



Definition von Schutzradien

Schriftenreihe, Heft 13/2020



Definition von Schutzradien um seismologische Messeinrichtungen bei der Errichtung von Windkraftanlagen

MSc. Nikolaus Lerbs und Prof. Dr. Michael Korn

Inhalt

1	Einleitung.....	9
1.1	Zielsetzung.....	10
1.2	Strategie zur Definition von Schutzradien.....	10
2	Messobjekte.....	11
2.1	Windkraftanlagen in Sachsen.....	11
2.2	Vorläufige Messobjekte.....	13
2.3	Auswahl der Messobjekte.....	14
2.4	Messkonfiguration.....	16
3	Messgeräte.....	17
3.1	Testmessung.....	17
3.2	Vorprozessierung.....	20
4	Seismische Messungen.....	21
4.1	WKA Niedersaida.....	21
4.1.1	Untersuchungsgebiet.....	22
4.1.2	Frequenzpeaks f_P	23
4.1.3	Emissionskoeffizient C_E	25
4.1.4	Entfernungsabhängigkeit C_A	25
4.2	WKA Waldkirchen.....	27
4.2.1	Messanordnung.....	28
4.2.2	Frequenzpeaks f_P	29
4.2.3	Emissionskoeffizient C_E	30
4.2.4	Entfernungsabhängigkeit C_A	30
4.3	WKA Pfinztal.....	31
4.3.1	Messanordnung.....	32
4.3.2	Frequenzpeaks f_P	33
4.3.3	Emissionskoeffizient C_E	35
4.3.4	Entfernungsabhängigkeit C_A	37
4.4	WKA Bautzen.....	39
4.4.1	Messanordnung.....	40
4.4.2	Frequenzpeaks f_P	41
4.4.3	Emissionskoeffizient C_E	42
4.4.4	Entfernungsabhängigkeit C_A	42
4.5	WP Freiberg.....	43
4.5.1	Untersuchungsgebiet.....	44
4.5.2	Frequenzpeaks f_P	44
4.5.3	Entfernungsabhängigkeit C_A	45
5	Modellierung der Wellenausbreitung in unterschiedlichen Untergrundstrukturen.....	45
5.1	Geometrische Amplitudenabnahme α	48
5.2	Dämpfungskoeffizient β	49
6	Grenzwert.....	52
7	Exemplarische Definition eines Schutzradius.....	53
8	Zusammenfassung.....	56
9	Literaturverzeichnis.....	59
Anhang	60
Anhang 1	Dämpfungskoeffizient β	60
Anhang 2	Manual zur Definition von Schutzradien.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Frequenzbereiche mit starken WKA-Immissionen.....	9
Abbildung 2: Wirkungskette WKA – seismologische Station	10
Abbildung 3: Verteilung der WKAs in Sachsen und der Permanentstationen des SXNET	12
Abbildung 4: Auflistung der WKAs in Sachsen mit einer Mindestleistung von 0.5 MW bis zu einer Entfernung von 15 km zu den Permanentstationen des SXNET	12
Abbildung 5: Lage des WP Neumark-Beiersdorf, WP Zodel und WP Heinde	13
Abbildung 6: Verteilung der einzeln stehenden WKAs in Sachsen. Die Symbolgröße entspricht der WKA-Leistung zwischen 0.5 MW und 2.0 MW. Die Nummerierung entspricht den Messobjekten in Tabelle 1.....	16
Abbildung 7: Messkonfigurationen für die Messkampagnen an den einzeln stehenden WKAs, bestehend aus Ringmessungen (links) und Profilmessungen (rechts)	16
Abbildung 8: Für die Messkampagnen genutzte Sensoren (links) und Datenlogger (rechts)	17
Abbildung 9: Testmessung der DataCubes und Geophone beim Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig am 08.05.2018.....	18
Abbildung 10: Seismogramme der Vertikalkomponenten der Testmessung.....	18
Abbildung 11: Links: PSD für jede Station und Komponente. Rechts: Mittelwert und Standardabweichung (gestrichelte Linie) der PSDs für jede Komponente sowie die Maximalamplitude für jeden Mittelwert (graue Linie).....	19
Abbildung 12: Vergleich eines Datensatzes mit (orange) und ohne Anwendung (blau) des Simulationsfilters	20
Abbildung 13: Windkraftanlage bei Niedersaida	21
Abbildung 14: Übersichtskarte der Messkampagne. oben: Übersicht über die Profilmessungen. Profil B verläuft in Südsüdöstlicher-Richtung (B1-B7). Profil C verläuft in Westlicher-Richtung (C1-C7). unten: Aufbau der Ringmessung um die WKA (A1-A5).....	22
Abbildung 15: Standort des etwa 3.5 km entfernten Windparks	23
Abbildung 16: Spektrogramm der Station A4 vom 13.-15. November 2018.....	24
Abbildung 17: 75 %-Quantil der PSDs der Ringmessung vom 13.-15. November 2018. Deutlich sichtbar sind Frequenzpeaks bei 1.4 Hz, 2.4 Hz, 4.1 Hz, 4.6 Hz, 6.2 Hz und 8.3 Hz zu erkennen.....	24
Abbildung 18: PSD über die Zeit um das Frequenzband von 4.1 Hz. Der rote Kasten zeigt ein Zeitfenster, in dem sich der seismische Rauschpegel von ca. -165 dB/Hz auf ca. -151 dB/Hz erhöht.....	25
Abbildung 19: Amplitudenabklingverhalten der Amplituden aus den Profilmessungen um den Frequenzpeak von 1.5 Hz	26
Abbildung 20: Windkraftanlage bei Waldkirchen/Erzgebirge	27
Abbildung 21: Übersichtskarte der Messkampagne. oben: Übersicht über die Profilmessungen. Profil B verläuft in Ost-Richtung (B1-B5). Profil C verläuft in N-Richtung (C1-C5). unten: Aufbau der Ringmessung um die WKA (A1-A5).....	28
Abbildung 22: Spektrogramm der Station A5 über den Zeitraum vom 05-08. Dezember 2018	29
Abbildung 23: Peakfrequenzen der Ringmessung vom 05-08. Dezember 2018.....	29
Abbildung 24: PSD über die Zeit um das Frequenzband von 4.1 Hz. Der rote Kasten zeigt ein Zeitfenster, in dem der seismische Rauschpegel auf ca. -144 dB/Hz steigt	30
Abbildung 25: Entfernungsabhängiges Amplitudenabklingverhalten für den Frequenzpeak um 4.1 Hz.....	31
Abbildung 26: Windkraftanlage Pfinztal (Baden-Württemberg). Foto: Dr. Peter Fischer.....	31
Abbildung 27: Übersichtskarte der Messkampagne bei Pfinztal (Baden-Württemberg). oben: Übersicht über die Profilmessungen. Profil B verläuft in W-Richtung (B1-B10) und Profil C verläuft in N-Richtung (C1-C10). b: Aufbau der Ringmessung um die WKA. Ring A hat einen Radius von ca. 50 m (A1-A8). Ring B hat einen Radius von ca. 200 m (B1-B8).....	32
Abbildung 28: Spektrogramm der Station A1 vom 20.-25. Dezember 2018.....	33

Abbildung 29: PSD über die Frequenz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.....	34
Abbildung 30: PSD über die Frequenz in Abhängigkeit der Rotorumdrehungszahl	34
Abbildung 31: Zusammenhang zwischen PSD um den Frequenzpeak von 1.65 Hz (blau) und der Windgeschwindigkeit (rot) bzw. Leistung der WKA (grün). Hervorgehoben sind zwei Zeitfenster, innerhalb derer ein Trend zwischen Rauschniveau und Windgeschwindigkeit bzw. Leistung der WKA zu erkennen ist (gestrichelte schwarze Kästen 1-2).....	35
Abbildung 32: Darstellung des seismischen Rauschpegels in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit um die Frequenzpeaks von (a) 1.65 Hz, (b) 2.4 Hz, (c) 3.35 Hz und (d) 5.25 Hz (d). Die Ziffern 1-3 entsprechen den Phasen unterschiedlichen Windbedingungen, wie im Text beschrieben. Die grüne Raute zeigt den Emissionskoeffizienten (C_E). Die rote Linie zeigt die Windgeschwindigkeitsfunktion $F(v)$. Die rot gestrichelte Linie stellt die Standardabweichung von $F(v)$ dar	37
Abbildung 33: Entfernungsabhängiges Amplitudenabklingverhalten für die vier Frequenzpeaks von (a) 1.65 Hz, (b) 2.4 Hz, (c) 3.35 Hz und 5.25 Hz (d).....	38
Abbildung 34: Windkraftanlage bei Bautzen	39
Abbildung 35: Übersichtskarte der Messkampagne. oben: Übersicht der Profilmessungen. Profil B verläuft in E-Richtung (B1-B5). Profil C verläuft in N-Richtung (C1-C5). unten: Aufbau der Ringmessung um die WKA (A1-A5).....	40
Abbildung 36: Spektrogramm der Station A4 vom 14.-17. April 2019	41
Abbildung 37: Darstellung der PSDs der Ringmessung. Deutlich sichtbar sind Frequenzpeaks bei 1.7 Hz, 2.2 Hz, 4.1 Hz, 5.0 Hz, 6.85 Hz und 8.9 Hz.....	41
Abbildung 38: PSD über die Zeit um das Frequenzband von 4.1 Hz. Die roten Kästen zeigen Zeitfenster in denen der seismische Rauschpegel innerhalb kurzer Zeit sehr stark auf ca. -160 dB/Hz bis - 150 dB/Hz abfällt.....	42
Abbildung 39: Amplitudenabklingverhalten auf die Distanz für die Peakfrequenz von 2.2 Hz	43
Abbildung 40: Windpark bei Freiberg	43
Abbildung 41: Übersichtskarte der Messkampagne. Profil A hat eine Länge von 4.3 km (A1-A8), Profil B hat eine Länge von 6.8 km (B1-B8)	44
Abbildung 42: Spektrogramm der Station A1/B1 vom 13.-17. Juni 2019	44
Abbildung 43: PSDs der Station A1/B1 vom 15.-16. Juni 2019. Deutlich sichtbar sind Frequenzpeaks bei 2.2 Hz, 4.1 Hz, 5.0 Hz und 6.75 Hz	45
Abbildung 44: Amplitudenabklingverhalten auf die Distanz für die Peakfrequenz um 5.0 Hz.....	45
Abbildung 45: a) Skizze zu den Schichtmodellen der Modellrechnungen. f ist das Quellsignal (roter Stern). Die schwarzen Dreiecke zeigen die Stationen. Innerhalb der ersten Schicht sind die Parameter (v_P -Wellengeschwindigkeit, Dichte ρ , Dämpfungsparameter Q und Schichtmächtigkeit d) variiert worden. Die Parameter der unteren Schichten bleiben für alle Modellrechnungen konstant. b) Beispielhafte synthetische Seismogramme mit $f = 3$ Hz, $v_P = 1600$ m/s, $d = 200$ m, $Q = 200$, und $\rho = 2.7$ g/cm ³	47
Abbildung 46: Konturdiagramm der aus den synthetischen Modellen berechneten Amplitudenabnahme α für die Peakfrequenz von 1.5 Hz. A und B stellen die Baugrundklassen dar	48
Abbildung 47: Konturdiagramm der aus den synthetischen Modellen berechneten Amplitudenabnahme α für die Peakfrequenz von 3 Hz. A und B stellen die Baugrundklassen dar	49
Abbildung 48: Konturdiagramm der aus den synthetischen Modellen berechneten Amplitudenabnahme α für die Peakfrequenz von 6 Hz. A und B stellen die Baugrundklassen dar	49
Abbildung 49: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 50. A und B stellen die Baugrundklassen dar	50
Abbildung 50: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 100. A und B stellen die Baugrundklassen dar	51

Abbildung 51: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 200. A und B stellen die Baugrundklassen dar	51
Abbildung 52: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 400. A und B stellen die Baugrundklassen dar	52
Abbildung 53: Verteilung der natürlichen Rauschbedingungen der seismologischen Permanentstation CLL über das Jahr 2018. Die grauen Linien zeigen das New Low Noise Model (NLNM) und das New High Noise Model (NHNM) nach Peterson (1993). Die Farbskala zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des seismischen Rauschens	53
Abbildung 54: Emission der WKA für den Frequenzpeak um 1.65 Hz. Hiermit lässt sich ein Emissionskoeffizient C_E (grüne Raute) bestimmen. Mit Hilfe der Funktion der Windgeschwindigkeit $F(v)$ (pinke Raute) wird die Erhöhung der Emission für höhere Windgeschwindigkeiten berechnet	54
Abbildung 55: Synthetische Abklingkurve für den Frequenzpeak von 1.5 Hz. Die Parameter α und β wurden anhand der geologischen Begebenheiten bei Pfinztal bestimmt	55
Abbildung 56: Die mittlere spektrale Rauschleistung $PSD(f_P, x)$ setzt sich aus dem Emissionskoeffizienten C_E , $F(v)$ und der synthetischen Abklingkurve C_A zusammen	55
Abbildung 57: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die den natürlichen Rauschpegel an der seismologischen Station des Collm zeigt. Der Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$ beträgt -158 dB/Hz bei einer Frequenz von 1.65 Hz	56
Abbildung 58: Unterschreitet $PSD(f_P, x)$ den Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$, so ist die Bedingung des Schutzradius erfüllt. In diesem Beispiel wäre dies nach etwa 3800 m der Fall	56
Abbildung 59: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 50. A und B stellen die Baugrundklassen dar	60
Abbildung 60: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 100. A und B stellen die Baugrundklassen dar	60
Abbildung 61: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 200. A und B stellen die Baugrundklassen dar	61
Abbildung 62: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 400. A und B stellen die Baugrundklassen dar	61
Abbildung 63: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 50. A und B stellen die Baugrundklassen dar	62
Abbildung 64: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 100. A und B stellen die Baugrundklassen dar	62
Abbildung 65: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 200. A und B stellen die Baugrundklassen dar	63
Abbildung 66: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 400. A und B stellen die Baugrundklassen dar	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einzel stehende WKAs (WKA 1-15).....	14
Tabelle 2: Einteilung der Baugrundklassen A, B und C nach dem EUROCODE 8 (2010)	46
Tabelle 3: Parameter zur Definition von Schutzradien.	65

Abkürzungsverzeichnis

A	Amplitude
α	geometrische Amplitudenabnahme
β	Dämpfungskoeffizient
C0	WKA-spezifischer Faktor
CA	Abklingkoeffizient
CE	Emissionskoeffizient
CLL	Collm Observatorium
cm ³	Kubikzentimeter
d	Schichtmächtigkeit
dB	Dezibel
f	Frequenz
FBE	Freiberg
fP	Peakfrequenz
F(v)	Funktion der Windgeschwindigkeit
g	Gramm
GIPP	Geophysical Instrument Pool Potsdam
GFZ	Geoforschungszentrum
GRZ1	Greiz
Hz	Hertz
ICT	Institut für Chemische Technologie
km	Kilometer
Lat	Latitude
Long	Longitude
MW	MegaWatt
NLNM	New Low Noise Model
NHNM	New High Noise Model
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, probability density function
PSD	spektrale Leistungsdichte, power spectral density
PSDGrenz	Grenzwert
Q	Dämpfungsparameter
ρ	Dichte
ROHR	Rohrbach
rpm	Rotorumdrehungen pro Minute
s	Sekunde
SCHF	Schönfels
SXNET	Sachsennetz
t	Zeit
TANN	Tannenbergesthal
v	Windgeschwindigkeit
vP	Primärwellengeschwindigkeit
vs	Scherwellengeschwindigkeit
vr	Referenzwindgeschwindigkeit
Vs30	mittlere Scherwellengeschwindigkeit der obersten 30 m
WEA	Windenergieanlage
WERN	Wernitzgrün
WKA	Windkraftanlage
WP	Windpark
x	Entfernung
xr	Referenzentfernung

1 Einleitung

Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien (z. B. Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Photovoltaik) ist die Zahl der Windkraftanlagen (WKA) und Windparks (WP) an Land in Deutschland seit dem Jahr 2000 von 9300 WKAs auf über 29000 WKAs (Stand: 2019) gestiegen (WindGuard GmbH). WKAs wandeln kinetische, durch das Wellenfeld erzeugte Energie in elektrische Energie um. Dies ist grundsätzlich ein guter Ansatz zur Erzeugung von „sauberer“ Energie, kann jedoch durch die Emissionen der WKAs zu Konflikten mit sensiblen Messgeräten, wie beispielsweise seismischen Sensoren führen.

WKAs emittieren mechanische Schwingungsenergie in den Erdboden, die sich als seismische Wellen ausbreitet und das natürliche vorhandene seismische „Bodenrauschen“ bis in mehrere Kilometer Entfernung von der WKA signifikant erhöhen kann. Da einige der Standorte für seismologische Stationen auch für die Installation von WKAs geeignet sind (Neuffer und Kremers, 2017), beeinflusst der WKA-Betrieb die Datenqualität dieser seismologischen Stationen in ihrer Nähe.

Insbesondere der Frequenzbereich zwischen 1-20 Hz ist für die Detektion und Analyse lokaler seismischer Ereignisse wesentlich. Dadurch können seismische Signale innerhalb dieses Frequenzbereiches nicht mehr vor dem Hintergrund des erhöhten Störrauschpegels identifiziert werden. Abbildung 1 zeigt die in früheren Studien identifizierten Peakfrequenzen, die durch den Betrieb von WKAs betroffen sind. Deutlich sichtbar ist eine große Streuung der WKA-induzierten Peakfrequenzen innerhalb des Frequenzbereichs zwischen 1-10 Hz.

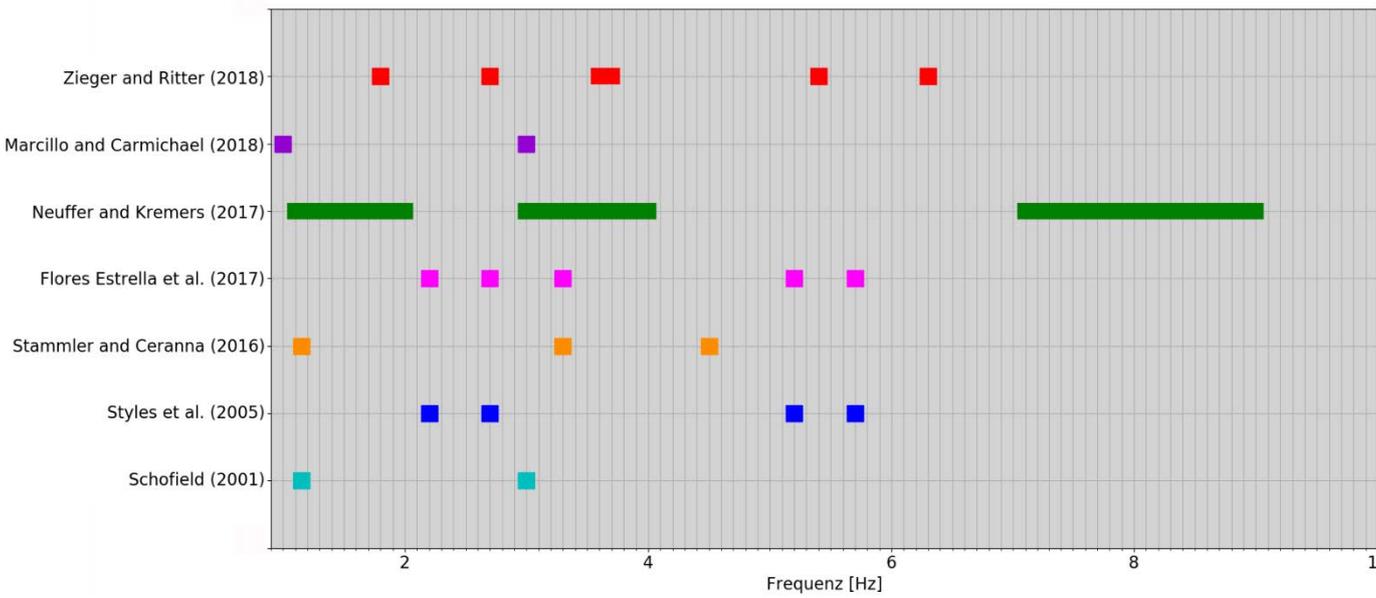


Abbildung 1: Frequenzbereiche mit starken WKA-Immissionen

Die Wirkungskette zwischen einer WKA und einer seismologischen Station (Abbildung 2) lässt sich vereinfacht in drei Faktoren untergliedern, die unabhängig voneinander zu bewerten sind (Saccorotti et al., 2011; Stammler and Ceranna, 2016; Flores Estrella et al., 2017a,b; Neuffer and Kremers, 2017):

Schwingungsemission der WKA im seismisch relevanten Frequenzbereich (1-10 Hz),

Ausbreitungsverhalten der seismischen Wellen im oberflächennahen Untergrund,

daraus resultierend eine entfernungsabhängige Erhöhung des seismischen Bodenrauschens im Vergleich zum natürlich vorhandenen mittleren Rauschpegel.

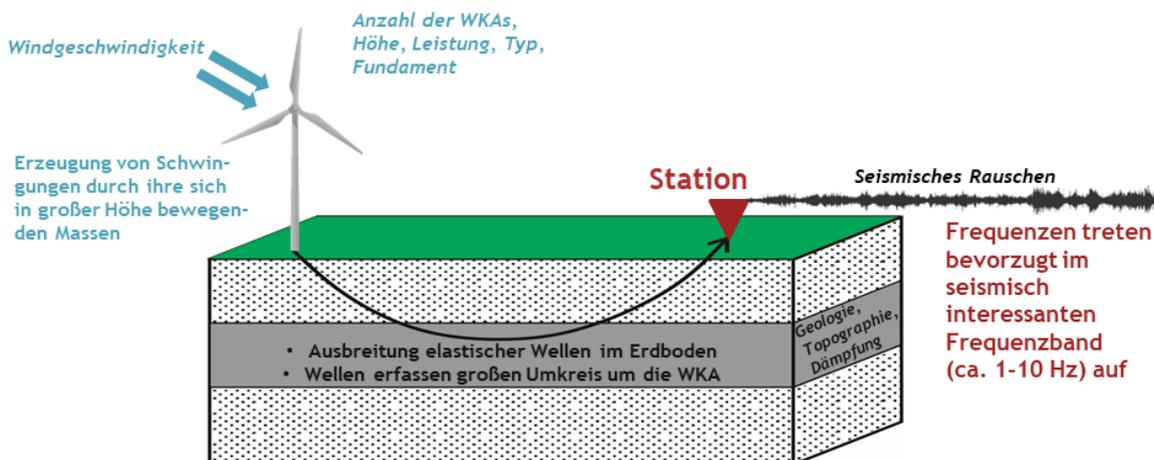


Abbildung 2: Wirkungskette WKA – seismologische Station

Damit gewährleistet ist, dass die Erdbebenüberwachung seismologischer Stationen nicht unzumutbar durch den Betrieb von WKAs gestört wird, ist es wichtig für existierende seismologische Stationen einen Schutzradius zu definieren, innerhalb dessen keine neuen WKAs errichtet werden sollten.

1.1 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines einfachen und schematischen Bewertungsverfahrens, um Schutzradien unter der Berücksichtigung geologischer Begebenheiten sowie verschiedener WKA-Typen erstellen zu können. Hierfür wurden verschiedene einzeln stehende WKAs für seismische Messungen ausgewählt, um die Abstrahlcharakteristik und das entfernungsabhängige Amplitudenabklingen WKA-induzierter seismischer Wellen quantifizieren zu können. Zudem wurden synthetische Modellrechnungen zum untergrund- und frequenzspezifischen Abklingverhalten durchgeführt, um abhängig von WKA-Typen und standortbezogenen Faktoren individuelle Schutzradien um seismologische Stationen definieren zu können, die in den Planungsphasen neuer WKAs berücksichtigt werden sollten.

1.2 Strategie zur Definition von Schutzradien

Die nachweislich durch den WKA-Betrieb hervorgerufenen Frequenzbänder mit hoher Amplitude lassen sich zur Definition von distanzabhängigen Abklingkurven verwenden.

Zur Definition eines Schutzradius ist ein Berechnungsverfahren entwickelt worden, das sich wie folgt in drei Teile untergliedern lässt:

1. Die mittlere spektrale Leistungsdichte $PSD(f_p, x)$ (PSD, *power spectral density*) beschreibt eine Rauschleistung in einer Entfernung x von der WKA. Die spektrale Leistungsdichte stellt die auf die Frequenz bezogene Leistung eines Signals dar und wird in dB/Hz angegeben. Da dB eine logarithmische Einheit ist, setzt sich die mittlere spektrale Rauschleistung bei einer Peakfrequenz f_p aus der Summe folgender drei Koeffizienten zusammen:

$$PSD(f_p, x) = C_E(f_p, v_r, x_r) + F(v) + C_A(f_p, x)$$

- i.* C_E bezeichnet den Emissionskoeffizienten. Dieser hängt von der Bauart der WKA, Nabenhöhe, Rotorbauart, Leistung, dem Fundament und anderen konstruktiven Gegebenheiten ab. Der Emissionskoeffizient C_E wird z. B. in einer Referenzentfernung x_r vom Aufstellort und bei einer festgelegten Windgeschwindigkeit v_r definiert.
 - ii.* $F(v)$ ist eine Funktion der Windgeschwindigkeit und erhöht sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Es gilt $F(v_r) = 0$.
 - iii.* C_A beschreibt die Abnahme der spektralen Amplitude mit zunehmender Entfernung zur WKA. Sie ist abhängig von den Ausbreitungsbedingungen der seismischen Wellen im Untergrund. C_A wird so normiert, dass $C_A(f_p, x_r) = 0$ ist.
2. Zur Definition eines Schutzradius um eine seismologische Station muss ein Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_p)$ für eine seismologische Station definiert werden, der als ein maximal tolerierbares Effektivrauschen gilt. Dieser kann in Abhängigkeit des natürlich vorhandenen Bodenrauschens an der jeweiligen seismologischen Station festgelegt werden.
3. Der Schutzradius um die seismologische Station ist mit der Bedingung erfüllt, wenn die zuvor definierte mittlere spektrale Rauschleistung der WKA ab einer Entfernung x_s geringer ist, als das maximal tolerierbare Effektivrauschen an der seismologischen Station. Dabei gilt:

$$PSD(f_p, x_s) < PSD_{Grenz}(f_p)$$

Ist diese Bedingung erfüllt und somit der Schutzradius eingehalten, ist gewährleistet, dass die Datenaufnahme einer seismologischen Station ohne wesentlichen Einfluss WKA-induzierter seismischer Signale erfolgen kann.

2 Messobjekte

2.1 Windkraftanlagen in Sachsen

Die Verteilung der WKAs in Sachsen und der Permanentstationen des seismologischen Sachsenetzes (SXNET) zeigt eindeutig eine Koexistenz zwischen WKAs und Permanentstationen (Abbildung 3). Dies wird in Abbildung 4 verdeutlicht, in der für jede Station des SXNET die Anzahl und Distanz aller WKAs bis zu einer Maximalentfernung von 15 km dargestellt wird. So beträgt derzeit für die seismologische Permanentstation Collm (CLL) die minimale Entfernung zu einer WKA 7.17 km bei einer Anlagen-Leistung von 0.6 MW. Insgesamt befinden sich 71 WKAs innerhalb eines Radius von 15 km um die Station CLL. Die aktuell geringste Entfernung zwischen einer modernen 2.0 MW-Anlage und einer Permanentstation liegt bei der seismologischen Station Freiberg (FBE) vor und beträgt 3.6 km. Um die Station Schönfels (SCHF) stehen derzeit 21 WKAs mit einem Mindestabstand von 4 km. Bei den weiteren seismologischen Stationen Rohrbach (ROHR), Tannenbergsthal (TANN) und Wernitzgrün (WERN) gibt es aktuell keine WKAs innerhalb eines Radius von 15 km.

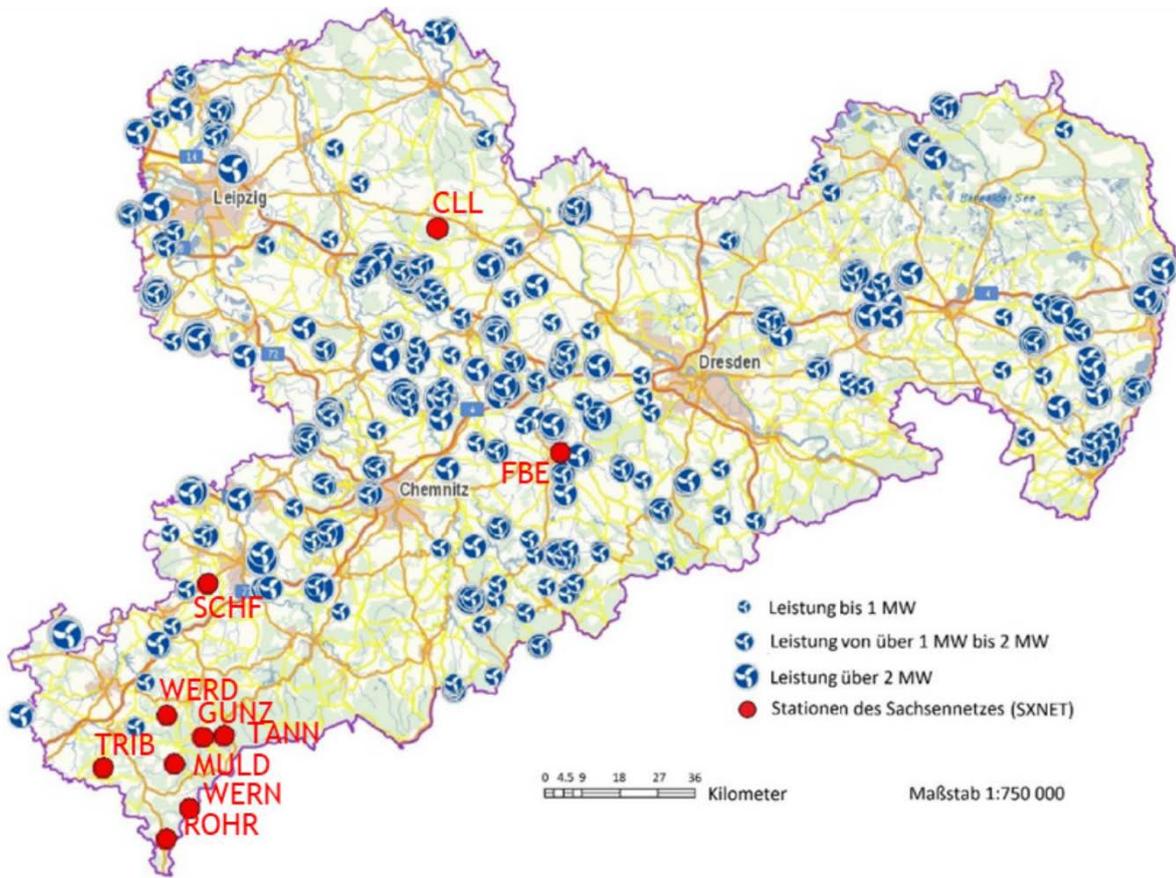


Abbildung 3: Verteilung der WKAs in Sachsen und der Permanentstationen des SXNET

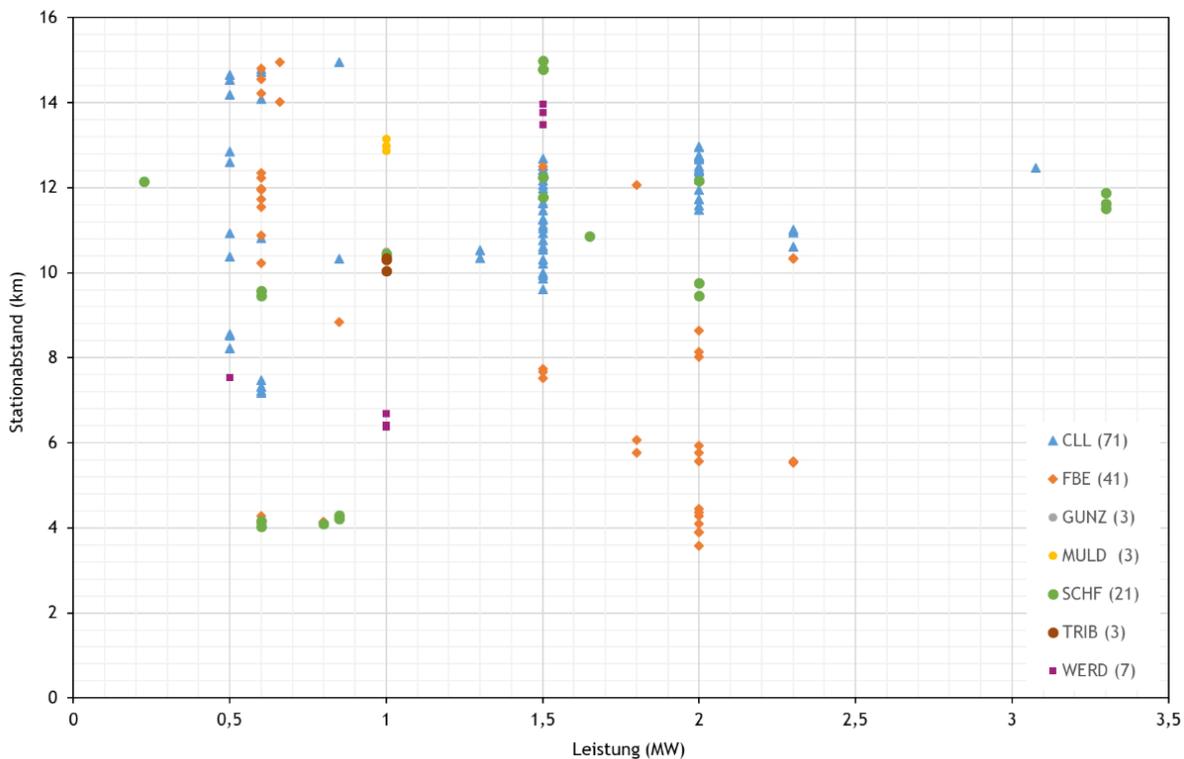


Abbildung 4: Auflistung der WKAs in Sachsen mit einer Mindestleistung von 0.5 MW bis zu einer Entfernung von 15 km zu den Permanentstationen des SXNET

Aktuell ist auf Grund der bisher großen Distanzen der WKAs zu den Stationen des SXNET von einer nur geringen Beeinträchtigung des SXNET durch WKAs auszugehen. Da jedoch die Standorte für seismologische Stationen häufig auch für die Installation von WKAs geeignet sind (Neuffer und Kremers, 2017), kann sich der Konflikt zukünftig verschärfen und macht eine Einrichtung von Schutzradien erforderlich.

2.2 Vorläufige Messobjekte

Im Vorfeld des Projekts wurden bereits seismische Messkampagnen an drei Windparks (WP) durchgeführt (Flores-Estrella et al., 2017a,b). Es handelt sich um die Windparks Neumark-Beiersdorf (5 WKAs), Zodel (11 WKAs) und Heinde (2 WKAs) (Abbildung 5).

Der WP Neumark-Beiersdorf befindet sich in der Nähe von Zwickau zwischen den Ortschaften Beiersdorf und Neumark. Er wurde als Messobjekt ausgewählt, da er sich in der Nähe der seismologischen Permanentstationen SCHF (SXNET) und Greiz (GRZ1, Thüringennetz) befindet. Der Windpark besteht aus 5 WKAs unterschiedlicher Bauart. Die Leistungen dieser WKAs liegen zwischen 0.6 MW und 0.85 MW.

Der Windpark Zodel befindet sich im östlichen Sachsen auf dem Gebiet der Gemeinde Neißeau, nördlich der Bundesautobahn A4 und ca. 2 km von der Grenze zur Republik Polen entfernt. Er besteht aus 11 WKAs, die in drei Reihen in nahezu Ost-West-Richtung errichtet wurden. Die nördlichen zwei Reihen beinhalten je vier 1.5 MW-Anlagen, die südlichen drei WKAs haben eine Leistung von je 2.3 MW (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2013).

Der Windpark Heinde in Niedersachsen befindet sich 30 km südöstlich von Hannover in der Gemeinde Bad Salzdetfurth in der Nähe des Ortes Heinde. Dort stehen zwei identische WKAs mit einer Maximalleistung von 3.0 MW. Der Abstand zwischen den beiden Anlagen beträgt ca. 300 m. Nördlich der WKAs verläuft in etwa 800 m Entfernung die Autobahn A7 und westlich die Landstraße L492. Die Umgebung von Heinde besteht hauptsächlich aus landwirtschaftlich genutzten Flächen, gefolgt von bewaldeten Gebieten, während der geringste Teil Siedlungs- und Verkehrsfläche ausmacht.



Abbildung 5: Lage des WP Neumark-Beiersdorf, WP Zodel und WP Heinde

Ergebnisse dieser seismischen Messkampagnen konnten WKA-induzierte Frequenzpeaks identifizieren sowie ein Amplitudenabklingverhalten dieser WP-induzierten seismischen Wellen mit der Entfernung beobachten (Flores-Estrella et al., 2017a,b). Die Ergebnisse dieser Studien dienen als Grundlage für die seismischen Messungen dieses Forschungsprojektes zur Abstrahlcharakteristik einzeln stehender WKAs.

2.3 Auswahl der Messobjekte

Die Auswahl der Messobjekte erfolgte unter der Berücksichtigung verschiedener Kriterien. So sollten die WKAs einzeln stehen und einen Mindestabstand von 2 km zu weiteren WKAs besitzen sowie eine Mindestleistung von 0.5 MW aufweisen. Zudem wurde darauf geachtet, dass die WKAs möglichst fern von anthropogenen Gebieten stehen sowie einen Mindestabstand von 2 km zu Autobahnen besitzen, sodass Störeffekte durch Verkehr oder Bauarbeiten minimiert werden können. Weiterhin sollten Betriebsdaten der WKA-Betreiber wie Stillstandzeiten, Leistungsangaben bzw. Rotordrehzahlen und lokale Windgeschwindigkeitsangaben in Nabenhöhe zur Verfügung gestellt werden.

Die WKAs in Sachsen, die diesen Anforderungen entsprechen, sind in Tabelle 1 (WKA1-WKA14) gelistet. Abbildung 6 zeigt die Standorte dieser WKAs sowie deren Leistung, die in Abhängigkeit der Symbolgröße skaliert wurde. Der Leistungsbereich der ausgewählten WKAs liegt zwischen 0.5 MW und 2.0 MW.

Weiterhin wurde der Kontakt zu einer WKA bei Pfinztal (Baden-Württemberg) hergestellt (Tabelle 1, WKA 15). Diese wird vom Fraunhofer Institut für Chemische Technologie betrieben und zu Forschungszwecken bezüglich der Speicherung der durch die WKA erzeugten Energie benutzt. Zudem wurde eine Messkampagne an einem WP in der Nähe von Freiberg durchgeführt (Tabelle 1, WKA 16). Dieser WP besteht aus sieben WKAs, die jeweils eine Maximalleistung von 2.0 MW besitzen. Schriftliche Anfragen an die jeweiligen Betreiber zur Überlassung von Betriebsdaten wurden negativ oder gar nicht beantwortet. Lediglich für die WKA Pfinztal wurden diese Daten zur Verfügung gestellt.

Tabelle 1: Einzeln stehende WKAs (WKA 1-15). WKA 16 zeigt die Koordinaten des WPs bei Freiberg. Die grün hinterlegten Tabellenzellen zeigen die WKAs, an denen Messkampagnen durchgeführt wurden.

WKA	Long	Lat	Behörde	Betreibername	Gesamthöhe [m]	Rotordurchmesser [m]	Leistung [MW]	Distanz zur nächsten WKA	Anlagenbezeichnung
1	14.57	51.08	LRA Görlitz	BOREAS Energieanlagen Betriebs GmbH	87	44	0.5	7.86	-
2	13.19	50.69	LRA Erzgebirgskreis	WEA Niederlauterstein Windkraft Niederlauterstein Schönherr u. Hengst OHG	73	39	0.5	2.82	-
3	12.77	50.64	LRA Erzgebirgskreis	Herr Ralf Schiek	83	40	0.5	6.23	WEA Lenkersdorf
4	13.29	50.74	LRA Mittelsachsen, Niedersaida	WEA Niedersaida Windkraft Arndt Helbig	63	40	0.5	3.13	-
5	12.	50.5	LRA	Entsorgung-	59	41	0.5	7.52	WEA Typ

	25	0	Vogtlandkreis	und Aufbereitungsg esellschaft mbH Zobes						NetWind 40 40-500-21-1-2
6	14. 73	51.5 0	LRA Görlitz	Wilfried Ceglarski, Alphatek Schaltschrank- systeme	94	48	0.6	22.67	-	
7	14. 86	50.9 7	LRA Görlitz	Hans-Jürgen Kunack	100	58	0.85	2.18	-	
8	13. 25	50.9 7	LRA Mittelsachsen	Wolfgang Fröbe	99	52	0.85	2.27	WEA Vestas V52	
9	12. 94	51.0 0	LRA Mittelsachsen	Energieanlagen Frank Bündig GmbH	91	52	0.85	2.03	WEA Vestas V52	
10	12. 31	50.6 0	LRA Vogtlandkreis	Ingenieurbüros Gumbert und Bergert	96	58	1	4.04	WEA Typ Enercon E 58	
11	13. 05	50.8 9	LRA Mittelsachsen	Energieanlagen Frank Bündig GmbH	100	70	1.5	7.41	WEA 3 Wp Erlau (Mühlbach)	
12	13. 13	50.7 6	LRA Erzgebirgskrei s, Waldkirchen	Egon Fischer	100	70	1.8	5.87	WEA E- 66/18.70	
13	14. 21	51.2 1	LRA Bautzen	Bau- und Umwelttechnik GmbH	141	82	2	2.23	MM 82	
14	13. 28	50.9 8	LRA Mittelsachsen	Windkraft Großvoigtsberg GmbH & Co. KG	99.5	71	2	2.27	WEA Großvoigtsber g	
15	8.5 2	49.0 2	Pfingsttal	Fraunhofer ITC Großprojekt „RedoxWind“	101	82	2	-	Qreon Q82	
16	13. 34	50.9 7	Freiberg	-	100	70	7*2		MM82	

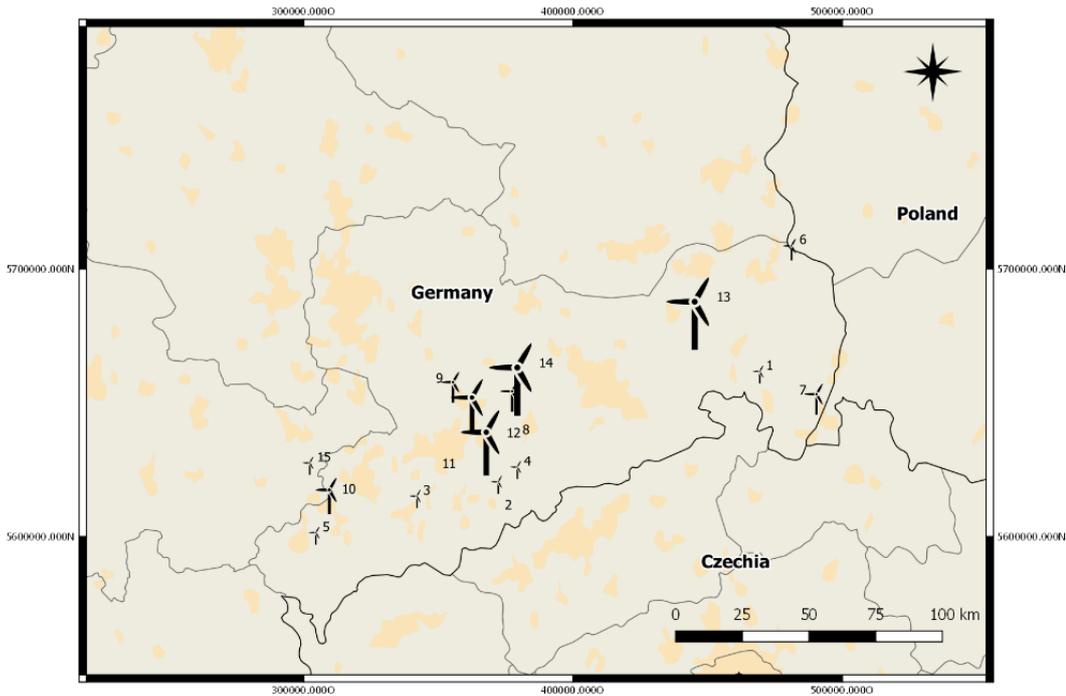


Abbildung 6: Verteilung der einzeln stehenden WKAs in Sachsen. Die Symbolgröße entspricht der WKA-Leistung zwischen 0.5 MW und 2.0 MW. Die Nummerierung entspricht den Messobjekten in Tabelle 1

2.4 Messkonfiguration

Die Messungen werden mit den Geometrien in Abbildung 7 durchgeführt. Die kreisförmigen Messauslagen dienen vor allem der Bestimmung der Schwingungsemission der WKA im Nahfeld. Hierbei wurde eine kreisförmige Messauslage gewählt, deren Radius etwa der Nabenhöhe der jeweiligen WKA entsprechen sollte. Zudem werden Profilmessungen durchgeführt, die der Bestimmung des entfernungsabhängigen Abklingverhaltens der seismischen Wellen dienen. Die Länge der Profile wurde auf einige Kilometer festgelegt, abhängig von den örtlichen Gegebenheiten im Gelände. Da insgesamt 19 Messgeräte zur Verfügung stehen, können beide Messkonfigurationen simultan realisiert werden.

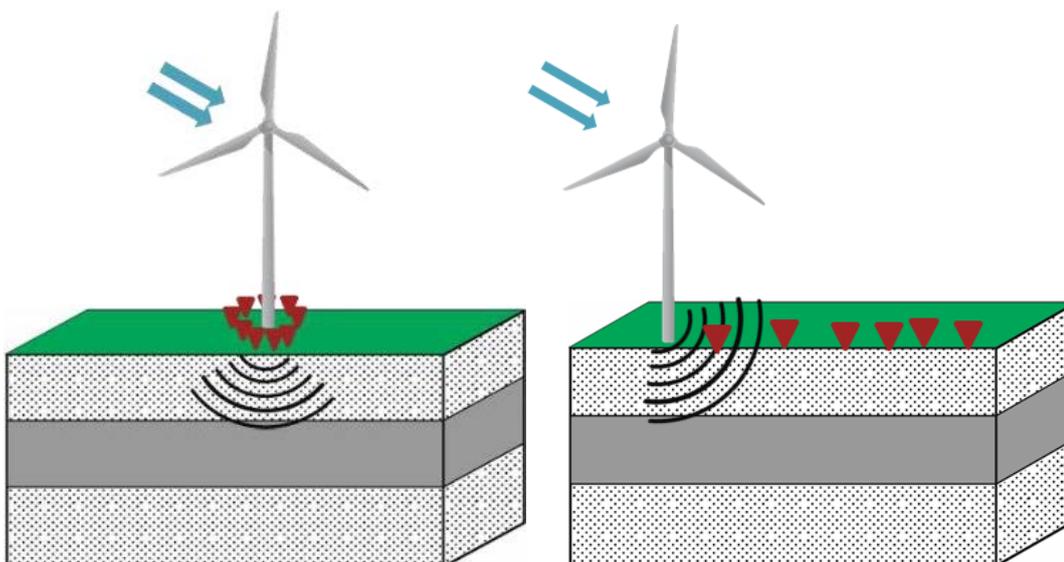


Abbildung 7: Messkonfigurationen für die Messkampagnen an den einzeln stehenden WKAs, bestehend aus Ringmessungen (links) und Profilmessungen (rechts)

3 Messgeräte



Abbildung 8: Für die Messkampagnen genutzte Sensoren (links) und Datenlogger (rechts)

Bei den vorherigen Messkampagnen an den WPs sind im Vorfeld des Projektes seismische Instrumente von unterschiedlichen Herstellern eingesetzt worden, die zudem unterschiedliche Übertragungscharakteristiken hatten, was eine umfangreiche Nachbearbeitung der Daten erforderte. Daher wurden für die Messungen innerhalb des laufenden Projektes 12 Geräte des Typs DataCube der Firma Omnirecs zusammen mit 12 PE-6/B Drei-Komponenten Geophonen mit einer Eigenfrequenz von 4.5 Hz der Marke Sensor Nederlands (Abbildung 8) für einen Zeitraum von 12 Monaten gemietet. Zusammen mit an der Universität Leipzig vorhandenen Instrumenten des gleichen Typs können somit bis zu 19 identische Geräte eingesetzt werden. Die Mietgeräte wurden im April 2018 übernommen.

3.1 Testmessung

Alle einzusetzenden Geräte wurden zunächst einer seismischen Testmessung am Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig unterzogen. Dabei wurde etwa eine Stunde mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet. In Abbildung 9 ist der räumliche Aufbau der Testmessung zu sehen. Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Zeitsignale der Vertikalkomponenten, in Abbildung 11 werden die spektralen Leistungsdichten (PSD) der einzelnen Geräte für alle drei Komponenten (Vertikal-, Nordsüd- und Ostwest-Komponente) verglichen. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung aller Aufzeichnungen, so dass von einer korrekten Funktion und einer gleichen Kalibrierung der seismischen Instrumente ausgegangen werden kann.

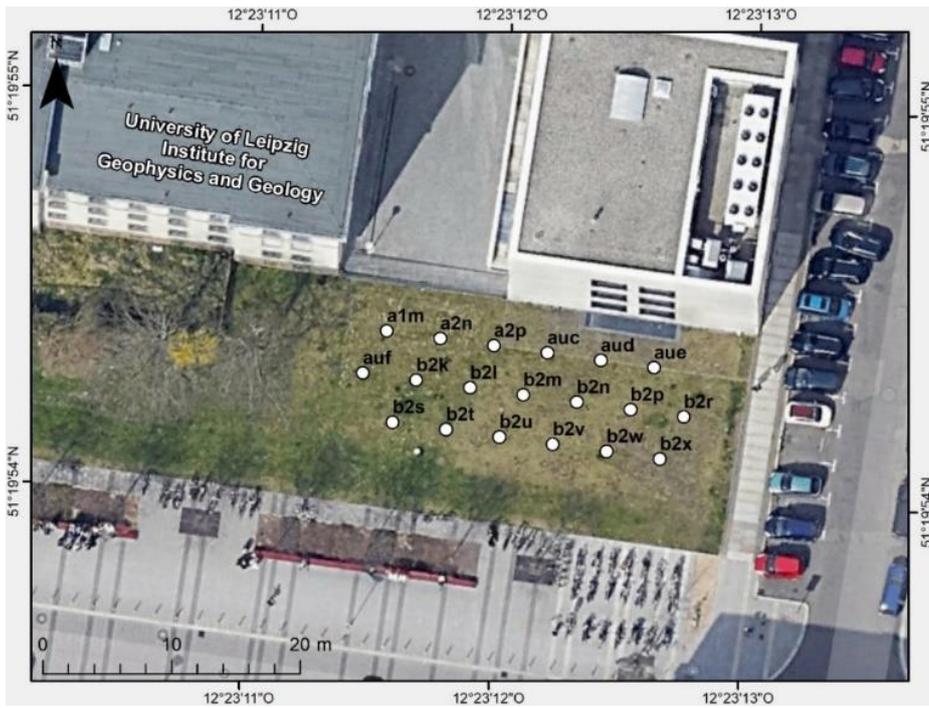


Abbildung 9: Testmessung der DataCubes und Geophone beim Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig am 08.05.2018

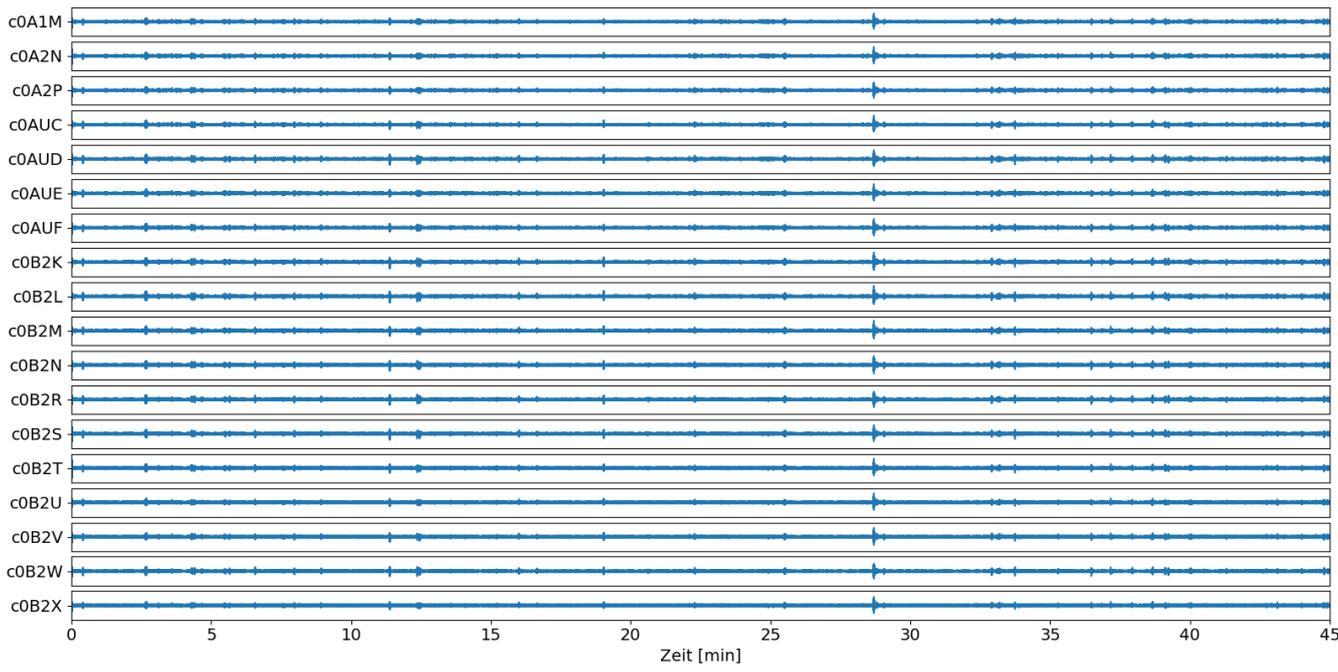


Abbildung 10: Seismogramme der Vertikalkomponenten der Testmessung

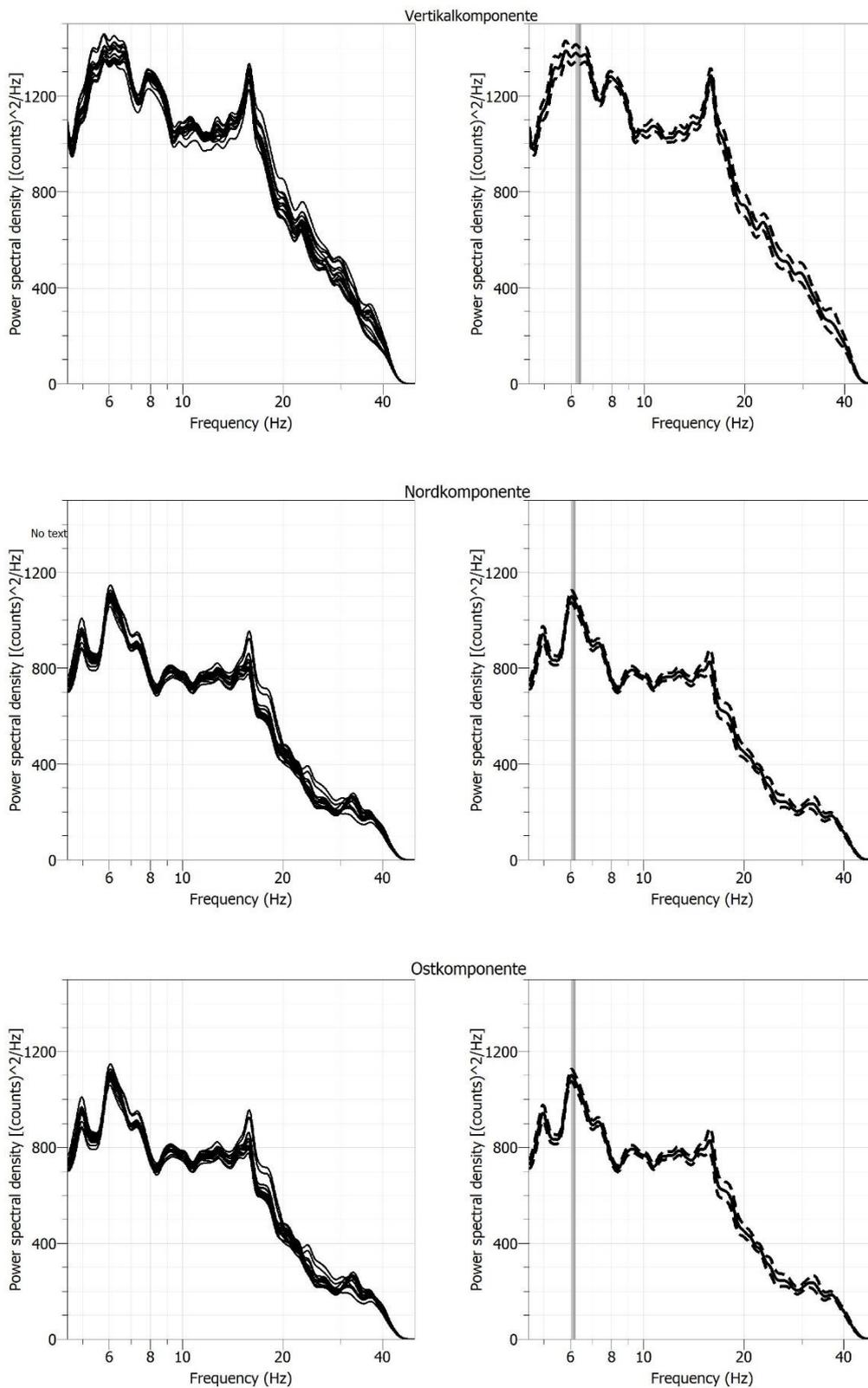


Abbildung 11: Links: PSD für jede Station und Komponente. Rechts: Mittelwert und Standardabweichung (gestrichelte Linie) der PSDs für jede Komponente sowie die Maximalamplitude für jeden Mittelwert (graue Linie)

3.2 Vorprozessierung

Die Datensätze aller Messkampagnen wurden gleichermaßen vorprozessiert. So wurde die Instrumentenantwort restituiert, um die wahre Bodengeschwindigkeit erhalten zu können. Da die Geophone eine Eigenfrequenz von 4.5 Hz haben, unterhalb derer keine korrekten Amplituden dargestellt werden können, die Peakfrequenzen der WKA-induzierten seismischen Signale allerdings hauptsächlich zwischen 1-10 Hz (vgl. Abbildung 1) und somit teilweise unterhalb der gerätespezifischen Eigenfrequenz liegen, wurden alle Datensätze nach der jeweiligen Messkampagne einheitlich mit Hilfe eines Simulationsfilters in ein Gerät mit einer Eigenfrequenz von 1 Hz umgerechnet. Abbildung 12 zeigt PSDs einer Station aus der Testmessung ohne und nach Anwendung des 1 Hz-Simulationsfilters. Dabei ist zu erkennen, dass die Amplituden nach der Anwendung des Simulationsfilters bis zu etwa 1 Hz stabil sind, wohingegen die Amplituden ohne Simulationsfilter ab der gerätespezifischen Eigenfrequenz von 4.5 Hz abfallen.

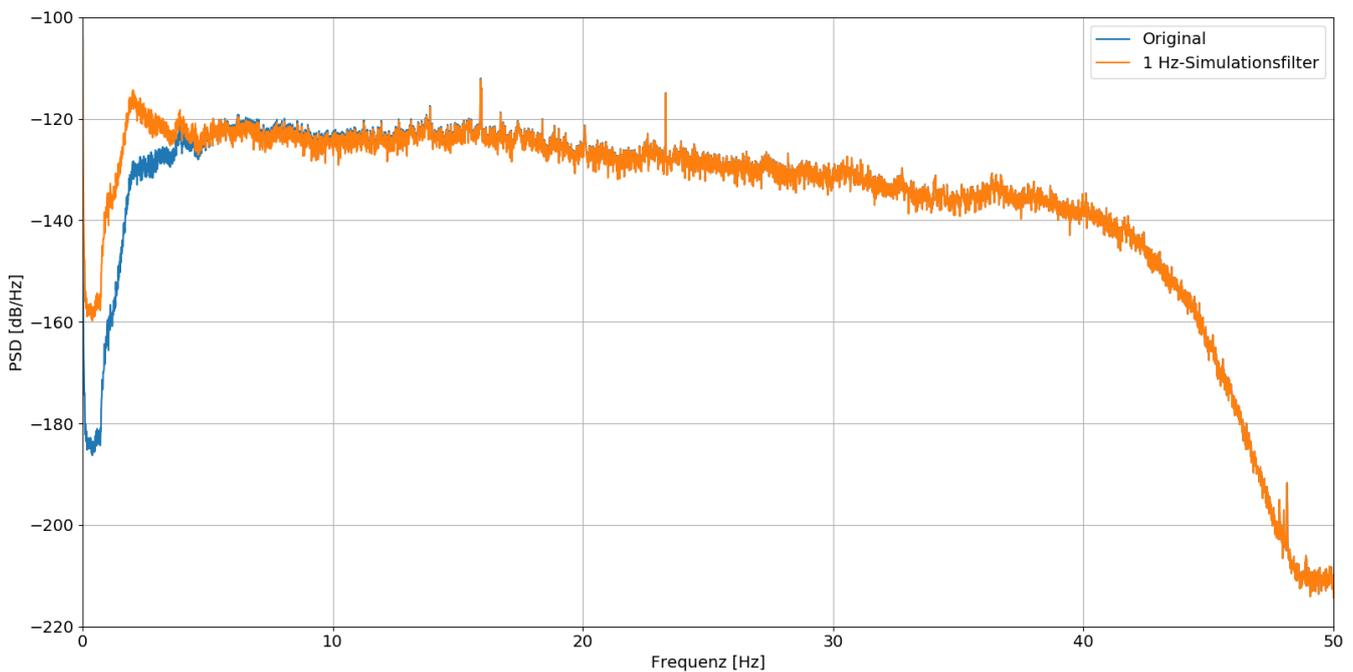


Abbildung 12: Vergleich eines Datensatzes mit (orange) und ohne Anwendung (blau) des Simulationsfilters

4 Seismische Messungen

4.1 WKA Niedersaida

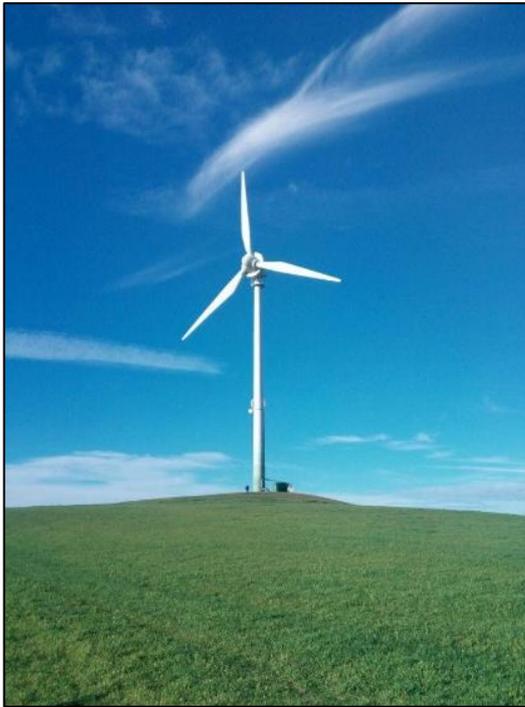


Abbildung 13: Windkraftanlage bei Niedersaida

Das Messobjekt (Tabelle 1, WKA 4) liegt etwa einen Kilometer von Niedersaida und ca. 75 m von der Bundesstraße 101 entfernt. Dieses Messobjekt wurde nachträglich als Ersatz der ursprünglich vorgesehenen, jedoch nicht mehr existierenden WKA bei Niederlauterstein (Tabelle 1, WKA 2) gewählt. Die WKA besitzt eine Nabenhöhe von 63 m sowie einen Rotordurchmesser von 40 m und hat eine Maximalleistung von 0.5 MW (Abbildung 13). Die Messkampagne dauerte vom 12.-15. November 2018. Insgesamt wurden 18 Stationen aufgebaut und seismische Daten mit einer Abtastrate von 100 Hz registriert.

Für die Ringmessung wurde auf Grund der Nähe zur Bundesstraße 101 (ca. 75 m) ein Halbkreis mit fünf Stationen aufgebaut (Abbildung 14). Der ungefähre Radius des Halbkreises beträgt 70 m. Zudem wurden zwei Profile in Südsüdost- (Profil B) und Ost-Richtung (Profil C) aufgebaut. Profil B besteht aus 7 Stationen mit einer Länge von 3 km und Profil C besteht aus 6 Stationen mit einer Länge von 2.8 km (Abbildung 14). Während der Messkampagne stellte sich heraus, dass zwar die nächstgelegene WKA ca. 3.5 km von diesem Messobjekt entfernt ist, diese allerdings zu einem WP bestehend aus 25 WKAs gehört (Abbildung 15). Dadurch stellte sich diese WKA wegen ihrer Nähe zum WP als kein ideales Messobjekt zur Bestimmung des Abklingverhaltens heraus.

4.1.1 Untersuchungsgebiet

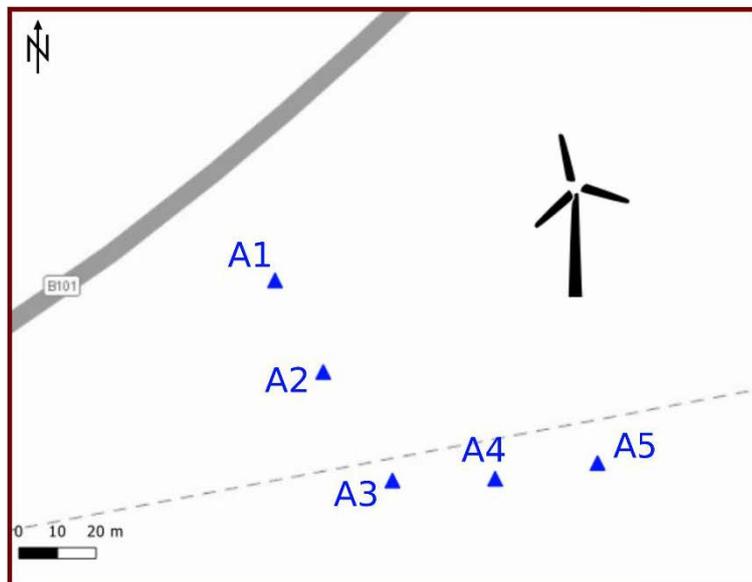
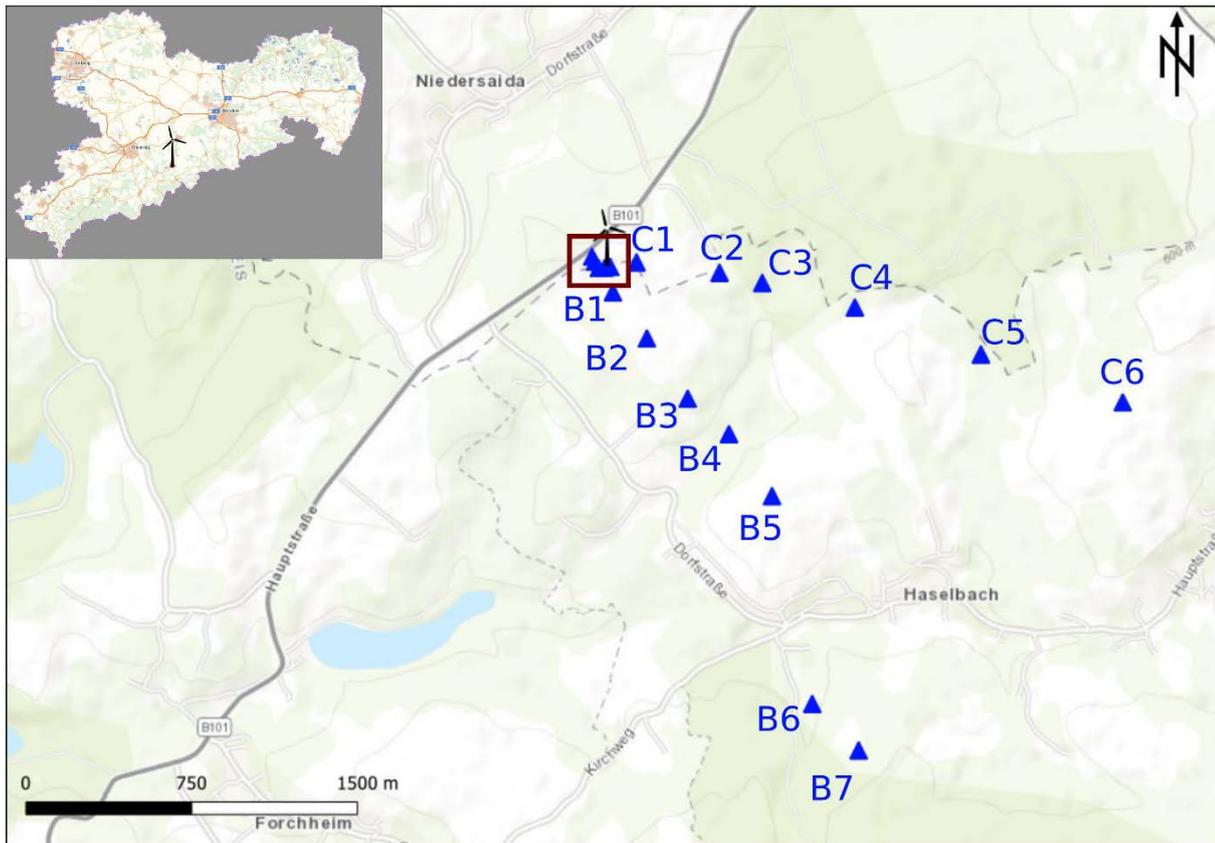


Abbildung 14: Übersichtskarte der Messkampagne. oben: Übersicht über die Profilmessungen. Profil B verläuft in Südsüdöstlicher-Richtung (B1-B7). Profil C verläuft in Westlicher-Richtung (C1-C7). unten: Aufbau der Ringmessung um die WKA (A1-A5)

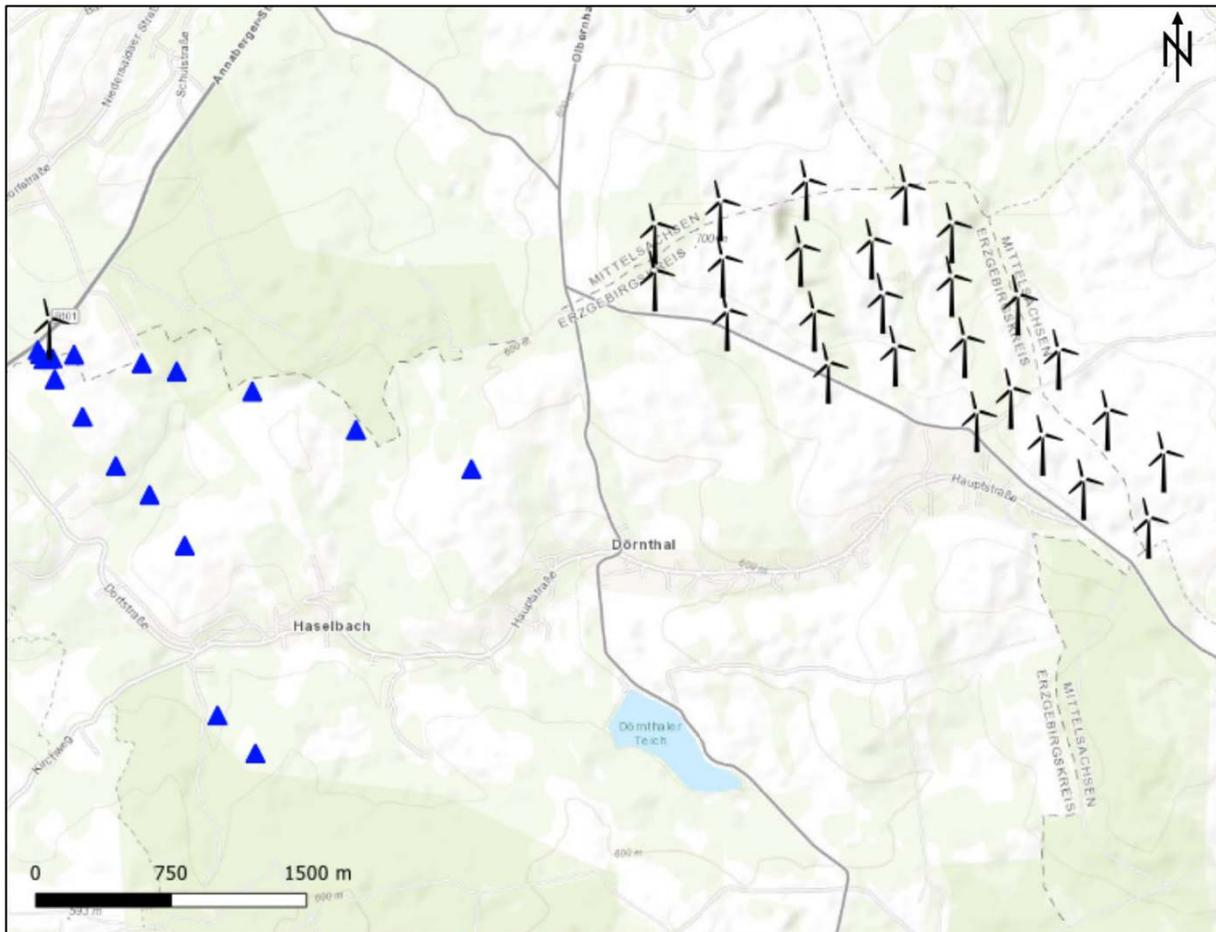


Abbildung 15: Standort des etwa 3.5 km entfernten Windparks

4.1.2 Frequenzpeaks f_p

Abbildung 16 zeigt ein Spektrogramm der Station A4 (vgl. Abbildung 14) über zwei Tage. Die vertikalen Bänder erhöhter Energie sind dem Verkehr der etwa 75 m entfernten Bundesstraße 101 zuzuschreiben. Zusätzlich sind jedoch horizontale schmale Frequenzbänder zu erkennen, die der Aktivität der WKA zugeordnet werden können. Auf Grund des ca. 3.5 km entfernten WPs ist jedoch davon auszugehen, dass diese Frequenzbänder von den WP-induzierten seismischen Wellen ausgehen. Auf Grund fehlender spezifischer WKA-Daten können keine spezifischen Betriebszeiten der WKA betrachtet werden, womit eine eindeutige Zuordnung der Frequenzpeaks zur Anlage möglich gewesen wäre.

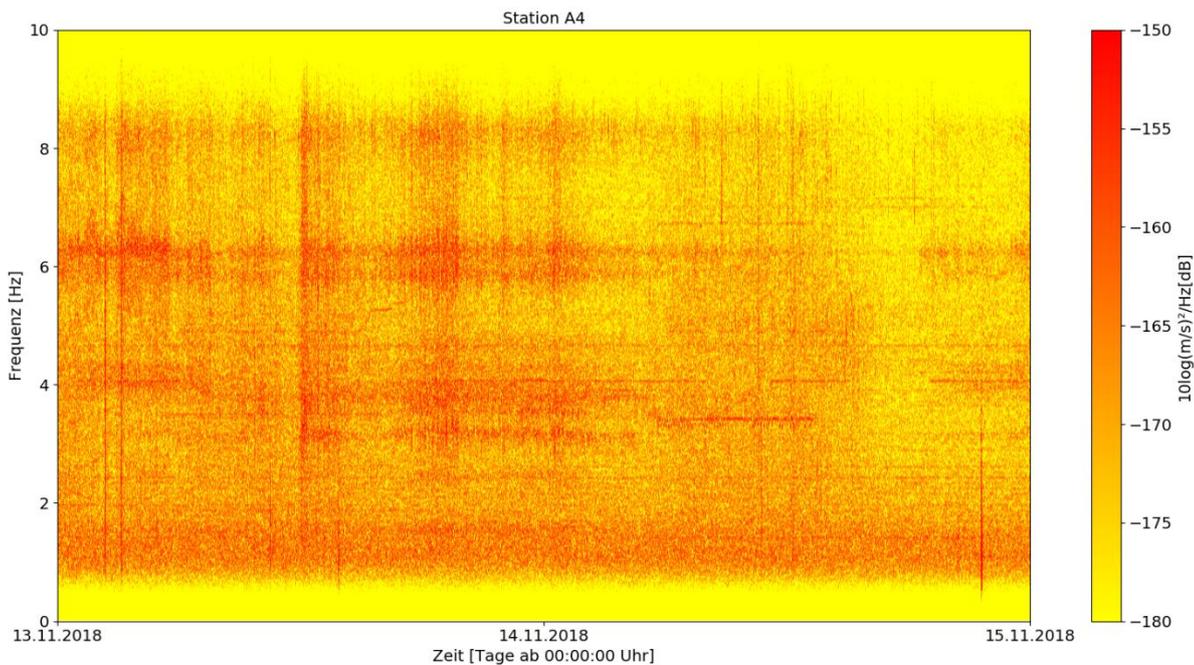


Abbildung 16: Spektrogramm der Station A4 vom 13.-15. November 2018

Zur genaueren Betrachtung der Frequenzpeaks sind die seismischen Signale der Ringmessung in einminütige Zeitsegmente geteilt und für jedes Zeitsegment ein PSD-Wert berechnet worden. Daraufhin sind die PSDs mit Hilfe des 75 %-Quantils gemittelt worden. Das 75 %-Quantil gibt den Wert an, für den gilt, dass 75 % aller Werte geringer sind. Dies verhindert eine Verzerrung der Mittelung durch Ausreißer und minimiert den Einfluss von Anomalien. Die Mittelung der PSDs zeigt eindeutige Frequenzpeaks bei 1.4 Hz, 2.4 Hz, 4.1 Hz, 4.6 Hz, 6.2 Hz und 8.3 Hz (Abbildung 17). Diese stimmen mit den in früheren Arbeiten identifizierten WKA-Frequenzpeaks überein (z. B. Schofield, 2010; Stammer und Ceranna, 2016; Flores-Estrella et al., 2017a; Zieger & Ritter, 2018), lassen sich aber durch fehlende WKA-Betriebsdaten nicht eindeutig der WKA zuordnen.

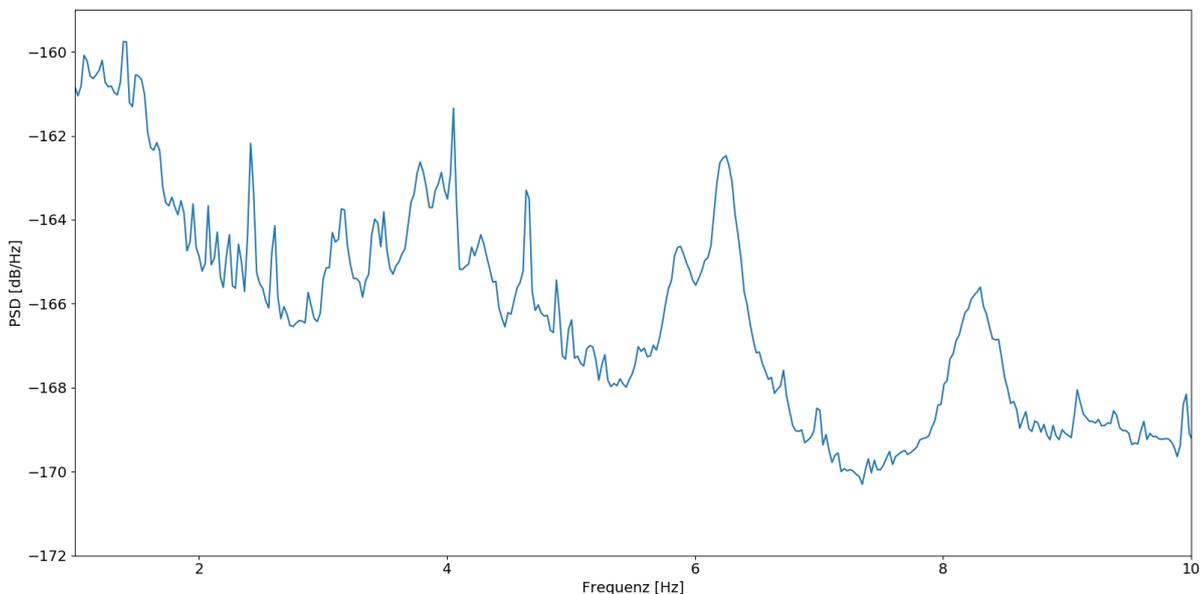


Abbildung 17: 75 %-Quantil der PSDs der Ringmessung vom 13.-15. November 2018. Deutlich sichtbar sind Frequenzpeaks bei 1.4 Hz, 2.4 Hz, 4.1 Hz, 4.6 Hz, 6.2 Hz und 8.3 Hz zu erkennen

Abbildung 18 zeigt das seismische Rauschniveau um den Frequenzpeak von 4.1 Hz über die Zeit von zwei Tagen. Hierfür wurde die Peakfrequenz von 4.1 Hz mithilfe eines Bandpassfilters fokussiert und die Zeitsignale in einminütige Zeitsegmente geteilt. Für jedes Zeitsegment wird ein PSD berechnet und der Mittelwert dieses Frequenzbands mithilfe des 75 %-Quantil für jedes Segment bestimmt. Dieser Wert wird daraufhin über die Zeit aufgetragen und zeigt den Rauschpegel für die Peakfrequenz von 4.1 Hz. Der natürliche Rauschpegel liegt bei ca. -165 dB/Hz und stellt wohl den seismischen Rauschpegel ohne WKA-Aktivität dar. Kurzzeitige Ausreißer sind wohl anthropogenen Quellen (Landwirtschaftsarbeiten, Verkehr, etc.) zuzuschreiben. Auffällig ist jedoch ein deutlicher Anstieg des Rauschpegels auf ca. -151 dB/Hz am 13.11.2018 um etwa 12:00:00 Uhr (Abbildung 18, roter Kasten), der innerhalb dieses Zeitfensters sich immer wieder senkt und steigt. Dies lässt sich möglicherweise durch die Aktivität der WKA und einer Emission WKA-induzierter seismischer Wellen erklären. Allerdings fehlen hierbei WKA-Betriebsdaten (Rotordrehzahlen, Leistungsangaben) oder Windgeschwindigkeitsangaben, die dies verifizieren könnten.

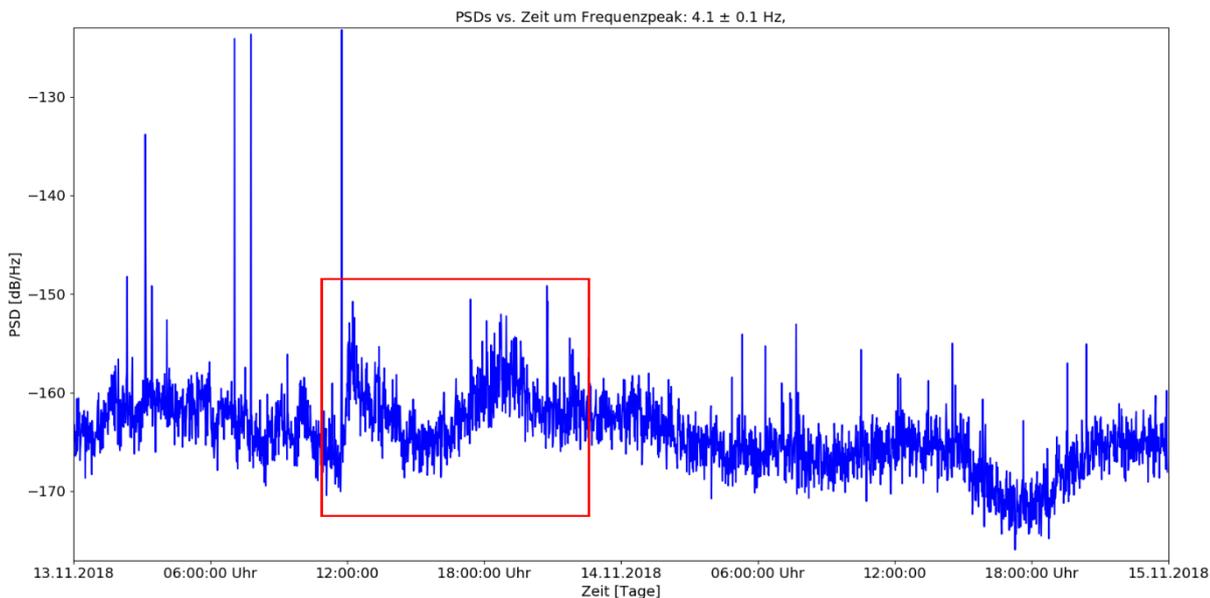


Abbildung 18: PSD über die Zeit um das Frequenzband von 4.1 Hz. Der rote Kasten zeigt ein Zeitfenster, in dem sich der seismische Rauschpegel von ca. -165 dB/Hz auf ca. -151 dB/Hz erhöht

4.1.3 Emissionskoeffizient C_E

Zur Charakterisierung der Emission einer WKA und zur Definition des Emissionskoeffizienten $C_E(f_P, v_r, x_r)$ werden Windgeschwindigkeitsangaben in Nabenhöhe benötigt, um die Emission WKA-induzierter seismischer Signale in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit definieren zu können. Damit lässt sich ein Emissionswert für eine WKA in einer normierten Entfernung x_r vom Aufstellort und bei einer festgelegten Windgeschwindigkeit v_r definieren. Da für dieses Messobjekt keine Windgeschwindigkeitsangaben in Nabenhöhe vorhanden sind, lässt sich der Emissionskoeffizient C_E für diese WKA nicht bestimmen.

Während des Messzeitraums beträgt der maximale gemessene Rauschpegel der 0.5 MW-Anlage ca. -151 dB/Hz. Dieser Wert lässt sich allerdings keiner Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe zuordnen.

4.1.4 Entfernungsabhängigkeit C_A

Der Abklingkoeffizient $C_A(f_P, x)$ beschreibt das Abklingverhalten der WKA-induzierten seismischen Wellen mit der Distanz. C_A hängt von den Untergrundbedingungen (Dämpfung, Topographie, Geologie) und den Peakfrequenzen der WKA ab und kann bis in einige Kilometer nachgewiesen werden (Flores Estrella et al., 2017a). Zur Bestimmung von C_A sind Profilmessungen genutzt worden. Zur Bestimmung des Amplitudenabklingverhaltens werden PSDs berechnet und mit Hilfe eines Bandpassfilters die Peakfrequenzen fokussiert. Daraufhin werden für

die jeweilige Peakfrequenz die Amplitudenmaxima berechnet und entfernungsabhängig aufgetragen. Zudem ist eine Trendlinie berechnet worden, deren entfernungsabhängiger Verlauf mit folgender Formel angepasst wird:

$$C_A(f_P, x) = \log \left[\left(\frac{x_r}{x} \right)^\alpha e^{\beta(x-x_r)} \right]$$

Dabei ist x die Entfernung zur WKA, x_r eine Referenzentfernung, α ein Koeffizient, der die geometrische Amplitudenabnahme beschreibt und β ein Koeffizient, der die Amplitudenabnahme durch Dämpfung beschreibt.

Auf Grund der Nähe des aus 25 WKA bestehenden WPs ist davon auszugehen, dass die seismischen Wellen der einzelstehenden WKA von den WP-induzierten seismischen Wellen überlagert werden. Abbildung 19 zeigt das entfernungsabhängige Amplitudenabklingen für WKA-induzierte seismische Wellen um den Frequenzpeak von 1.5 Hz und bestätigt die These der Überlagerung der seismischen Wellen. Hierbei ist kein Trend im entfernungsabhängigen Abklingverhalten der Amplituden zu erkennen.

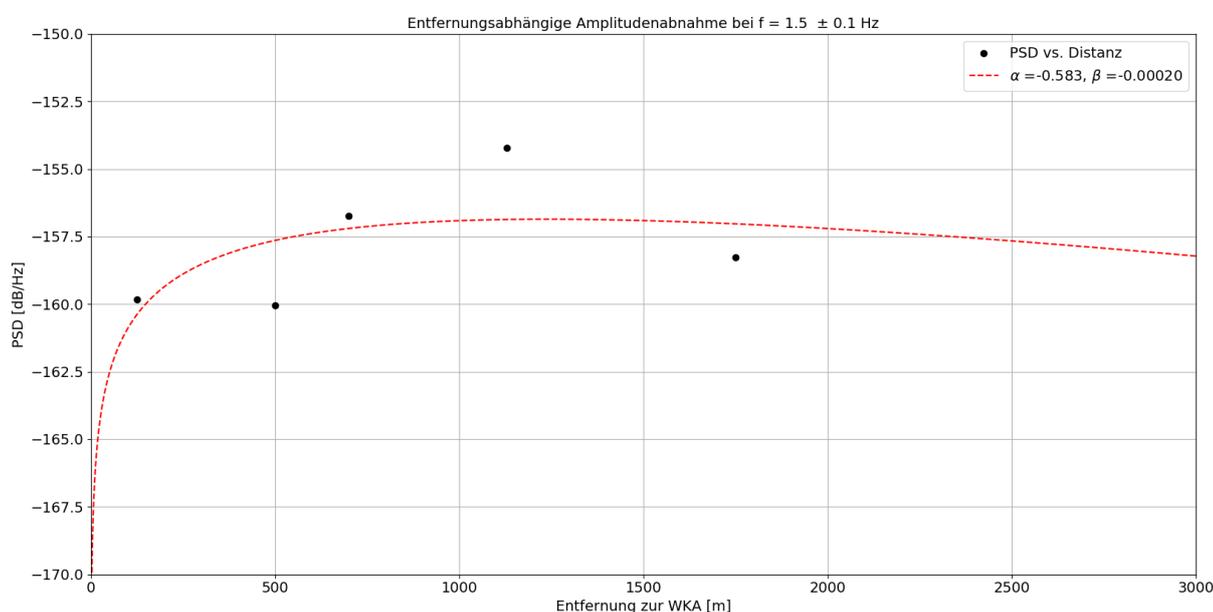


Abbildung 19: Amplitudenabklingverhalten der Amplituden aus den Profilmessungen um den Frequenzpeak von 1.5 Hz

4.2 WKA Waldkirchen



Abbildung 20: Windkraftanlage bei Waldkirchen/Erzgebirge

Das Messobjekt (Tabelle 1, WKA 12) liegt etwa 1.5 km südwestlich von Waldkirchen/Erzgebirge und ca. 2 km südöstlich von Grünhainichen. Die WKA besitzt eine Nabenhöhe von 100 m sowie einen Rotordurchmesser von 70 m (Abbildung 20). Die WKA hat eine maximale Leistung von 1.8 MW. Die Messkampagne fand vom 04.-11. Dezember 2018 statt. Auf Grund starker Schneefälle mit einer ca. 10-15 cm dicken Schneedecke sind einige Stationen bereits nach wenigen Tagen ausgefallen. Insgesamt wurden 15 Stationen aufgebaut, die mit einer Abtastrate von 100 Hz registriert haben. Auch bei diesem Messobjekt fehlte der Kontakt zu dem WKA-Betreiber, sodass keine spezifischen WKA-Betriebsdaten (Stillstandzeiten, Leistungsabgabe bzw. Rotordrehzahlen) beziehungsweise lokale Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe mit den seismischen Daten korreliert werden konnten.

Zur Quantifizierung der Emissionen wurde eine Ringmessung mit fünf Stationen und einem Radius von ca. 80-90 m um die WKA durchgeführt. Zudem wurden zwei Profile in Nord- und Ost-Richtung mit jeweils fünf Stationen aufgebaut. Das Nord-Profil hat eine Länge von 4.6 km, das Ost-Profil besitzt eine Länge von 4.2 km (Abbildung 21).

4.2.1 Messanordnung

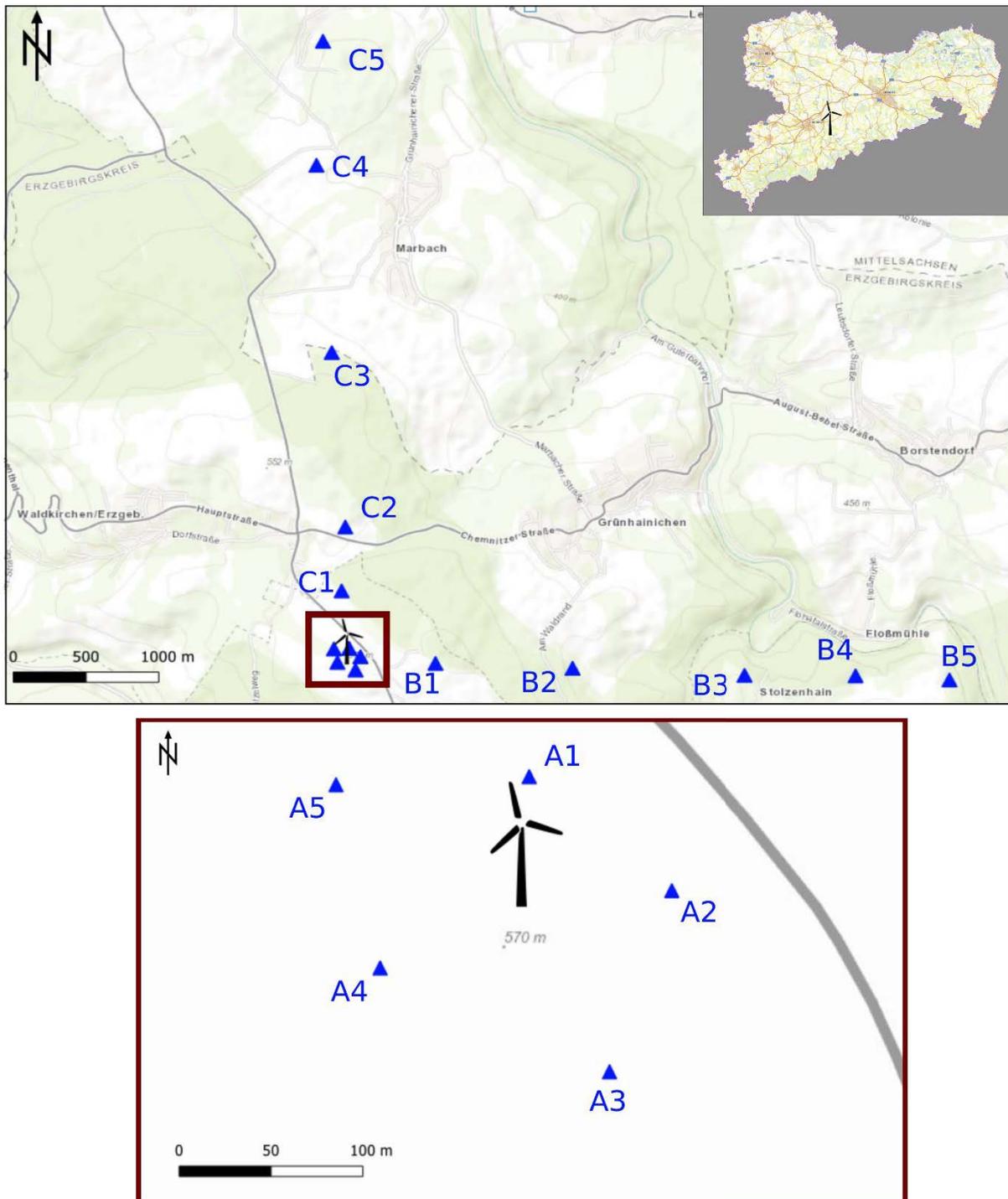


Abbildung 21: Übersichtskarte der Messkampagne. oben: Übersicht über die Profilmessungen. Profil B verläuft in Ost-Richtung (B1-B5). Profil C verläuft in N-Richtung (C1-C5). unten: Aufbau der Ringmessung um die WKA (A1-A5)

4.2.2 Frequenzpeaks f_p

Abbildung 22 zeigt ein Spektrogramm der Vertikalkomponenten der Station A5 über drei Tage. Hierbei sind horizontale schmale Frequenzbänder erhöhter Energie zu erkennen, die der Aktivität der WKA zugeordnet werden können. Abbildung 23 zeigt ein PSD der Ringmessung, das wie in Abschnitt 4.1.2 berechnet wurde, das eindeutige Frequenzpeaks bei 1.4 Hz, 3.5 Hz, 4.05 Hz und 7.0 Hz zeigt. Aufgrund fehlender spezifischer WKA-Daten können diese Frequenzpeaks nicht mit Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe oder Leistungsangaben der WKA verglichen werden.

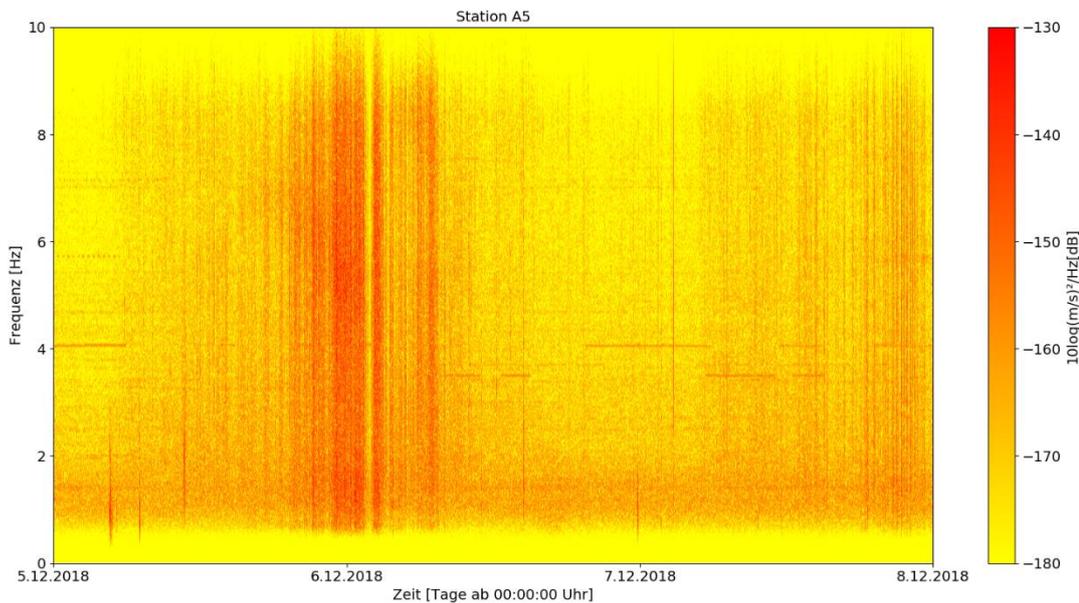


Abbildung 22: Spektrogramm der Station A5 über den Zeitraum vom 05.-08. Dezember 2018

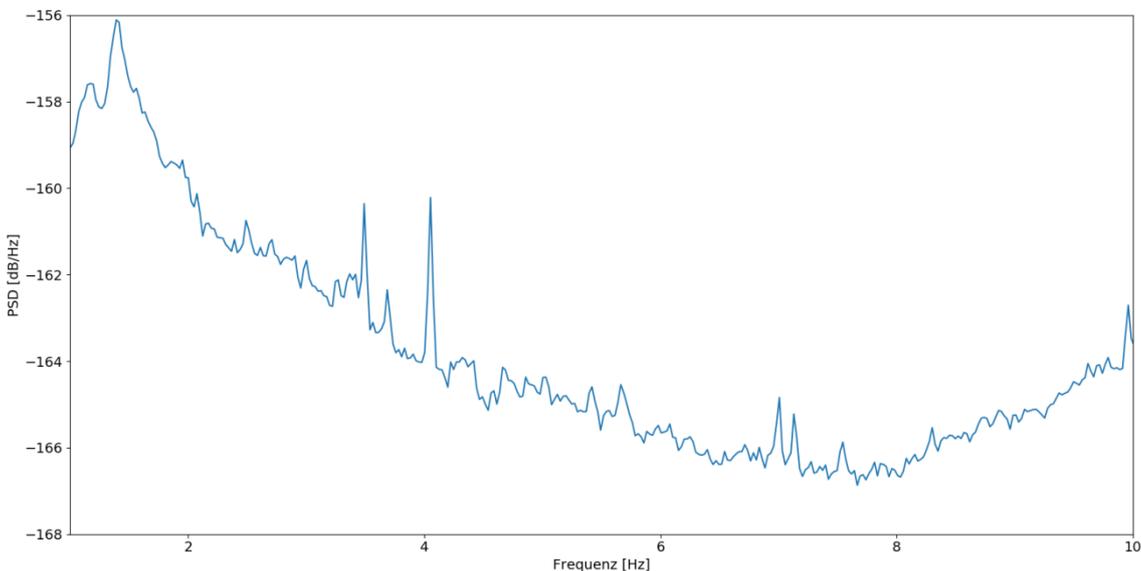


Abbildung 23: Peakfrequenzen der Ringmessung vom 05.-08. Dezember 2018

Abbildung 24 zeigt das seismische Rauschniveau um den Frequenzpeak von 4.1 Hz. Der natürliche Rauschpegel liegt bei ca. -170 dB/Hz und stellt wohl den seismischen Rauschpegel ohne WKA-Aktivität dar. Kurzzeitige Ausreißer sind anthropogenen Quellen (Landwirtschaftsarbeiten, Verkehr, etc.) zuzuschreiben. Auffällig ist jedoch ein Anstieg des Rauschpegels auf ca. -144 dB/Hz am 05.12.2018 um ca. 18:00:00 Uhr (Abbildung 24, roter Kasten), der über ein Zeitfenster von ca. 16 Stunden immer wieder abflacht und ansteigt. Dies lässt sich möglicherweise durch die Aktivität der WKA und einer Emission WKA-induzierter seismischer Wellen erklären.

Allerdings fehlen hierbei WKA-Betriebsdaten (Rotordrehzahlen, Leistung) oder Windgeschwindigkeitsangaben in Nabenhöhe, die mit dem seismischen Rauschniveau über die Zeit verglichen werden könnten.

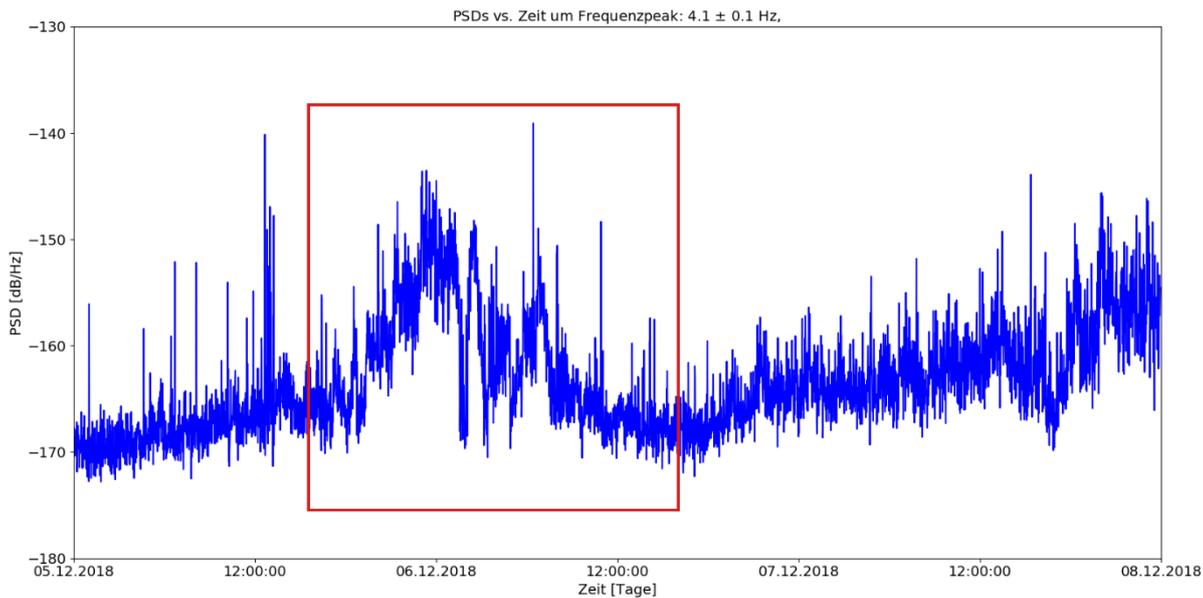


Abbildung 24: PSD über die Zeit um das Frequenzband von 4.1 Hz. Der rote Kasten zeigt ein Zeitfenster, in dem der seismische Rauschpegel auf ca. -144 dB/Hz steigt

4.2.3 Emissionskoeffizient C_E

Während des Messzeitraums beträgt der maximale gemessene Rauschpegel ca. -144 dB/Hz. Dieser Emissionswert lässt sich allerdings keiner Windgeschwindigkeit zuordnen. Der Emissionswert lässt sich mit der WKA bei Pfinztal vergleichen (Kap. 4.3), bei der WKA-Betriebsdaten vorhanden sind. Da die WKA Pfinztal eine Maximalleistung von 2.0 MW und die WKA Waldkirchen eine Maximalleistung von 1.8 MW besitzt, sind die Emissionswerte dieser zwei Anlagen vergleichbar. Der seismische Rauschpegel von -144 dB/Hz bei der WKA Pfinztal um den Frequenzpeak von 3.35 Hz ist bei einer Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von ca. 11 m/s erreicht (Abbildung 32c).

4.2.4 Entfernungsabhängigkeit C_A

Das Amplitudenabklingverhalten wird exemplarisch um den Frequenzpeak von 4.05 Hz dargestellt. Dabei werden wie in Abschnitt 4.1.4 beschrieben PSDs der Profilmessungen berechnet und deren Amplitudenmaxima auf die Distanz aufgetragen. Diese werden dann mit Hilfe einer Trendlinie angepasst. Abbildung 25 zeigt das Amplitudenabklingverhalten über die Distanz bis zu einer Entfernung von ca. 2300 m. Weiter entfernte Station zeigen keinen weiteren Einfluss der WKA-induzierten seismischen Wellen. Dies kann an näher gelegenen seismischen Quellen (bspw. Ortschaften, Landstraßen, etc.) oder an Einflüssen des lokalen Untergrunds liegen (Flores Estrella et al., 2017a; Zieger & Ritter, 2018).

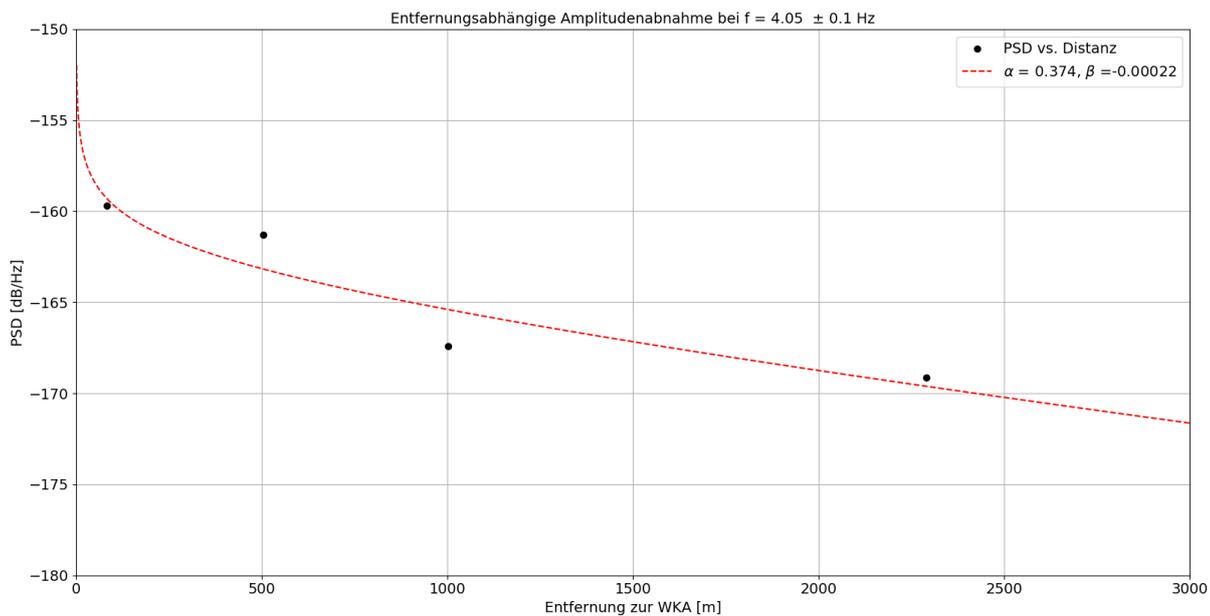


Abbildung 25: Entfernungsabhängiges Amplitudenabklingverhalten für den Frequenzpeak um 4.1 Hz

4.3 WKA Pfinztal



Abbildung 26: Windkraftanlage Pfinztal (Baden-Württemberg). Foto: Dr. Peter Fischer

Das Messobjekt (Tabelle 1, WKA 15) steht auf dem Fraunhofer Institut für chemische Technologie (ICT) in Pfinztal (Baden-Württemberg), das etwa 10 km nordöstlich von Karlsruhe liegt. Die Messkampagne wurde in Kooperation mit dem KIT Karlsruhe durchgeführt und fand vom 19.12.2018-10.01.2019 statt. Die WKA besitzt eine Nabenhöhe von 101 m sowie ein Rotordurchmesser von 82 m und hat eine maximale Leistung von 2 MW (Abbildung 26).

Insgesamt wurden 36 Stationen aufgebaut und mit einer Abtastrate von 100 Hz registriert. Für die Ringmessungen wurden die Sensoren und Datenlogger der Universität Leipzig genutzt. Für die Profilmessungen wurden 20 Mark L-4C-3D Geophone mit einer Eigenfrequenz von 1 Hz und Data-Cubes Datenloggern genutzt, die vom GIPP Pool des GFZ Potsdam geliehen wurden. Von diesem Messobjekt sind spezifische WKA-Daten (Leistung und Rotordrehzahlen) sowie lokale Winddaten (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) in Nabenhöhe verfügbar. Die WKA-spezifischen Daten wurden in einminütigen Zeitintervallen registriert.

Da das Messobjekt innerhalb des Forschungsprojektes, das einzige Messobjekt mit verfügbaren Betriebsdaten ist, wurde der Fokus der Arbeit auf diese WKA gelegt. Zudem stellt diese WKA mit einer Maximalleistung von 2 MW ein repräsentatives und modernes Messobjekt für zukünftige WKAs dar.

Zur Quantifizierung der Emission der WKA wurden zwei Ringmessungen mit jeweils acht Stationen und einem Radius von ca. 50 m (Ring A) bzw. 200 m (Ring B) um die WKA durchgeführt. Zudem wurden zwei Profile in Nord- und Nordwest-Richtung mit jeweils 10 Stationen aufgebaut. Beide Profile besitzen eine Länge von ca. 3 km (Abbildung 27).

4.3.1 Messanordnung

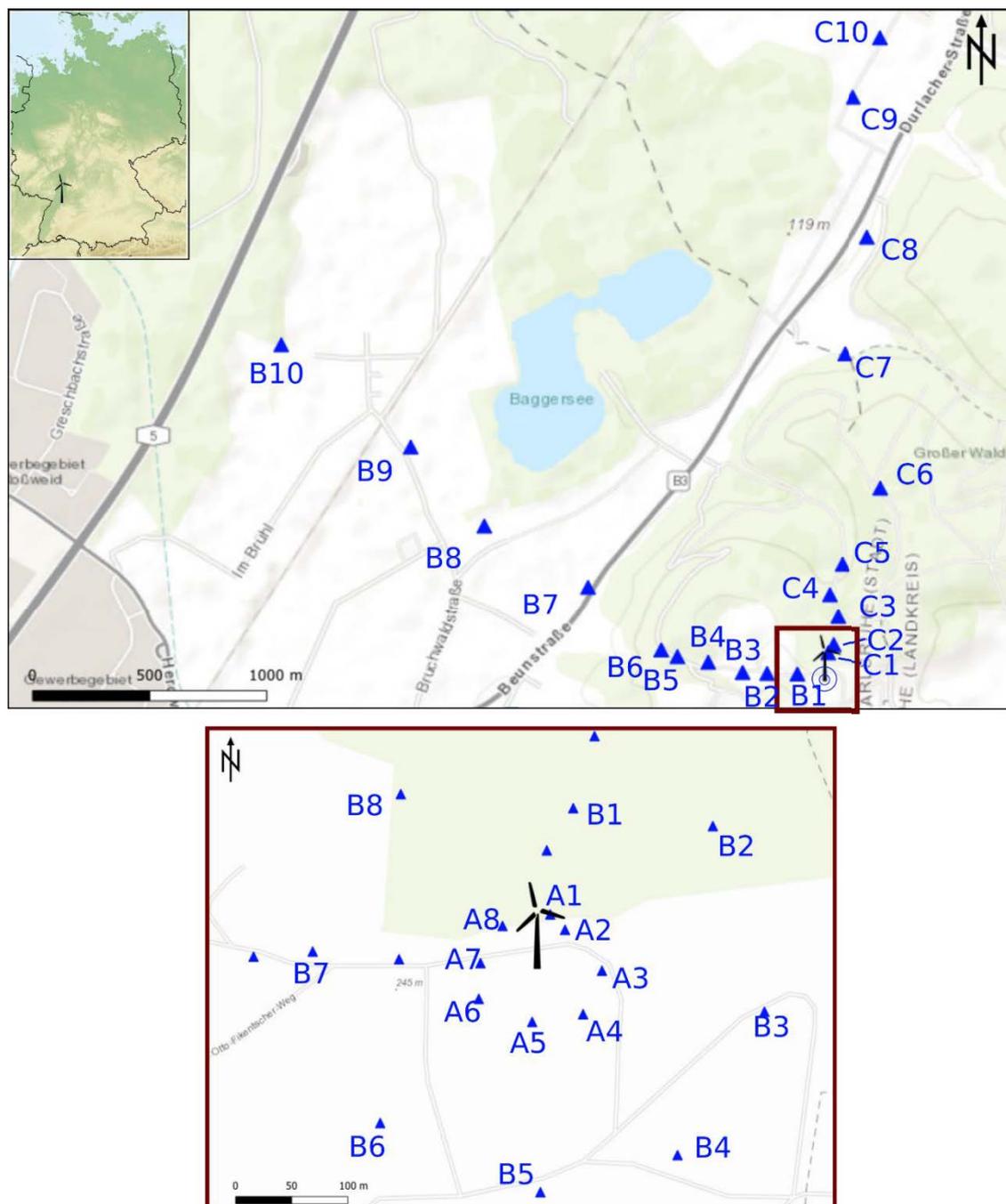


Abbildung 27: Übersichtskarte der Messkampagne bei Pfnitztal (Baden-Württemberg). oben: Übersicht über die Profilmessungen. Profil B verläuft in W-Richtung (B1-B10) und Profil C verläuft in N-Richtung (C1-C10). b: Aufbau der Ringmessung um die WKA. Ring A hat einen Radius von ca. 50 m (A1-A8). Ring B hat einen Radius von ca. 200 m (B1-B8)

4.3.2 Frequenzpeaks f_p

In Abbildung 28 ist das Spektrogramm der Station A1 über fünf Tage zu sehen. Gut sichtbar sind horizontale Frequenzbänder zwischen 1-4 Hz und breitere Frequenzbänder zwischen 5-8 Hz. Auf Grund der WKA-spezifischen Daten (Windgeschwindigkeit und Rotorumdrehungszahl) können die Frequenzpeaks nun mit der WKA-Aktivität in Beziehung gebracht werden.

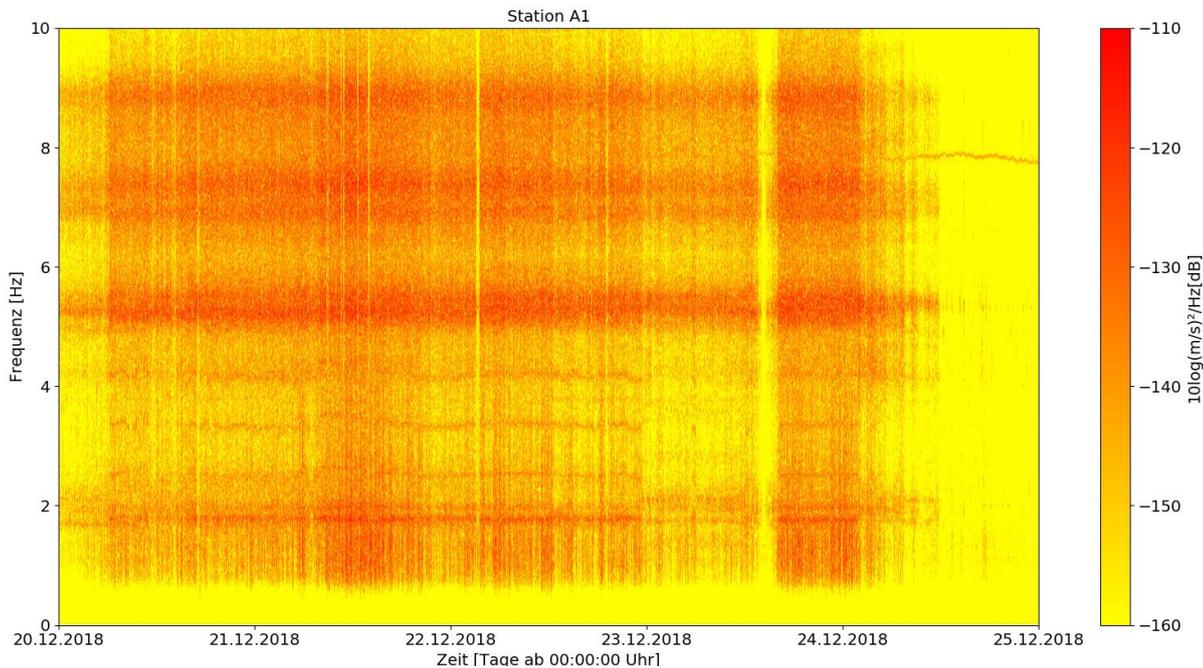


Abbildung 28: Spektrogramm der Station A1 vom 20.-25. Dezember 2018

Zur genaueren Betrachtung der Frequenzpeaks wurden die PSDs in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und in Abhängigkeit der Rotordrehzahl dargestellt. Hierfür werden die aufgenommenen Daten in einminütige Zeitsegmente geteilt und der jeweiligen Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe bzw. Rotorumdrehungszahl zu dieser Zeit zugeordnet. Daraufhin wurden die PSDs in Windgeschwindigkeits- und Rotorumdrehungsintervalle zusammengefasst und gemittelt (nach Stammeler und Ceranna, 2016). Abbildung 29 zeigt die PSDs in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit. Hierbei sind Frequenzpeaks bei etwa 1.65 Hz, 2.5 Hz, 3.35 Hz, 4.1 Hz und 5.25 Hz zu erkennen, die erst mit zunehmender Windgeschwindigkeit sichtbar werden. Der Frequenzpeak bei ca. 7.8 Hz, der nur bei geringen Windgeschwindigkeiten sichtbar ist, deren Amplitude sich allerdings bei höheren Windgeschwindigkeiten nicht verstärkt, ist wohl nicht durch die Aktivität der WKA zu erklären, sondern stellt eine externe Rauschquelle innerhalb des Geländes dar. Die Frequenzpeaks zwischen 1 Hz und 6 Hz verschwinden allerdings für sehr geringe Windgeschwindigkeiten (0-4 m/s) nahezu völlig und treten erst ab einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s auf. Dies kann durch die „cut-in Windgeschwindigkeit“ erklärt werden, die per Definition bei 2.5-4.5 m/s liegt (z. B. Nemes & Munteanu, 2011; Marcillo & Carmichael, 2017). Die „cut-in Windgeschwindigkeit“ ist die Geschwindigkeit, ab der die Rotoren einer WKA sich beginnen zu drehen und ab der die WKA Leistung abgibt. Da die Frequenzpeaks erst ab Windgeschwindigkeiten größer 4 m/s auftreten, ist dies ein eindeutiger Hinweis darauf, dass die Frequenzpeaks von der WKA induziert sind.

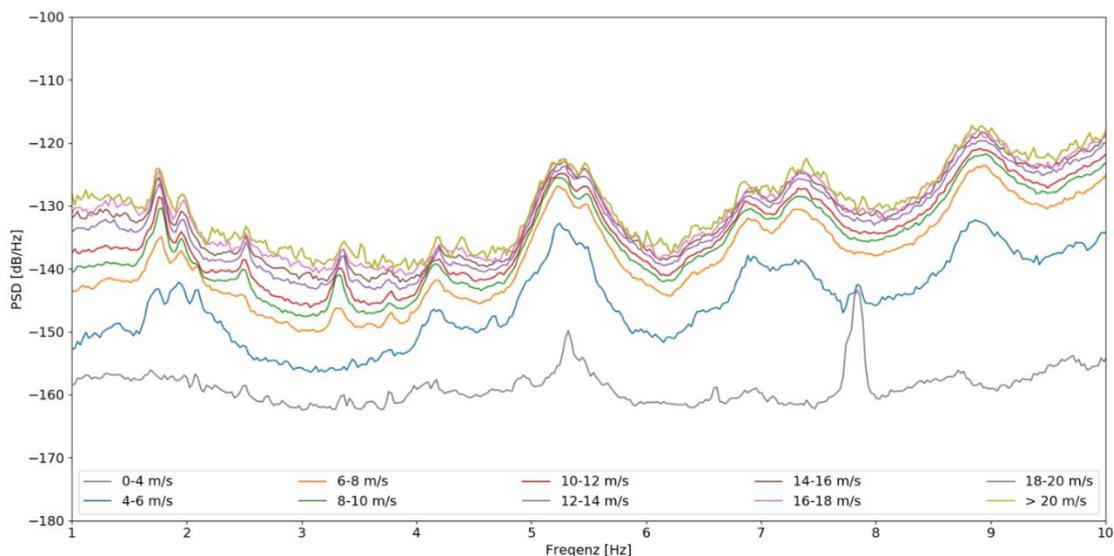


Abbildung 29: PSD über die Frequenz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Abbildung 30 stellt die PSDs in Abhängigkeit der Rotorumdrehungszahl dar. Auch hier sind eindeutige Frequenzpeaks zu erkennen, die bei geringeren Rotorumdrehungen (0-6 rpm, Rotorumdrehungen pro Minute) verschwinden. Dies deutet ebenfalls auf einen Ursprung der Frequenzpeaks durch die Aktivität der WKA hin.

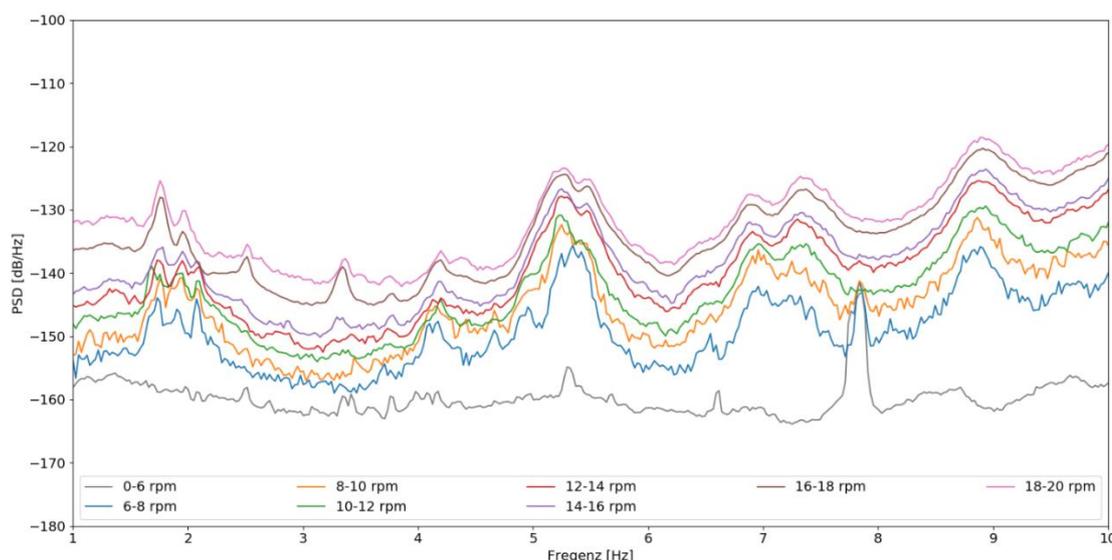


Abbildung 30: PSD über die Frequenz in Abhängigkeit der Rotorumdrehungszahl

Abbildung 31 zeigt das seismische Rauschniveau um den Frequenzpeak von 1.65 Hz sowie die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und Leistung der WKA über fünf Tage (20-25. Dezember 2018). Dabei ist deutlich ein Zusammenhang zwischen dem seismischen Rauschniveau und der Windgeschwindigkeit bzw. der Leistung der WKA zu erkennen. Das Zeitfenster vom 23.12.2018 12:00 Uhr bis 24.12.2018 06:00 Uhr (Abbildung 31, schwarzer gestrichelter Kasten 1) zeigt den Zusammenhang zwischen diesen Parametern. Innerhalb dieses Zeitfensters flacht die Windgeschwindigkeit zuerst stark von etwa 8 m/s auf 2.5 m/s ab. Parallel dazu sinkt die Leistung der WKA von ca. 1.0 MW auf 0 MW. Dieser Trend ist auch im seismischen Rauschniveau zu sehen. Hierbei flacht das seismische Rauschniveau von ca. -135 dB/Hz auf -158 dB/Hz ab. Daraufhin steigt der Wind für etwa 12 Stunden (23.12.2018 18:00 Uhr - 24.12.2018 06:00 Uhr) auf etwa 15-18 m/s an. Durch die konstant hohen Windgeschwindigkeiten gibt die WKA mit einer konstanten Leistung von ca. 1.0 MW ab. Dies lässt sich auch im seismischen Rauschniveau beobachten, in dem das Rauschniveau auf ca. -127 dB/Hz steigt und innerhalb dieser Zeit konstant bleibt. Ein weiteres Zeitfenster (22.12.2018 ca. 05:00 Uhr) zeigt die Abhängigkeit des seismischen Rauschens von der Leistungsabgabe der WKA (Abbildung 31, schwarz gestrichelter Kasten 2). Innerhalb dieses

Zeitfenster beträgt die Windgeschwindigkeit ca. 5 m/s. Auf Grund der „cut-in Windgeschwindigkeit (2.5-4 m/s) sollte die WKA in Betrieb sein und Leistung abgeben. Allerdings wurde innerhalb dieses Zeitfensters ein Abschaltversuch für ungefähr 30 Minuten durchgeführt, bei dem die WKA trotz möglicher Leistungsabgabe ausgeschaltet wurde. Innerhalb dieses Zeitfensters sinkt das seismische Rauschlevel trotz einer Windgeschwindigkeit von ca. 5 m/s von -135 dB/Hz auf -152 dB/Hz, das als ein eindeutiger Zusammenhang bezüglich des seismischen Rauschniveaus und der Leistungsabgabe der WKA interpretiert werden kann.

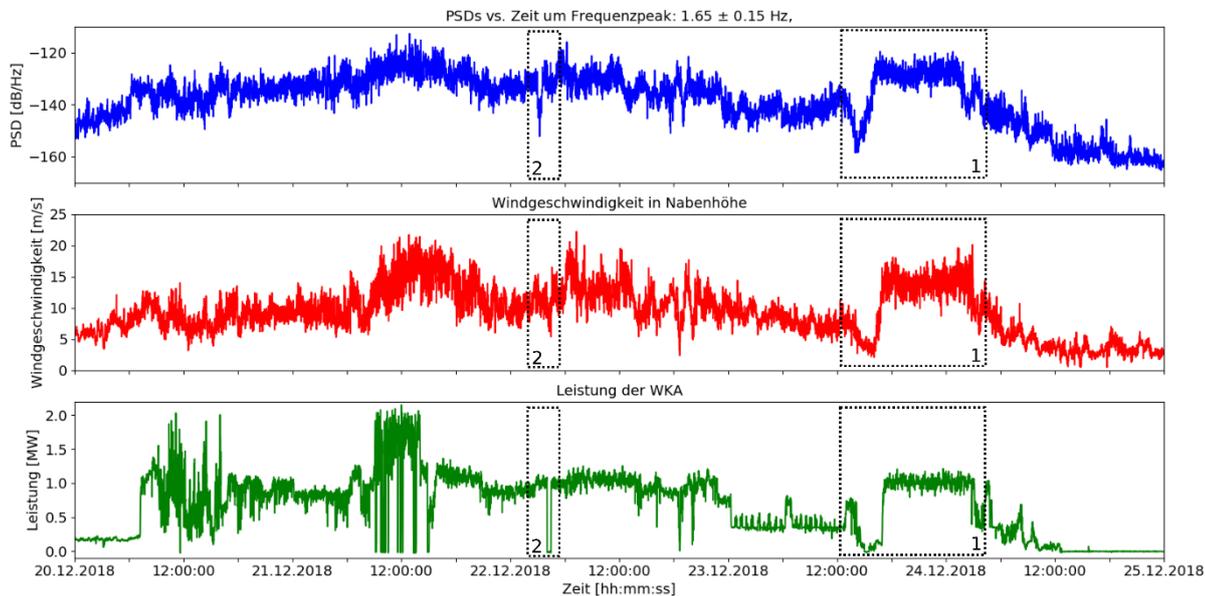


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen PSD um den Frequenzpeak von 1.65 Hz (blau) und der Windgeschwindigkeit (rot) bzw. Leistung der WKA (grün). Hervorgehoben sind zwei Zeitfenster, innerhalb derer ein Trend zwischen Rauschniveau und Windgeschwindigkeit bzw. Leistung der WKA zu erkennen ist (gestrichelte schwarze Kästen 1–2)

4.3.3 Emissionskoeffizient C_E

Für die Charakterisierung der Schwingungsemission der WKA werden die Daten der Ringmessungen mit einem Radius von ca. 50 m genutzt. Da für diese WKA spezifischen WKA-Betriebsdaten oder Windgeschwindigkeitsdaten in Nabenhöhe vorhanden sind, kann das seismische Rauschniveau in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit ermittelt werden und daraus die Emission der WKA quantifiziert sowie ein Emissionskoeffizient C_E für diesen WKA-Typ berechnet werden. Hierfür wird für jede Station der Ringmessung das Zeitsignal in einminütige Zeitsegmente geteilt und der jeweiligen Windgeschwindigkeit zugeordnet. Daraufhin wurde für jedes Zeitsegment und jede Station ein PSD berechnet und diese in 0.1 m/s Windgeschwindigkeitsintervallen zusammengefasst. Für jedes Intervall wurde daraufhin ein Mittelwert mithilfe des 75 %-Quantil berechnet. Das Ergebnis zeigt den Anstieg des gemittelten seismischen Rauschpegels in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für vier Frequenzbänder um die Frequenzpeaks von 1.65 Hz, 2.4 Hz, 3.35 Hz und 5.25 Hz (Abbildung 32 a-d).

Der Anstieg des seismischen Rauschpegels lässt sich dabei in drei Phasen unterschiedlicher Windgeschwindigkeitsbedingungen untergliedern:

Windgeschwindigkeit zwischen 0-3 m/s: Der seismische Rauschpegel beträgt ca. -160 dB/Hz. Dieser Wert entspricht den lokalen seismischen Rauschbedingungen bei der die WKA still steht.

Windgeschwindigkeit zwischen 3-6 m/s: Der seismische Rauschpegel steigt stark an. Dies lässt sich durch die „cut-in Windgeschwindigkeit“ erklären, ab der die Rotoren der WKA beginnen sich zu drehen und die WKA Leistung abgibt.

Windgeschwindigkeiten größer als 6 m/s: Der seismische Rauschpegel steigt kontinuierlich in Abhängigkeit des Logarithmus der Windgeschwindigkeit an. Da die WKA ab einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s die nominale Rotordrehzahl erreicht, wird im Folgenden nur das seismische Rauschen der dritten Phase betrachtet. Hierfür wurde eine Trendlinie berechnet, die als Windgeschwindigkeitsfunktion $F(v)$ das seismische Rauschen für höhere Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe definiert (s. Abbildung 32, rote Linie).

Der windabhängige Anstieg des seismischen Rauschniveaus kann nun benutzt werden, um einen Emissionskoeffizienten (C_E) in einer normierten Entfernung zur WKA (hier Ring A: 50 m) für eine Referenzwindgeschwindigkeit von 6 m/s (Beginn Phase 3) zu definieren. Mit Hilfe der Windgeschwindigkeitsfunktion $F(v)$ kann nun ein Faktor berechnet werden, um wieviel dB sich die Emission für höhere Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe erhöht. Beispielsweise wurde die Windgeschwindigkeit an der WKA für das Jahr 2018 ausgewertet. Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe (101 m) liegt in 90 % der Zeit bei maximal 10 m/s.

Abbildung 32a zeigt den Anstieg des seismischen Rauschniveaus um den Frequenzpeak von 1.65 Hz. C_E liegt bei dieser Frequenz bei ca. -142 dB/Hz. Die Erhöhung der Emission für eine Windgeschwindigkeit von 10 m/s wird mit $F(v)$ berechnet. Für diesen Fall ist $F(v) = 19.58 \cdot \log(v/v_r)$, mit $v_r = 6 \text{ m/s}$ und entspricht einer Erhöhung der Emission um +4.3 dB/Hz (s. Abbildung 32a, rote Linie). C_E um den Frequenzpeak von 2.4 Hz ist -145.5 dB/Hz, was bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s einer Erhöhung der Emission von +4.1 dB/Hz entspricht (Abbildung 32b). C_E um den Frequenzpeak von 5.25 Hz ist -131 dB/Hz. Nach der Skalierung des C_E auf eine Windgeschwindigkeit von 10 m/s erhöht sich der Emissionswert um +2.8 dB/Hz (Abbildung 32d).

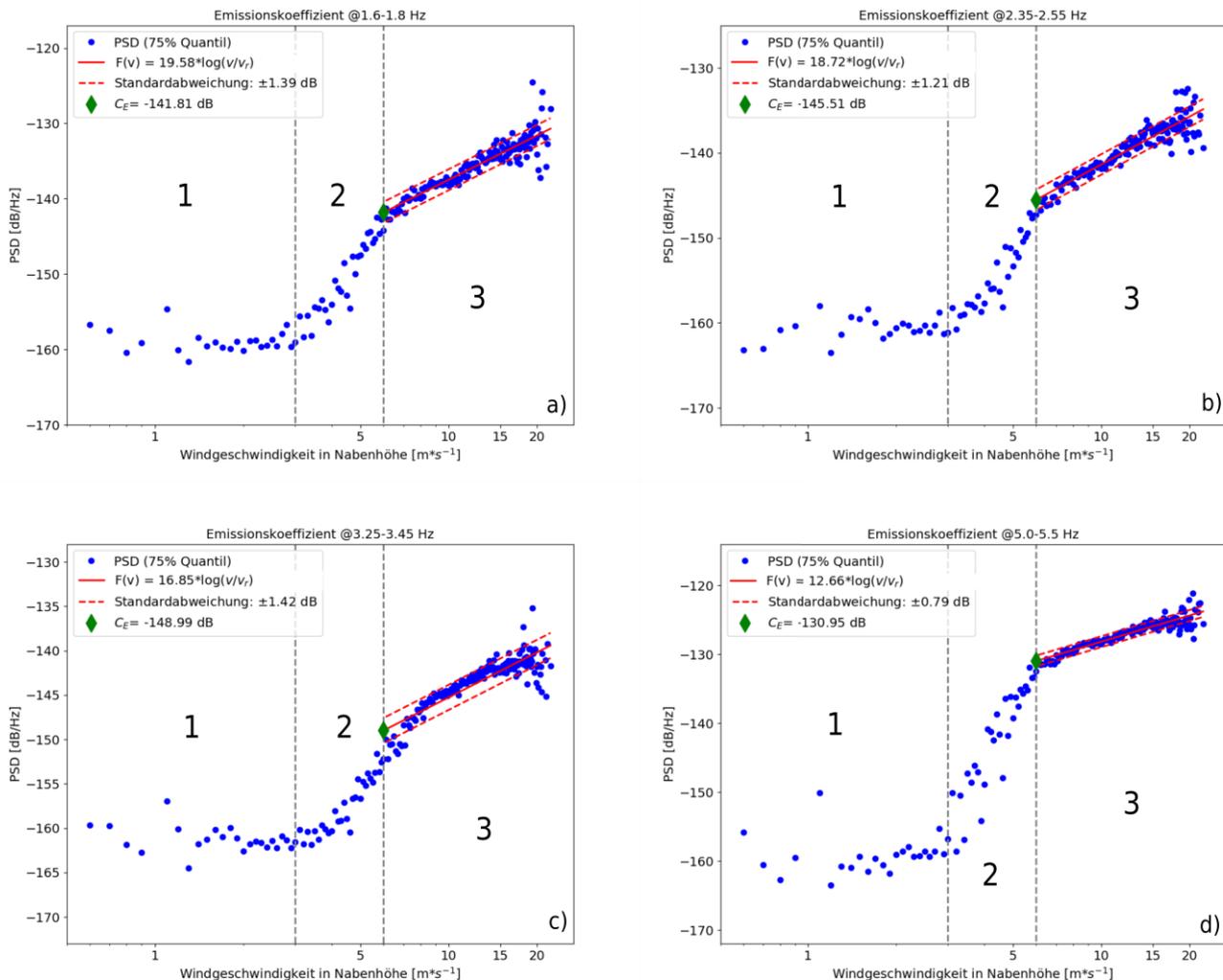


Abbildung 32: Darstellung des seismischen Rauschpegels in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit um die Frequenzpeaks von (a) 1.65 Hz, (b) 2.4 Hz, (c) 3.35 Hz und (d) 5.25 Hz (d). Die Ziffern 1-3 entsprechen den Phasen unterschiedlichen Windbedingungen, wie im Text beschrieben. Die grüne Raute zeigt den Emissionskoeffizienten (C_E). Die rote Linie zeigt die Windgeschwindigkeitsfunktion $F(v)$. Die rot gestrichelte Linie stellt die Standardabweichung von $F(v)$ dar

4.3.4 Entfernungsabhängigkeit C_A

Mit Hilfe der Profilmessungen kann das Abklingverhalten der WKA-induzierten seismischen Wellen mit der Entfernung quantifiziert werden. Zur Berechnung des Abklingverhaltens ist ein Zeitfenster von sechs Stunden gewählt worden, in dem konstante Windgeschwindigkeiten und stabile Rotorumdrehungen registriert wurden (21.12.2018 22:00:00 – 22.12.2018 04:00:00). Die Berechnung des Amplitudenabklingverhaltens erfolgt wie in Abschnitt 4.1.4 beschrieben. Es sind vier Abklingkurven für die Peakfrequenzen von 1.65 Hz, 2.4 Hz, 3.35 Hz und 5.25 Hz bestimmt worden.

Die Abklingkurven werden bis zu einer Distanz von 1500 m berechnet, weiter entfernte Stationen zeigen keinen Einfluss der WKA-induzierten seismischen Signale. Dies lässt sich durch zwei Faktoren erklären:

Beide Profile sind stark von anthropogenen Rauschquellen betroffen. Das Nord-Profil kreuzt nach ca. 1.5 km die Bundesstraße B3. Das W-Profil kreuzt ebenfalls nach ca. 1 km die Bundesstraße B3. Zudem kreuzt das West-Profil nach ca. 2 km die Bahnlinie und endet ca. 300 m vor der Autobahn A5. Auf Grund der Nähe der WKA zum südlich gelegenen Pfinztal sowie den östlich gelegenen Gemeinden Walzbachtal, Wöschbach und Jöhlingen, sind die Profile in Nord- und West-Richtung als die am wenigsten beeinträchtigten Profilauslagen gewählt worden.

Die Profile liegen am Rand des Oberrheingraben. An den Randverwerfungen, an denen Riftflanken (hauptsächlich Muschelkalke) auf känozoische Sedimente des Grabentals treffen, kann es zu einem Impedanzkontrast kommen, an dem seismische Energie partiell an der Grenzfläche reflektiert wird. Zudem kann es durch die Sedimente innerhalb des Grabentals zu erhöhter Dämpfung der seismischen Wellen entlang des Profils kommen.

Aus diesen zwei Gründen kann es zu Überlagerungen der seismischen Wellen kommen, weswegen sich die WKA-induzierten seismischen Signale nur bis zu einer Distanz zur WKA von etwa 1500 m nachweisen lassen. Das Abklingverhalten der seismischen Wellen ist in Abbildung 33 zu sehen.

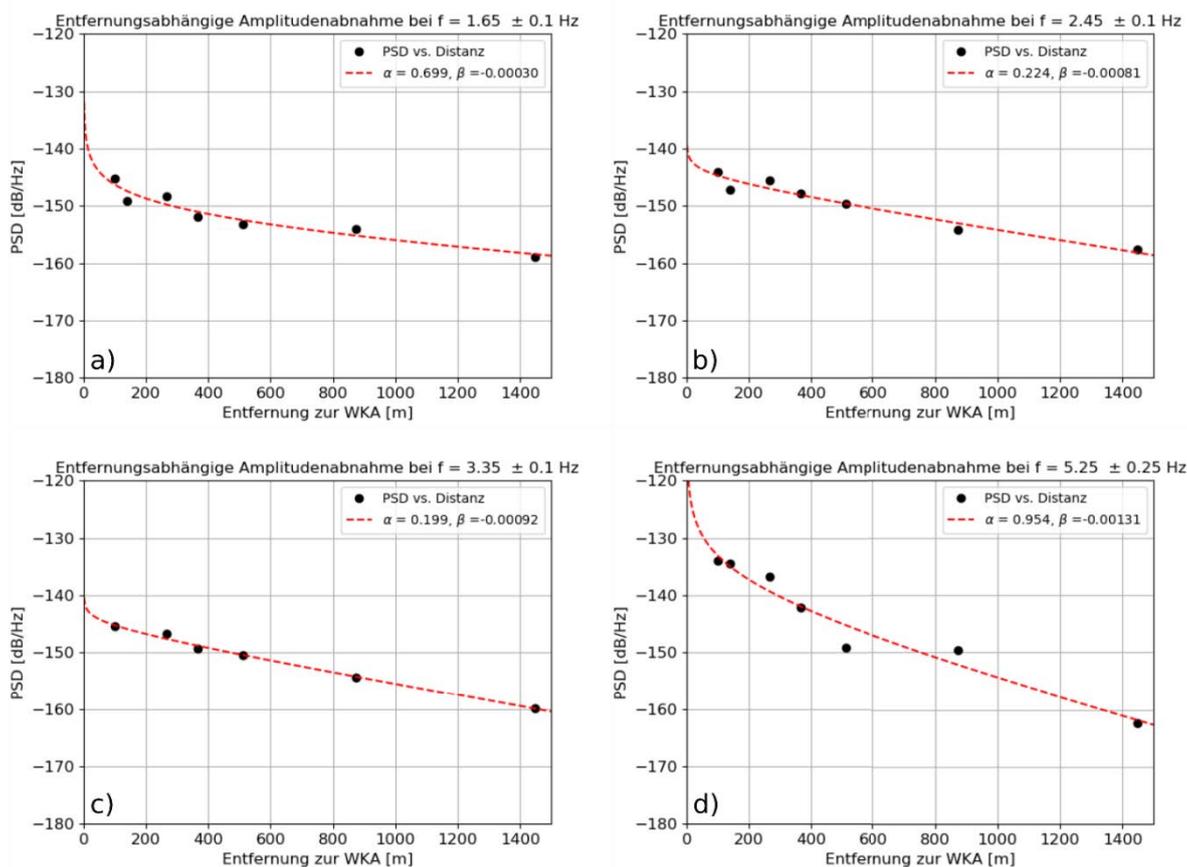


Abbildung 33: Entfernungsabhängiges Amplitudenabklingverhalten für die vier Frequenzpeaks von (a) 1.65 Hz, (b) 2.4 Hz, (c) 3.35 Hz und 5.25 Hz (d)

4.4 WKA Bautzen



Abbildung 34: Windkraftanlage bei Bautzen

Das Messobjekt (Tabelle 1, WKA 13) liegt etwa 15 km östlich von Bautzen und ca. 5 km westlich von Elstra. Die WKA besitzt eine Nabenhöhe von 141 m sowie einen Rotordurchmesser von 82 m und besitzt eine maximale Leistung von 2.0 MW (Abbildung 34). Die Messkampagne fand vom 10.-17. April 2019 statt. Insgesamt wurden 15 Stationen aufgebaut und mit einer Abtastrate von 100 Hz registriert. Auch bei diesem Messobjekt fehlte der Kontakt zu dem WKA-Betreiber, sodass keine spezifischen WKA-Betriebsdaten (Stillstandzeiten, Leistungsabgabe bzw. Rotordrehzahlen) sowie lokale Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe mit den seismischen Daten korreliert werden konnten.

Zur Quantifizierung der Emissionen wurde eine Ringmessung mit fünf Stationen und einem Radius von ca. 80 m um die WKA durchgeführt. Zudem wurden zwei Profile in Nord- und Ost-Richtung mit jeweils fünf Stationen und jeweils einer Länge von 5.6 km aufgebaut (Abbildung 35).

4.4.1 Messanordnung

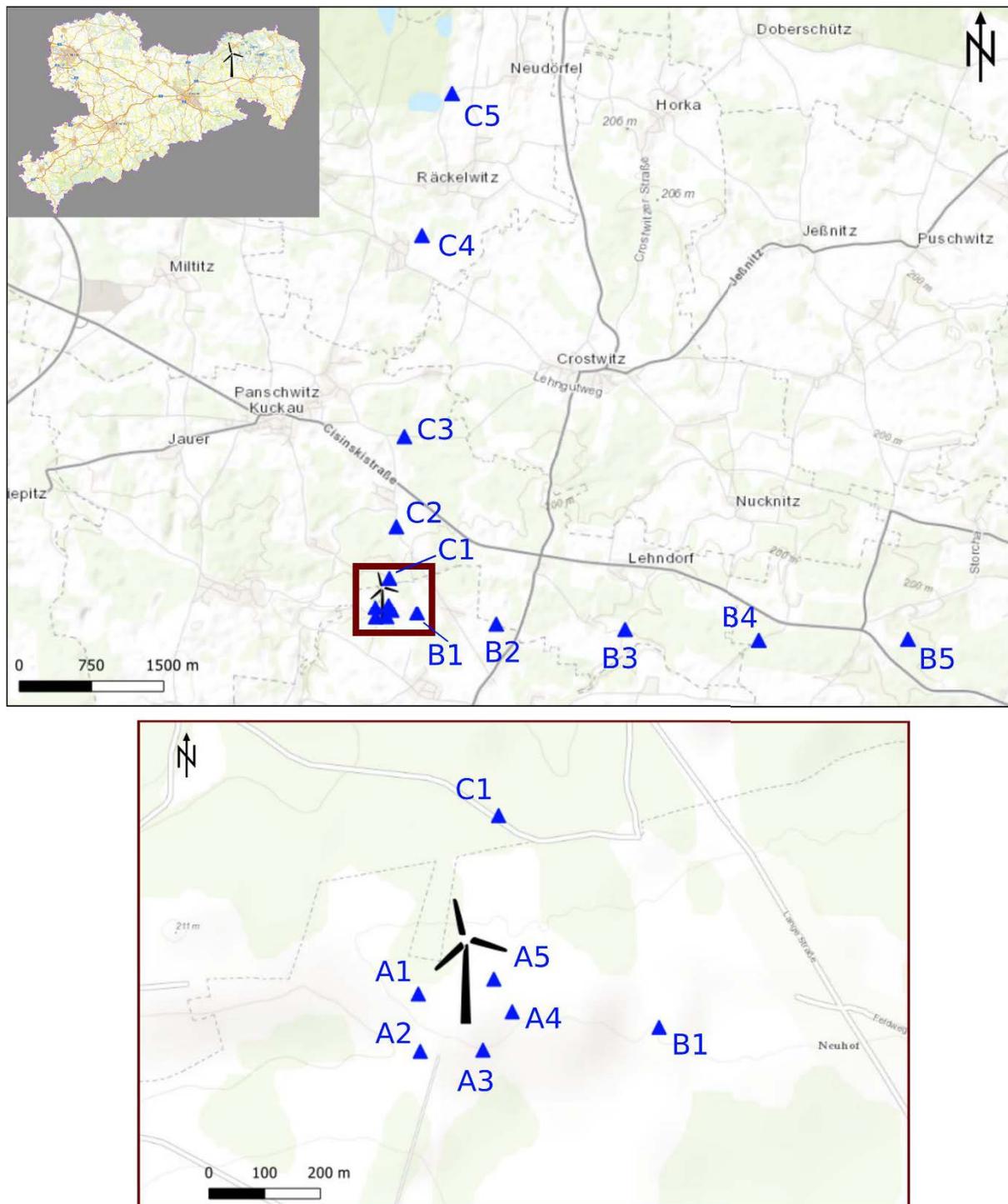


Abbildung 35: Übersichtskarte der Messkampagne. oben: Übersicht der Profilmessungen. Profil B verläuft in E-Richtung (B1-B5). Profil C verläuft in N-Richtung (C1-C5). unten: Aufbau der Ringmessung um die WKA (A1-A5)

4.4.2 Frequenzpeaks f_p

Abbildung 36 zeigt ein Spektrogramm der Station A4 über drei Tage. Hierbei sind immer wieder horizontal auftretende schmale Frequenzbänder zu erkennen. Diese können der kurzzeitigen Aktivität der WKA zu geordnet werden. Allerdings kann dies durch fehlende spezifische WKA-Daten nicht vollends bewiesen werden. Zur Veranschaulichung der Frequenzpeaks werden die PSDs der Ringmessungen berechnet und mit Hilfe des 75 %-Quantil gemittelt. Die Mittelung der PSDs der Ringmessung zeigen Frequenzpeaks bei 1.7 Hz, 2.2 Hz, 4.1 Hz, 5.0 Hz, 6.85 Hz und 8.9 Hz (Abbildung 37).

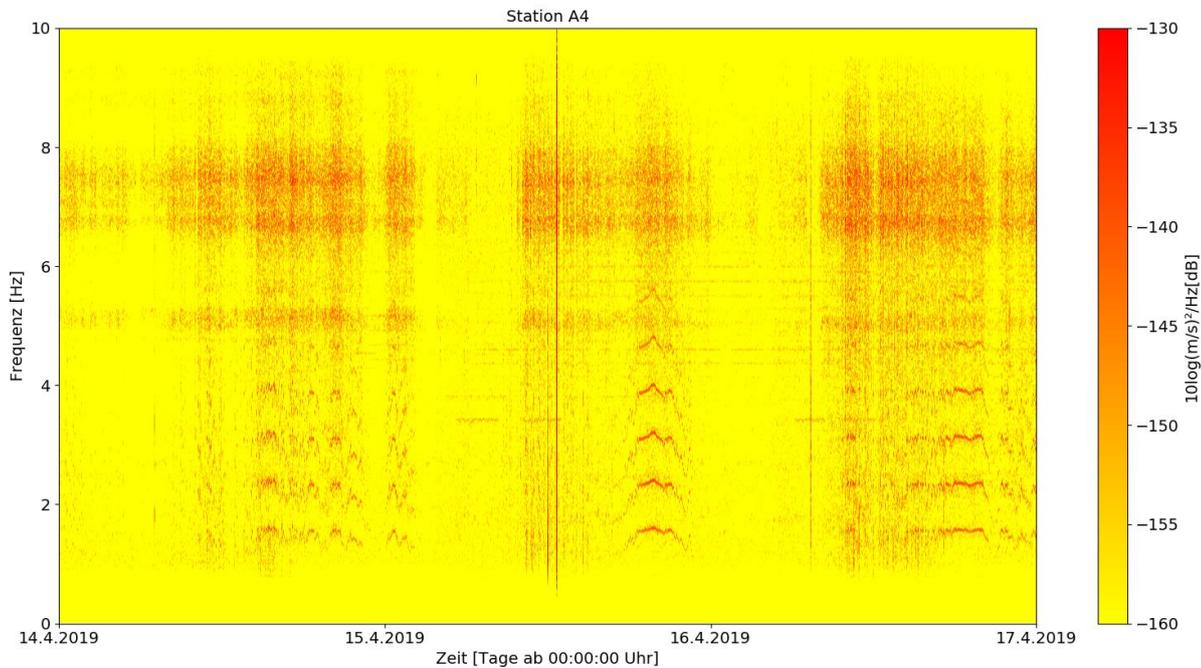


Abbildung 36: Spektrogramm der Station A4 vom 14.-17. April 2019

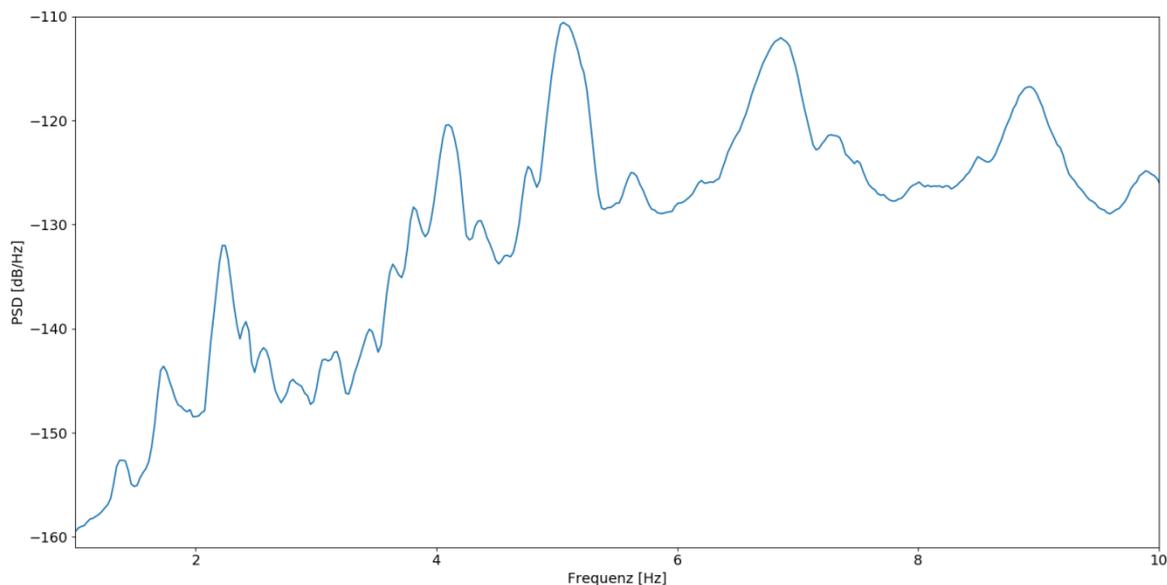


Abbildung 37: Darstellung der PSDs der Ringmessung. Deutlich sichtbar sind Frequenzpeaks bei 1.7 Hz, 2.2 Hz, 4.1 Hz, 5.0 Hz, 6.85 Hz und 8.9 Hz

Abbildung 38 zeigt das seismische Rauschniveau um den Frequenzpeak von 4.1 Hz vom 11.-17. April 2019. Auffällig ist ein relativ hohes seismisches Rauschniveau (-135 dB/Hz bis -115 dB/Hz) über den gesamten Zeitraum, das innerhalb kurzer Zeiträume auf ca. -160 dB/Hz bis -150 dB/Hz sinkt (Abbildung 38, rote Kästen). Dieses kurzzeitige Abflachen des seismischen Rauschniveaus könnte sich durch Windgeschwindigkeiten unterhalb der

„cut-in Windgeschwindigkeit“ und damit verbundene Stillstandzeiten der WKA erklären. Zur Verifizierung dieser Annahme fehlen allerdings WKA-Daten (Rotordrehzahlen, Leistungsangaben) oder Windgeschwindigkeitsangaben Nabenhöhe, mit denen eine zeitliche Übereinstimmung der WKA-Aktivität mit dem seismischen Rauschniveau bewiesen werden könnte.

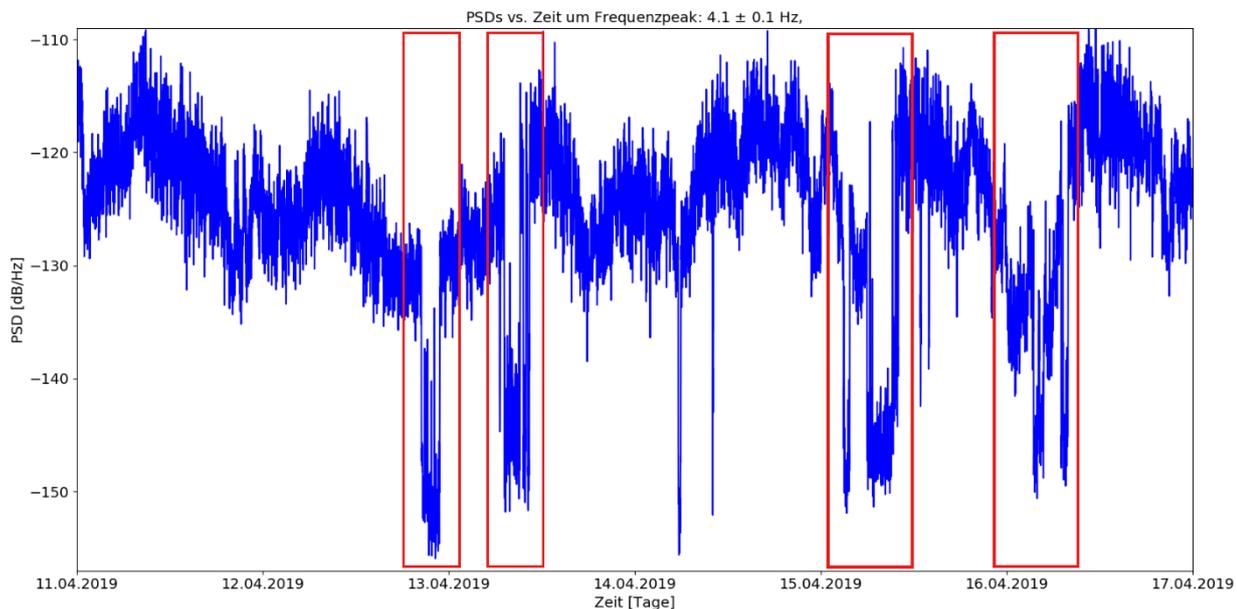


Abbildung 38: PSD über die Zeit um das Frequenzband von 4.1 Hz. Die roten Kästen zeigen Zeitfenster in denen der seismische Rauschpegel innerhalb kurzer Zeit sehr stark auf ca. -160 dB/Hz bis -150 dB/Hz abfällt

4.4.3 Emissionskoeffizient C_E

Vergleicht man das seismische Rauschniveau der WKA Bautzen mit dem Rauschniveau der WKA Pfinztal (Abbildung 31), so ist dort bei erhöhter Aktivität der WKA Pfinztal ein vergleichbarer Rauschpegel (ca. -125 dB/Hz) zu erkennen. Da es sich hierbei bei beiden WKAs um Anlagentypen mit einer Leistung von 2.0 MW handelt, ist von einer vergleichbaren Emission der WKA Bautzen auszugehen. Ein Emissionswert von -125 dB/Hz entspricht bei der WKA Pfinztal einer Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von ca. 14 m/s (Abbildung 32d). Auf Grund fehlender WKA-Daten lässt sich diese These allerdings nicht verifizieren.

4.4.4 Entfernungsabhängigkeit C_A

Mit Hilfe der Profilmessungen kann das Abklingverhalten der WKA-induzierten seismischen Wellen quantifiziert werden. Da keine spezifischen WKA-Daten zur Verfügung stehen, konnte kein explizites Zeitfenster erhöhter WKA-Aktivität gewählt werden. Abbildung 39 zeigt das entfernungsabhängige Amplitudenabklingverhalten für den Frequenzpeak um 2.2 Hz. Das Abklingverhalten wird mithilfe einer Trendlinie bestimmt, wie in Abschnitt 4.1.4 beschrieben. Hierbei ist kein eindeutiger Trend im Amplitudenabklingverhalten zu sehen. Mögliche Gründe dafür sind externe Quellen, die in der selben Frequenz schwingen, jedoch bei weiter entfernten Stationen stärker sind als die WKA-induzierten seismischen Signale. Das können beispielsweise Bauarbeiten, Straßenverkehr oder Landarbeiten, aber auch die nahegelegenen Orte Lehdorf (ca. 2.5 km), Panschwitz-Kuckau (ca. 3 km) oder Crostwitz (ca. 4.5 km) sein.

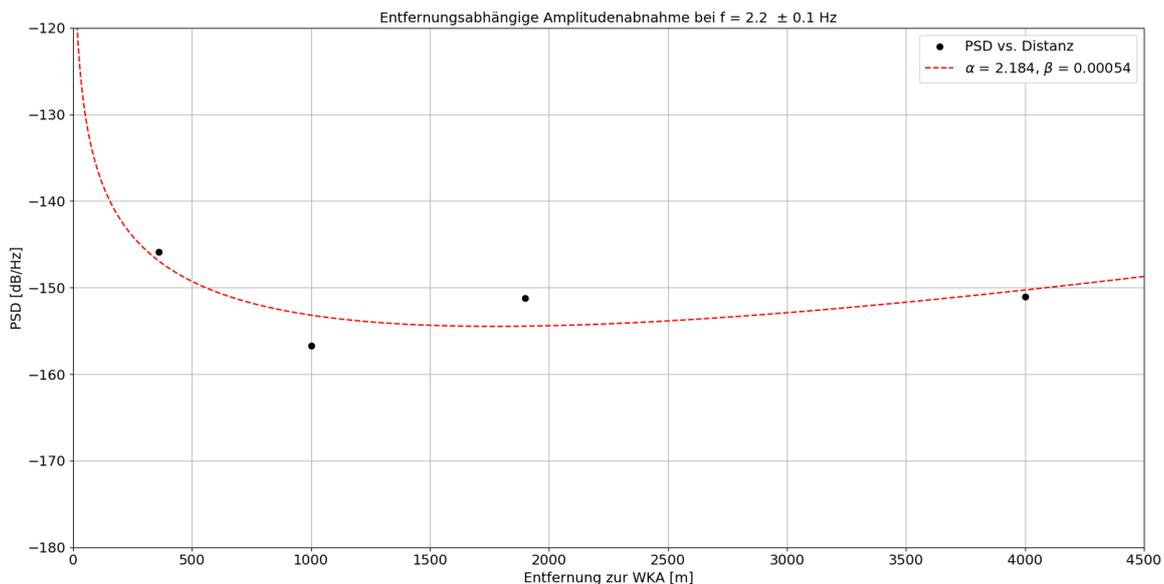


Abbildung 39: Amplitudenabklingverhalten auf die Distanz für die Peakfrequenz von 2.2 Hz

4.5 WP Freiberg



Abbildung 40: Windpark bei Freiberg

Der Windpark (Tabelle 1, WKA 16) liegt etwa 7 km nordnordöstlich von Freiberg. Der WP besteht aus 7 WKAs mit einer Maximalleistung von 2.0 MW pro WKA (Abbildung 42). Die Messkampagne fand vom 13.-23. Juni 2019 statt. Insgesamt wurden 16 Stationen aufgebaut und mit einer Abtastrate von 100 Hz registriert. Auch bei diesen Messobjekten fehlte der Kontakt zu dem WKA-Betreiber, sodass keine spezifischen WKA-Daten (Stillstandzeiten, Leistungsabgabe bzw. Rotordrehzahlen) sowie lokale Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe mit den seismischen Daten korreliert werden konnten. Da bei einem WP keine gezielte Ringmessung um die WKAs gelegt wurde, ist auf die Ringmessung verzichtet worden und lediglich zwei Profile gelegt worden (Abbildung 41). Profil A verläuft in Nordnordwest-Richtung, besteht aus 8 Stationen und ist ca. 4.3 km lang. Profil B verläuft in Ost-Richtung, besteht auch aus 8 Stationen und hat eine Länge von 6.8 km. Der Ursprung beider Profile (Station A1/B1) liegt in etwa in der Mitte des WPs (s. Abbildung 41).

4.5.1 Untersuchungsgebiet

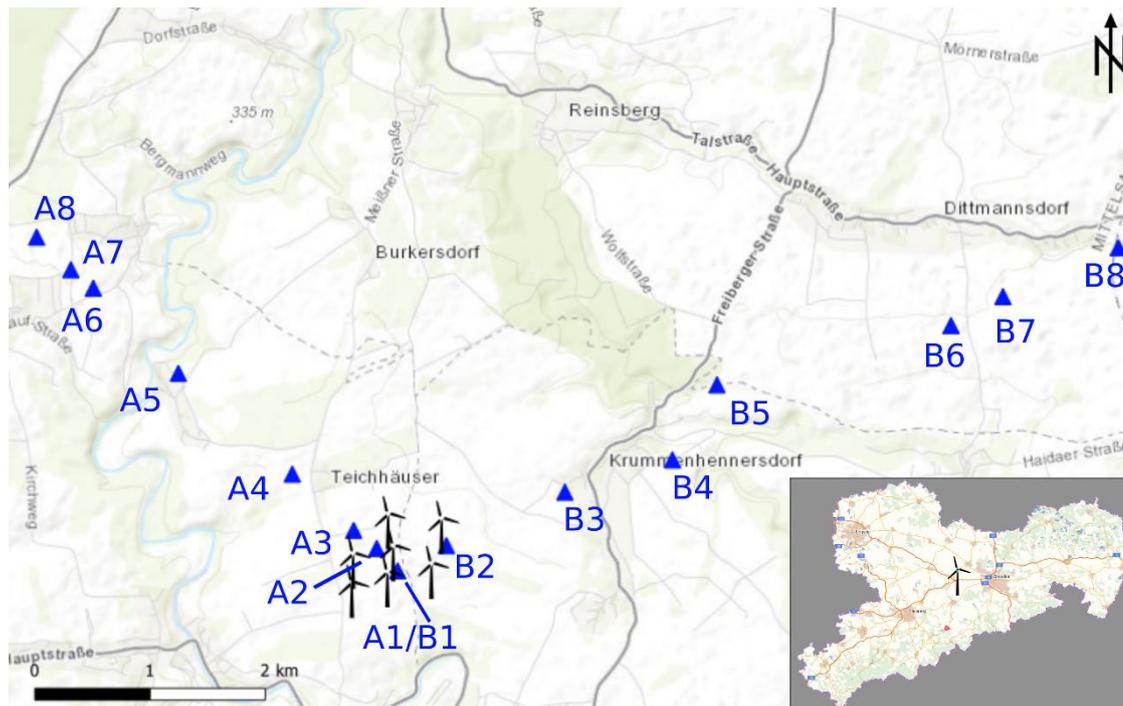


Abbildung 41: Übersichtskarte der Messkampagne. Profil A hat eine Länge von 4.3 km (A1-A8), Profil B hat eine Länge von 6.8 km (B1-B8)

4.5.2 Frequenzpeaks f_p

Abbildung 42 zeigt ein Spektrogramm der Station A1/B1 über zwei Tage. Die Station ist der Ursprung beider Profile und ca. 50 m von der nächstgelegenen WKA entfernt. Vor allem vom 15.-16. Juni 2019 sieht man eine erhöhte seismische Energie im niederfrequenten Bereich zwischen 2-8 Hz. Diese teilweise kurz auftretenden horizontalen Frequenzbänder können sich durch die Aktivität der WKA erklären lassen. Betrachtet man nun die PSDs dieser Station innerhalb des Zeitraums vom 15.-16. Juni 2019, so erkennt man deutliche Frequenzpeaks bei 2.2 Hz, 4.1 Hz, 5.0 Hz und 6.75 Hz (Abbildung 43). Auf Grund fehlender WKA-Daten können diese Frequenzpeaks allerdings nicht mit Windgeschwindigkeitsangaben oder Rotordrehzahlen der WKA korreliert werden.

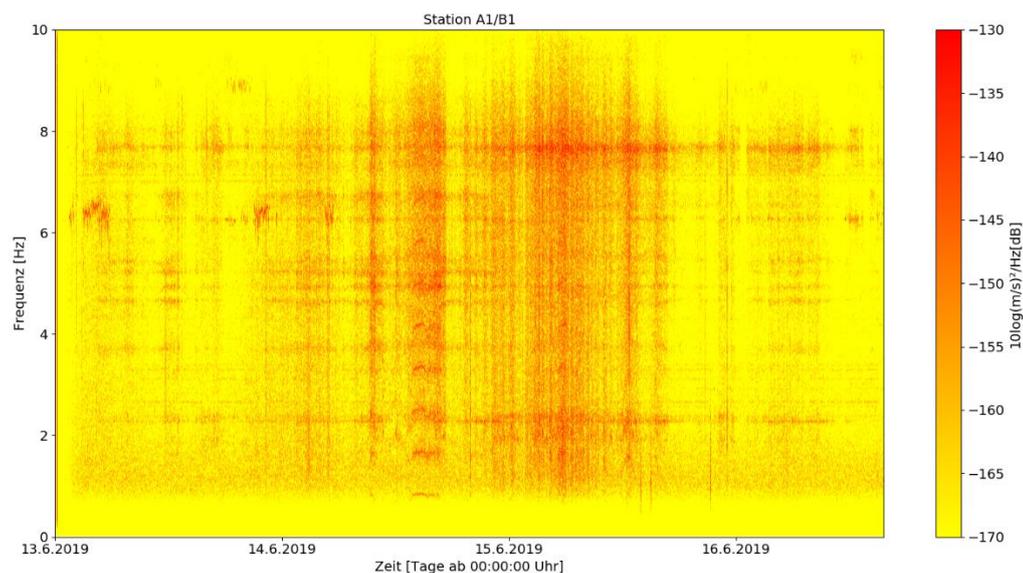


Abbildung 42: Spektrogramm der Station A1/B1 vom 13.-17. Juni 2019

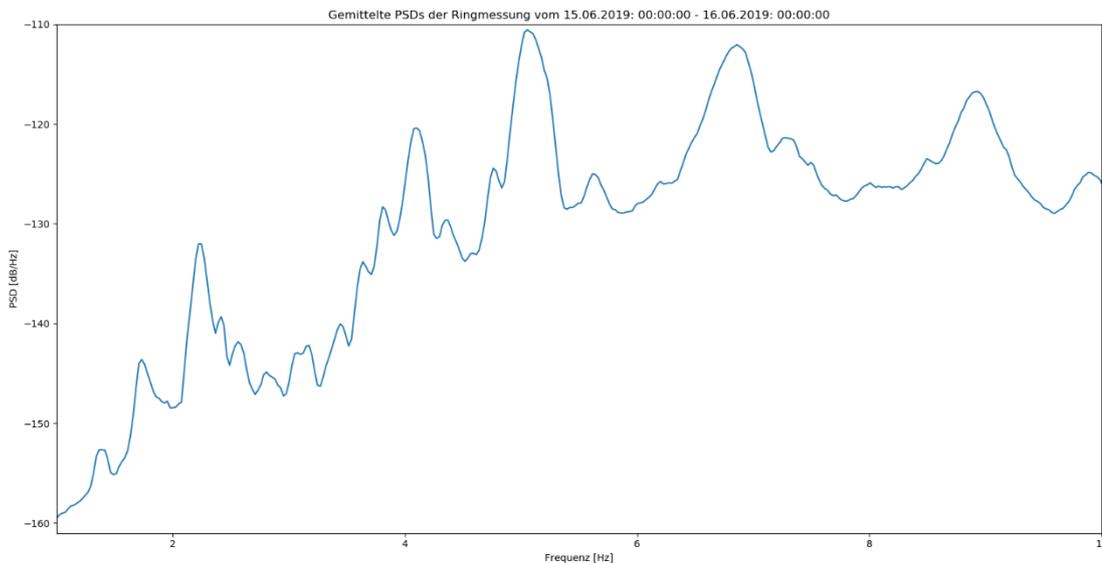


Abbildung 43: PSDs der Station A1/B1 vom 15.-16. Juni 2019. Deutlich sichtbar sind Frequenzpeaks bei 2.2 Hz, 4.1 Hz, 5.0 Hz und 6.75 Hz

4.5.3 Entfernungsabhängigkeit C_A

Das Abklingverhalten der WP-induzierten seismischen Signale ist wie in Abschnitt 4.1.4 berechnet worden. Abbildung 44 zeigt das entfernungsabhängige Amplitudenabklingen für die WP-induzierten seismischen Wellen um den Frequenzpeak von 5.0 Hz. Dabei können die WP-induzierten seismischen Signale bis in eine Entfernung von ca. 4300 m nachgewiesen werden.

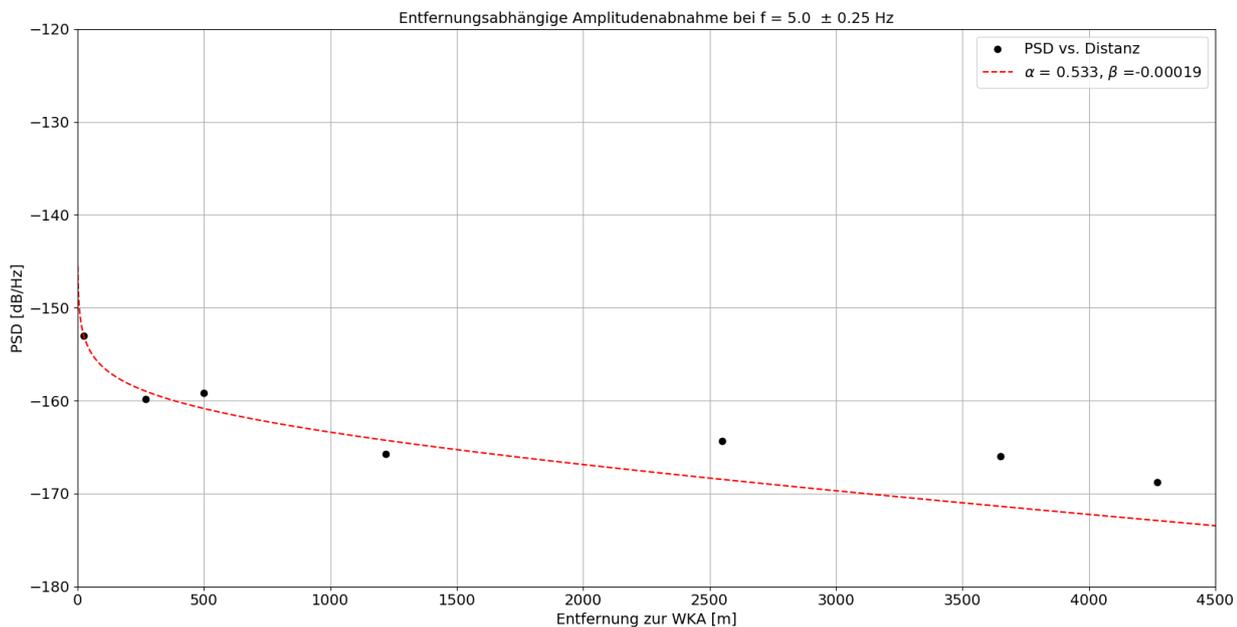


Abbildung 44: Amplitudenabklingverhalten auf die Distanz für die Peakfrequenz um 5.0 Hz

5 Modellierung der Wellenausbreitung in unterschiedlichen Untergrundstrukturen

Die Modellierung der Wellenausbreitung dient der Bestimmung des untergrund- und frequenzspezifischen Amplitudenabklingverhaltens mit der Entfernung. Dies wird mit der Software ‚psexpld‘ vorgenommen, mit der seismische Wellen, die sich in horizontal geschichteten Untergrundstrukturen ausbreiten, vollständig simuliert

werden können. Als Anregung der seismischen Wellen dient eine an der Erdoberfläche wirkende Punktkraft, womit synthetische Seismogramme in verschiedenen Entfernungen erzeugt werden.

Dafür wird eine größere Anzahl von Untergrundmodellen berechnet. Die Modelle bestehen durchweg aus einem Drei-Schichtmodell, um eine Sedimentauflage über Festgestein zu simulieren. Scherwellen-Geschwindigkeiten in der obersten Schicht sowie die Schichtmächtigkeit werden variiert. Die P-Wellen-Geschwindigkeit beträgt immer das 1.73fache der Scherwellen-Geschwindigkeit. Die darunter liegenden Schichten bleiben für alle Modellrechnungen konstant. Ferner muss ein Dämpfungsparameter (Q-Wert) angegeben werden. Auch dieser Wert wird innerhalb der obersten Schicht variiert und bleibt darunter konstant. Q ist ein Maß zur Stärke der Dämpfung. Ein kleiner Q-Wert entspricht einer starken Dämpfung und umgekehrt. Die Dämpfung wurde für jede Geschwindigkeit in den Schritten $Q = 50, 100, 200$ und 400 verändert. Als Anregungssignal dient für jede Simulation ein quasiharmonisches Signal mit einer Frequenz von $1.5 \text{ Hz}, 3 \text{ Hz}$ oder 6 Hz und stellt repräsentative von Windkraftanlagen generierte spektrale Amplitudenpeaks dar.

Für eine systematische Untersuchung wurde die Einteilung der Untergrundbeschaffenheit in verschiedene Baugrundklassen zugrunde gelegt, wie sie im EUROCODE 8 (2010) festgelegt ist. Die Details sind in Tabelle 2 aufgeführt. V_{s30} bezeichnet den Durchschnittswert der Scherwellen-Geschwindigkeit in den obersten 30 m. Die Modelle der Baugrundklasse A besitzen V_{s30} -Geschwindigkeiten zwischen 800 und 1730 m/s . Für die Baugrundklasse B wurde die V_{s30} -Geschwindigkeit zwischen 600 und 800 m/s . Baugrundklasse C beinhaltet tiefe Ablagerungen von dichtem Sand oder Kies mit Schichtdicken bis in mehrere hundert Meter Mächtigkeit für V_{s30} -Geschwindigkeiten kleiner 360 m/s . Auf Modellrechnungen, die dieser Baugrundklasse entsprechen, wurde verzichtet.

Tabelle 2: Einteilung der Baugrundklassen A, B und C nach dem EUROCODE 8 (2010)

Klasse	Stratigraphisches Profil	V_{s30} [m/s]
A	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation, mit höchstens 5 m weicherem Material an der Oberfläche.	< 800
B	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steifem Ton, mit einer Dicke von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe.	360 – 800
C	Tiefe Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steifem Ton, mit Dicken von einigen zehn bis mehreren hundert Metern.	180 – 360

Insgesamt wurden 4224 Modelle mit unterschiedlichen Parameterkombinationen von v_P, d, Q und f in der obersten Schicht berechnet. Abbildung 45a zeigt eine Skizze zu den Schichtmodellen und den dazugehörigen Parametern der einzelnen Schichten sowie beispielhaft die Erzeugung synthetischer Seismogramme mit der Entfernung für ein spezifisches Schichtmodell (Abbildung 45b).

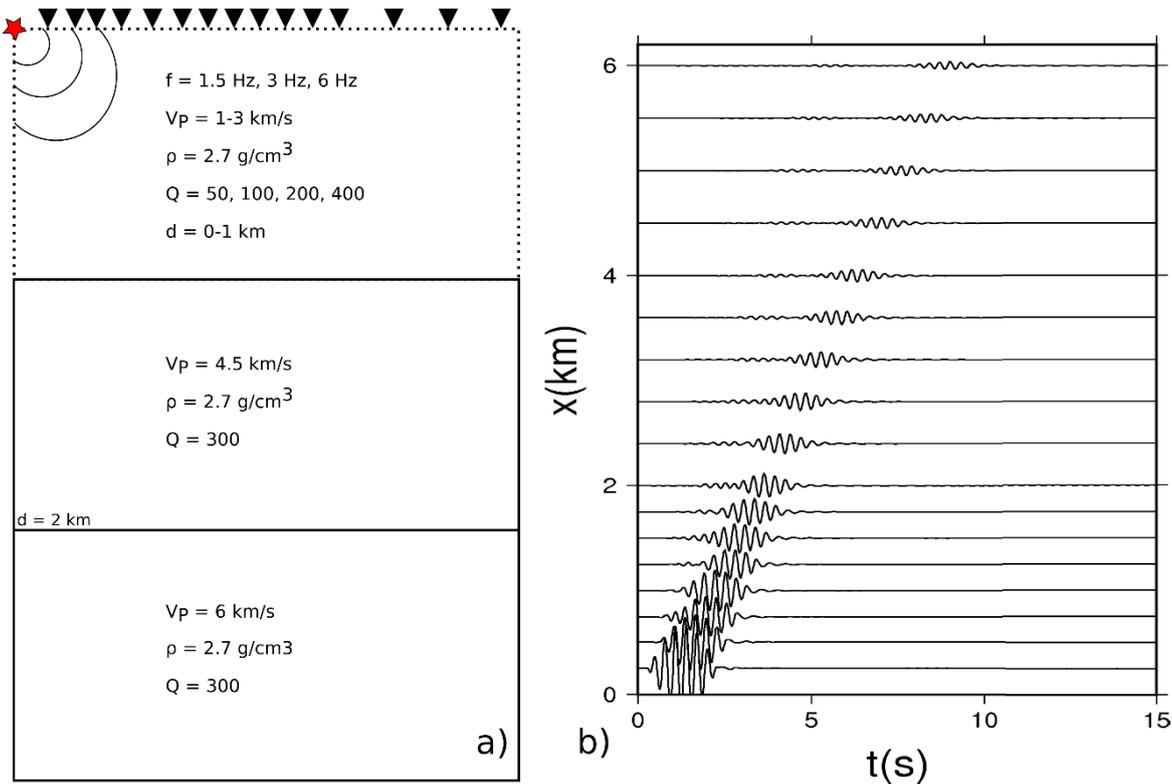


Abbildung 45: a) Skizze zu den Schichtmodellen der Modellrechnungen. f ist das Quellsignal (roter Stern). Die schwarzen Dreiecke zeigen die Stationen. Innerhalb der ersten Schicht sind die Parameter (v_P -Wellengeschwindigkeit, Dichte ρ , Dämpfungsparameter Q und Schichtmächtigkeit d) variiert worden. Die Parameter der unteren Schichten bleiben für alle Modellrechnungen konstant. b) Beispielhafte synthetische Seismogramme mit $f = 3 \text{ Hz}$, $v_P = 1600 \text{ m/s}$, $d = 200 \text{ m}$, $Q = 200$, und $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$

Zur Bestimmung der Abklingkurven werden für jedes Modell synthetische Seismogramme in verschiedenen Distanzen zum Quellsignal berechnet, deren Maximalamplituden ermittelt und diese auf die Distanz aufgetragen (Abbildung 45b). Das Ergebnis zeigt ein Abklingverhalten der synthetischen Amplituden.

Daraufhin wird für jedes Modell eine Abklingkurve $C_A(f_P, x)$ ermittelt, deren Verlauf mit den Amplituden-Entfernungskurven mit folgender Formel angepasst wurde:

$$C_A(f_P, x) = \log \left[\left(\frac{x_r}{x} \right)^\alpha e^{\beta(x-x_r)} \right]$$

Dabei ist x die Entfernung, x_r eine Referenzentfernung, α ein Koeffizient, der die geometrische Amplitudenabnahme beschreibt und β ein Koeffizient, der die Amplitudenabnahme durch Dämpfung beschreibt.

Die aus den Entfernungskurven gewonnenen Parameter (α und β) werden daraufhin mit Hilfe eines Konturdiagramms für ein konstantes Quellsignal f und einen konstanten Dämpfungsparameter Q interpoliert.

In den Abbildung 46 - 52 und in Anhang 1 sind die Konturdiagramme für α und β zu sehen. Aufgrund geringer Streuungen der α -Werte wird α lediglich für die Peakfrequenzen von 1.5 Hz, 3 Hz und 6 Hz für $Q = 100$ dargestellt. Der Dämpfungskoeffizient β hängt stark von dem Dämpfungsparameter Q ab und wird für alle drei Peakfrequenzen und Q -Werte (50, 100, 200, 400) dargestellt. Aus den Konturdiagrammen können nun die α - und β -Werte für verschiedene geologische Begebenheiten (Schichtmächtigkeit und v_P - bzw. v_S -Wellengeschwindigkeit) und für den Dämpfungsparameter Q bestimmt und daraus untergrund- und frequenzspezifische Abklingkurven berechnet werden.

5.1 Geometrische Amplitudenabnahme α

Die geometrische Amplitudenabnahme der seismischen Wellen wird durch den α -Wert definiert. Im Fall von reinen Oberflächenwellen beträgt $\alpha = 1$. Bei einer Dominanz von Raumwellen ist $\alpha = 2$. Abbildung 46 zeigt das Konturdiagramm für die α -Werte bei der Frequenz von 1.5 Hz. Hierbei ist zu sehen, dass die α -Werte für geringmächtige Schichten (0-200 m Mächtigkeit) um den Wert von $\alpha = 2$ streuen. Das deutet auf eine Dominanz von Raumwellen hin. Für größere Schichtmächtigkeiten (> 200 m) streuen die α -Werte um $\alpha = 1$, das auf eine Wellenausbreitung von Oberflächenwellen schließen lässt. Das Konturdiagramm für die α -Werte bei 3 Hz (Abbildung 47) zeigt für alle Schichtmächtigkeiten eine Dominanz von Oberflächenwellen ($\alpha \approx 1$). Abbildung 48 zeigt den Konturplot der Amplitudenabnahme α für den Frequenzpeak von 6 Hz. Auch hierbei ist nur eine geringe Streuung um $\alpha = 1$ zu erkennen. Die geometrische Amplitudenabnahme α zeigt somit für alle verschiedene Frequenzen eine Dominanz von Oberflächenwellen und eine Streuung um den Wert von $\alpha = 1$. Mit Hilfe dieser Konturdiagramme kann die Amplitudenabnahme α für unterschiedliche geologische Begebenheiten und für verschiedene Peakfrequenzen bestimmt und als Parameter in die Formel der Abklingkurve eingesetzt werden.

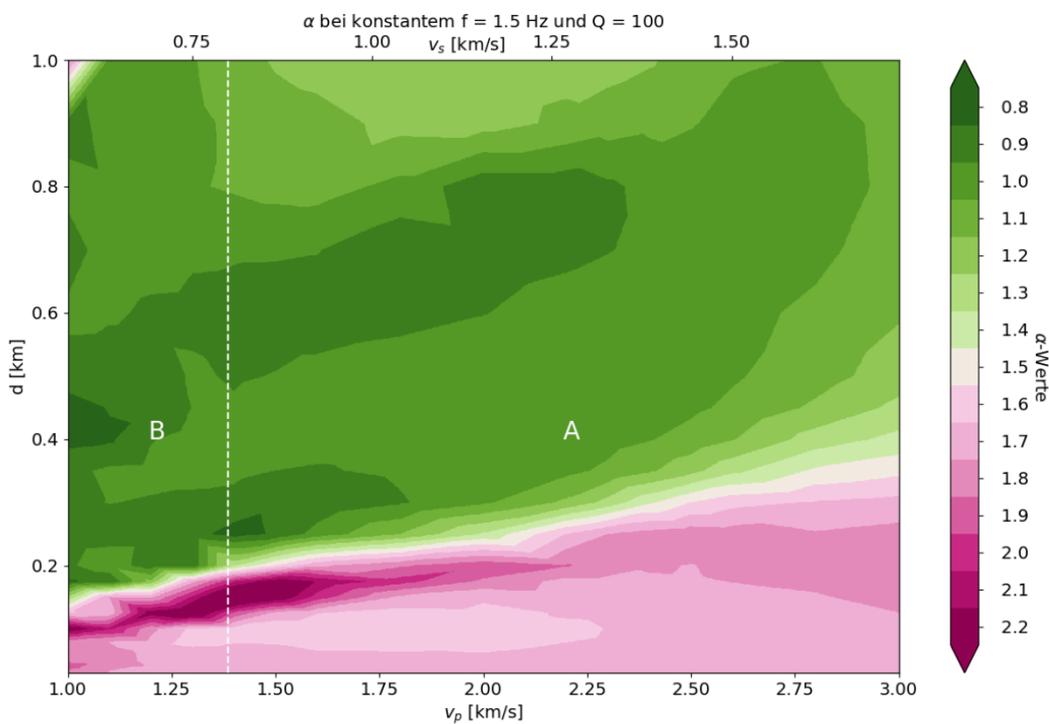


Abbildung 46: Konturdiagramm der aus den synthetischen Modellen berechneten Amplitudenabnahme α für die Peakfrequenz von 1.5 Hz. A und B stellen die Baugrundklassen dar

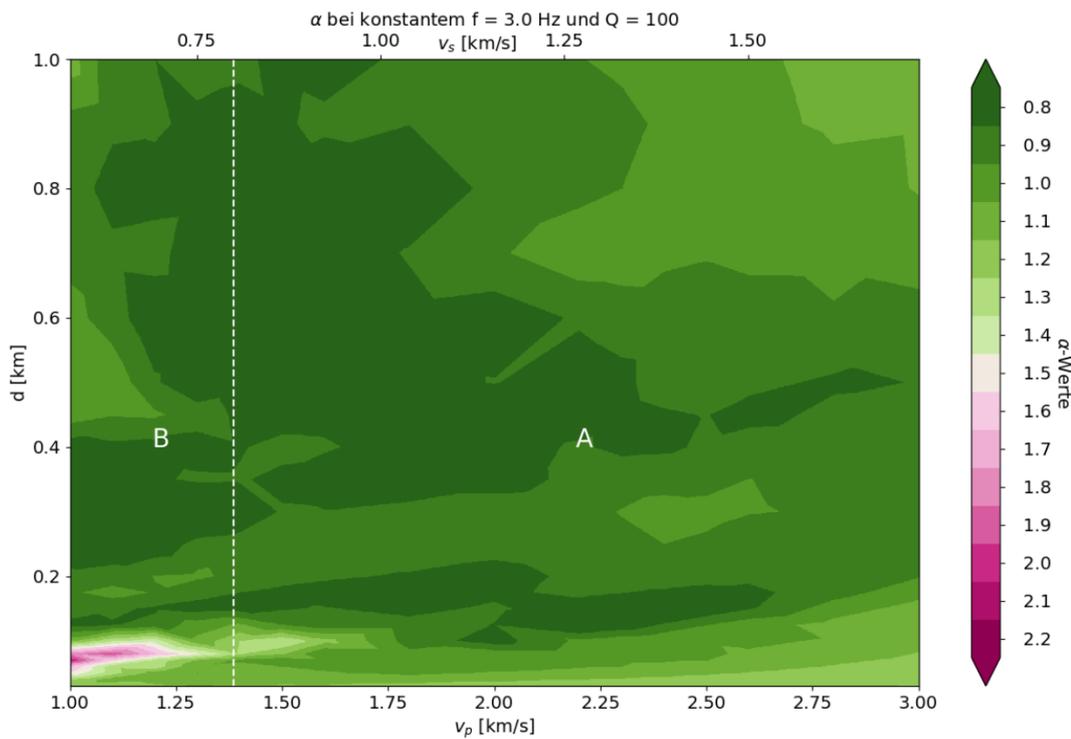


Abbildung 47: Konturdiagramm der aus den synthetischen Modellen berechneten Amplitudenabnahme α für die Peakfrequenz von 3 Hz. A und B stellen die Baugrundklassen dar

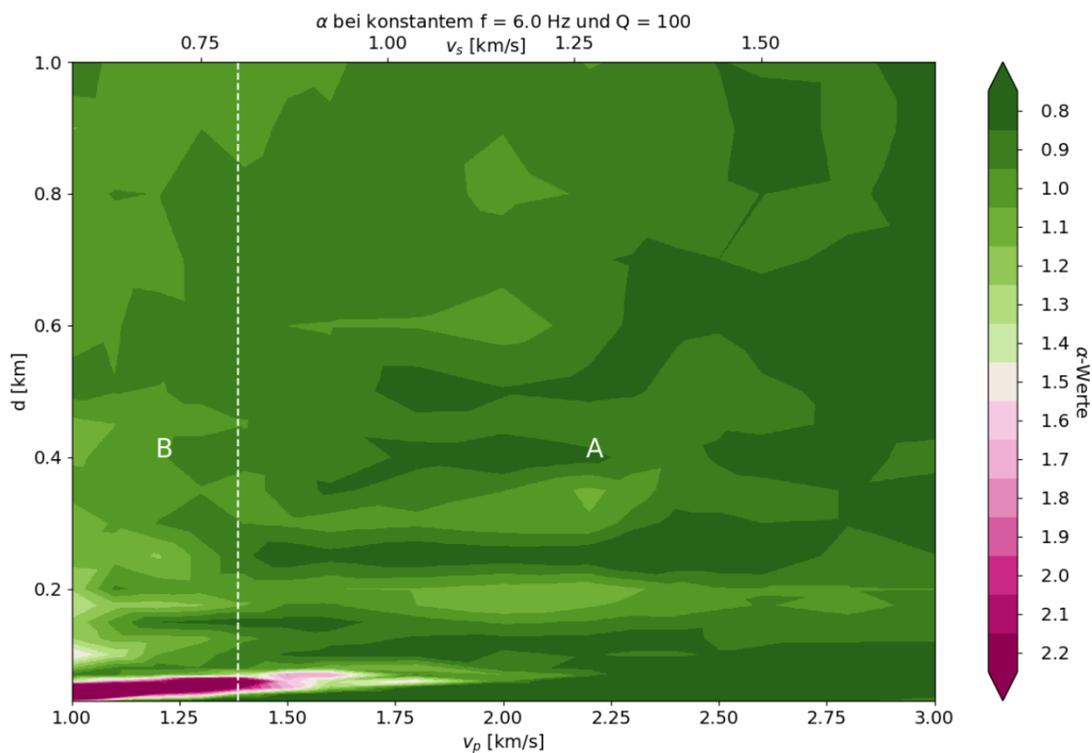


Abbildung 48: Konturdiagramm der aus den synthetischen Modellen berechneten Amplitudenabnahme α für die Peakfrequenz von 6 Hz. A und B stellen die Baugrundklassen dar

5.2 Dämpfungskoeffizient β

Der Koeffizient β beschreibt die Dämpfung der seismischen Wellen durch Absorption oder Streuung elastischer Energie. Er verstärkt die Amplitudenabnahme mit zunehmender Entfernung. Je größer die Dämpfung ist, desto kleiner ist der Dämpfungsparameter Q . In den Abbildung 49 – 52 die Konturdiagramme zur Quantifizierung des Dämpfungskoeffizienten β für die Peakfrequenz $f = 3$ Hz sowie die Q -Werte von 50, 100, 200 und 400 dargestellt.

Die Konturdiagramme für die Peakfrequenzen von $f = 1.5$ Hz und 6 Hz und für die Q-Werte von 50 bis 400 sind in Anhang 1 gezeigt. Vergleicht man den Dämpfungsparameter β für unterschiedliche Q-Faktoren, so erkennt man, dass die β -Werte mit steigendem Q größer werden und somit einen immer geringeren Einfluss auf das Amplitudenabklingen mit der Entfernung haben. Ein sehr geringer Q-Wert entspricht einer starken Dämpfung, weswegen β stark negativ wird und somit das Amplitudenabklingverhalten mit der Entfernung stark beeinflusst. Die Konturdiagramme zeigen eine starke Abhängigkeit des β -Wertes hinsichtlich der Q-Werte, die für einen potentiellen Standort neuer WKAs bekannt sein müssen. Mit Hilfe dieser Diagramme kann der Dämpfungskoeffizient β für unterschiedliche geologische Begebenheiten und für drei verschiedene Peakfrequenzen (1.5 Hz, 3 Hz und 6 Hz) in Abhängigkeit des Dämpfungsparameters Q bestimmt und in die Formel zur Bestimmung einer individuellen Abklingkurve eingesetzt werden.

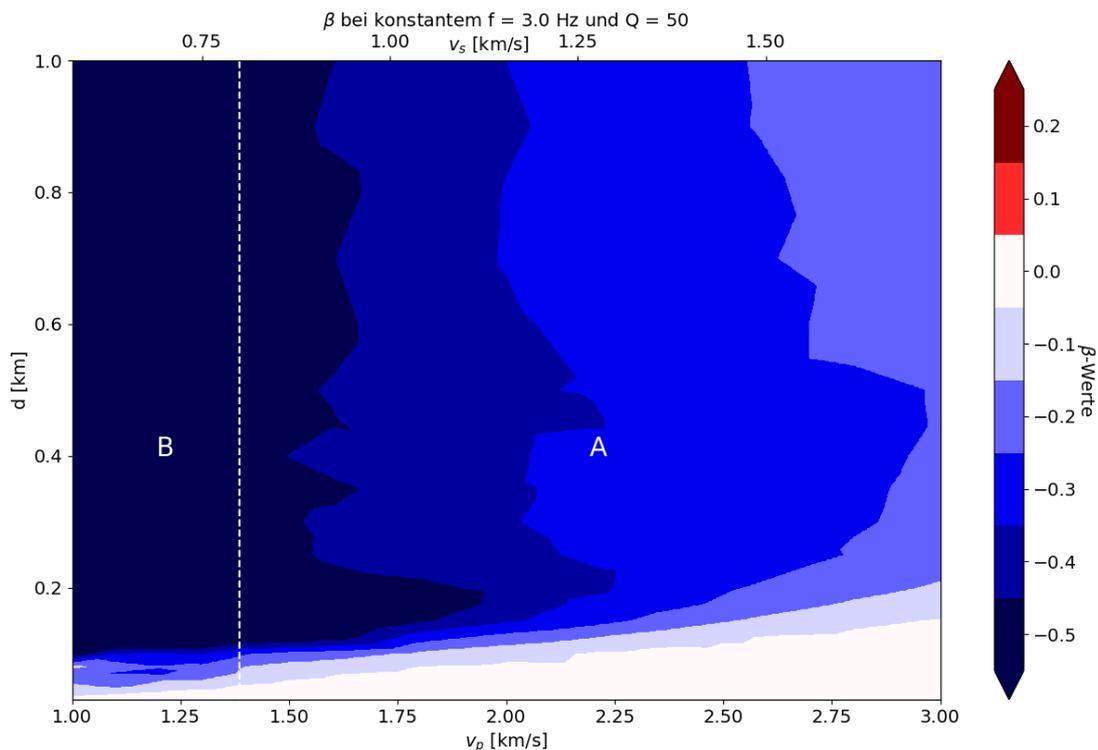


Abbildung 49: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 50. A und B stellen die Baugrundklassen dar

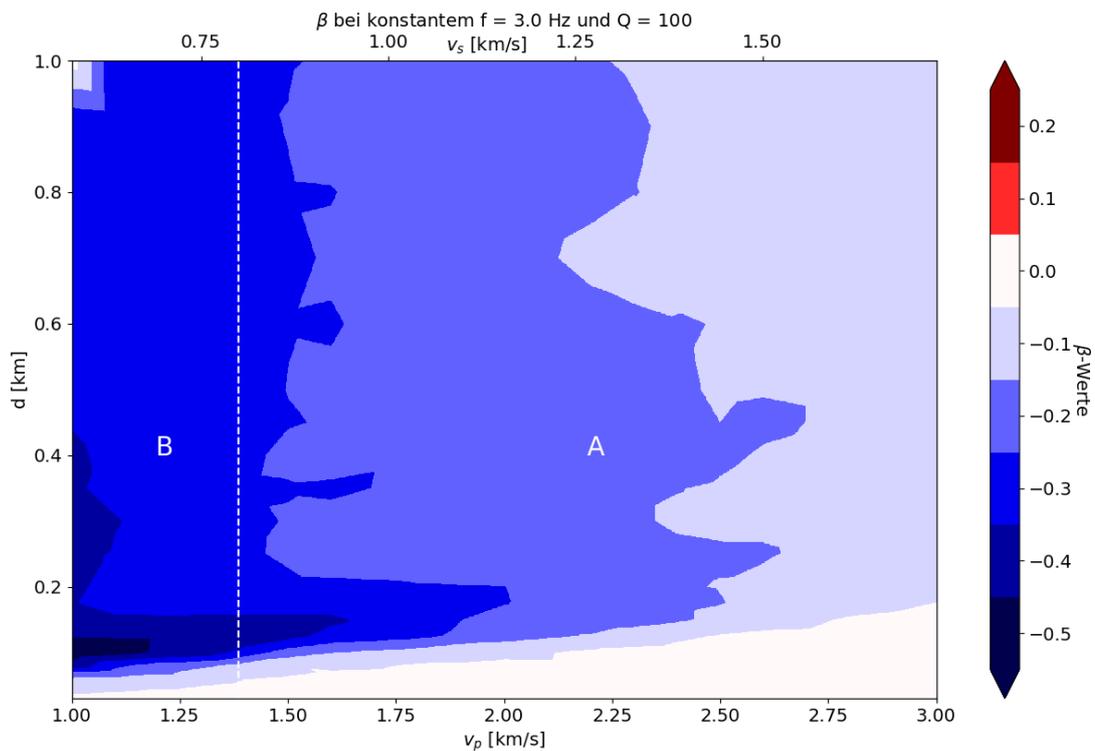


Abbildung 50: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 100. A und B stellen die Baugrundklassen dar

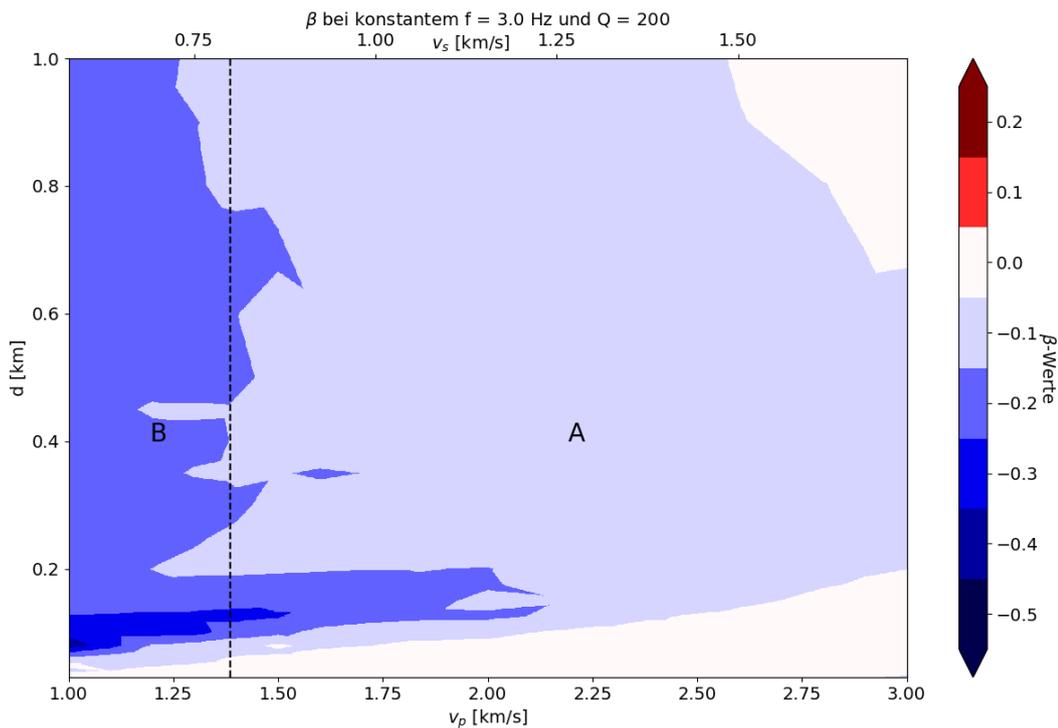


Abbildung 51: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 200. A und B stellen die Baugrundklassen dar

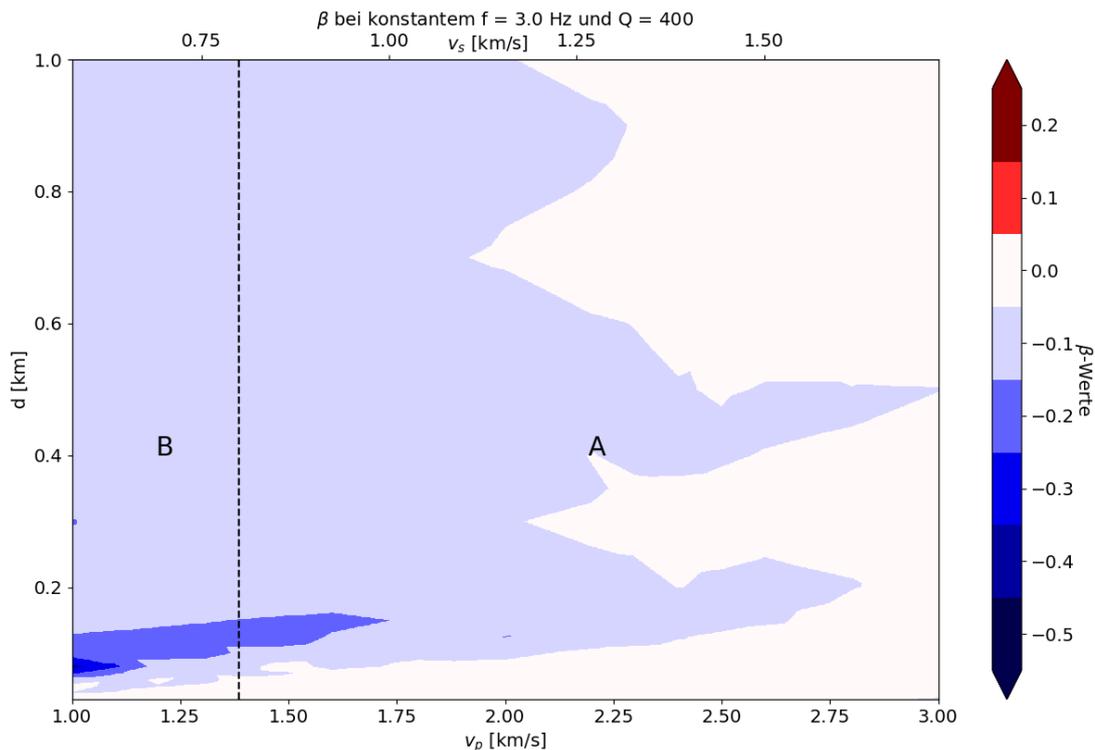


Abbildung 52: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 3 Hz und ein konstantes Q von 400. A und B stellen die Baugrundklassen dar

6 Grenzwert

Zur Definition eines Grenzwertes an einer seismologischen Station, der von WKA-induzierten seismischen Wellen nicht überschritten werden soll, ist das tatsächlich vorhandene Rauschlevel an einer seismologischen Permanentstation zu ermitteln. Die natürlichen Rauschbedingungen einer seismologischen Station können mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (probability density functions, PDF) berechnet werden (nach McNamara & Buland, 2004). Die PDF stellt das Rauschniveau als Wahrscheinlichkeitsverteilung über einen Zeitraum dar. Zur Berechnung der PDFs werden die Daten einer Permanentstation in einstündige Zeitsegmente geteilt, für jedes Zeitsegment ein PSD berechnet und diese als Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. Mit Hilfe der PDFs lässt sich daraufhin ein Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$ für ein maximal tolerierbares seismisches Effektivrauschen definieren. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wird der Grenzwert als der Rauschpegel definiert, der in 99 % der Zeit nicht überschritten wird. Als Kriterium für die Festlegung eines Schutzradius wird festgelegt, dass die von einer WKA an der Station zusätzlich erzeugte Rauschleistung das maximale Rauschniveau ohne WKA (Grenzwert) nicht überschreiten soll. Abbildung 53 zeigt eine PDF über das Jahr 2018 von der seismologischen Station Collm (CLL). Hiermit lässt sich das maximal tolerierbare Effektivrauschen bestimmen, das in 99 % der Zeit innerhalb des Jahres 2018 nicht überschritten wurde (Abbildung 53, schwarz gestrichelte Linie).

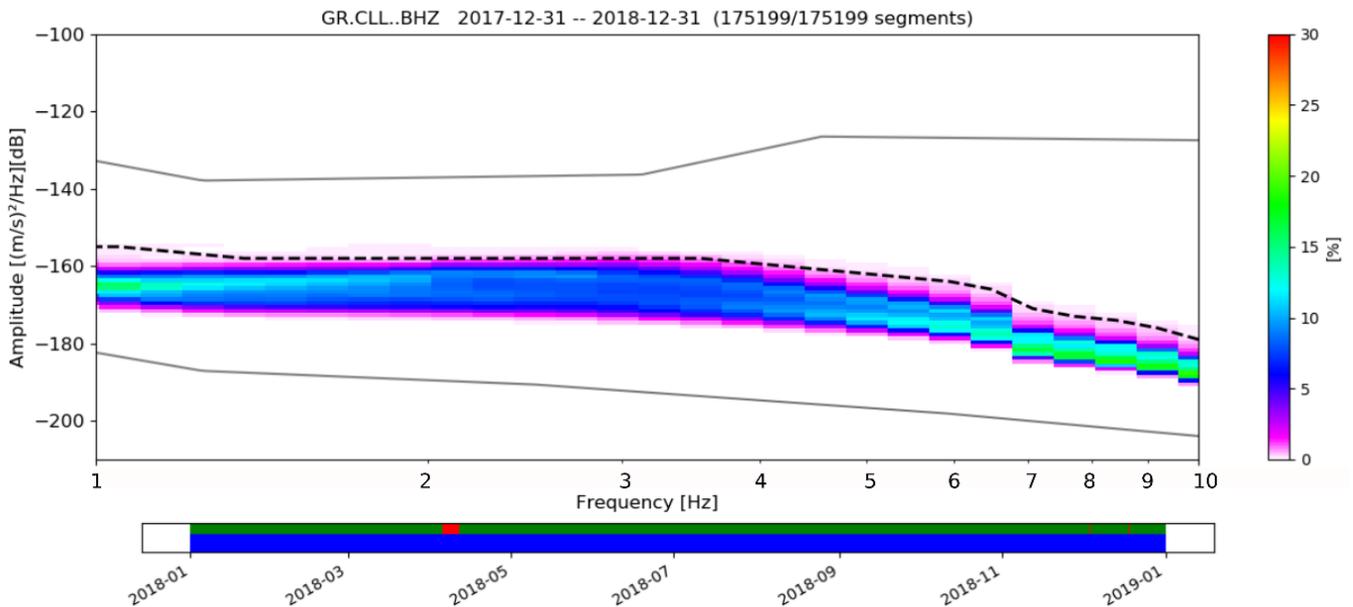


Abbildung 53: Verteilung der natürlichen Rauschbedingungen der seismologischen Permanentstation CLL über das Jahr 2018. Die grauen Linien zeigen das New Low Noise Model (NLNM) und das New High Noise Model (NHNM) nach Peterson (1993). Die Farbskala zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des seismischen Rauschens

7 Exemplarische Definition eines Schutzradius

Im Folgenden wird exemplarisch die Definition eines Schutzradius um die seismologische Permanentstation CLL dargestellt. Da die WKA Pfinztal (Kap. 4.3) das einzige Messobjekt mit spezifischen WKA-Daten ist, wird der Schutzradius exemplarisch für diesen einzeln stehenden WKA-Typ vorgestellt:

Ein Schutzradius lässt sich zusammengefasst mit Hilfe folgender Parameter definieren. Eine genaue Erklärung der Parameter ist in Kapitel 1.2 beschrieben.

1. Festlegung der mittleren spektralen Rauschleistung: $PSD(f_P, X)$
 - (i) Emissionskoeffizient $C_E(f_P, v_r, x_r)$
 - (ii) Funktion der Windgeschwindigkeit $F(v)$
 - (iii) Abklingkoeffizient $C_A(f_P, X)$
2. Definition eines Grenzwertes an einer seismologischen Station: $PSD_{Grenz}(f_P)$
3. Definition des Schutzradius aus der Bedingung: $PSD(f_P, X_s) < PSD_{Grenz}(f_P)$

Im Folgenden werden die zuvor aufgeführten Punkte im Detail beschrieben:

1. Die mittlere spektrale Rauschleistung tritt bei bestimmten Peakfrequenzen f_P auf. Diese werden der Bewertung zugrunde gelegt. Da niederfrequente seismische Signale langsamer mit der Entfernung zur Quelle abklingen, wird der Schutzradius beispielhaft anhand der Peakfrequenz von 1.65 Hz berechnet (vgl. Abbildung 30 und Abbildung 31).

- (i) Der erste Schritt ist die Quantifizierung des Emissionskoeffizienten C_E . Dieser kann mit Hilfe der Ringmessungen ermittelt werden und wird für eine Peakfrequenz in einer normierten Entfernung x_r bei einer festgelegten Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe v_r definiert. Für die Peakfrequenz von 1.65 Hz entspricht der

Emissionskoeffizient $C_E = -141.8 \text{ dB/Hz}$ in einer Entfernung von $x_r = 50 \text{ m}$ zur WKA und einer Referenzwindgeschwindigkeit von $v_r = 6 \text{ m/s}$ (Abbildung 54, grüne Raute).

(ii) Der zweite Schritt ist die Skalierung der Emission auf höhere und typische Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe. Dies erfolgt mit Hilfe der Funktion der Windgeschwindigkeit $F(v)$. Innerhalb dieses Projektes ist die Emission für die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe berechnet worden, die in 90 % der Zeit über das Jahr 2018 an der WKA nicht überschritten wurde. Die frequenzspezifische Windgeschwindigkeitsfunktion $F(v)$ ist für den Frequenzpeak von 1.65 Hz $F(v) = 19.58 \cdot \log(v/v_r)$ (Abbildung 54, rote Linie). Für eine Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von $v = 10 \text{ m/s}$ ist $F(v) = +4.3 \text{ dB/Hz}$. (Abbildung 54, pinke Raute).

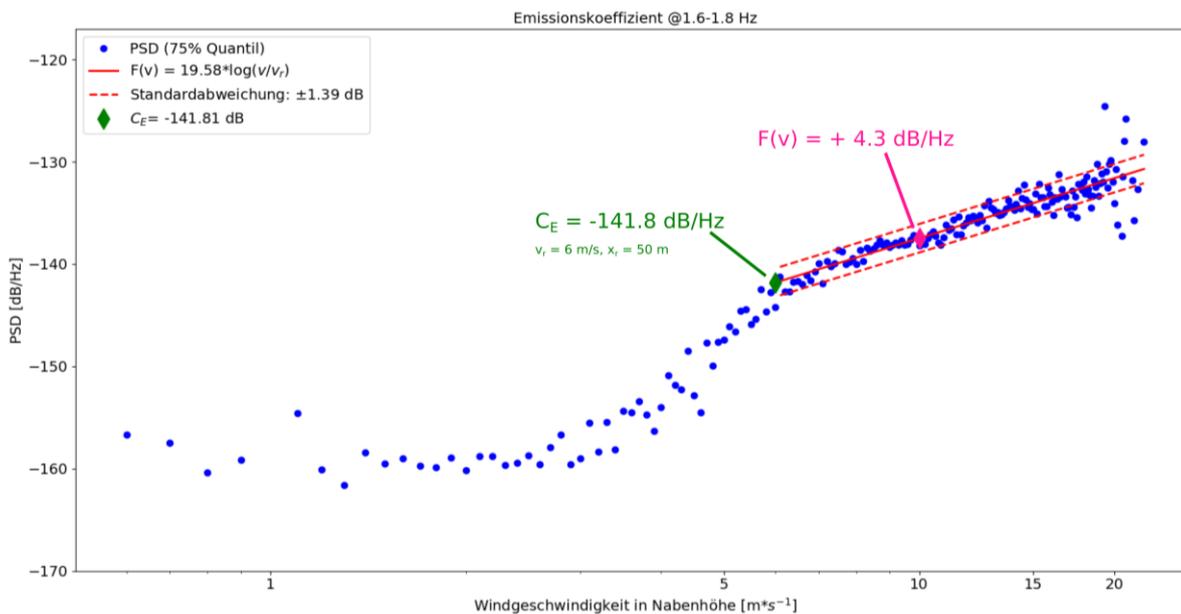


Abbildung 54: Emission der WKA für den Frequenzpeak um 1.65 Hz. Hiermit lässt sich ein Emissionskoeffizient C_E (grüne Raute) bestimmen. Mit Hilfe der Funktion der Windgeschwindigkeit $F(v)$ (pinke Raute) wird die Erhöhung der Emission für höhere Windgeschwindigkeiten berechnet

(iii) Der dritte Schritt ist die Definition des Abklingkoeffizienten C_A . Dieser wird mit Hilfe der Modellrechnungen bestimmt. Dabei kann anhand der Konturdiagramme (Abbildung 46 - Abbildung 51 und Anhang 1) eine frequenz- und untergrundspezifische synthetische Abklingkurve ermittelt werden. Hierfür werden die geologischen Begebenheiten und die oberflächennahen v_P - bzw. v_S -Geschwindigkeiten für das Gebiet um eine WKA sowie der Dämpfungsparameter Q benötigt. Für den Untergrund um die WKA bei Pfinztal entspricht für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und einem Q von 100 die Amplitudenabnahme $\alpha = 1$ und der Dämpfungskoeffizient $\beta = -0.1$. Anhand dieser zwei Parameter lässt sich eine synthetische Abklingkurve berechnen, wie es in Kapitel 5 beschrieben ist (Abbildung 55).

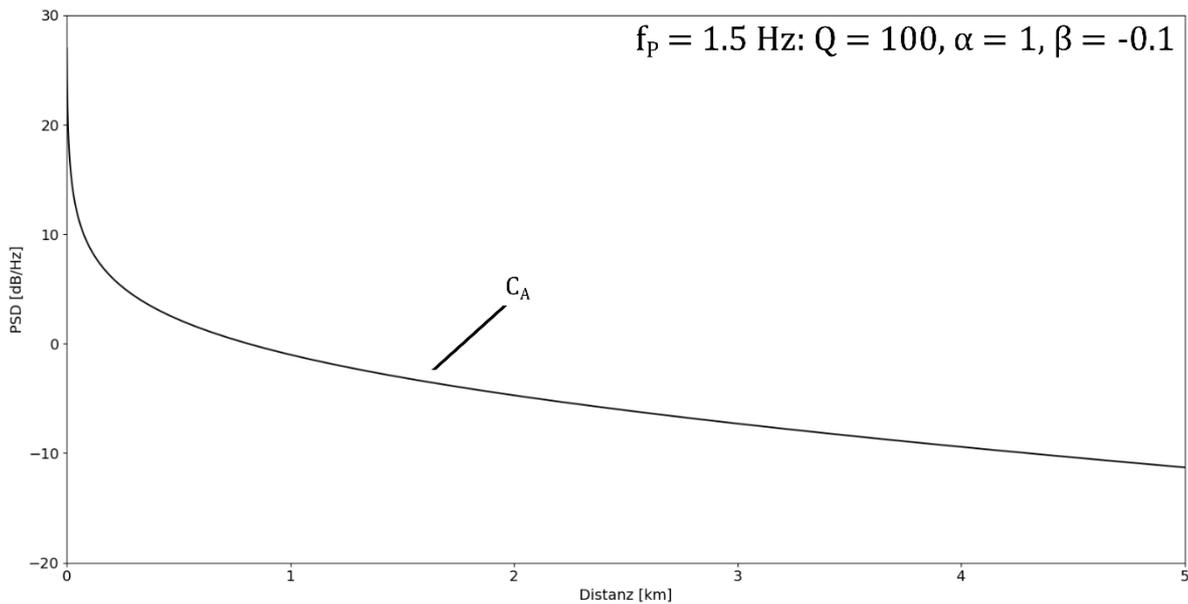


Abbildung 55: Synthetische Abklingkurve für den Frequenzpeak von 1.5 Hz. Die Parameter α und β wurden anhand der geologischen Begebenheiten bei Pfinztal bestimmt

Durch die zuvor definierten Koeffizienten C_E und C_A sowie $F(v)$ kann nun eine mittlere spektrale Rauschleistung $PSD(f_p, x)$ auf die Distanz definiert und aufgetragen werden (Abbildung 56).

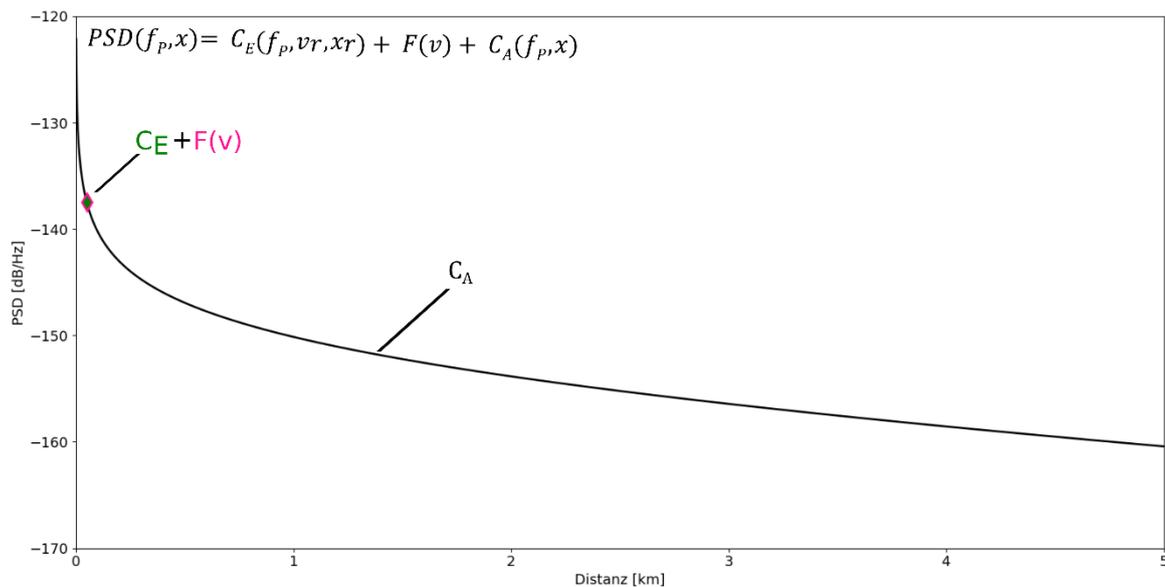


Abbildung 56: Die mittlere spektrale Rauschleistung $PSD(f_p, x)$ setzt sich aus dem Emissionskoeffizienten C_E , $F(v)$ und der synthetischen Abklingkurve C_A zusammen

2. Als nächstes muss ein Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_p)$ für ein maximal tolerierbares Effektivrauschen an einer seismologischen Permanentstation definiert werden. Das kann anhand von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bestimmt werden (vgl. Kapitel 6). Am Beispiel der seismologischen Station des Collm Observatorium beträgt im Jahr 2018 der seismische Rauschpegel um die Frequenz von 1.65 Hz in 99 % der Zeit höchstens -158 dB/Hz (Abbildung 57).

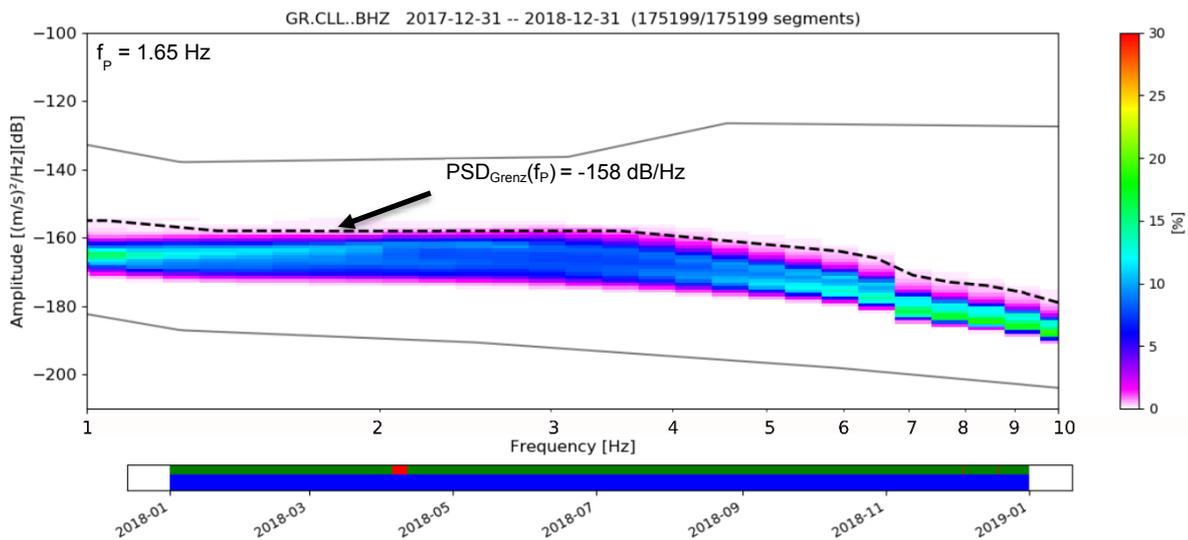


Abbildung 57: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die den natürlichen Rauschpegel an der seismologischen Station des Collm zeigt. Der Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$ beträgt -158 dB/Hz bei einer Frequenz von 1.65 Hz

3. Als letzter Schritt wird nun ermittelt in welcher Entfernung die mittlere spektrale Rauschleistung $PSD(f_P, x)$ den Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$ unterschreitet. Ist diese Bedingung erfüllt, ist eine Datenaufnahme der seismologischen Station ohne Störeinflüsse der WKA gewährleistet. Für das Beispiel der Station CLL ergibt sich ein Schutzradius von ca. 3800 m (Abbildung 58).

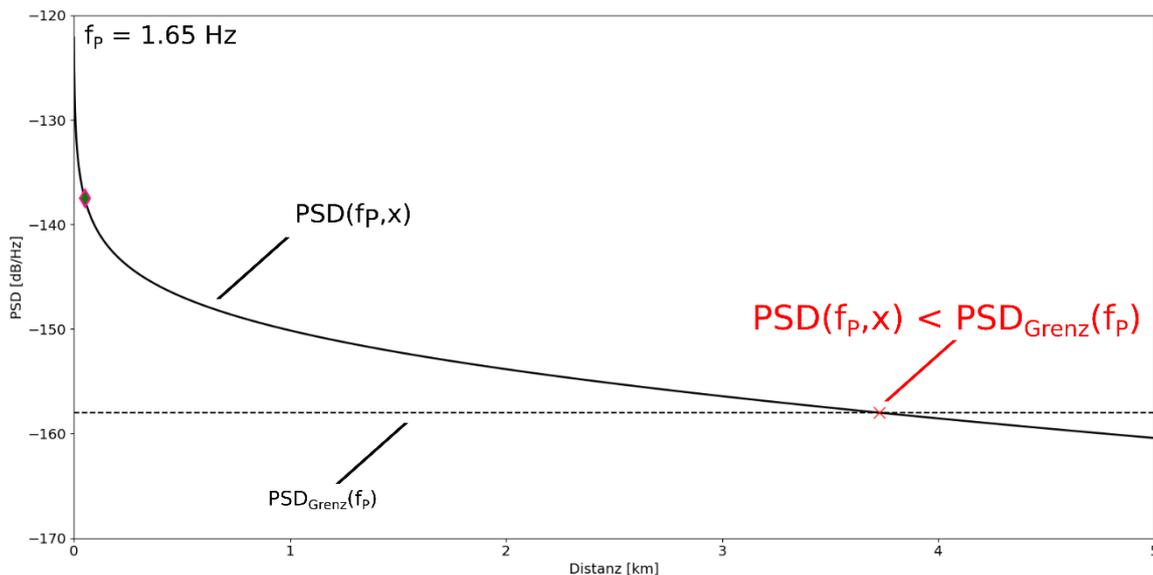


Abbildung 58: Unterschreitet $PSD(f_P, x)$ den Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$, so ist die Bedingung des Schutzradius erfüllt. In diesem Beispiel wäre dies nach etwa 3800 m der Fall

8 Zusammenfassung

WKAs erzeugen seismisches Rauschen mit Vorzugsfrequenzen, die sich durch klare Bänder mit erhöhten Amplituden in den Spektren des Bodenrauschens identifizieren lassen. Da diese Bänder innerhalb des seismisch interessanten Frequenzbandes liegen ($1-20$ Hz) und sich kilometerweit ausbreiten können, bilden sie ein signifikantes Störsignal für seismologische Stationen zur Erdbebenüberwachung.

Die Frequenzen der Bänder sind abhängig vom Typ der WKA, insbesondere von der Höhe des Turmes, der bewegten Masse und der Leistung der WKA. Eine eindeutige Abhängigkeit der Peakfrequenzen von der

Windgeschwindigkeit oder der Rotordrehzahl wurde nicht festgestellt. Die Stärke des Störsignals (Amplitude des Frequenzbandes) ist direkt abhängig von der Rotordrehzahl und der Windgeschwindigkeit. Bei Stillstand der WKA verschwindet das Störsignal.

Insgesamt wurden für dieses Forschungsprojekt drei WKAs und ein WP in Sachsen und zusätzliche eine WKA in Baden-Württemberg für die Messkampagnen gewählt. Auf Grund fehlender Kooperationsbereitschaft der WKA-Betreiber ist die WKA bei Pfinztal die einzige WKA mit zur Verfügung stehender WKA-Betriebsdaten, die zur Quantifizierung der Emission einer WKA erforderlich sind.

Die Messungen an den WKAs ohne WKA-Daten zeigen klare Frequenzpeaks im niederfrequenten Bereich zwischen 1.5-8 Hz. Das seismische Rauschniveau dieser Frequenzpeaks über die Zeit lässt einen Zusammenhang zwischen Amplitudenstärke und Aktivität der WKA (Leistungsaufnahme, Rotordrehzahl) bzw. Windgeschwindigkeit vermuten. Dies lässt sich aber auf Grund fehlender spezifischer WKA-Daten nicht quantifizieren. Da die WKA bei Pfinztal das einzige Messobjekt mit spezifischen WKA-Daten ist, jedoch gleichzeitig als 2.0 MW-Anlage eine moderne WKA repräsentiert, ist der Fokus des Forschungsprojektes zur Quantifizierung der WKA-Emission auf diese WKA gelegt worden.

Ergebnisse der Messkampagne bei der WKA Pfinztal bestätigen einen direkten Zusammenhang zwischen der Amplitudenstärke WKA-induzierter seismischer Signale und der Rotordrehzahl der WKA bzw. der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe. Es wurden Peakfrequenzen zwischen 1 Hz und 5.25 Hz identifiziert, die eindeutig der WKA zugeordnet werden können. Es wurden für vier Peakfrequenzen Emissionskoeffizienten (C_E) in einer normierten Entfernung zur WKA und einer Referenzwindgeschwindigkeit von 6 m/s definiert. Zudem sind frequenzspezifische Funktionen der Windgeschwindigkeit ($F(v)$) berechnet worden um die windabhängige Erhöhung der Emission zu quantifizieren. Die WKA-induzierten seismischen Signale konnten bis zu einer Distanz von ca. 1500 m nachgewiesen werden. Weiter entfernte Stationen zeigen keinen Einfluss der WKA-induzierten seismischen Wellen. Dies lässt sich durch die vorherrschende Geologie sowie durch anthropogene Störeinflüsse (Bahnlinie, Autobahn A5) erklären.

Das Amplituden-Abklingverhalten mit der Entfernung ist gegeben durch die Ausbreitungsbedingungen und Dämpfung der seismischen Wellen. Hierfür wurden Modellrechnungen für horizontal geschichtete Untergründe für drei Quellsignale (1.5 Hz, 3 Hz und 6 Hz) berechnet. Ergebnisse der Modellierungen zeigen eine Dominanz von Oberflächenwellenausbreitung und eine starke Abhängigkeit der Amplitudenabnahme hinsichtlich der Dämpfung. Anhand der Modellrechnungen können für eine bekannte geologische Begebenheit (Schichtmächtigkeit und v_P -Geschwindigkeit im oberflächennahen Untergrund) sowie für einen bekannten Dämpfungsparameter individuelle Abklingkurven berechnet werden.

Die Definition eines Grenzwertes kann mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) bestimmt werden, die das natürlich vorhandene Rauschniveau einer seismologischen Station quantifizieren. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurde das maximal tolerierbare Effektivrauschen an der seismologischen Station und somit der Grenzwert als das Rauschlevel definiert, das in 99 % der Zeit nicht überschritten wird.

Zur Definition eines Schutzradius wird ein anlagenspezifischer Emissionswert und typische Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe benötigt. Zudem müssen die geologischen Begebenheiten und ein Dämpfungskoeffizient für den potentiellen Standort einer neuen WKA bekannt sein, um daraus untergrundspezifische Abklingkurven berechnen zu können. Des Weiteren müssen die natürlichen Rauschbedingungen einer seismologischen Station bekannt sein, um einen Grenzwert definieren zu können.

Mit Hilfe dieser Parameter wird eine mittlere spektrale Rauschleistung festgelegt. Diese hängt von dem Emissionskoeffizienten C_E ab, der für eine WKA-induzierte Peakfrequenz f_P in einer Referenzentfernung und bei einer festgelegten Windgeschwindigkeit definiert wird. Des Weiteren wird mit Hilfe einer frequenzspezifischen Windgeschwindigkeitsfunktion $F(v)$ die Erhöhung der Emission der WKA für typische Windgeschwindigkeiten in

Nabenhöhe berechnet. Zudem benötigt man zur Definition der mittleren spektralen Rauschleistung Angaben zum oberflächennahen Untergrund (geologische Begebenheiten und Dämpfungskoeffizient Q). Damit lässt sich die geometrische Amplitudenabnahme α und der Dämpfungskoeffizient β bestimmen, um damit eine untergrundspezifische Abklingkurve bestimmen zu können. Der Grenzwert einer seismologischen Station lässt sich durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bestimmen.

Zur Definition individueller Schutzradien wurde ein einfaches schematisches Bewertungsverfahren entwickelt (siehe Anhang 2). Unterschreitet die frequenz- und windabhängige Rauschleistung den Grenzwert an einer seismologischen Station, ist die Bedingung für einen Schutzradius erfüllt und gewährleistet, dass die Station nicht von WKA-induzierten Störsignalen betroffen ist.

9 Literaturverzeichnis

- Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings; German Version EN1998-1:2004+AC:2009. Beuth-Verlag, Berlin(2010).
- FLORES ESTRELLA, H., KORN, M. AND ALBERTS, K.: Analysis of the Influence of Wind Turbine Noise on Seismic Recordings at Two Wind Parks in Germany. *Journal of Geoscience and Environment Protection*(2017 a), 5, S.76-91.
- FLORES ESTRELLA, H., KORN, M, SONDERMAYERM E. AND SCHERING, K.: Windkraftanlagen und seismische Stationen: eine offene Diskussion. Bisheriger Zustand in Sachsen. *DGG Mitteilungen*(2017b), 2, S.11-15.
- Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen. *Dreijahresbericht 2010 - 2012*. Dresden(2013).
- MARCILLO, O. AND CARMICHAEL, J: The detection of Wind-Turbine Noise in Seismic Records. *Seimol. Res. Letters*(2018) 78(5), S.1826-1837.
- MCNAMARA, D.E. AND BULAND, R.P.: Ambient noise levels in the continental united states, *Bulletin of the seismological society of America*(2004), 94, S.1517-1527.
- NEMES, C. AND MUNTEANU, F.: The wind energy system performance overview: capacity factor vs. technical efficiency, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*(2011), 5, S.159-166.
- NEUFFER, T. AND KREMERS, S: How Wind Turbines Affect the Performance of Seismic Monitoring Stations and Networks. 77. *Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, 27. –30. März 2017 in Potsdam(2017).
- Peterson, J.: Observations and modelling of background seismic noise, Open-file report 93-322, Albuquerque, New Mexico: U.S Geological Survey(1993).
- SACCOROTTI, G., PICCININI, D., CAUCHIE, L. FIORI, I.: SEISMIC NOISE BY WIND FARMS: A Case Study from the VIRGO Gravitational Wave Observatory, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*(2011) (101(2)), S.568.
- SCHOFIELD, R.: Seismic measurements at the Stateline wind project. Rept. No. LIGO T020104-00-Z, Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory(2001), verfügbar unter: <https://dcc.ligo.org/public/0027/T020104/000/T020104-00.pdf>, zuletzt angesehen am: 30.11.2018.
- STAMMERLER, K. AND CERANNA, L.: Influence of Wind Turbines on Seismic Records of the Gräfenberg Array. *Seismological Research Letters*(2016), Vol. 87, Number 5.
- STYLES, P, ENGLAND, R., STIMPSON, I. G., TOON, S. M., BOWERS, D. AND HAYES, M.: Microseismic and infrasound monitoring of low frequency noise and vibrations from windfarms: recommendations on the siting of windfarms in the vicinity of Eskdalemuir, Scotland. Keele University, UK(2005), verfügbar unter: https://www.keele.ac.uk/geophysics/appliedseismology/wind/Final_Report.pdf, zuletzt angesehen am: 30.11.2019.
- WindGuard GmbH: Windenergieanlagen in Deutschland, verfügbar unter: <http://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>, zuletzt angesehen am: 14.11.2019.
- ZIEGER, T AND RITTER, J.: Influence of wind turbines on seismic stations in the upper rhine graben, SW Germany, *Journal Seismology*(2018), 22, S.105-122.

Anhang

Anhang 1

Dämpfkoeffizient β

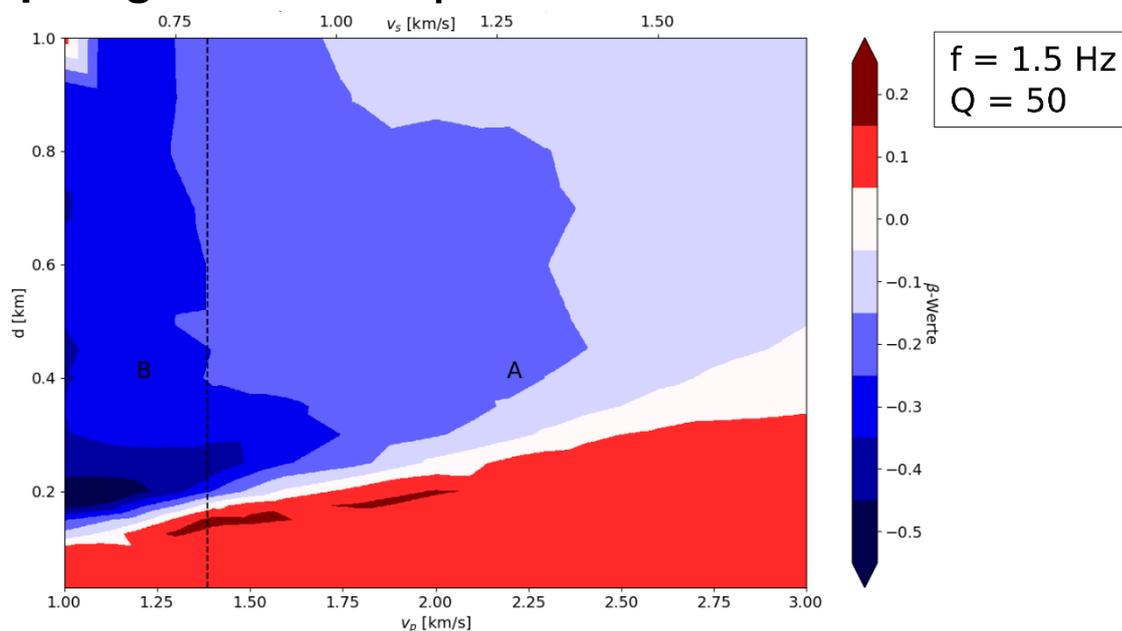


Abbildung 59: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 50. A und B stellen die Baugrundklassen dar

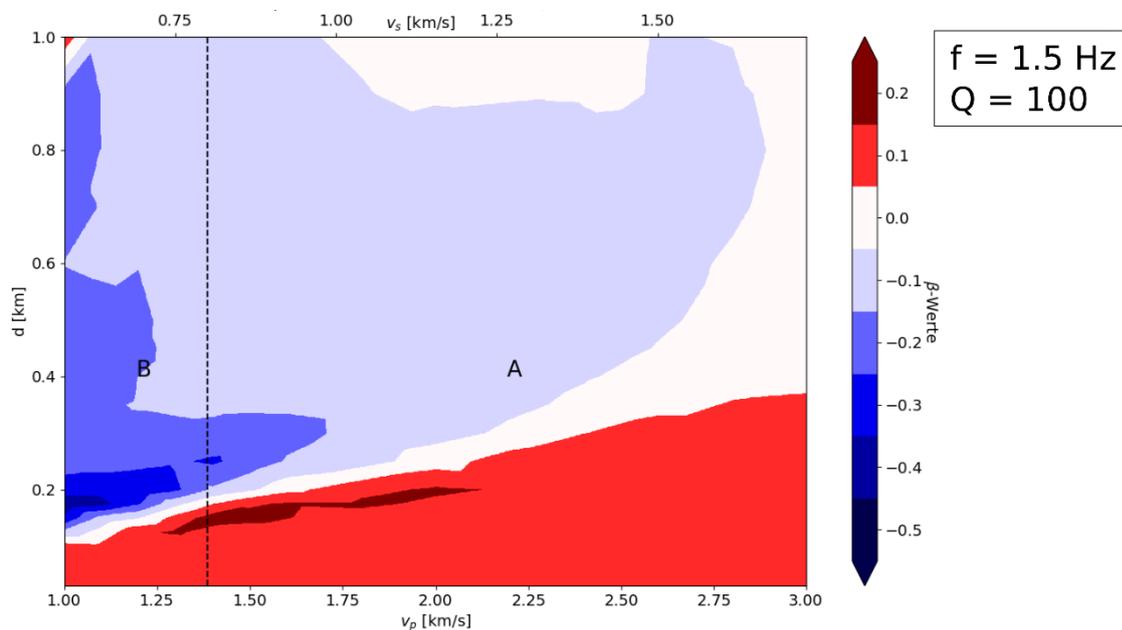


Abbildung 60: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 100. A und B stellen die Baugrundklassen dar

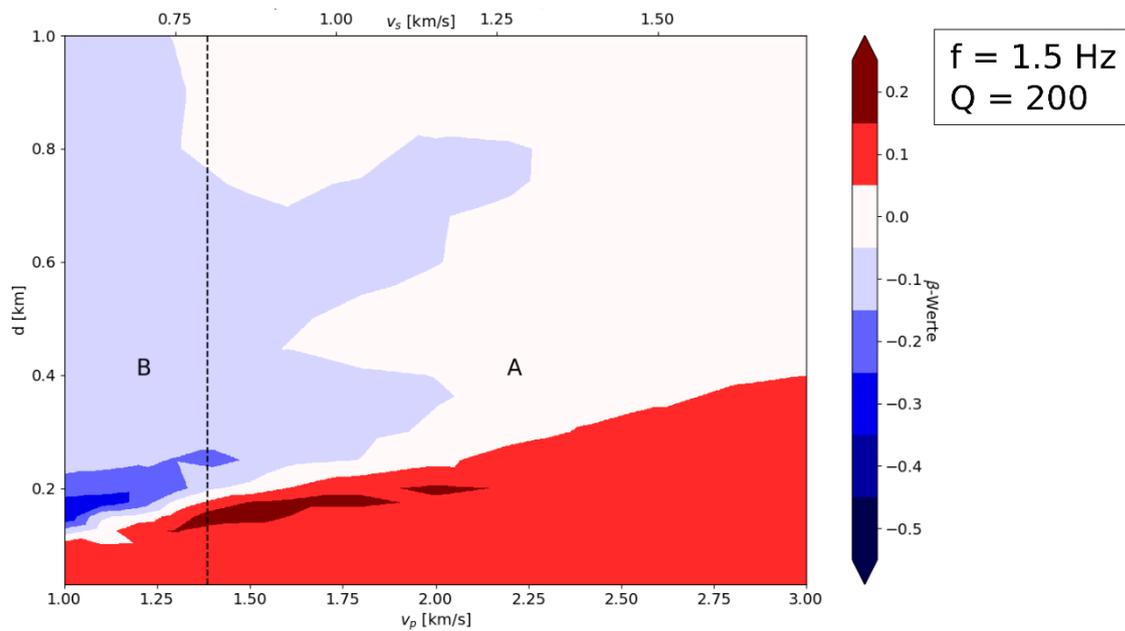


Abbildung 61: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 200. A und B stellen die Baugrundklassen dar

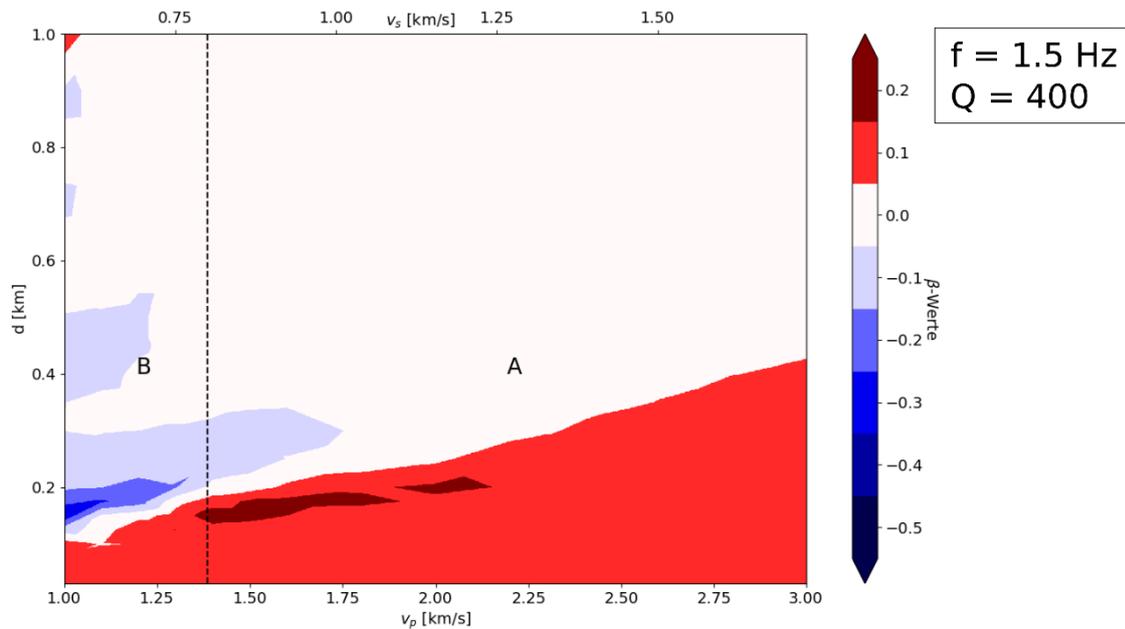


Abbildung 62: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 1.5 Hz und ein konstantes Q von 400. A und B stellen die Baugrundklassen dar

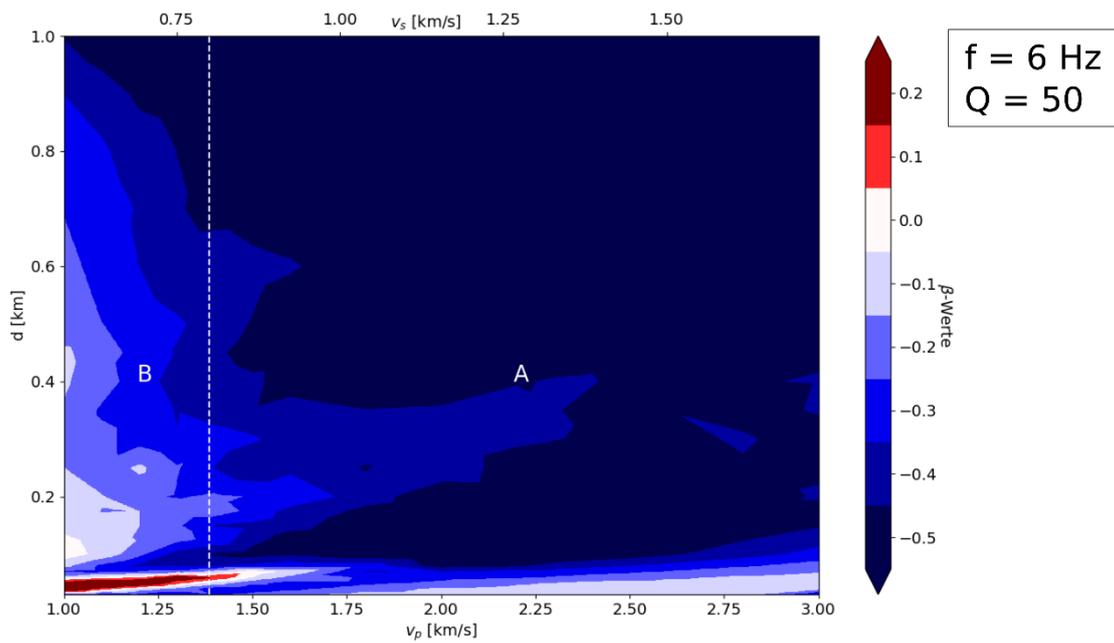


Abbildung 63: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 50. A und B stellen die Baugrundklassen dar

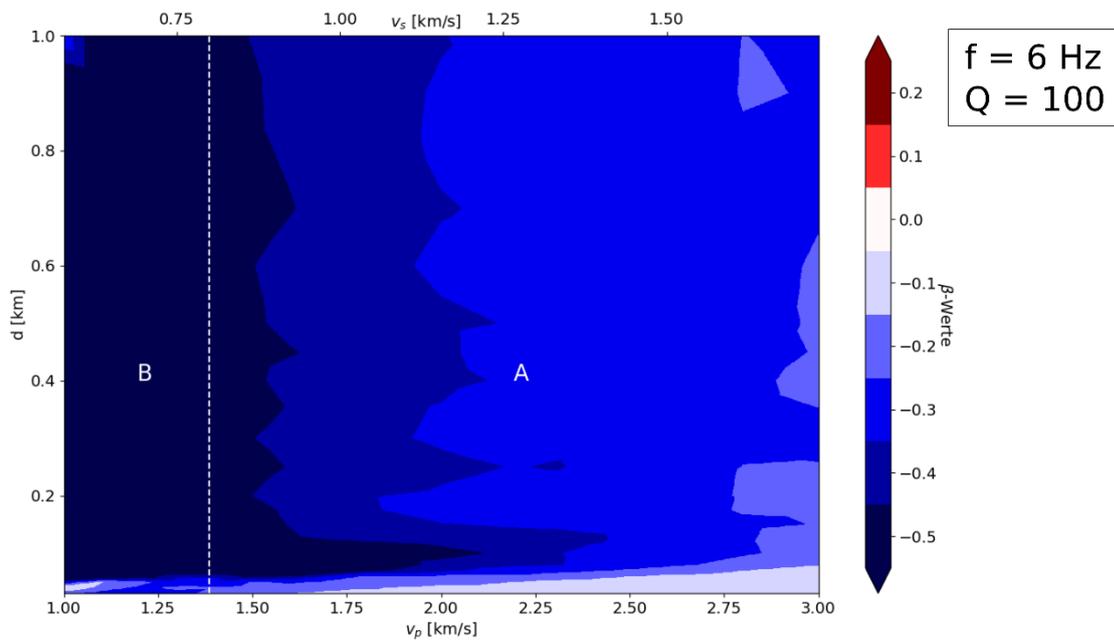


Abbildung 64: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 100. A und B stellen die Baugrundklassen dar

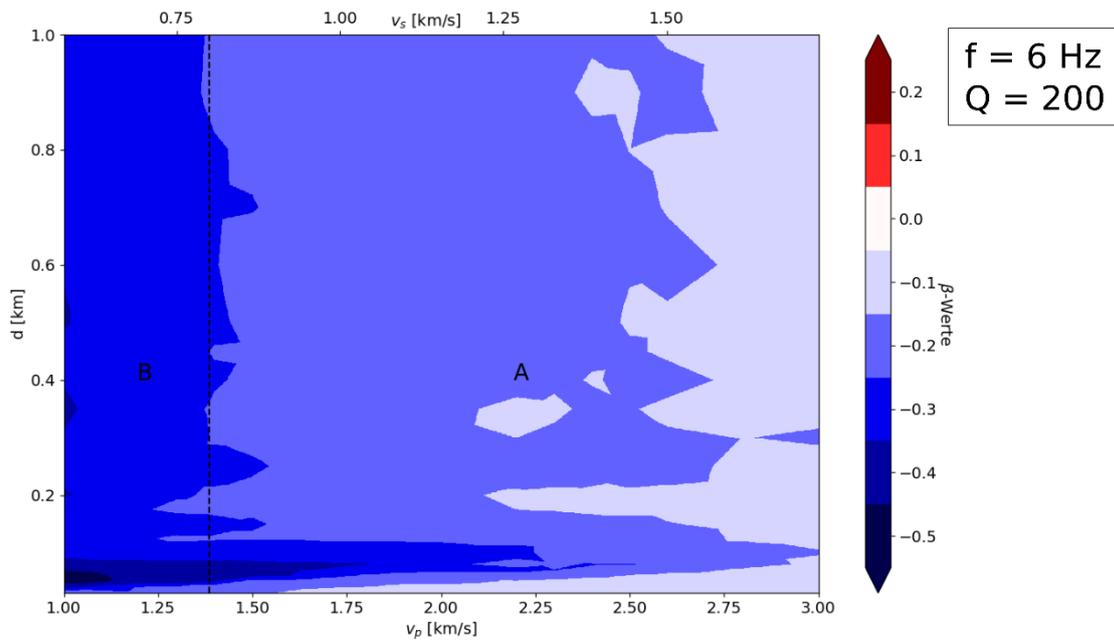


Abbildung 65: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 200. A und B stellen die Baugrundklassen dar

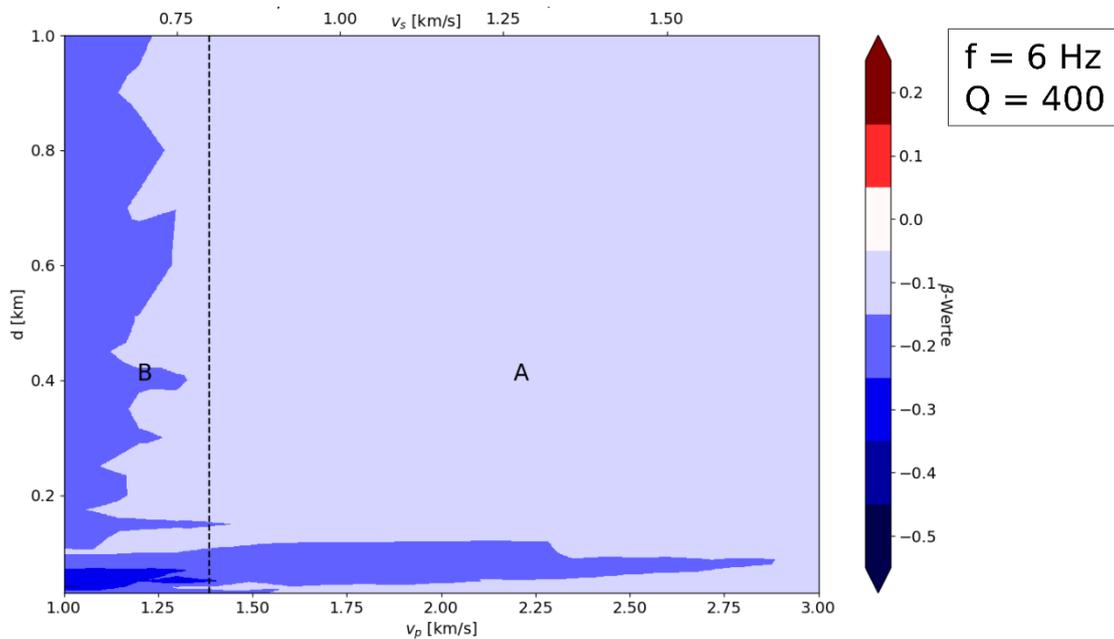


Abbildung 66: Konturdiagramm der β -Werte für die Peakfrequenz von 6 Hz und ein konstantes Q von 400. A und B stellen die Baugrundklassen dar

Manual zur Festlegung von Schutzradien

Es wird ein einfach zu handhabendes Berechnungsverfahren vorgeschlagen, mit den Schutzradien um seismologische Stationen bei der Errichtung von Windkraftanlagen festgelegt werden.

Grundlage des Verfahrens ist die Tatsache, dass WKAs nachweislich in bestimmten schmalen Frequenzbändern besonders viel seismische Energie in den Boden emittieren. Von besonderer Bedeutung sind dabei Frequenzbänder f_p (Peakfrequenzen) zwischen 1 Hz und ca. 6 Hz. Bei höheren Frequenzen ist durch die erhöhte Dämpfung der Wellen mit einem schnelleren Abklingen der emittierten Störenergie zu rechnen.

Als Maßeinheit wird die mittlere spektrale Leistungsdichte PSD (power spectral density) verwendet. Sie stellt die auf die Frequenz bezogene Leistung eines Signals dar und wird im logarithmischen Maßstab in dB/Hz angegeben.

Das Signal ist die Geschwindigkeit der Bodenbewegung in m/s , da seismische Stationen in aller Regel diese Größe direkt aufzeichnen.

Die Festlegung eines Schutzradius erfolgt in 3 Schritten:

1. Die PSD bei einer Peakfrequenz f_P im Abstand x von einer WKA lässt sich wie folgt beschreiben:

$$PSD(f_P, x) = C_E(f_P, v_r, x_r) + F(v) + C_A(f_P, x) \quad (1)$$

C_E bezeichnet den **Emissionskoeffizienten** der WKA im Frequenzband f_P . Er ist bei einer Referenzwindgeschwindigkeit v_r und in einer Referenzentfernung x_r vom Fußpunkt der WKA definiert. C_E hängt von der Bauart der WKA wie Nabenhöhe, Rotorbauart, Leistung und anderen konstruktiven Gegebenheiten ab. Er ist an existierenden WKAs durch Messungen zu bestimmen und in Tabellenform zu erfassen. Im Anwendungsfall wird C_E aus vorhandenen Tabellen (siehe Tabelle 3) entnommen. Als Richtwerte werden $v_r = 6 \text{ m/s}$ und $x_r = 100 \text{ m}$ vorgeschlagen. Sollten Messwerte in anderer Entfernung und/oder bei anderer Referenzwindgeschwindigkeit vorliegen, können sie mit einer Korrektur der Funktionen $F(v)$ und $C_A(f_P, x_r)$ (siehe unten) ebenfalls verwendet werden.

$F(v)$ ist eine **Funktion der Windgeschwindigkeit** und erhöht sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Es gilt

$$F(v) = C_0 \log \frac{v}{v_r} \quad (2)$$

Der WKA-spezifische Faktor C_0 ist ebenfalls aus Messungen an existierenden WKAs zu bestimmen und der Tabelle 3 zu entnehmen. Die Grenzwindgeschwindigkeit v ist die Windgeschwindigkeit, die in Nabenhöhe der WKA für den größten Teil der Zeit (Richtwert: 90 %) voraussichtlich nicht überschritten wird. Die Grenzwindgeschwindigkeit ist in der Regel vom WKA Betreiber zur Verfügung zu stellen.

$C_A(f_P, x_r)$ beschreibt die **entfernungsabhängige Abnahme** der PSD. Sie ist abhängig von den Eigenschaften des oberflächennahen Untergrunds. Es gilt:

$$C_A(f_P, x) = \log \left[\left(\frac{x_r}{x} \right)^\alpha e^{\beta(x-x_r)} \right] \quad (3)$$

Die beiden Parameter α und β werden den Abbildung 46-52 sowie Abbildung 59-66 entnommen. Sie hängen von der Mächtigkeit einer oberflächennahen Deckschicht, deren v_p -Geschwindigkeit und Dämpfungseigenschaften (Q-Wert) ab. Sollten diese Größen nur ungenau bekannt sein, kann für Festgesteinsstandorte $\alpha = 1.0$ und $\beta = -0.1$ angenommen werden.

2. Für die seismologische Station wird ein Grenzwert $PSD_{Grenz}(f_P)$ definiert, der als maximal tolerierbarer Rauschpegel gilt. Dieser wird in Abhängigkeit des natürlich vorhandenen Bodenrauschens an der jeweiligen seismologischen Station festgelegt. Dazu werden die Daten der Station über einen Zeitraum von 1 Jahr mit Hilfe der Software ‚obspy‘ analysiert (vgl. Abbildung 53). Für die Peakfrequenzen wird daraus der Rauschpegel $PSD_{Grenz}(f_P)$ entnommen, der für den größten Teil der Zeit (Richtwert: 99%) nicht überschritten wird.

3. Der Schutzradius x_S um die seismologische Station ist nunmehr durch die Bedingung gegeben, dass die in Schritt 1 definierte spektrale Rauschleistung $PSD(f_P, x)$ der WKA geringer ist als das in Schritt 2 bestimmte maximal tolerierbare Rauschen $PSD_{Grenz}(f_P)$ an der seismologischen Station:

$$PSD(f_P, x_S) < PSD_{Grenz}(f_P) \quad (4)$$

Sind mehrere Peakfrequenzen f_P verfügbar, ist zunächst für jede Frequenz ein Schutzradius zu bestimmen. Der endgültige Schutzradius entspricht dann dem größten erhaltenen Wert.

Tabelle 3: Parameter zur Definition von Schutzradien

WKA-Typ	Leistung (MW)	f_P (Hz)	C_E (dB)	v_r (m/s)	x_r (km)	C_0
Qreon Q82	2.0	1.70	-141.8	6.0	0.05	19.58
		2.50	-145.5	6.0	0.05	18.72
		3.35	-149.0	6.0	0.05	16.85
		5.25	-131.0	6.0	0.05	12.66

Weitere Werte zu WKA-Typen sollen in einem Folgeprojekt erhoben werden.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor:

Nikolaus Lerbs, Michael Korn
Institut für Geophysik und Geologie, Universität Leipzig
Talstraße 35, 04103 Leipzig
Telefon: +49 341 97 32814
E-Mail: nikolaus.lerbs@uni-leipzig.de / mikorn@uni-leipzig.de

Redaktion:

Dorina Domigal, Lutz Sonnabend
Abteilung 10 / Referat 102
Halsbrücker Straße 31a
09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 294-1202
Telefax: +49 3731 294-1099
E-Mail: lutz.sonnabend@smul.sachsen.de

Fotos:

Nikolaus Lerbs, Dr. Peter Fischer

Redaktionsschluss:

12.08.2020

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de