

JAHRESBERICHT 2023

betreffend

ÜLG-091

1D-Inversion elektromagnetischer Daten
aus bodengeophysikalischen Messungen

Auftraggeber: BUND

Durchführung

Oberflächennahe Geophysik

Wien, am 23.01.2024

Erstellt von	Geprüft von
Dr. Andreas Ahl	
Mag. Klaus Motschka	
Mag. Alexander Römer	

Copy-Right-Text und ggf. Haftungsausschluss

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Durchführung und Auswertung der Testmessungen in Goggendorf (NÖ).....	5
2.1	Stacking.....	6
2.2	Dipolmomente.....	7
2.3	Reproduzierbarkeit der Messergebnisse.....	9
2.3.1	Spulenabstand 20 m.....	11
2.3.2	Spulenabstand 50 m.....	11
2.3.3	Spulenabstand 100 m.....	12
2.3.4	Spulenabstand 200 m.....	13
2.3.5	Spulenabstand 400 m.....	14
2.4	Variation der Höhe der Sendespule.....	15
3	Empfehlungen zur Messdurchführung.....	19
4	Ausblick.....	20
5	Literatur und Quellen.....	20
6	Abbildungsverzeichnis.....	21
7	Anhang - Histogramme der Messergebnisse.....	23

1 Einleitung

Aufbauend auf den langjährigen Erfahrungen der GBA mit Multifrequenzsystemen aus der Aerogeophysik, soll im Rahmen des begonnenen Projekts eine 1D-Inversion der Messdaten von PROMIS entwickelt werden. Ab dem Projektjahr 2024 sollen die Inversions-Methoden aus der Aerogeophysik (z.B. Em1d, Datenbank-Suche usw.) für die Verwendung der PROMIS-Daten soweit möglich adaptiert bzw. auf diesen Methoden aufbauend eine neue Inversionslösung entwickelt werden.

Im Zuge der Entwicklung einer Inversion sollten auch Fragen hinsichtlich einer effizienten Messdurchführung bzw. möglicher Störungs-Ursachen untersucht werden und Handlungsempfehlungen bei der Benutzung des Messgeräts erarbeitet werden. Diese Untersuchungen konnten im Projektjahr 2023 weitestgehend abgeschlossen werden.

Zu Beginn des Projektjahres 2023 wurden zunächst verschiedene Computerprogramme entwickelt bzw. adaptiert. Dabei wurde zunächst die aus der Aerogeophysik stammende Software zur Berechnung der theoretischen Messantwort eines EM-Systems für das PROMIS-Messsystem adaptiert. Außerdem wurde Software entwickelt, welche eine automatisierte Bearbeitung von PROMIS-Messdaten erlaubt. Erst mit dem Vorliegen derartiger Programme war zielgerichtete Arbeit mit Messdaten des PROMIS-Systems möglich.

Neben der Arbeit mit Software wurden Halterungen ohne elektrisch leitfähige Komponenten für die Sende- und die Empfangseinheit hergestellt (siehe Abb. 1 und 2). Da man nicht davon ausgehen kann, dass ein Mensch diese Einheiten über längere Zeit ruhig halten bzw. tragen kann, sind solche Fixiervorrichtungen für gezielte Test unbedingt erforderlich.

Voraussetzung für die Entwicklung einer Inversion für das PROMIS-System sind möglichst umfangreiche Kenntnisse über das Messsystem.

Von entscheidender Bedeutung für jede Inversion ist die Kenntnis der zu erwartenden Messgenauigkeit bzw. der erzielbaren Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Diese Reproduzierbarkeit bestimmt letztlich auch welche Untergrundmodelle auflösbar sind. Um diese Reproduzierbarkeit zu untersuchen wurden ab März 2023 zahlreiche Messungen mit dem PROMIS-System durchgeführt. Im Zuge dieser Untersuchungen wurden Messungen in

unterschiedlichen Messkonfigurationen durchgeführt. Dabei wurden für jede Konfiguration zwischen 10 und 50 Einzelmessungen durchgeführt und die Schwankungen der Messwerte untersucht. Diese Messungen dienen auch als Grundlage für erste Handlungsempfehlungen im Umgang mit dem PROMIS-Messsystem.

2 Durchführung und Auswertung der Testmessungen in Goggendorf (NÖ)

Die Messungen mit dem PROMIS-Messsystem in Goggendorf fanden im März und im Juli 2023 statt. Für diese Messungen wurden die Sende- und die Empfängereinheit jeweils auf den bereits eingangs erwähnten Halterungen aus Holz und Kunststoff (ohne jegliche Metallteile) fixiert. So konnte ausgeschlossen werden, dass Schwankungen der Messwerte durch Variationen in den Spulenorientierungen und/oder dem Spulenabstand verursacht werden.



Abbildung 1: Sendeeinheit auf den verwendeten Halterungen aus Holz und Kunststoff. Rechts oben im Bild ist im Hintergrund die Empfängereinheit erkennbar.

Im Zuge dieser Messungen wurde für die verschiedenen Spulenabstände (20 m, 50 m, 100 m, 200 m und 400 m) die Einstellungen für den stacking-level (0 bis 4, außer 3), sowie die Höhe der Sendespule (73.5 cm oder 89.5 cm) variiert. Insgesamt wurden 342 Messungen mit 813

Einzelmessungen (stacks) durchgeführt. Die unterschiedlichen Messkonfigurationen können Tabelle 1 entnommen werden.



Abbildung 2: Empfängereinheit auf der verwendeten Halterung aus Holz und Kunststoff.

2.1 Stacking

Beim Stacking führt das Messsystem üblicherweise automatische mehrere Messungen durch und berechnet aus diesen Einzelmessungen ein Messergebnis.

Laut Bedienungsanleitung (IRIS Instruments, 2019) wird bei stacking-level 0 pro Messung nur eine Einzelmessung durchgeführt. Außerdem findet bei stacking-level 0 keine Rauschunterdrückung statt.

Ab stacking-level 1 wird bei allen Spulenabständen eine Rauchunterdrückung durchgeführt. Was diese Rauschunterdrückung ist bzw. tut, wird in der Bedienungsanleitung nicht näher beschrieben. Die Anzahl der Einzelmessungen (stacks) pro Messung ist abhängig vom Spulenabstand und dem stacking-level (siehe Tabelle 1).

Laut Bedienungsanleitung sollte es ab stacking-level 2 jeweils zu einer Verdoppelung der Anzahl der Einzelmessungen kommen. Unsere Messungen mit stacking-level 4 konnten das

jedoch nicht bestätigen. Die maximale Anzahl von stacks lag bei unseren Messungen bei 8 Einzelmessungen (stacks) für alle Spulenabstände.

Tabelle 1: Durchgeführte Test-Messungen im Jahr 2023. Anzahl der "stacks" pro Messung laut Messdaten-File.

stacking level	Abstand [m]	Anzahl Messungen	Anzahl stacks pro Messung	stacking level	Abstand [m]	Anzahl Messungen	Anzahl stacks pro Messung
0	20	20	1	2	20	20	2
0	50	20	1	2	50	10	2
0	100	20	1	2	100		
0	200	25	1	2	200		
0	400	20	1	2	400		
1	20	50	1	4	20	10	8
1	50	50	1	4	50	10	8
1	100	20	2	4	100		
1	200	25	4	4	200	10	8
1	400	22	4	4	400	10	8

2.2 Dipolmomente

Das Dipolmoment gibt die Stärke des Sender-Signals an, das in den Untergrund entsandt wird. Je stärker dieses Signal ist, desto deutlicher ist das Signal am Empfänger und desto besser ist die Tiefenauflösung des Messsystems.

Das Messsystem PROMIS gibt für jede Messung auch das aktuell verwendete Dipolmoment aus. Im Folgenden sollen unsere Beobachtungen beschrieben werden, unter welchen Umständen das PROMIS-System die Dipolmomente der einzelnen Frequenzen verändert (siehe Abb. 3).

110 Hz und 220 Hz (siehe Abb. 3): Bei den niedrigsten Frequenzen beobachteten wir einen Anstieg des Dipolmoments für die Spulenabstände 20 m, 50 m und 100 m erst bei stacking-level 4. Für die Spulenabstände 200 m und 400 m erfolgte eine Anhebung schon ab stacking-level 1.

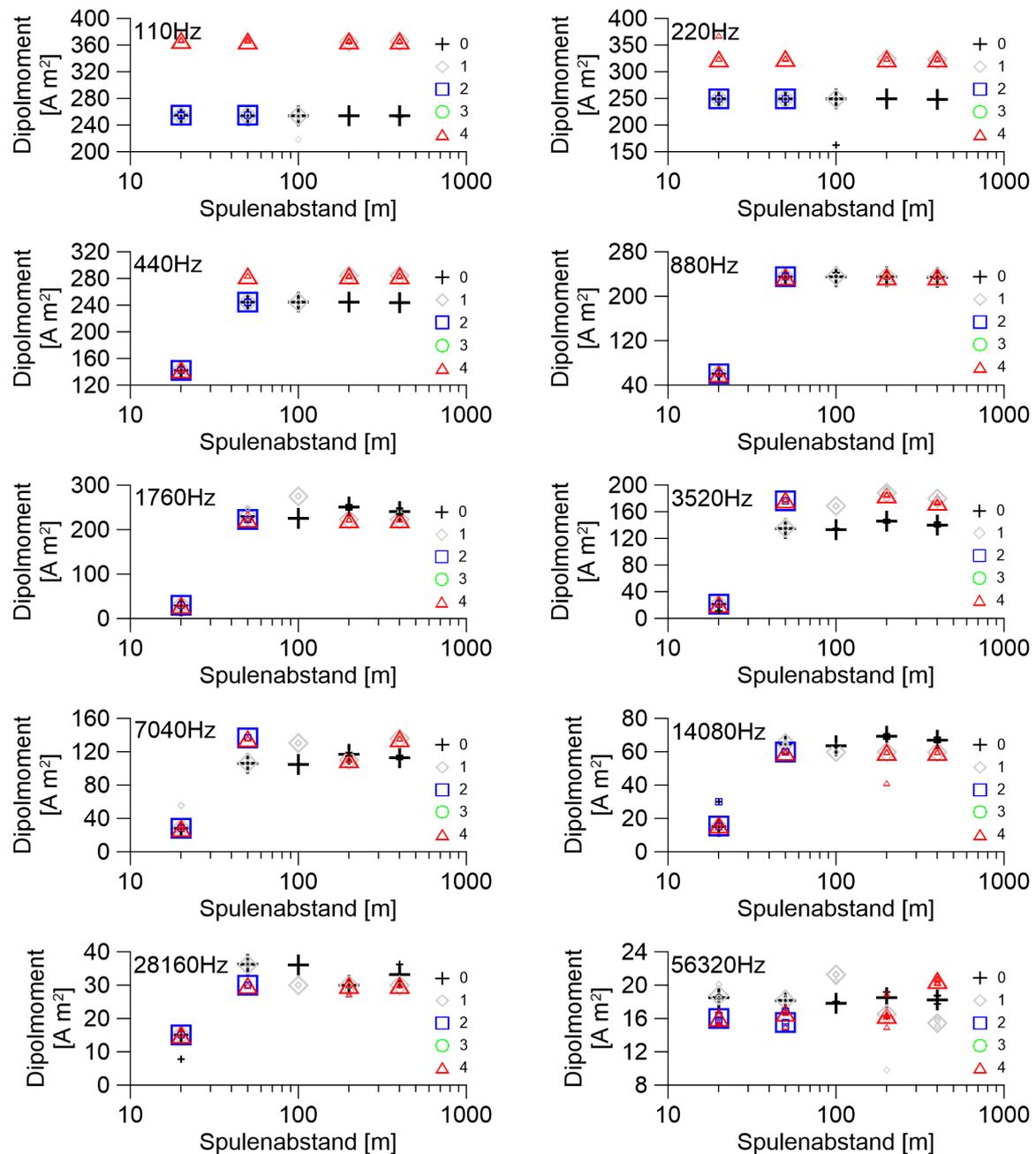


Abbildung 3: Dipolmoment der Sendeeinheit bei unterschiedlichen Spulenabständen und stacking-level. Die unterschiedlichen Symbole markieren die unterschiedlichen stacking-level. Kleine Symbole entsprechen Einzelmessungen, große Symbole dem Median der Einzelmessungen.

440 Hz (siehe Abb. 3): Gleichbleibend niedrige Dipolmomente beobachteten wir bei Spulenabstand 20 m für alle stacking-level. Ab Spulenabstand 50 m stieg das Dipolmoment für alle stacking-level deutlich an. Für die Spulenabstände 50 m und 100 m stieg bei stacking-level 4 das Dipolmoment noch einmal ein wenig an. Für die Spulenabstände 200 m und 400 m fand dieser zweite Anstieg des Dipolmoment schon ab stacking-level 1 statt.

880 Hz (siehe Abb. 3): Gleichbleibend niedrige Dipolmomente beobachteten wir bei Spulenabstand 20 m für alle stacking-level. Ab einem Spulenabstand von 50 m stieg das Dipolmoment für alle stacking-level an.

1760 Hz bis 28160 Hz (siehe Abb. 3): Bei diesen Frequenzen verhielt sich das Dipolmoment ähnlich wie bei 880 Hz. Allerdings schwankten die Dipolmomente bei diesen Frequenzen teilweise recht stark.

56320 Hz (siehe Abb. 3): Das Dipolmoment der höchsten Frequenz zeigte keinen markanten Anstieg mit zunehmendem Spulenabstand oder ansteigendem stacking-level. Das Dipolmoment schwankte jedoch recht stark bei unterschiedlichen Spulenabständen und stacking-level.

2.3 Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

Die zentrale Frage der Messungen im Projektjahr 2023 war die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Bei einem perfekten Messsystem müsste bei jeder Messung unter gleichen Bedingungen immer das gleiche Messergebnis zu beobachten sein. So ein perfektes Messsystem existiert natürlich nicht. Jedes Messsystem wird bei Wiederholungsmessungen immer mehr oder weniger große Abweichungen in den Messergebnissen liefern. Eine Inversion der Messdaten muss mit diesen Abweichungen umgehen können. Die Kenntnis der Reproduzierbarkeit ist daher eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung einer stabilen Inversion realer Messdaten.

Um die Reproduzierbarkeit der Messdaten des PROMIS-Messsystems zu untersuchen wurde eine Vielzahl von Messungen mit unterschiedlichen Messparametern durchgeführt. Dabei wurden die Messungen einzelner Messkonfigurationen auch manchmal an unterschiedlichen Tagen wiederholt. Wie schon zuvor besprochen, wurden die Spulen auf elektrisch nicht leitfähigen Halterungen montiert um Fehler durch Schwankungen vom Spulenabstand und der Orientierung der Spulen zu verhindern.

In dieser Untersuchung wurde für jede Messfrequenz einer Messkonfiguration (gleiche Messparameter und zeitlich unmittelbar aufeinander folgende Messungen) der arithmetische Mittelwert und dessen Standardabweichung der Messungen berechnet. Messungen, die zu

unterschiedlichen Zeiten (z.B. an unterschiedlichen Tagen) durchgeführt wurden, wurden getrennt behandelt. Für die Interpretation hinsichtlich Reproduzierbarkeit war nicht der Mittelwert selbst sondern vielmehr die dazugehörige Standardabweichung ausschlaggebend. Da der Mittelwert und dessen Standardabweichung eine Gaussverteilung der Messwerte um den wahren Wert voraussetzen, wurden auch Histogramme der Messwerte angefertigt und in die Interpretation mit einbezogen (siehe Anhang). Betrachtet wurden immer die Vertikalkomponenten (vgl. Orientierung der Sendespule in Abb. 1) der Inphase (HZ Ip) und der Outphase (HZ Op) des EM-Feldes am Empfänger (als Verhältnis zum Primärfeld des Senders) in Prozent.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen bezüglich der Messdurchführung für die verschiedenen Spulenabstände besprochen. Dafür wurden die Tabellen 2 bis 8 angelegt.

Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8: Jede Zeile in den Tabellen 2 bis 8 steht für die Messungen einer Messkonfiguration. In der 1.Spalte wird der stacking-level und die Abbildungsnummer des dazugehörigen Histogramms im Anhang angegeben. Die zweite bis zur vorletzten Spalte geben die Standardabweichungen der Inphase HZ Ip (oben) und der Outphase HZ Op (unten) an. Die letzte Spalte zeigt die Mittelwerte der Standardabweichungen für HZ Ip (oben, erste Zahl) und HZ Op (unten, zweite Zahl) der einzelnen Messfrequenzen, sowie den Mittelwert dieser beiden Werte (unten). Außerdem wurde der Hintergrund der Tabellen-Felder mit den Standardabweichungen farbcodiert:

GRÜN: Das Histogramm der entsprechenden Frequenz zeigt annähernd eine Gaussfunktion;

GELB: Es ist fraglich, ob das Histogramm annähernd eine Gaussfunktion zeigt;

ROT: Das Histogramm zeigt markante Abweichungen von einer Gaussfunktion, z.B. „Ausreißer“).

Wir mussten leider immer wieder "Ausreißer" beobachten, die eine Interpretation der Messdaten massiv stören könnten (siehe dazu z.B. Abb. 8 bis 11, Abb. 26 oder Abb. 32). Diese Ausreißer traten bei allen verwendeten stacking-level auf. Die Hoffnung, solche Ausreißer durch höhere stacking-level zu vermeiden, erfüllte sich leider nicht. Diese Ausreißer waren auch auf Grund der während der Messung einsehbaren Fehler-Parameter nicht

identifizierbar. Nur mit mehreren Messungen an einem Messpunkt könnten diese Ausreißer im Zuge der Auswertung identifiziert und korrigiert werden.

2.3.1 Spulenabstand 20 m

Bei einem Spulenabstand von 20 m können alle Messfrequenzen sinnvoll genutzt werden (siehe Tab. 2). Ein stacking-level größer als 0 oder 1 erscheint nicht notwendig bzw. nicht sinnvoll.

Tabelle 2: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 20 m für alle Messfrequenzen. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	110Hz [%]	220Hz [%]	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	28kHz [%]	56kHz [%]	MW [%]
0	0.07	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	0.02	0.03 0.04
15	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	0.11	0.02	0.035
0	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.06	0.10	0.04 0.06
16	0.07	0.06	0.05	0.02	0.05	0.06	0.05	0.04	0.13	0.08	0.05
1	0.22	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05 0.05
17	0.16	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.02	0.07	0.05	0.05
1	0.16	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.07	0.05 0.06
18	0.16	0.06	0.05	0.04	0.04	0.02	0.06	0.05	0.06	0.08	0.055
1	0.16	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.13	0.24	0.51	0.16 0.17
8	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.13	0.19	0.67	0.32	0.165
2	0.08	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	9.60	10.58	1.37	2.17 0.30
9	0.06	0.03	0.04	0.07	0.09	0.15	0.28	0.92	0.71	0.63	1.24
2	0.10	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	6.63	9.74	10.72	2.31	2.96 0.48
11	0.09	0.04	0.03	0.07	0.12	0.25	0.71	1.18	1.15	1.20	1.72
4	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	1.82	3.93	2.42	2.62	1.10 0.45
10	0.05	0.02	0.03	0.06	0.13	0.25	0.52	0.99	1.30	1.18	0.78

2.3.2 Spulenabstand 50 m

Bei einem Spulenabstand von 50 m können alle Frequenzen sinnvoll genutzt werden (siehe Tab. 3). Ein stacking-level größer als 0 oder 1 erscheint nicht notwendig bzw. die Verbesserung der Streuung der Messwerte bei stacking-level 4 gegenüber der Streuung bei stacking-level 0 scheint den deutlich höheren zeitlichen Mehraufwand nicht zu rechtfertigen.

Tabelle 3: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 50 m für alle Messfrequenzen. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	110Hz [%]	220Hz [%]	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	28kHz [%]	56kHz [%]	MW [%]
0 19	0.89 0.70	0.19 0.32	0.19 0.09	0.08 0.07	0.03 0.08	0.05 0.04	0.07 0.14	0.08 0.12	0.20 0.16	0.72 0.46	0.25 0.22 0.235
0 20	0.57 0.64	0.27 0.15	0.17 0.16	0.04 0.09	0.05 0.05	0.04 0.05	0.06 0.13	0.08 0.08	0.12 0.18	0.44 0.53	0.18 0.21 0.195
1 12	2.05 1.76	0.31 0.31	0.14 0.20	0.10 0.07	0.08 0.05	0.09 0.06	0.09 0.11	0.10 0.08	0.23 0.30	0.51 0.41	0.37 0.33 0.35
1 21	2.87 2.25	0.34 0.19	0.13 0.21	0.08 0.08	0.04 0.05	0.04 0.05	0.06 0.14	0.06 0.07	0.21 0.21	0.67 0.44	0.45 0.37 0.41
1 22	3.62 2.30	0.49 0.26	0.14 0.08	0.07 0.04	0.02 0.05	0.04 0.07	0.04 0.11	0.06 0.12	0.23 0.11	0.92 0.96	0.56 0.41 0.485
2 13	1.45 1.89	0.23 0.20	0.08 0.13	0.04 0.10	0.03 0.12	0.04 0.23	0.19 0.46	0.56 0.48	1.09 0.39	1.30 0.43	0.50 0.44 0.47
4 14	0.69 0.71	0.06 0.10	0.04 0.03	0.03 0.03	0.03 0.03	0.02 0.06	0.03 0.11	0.12 0.14	0.28 0.18	0.31 0.11	0.16 0.15 0.155

2.3.3 Spulenabstand 100 m

Bei einem Spulenabstand von 100 m können grundsätzlich alle Frequenzen genutzt werden (siehe Tab. 4). Will man die Messzeit pro Messpunkt verkürzen, scheint ein Verzicht der Messungen mit 110 Hz sinnvoll. Auch mit stacking-level 0 können bereits verwendbare Resultate erzielt werden.

Tabelle 4: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 100 m für alle Messfrequenzen. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	110Hz [%]	220Hz [%]	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	28kHz [%]	56kHz [%]	MW [%]
0 23	5.03 5.14	1.70 1.83	1.09 1.36	0.64 0.56	0.29 0.24	0.24 0.27	0.16 0.24	0.66 0.45	1.57 0.97	1.38 0.78	1.28 1.18 1.23
0 24	3.96 4.61	2.50 1.81	0.55 0.98	0.47 0.31	0.29 0.22	0.21 0.23	0.24 0.27	0.35 0.51	2.01 1.12	0.95 1.62	1.15 1.17 1.16
1 25	19.5 13.8	1.51 2.29	0.61 0.54	0.24 0.37	0.15 0.13	0.13 0.13	0.11 0.16	0.33 0.27	1.52 1.49	0.83 0.99	2.50 2.01 2.26
1 26	14.6 11.6	1.55 2.24	0.59 0.42	0.31 0.35	0.11 0.15	0.13 0.18	0.12 0.09	1.79 2.52	1.41 1.10	1.07 0.72	2.17 1.94 2.06

2.3.4 Spulenabstand 200 m

Bei annähernd normal verteilten Daten liegen etwa 68% aller Messungen innerhalb einer Standardabweichung vom Mittelwert. Etwa 95% aller Messungen liegen innerhalb von 2 Standardabweichung und 99,7% liegen innerhalb von 3 Standardabweichungen. Es erscheint daher fraglich, ob für das Messsystem PROMIS bei Standardabweichungen von mehr als $\pm 25\%$, d.h. 95% aller Messdaten liegen innerhalb von $\pm 50\%$, noch von einer sinnvollen Messung gesprochen werden kann.

Tabelle 5: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 200 m für alle Messfrequenzen. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	110Hz [%]	220Hz [%]	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	28kHz [%]	56kHz [%]	MW [%]
0 27	30.7 44.0	14.8 8.48	8.06 7.87	3.58 3.97	1.62 1.52	1.65 1.63	1.90 2.36	3.33 3.22	14.8 10.2	3.51 4.64	8.40 8.79 8.60
0 28	38.8 36.8	21.5 12.4	8.43 12.0	2.92 2.93	1.24 1.30	2.41 1.76	1.57 1.63	2.50 4.16	12.6 12.3	14.9 9.77	10.69 9.51 10.1
1 29	24.8 34.3	6.94 8.79	2.80 2.94	2.73 2.07	1.17 1.37	0.59 0.82	0.59 0.45	2.24 1.96	4.54 3.61	4.38 7.48	5.07 6.38 5.73
1 30	36.8 28.9	7.70 11.1	4.19 5.26	1.76 1.63	1.47 1.35	0.95 0.78	1.23 0.94	1.58 2.29	3.94 4.38	2.77 5.26	6.24 6.19 6.22
4 31	43.2 22.8	5.93 2.64	2.73 2.16	1.23 1.69	0.84 0.89	0.32 0.59	0.48 0.65	1.18 2.31	2.53 2.77	3.43 4.14	6.18 4.07 5.13

Tabelle 6: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 200 m für alle Messfrequenzen mit Ausnahme von 110 Hz. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	220Hz [%]	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	28kHz [%]	56kHz [%]	MW [%]
0 27	14.8 8.48	8.06 7.87	3.58 3.97	1.62 1.52	1.65 1.63	1.90 2.36	3.33 3.22	14.8 10.2	3.51 4.64	5.93 4.88 5.41
0 28	21.5 12.4	8.43 12.0	2.92 2.93	1.24 1.30	2.41 1.76	1.57 1.63	2.50 4.16	12.6 12.3	14.9 9.77	7.57 6.47 7.02
1 29	6.94 8.79	2.80 2.94	2.73 2.07	1.17 1.37	0.59 0.82	0.59 0.45	2.24 1.96	4.54 3.61	4.38 7.48	2.89 3.28 3.09
1 30	7.70 11.1	4.19 5.26	1.76 1.63	1.47 1.35	0.95 0.78	1.23 0.94	1.58 2.29	3.94 4.38	2.77 5.26	2.84 3.67 3.26
4 31	5.93 2.64	2.73 2.16	1.23 1.69	0.84 0.89	0.32 0.59	0.48 0.65	1.18 2.31	2.53 2.77	3.43 4.14	2.07 1.98 2.03

Nimmt man $\pm 25\%$ als maximal zulässige Standardabweichung für sinnvolle Messungen an, liefern bei 200 m Spulenabstand die Messungen bei 110 Hz im Grunde keine verwertbaren Meßergebnisse (siehe Tab. 5). Lässt man Messungen bei 110 Hz weg (siehe Tab. 6) verkürzt sich zudem die Messzeit pro Messpunkt.

Bei einem Spulenabstand von 200 m erscheint außerdem die Verwendung eines stacking-level von zumindest Stufe 1 als sinnvoll.

2.3.5 Spulenabstand 400 m

Auch hier erscheint es fraglich, ob bei Standardabweichungen von mehr als $\pm 25\%$, d.h. 95% aller Messdaten liegen innerhalb von $\pm 50\%$, beim PROMIS-Messsystem noch von einer sinnvollen Messung gesprochen werden kann.

Tabelle 7: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 400 m für alle Messfrequenzen. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	110Hz [%]	220Hz [%]	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	28kHz [%]	56kHz [%]	MW [%]
0 32	365 216	169 151	65.3 59.6	21.8 37.8	10.4 10.8	17.6 19.7	10.1 14.7	34.0 17.5	54.2 94.9	101 109	84.8 73.1 79.0
0 33	342 372	232 109	65.3 52.8	26.8 54.0	14.6 13.2	16.0 11.7	13.7 13.5	24.4 36.1	106 61.1	64.7 58.9	90.5 78.3 84.4
1 34	140 146	47.7 52.9	22.5 34.7	19.3 17.8	7.93 9.33	5.61 3.87	3.22 6.10	15.5 18.9	29.9 40.9	22.5 36.2	31.5 36.6 34.0
1 35	148 130	38.7 52.4	25.8 19.2	11.6 14.2	7.60 9.09	5.73 6.10	4.25 2.88	19.3 9.14	46.9 46.3	42.7 30.4	35.0 32.0 33.5
4 36	121 55.1	26.5 38.4	12.6 13.1	15.0 14.8	3.00 6.40	2.85 1.86	1.92 2.46	9.73 12.5	38.7 20.4	30.1 21.0	26.1 18.6 22.4

Demnach liefern bei 400 m Spulenabstand die Messungen bei 110 Hz, 220 Hz, 28 kHz und 56 kHz im Grunde keine verwertbaren Ergebnisse (siehe Tab. 7). Lässt man Messungen mit diesen Frequenzen weg (siehe Tab. 8) verkürzt sich zudem die Messzeit deutlich.

Bei einem Spulenabstand von 400 m erscheint außerdem die Verwendung von stacking-level 4 sinnvoll. Da es auch bei stacking-level 4 zu Ausreißern bei den aufgezeichneten Messwerten kommen kann, ist es empfehlenswert an jedem Messpunkt zumindest zwei Messungen durchzuführen.

Aufgrund der langen Messzeit pro Messfrequenz wird hier die Verwendung einer Vorrichtungen zur Fixierung zumindest der Sendeeinheit empfohlen.

Tabelle 8: Standardabweichungen von Messungen mit Spulenabstand 400 m ohne die Messfrequenzen 110 Hz, 220 Hz, 28 kHz und 56 kHz. Siehe Erklärung zu den Tabellen 2 bis 8.

stacking Abb.	440Hz [%]	880Hz [%]	1760Hz [%]	3520Hz [%]	7040Hz [%]	14kHz [%]	MW [%]
0 32	65.3 59.6	21.8 37.8	10.4 10.8	17.6 19.7	10.1 14.7	34.0 17.5	26.5 26.7 26.6
0 33	65.3 52.8	26.8 54.0	14.6 13.2	16.0 11.7	13.7 13.5	24.4 36.1	26.8 30.2 28.5
1 34	22.5 34.7	19.3 17.8	7.93 9.33	5.61 3.87	3.22 6.10	15.5 18.9	12.3 15.1 13.7
1 35	25.8 19.2	11.6 14.2	7.60 9.09	5.73 6.10	4.25 2.88	19.3 9.14	12.4 10.1 11.25
4 36	12.6 13.1	15.0 14.8	3.00 6.40	2.85 1.86	1.92 2.46	9.73 12.5	7.51 8.53 8.02

2.4 Variation der Höhe der Sendespule

Bei Feldmessungen mit dem PROMIS-Messsystem wird die Sendespule normalerweise mit Hilfe von Schultergurten getragen (siehe Abb. 4).



Abbildung 4: Sendespule des PROMIS-Messsystems. Mit Hilfe der Schultergurte getragen.

Dabei ist die Höhe der Sendespule über der Geländeoberkante natürlich abhängig von der Körpergröße und den Tragegewohnheiten der MitarbeiterIn. Damit die Sendespule die/den MitarbeiterIn beim Gehen nicht behindert, wird sie/er die Spule vermutlich etwa in Beinlänge

über dem Boden tragen. Bei den durchschnittlichen Körpergrößen in Österreich (Frauen ca. 166 cm, Männer ca. 178 cm) sind Höhen der Sendespule von ca. 77 cm bzw. 81 cm über dem Boden zu erwarten.

Die Testmessungen in Goggendorf (NÖ) wurden mit zwei unterschiedlichen Höhen der Sendespule durchgeführt - 73.5 cm oder 89.5 cm über dem Boden. Zu diesem Zweck wurden höhenverstellbare Spulenhalterungen verwendet (siehe Abb. 1). Diese beiden Höhen stellten die unterste und die oberste stabile Höhe der Spulenhalterungen dar.

Die von uns gemessenen Höhen würden der Beinlänge einer 157 cm großen Frau (74 cm) bzw. der Beinlänge eines 194 cm großen Mannes (89 cm) entsprechen. Damit stellen die von uns verwendeten Höhen der Sendespule durchaus Extremwerte dar.

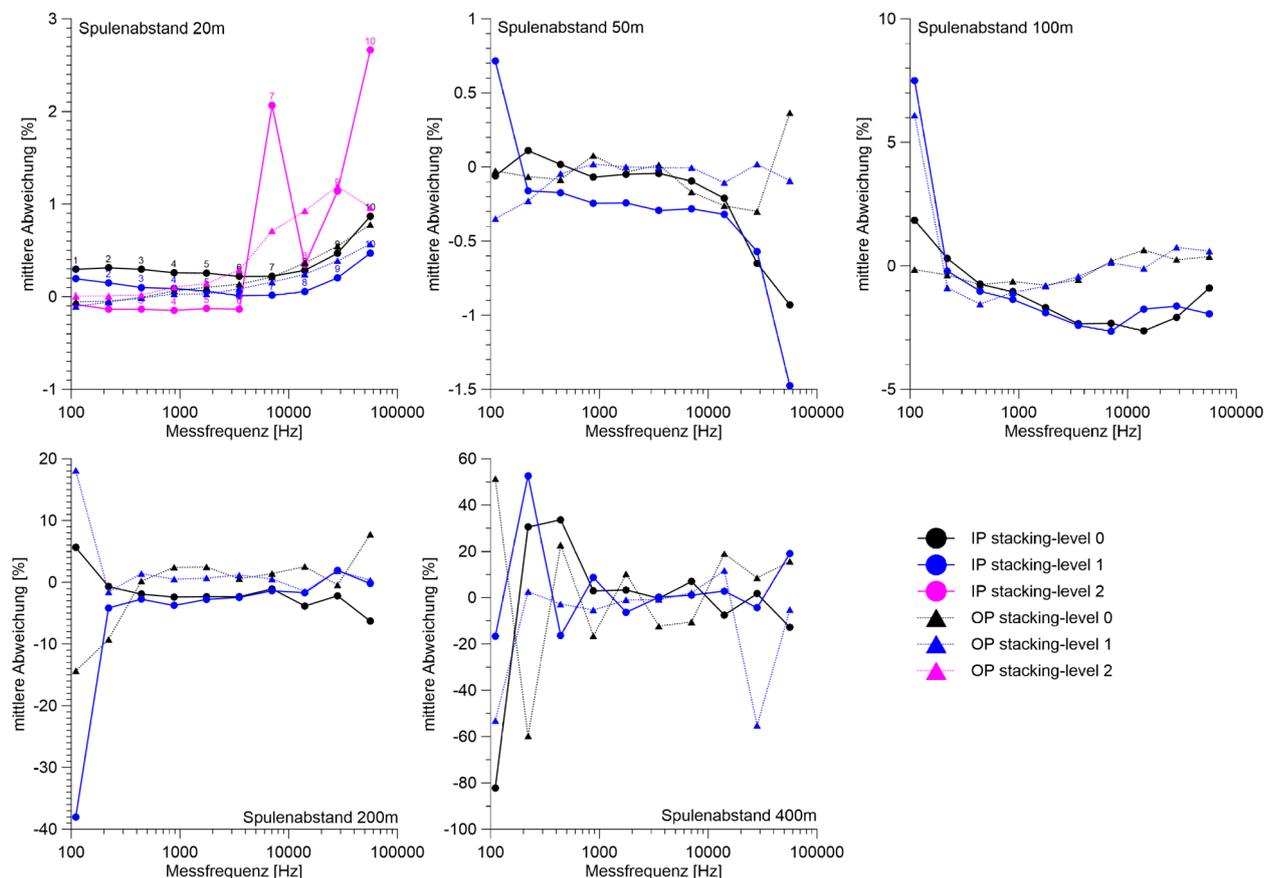


Abbildung 5: Mittlere Abweichungen der Messwerte durch unterschiedliche Höhen der Sendespule für verschiedene Spulenabstände und stacking-level. Die mittlere Abweichung errechnet sich aus der Differenz der mittleren Messwerte der unteren Sendespulenhöhe minus der mittleren Messwerte der oberen Spulenhöhe.

Im Zuge der Messungen in Goggendorf wurde für manche Messkonfigurationen mit den beiden oben erwähnten Höhen der Sendespule gemessen. Für die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Senderhöhen wurde für jede Frequenz jeweils die Differenz

der Mittelwerte dieser beiden Höhen berechnet (mittlerer Messwert bei 73.5 cm minus mittlerer Messwert bei 89.5 cm Spulenhöhe). In den Abbildungen 5 und 7 werden diese Differenzen als „mittlere Abweichung“ bezeichnet. Eine positive „mittlere Abweichung“ in Abbildung 5 zeigt eine Abnahme des Messwerts durch Erhöhung der Höhe der Sendespule, eine negative „mittlere Abweichung“ eine Erhöhung des Messwerts.

Wie in Abbildung 5 klar zu erkennen ist, kommt es bei allen Spulenabständen sowohl zu Zunahmen als auch zu Abnahmen der Messwerte durch Erhöhung der Sendespule. Dabei fallen die Veränderungen der Messwerte tendenziell bei den niedrigsten und den höchsten Frequenzen am stärksten aus.

Um diese Ergebnisse besser einordnen zu können, zeigt Abbildung 6 die bei den betrachteten Messkonfigurationen festgestellten Standardabweichungen (Reproduzierbarkeit) der Messungen. Dabei fällt auf, dass auch hier die kleinsten und die größten Frequenzen tendenziell höhere Standardabweichungen aufweisen.

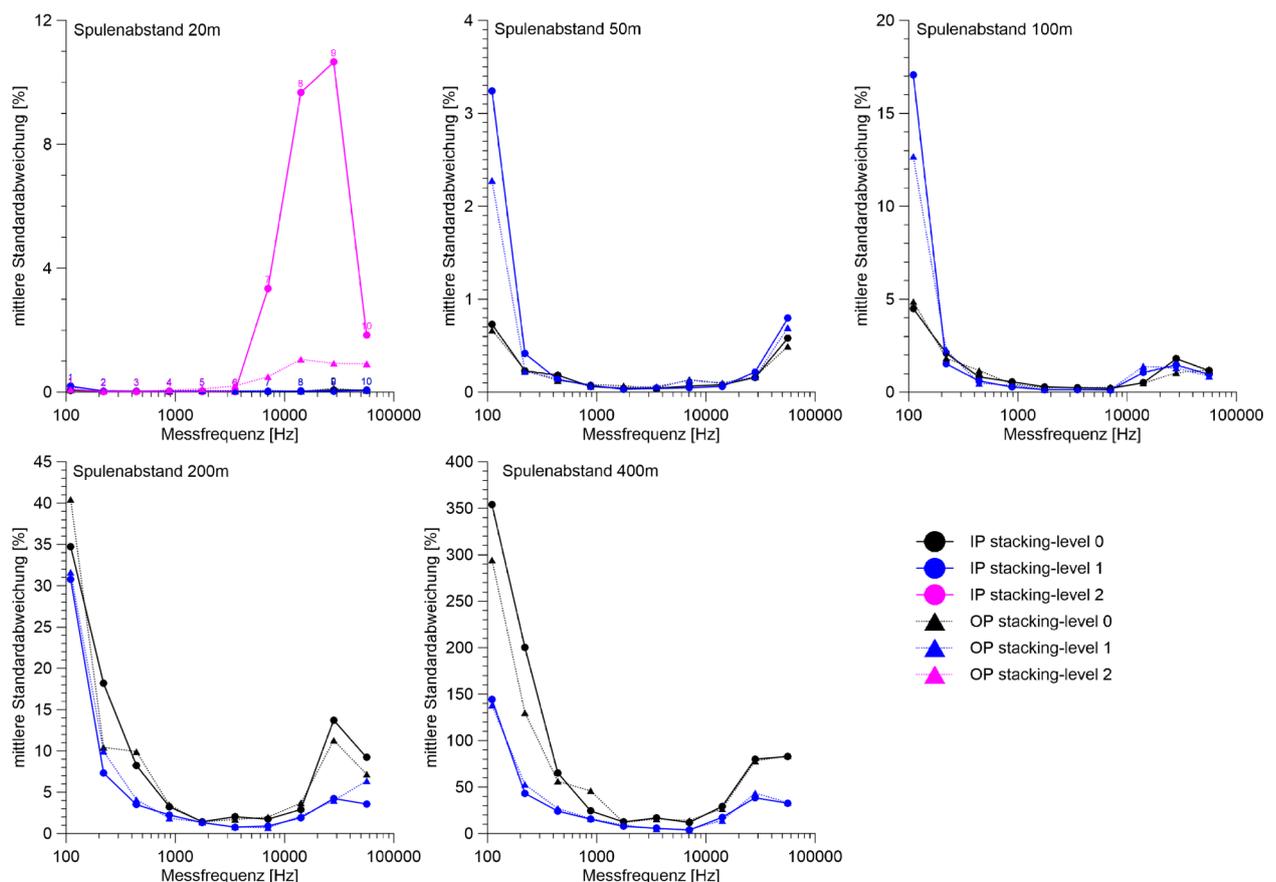


Abbildung 6: Mittlere Standardabweichung der für diese Detailuntersuchung betrachteten Messkonfigurationen.

Für eine Interpretation wurde das Verhältnis der mittleren Abweichungen zu den mittleren Standardabweichungen betrachtet (siehe Abb. 7). Der Bereich -1 bis +1, also jener Bereich in dem die Messwert-Unterschiede kleiner als die ermittelten Reproduzierbarkeiten sind, ist in Abbildung 7 schraffiert dargestellt.

Bei einem Spulenabstand von 20 m zeigen sich vor allem bei den Inphase-Werten signifikante Abweichungen durch Änderung der Höhe der Sendespule. Warum bei den stacking-levels 0 und 1 die Inphase-Werte sinken, bei stacking-level 2 jedoch steigen, ist unklar.

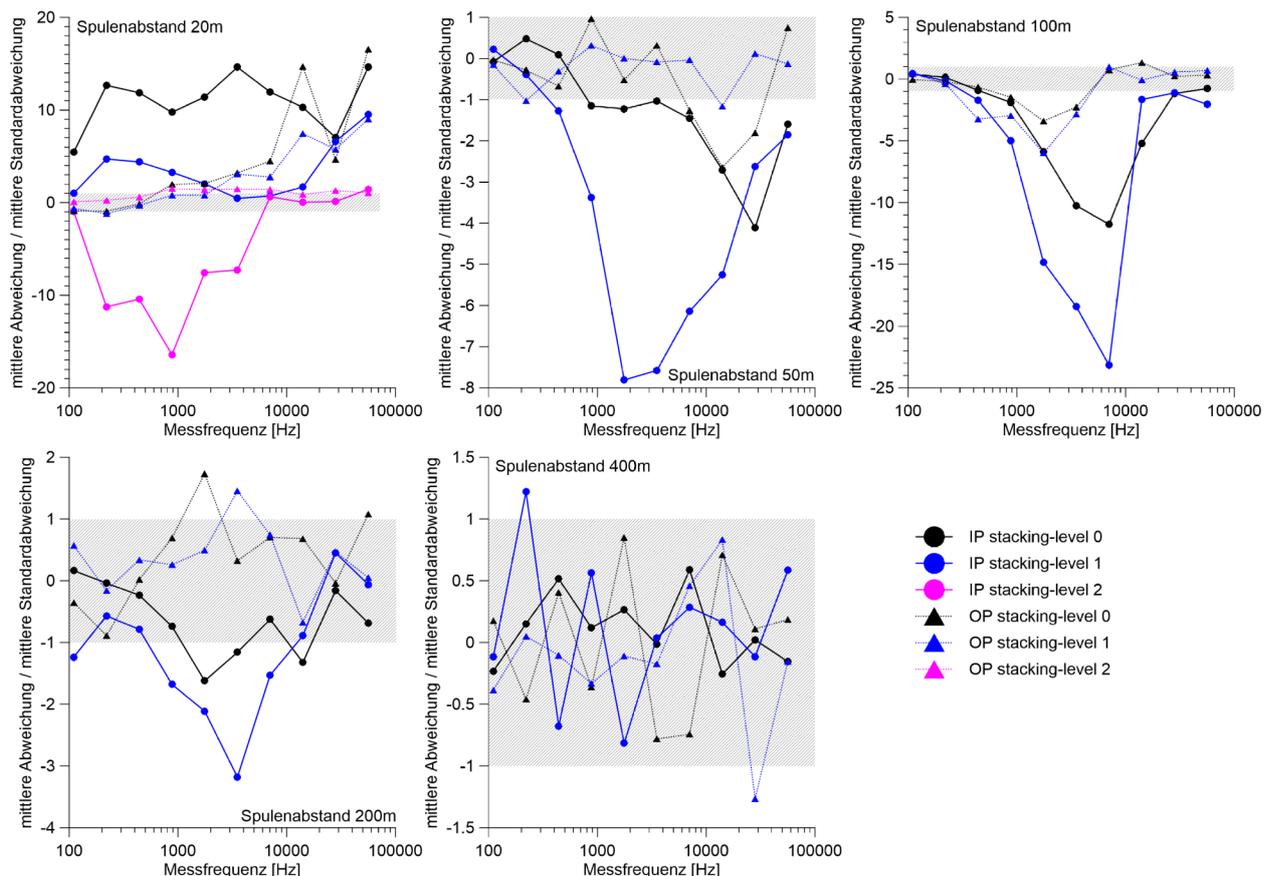


Abbildung 7: Verhältnis der mittleren Abweichungen aus Abb. 5 zu den entsprechenden Standardabweichungen (vgl. Abb. 6 – Reproduzierbarkeit).

Bei einem Spulenabstand von 50 m zeigen sich fast nur noch bei den Inphase-Werten signifikante Abweichungen. Die Abweichungen der Outphase liegen fast ausschließlich im Bereich unter der Reproduzierbarkeit. Mit erhöhter Positionierung der Sendespule wird hier durchgehend ein Anstieg der Messwerte beobachtet.

Die Abweichungen bei Spulenabstand 100 m sind teilweise recht deutlich. Vor allem bei den Inphase-Werten der Frequenzen zwischen 1000 Hz und 10000 Hz. Auch hier wird mit erhöhter Positionierung der Sendespule durchgehend ein Anstieg der Messwerte beobachtet.

Bei einem Spulenabstand von 200 m liegen bereits viele Abweichungen unter der Reproduzierbarkeit des Messsystems. Bei einem Spulenabstand von 400 m liegen die Abweichungen schließlich fast ausschließlich unter der Reproduzierbarkeit des Messsystems

Für eine schlüssige Beurteilung der Messwert-Abweichungen durch unterschiedliche Höhen der Sendespule sind noch zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

3 Empfehlungen zur Messdurchführung

Wegen der beobachteten Ausreißer wird für alle Spulenabstände empfohlen, zwei unabhängige Messungen pro Messpunkt durchzuführen.

Hinsichtlich Reproduzierbarkeit liefern bei 20 m und 50 m Spulenabstand alle Messfrequenzen grundsätzlich verwendbare Messwerte. Wegen den erhöhten Dipolmomenten ist für 110 Hz und 220 Hz der stacking-level 4 vorteilhaft. Für alle anderen Frequenzen erscheinen die stacking-level 0 oder 1 sinnvoll. Im Gegensatz zu 20 m Spulenabstand werden bei Messungen mit 50 m Spulenabstand bei allen Frequenzen von 440 Hz bis 28 kHz die Dipolmomente bei allen stacking-level erhöht.

Bei 100 m Spulenabstand liefern zwar alle Messfrequenzen grundsätzlich verwendbare Messwerte, es ist jedoch sinnvoll auf Messungen mit 110 Hz zu verzichten. Bei allen Frequenzen von 440 Hz bis 28 kHz werden die Dipolmomente bei allen stacking-level erhöht. Die Reproduzierbarkeit ist deutlich schlechter als bei 20 m oder 50 m Spulenabstand.

Bei 200 m Spulenabstand liefern Messungen mit 110 Hz Messfrequenz hinsichtlich Reproduzierbarkeit keine sinnvollen Ergebnisse. Für alle anderen Frequenzen wird ein stacking-level ab level 1 empfohlen. Die Reproduzierbarkeit ist jedoch deutlich schlechter als bei 100 m Spulenabstand. Messungen mit 200 m Spulenabstand können nur eingeschränkt empfohlen werden.

Bei 400 m Spulenabstand liefern Messungen mit 110 Hz, 220 Hz, 28 kHz und 56 kHz Messfrequenz hinsichtlich Reproduzierbarkeit keine sinnvollen Ergebnisse. Für alle anderen Frequenzen werden Messungen mit stacking-level 4 empfohlen. Wegen der langen Messzeiten bei stacking-level 4 sind Messungen mit 400 m Spulenabstand nur für Spezialuntersuchung empfehlenswert.

4 Ausblick

Dank der aus dem Projektjahr 2023 vorliegenden Ergebnisse zur Reproduzierbarkeit der Messwerte konnte Ende 2023 mit der Untersuchung der theoretischen Auflösbarkeit verschiedener geologisch-geophysikalischer Modelle begonnen werden. Dabei soll ermittelt werden, welche Strukturen in welchen Tiefenbereichen zuverlässig erkannt bzw. vom Umgebungsgestein unterschieden werden können. Diese Untersuchungen sollen im Projektjahr 2024 weitergeführt werden.

Da der Datenbankansatz zur Inversion der EM-Daten des PROMIS-Messsystems eine intensive Analyse der Messdaten beinhaltet, kann dieser Ansatz gut parallel zur Untersuchung der theoretischen Auflösbarkeit verschiedener geologisch-geophysikalischer Modelle verfolgt werden.

5 Literatur und Quellen

IRIS Instruments (2019): PROMIS - FDEM System, Multi-Frequency Electromagnetic Profiling System, User's manual, January 2019

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sendeeinheit auf den verwendeten Halterungen aus Holz und Kunststoff. Rechts oben im Bild ist im Hintergrund die Empfängereinheit erkennbar	5
Abbildung 2: Empfängereinheit auf der verwendeten Halterung aus Holz und Kunststoff.....	6
Abbildung 3: Dipolmoment der Sendeeinheit bei unterschiedlichen Spulenabständen und stacking-level. Die unterschiedlichen Symbole markieren die unterschiedlichen stacking-level. Kleine Symbole entsprechen Einzelmessungen, große Symbole dem Median der Einzelmessungen.....	8
Abbildung 4: Sendespule des PROMIS-Messsystems. Mit Hilfe der Schultergurte getragen.....	15
Abbildung 5: Mittlere Abweichungen der Messwerte durch unterschiedliche Höhen der Sendespule für verschiedene Spulenabstände und stacking-level. Die mittlere Abweichung errechnet sich aus der Differenz der mittleren Messwerte der unteren Sendespulenhöhe minus der mittleren Messwerte der oberen Spulenhöhe.....	16
Abbildung 6: Mittlere Standardabweichung der für diese Detailuntersuchung betrachteten Messkonfigurationen.....	17
Abbildung 7: Verhältnis der mittleren Abweichungen aus Abb. 5 zu den entsprechenden Standardabweichungen (vgl. Abb. 6 – Reproduzierbarkeit).....	18
Abbildung 8: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 30 Messungen.....	23
Abbildung 9: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 2. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	23
Abbildung 10: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	24
Abbildung 11: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 2. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	24
Abbildung 12: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 30 Messungen.....	25
Abbildung 13: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 2. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	25
Abbildung 14: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	26
Abbildung 15: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	26
Abbildung 16: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	27
Abbildung 17: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	27
Abbildung 18: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	28
Abbildung 19: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	28

Abbildung 20: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	29
Abbildung 21: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	29
Abbildung 22: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	30
Abbildung 23: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	30
Abbildung 24: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	31
Abbildung 25: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	31
Abbildung 26: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	32
Abbildung 27: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 15 Messungen.....	32
Abbildung 28: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	33
Abbildung 29: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 15 Messungen.....	33
Abbildung 30: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	34
Abbildung 31: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	34
Abbildung 32: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	35
Abbildung 33: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	35
Abbildung 34: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	36
Abbildung 35: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.....	36
Abbildung 36: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.....	37

7 Anhang - Histogramme der Messergebnisse

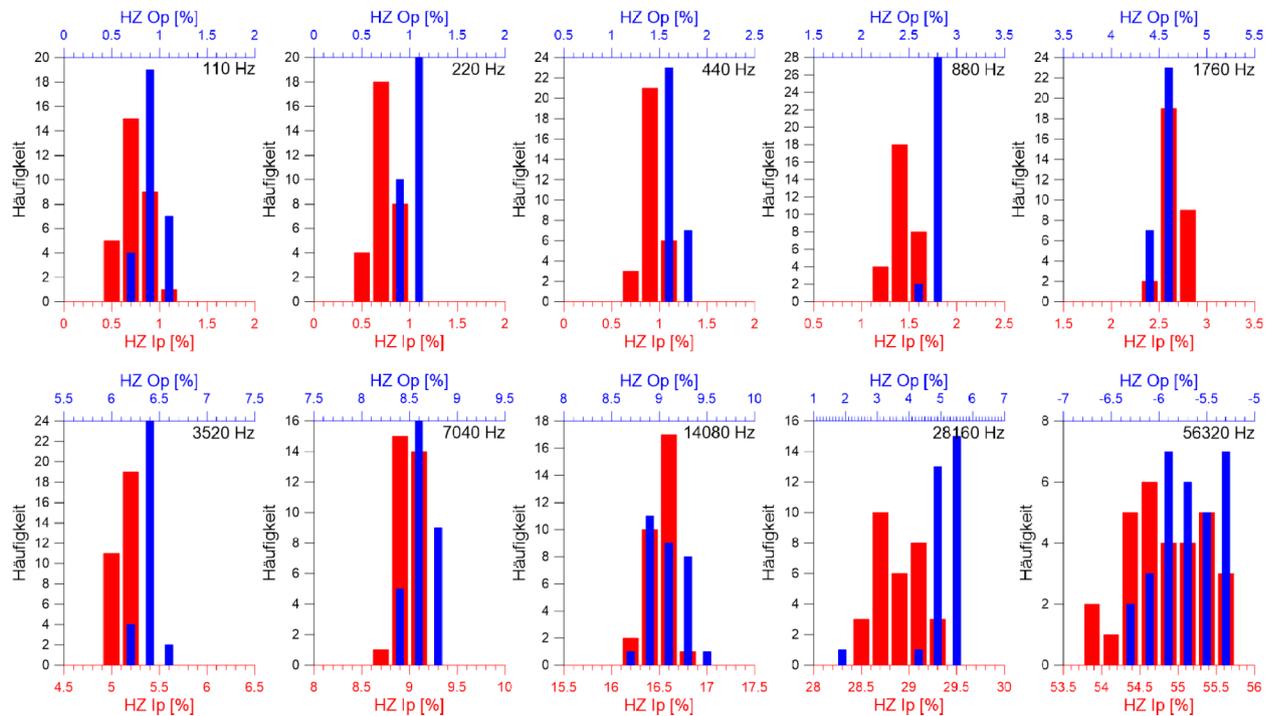


Abbildung 8: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 30 Messungen.

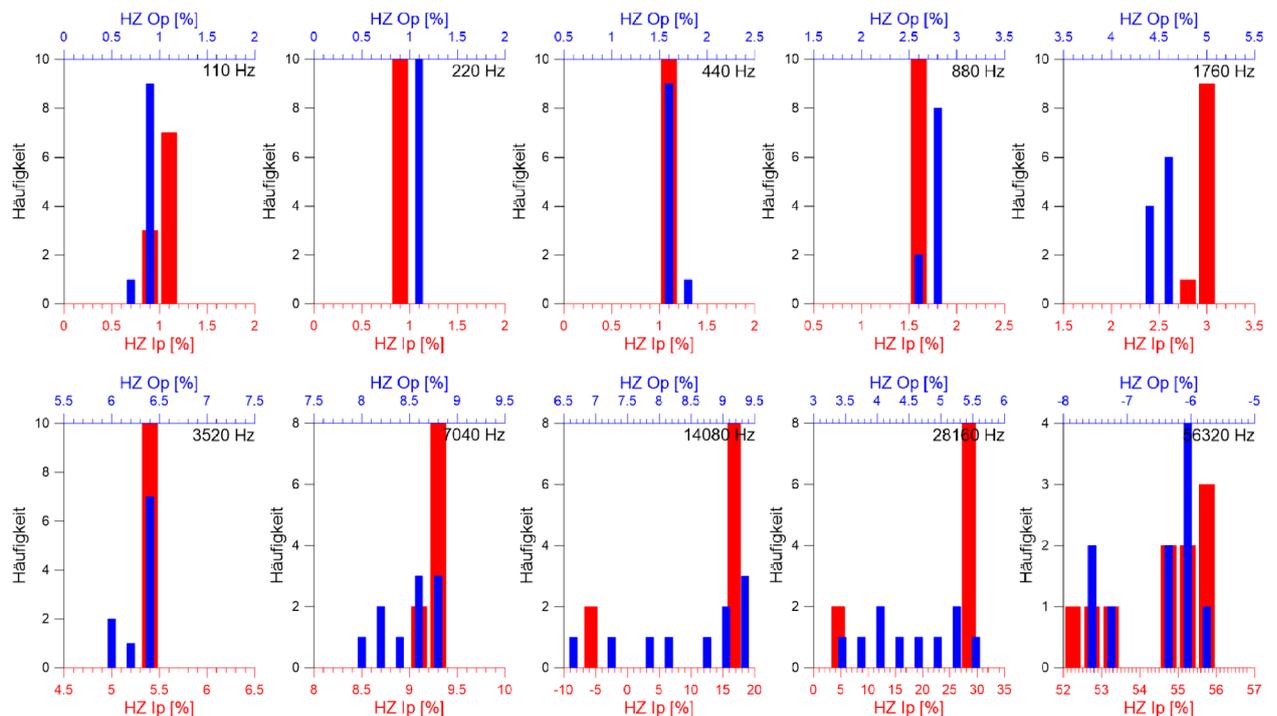


Abbildung 9: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 2. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

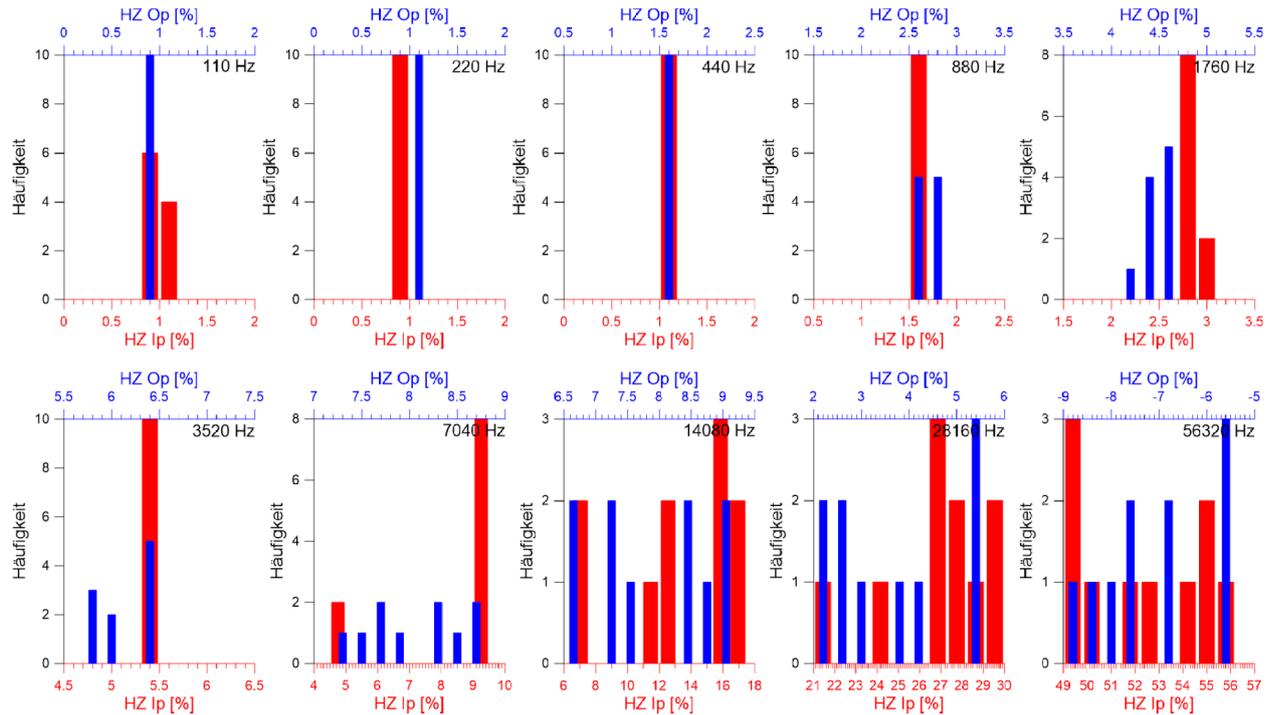


Abbildung 10: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

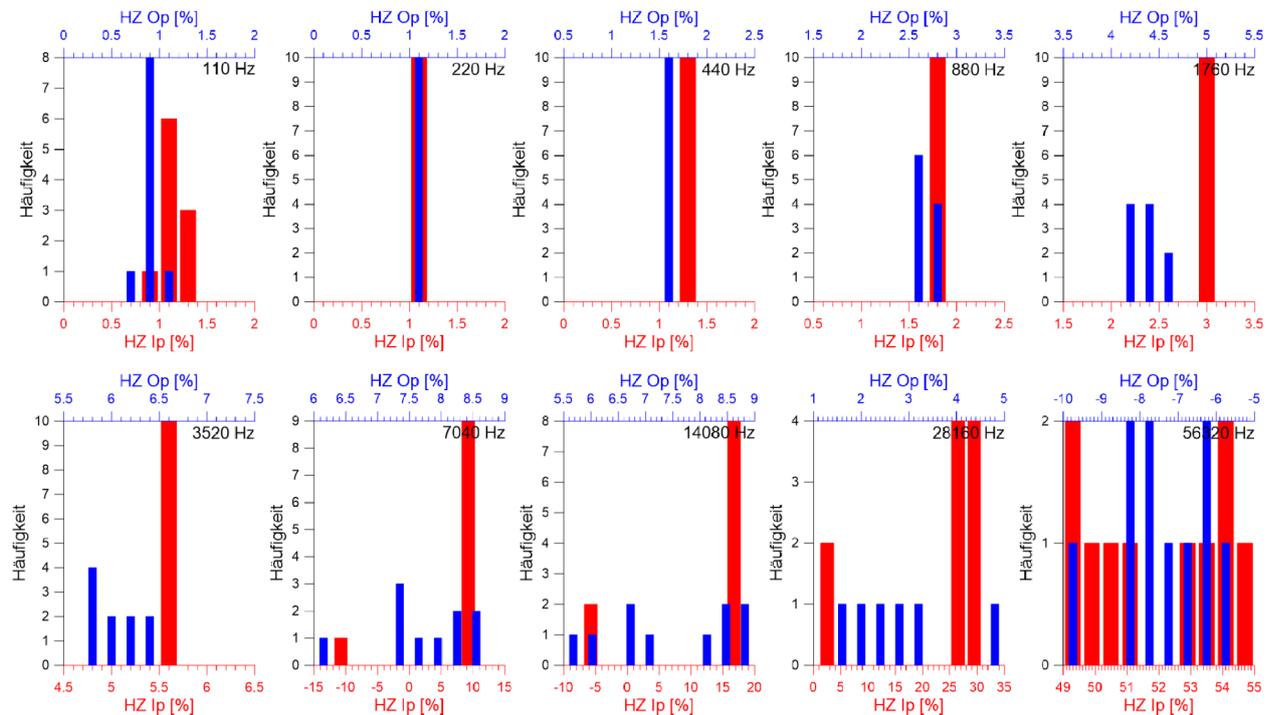


Abbildung 11: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 2. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

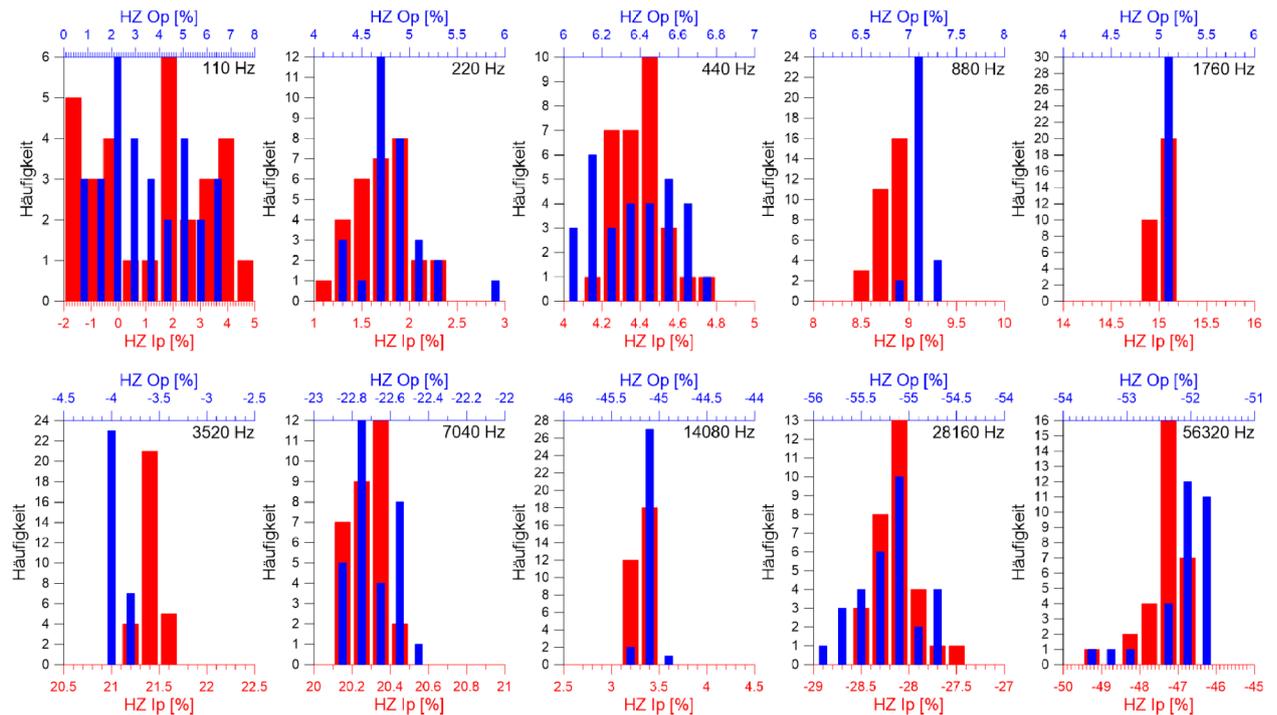


Abbildung 12: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 30 Messungen.

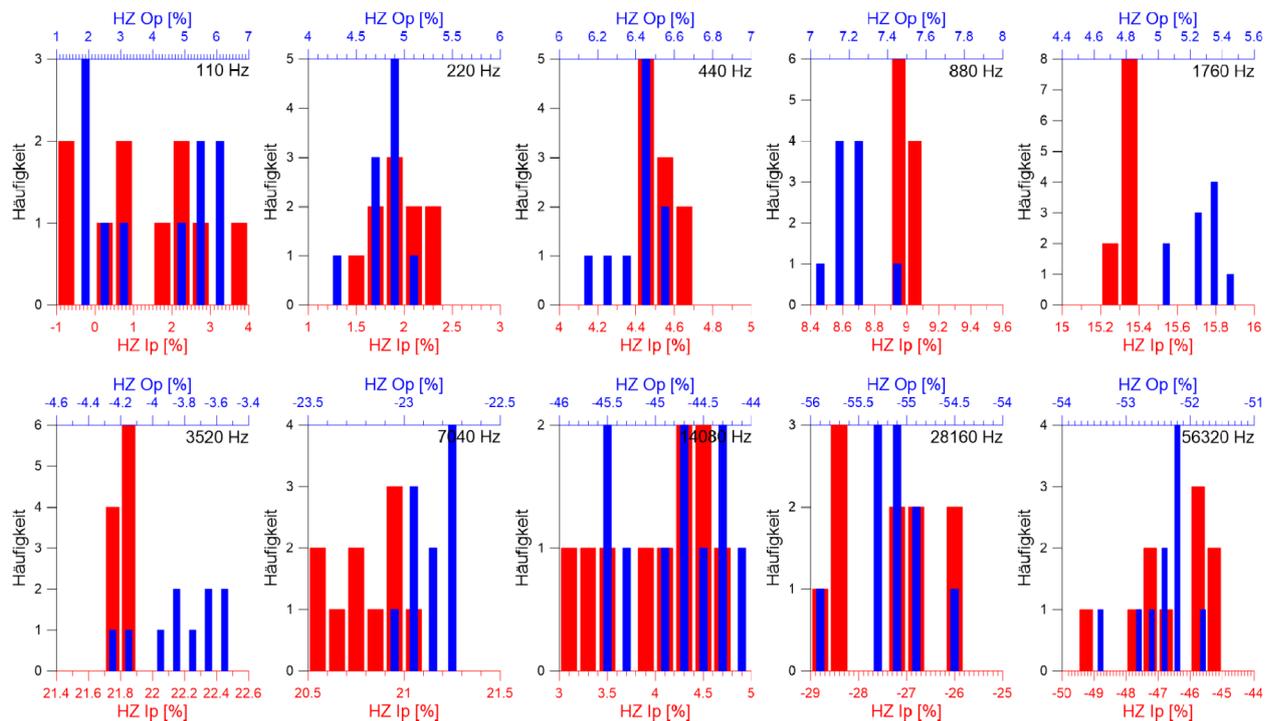


Abbildung 13: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 2. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

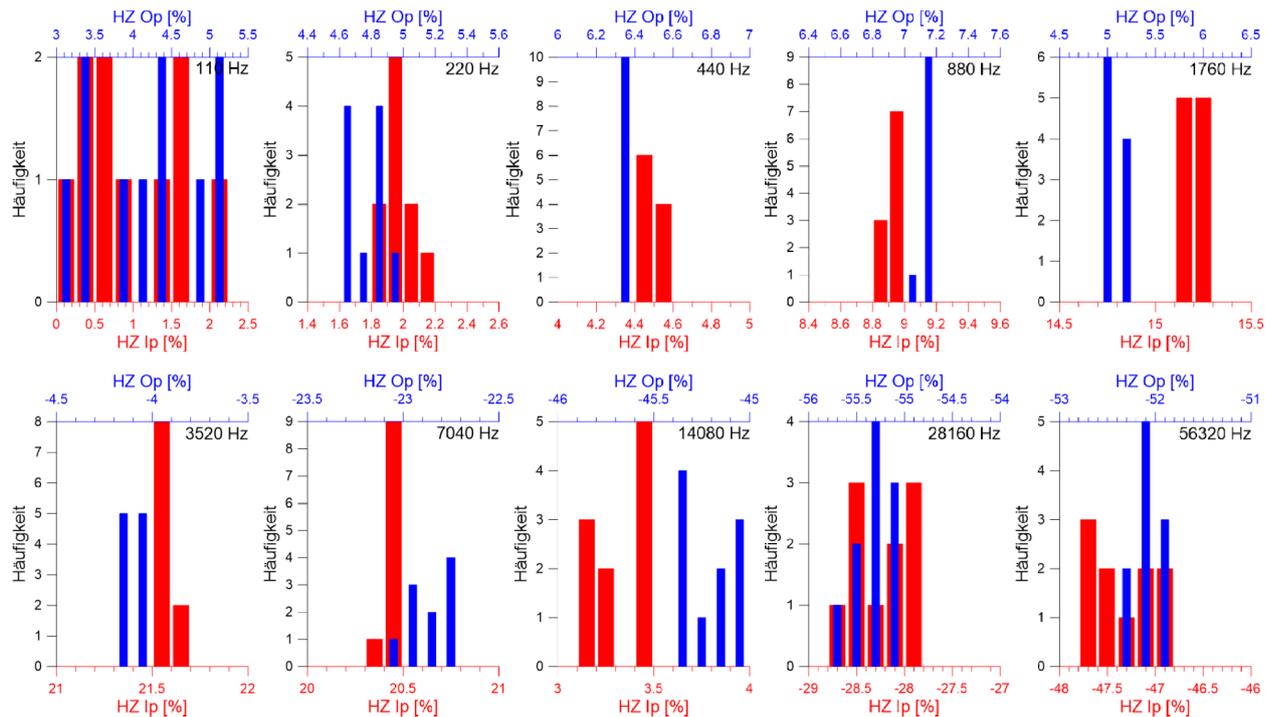


Abbildung 14: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

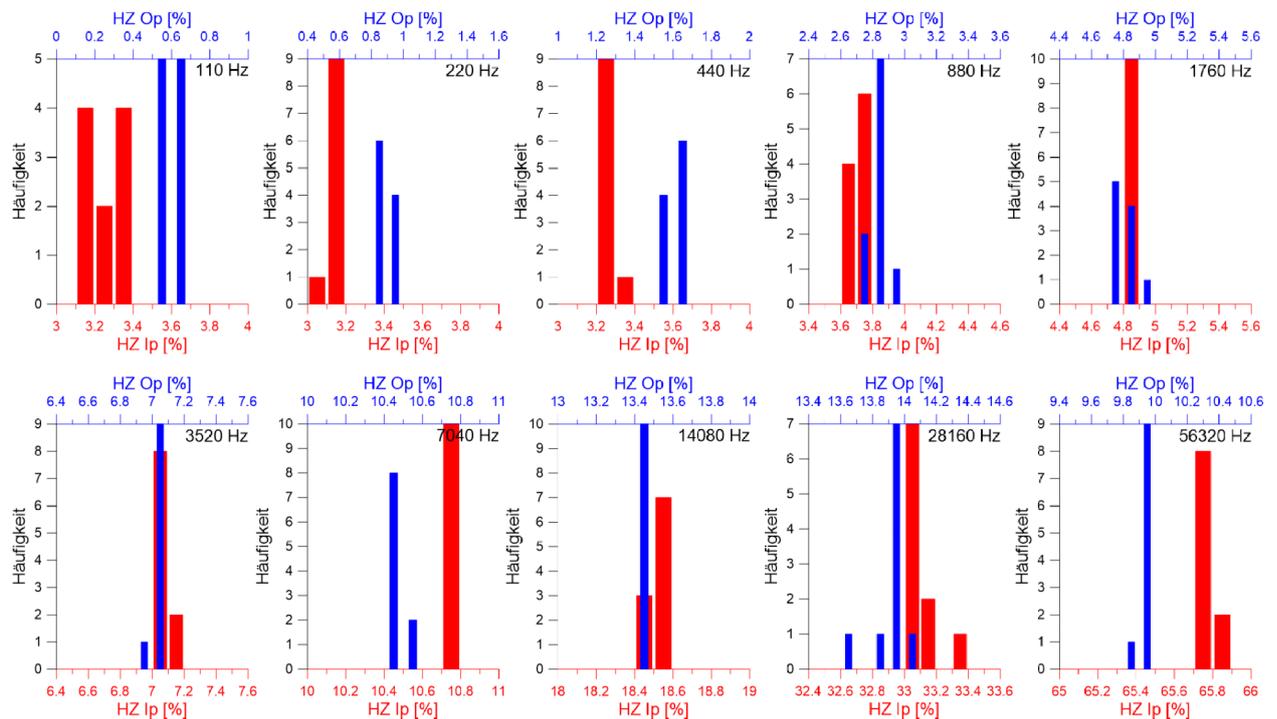


Abbildung 15: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

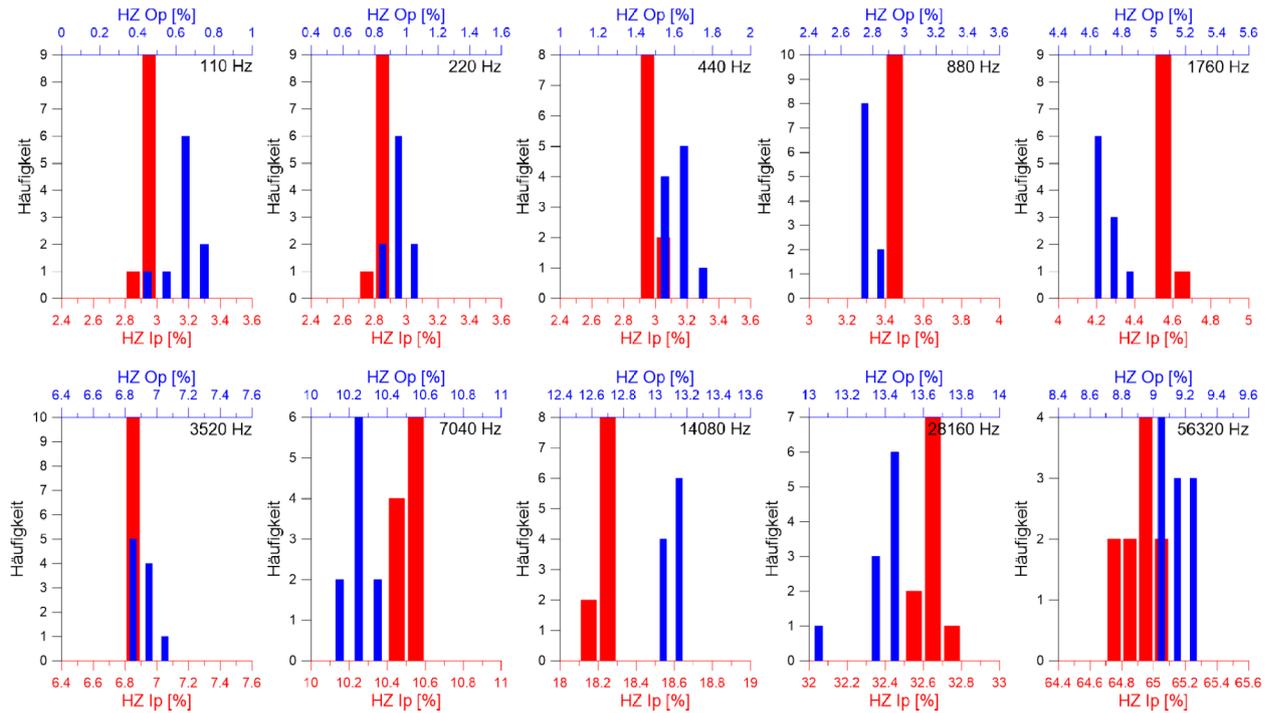


Abbildung 16: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

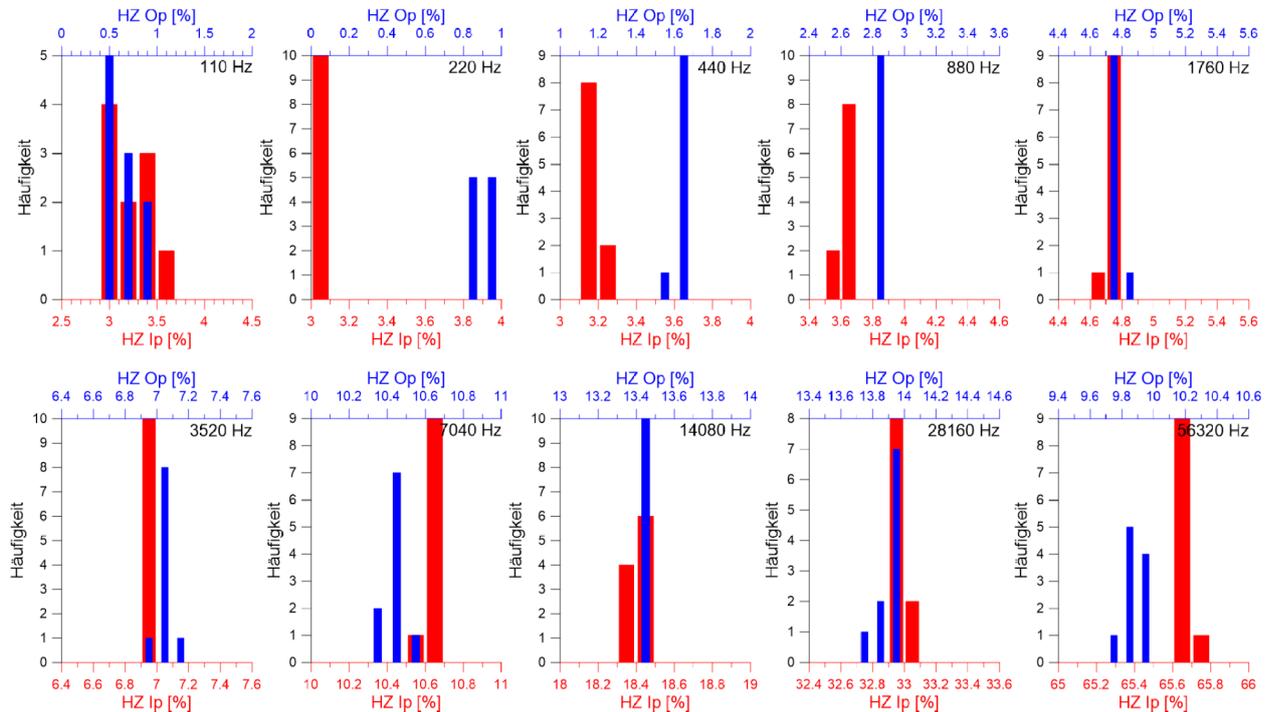


Abbildung 17: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

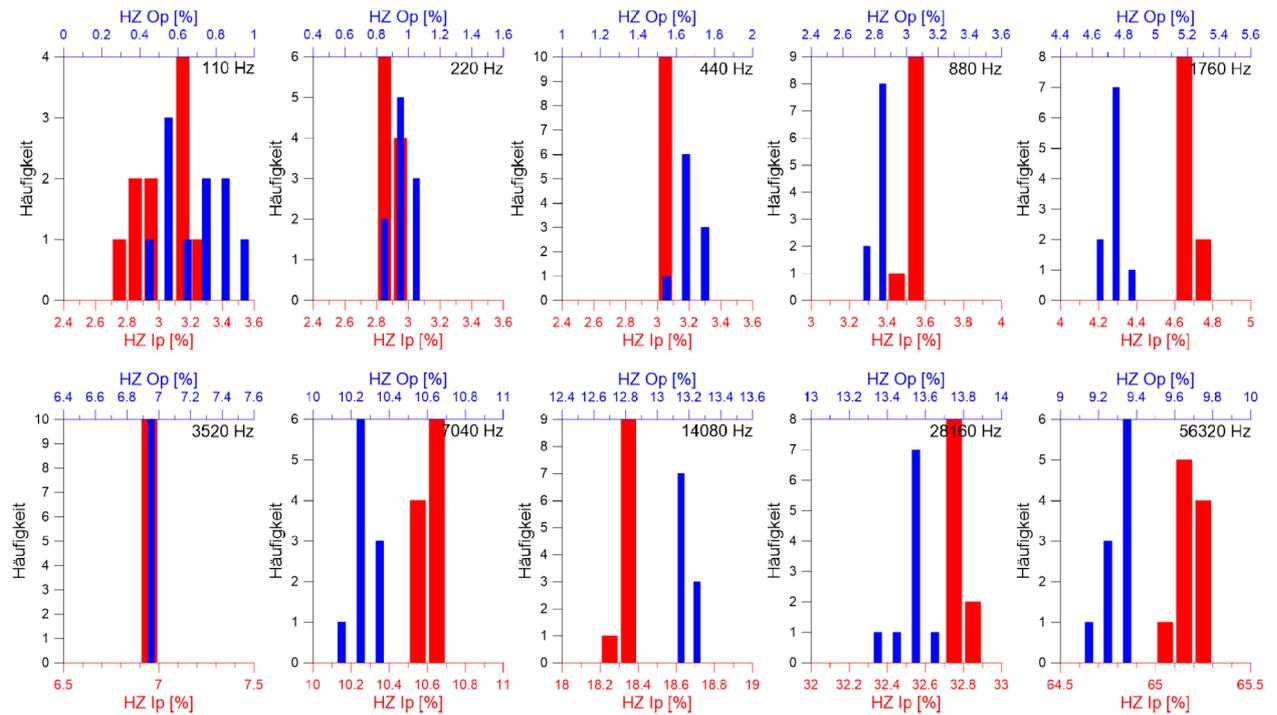


Abbildung 18: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 20 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

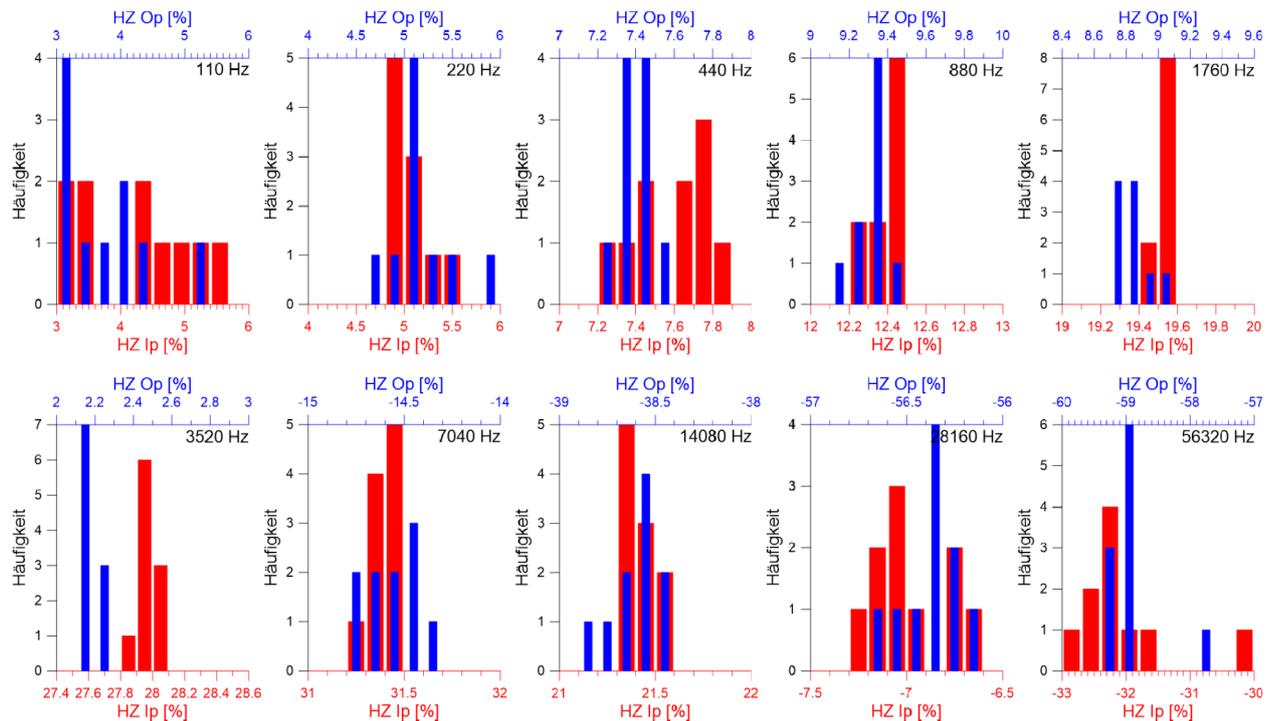


Abbildung 19: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

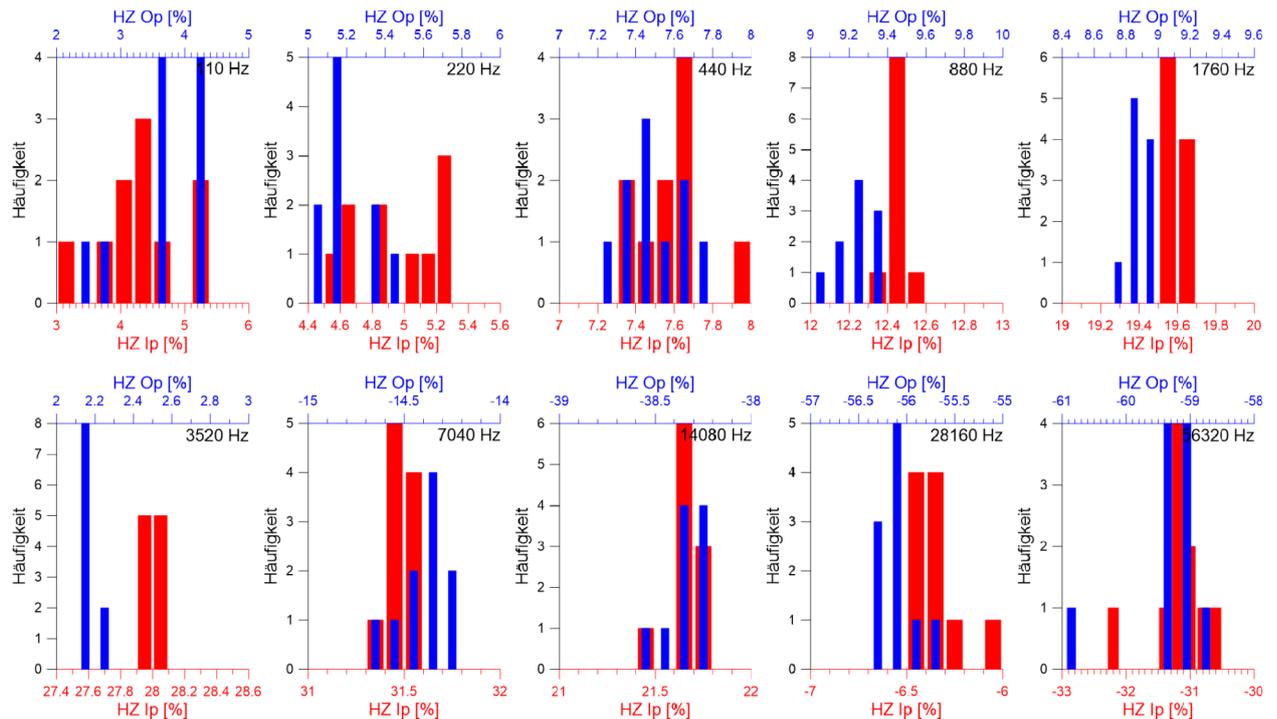


Abbildung 20: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

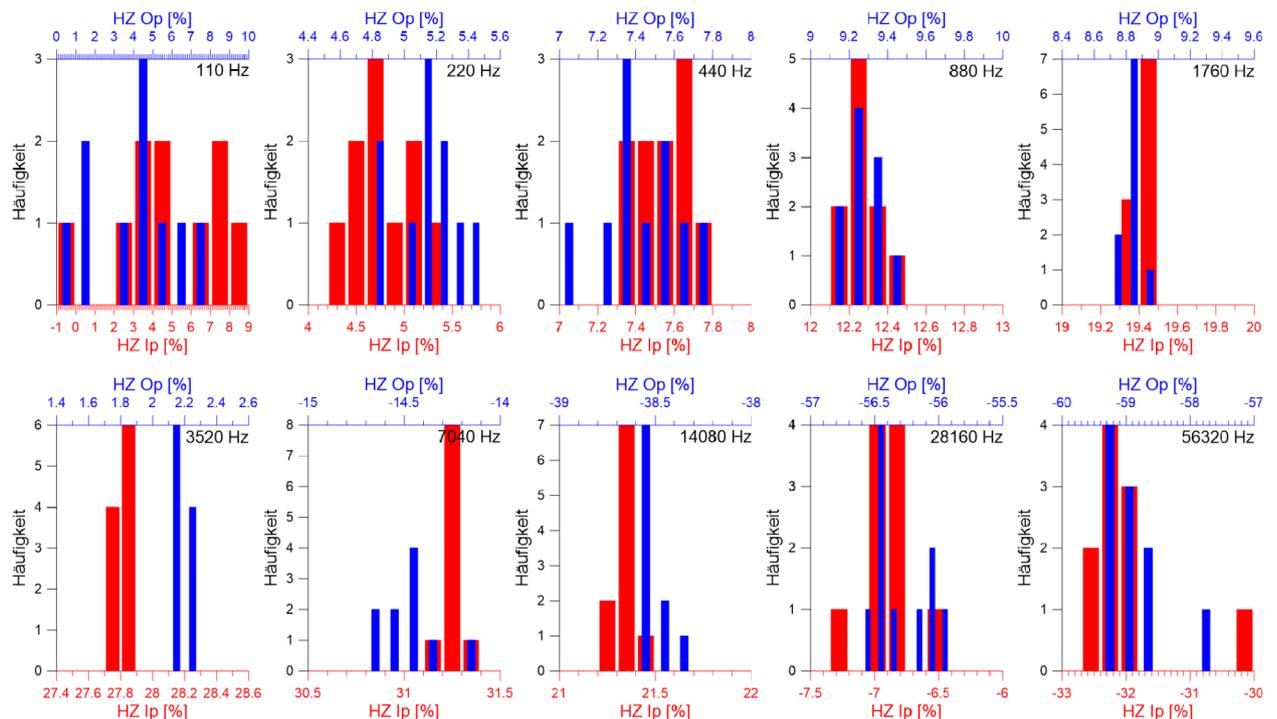


Abbildung 21: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

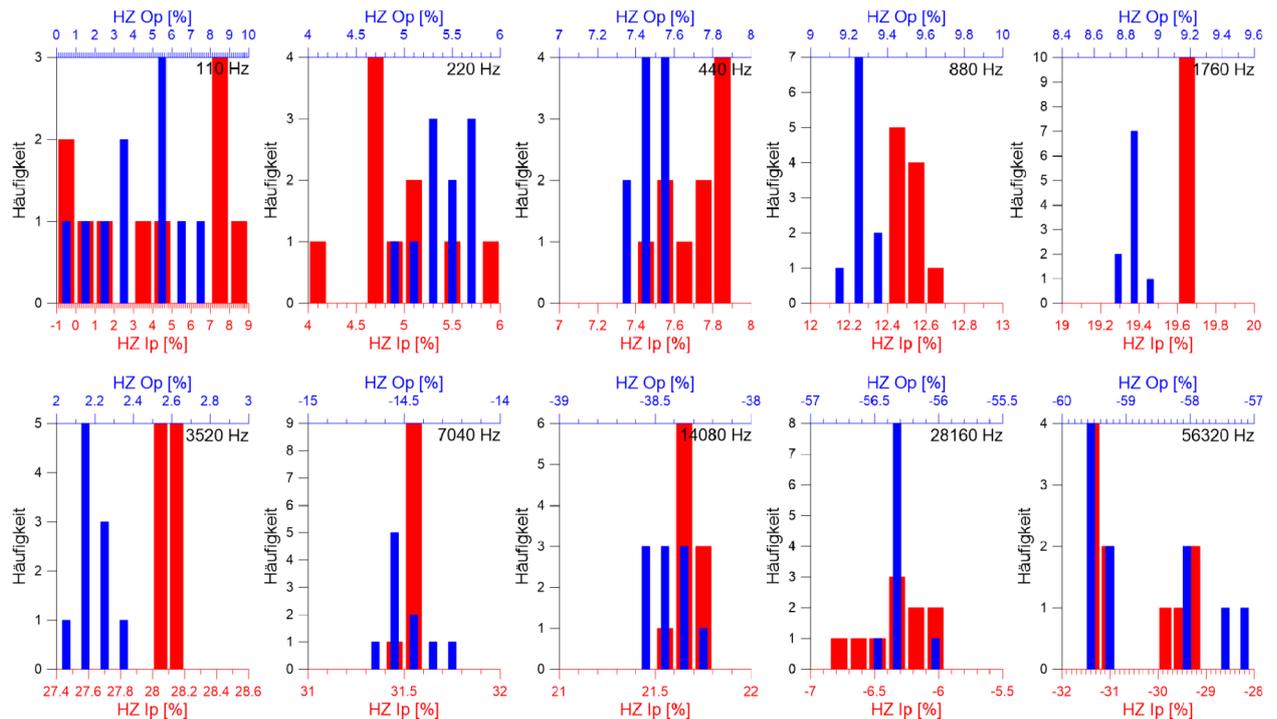


Abbildung 22: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 50 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

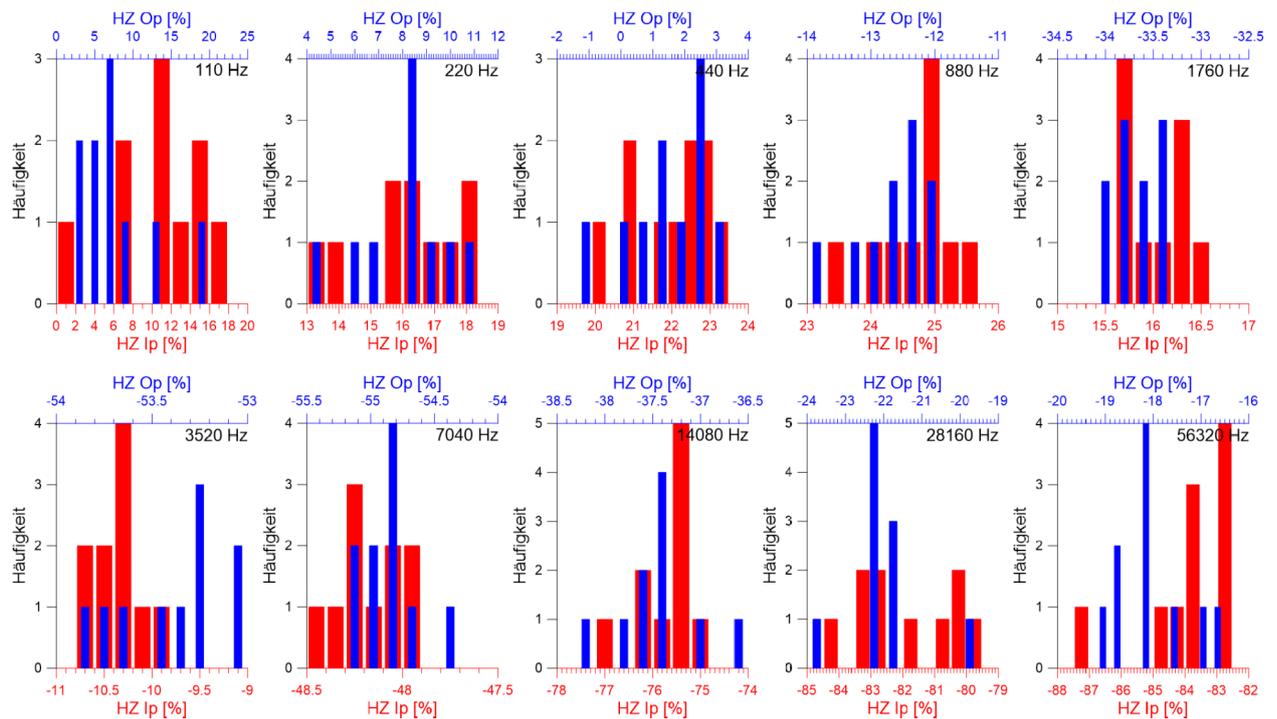


Abbildung 23: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

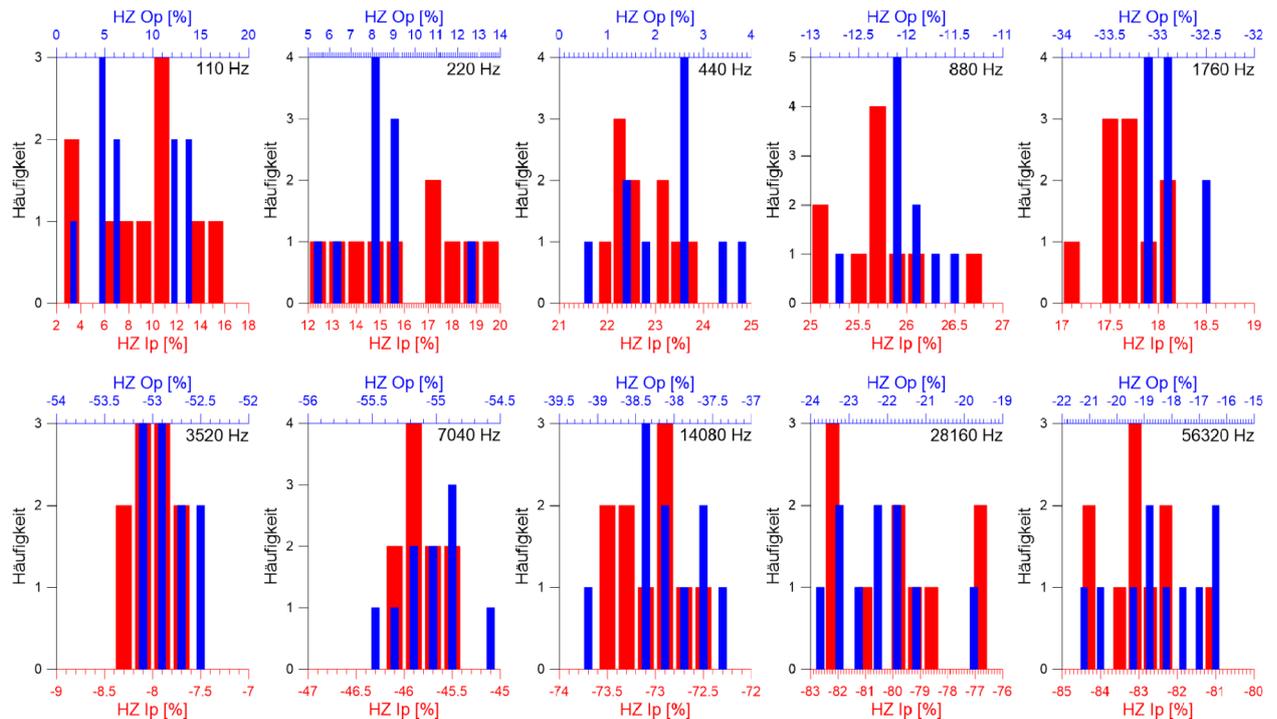


Abbildung 24: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

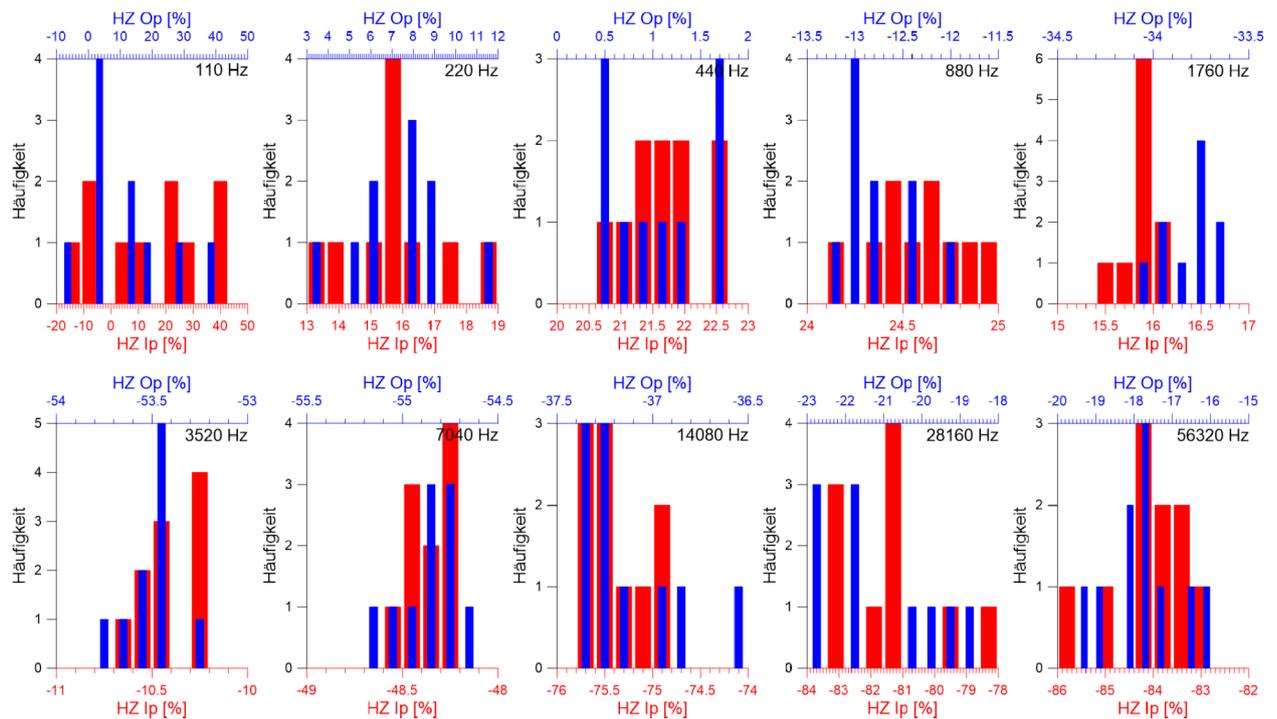


Abbildung 25: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

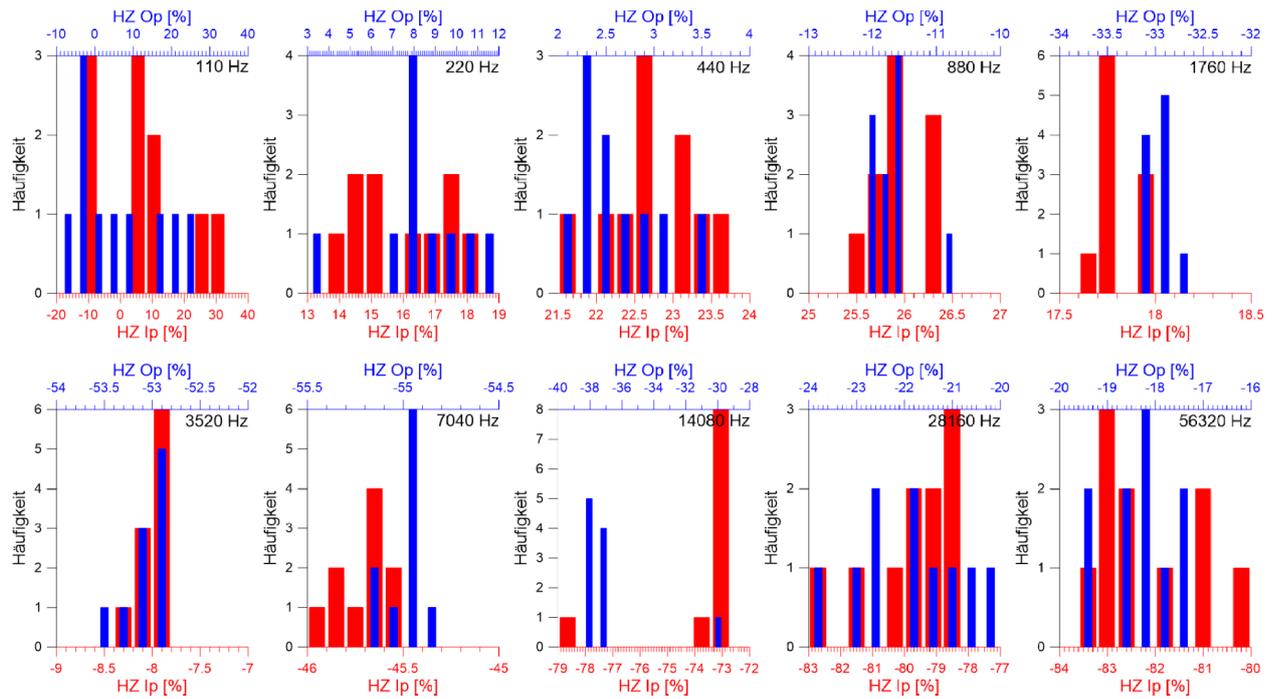


Abbildung 26: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 100 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

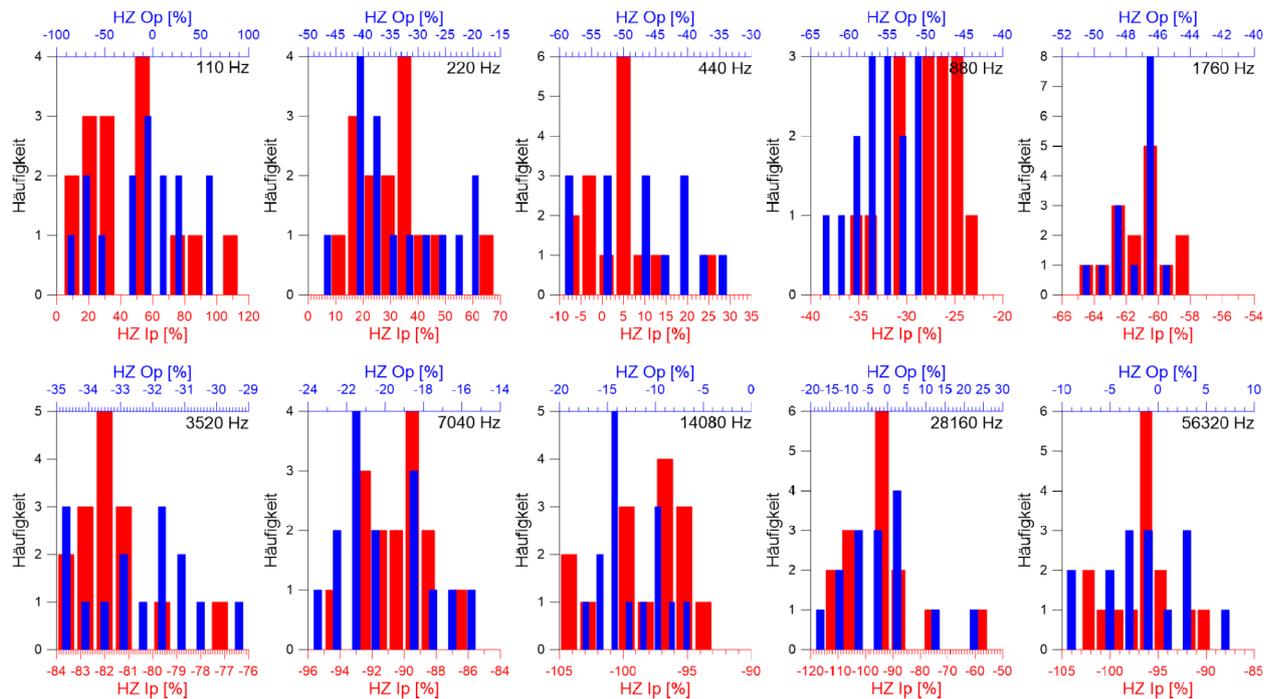


Abbildung 27: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 15 Messungen.

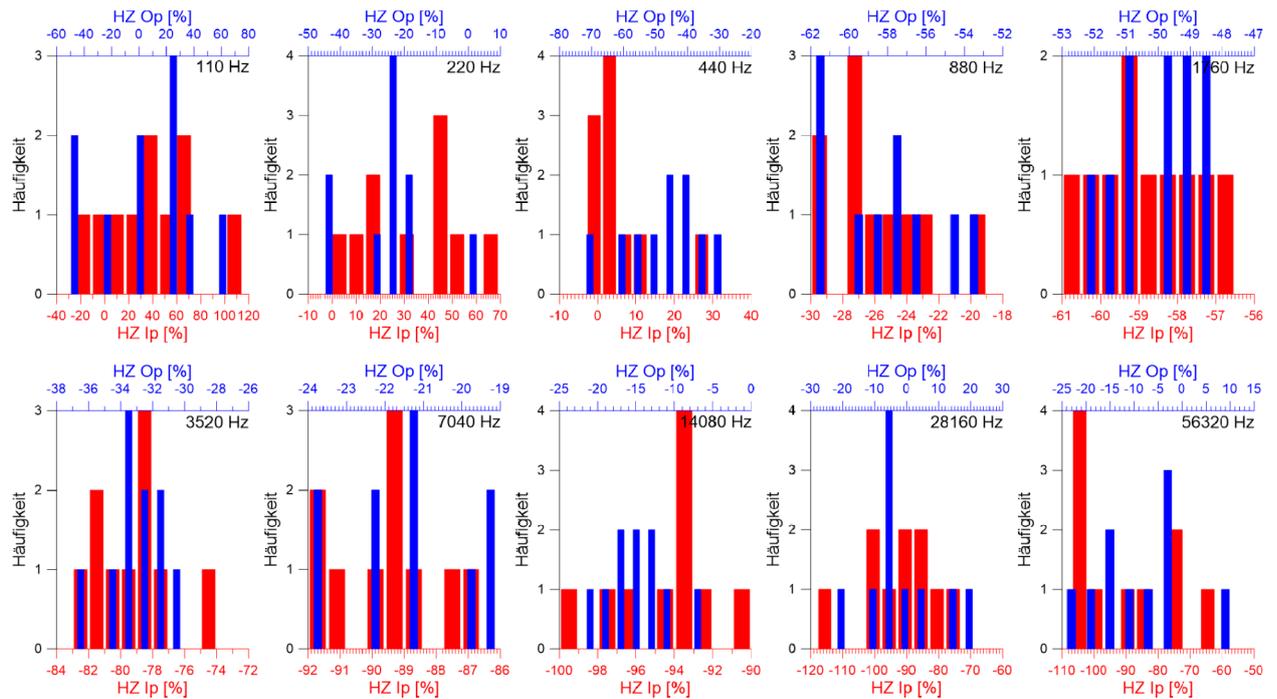


Abbildung 28: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

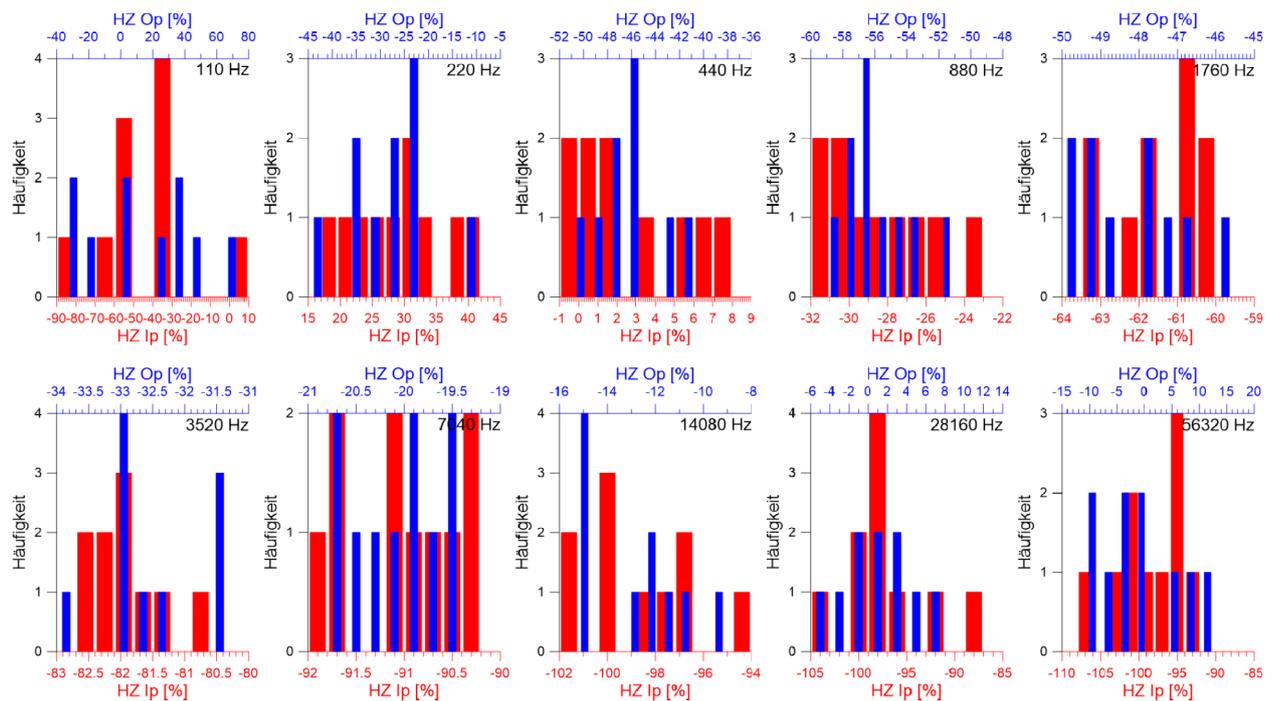


Abbildung 29: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 15 Messungen.

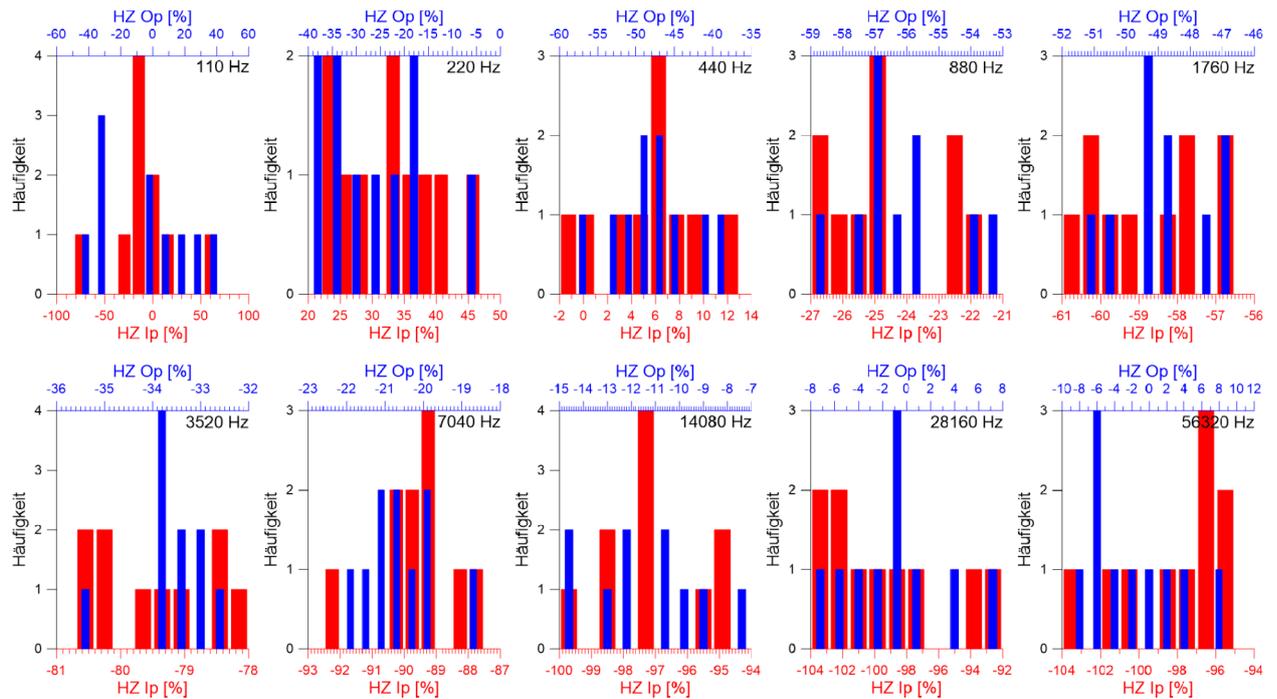


Abbildung 30: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

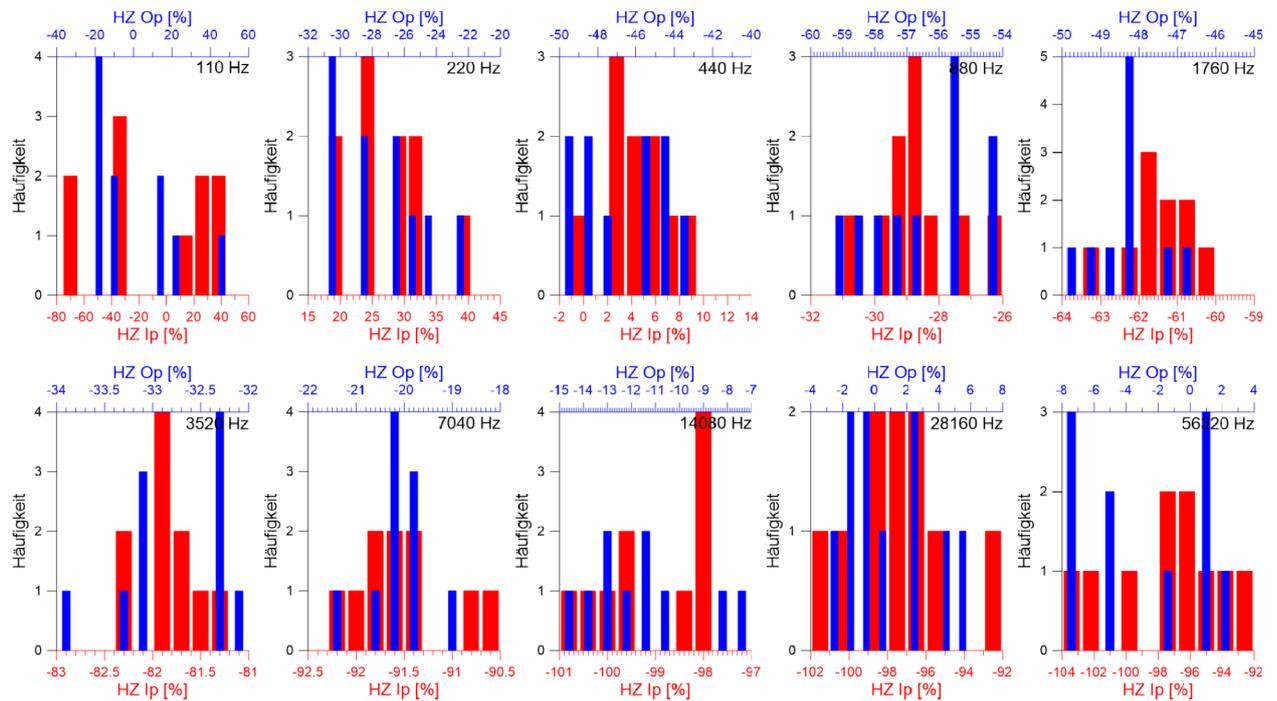


Abbildung 31: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 200 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

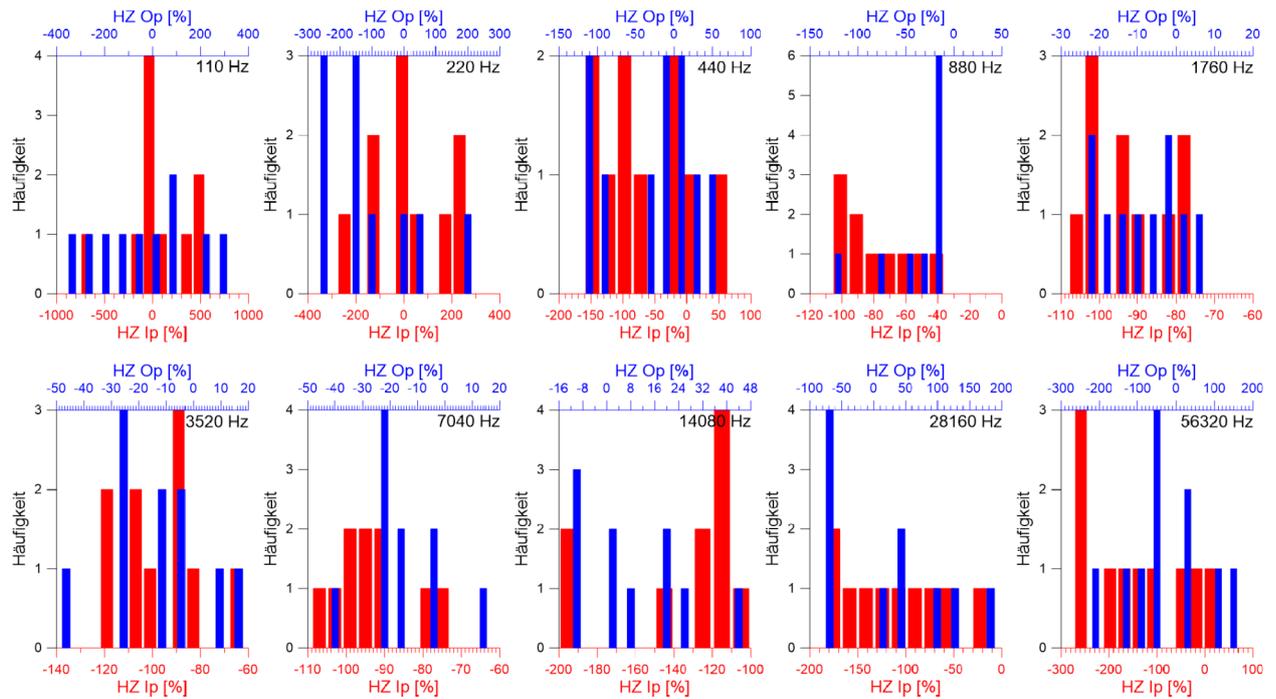


Abbildung 32: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

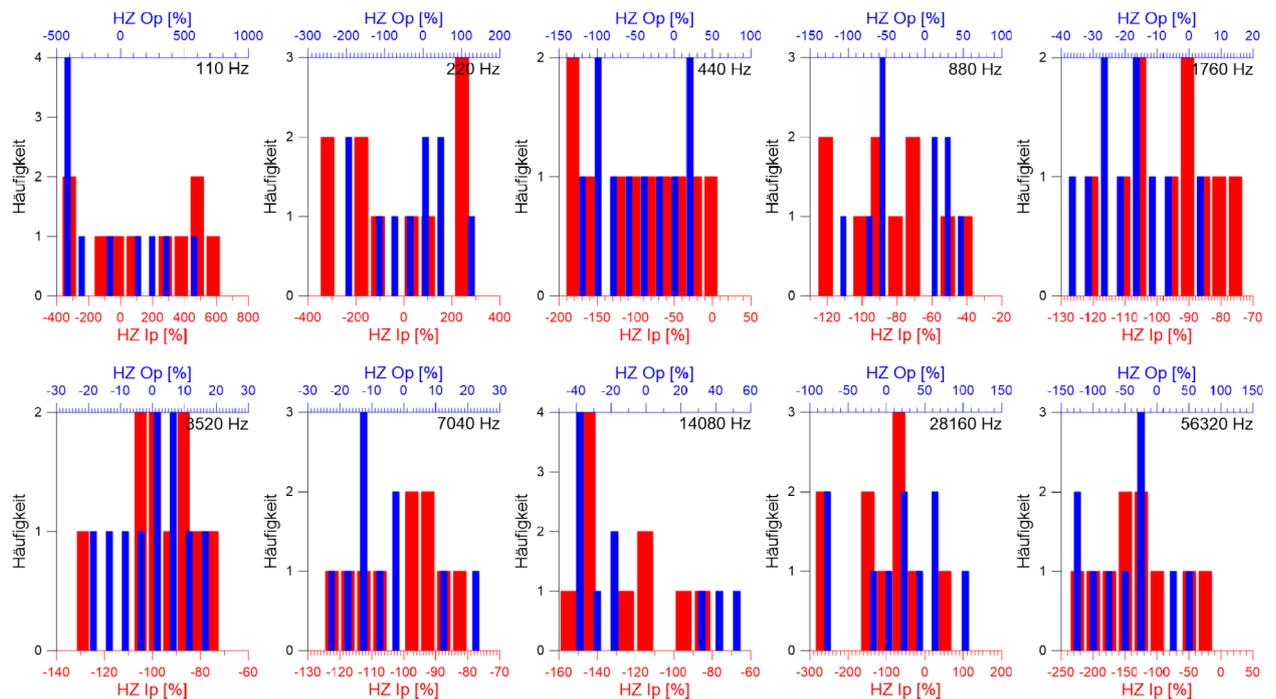


Abbildung 33: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 0. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

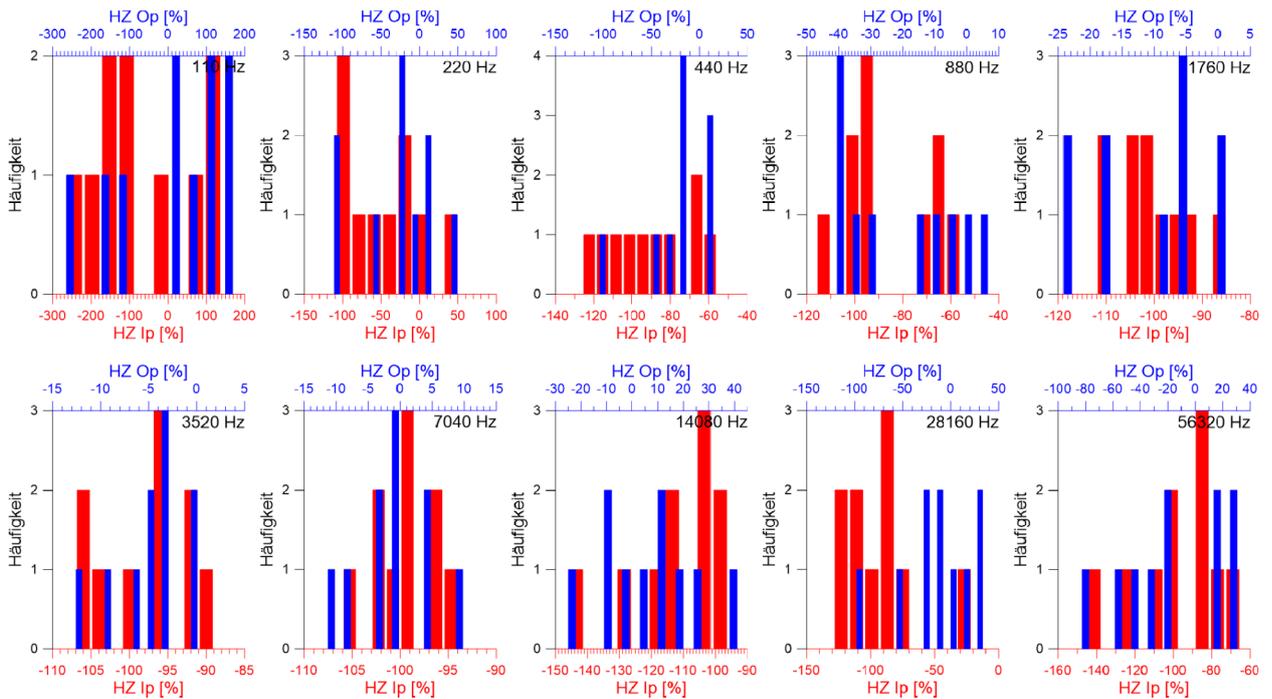


Abbildung 34: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.

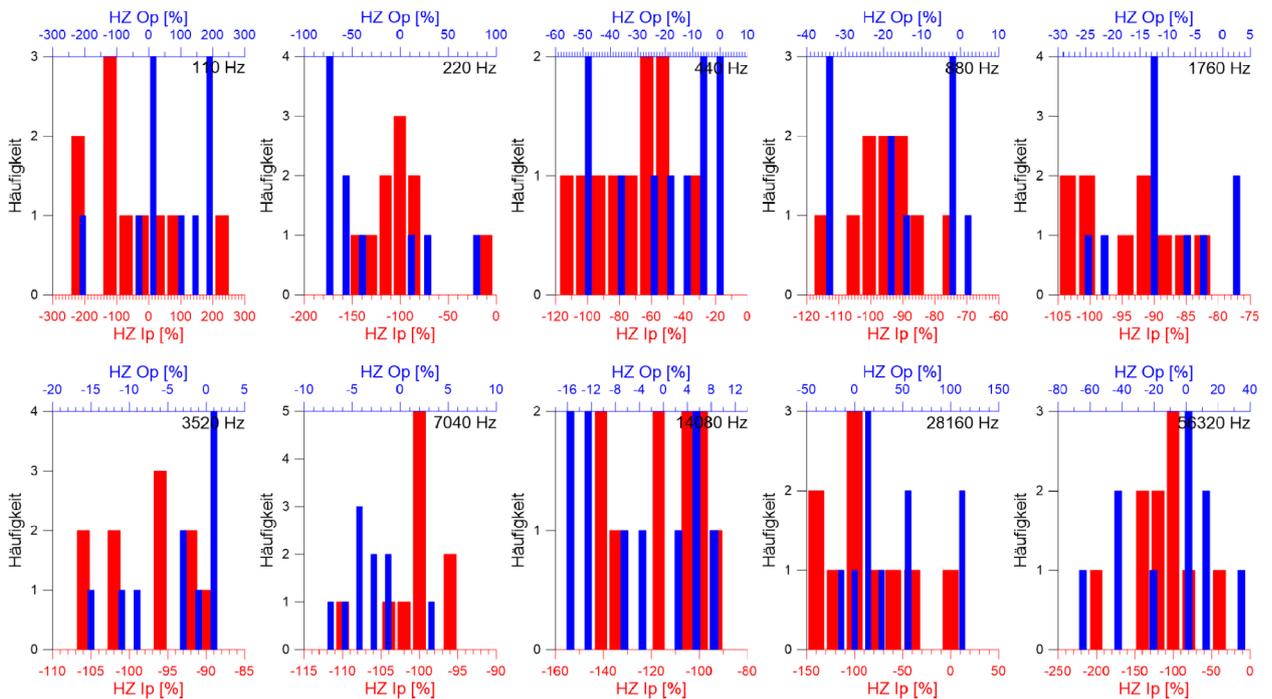


Abbildung 35: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 1. Höhe der Sendespule 89.5 cm. 10 Messungen.

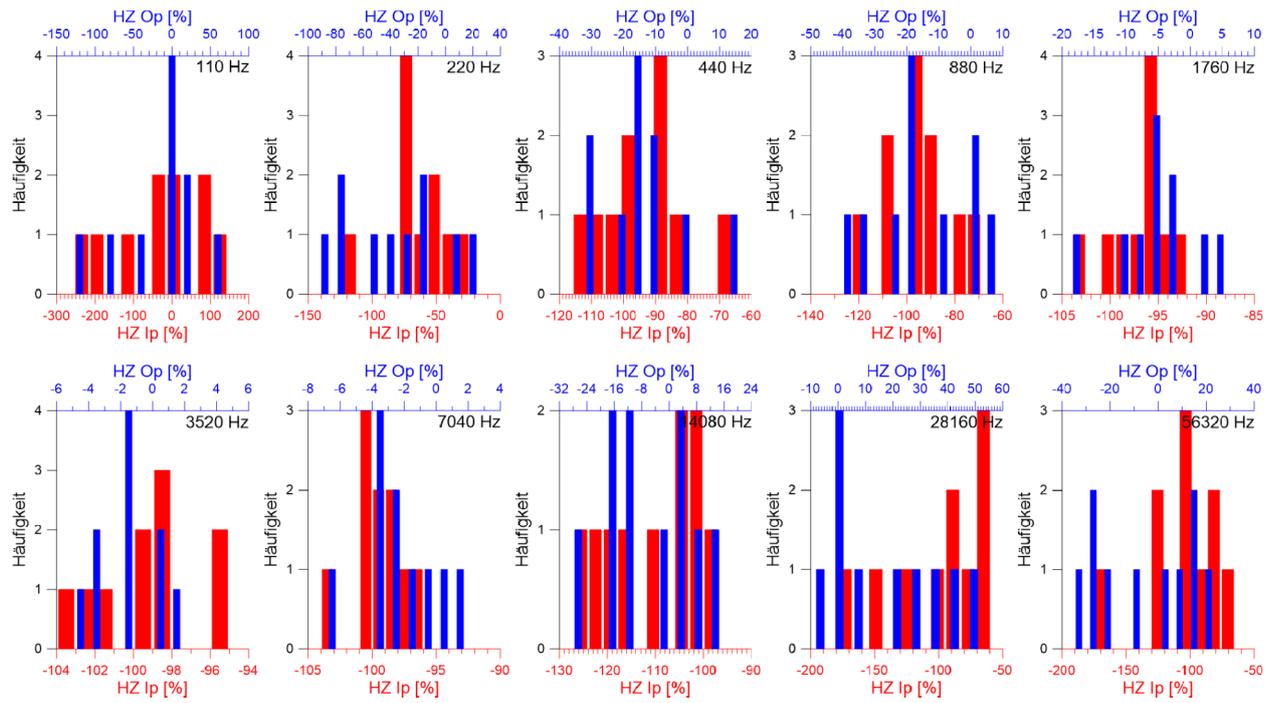


Abbildung 36: Histogramme der gemessenen Vertikalkomponenten des EM-Feldes (HZ Ip und HZ Op) bei 400 m Spulenabstand und stacking-level 4. Höhe der Sendespule 73.5 cm. 10 Messungen.