

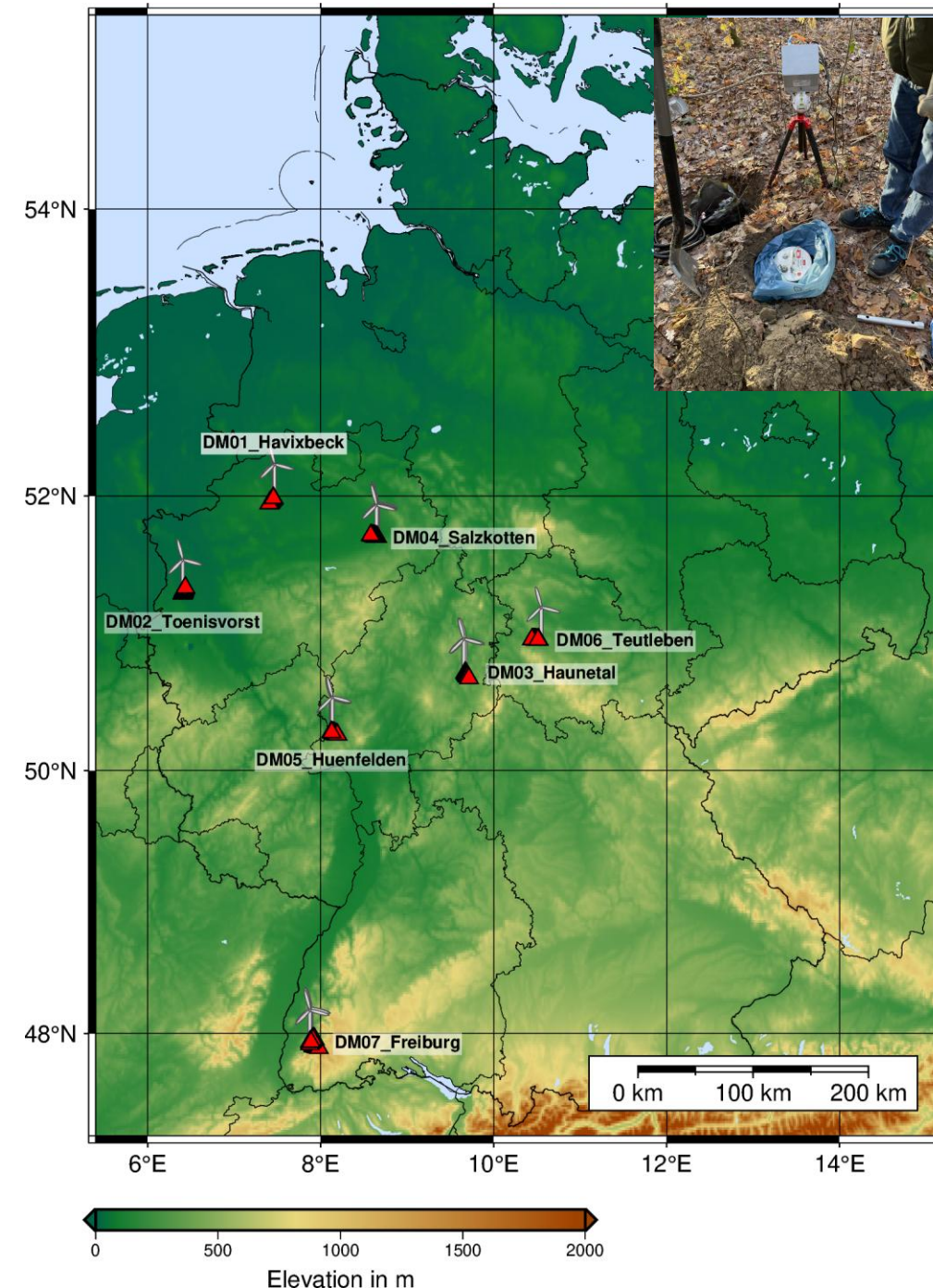
Bestimmung der Abklingrate von WEA-Emissionen in Deutschland im Rahmen des Projektes DB MISS

Sarah Moser & Joachim Ritter, 09.07.2026



Messkampagnen

- Es wurde an sieben unterschiedlichen Standorten vergleichbare seismische Messungen durchgeführt
 - Messstationen wurden entlang eines Profils in 500 m Abständen installiert
 - Die erste Messstation befindet sich auf dem Fundament der Windenergieanlage (min. 4 MW Leistung)
 - Die Seismometertypen waren immer dieselben und wurden vom GFZ GIPP Gerätepool zur Verfügung gestellt
- Unterschiede der Messstandorte sind
 - Der geologische Untergrund
 - Die Anzahl der WEA in einem Windpark
 - Die Anlagentypen (max. Leistung, Nabenhöhe, Rotordurchmesser)
- Schwierigkeiten
 - Ruhige Messbedingungen
 - Geeignete Windenergieanlagen finden
 - Genehmigung für Messung von Grundstücksbesitzern und Anlagenbetreibern

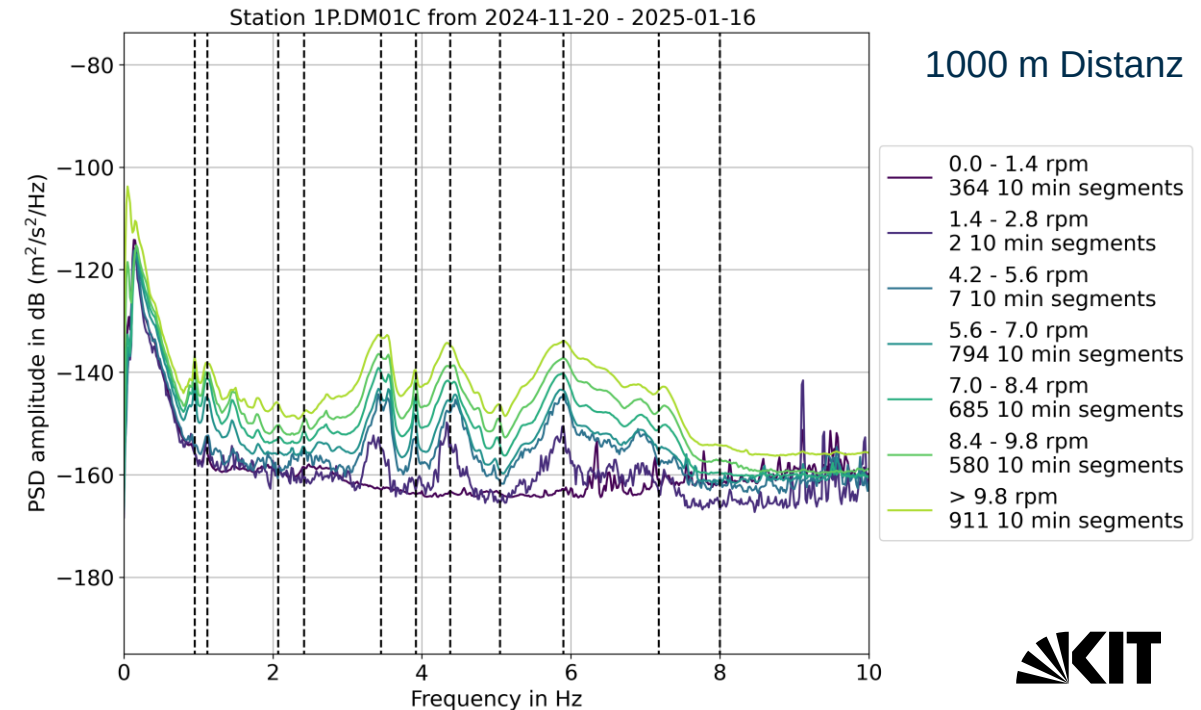
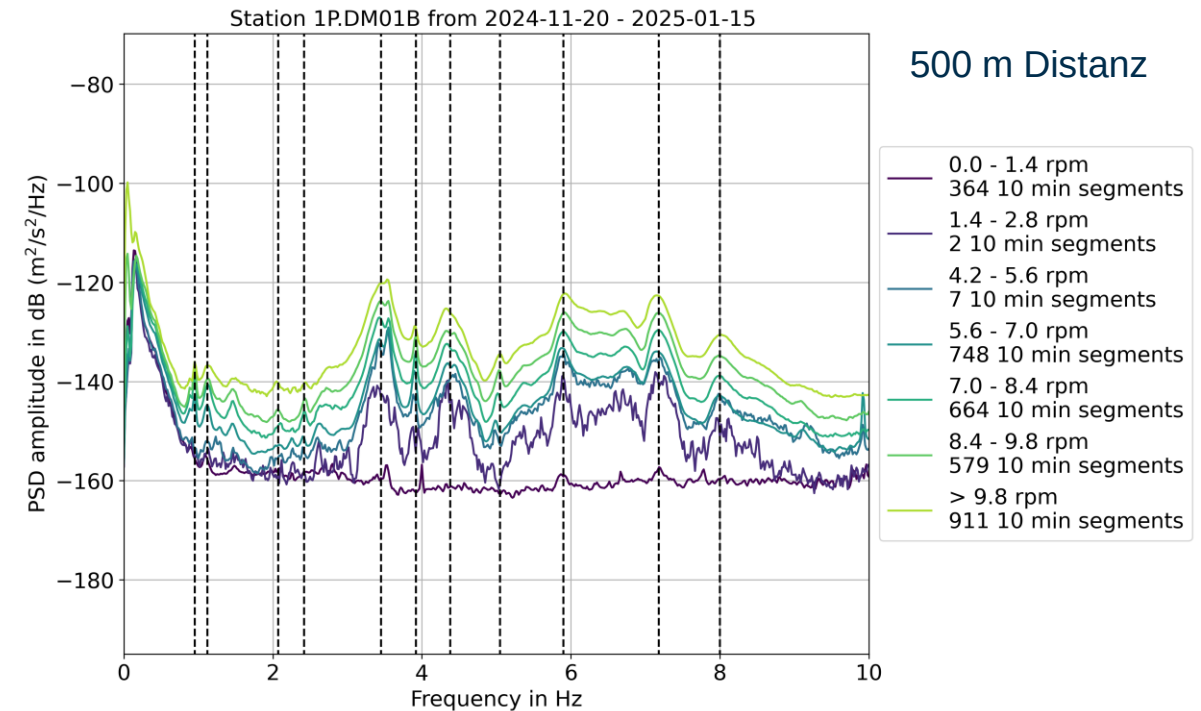


Messkampagnen

	Messzeitraum	Anzahl an WEAs	Leistung in MW	Anzahl untersch. Typen	Geologie
DM01 Havixbeck	Nov 2022	3	4.5	1	Quartäre Gletscherablagerungen, Schlick, Sand und Kies
	Nov 2024 – Jan 2025				
DM02 Tönisvorst	Dez 2022 – Jan 2023	2	4.0	1	Quartärer Sand und Kies
DM03 Haunetal	Okt 2023 – Nov 2023	4	4.2	1	Sandstein mit Felsbrocken, Tonschluffstein
DM04 Salzkotten	Dez 2023 – Jan 2024	11	2 – 4.2	4	Quartäre Gletscherablagerungen, Schlick, Sand und Kies, Schmelzwasserablagerungen
DM05 Hünfelden	Feb 2024 – März 2024	3	4.5	1	Tonschiefer, Schluffstein, Sandstein, Quarzit
DM06 Teutleben	Okt 2024 – Nov 2024	13	3.0 – 5.5	6	Kalkstein, Kalkmergelstein
DM07 Freiburg	April 2025 – Juni 2025	3	4.26 – 5.6	3	Gneis, Granit

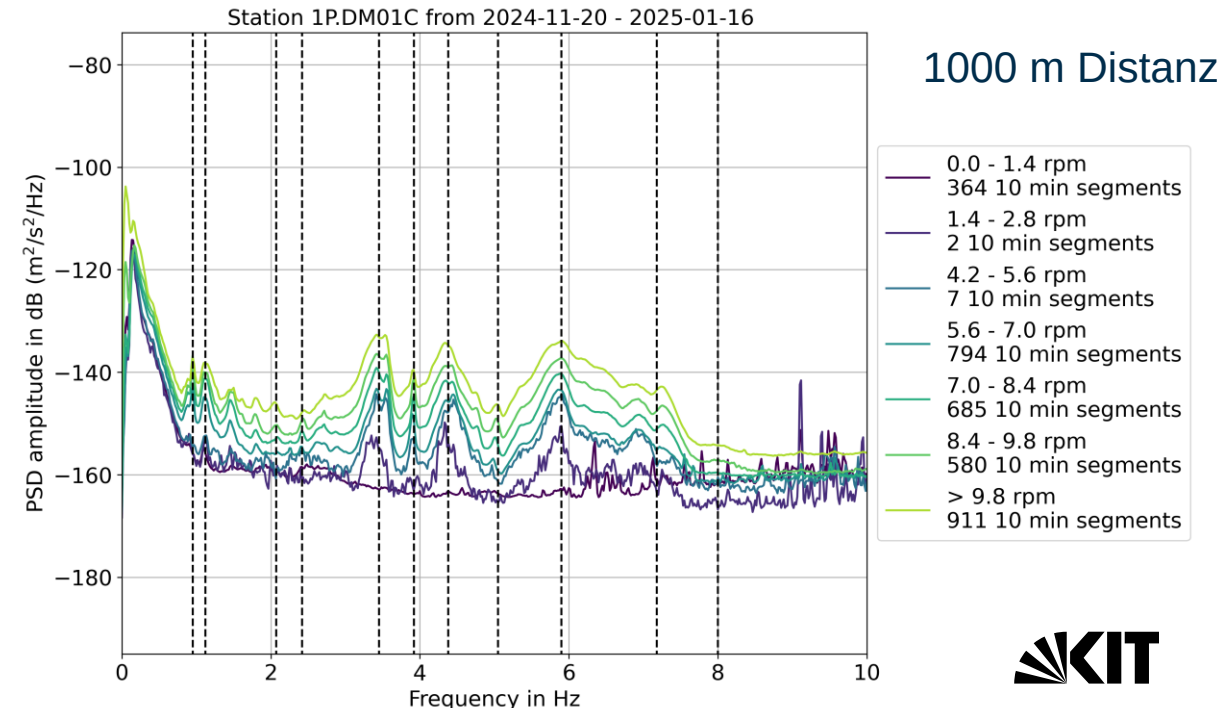
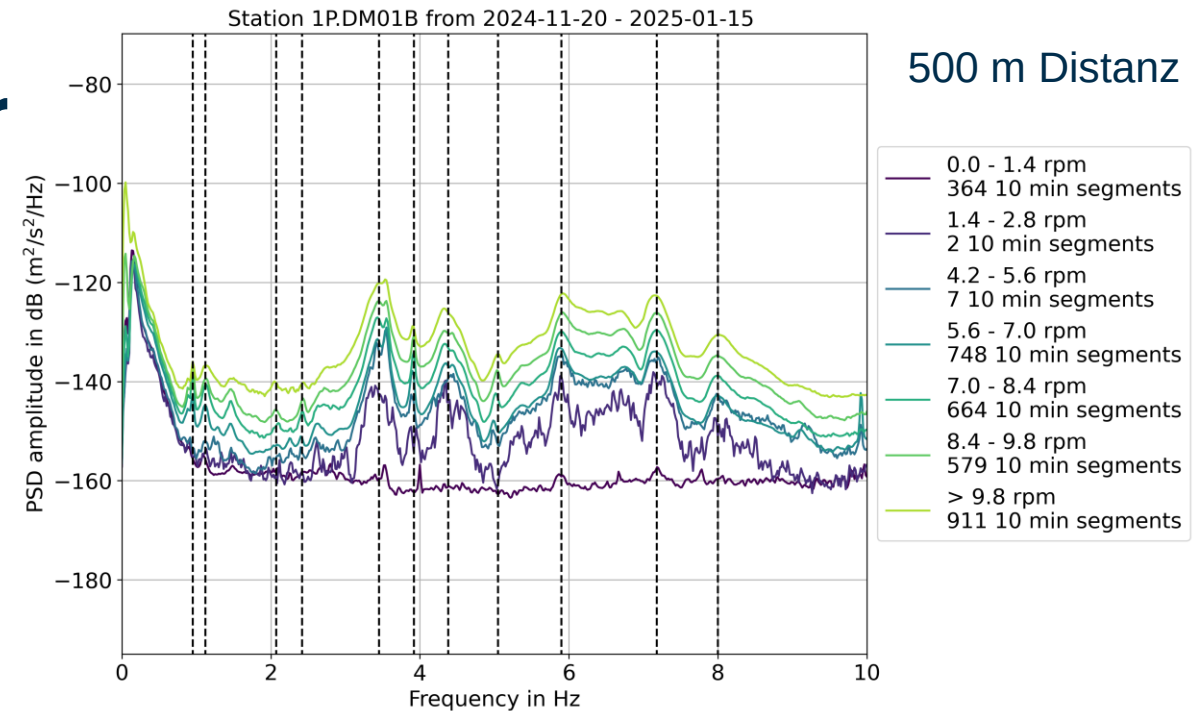
Problemstellung

- Windenergieanlagen regen Signale mit charakteristischen Frequenzen an durch
 - Biegemoden des Turmes
 - Die Interaktion des Rotorblattes mit dem Turm
- Die Stärke des beobachteten Signals an den seismischen Messstationen nimmt mit der Rotationsrate des Windrads zu
- Ziel:
 - Charakteristische Frequenzen identifizieren
 - Amplitudenabnahme der Signale mit der Distanz bestimmen
 - b-Wert: $1/x^b$
 - Geometrische Amplitudenabnahme und Q: $1/x \cdot e^{-2\pi f x / Qv}$



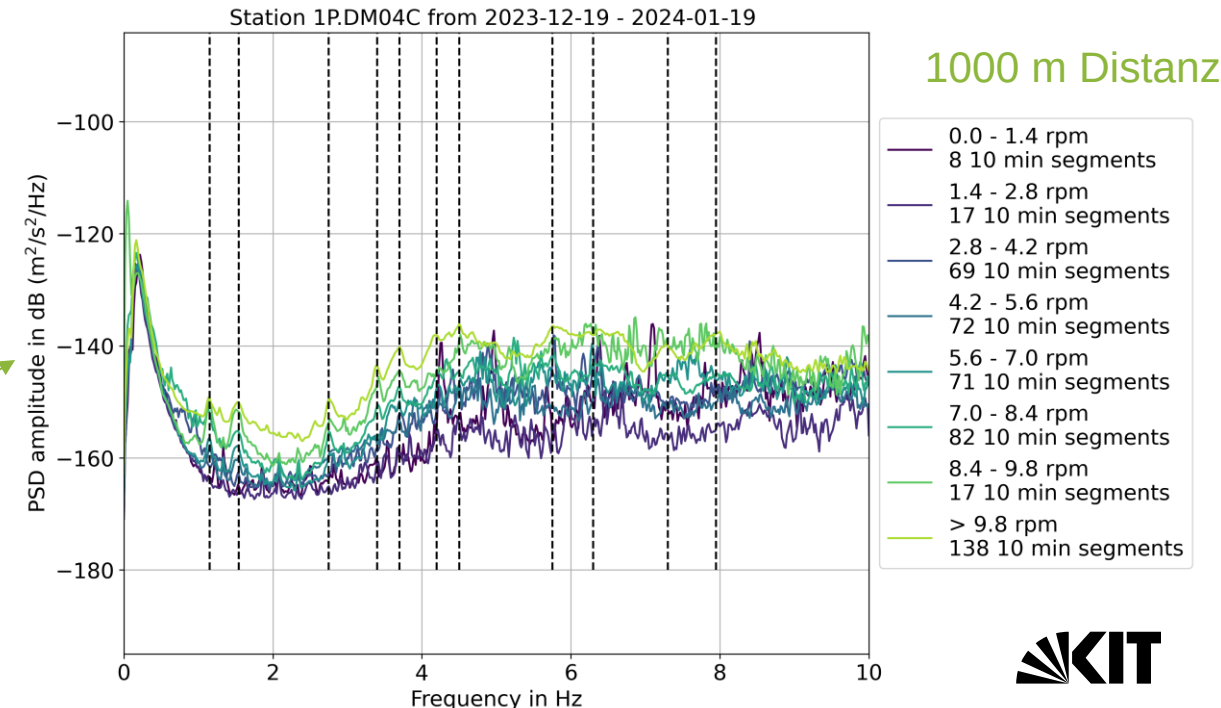
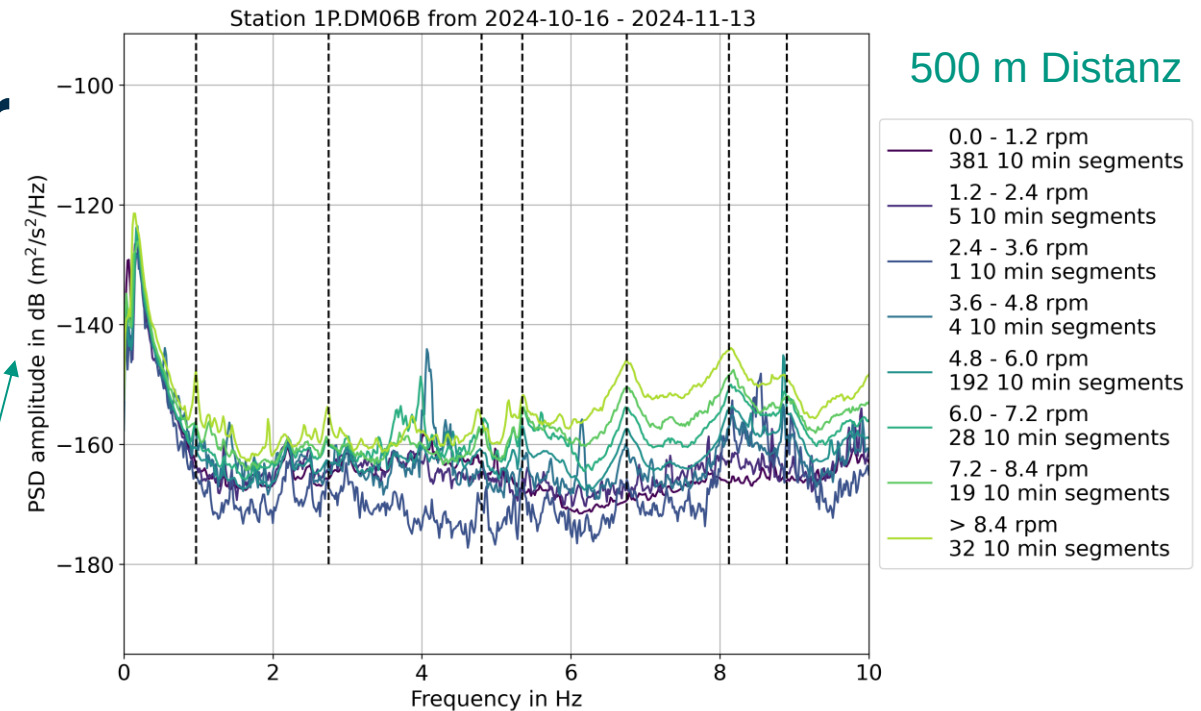
Bestimmung charakteristischer Frequenzen

- Frequenzauswahl:
 - gleiche Kriterien für alle Messkampagnen
 - nur Daten während der Nacht
 - deutliche rotationsabhängige Frequenzspitze auf den beiden nächsten Messstationen (500 m und 1000 m Distanz)
- Schwierigkeiten:
 - Frequenz verschiebt sich mit der Distanz
 - Frequenzspitzen nur eindeutig identifizierbar, wenn alle WEA eines Windparks ähnlich rotieren
 - ausgefallene Messung in 500 m oder 1000 m Distanz
 - Störsignale
 - starke lokale Dämpfung (z.B. Haunetal, Teutleben)



Bestimmung charakteristischer Frequenzen

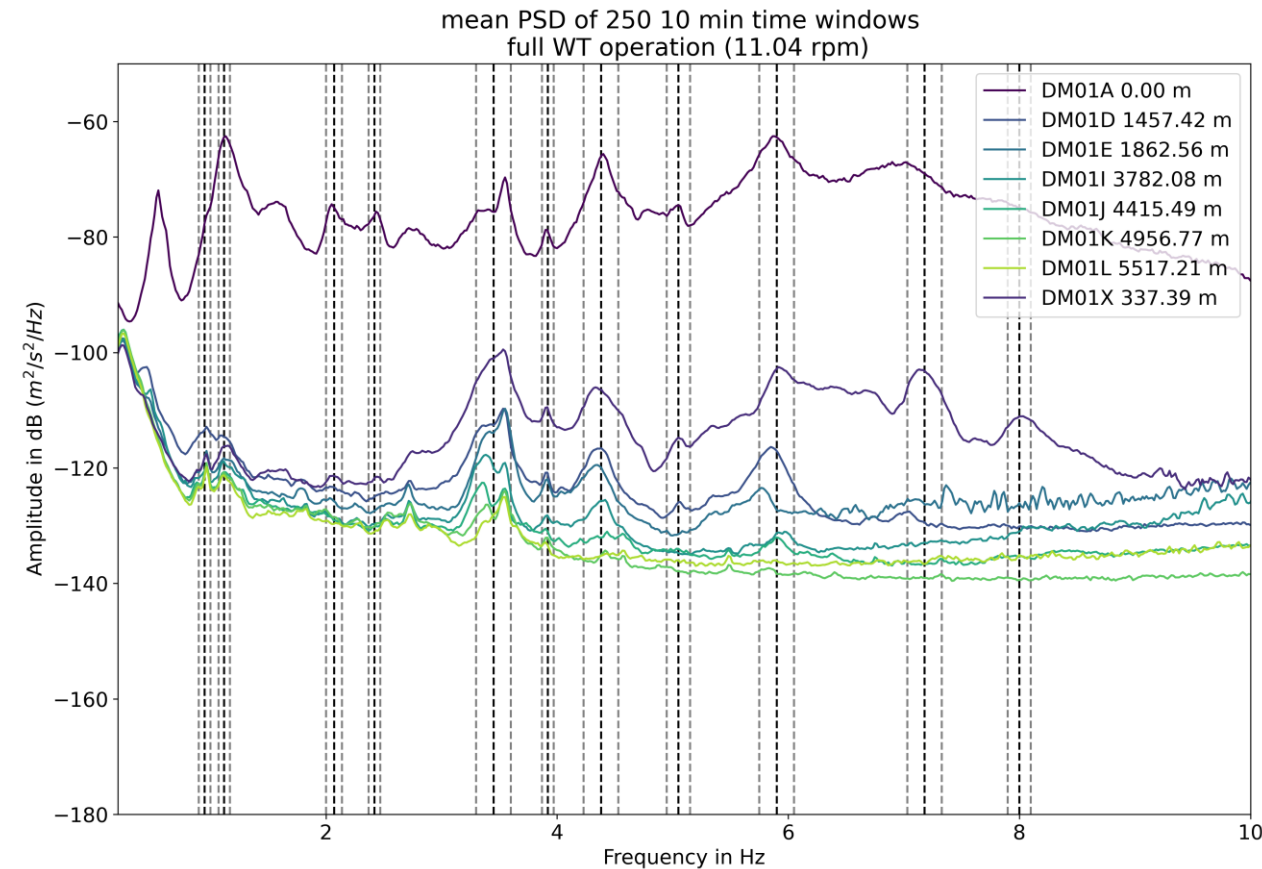
- Frequenzauswahl:
 - gleiche Kriterien für alle Messkampagnen
 - nur Daten während der Nacht
 - deutliche rotationsabhängige Frequenzspitze auf den beiden nächsten Messstationen (500 m und 1000 m Distanz)
- Schwierigkeiten:
 - Frequenz verschiebt sich mit der Distanz
 - Störsignale
 - starke lokale Dämpfung (z.B. Haunetal, Teutleben)
 - Frequenzspitzen nur eindeutig identifizierbar, wenn alle WEA eines Windparks ähnlich rotieren
 - ausgefallene Messung in 500 m oder 1000 m Distanz



Bestimmung charakteristischer Frequenzen

- Frequenzauswahl:
 - gleiche Kriterien für alle Messkampagnen
 - nur Daten während der Nacht
 - deutliche rotationsabhängige Frequenzspitze auf den beiden nächsten Messstationen (500 m und 1000 m Distanz)
- Schwierigkeiten:
 - Frequenz verschiebt sich mit der Distanz
 - Störsignale
 - starke lokale Dämpfung (z.B. Haunetal, Teutleben)
 - Frequenzspitzen nur eindeutig identifizierbar, wenn alle WEA eines Windparks ähnlich rotieren
 - ausgefallene Messung in 500 m oder 1000 m Distanz

Amplitudenabnahme mit der Distanz

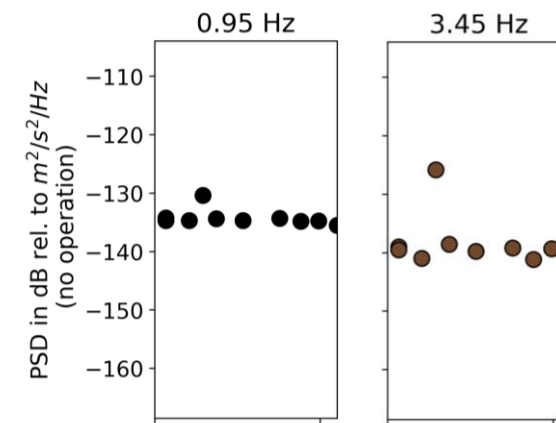


b-Wert

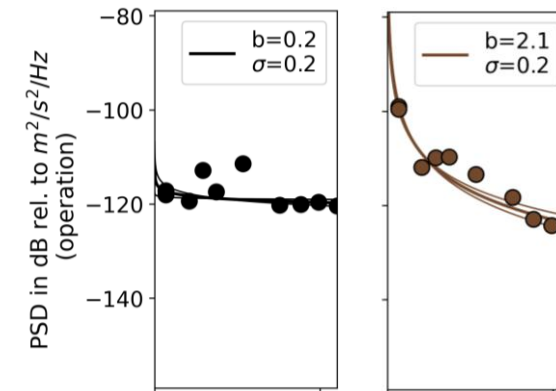
- Amplitudenabnahme mit $1/x^b$
- Unsicherheitsabschätzung aus der Kovarianz-Matrix
- Sowohl relative als auch absolute Amplitudenabnahme wird betrachtet

DM01 Havixbeck

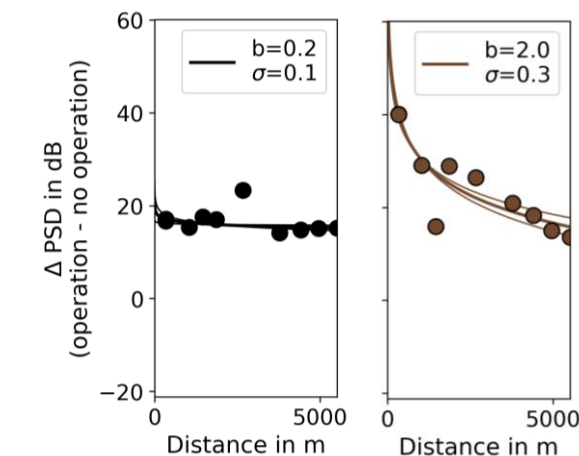
Keine WEA in Betrieb



Alle WEA in Betrieb unter Vollast



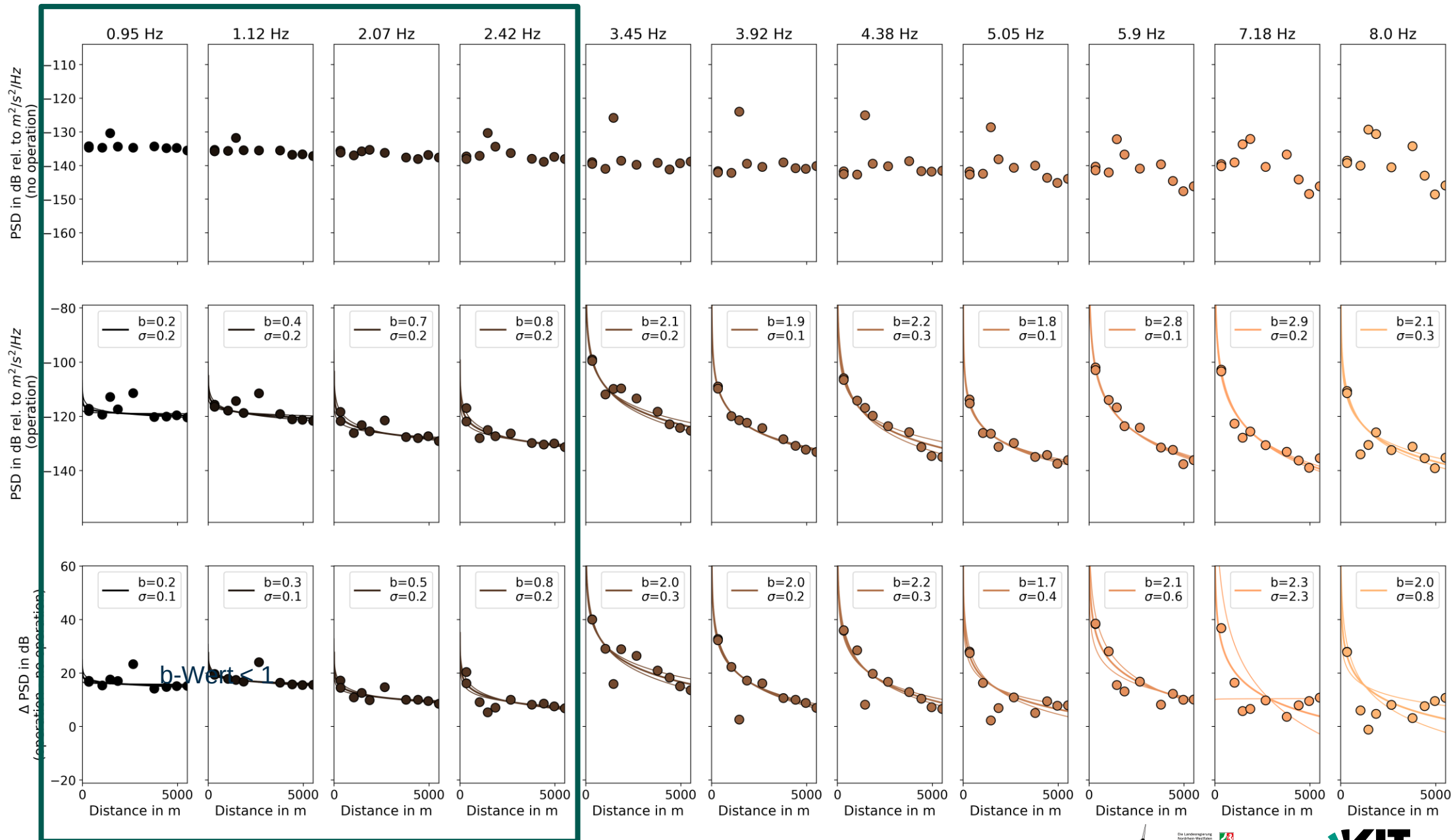
Relativ:
in Betrieb – kein Betrieb



Keine WEA in Betrieb

Alle WEA in Betrieb
unter Volllast

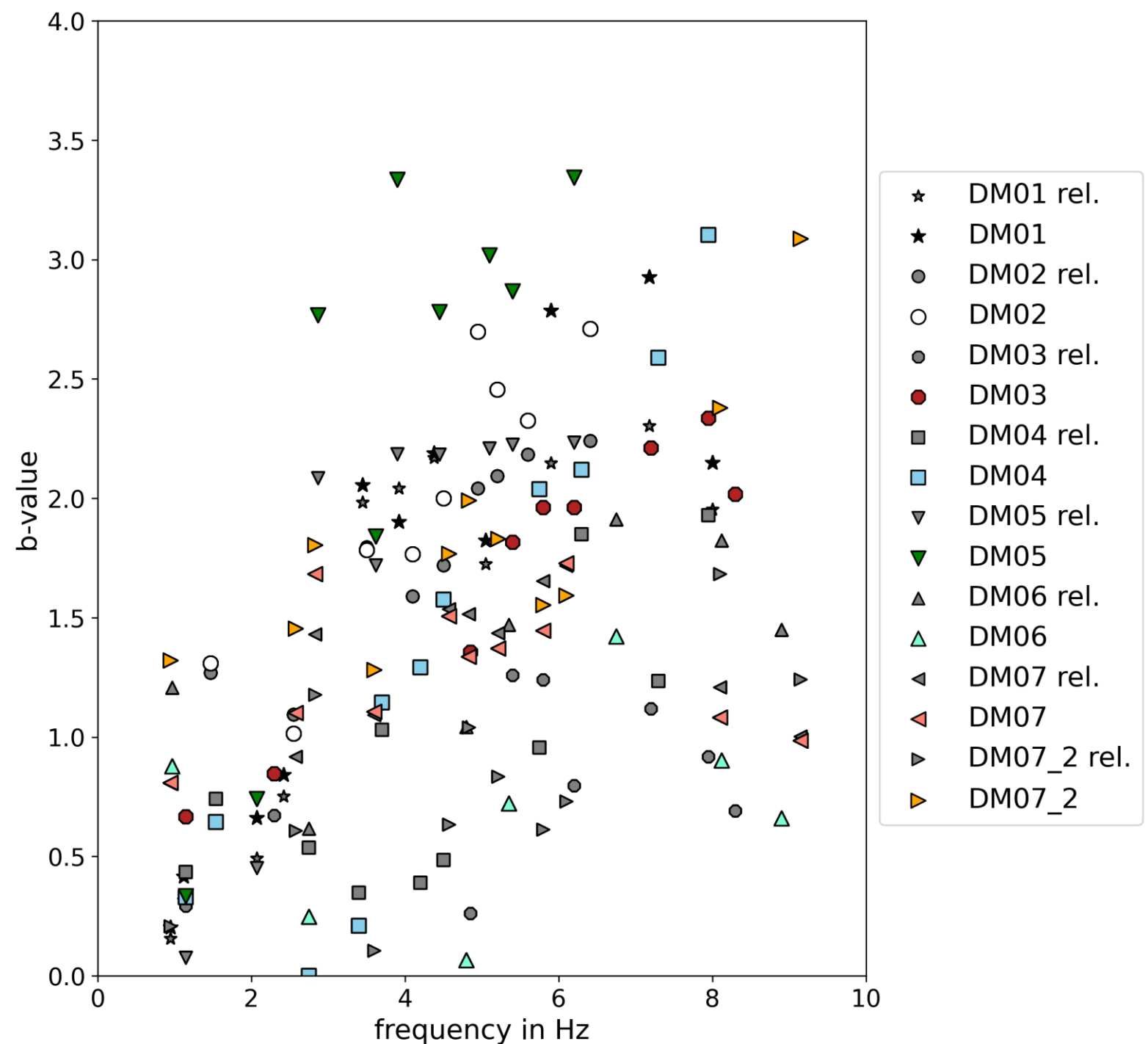
Relativ:
in Betrieb – kein
Betrieb



Ergebnisse

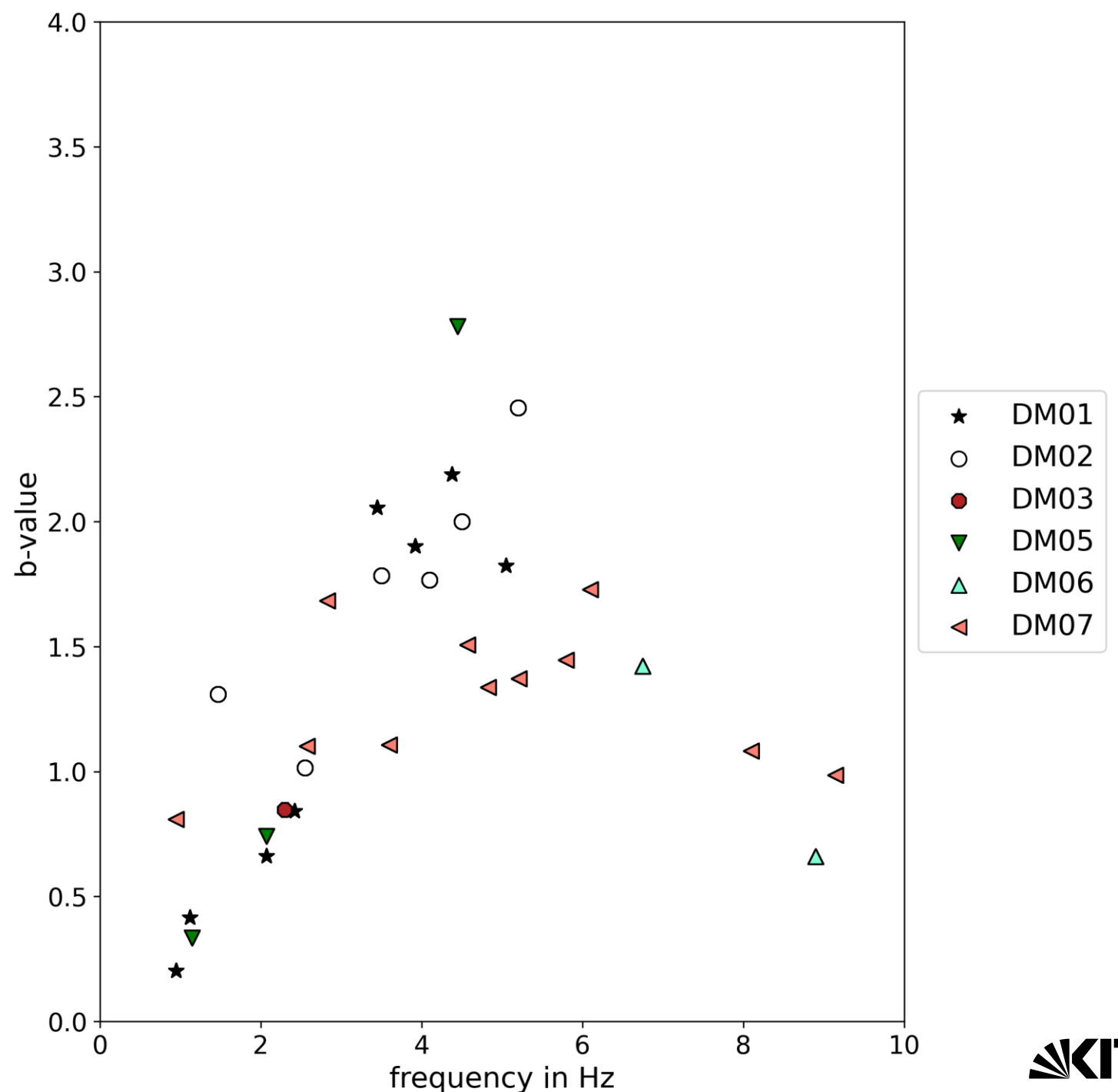
b-Wert

- b-Werte nehmen mit der Frequenz zu
- gut bestimmte b-Werte?



Ergebnisse b-Wert

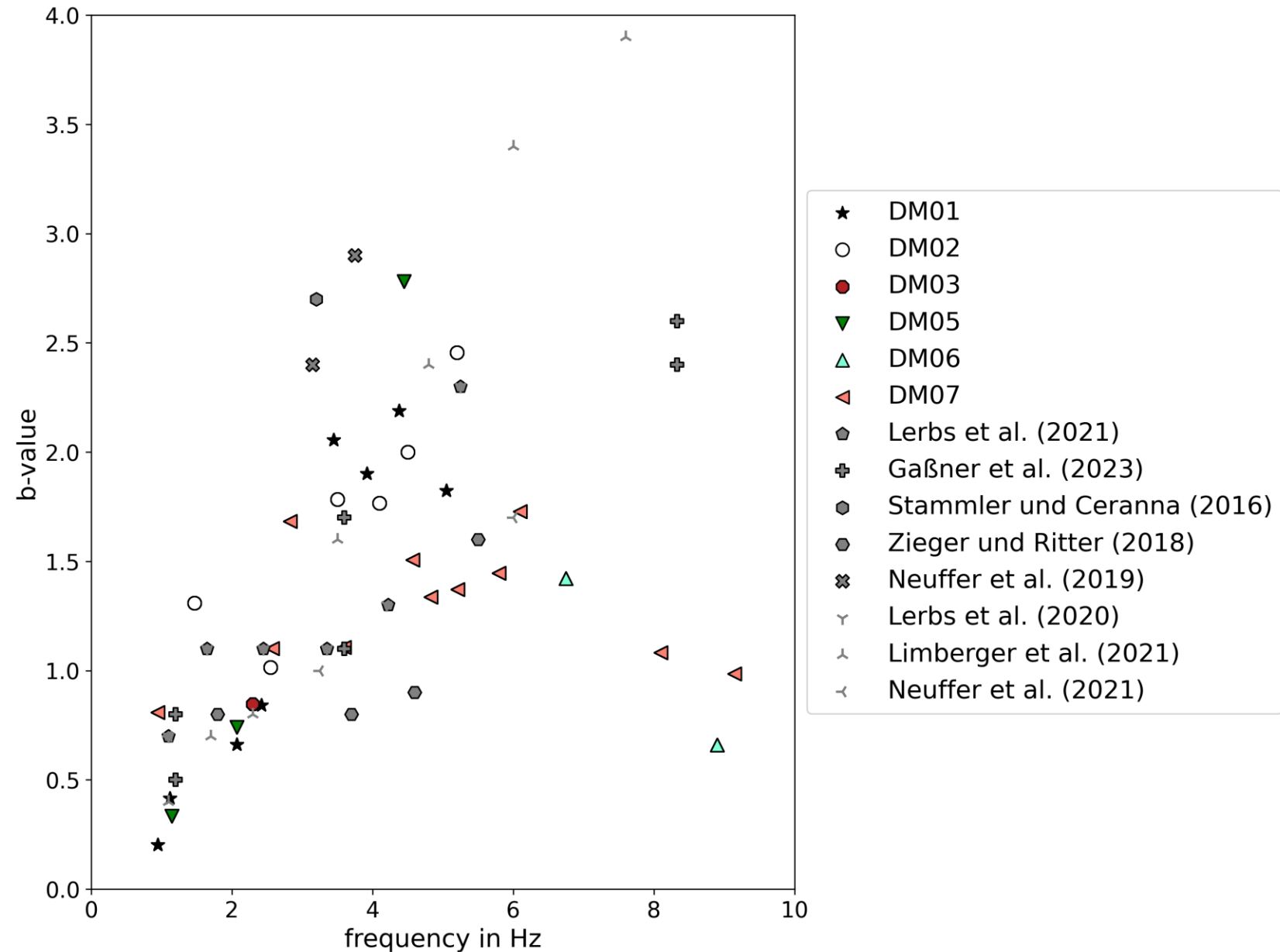
- b-Werte nehmen mit der Frequenz zu
- gut bestimmte b-Werte
 - Absoluter und relativer b-Wert stimmen im Rahmen ihrer Unsicherheiten überein
 - Die Standardabweichung darf nicht größer als 0.5 sein

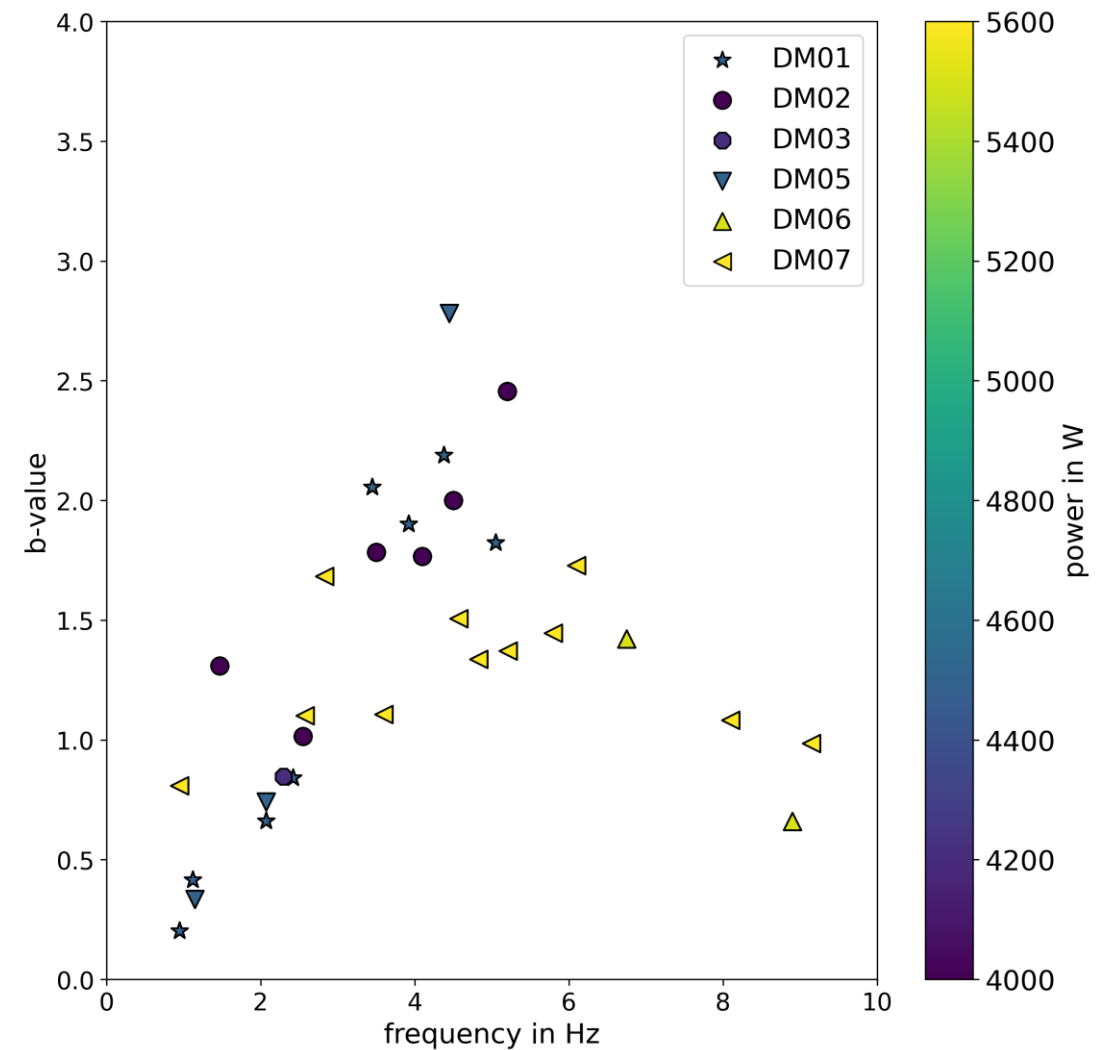
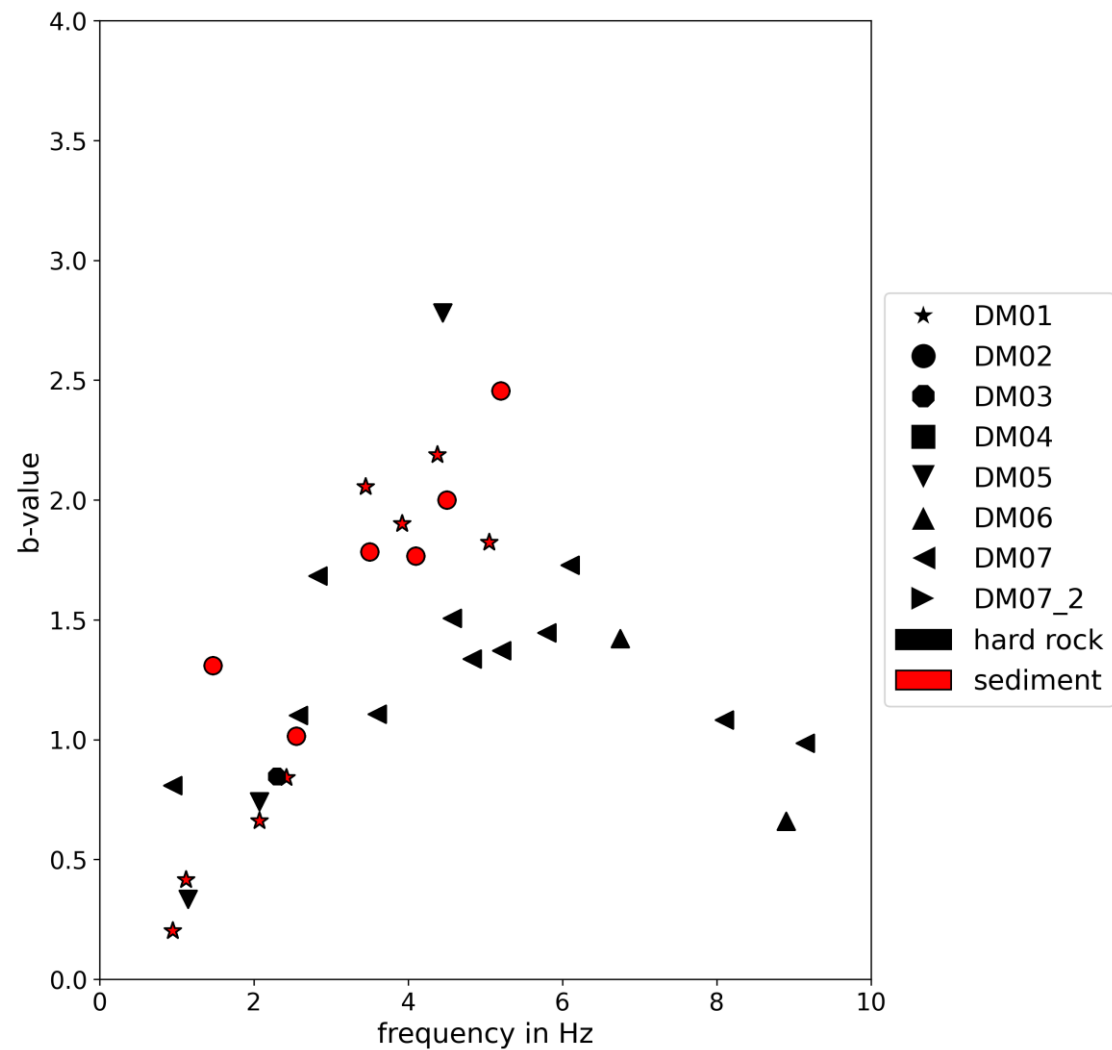


Ergebnisse

b-Wert

- b-Werte nehmen mit der Frequenz zu
- gut bestimmte b-Werte
 - Absoluter und relativer b-Wert stimmen im Rahmen ihrer Unsicherheiten überein
 - Die Standardabweichung darf nicht größer als 0.5 sein
- Vergleich mit Literaturwerten zeigt Übereinstimmung



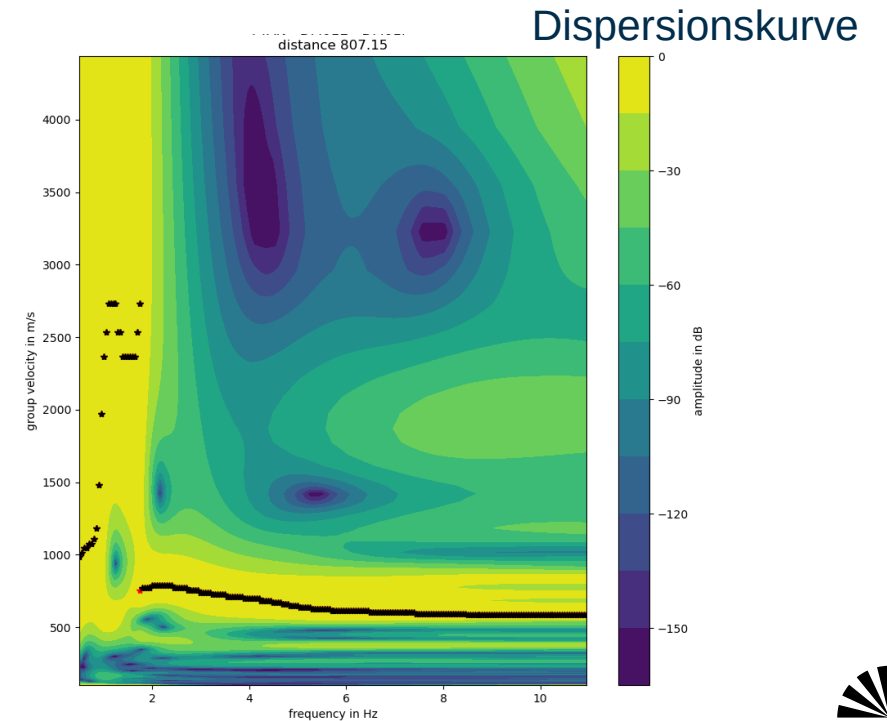
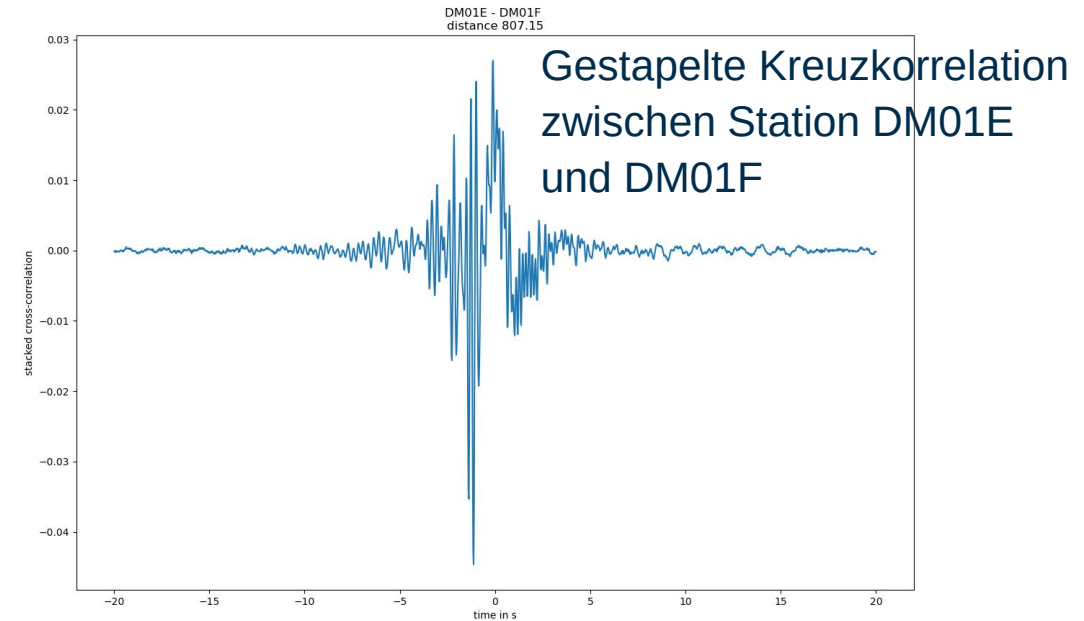


Ergebnisse b-Wert

Vergleich der b-Werte mit Geologie, WEA Leistung, ...
zeigt keine eindeutige Korrelation

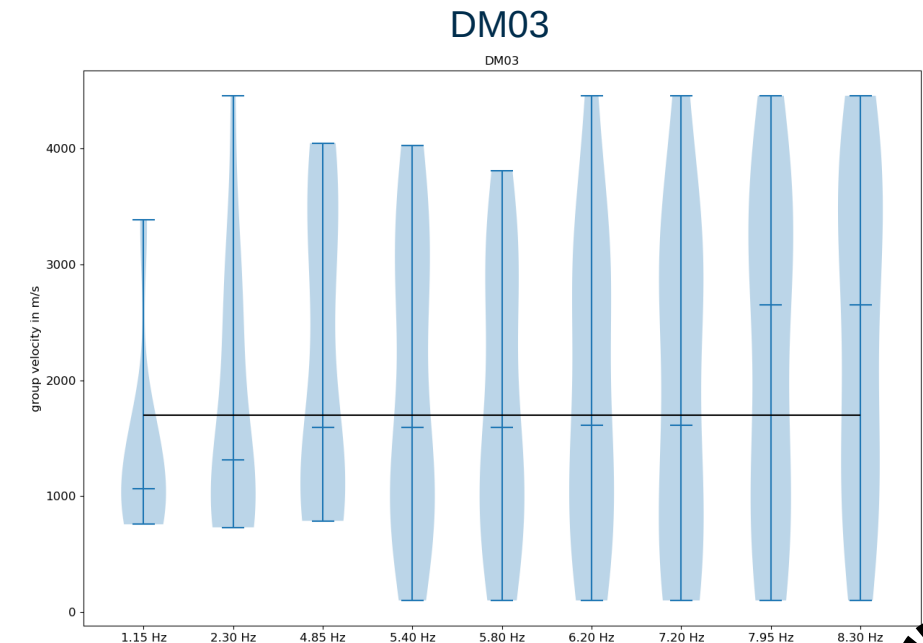
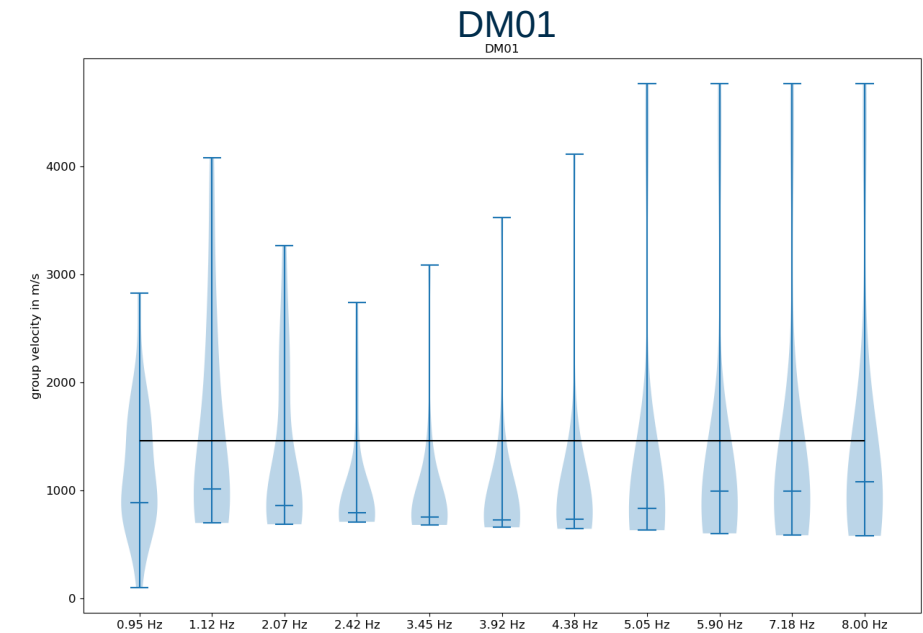
Bestimmung von Q

- Beschreibung der Amplitudenabnahme durch geometrische Amplitudenabnahme und Q: $\frac{1}{x} e^{-2\pi f x / Qv}$
- Bestimmung von v:
 - Bestimmung von Dispersionskurven der Gruppengeschwindigkeit aus Kreuzkorrelationen des Hintergrundrauschens unserer Daten
 - Problem: große Unterschiede zwischen unterschiedlichen Stationspaaren und dadurch große Unsicherheiten
 - Alternativ Literaturwerte/GD-Werte für v_p oder v_s in Phasengeschwindigkeit umrechnen
 - Problem: ungenau

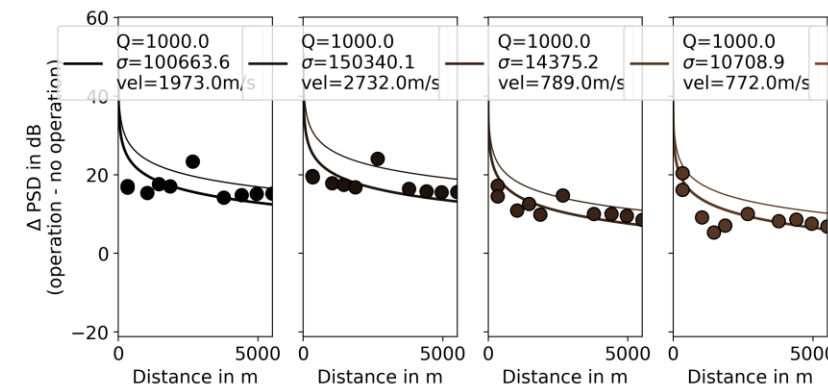
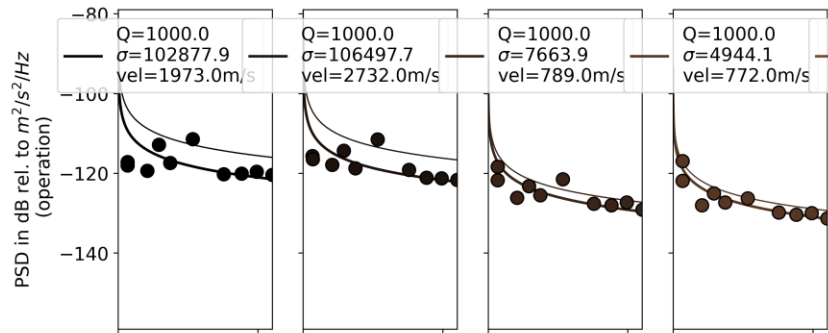
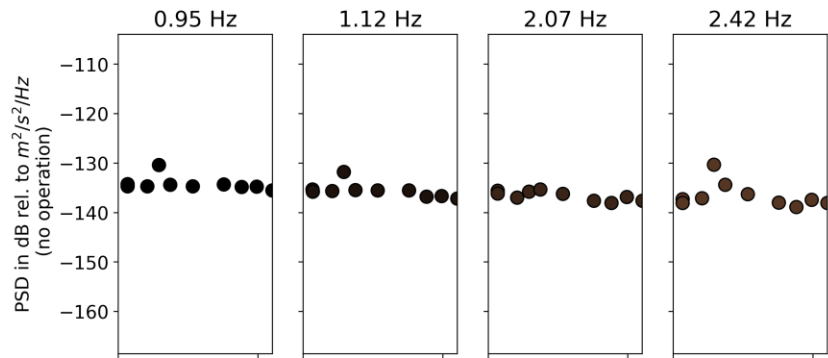


Bestimmung von Q

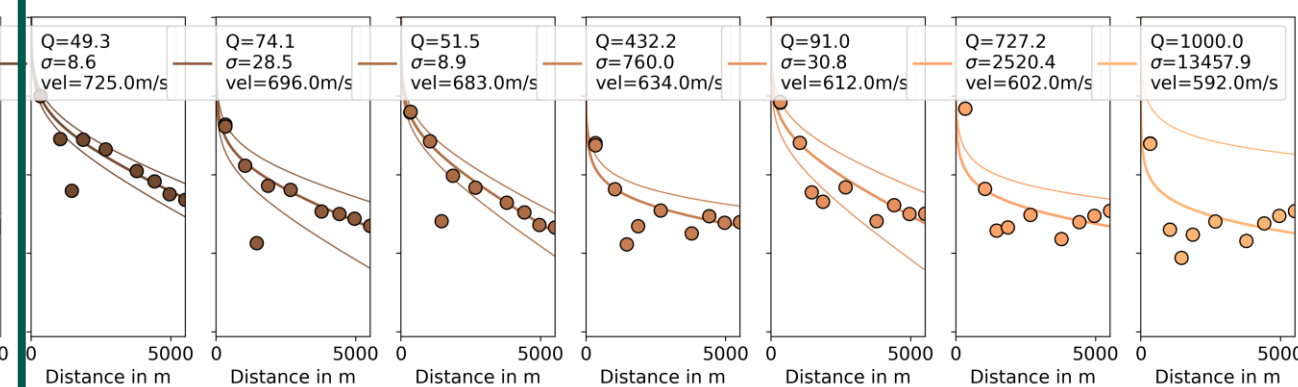
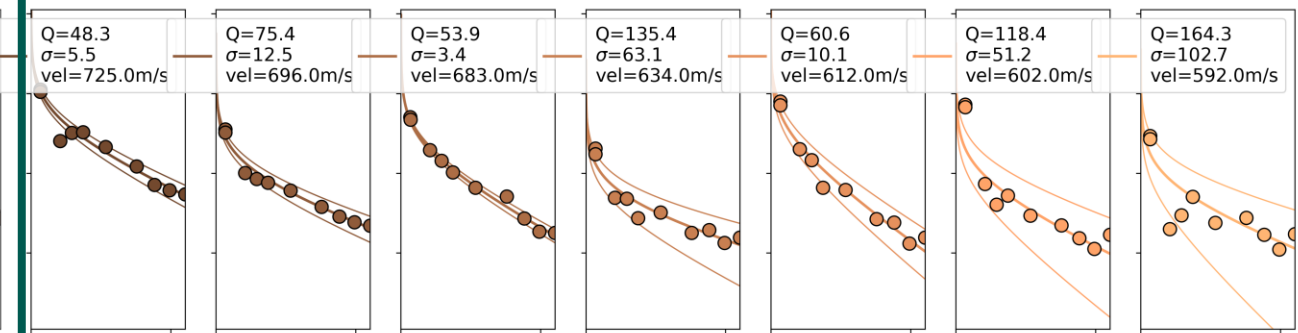
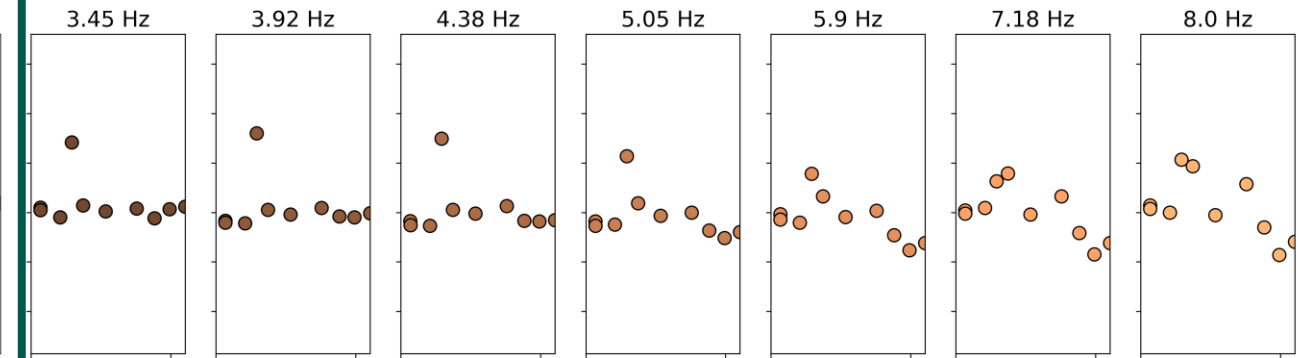
- Beschreibung der Amplitudenabnahme durch geometrische Amplitudenabnahme und Q: $\frac{1}{x} e^{-2\pi f x / Qv}$
- Bestimmung von v:
 - Bestimmung von Dispersionskurven der Gruppengeschwindigkeit aus Kreuzkorrelationen des Hintergrundrauschens unserer Daten
 - Problem: große Unterschiede zwischen unterschiedlichen Stationspaaren und dadurch große Unsicherheiten
 - Alternativ Literaturwerte/GD-Werte für v_p oder v_s in Phasengeschwindigkeit umrechnen
 - Problem: ungenau
 - Geschwindigkeit zu groß -> Q unterschätzt
 - Geschwindigkeit zu klein -> Q überschätzt



b-Wert < 1 - Kein sinnvolles Q!



DM01_Havixbeck Q-value estimation from mean PSD
of 451 10 min time windows with no WT operation
of 219 10 min time windows with full WT operation



Keine WEA in Betrieb

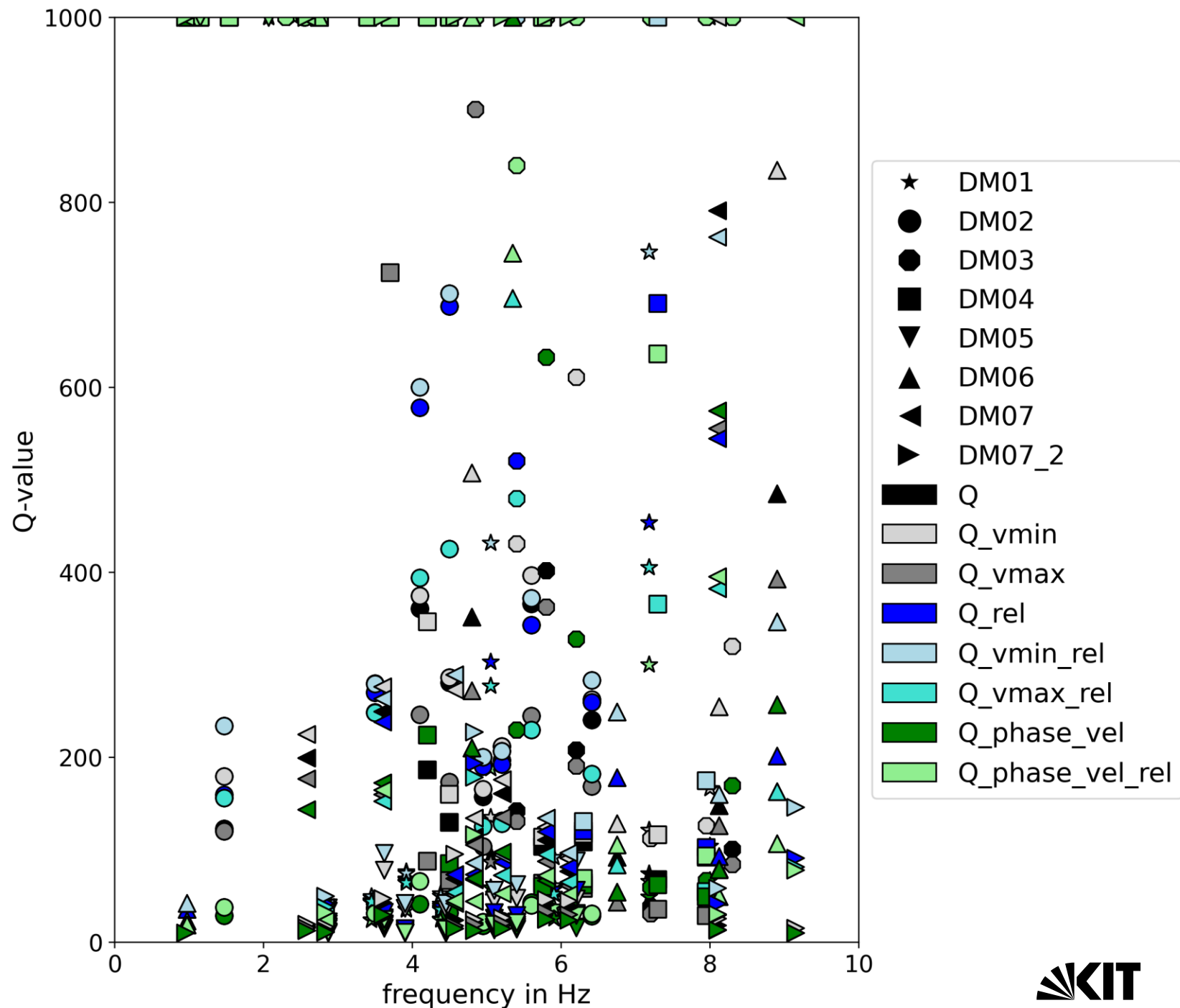
Alle WEA in Betrieb unter Vollast

Relativ:
in Betrieb – kein Betrieb

Q-Wert

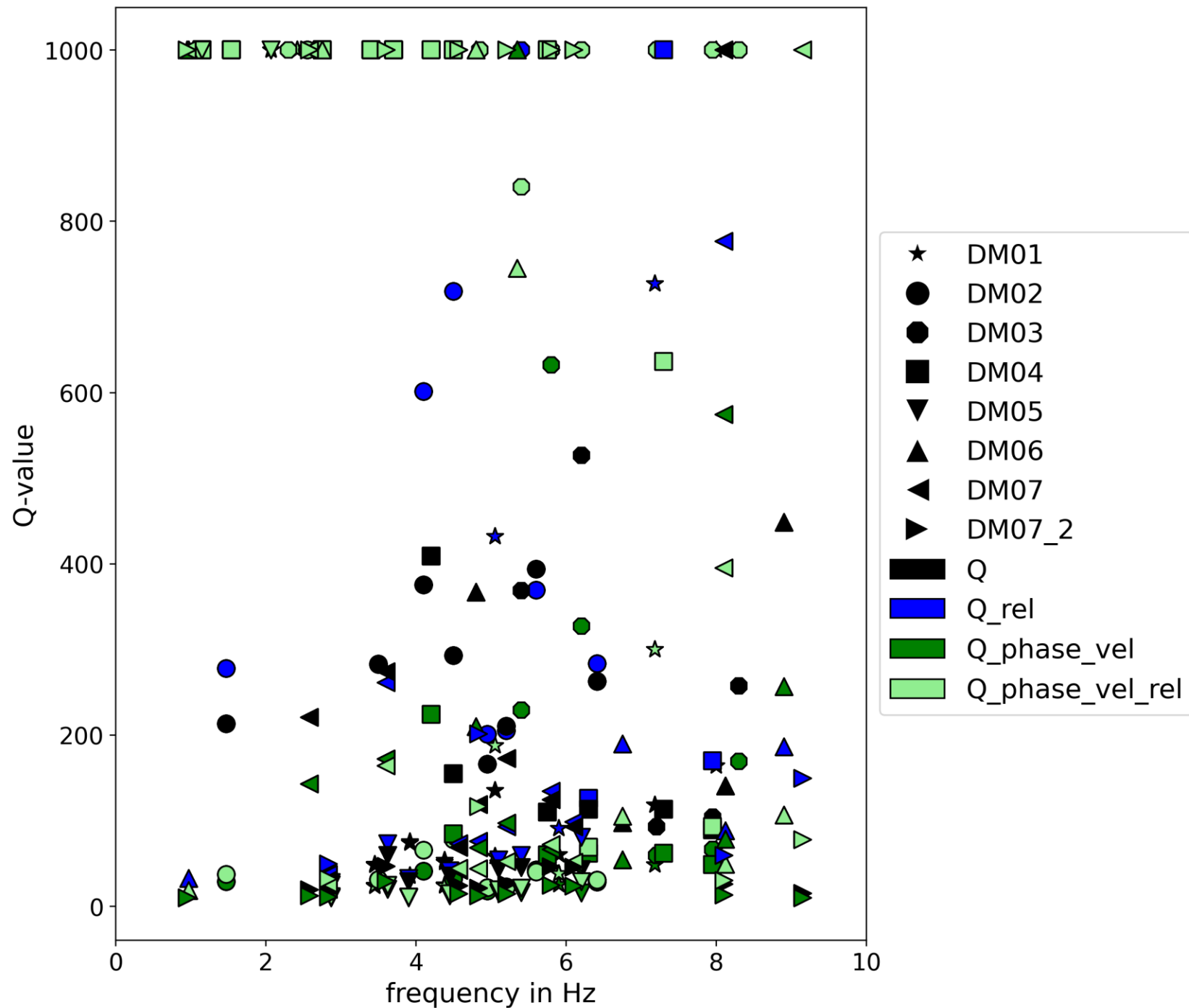
Bestimmung von Q

- Probleme:
 - $Q \geq 1000$ und $Q < 0$
 - Große Unterschiede der Q-Werte auf Grund der Geschwindigkeit
 - Viele kleine Q



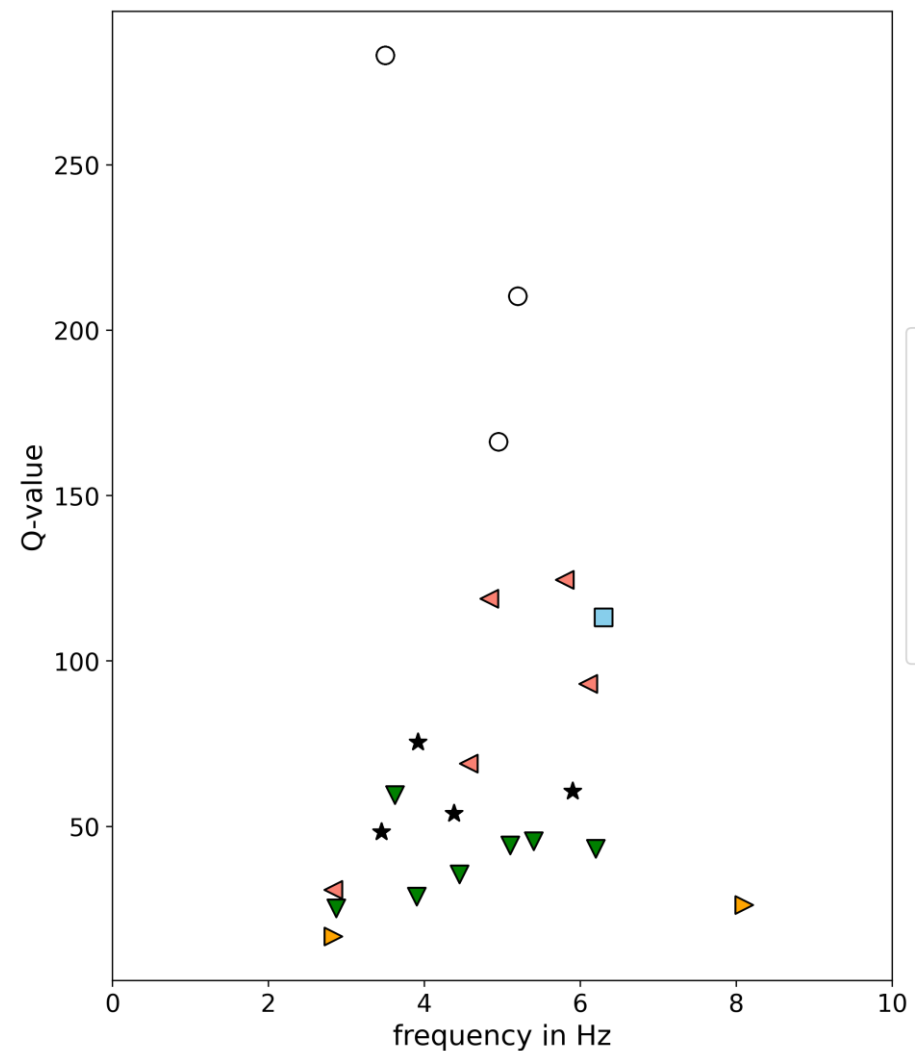
Bestimmung von Q

- Probleme:
 - $Q \geq 1000$ und $Q < 0$
 - Große Unterschiede der Q-Werte auf Grund der Geschwindigkeit
 - Viele kleine Q
- Wähle je Messkampagne die “deutlichste” Dispersionskurve und verwende diese Gruppengeschwindigkeit



Ergebnisse Q-Wert

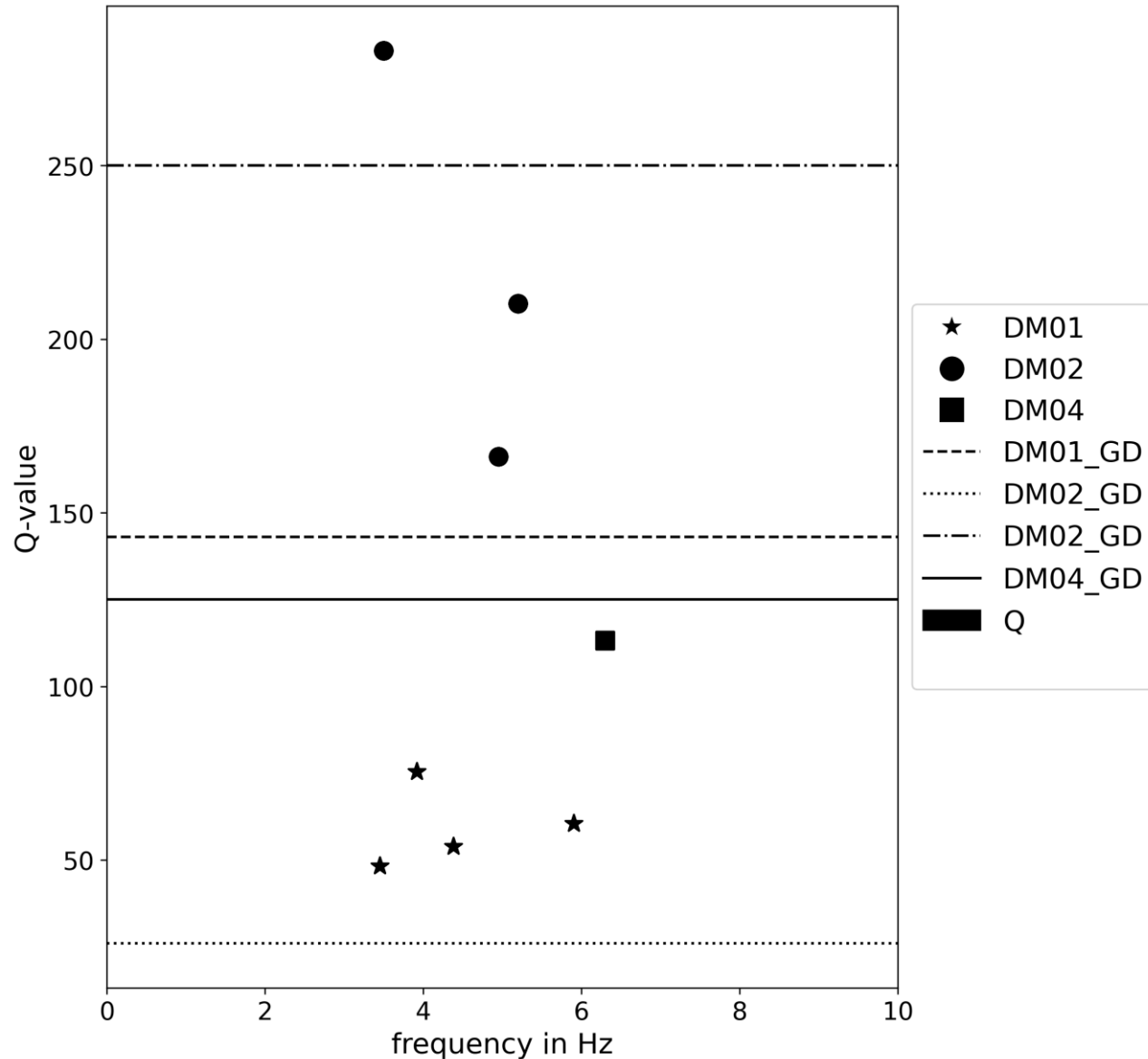
- gut bestimmte Q-Werte
 - Absoluter und relatives Q stimmen im Rahmen ihrer Unsicherheiten überein
 - Die Standardabweichung darf nicht größer als 70 sein
- Unsicherheiten in der v-Bestimmung sind nicht berücksichtigt
- Q enthält alle Effekte, die nicht durch die geometrische Amplitudenabnahme erklärt werden können
- Kann nicht direkt mit im Labor bestimmten Q verglichen werden

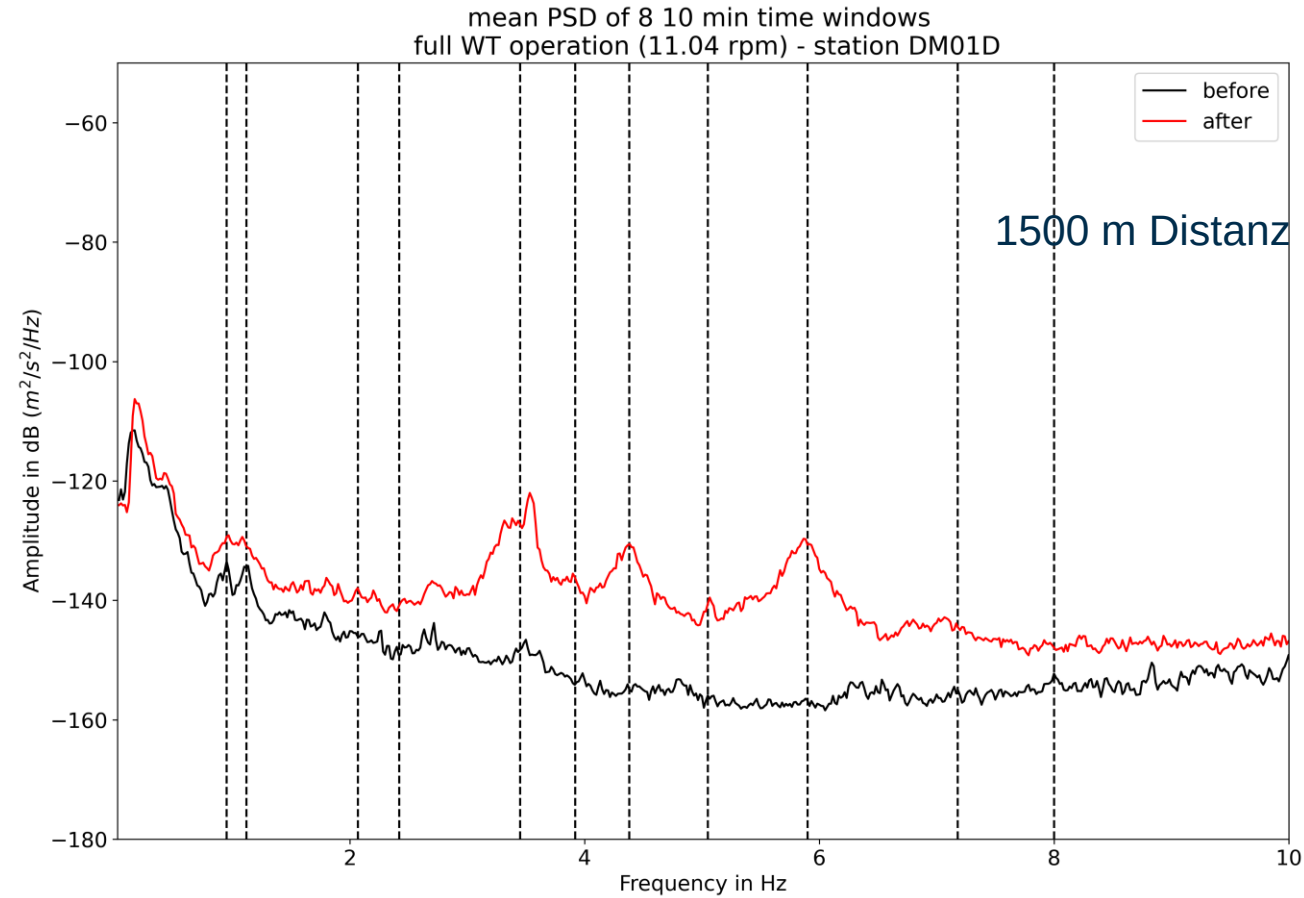
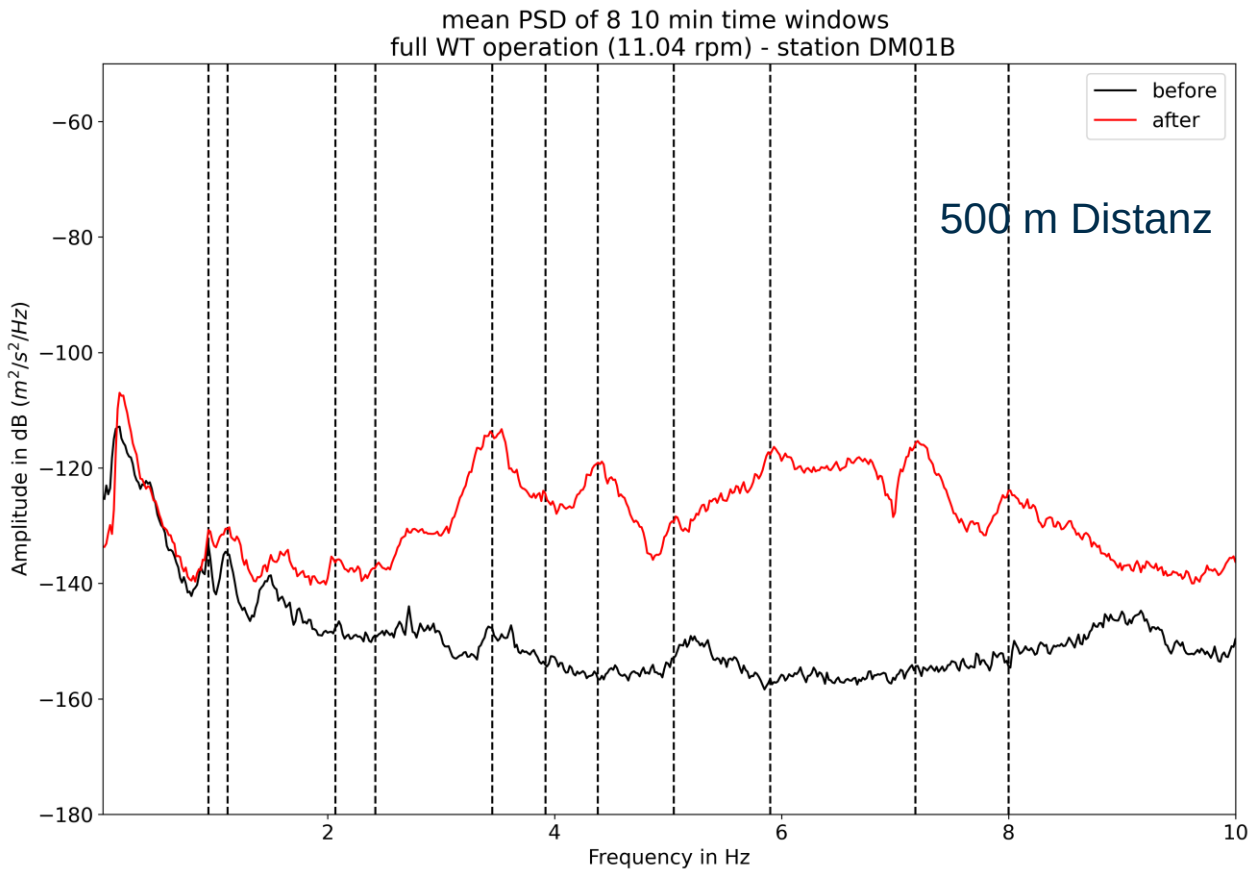


- ★ DM01 - Quarternary glacial deposits, silt, sand and gravel
- DM02 - Quarternary sand and gravel
- DM03 - sandstone with boulders, clay siltstone
- DM04 - Quarternary glacial deposits, silt, sand and gravel, meltwater deposits
- ▼ DM05 - clay slate, siltstone, sandstone, quartzite
- ▲ DM06 - limestone, lime marl stone
- ◀ DM07 - gneiss, granite
- ▶ DM07_2 - gneiss, granite

Ergebnisse Q-Wert

- gut bestimmte Q-Werte
 - Absoluter und relativer b-Wert stimmen im Rahmen ihrer Unsicherheiten überein
 - Die Standardabweichung darf nicht größer als 70 sein
- Unsicherheiten in der v-Bestimmung sind nicht berücksichtigt
- Q enthält alle Effekte, die nicht durch die geometrische Amplitudenabnahme erklärt werden können
- Kann nicht direkt mit im Labor bestimmten Q verglichen werden
- Vergleich mit den vom GD bestimmten Q-Werten zeigt im Rahmen der Ungenauigkeiten eine Übereinstimmung

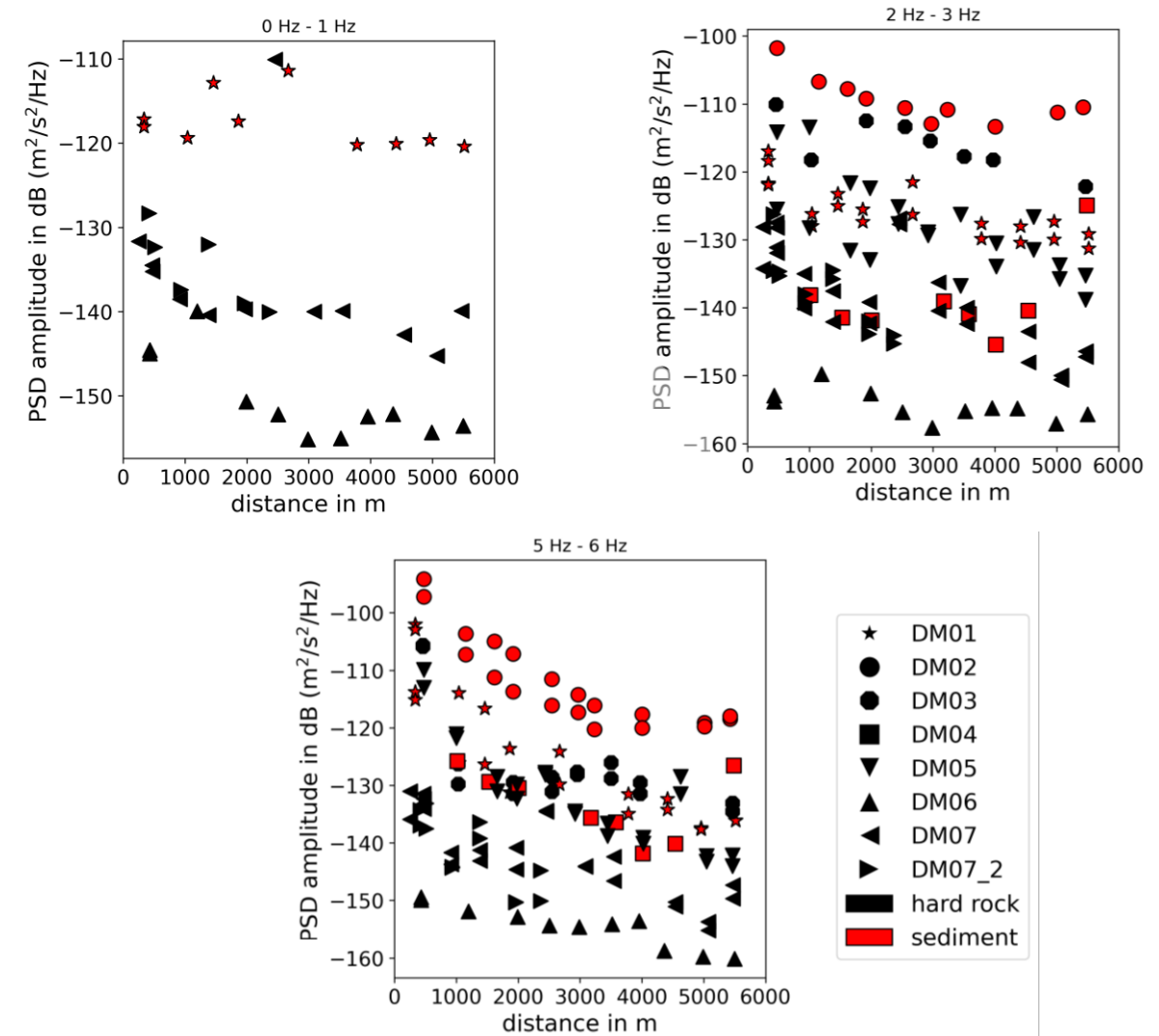




Vergleich Amplitude vor und nach Installation von WEA

- Rauschamplitude +35 dB in 500 m
- Rauschamplitude +20 dB in 1.500 m

	$f < 1\text{ Hz}$	$2\text{ Hz} \leq f < 3\text{ Hz}$	$5\text{ Hz} \leq f < 6\text{ Hz}$
DM01	-	10 dB	20 dB
DM02	-	10 dB	20 dB
DM03	-	10 dB	20 dB
DM04	-	-	(15 dB)
DM05	-	10 dB	30 dB
DM06	10 dB	5 dB	(10 dB)
DM07	10 dB	10 dB	15 dB



Vergleich absolute Amplitude

Zusammenfassung

- Vermessung von 7 Profilen an WEA mit einer Leistung ≥ 4 MW
- Vergleich vorher/nachher zeigt eine Zunahme von +35 dB in 500 m und +20 dB in 1500 m Entfernung
- WEA-Signale sind bis 5,5 km weit identifizierbar
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden beeinflusst durch
 - Unterschiedliche Geologie und lokale Verstärkungs- und Dämpfungseffekte
 - Verschiedene Windbedingungen
 - Stationsausfälle
- Zunahme des b-Werts mit der Frequenz
- Der bestimmte Q-Wert ist stark von der Geschwindigkeit abhängig

