die negativ normierte zweite Ableitung einer Gauß-Funktion. Sie wird häufig bei der Modellierung seismischer Daten eingesetzt.

[13] P-Welle = Primärwelle/Druckwelle; S-Welle = Sekundärwelle/Scherwelle

eine effektivere Dämpfung der Energie festgestellt, da die Wellenlängen eher den Abmessungen der Einheitszellen entsprechen. Die Frequenzen, die wir jedoch bei WEA unterdrücken wollen, liegen im Bereich von 1 bis 10 Hz, sodass die hier gezeigten Metamaterialien für unsere Zwecke nicht von praktischem Nutzen sind.

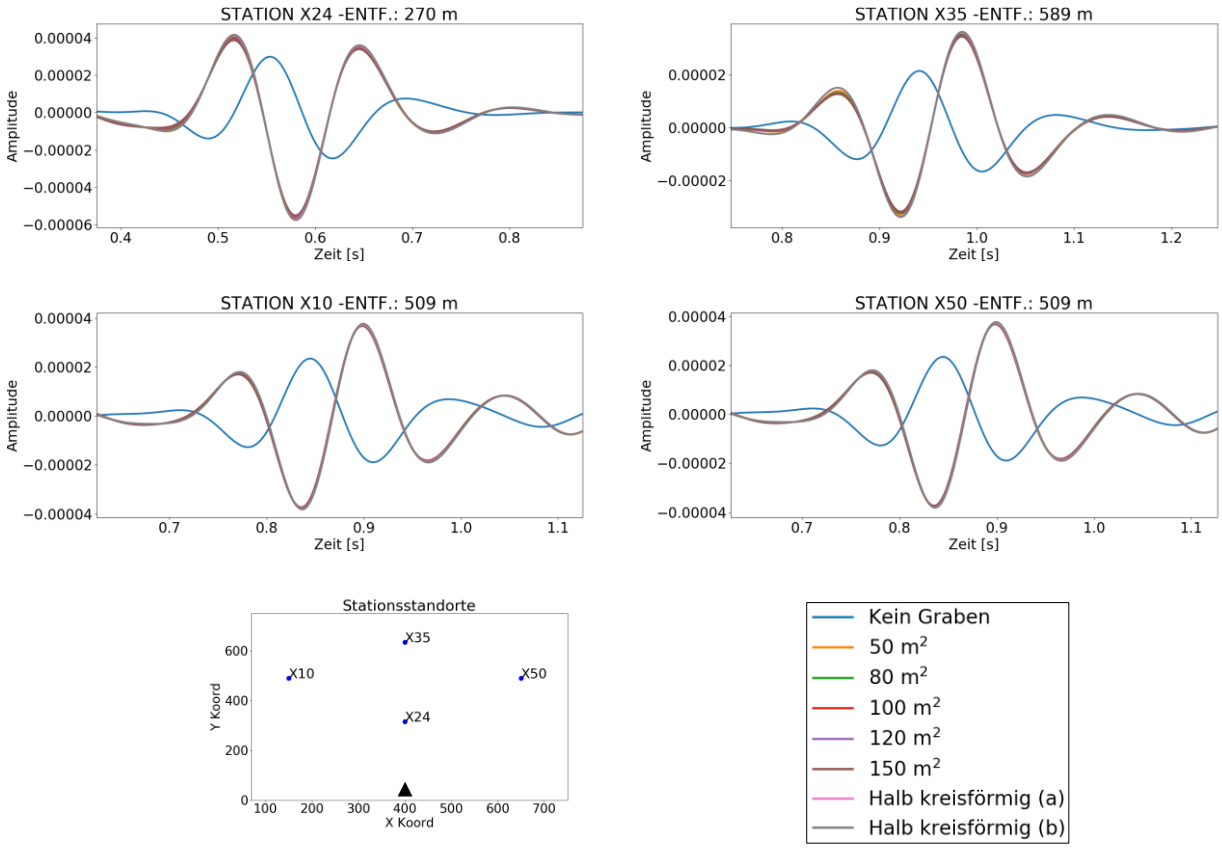


Abbildung 3: Simulationsergebnisse für die kreuzförmigen Metamaterialien für eine 5 Hz Quelle. Die verschiedenen Farben zeigen Resultate der unterschiedlichen Anordnungen, die Lage der vier unterschiedlich entfernten Stationen ist unten links angegeben.

2.2 Halbkreisförmige Gräben

In einem zweiten Szenario wurden im Vergleich zu den in Kapitel 2.1 vorgestellten Metamaterialien einfachere Modelle genutzt. Dafür wurden insgesamt achtzehn Modelle mit halbkreisförmigen Gräben um die WEA erstellt. Bei neun Modellen sind die Gräben leer und bei neun weiteren mit Wasser gefüllt. Die Gräben haben Tiefen von 5 bis 20 m und Breiten von 3 bis 5 m (siehe Abbildung 4). Wie oben wurde ein Frequenzbereich seismischer Energie zwischen 1 und 10 Hz mit einem bei 5 Hz zentrierten Ricker-Wavelet als Quellzeitfunktion modelliert. Die Punktquelle, welche die WEA simuliert, befindet sich ca. 10 m von den Gräben entfernt. Das verwendete numerische Modell hatte Abmessungen von 400 × 400 × 200 m (L/B/T) und wird mit mehr als einhundert Millionen globalen Punkten beschrieben (siehe Abbildung 4). An den Rändern des Modells wurden absorbierende Randbedingungen und am oberen Rand die freie Oberfläche festgelegt. Es wird angenommen, dass die Strukturmodelle konstante Geschwindigkeiten v_p = 1.500 m/s und v_s = 900 m/s und eine Dichte $\boldsymbol{\rho}$ = 2.300 kg/m³ haben.

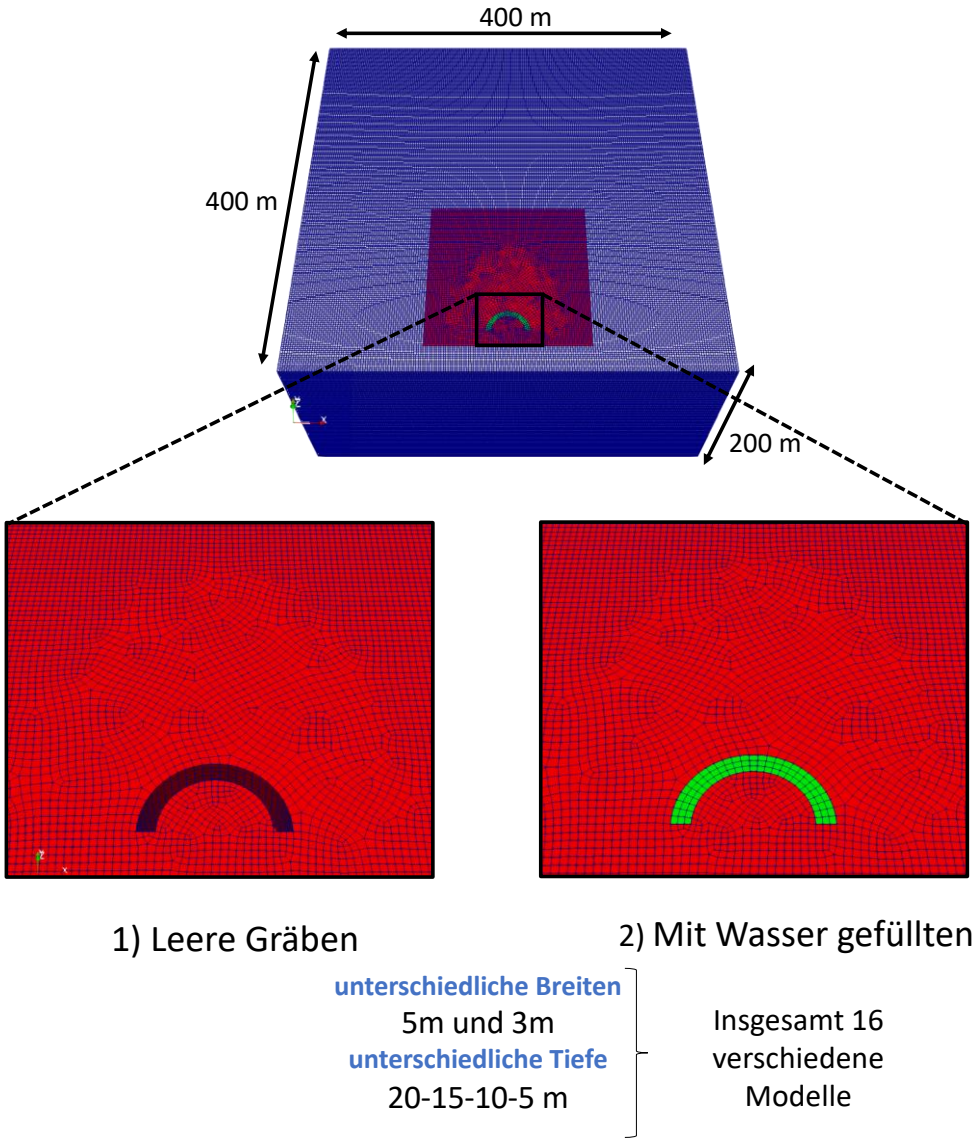


Abbildung 4: Netzbeispiele von Modellen mit kreisförmigen Gräben unterschiedlicher Breite und Tiefe, die leer oder mit Wasser gefüllt sind; 1) leere Gräben und 2) Gräben mit Wasser gefüllt; verschiedene Tiefen und Breiten wie angegeben

Die Ergebnisse für die auf der vertikalen Komponente aufgezeichneten seismischen Wellen für die leeren Gräben sind in Abbildung 5 dargestellt. Alle hier genutzten Modelle dämpfen die seismische Energie verglichen mit dem Fall ohne Graben (blaue Linie). Wenn der Graben zu flach ist (5 m), hat die Breite wenig bis gar keinen Effekt. Der tiefste (20 m) und breiteste (5 m) Graben weist die effektivste Dämpfung der Amplitude auf. Bei der größten betrachteten Entfernung (355 m) verhalten sich alle Modelle mit Ausnahme der Modelle mit 5 m Tiefe praktisch gleich. Bei kürzeren Entfernungen (28 m) sind die Modelle, die das Signal am effektivsten dämpfen, die Modelle mit 5 m Breite und 15 m bzw. 20 m Tiefe sowie das Modell mit 20 m Tiefe und 3 m Breite.

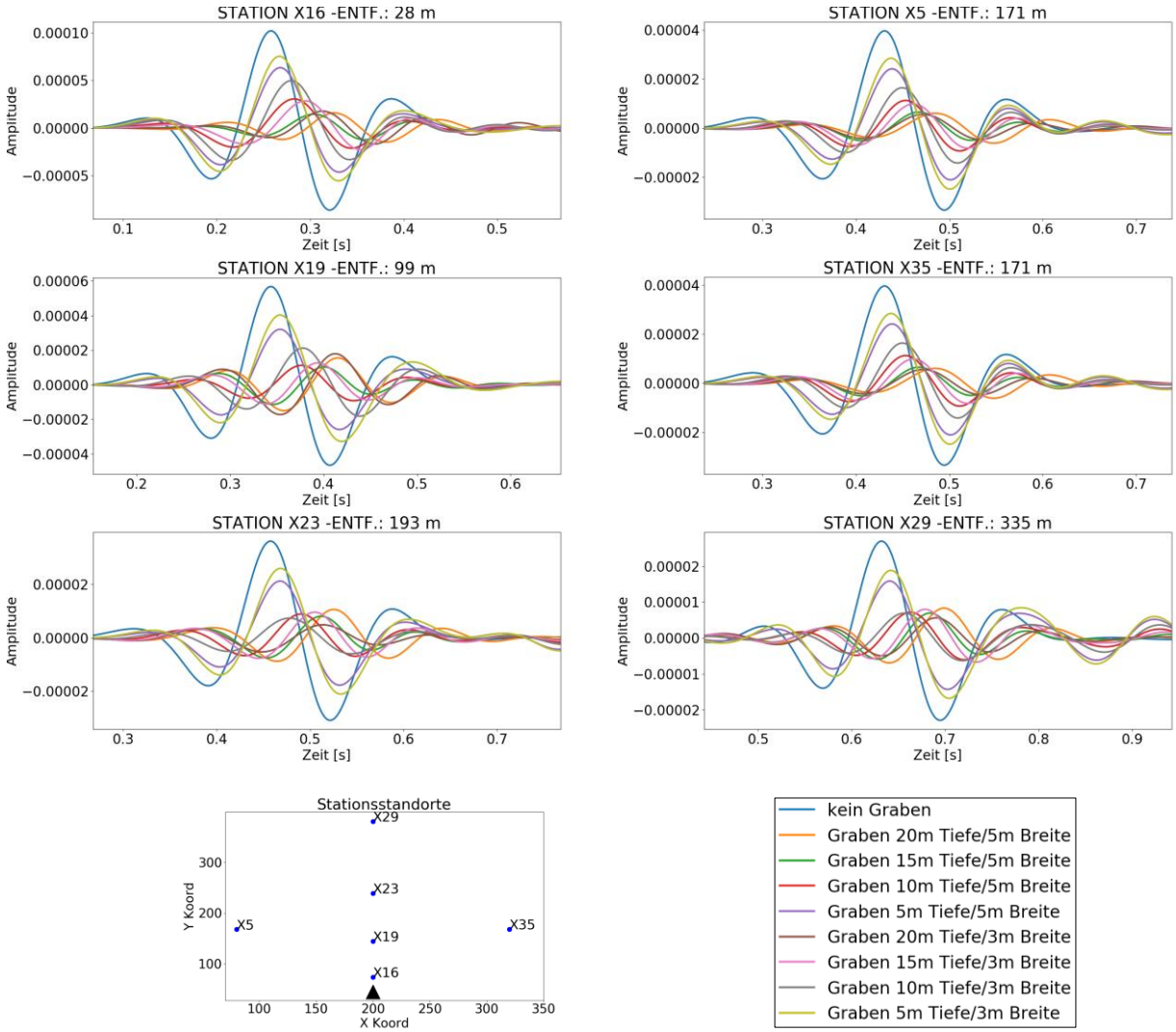


Abbildung 5: Darstellung der vertikalen Komponente der seismischen Registrierung für die Simulationsergebnisse der leeren Gräben (siehe Abbildung 4) unter Verwendung einer bei 5 Hz zentrierten Ricker-Quellzeitfunktion. Die verschiedenen Farben geben die unterschiedlichen Modelle an, die Stationslokationen der einzelnen Aufzeichnungen sind angegeben.

Die Ergebnisse für die Modelle der mit Wasser gefüllten Gräben zeigen ein komplexeres Verhalten als die Modelle mit leeren Gräben (siehe Abbildung 6). Dies liegt daran, dass durch die Flüssigkeit in den Gräben multiple Reflexionen der Wellen an den Seiten der Gräben erzeugt werden. Bei kurzen Entfernungen (28 m) wird ein ähnliches Verhalten beobachtet wie bei leeren Gräben, bei denen die Modelle mit einer Breite von 5 m und einer Tiefe von 15 m und 20 m die stärksten Effekte zeigen. Bei größeren Entfernungen, bei denen größere Auswirkungen der Multiplen auftreten, ist zu beobachten, dass Modelle mit größeren Abmessungen tatsächlich die seismische Energie durch Überlagerung des Wellenfeldes erhöhen. Dies weist darauf hin, dass das Füllen der kreisförmigen Gräben mit Wasser oder einem anderen, die Wellen gut leitenden Material, sich negativ auf die gewünschten Dämpfungseffekte auswirken kann. Verstärkungseffekte, ähnlich wie sie in Sedimentbecken auftreten,[14] scheinen sich zu manifestieren. Die Tatsache, dass das Füllen der Gräben mit Wasser oder anderen Materialien den gewünschten Effekten entgegenwirken kann, ist ein wichtiges zu berücksichtigendes Ergebnis. Denn in einer realen Bodenumgebung kann die Integrität des Grabens beeinträchtigt werden, beispielsweise wenn keine konsolidierten Sedimente vorhanden sind. Alternative Lösungen für diese Situation können darin bestehen, die Unversehrtheit des Grabens mit einer Zementhülle zu erhalten, wie dies in der Ölindustrie praktiziert wird[15].

[14] z. B. Wirth et al. (2019).

[15] Davies et al. (2014).

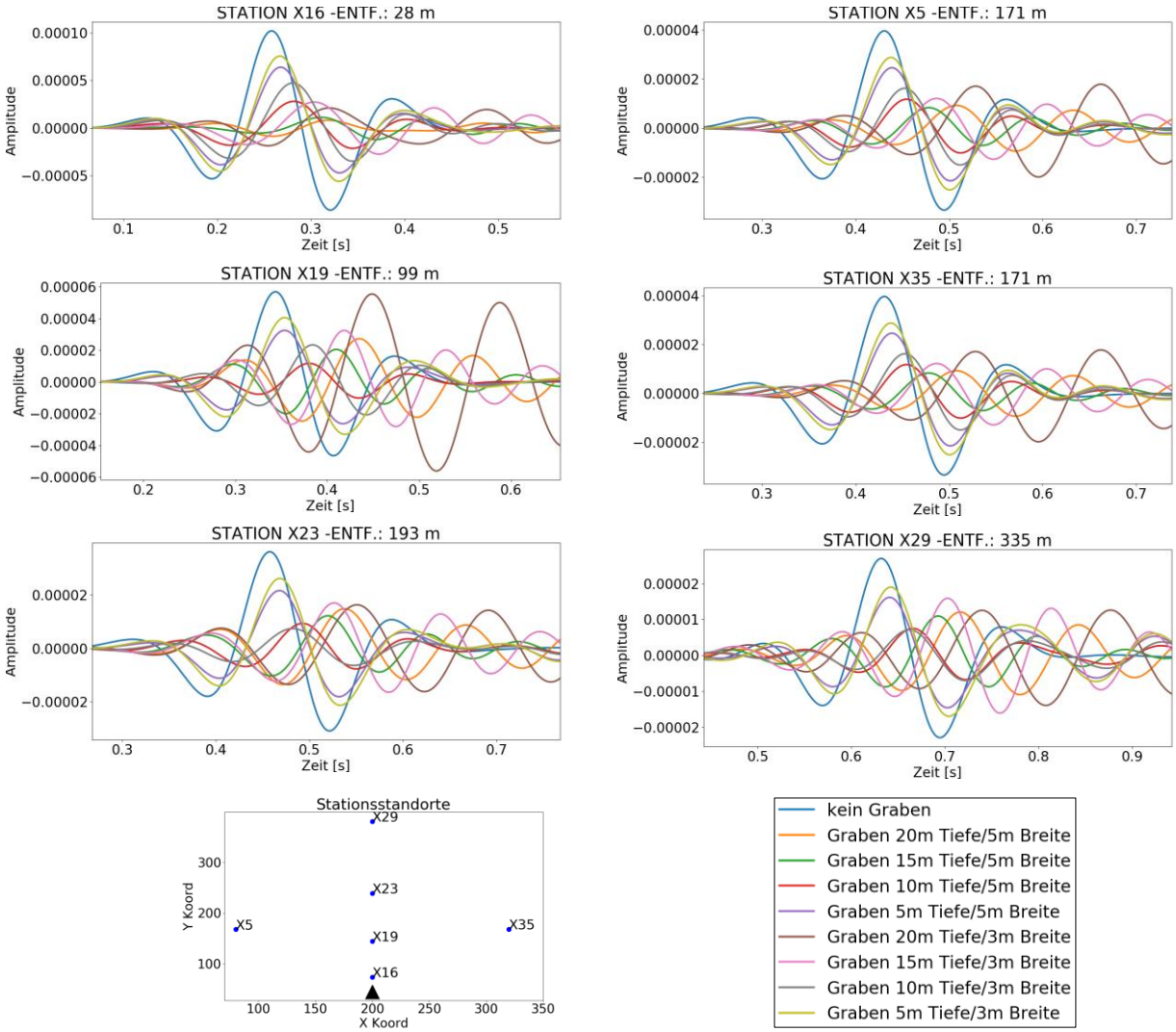


Abbildung 6: Darstellung der vertikalen Komponente der seismischen Registrierungen für die Simulationsergebnisse der mit Wasser gefüllten Gräben (siehe Abbildung 4) unter Verwendung einer bei 5 Hz zentrierten Ricker-Quellzeitfunktion. Die verschiedenen Farben geben die unterschiedlichen Modelle an, die Stationslokationen der einzelnen Aufzeichnungen sind angegeben.

2.3 Halbkreisförmige Gräben mit realistischer Quellfunktion der Erschütterungen

Basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts (Kapitel 2.2) wurde in einem dritten Szenario untersucht, wie leere Gräben die in großen Entfernungen gemessene seismische Energie abschwächen können. Erstellten wurden insgesamt acht Modelle mit leeren halbkreisförmigen Gräben in einer Entfernung von 10 m zur WEA in einem großen Modell mit Abmessungen von 2.500 m × 400 m × 1.000 m (L/B/T). Die Modelle wurden jeweils mit mehr als einhundert Millionen globalen Punkten abgebildet (siehe Abbildung 7). Wie oben sind an allen Rändern absorbierende Randbedingungen eingestellt worden, außer an der freien Oberfläche. Es wird angenommen, dass die seismische Geschwindigkeit mit der Tiefe zunimmt (d. h. Geschwindigkeiten v_p = 1.200 bis 3.200 m/s und v_s = 900 bis 2.400 m/s bei einer konstanten Dichte von $\boldsymbol{\rho}$ = 2.300 kg /m^3, siehe Abbildung 7b bis c).

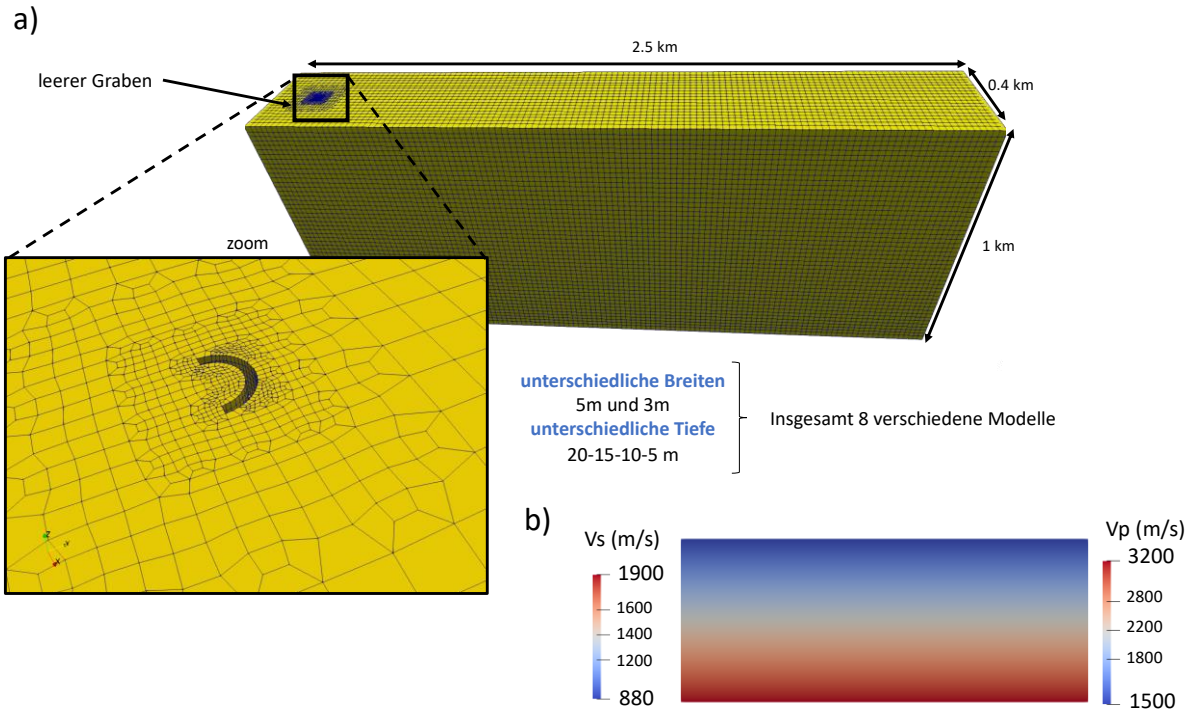


Abbildung 7: Netzbeispiel der acht großformatigen Modelle, die mit leeren Gräben unterschiedlicher Breite und Tiefe erstellt wurden. Für jedes Modell wird eine Zunahme der Wellen-Geschwindigkeit mit der Tiefe berücksichtigt, wie in b) gezeigt.

Als Quellzeitfunktionen dienten die Ergebnisse seismischer Rauschmessungen an WEA von Neuffer[16]. Die seismischen Messungen wurden im „Bürgerwindpark A31 Hohe Mark" in Heiden (NRW) durchgeführt. Der Windpark besteht aus zwei WEA-Konzentrationszonen mit jeweils drei WEA des Typs E-115 mit 3 MW Leistung, 149 m Nabenhöhe und 115,7 m Rotordurchmesser. Innerhalb der Konzentrationszonen befinden sich die WEA etwa 500 Meter voneinander entfernt und in gleicher Entfernung zur nahe gelegenen Autobahn. Die WEA mit dem größten Abstand zur Autobahn und zu den anderen WEA wurde als Untersuchungsobjekt ausgewählt, um verschiedene Messungen durchzuführen.

Um die Schwingungen am Fundament und in der direkten Umgebung im Untergrund zu analysieren, wurden kontinuierliche Messungen mit einer Dauer von einem Monat mit insgesamt 17 mobilen seismischen Stationen durchgeführt.[17] Verwendet wurden die seismischen Aufzeichnungen eines Beschleunigungsmessers, der in einer Entfernung von 8 m von der WEA installiert war. In unseren Modellierungen werden die von Neuffer[16] gemessenen Signale als Punktquelle am Ort der WEA injiziert. Die Ergebnisse der hier beschriebenen Modellierungen mit dieser Quellfunktion für die vertikale Komponente sind in Abbildung 8 dargestellt. In allen Modellen wird die Energie des von der WEA induzierten Rauschens durch den Einbau der halbkreisförmigen Gräben reduziert. Je tiefer die Gräben sind, desto effektiver ist die Reduktion der Energie. Wie oben scheint die Breite des Grabens eine weniger wichtige Rolle zu spielen, da die Modelle mit gleicher Tiefe aber unterschiedlicher Breite die Energie ähnlich gut reduzieren. Insgesamt ist zu beobachten, dass der effektivste kreisförmige Graben der tiefste (20 m) und der breiteste (5 m) ist. Die Gräben bilden damit eine Barriere für seismische Energie und alle beeinflussen das seismische Rauschen. Dies sind ermutigende Ergebnisse, da der Bau einfacher, halbkreisförmiger Gräben vor einer WEA im Vergleich zu komplexen Metamaterialien (siehe Kapitel 2.1) geringere Kosten und Aufwand sowie geringere Auswirkungen auf die Umwelt darstellen.

[16] Neuffer (2020).

[17] Neuffer (2020).

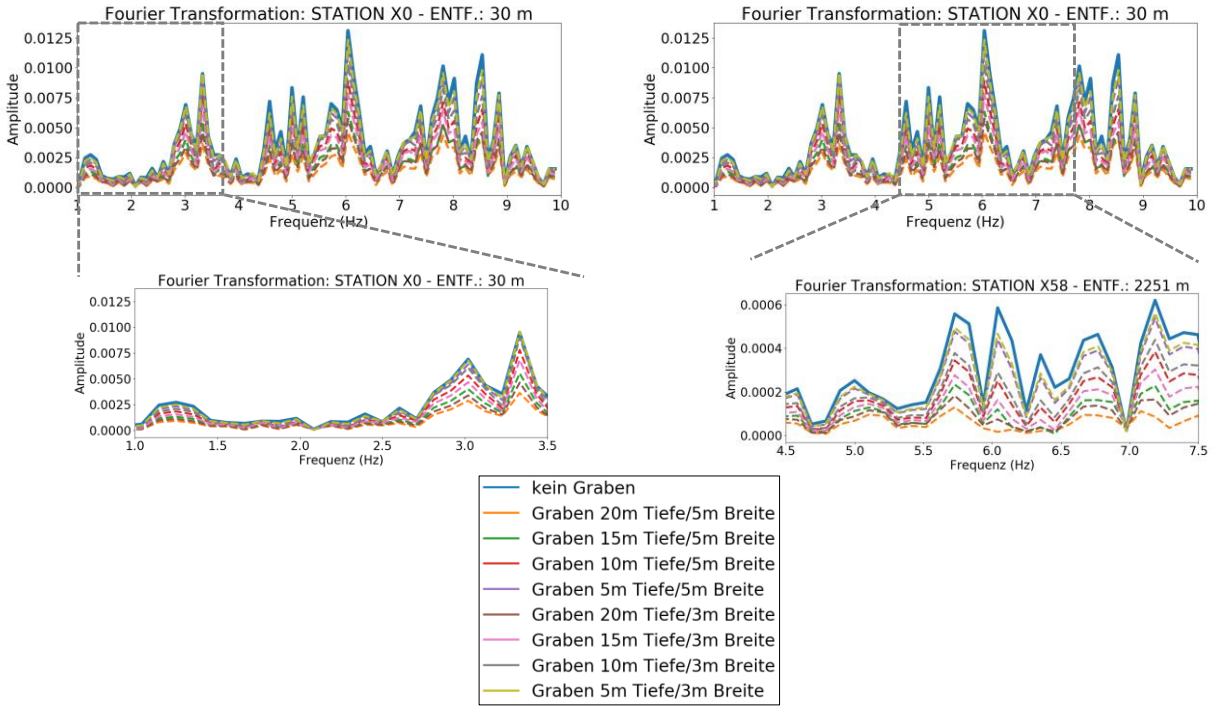


Abbildung 8: Simulationsergebnisse für die Ausbreitung des seismischen Rauschens mit kreisförmigen Gräben unterschiedlicher Abmessungen (siehe Abbildung 7 für die hier betrachteten Modelle); obere Reihe: zwei Stationen in unterschiedlichen Entfernungen (ENTF), die mittlere Reihe vergrößert den mit gestrichelten Linien umrandeten Teil des Spektrums

2.4 Einfluss der Topographie auf die Ausbreitung der Erschütterungen

Es ist bekannt, dass die Topographie einen Einfluss auf die Amplituden des seismischen Rauschens hat.[18] Ein viertes Szenario diente der Betrachtung dieser Effekte. Die Modelle haben Abmessungen von 2.500 m × 1.000 m × 1.000 m (L/B/T), die mit mehr als einhundert Millionen globalen Punkten beschrieben werden. Die für jedes Modell erstellten Topographien haben unterschiedliche Höhe von 33,5 m, 67 m, 100 m, 153 m, 200 m (siehe Abbildung 9). Die seismische Geschwindigkeit im Modell nimmt mit der Tiefe zu (v_p = 1.200 - 3.200 m/s und v_s = 900 - 2.400 m/s). Die Dichte wird mit $\boldsymbol{\rho}$ = 2.300 kg/m^3 als konstant angenommen. Alle Modelle haben die gleichen topographischen horizontalen Ausdehnungs- und Geschwindigkeitsschwankungen, was garantiert, dass die in den Simulationen beobachteten Unterschiede nur auf die Topographie zurückzuführen sind. Durchgeführt wurden die Berechnungen mit verschiedenen Anomalien mit hoher bzw. niedriger Geschwindigkeit, mit und ohne Streuung innerhalb der Erhebung (Topographie). Wie im vorherigen Abschnitt wurden als Quellzeitfunktionen die seismischen Rauschmessungen von Neuffer[19] genutzt und diese wie oben als Punktquelle injiziert (siehe Kapitel 2.3).

[18] Lacanna et al. (2014); Kohler et al. (2012).

[19] Neuffer (2020).

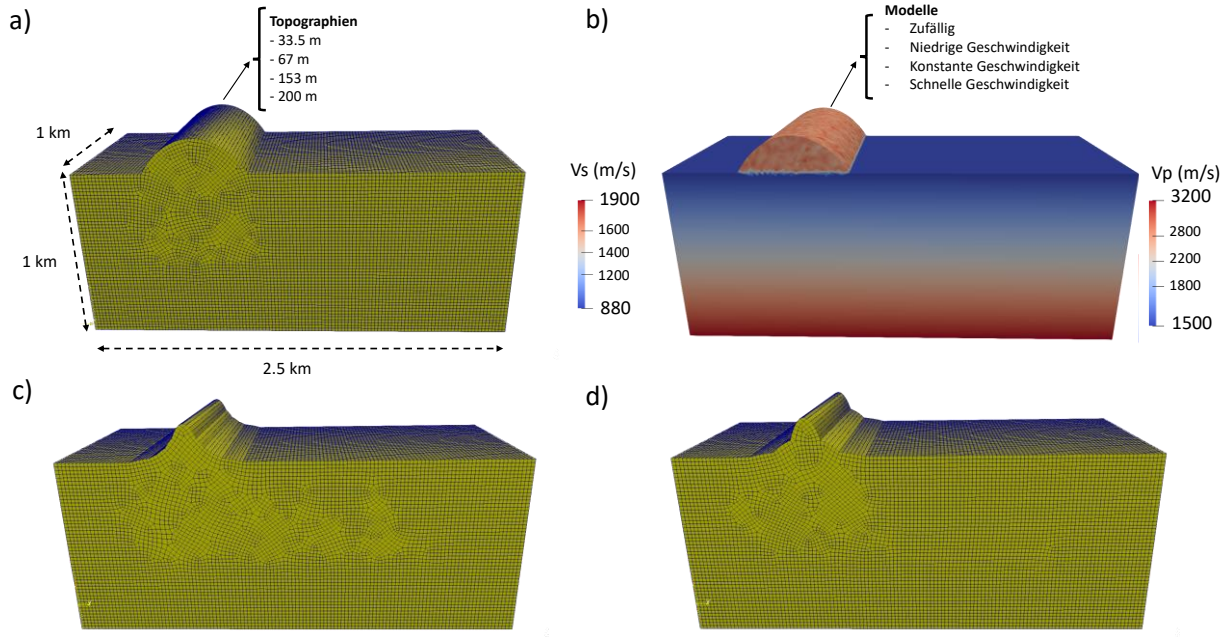


Abbildung 9: a) Netzbeispiele von Modellen mit topographischen Variationen von 33,5 m, 67 m, 100 m, 153 m und 200 m; b) Für jedes topographische Modell wird eine Zunahme der P- und S-Geschwindigkeit mit der Tiefe angenommen und eine zusätzliche Geschwindigkeitsstörung in der topographischen Höhe berücksichtigt (hier eine Hochgeschwindigkeitszone). c) und d) zwei verschiedene Modelle mit komplexeren Topographien

Berechnet wurden im ersten Szenario Topographien mit konstanter Geschwindigkeit an der Oberfläche und der Quelle auf die Oberfläche vor der Erhöhung. Die Ergebnisse für die vertikale Komponente sind in Abbildung 10 dargestellt. Zunächst ist zu beobachten, dass das Vorhandensein von Topographie und Höhen über 100 m die Amplitudenenergie teils erheblich reduziert. Da die seismischen Eigenschaften der topographischen Strukturen konstant sind können keine Streueffekte erwartet werden. Ferner wird gezeigt, dass Erhebungen unter 100 m bei der Reduzierung der seismischen Energie für alle Stationen kaum eine Rolle spielen.

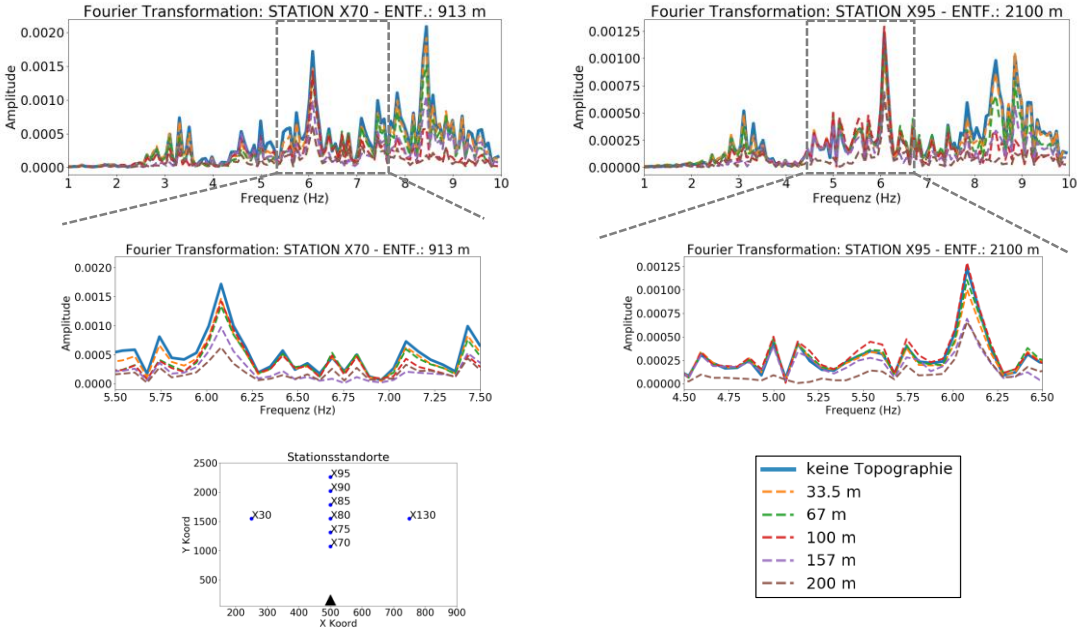


Abbildung 10: Simulationsergebnisse für die Ausbreitung des seismischen Rauschens bei topographischen Variationen (siehe Abbildung 9 für die hier betrachteten Modelle) bei der die Quelle am linken Rand des Modells (vor der Erhebung) steht. Obere Reihe: Zwei Stationen in verschiedenen Entfernungen (ENTF), mittlere Reihe zeigt die Vergrößerung der umrandeten Teile des Frequenzspektrums; die unterste Reihe zeigt die modellierten Stationen sowie die Legende

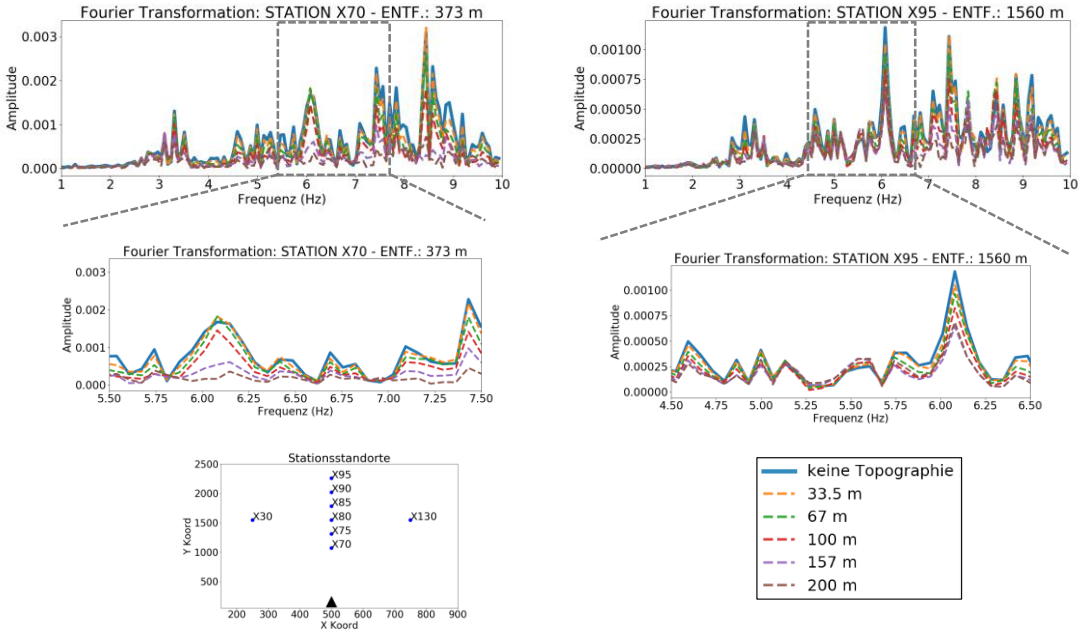


Abbildung 11: Wie Abbildung 10, jedoch für die Quelle auf dem höchsten Punkt des Hügels

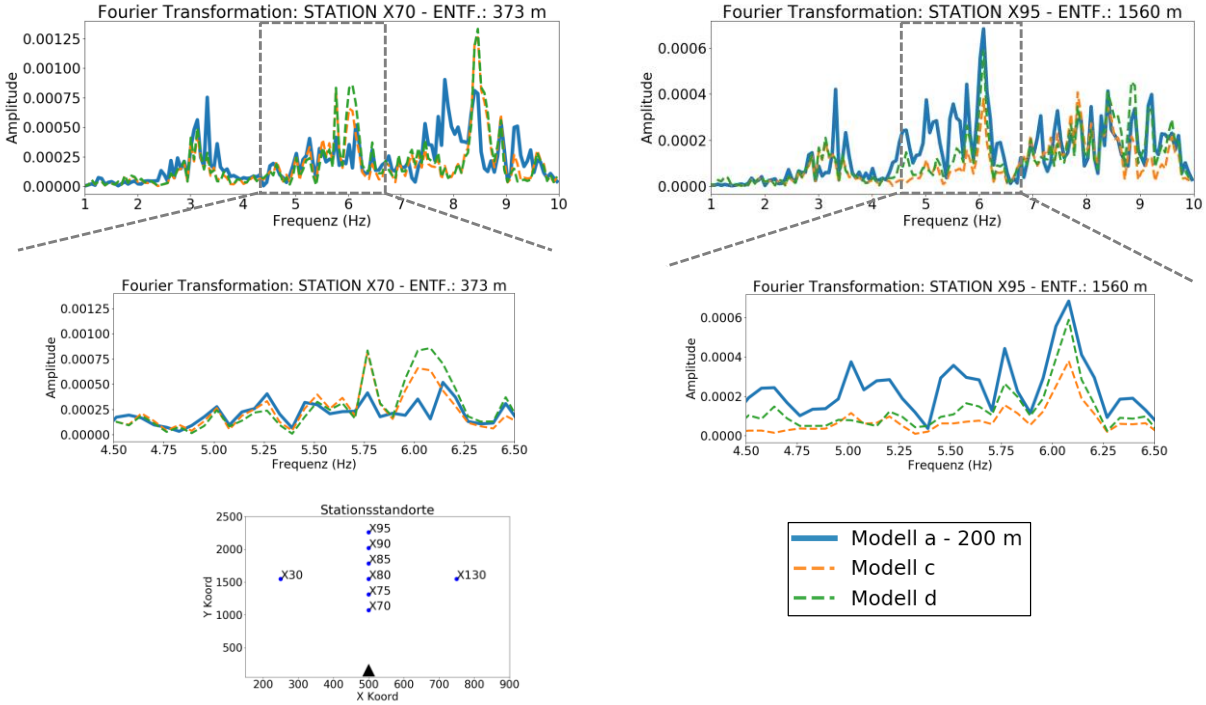


Abbildung 12: Wie Abbildung 11, aber für komplexere Topographien (Abbildung 9c und d)

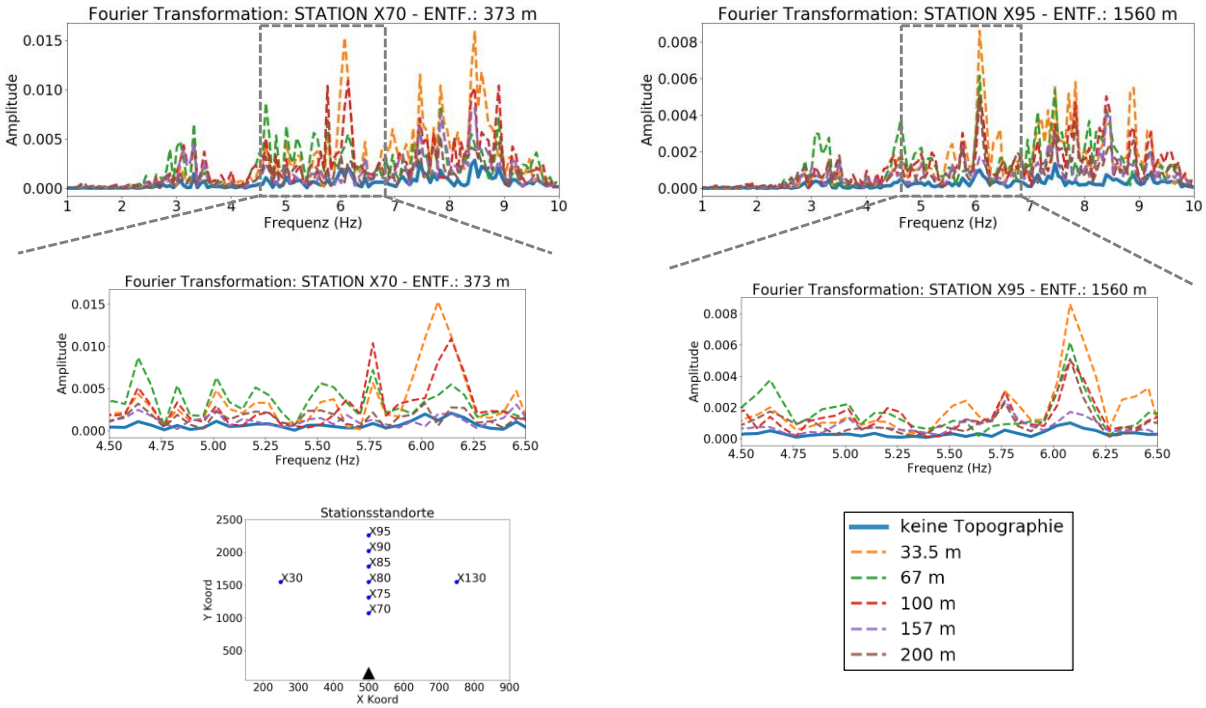


Abbildung 13: Wie Abbildung 11, aber für langsame seismische Geschwindigkeiten mit einer zufälligen Streuverteilung innerhalb der Topographie

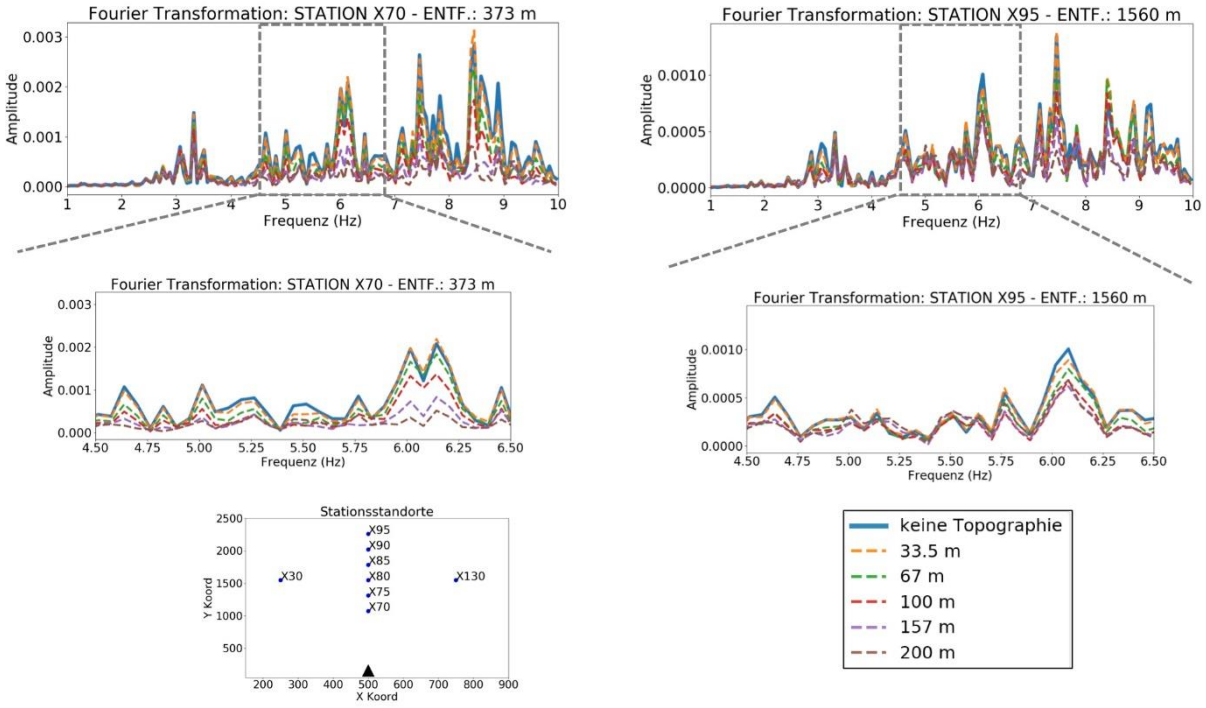


Abbildung 14: Wie Abbildung 11, jedoch ist die Geschwindigkeit gleichmäßig die der obersten Schicht im Modell und die Streuer sind zufällig in der Topographie verteilt

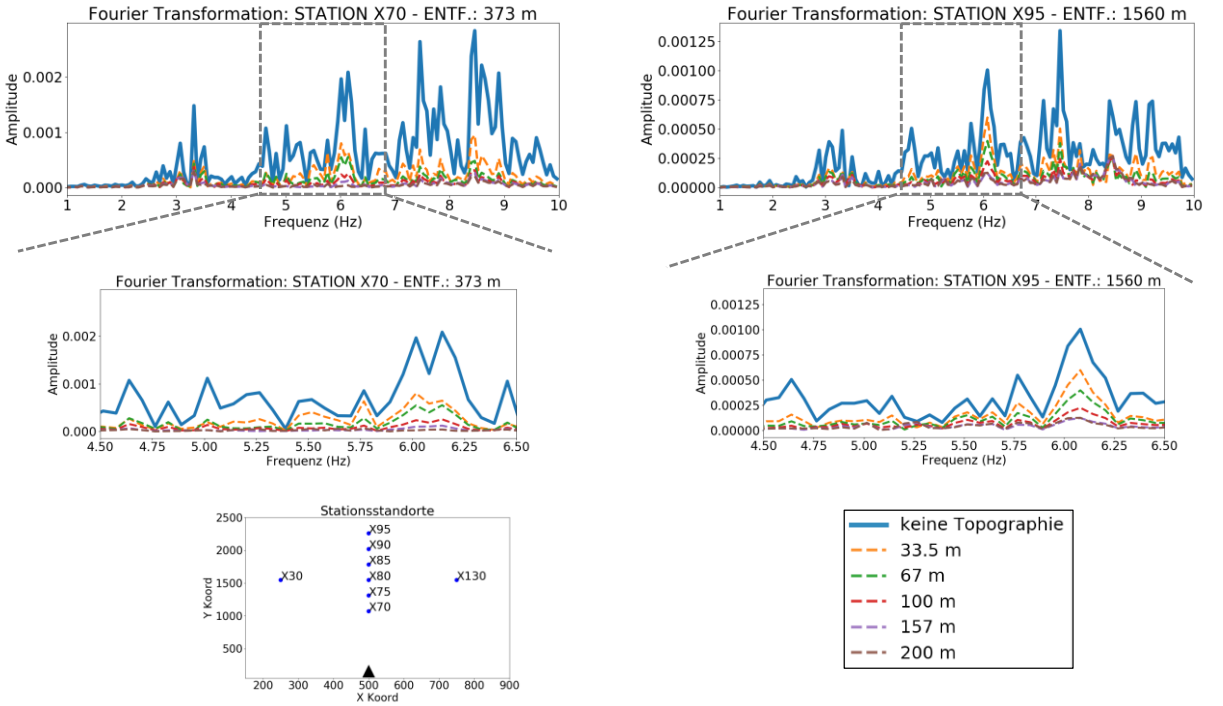


Abbildung 15: Wie Abbildung 12, aber mit einer schnellen Geschwindigkeit in der Topographie und einer zufälligen Streuverteilung

Im zweiten topographischen Szenario wurde die Quelle für seismisches Rauschen oben auf den Hügeln platziert, da dieses eher der Realität entspricht, und dieselben Topographien wie zuvor betrachtet. Die erhaltenen Ergebnisse für die vertikale Komponente sind in Abbildung 11 dargestellt. Zu beobachten ist, dass keine Frequenzen durch die Topographie erhöht werden. Generell zeigt die Verringerung der seismischen Energie eine direkte Proportionalität zur Höhe des Hügels. Jedoch ist diese Reduzierung bei großen Entfernungen gering. Komplexe topographische Variationen (Modelle in Abbildung 9c bis d), bei denen beide topographischen Erhebungen eine Höhe von 200 m haben, zeigen, dass beide Modelle die Energie im Vergleich zur einfachen Topographie (Abbildung 12) bei weiteren Entfernungen verringern. Es scheint bei diesen Modellen jedoch, dass die Frequenz von 6 Hz bei geringer Entfernung angeregt und bei großer Entfernung gedämpft wird. Bei 8 Hz jedoch ist eine deutliche Reduzierung auf kurzer Distanz zu beobachten. Die Modelle zeigen, dass die Reduktion der seismischen Energie von der Komplexität der Topographie abhängt und jede einzelne Frequenz unterschiedlich beeinflusst wird.

Ein interessanter Fall für ein Szenario ist der Energieberg im Zentrum der Stadt Karlsruhe. Der Energieberg ist ein etwa 60 m hoher ehemaliger Müllberg. Auf der Spitze des Hügels sind drei WEA und eine Photovoltaikanlage installiert. Dort wurden mehrere seismische Messungen mit einer unterschiedlichen Anzahl an in Betrieb befindlichen WEA durchgeführt, um den Einfluss des Untergrunds auf WEA-induzierte seismische Signale für diesen Sonderfall zu bestimmen.[20] Überraschenderweise sind die induzierten seismischen Signale der WEA nicht weiter als 130 m entfernt zu diesen messbar.[21] Die Ursache für einen plötzlichen Abfall der seismischen Amplituden entlang des Messprofils kann durch einen Impedanzkontrast[22] am Boden der Mülldeponie, zwischen dem stark nicht konsolidierten Abfallmaterial (entspricht einem Metamaterial) und den natürlichen Sedimenten des Oberrheingrabens, erklärt werden.[23] Für die numerischen Simulationen wurde eine solche Erhebung mit einem Hochgeschwindigkeits- bzw. Niedriggeschwindigkeitsmaterial mit und ohne Streuung erstellt (siehe auch Abbildung 9).

[20] Zieger (2019); Ritter (2020).

[21] Zieger (2019).

[22] Starke Unterschiede der Wellengeschwindigkeit in den Materialien.

[23] Zieger (2019).

Die Ergebnisse für diese Szenarien sind in Abbildung 13 bis 15 dargestellt. Bei Streuungen und reduzierten Geschwindigkeiten (Abbildung 13) kann die Anregung einiger Frequenzen und im Allgemeinen die Zunahme der Energie beobachtet werden. Dies ist Analog zu Sedimentbecken, bei denen die im Becken eingeschlossene Energie aufgrund von Welleninterferenzen und in Abhängigkeit von der Strukturgeometrie des Beckens zunimmt[24]. Die Ergebnisse für die Streuungen ohne Geschwindigkeitsänderung (Abbildung 14) zeigen eine deutliche Verringerung der seismischen Energie im Vergleich zum vorherigen Fall. Wie schon in den Fällen ohne Streuung zeigt der höchste Hügel die größte Dämpfung. Die Ergebnisse für die Streuungen und schnellen Geschwindigkeiten innerhalb der topographischen Erhebung (Abbildung 15) zeigen eine deutliche Verringerung der seismischen Energie aufgrund der Streuungen. Wie im vorherigen Fall korreliert die Reduzierung der Energie mit der Höhe der Hügel.

[24] Shumway (1960); Olsen (2000); Wirth et al., (2019).

Abkürzungsverzeichnis

WEA	Windenergieanlage
vp	P-Wellengeschwindigkeit
vs	S-Wellengeschwindigkeit
L/B/T	Länge/Breite/Tiefe
ρ	Dichte

Danksagung

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

Gefördert durch:

EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum und Beschäftigung

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

Leitmarkt Agentur.NRW

EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Literatur- und Quellenverzeichnis

Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P., Guenneau, S., Craster, R. V. (2016a), A seismic metamaterial: The resonant metawedge. Scientific Reports 6(1), S. 1-6. https://doi.org/10.1038/srep27717.

Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., Craster, R. V. (2016b), Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. Scientific Reports 6(1) S. 1-7. https://doi.org/10.1038/srep19238.

Colombi, A., Zaccherini, R., Aguzzi, G., Palermo, A., Chatzi, E. (2020), Mitigation of seismic waves: Metabarriers and metafoundations bench tested. Journal of Sound and Vibration 485:115537. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115537.

Davies, R. J., Almond, S., Ward, R. S., Jackson, R. B., Adams, C., Worrall, F., Herringshaw, L. G., Gluyas, J. G., Whitehead, M. A. (2014), Oil and gas wells and their integrity: Implications for shale and unconventional resource exploitation. Marine and Petroleum Geology 56, S. 239-254. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.03.001.

Kittel, C., McEuen, P., McEuen, P. (1996), Introduction to Solid State Physics. Volume 8, Wiley New York.

Köhler, A., Weidle, C., Maupin, V. (2012), On the effect of topography on surface wave propagation in the ambient noise frequency range. Journal of Seismology 16(2), S. 221-231. https://doi.org/10.1007/s10950-011-9264-5.

Komatitsch, D., Tromp, J. (1999), Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. Geophysical Journal International 139(3), S. 806-822. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00967.x.

Lacanna, G., Ichihara, M., Iwakuni, M., Takeo, M., Iguchi, M., Ripepe, M. (2014), Influence of atmospheric structure and topography on infrasonic wave propagation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 119(4), S. 2988-3005. https://doi.org/10.1002/2013JB010827.

Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F., Pugno, N. M. (2016), Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. New Journal of Physics 18(8):083041.

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

Olsen, K. (2000), Site amplification in the los angeles basin from three-dimensional modeling of ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America 90(6B), S.:77-94. https://doi.org/10.1785/0120000506.

Palermo, A., Krödel, S., Marzani, A., Daraio, C. (2016), Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. Scientific Reports 6(1), S. 1-10. https://doi.org/10.1038/srep39356.

Ritter, J. (2020), Erarbeitung eines Prognosetools für seismische Immissionen an Erdbeben-Messstationen in Nordrhein-Westfalen (NRW). Technical report, Karlsruher Institut für Technologie.

Shumway, G. (1960), Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method. Geophysics, 25(2), S 451-467. http://dx.doi.org/10.1190/1.1438717.

Wirth, E. A., Vidale, J. E., Frankel, A. D., Pratt, T. L., Marafi, N. A., Thompson, M., Stephenson, W. J. (2019), Source-dependent amplification of earthquake ground motions in deep sedimentary basins. Geophysical Research Letters 46(12), S. 6443-6450. https://doi.org/10.1029/2019GL082474.

Zeighami, F., Palermo, A., Marzani, A. (2021), Rayleigh waves in locally resonant metamaterials. International Journal of Mechanical Sciences 195:106250. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106250.

Zieger, T. (2019). Experimental quantification of seismic signals induced by wind turbines. PhD thesis, Karlsruher Institut für Technologie. doi: 10.5445/IR/1000096453.

Impressum

© FA Wind, Dezember 2021

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

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

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

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

Autorenschaft
Rafael Abreu und Prof. Dr. Christine Thomas,
Universität Münster

Redaktion
Dr. Dirk Sudhaus

Zitiervorschlag
FA Wind (2021), Minderung seismischer Wellen von Windenergieanlagen. Strukturelle Maßnahmen auf dem Wellenweg.

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

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

Fachagentur Windenergie an Land e.V.

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