



Jürgen Gerhard Lammer-Stecher, BSc

Anwendung von geophysikalischen Messmethoden zur Überprüfung der Ringspaltverfüllung mittels Perlkies

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Erdwissenschaften - Ingenieurgeologie

eingrichtet an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/Betreuerin

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Univ.-Prof. B.A. M.Sc. Ph.D. Daniel Scott Kieffer

Institut für Angewandte Geowissenschaften

Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Michael Rudolf Henzinger, BSc

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, Februar 2017

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern Ing. Jörg Lammer-Stecher und Mag. Ingeborg Lammer-Stecher bedanken, deren durchgehende bedingungslose Unterstützung mir die Durchführung und Fertigstellung meines Studiums ermöglicht hat.

Ein Dank gebührt auch Petra Steinkellner, MSc., Bakk. rer. nat. die mir in allen Phasen des Studentenlebens hilfreich zur Seite gestanden ist, mich motiviert und aufgebaut hat, wenn dies nötig war.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meinem Betreuer Dipl.-Ing. Michael Henzinger, BSc., der mir die Möglichkeit gegeben hat institutsfremd dieses interessante Thema zu behandeln und die Bezeichnung „Betreuer“ im wahrsten Sinne des Wortes verdient.

Danke auch an O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Wulf Schubert und Univ.-Prof. B.A. M.Sc. Ph.D. Daniel Scott Kieffer, durch deren Unterstützung ein institutsübergreifendes Arbeiten möglich wurde.

Abstract

A completely filled annular gap is of great importance in TBM tunneling in order to prevent unstable stress conditions within the segmental lining. This thesis evaluates the use of geophysical methods, in particular the ground penetrating radar, to evaluate the quality of the backfilling of the annular gap. A literature study regarding methods for the detection of voids within the annular gap has been conducted. As a result the ultrasonic and impact-echo-method revealed to be too slow and partly inaccurate in comparison to the ground penetrating radar. Both the impact-echo and the ultrasonic need a fixed contact with the to-be-measured surface for every measuring step. The ground penetrating radar allows rapid contactless measurement.

In this thesis the results of numerical simulations are presented, which describe the influence of the reinforcement, the use of different working frequencies and different media occurring as cavity filling. A reinforcement spacing lower than 10 cm causes poor results. The investigation of different frequencies showed that 1600 MHz provide the most promising results. The construction of the models and the simulation execution are described in detail. The simulation results show that the decrease of the frequency and the interval of the reinforcement rebars reduced the presentability of different backfill materials, and the results suggest that the use of ground penetrating radar to monitor the annular gap is reasonable.

Future research should validate the simulation results by means of field studies and laboratory tests. A recommendation is also given on how tunnel-segments can be designed to be ground-penetrating-radar-friendly in the future. This can be achieved by creating dedicated measuring gaps within the reinforcement.

Kurzfassung

Ein vollständig verfüllter Ringspalt ist beim maschinellen Tunnelvortrieb von großer Bedeutung, um ungünstige Spannungszustände am Tübbingring zu verhindern. Diese Diplomarbeit evaluiert den Einsatz von geophysikalischen Methoden, insbesondere des Bodenradars, um den Verfüllungsgrad des Ringspaltes zu ermitteln. Es wurde ein Literaturstudium bezüglich verschiedener Untersuchungsmethoden zur Detektion von Hohlräumen im Ringspalt durchgeführt. In der Folge wurden Ultraschall-Verfahren und Impact-Echo-Verfahren, im Vergleich zum Bodenradar, als zu langsam und zum Teil ungenau eingestuft. Sowohl beim Impact-Echo-Verfahren als auch beim Ultraschall muss für jeden Messdurchgang ein fester Kontakt zwischen dem Messinstrument und der Messoberfläche hergestellt werden. Das Bodenradar ermöglicht eine rasche, kontaktlose Messung.

Es werden die Ergebnisse numerischer Simulationen präsentiert, welche den Einfluss der Bewehrung, die Verwendung verschiedener Arbeitsfrequenzen und unterschiedliche Medien als Hohlraumfüllung beschreiben. Der Modellaufbau und die Simulationsdurchführung werden im Detail erläutert.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich durch die Abnahme von Frequenz und Bewehrungsdichte die Darstellbarkeit von unterschiedlichen Hinterfüllungsmedien verschlechtert. Vor allem ein Bewehrungsabstand von unter 10 cm führt zu schlechten Messergebnissen. Eine Untersuchung hinsichtlich der gewählten Arbeitsfrequenz zeigt, dass 1600 MHz am geeignetsten ist. Die präsentierten Erkenntnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass der Einsatz von Bodenradar zur Ringspaltüberprüfung sinnvoll ist.

Die Simulationsergebnisse sollten in Zukunft durch Feldversuche und Laboruntersuchungen validiert werden. Ebenfalls kann bei stark bewehrten Tübbing an geeigneten Stellen auf den Einbau eines Bewehrungsstranges verzichtet werden, um eine mindestens 15 cm breite Messbahn zu schaffen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Hohlräumen im Ringspalt . .	3
2.1.1	Elektromagnetik	3
2.1.2	Seismik	12
2.1.3	Impact-Echo-Verfahren	13
3	Aufgabenstellung	16
4	Grundlagen elektromagnetischer Wellen	17
4.1	Bodenradar	17
4.1.1	Maxwell Gleichungen	18
4.1.2	Welleneigenschaften	18
4.1.3	Materialmodell	19
4.1.4	Materialeigenschaften	20
4.1.5	Reflexion, Transmission und Diffraktion bei der Wellenausbreitung . .	20
5	Numerische Simulation	23
5.1	Aufbau der Modelle	27
5.1.1	Betrachtung der Laufzeiten und Amplituden ohne Einfluss der Bewehrung	28
5.1.2	Parameterstudie: Variation der Bewehrungsabstände	28
5.1.3	Variation der Tübbingdicke	29
5.1.4	Evaluierung eines Messbereiches mit verminderter Bewehrung	29
5.2	Nachbearbeitung der Laufzeitdiagramme	30
5.2.1	Subtraktion der direkten Welle	32
5.2.2	Time-Gain-Methode	33
5.2.3	Anwendung der Nachbearbeitung	34

6	Ergebnisse	38
6.1	Betrachtung der Laufzeiten und Amplituden ohne Einfluss der Bewehrung . .	38
6.2	Parameterstudie: Variation der Bewehrungsabstände	40
6.3	Parameterstudie: Variation der Arbeitsfrequenz	46
6.4	Variation der Tübbingdicke	50
6.5	Evaluierung eines Messbereiches mit verminderter Bewehrung	54
6.6	Validierung der numerischen Simulationen	56
7	Zusammenfassung	61
	Anhang A	66
	Anhang B	81
	Anhang C	96
	Anhang D	113

Abbildungsverzeichnis

1.1	Doppelschildmaschine (Herrenknecht AG, 2016)	1
1.2	Schematische Darstellung des Ringspaltes (Henzinger et al., 2016)	2
2.1	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Bodenradars (Lalagüe, 2015).	4
2.2	Untersuchung des Raumes zwischen Tübbing und Gebirge (Crocco, 2010)..	5
2.3	Aufbau der Testsegmente (a) Segment 1 mit Bewehrungsabstand 14x14 cm bei deckenden Bewehrungseisen (b) Segment 2 mit Bewehrungsabstand 14x14 cm bei versetzten Bewehrungseisen (c) Segment 3 ohne Bewehrung (Lalagüe et al., 2016).	6
2.4	Gegenüberstellung Radargramm und Foto des Messaufbaues. Objekte, die Reflexionen verursachen, sind als Hyperbel dargestellt (Lalagüe et al., 2016). . .	7
2.5	Radargramm des Testaufbaues mit 1500 MHz. Objekte, die Reflexionen verursachen, sind als Hyperbel dargestellt (Lalagüe et al., 2016).	8
2.6	Radargramm des Testaufbaues mit 2600 MHz. Objekte, die Reflexionen verursachen, sind als Hyperbel dargestellt (Lalagüe et al., 2016).	8
2.7	Vergleich einer numerischen Simulation und eines Feldtests bei 1000 MHz (a) numerische Simulation mit Stahlplatte auf linker Hälfte hinter Tübbing (b) Messung an echtem Tübbing mit Stahlplatte hinter rechter Hälfte des Betonsegmentes (c) Prinzipskizze zum numerischen Modellaufbau (d) Foto des Messaufbaues am Tübbing (Zhang et al., 2010).	10
2.8	Feldmessung mit 500 MHz an (a) freistehendem Tübbing mit Luft dahinter (b) eingebautem Tübbing mit 20 Tage ausgehärtetem Mörtel als Hinterfüllungsmedium (Zhang et al., 2010)	11
2.9	Bewehrung der Tübbinge (Xie et al., 2007).	12
2.10	Radargramm mit 200 MHz, bei 35 cm Tübbingdicke und durchschnittlich 30 cm Mörtelmächtigkeit (Xie et al., 2007).	12

2.11	Messanordnung bei Impact-Echo-Verfahren (Aggelis et al., 2008)	14
2.12	Reflexionen bei Impact-Echo-Verfahren bei (a) vollständiger (b) unvollständiger Verfüllung (Aggelis et al., 2008)	15
2.13	Laufzeitdiagramm unterschiedlicher Verfüllungszustände (a) bei einem Schwellenwert des Maximums von 10% (b) Vergrößerung ab einer Laufzeit von 500 μ s bei einem Schwellenwert von 0.1% (Aggelis et al., 2008).	15
4.1	Änderung eines Wavelets durch Reflexion an einer Schichtgrenze mit Leitfähigkeitsänderung von Luft („free_space“) zu Metall („pec“) bei 1600 MHz. Details in Abbildung 5.2.	22
5.1	Schematische Darstellung des Messbereiches	23
5.2	Beispiel für ricker wavelet (gprMax, 2016)	24
5.3	Wellenpfad in einem Modell ohne Bewehrung	24
5.4	Codebeispiel für gprMax	26
5.5	Anordnung Sender und Empfänger während des Messdurchganges	27
5.6	Messrichtung der Modelle. Es kann entlang des Kreisbogens des Tübbingringes (blauer Pfeil) oder in Vortriebsrichtung (roter Pfeil) gemessen werden. Geändert nach GPR (2012).	30
5.7	Direkte Welle von Sender zu Empfänger bei (a) 1600 MHz, (b) 1000 MHz, (c) 900 MHz und (d) 400 MHz.	33
5.8	Time-Gain-Berechnung entnommen aus Jol (2009) S. 35 zeigt (a) ein Radargramm ohne Bearbeitung, (b) die Kompensationskurve, (c) das Radargramm nach Multiplikation mit der Kompensationskurve	34
5.9	Single-tray-Analyse. (a) Rohdaten, (b) Subtraktions-Methode, (c) Subtraktion und Time-gain kombiniert und (d) direkte Welle. Für 1600 MHz ohne Bewehrung und Wasser als Hohlraumfüllung.	35
5.10	Auswirkungen der Nachbearbeitung. (a) Rohdaten, (b) Subtraktions-Methode, (c) Time-gain-Methode und (d) Subtraktion und Time-gain kombiniert. Für 1600 MHz ohne Bewehrung und Wasser als Hohlraumfüllung.	36
5.11	Auswirkungen der Nachbearbeitung (a) Rohdaten, (b) Subtraktions-Methode, (c) Time-gain-Methode und (d) Subtraktion und Time-gain kombiniert. Für 1600 MHz, 14 cm Bewehrungsabstand und Wasser als Hohlraumfüllung.	37
6.1	Modelle ohne Bewehrung bei 1600 MHz und Wasser als Hohlraumfüllung.	39

6.2	Modelle ohne Bewehrung bei 1600 MHz und Luft als Hohlraumfüllung.	39
6.3	Modelle mit Bewehrung bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.	41
6.4	Single-Tray-Analyse mit Bewehrung bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.	42
6.5	Modelle mit Bewehrung bei 1600MHz, Luft als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.	43
6.6	Single-Tray-Analyse mit Bewehrung bei 1600 MHz, Luft als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.	44
6.7	Absolutwerte der Amplituden am Ende des Tübbings bei 1600 MHz und abnehmendem Bewehrungsabstand	45
6.8	Vergleich der Amplituden am Ende des Tübbings bei 1600 MHz und abnehmendem Bewehrungsabstand	46
6.9	Modelle ohne Bewehrung, Wasser als Hohlraumfüllung bei (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz	47
6.10	Modelle ohne Bewehrung, Wasser als Hohlraumfüllung bei (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz	48
6.11	Modelle mit Bewehrungsabstand 14 cm, Wasser als Hohlraumfüllung bei (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz	49
6.12	Modelle mit Bewehrungsabstand 14 cm, Wasser als Hohlraumfüllung bei (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz	50
6.13	Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.	51
6.14	Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung, Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.	51
6.15	Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit, Bewehrung bei 1600 MHz, Luft als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.	52
6.16	Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei 1600 MHz, Luft als Hohlraumfüllung, Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.	52
6.17	Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei abnehmenden Frequenzen, Wasser als Hohlraumfüllung, Bewehrungsabstand bei 14 cm (a) 1000 MHz (b) 900 MHz und (c) 400 MHz.	53

6.18 Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei abnehmenden Frequenzen, Wasser als Hohlraumfüllung, Bewehrungsabstand bei 14 cm (a) 1000 MHz (b) 900 MHz und (c) 400 MHz.	54
6.19 Skizze Modellaufbau mit verminderter Bewehrung	55
6.20 Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 25 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 1600 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft	55
6.21 Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 1600 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft	55
6.22 Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 1000 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft	56
6.23 Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 900 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft	56
6.24 Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 400 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft	56
6.25 Schematische Darstellung eines Messaufbaues in Zhang et al. (2010).	57
6.26 Vergleich eines numerischen Modells und einer Feldmessung mit Tübbingmächtigkeit 35 cm, (a) Numerische Simulation mit 1000 MHz, Metallplatte an linker Hälfte. (b) Feldmessung mit 1000 MHz, Metallplatte an rechter Hälfte von Zhang et al. (2010). (c) Numerische Simulation, Metallplatte an linker Hälfte von Zhang et al. (2010). (d) Modellskizze zu numerischer Simulation	58
6.27 Vergleich eines numerischen Modells und einer Feldmessung mit Tübbingmächtigkeit 35 cm, (a) Numerische Simulation mit 1000 MHz, Metallplatte an linker Hälfte und künstliches Hinterfüllungsmaterial ($\varepsilon = 40$). (b) Numerische Simulation, Metallplatte an linker Hälfte und Künstliches Hinterfüllungsmaterial ($\varepsilon = 40$) von Zhang et al. (2010). (c) Skizze zum Modellaufbau	59
6.28 Vergleich eines numerischen Modells und einer Feldmessung mit Tübbingmächtigkeit 35 cm, (a) 1600 MHz, Mörtelmächtigkeit 20 cm (b) 500 MHz, Mörtelmächtigkeit 18.8 cm-22.5 cm, Fig.21 in Zhang et al. (2010).	60
7.1 Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . .	67
7.2 Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . .	68
7.3 Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . .	69
7.4 Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 8 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	70
7.5 Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 6 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	71

7.6	Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	72
7.7	Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	73
7.8	Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	74
7.9	Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	75
7.10	Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	76
7.11	Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	77
7.12	Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	78
7.13	Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	79
7.14	Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser . . .	80
7.1	Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft	82
7.2	Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft	83
7.3	Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft	84
7.4	Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 8 cm, Hohlraumfüllung: Luft	85
7.5	Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 6 cm, Hohlraumfüllung: Luft	86
7.6	Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft	87
7.7	Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft	88
7.8	Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft	89
7.9	Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft	90
7.10	Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft	91
7.11	Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft	92
7.12	Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft	93
7.13	Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft	94
7.14	Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft	95
7.1	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser	97
7.2	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser	98
7.3	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser	99
7.4	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser	100
7.5	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft	101

7.6	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft	102
7.7	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft	103
7.8	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft	104
7.9	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser	105
7.10	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser	106
7.11	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 900 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser	107
7.12	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 400 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser	108
7.13	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft	109
7.14	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft	110
7.15	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 900 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft	111
7.16	Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 400 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft	112
7.1	Frequenz: 1600 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft	113
7.2	Frequenz: 1600 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft	114
7.3	Frequenz: 1000 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft	115
7.4	Frequenz: 1000 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft	116
7.5	Frequenz: 900 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft	117

7.6	Frequenz: 900 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b)	
	Luft	118
7.7	Frequenz: 400 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b)	
	Luft	119
7.8	Frequenz: 400 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b)	
	Luft	120

Tabellenverzeichnis

2.1	Seismische Geschwindigkeiten nach Knödel et al. (2005, S. 462 f.) und Bergmeister et al. (2014, S. 258).	13
4.1	Permittivität ausgesuchter Materialien nach Meredith (1998, S. 28 ff.), Hippel (1995) und Salam & Rahman (2016, S. 208).	22
5.1	Frequenzabhängige Details der Modelle	28
5.2	Verwendete Materialeigenschaften	28
5.3	Geschwindigkeits und Laufzeitberechnungen der verwendeten Medien.	31

Symbole

\bar{E}	.....	elektrische Feldstärke [V/m]
q	.....	Ladungsdichte [C/m ³]
\bar{B}	.....	Magnetflussdichte [T]
\bar{J}	.....	elektrische Stromdichte [A/m ²]
\bar{D}	.....	elektrische Flussdichte [C/m ²]
t	.....	Zeit [s]
\bar{H}	.....	magnetische Feldstärke [A/m]
$\tilde{\sigma}$	.....	elektrische Leitfähigkeit [S/m]
$\tilde{\epsilon}$	.....	Permittivität ^[1] [As/(Vm)]
$\tilde{\mu}$	.....	magnetische Permeabilität [Vs/(Am)]
ϵ_r	.....	relative Permittivität ^[2] [dimensionslos]
ϵ_0	.....	Permittivität des Vakuums = $8,854 \cdot 10^{-12}$ [As/(Vm)]
f	.....	Frequenz [Hz]
ω	.....	Kreisfrequenz [rad/s]
γ	.....	Ausbreitungskonstante m ⁻¹
$\tan\delta$	.....	Tangens des Verlustwinkels [dimensionslos]
Z^*	.....	Wellenwiderstand (komplexe elektrische Impedanz) [Ω]
ϕ	.....	Einfallswinkel
ψ	.....	Brechungswinkel
v	.....	Ausbreitungsgeschwindigkeit em Wellen [m/ns]
β	.....	Phasenkonstante als Imaginärteil einer em Welle
c_0	.....	Lichtgeschwindigkeit [$2,998 \cdot 10^8$ m/s]

^[1] veraltet auch „Dielektrizitätskonstante“ oder „dielektrische Leitfähigkeit“

^[2] in (Jol, 2009) als K bezeichnet

1 Einleitung

Im maschinellen Tunnelvortrieb kommen unter Anderem, sowohl Doppelschildmaschinen, als auch Maschinen mit einem Schild zum Einsatz. Geschützt durch den Schild wird ein Tübbingring errichtet. Tübbinge sind vorgefertigte Elemente, welche zumeist aus Stahlbeton bestehen. Fertig aneinandergesetzt ergeben standardmäßig fünf bis zehn Segmente einen fertigen Tübbingring. Nach dem Verlassen des Schildschwanzes dient der Tübbingring als Außenschale und primäre Ausbruchssicherung (Poso & Windshügel, 2014, S. 236 f.; 250 f.). Der Aufbau einer Doppelschildmaschine wird in Abbildung 1.1 skizziert.

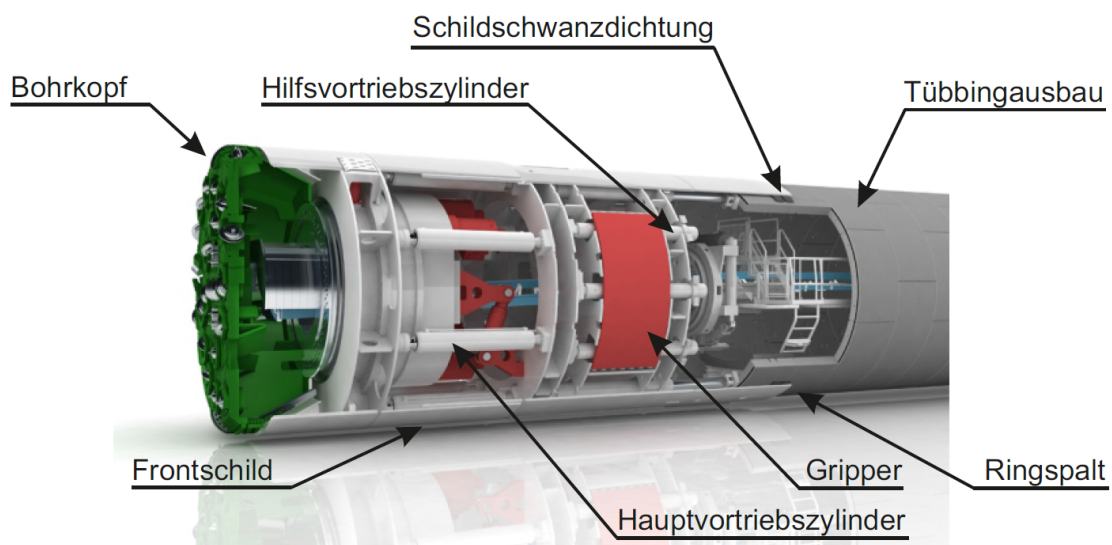


Abbildung 1.1: Doppelschildmaschine (Herrenknecht AG, 2016)

Der vom Bohrkopf erzeugte Hohlraum zwischen Schild und dem umliegenden Gebirge wird Steuerspalt genannt. Dieser dient als Manövrierraum bei Kurvenfahrten und zur Kompensation von Verformungen direkt nach der Ortsbrust. Ein zu gering angelegter Steuerspalt hat ein erhöhtes Gefahrenpotential zur Verklemmung des Schildes und die somit erhöhten Drehmomente sowie Vorschubkräfte zur Folge. Durch die unterschiedlichen Durchmesser der

Tübbingaußenseite und des Schildes bildet sich der Ringspalt, wie in Abbildung 1.2 zu sehen ist. Dieser muss zur Stabilisierung des Tübbingringes und zur Herstellung eines kraftschlüssigen Kontaktes zwischen Tübbingring und Gebirge schnellstmöglich verfüllt werden. In standfesten Gebirgen wird als Verfüllungsmaterial oft Perlkies mit einer Korngrößenverteilung von 8 bis 11 mm verwendet. Im Verlauf des Vortriebes kommt es zu Verlagerungen des binderlosen Verfüllungsmaterials im Ringspalt, sodass eine regelmäßige Bettungsverteilung erst einige Ringe nach dem Schildschwanz ausgebildet werden kann. Durch eine unzureichende Bettung der Betonsegmente kann es zu Ovalisierungen des Tübbingringes kommen. Das Loslösen von Blöcken aus dem Gebirge vor dem Einbringen des Hinterfüllungsmaterials führt zu punktuellen Beanspruchungen, welche den Tübbing direkt mechanisch beschädigen können. Ein im Ringspalt steckender Block kann das spätere Verfüllen behindern, wodurch Bettungsschatten entstehen können. Ein nicht vollständig verfüllter Ringspalt hat zur Folge, dass kein stabiles Trageverhalten gewährleistet werden kann, da der Gebirgsdruck und das Eigengewicht der Tübbingschale durch die Bettung übertragen werden. Durch das Verfüllen des Ringspaltes wird auch eine Pufferzone geschaffen, welche geeignet ist, stoßhafte Belastungen, wie Blockfälle, abzuschwächen und so den Tübbing zu schützen (Henzinger et al., 2016).

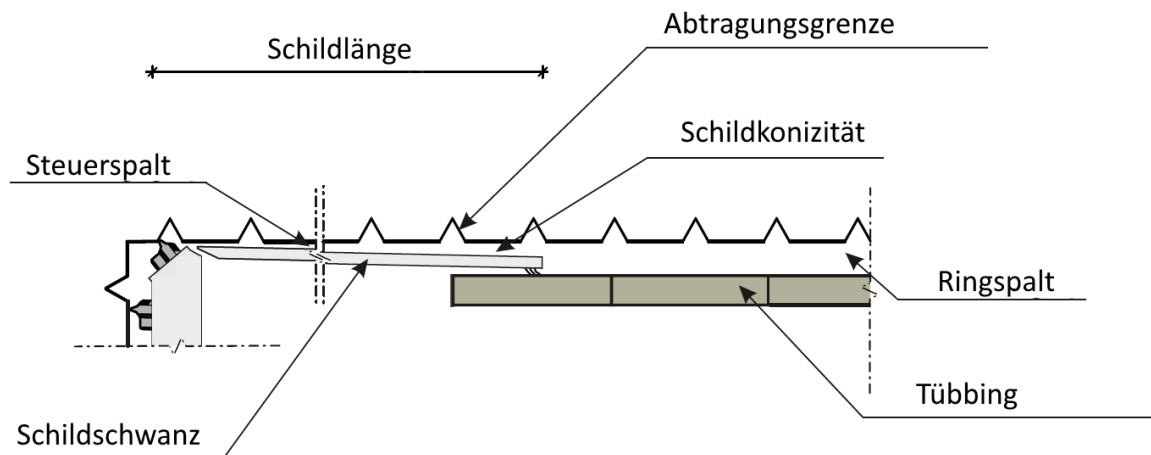


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des Ringspaltes (Henzinger et al., 2016)

2 Stand der Technik

Die Kontrolle der Ringspaltverfüllung erfolgt durch den Vergleich der eingepumpten Materialmenge mit dem Ringspaltvolumen. Die Vollständigkeit der Bettung wird bis dato ausschließlich über die messbaren Auswirkungen bei unzureichendem Zustand ermittelt. Hierfür werden optische Verfahren wie Handlaser, Theodolith oder Scanner bei Ulmen- und Firsttübblingen eingesetzt, um Rissbildung und Verformung zu beobachten (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009, S. 60 f.).

Der derzeitige Stand der Technik liefert keine Maßnahmen zur örtlichen Abbildung von Bettungsdefiziten des Tübblingringes. Eine zerstörungsfreie, flächendeckende Überprüfung ist nicht möglich.

2.1 Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Hohlräumen im Ringspalt

In diesem Kapitel werden geophysikalische Methoden beschrieben, die das Potential haben, den Verfüllungsgrad des Ringspalttes zu ermitteln.

2.1.1 Elektromagnetik

Mit Hilfe der Elektromagnetik wurden wie in Zhang et al. (2010) beschrieben, bereits erfolgreich qualitative Messungen der Hinterfüllung durchgeführt. Bei diesem Verfahren werden elektromagnetische Wellen in ein Medium eingebracht und die Amplituden der reflektierten Wellen gemessen. Gegen die Zeit geplottet ergibt sich dann ein Laufzeitdiagramm, welches die Interpretation der Daten ermöglicht. Das Verhalten einer elektromagnetischen Welle ist abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des durchdrungenen Mediums. Bei einer schlagartigen Änderung dieser Eigenschaften, etwa bei dem Übergang vom Betontübbling zu einem dahinterliegenden luftgefüllten Hohlraum, kommt es zu einer Reflexion. Je größer

der Eigenschaftsunterschied der Medien ist, desto markanter wird auch diese Grenze in dem Radargramm dargestellt. Die erreichbare Auflösung ist abhängig von der eingesetzten Wellenlänge. Je hochfrequenter die Messstrahlung ist, desto besser wird die Auflösung. Allerdings sinkt mit steigender Frequenz auch die mögliche Eindringtiefe der Wellen, weshalb es immer notwendig ist, einen Kompromiss zu finden, der beides ausreichend berücksichtigt. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die Funktionsweise des Bodenradars. Die von der Antenne ausgesendeten elektromagnetischen Wellen durchdringen die Schichten des Untergrundes, wobei an den Schichtgrenzen Reflexionen erfolgen. Diese Reflexionen können am Empfänger detektiert werden. Gegen die Zeit geplottet ergibt die Intensität der Reflexionen ein Abbild des Untergrundes.

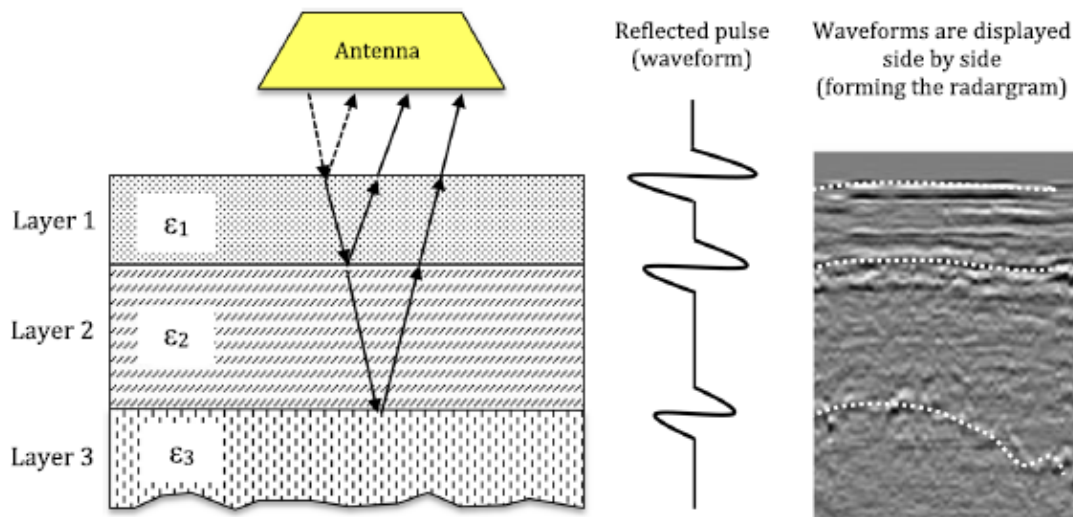


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Bodenradars (Lalagüe, 2015).

Lalagüe et al. (2016) beschreiben Untersuchungen, die durchgeführt wurden um Blockfälle in norwegischen Tunnel zu lokalisieren. Norwegen ist geologisch gesehen eine Region in der ca. 2/3 der anstehenden Gesteine präkambrischen Alters sind. Vornehmlich sind dies Gneise, Granite, Gabbros und Quarzite. Ungefähr 1/3 ist paläozoisches Gestein, welches in Form von Phylliten, Diabasen und Schiefergesteinen vorliegt. Im norwegischen Tunnelbau kommt zu meist der Sprengvortrieb zum Einsatz, während Tunnelbohrmaschinen nur für geringe Querschnitte oder Unterwasser-Vortriebe genutzt werden.

In Norwegen ist es gängige Methode, Tunnel mit freistehenden Innenschalen zu bauen, welche nicht der Stabilisierung des Gebirges, sondern der Abdichtung gegen Wasserzutritt oder dem

Frostschutz dienen. Zwischen diesen Innenschalen und dem Gebirge befindet sich ein Hohlraum, welcher in regelmäßigen Abständen auf Blockfälle überprüft werden muss, da einzelne Blockfälle ein Indiz für instabile Gesteinszonen sein können. Durch frühzeitiges Erkennen solcher Instabilitäten können Maßnahmen ergriffen werden, um ein Kollabieren der Innenschale zu verhindern. Das Betreten dieses Hohlraumes wie in Abbildung 2.2 gezeigt, ist aufgrund von Nässe und möglichen Blockstürzen gefährlich. Auch existiert vor allem in älteren Tunneln ein Mangel an Wartungsluken, wodurch die nötigen Arbeiten erschwert werden (Lalagüe et al., 2016).



Abbildung 2.2: Untersuchung des Raumes zwischen Tübbing und Gebirge (Crocco, 2010).

Im Zuge der Untersuchung von Lalagüe et al. (2016) bezüglich der Detektion von Blockfällen auf Betonsegmente mit Hilfe von Bodenradar, wurden Betonsegmente hergestellt, die vollständig den norwegischen Anforderungen entsprechen. Die Segmente haben eine Dicke von 15 cm und bestehen aus einer faserbewehrten Betonmischung. Drei verschiedene Bewehrungsarten kamen zum Einsatz und werden in Abbildung 2.3 dargestellt. In Testsegment 1 wurden 2 Drahtgeflechte deckend eingefügt. In Testsegment 2 wurden ebenfalls 2 Bewehrungsgeflechte eingebaut, allerdings wurden diese versetzt angeordnet. Testsegment 3 wurde ohne Bewehrung konstruiert. Die Bewehrungsabstände in Segment 1 und 2 betragen 14 cm x 14 cm.



(a)

(b)



(c)

Abbildung 2.3: Aufbau der Testsegmente (a) Segment 1 mit Bewehrungsabstand 14×14 cm bei deckenden Bewehrungsseisen (b) Segment 2 mit Bewehrungsabstand 14×14 cm bei versetzten Bewehrungsseisen (c) Segment 3 ohne Bewehrung (Lalagüe et al., 2016).

Hinter den fertiggestellten Testsegmenten wurden Blöcke mit einer Größe von 5 cm bis 50 cm platziert. Als Referenz wurde auch eine Metallplatte angebracht. Um die Ergebnisse der Messungen korrekt zu interpretieren, wurde jedem Radargramm auch einer Fotografie der Anordnung gegenübergestellt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Die hyperbelförmigen Reflexionen entstehen durch das Vorbeiziehen des Bodenradars an entsprechenden Objekten. In den Abbildungen 2.5 und 2.6 werden die Ergebnisse der Messungen mit den Frequenzen 1500 MHz bzw. 2600 MHz bei Verwendung eines bodengekoppelten Bodenradars

dargestellt. Bei diesen Messungen zeigte sich das 1500 MHz geeignet sind um große Blöcke hinter den Betonsegmenten abzubilden. 2600 MHz ermöglichen die Darstellung kleinerer Objekte. Es wurden ebenfalls Messungen mit Antennen durchgeführt, die in größerem Abstand zu den Segmenten gehalten wurden. Diese Messungen lieferten durchgängig schlechtere Ergebnisse (Lalagüe et al., 2016).

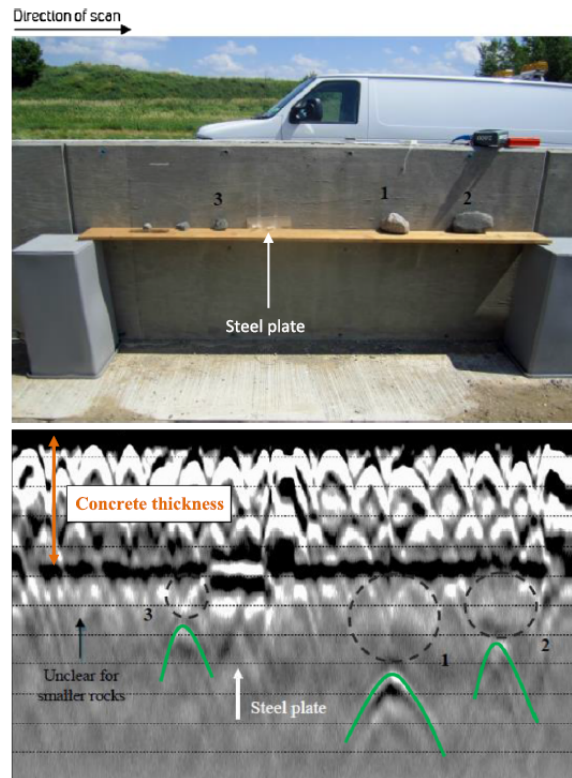


Abbildung 2.4: Gegenüberstellung Radargramm und Foto des Messaufbaues. Objekte, die Reflexionen verursachen, sind als Hyperbel dargestellt (Lalagüe et al., 2016).

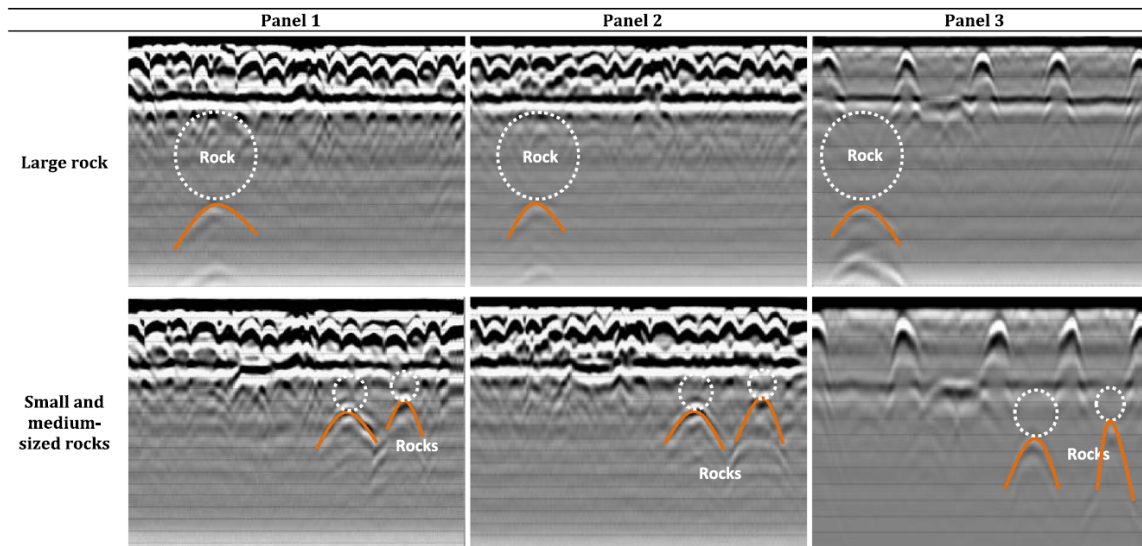


Abbildung 2.5: Radargramm des Testaufbaues mit 1500 MHz. Objekte, die Reflexionen verursachen, sind als Hyperbel dargestellt (Lalagüe et al., 2016).

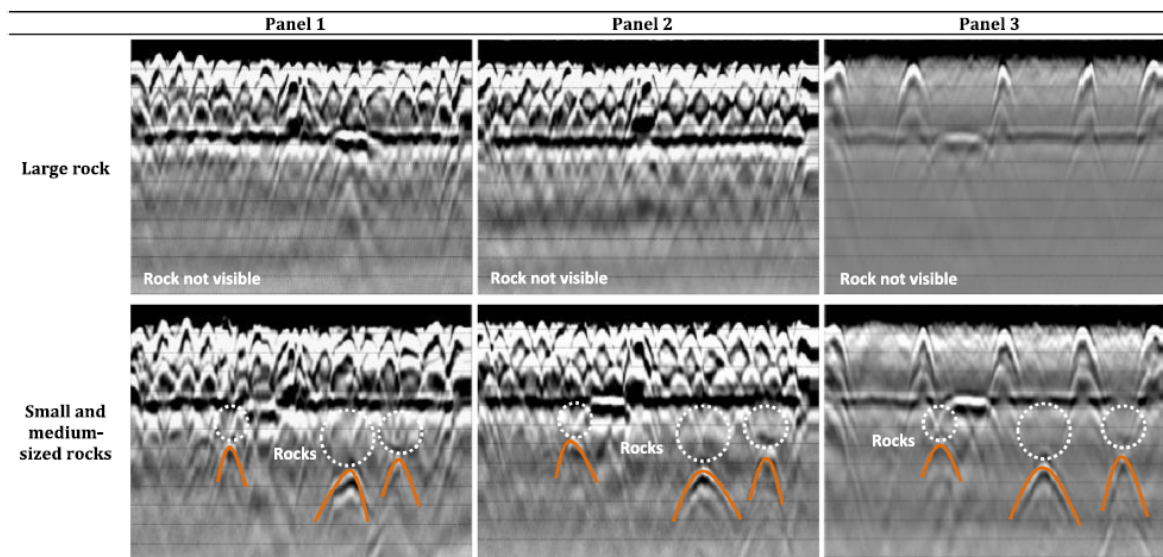


Abbildung 2.6: Radargramm des Testaufbaues mit 2600 MHz. Objekte, die Reflexionen verursachen, sind als Hyperbel dargestellt (Lalagüe et al., 2016).

Die von Lalagüe et al. (2016) durchgeführten Untersuchungen ergeben, dass eine Arbeitsfrequenz von 400 MHz zu niedrig ist, um die gewünschte Auflösung zu erzielen. Messungen mit einer Frequenz von 1500 MHz liefern insgesamt die besten Resultate. Die Messungen mit 2600 MHz liefern zwar gute Auflösungen für die Detektion sehr kleiner Blöcke, allerdings ist dabei die Eindringtiefe zu begrenzt, um größere Blöcke darzustellen. Zusätzlich können, wie in Crocco (2010) beschrieben, die Abstände zwischen Tunnel-Innenschale und Gebirge

kartiert werden, da die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen die sich durch die Luft ausbreiten, sehr genau berechnet werden kann. Ebenso können Blöcke mit einer Größe von über 10 cm verlässlich an der Innenschalen-Außenseite erkannt werden (Lalagüe et al., 2016).

Eine weitere Studie, in der Bodenradar erfolgreich zur Messung durch Tübbinge eingesetzt wurde, ist im Folgenden dargestellt. Der in Zhang et al. (2010) beschriebene U-Bahn Tunnelbau in Shanghai erfolgte in einer weichen, siltigen Tonschicht. Diese Tonschicht lagerte sich während des Holozäns vor 15000 - 20000 Jahren als flachmarines Sediment des Yangtze Deltas ab. Aufgrund des weichen, wasserführenden Bodens wurde der Ringspalt mit Mörtel verfüllt. Die dielektrischen Eigenschaften des Bodens und des Mörtels wurden im Labor ermittelt. Zu diesem Zweck wurde das auch im Bau verwendete Mörtelgemisch in Testblöcke gegossen, welche während des Aushärtens immer wieder auf ihre Eigenschaften untersucht wurden. Durch die Abnahme des Wassergehaltes im Mörtel bei fortschreitender Zeit, nahm auch die Permittivität immer weiter ab. Nach 14 Tagen war der Permittivitätsunterschied zwischen Mörtel und Boden ausreichend groß, um von dem Bodenradar detektiert zu werden. Die Grundlagen der Funktionsweise des Bodenradars sind in Kapitel 4 erklärt. In der Folge wurden numerische Modelle erstellt, die durch Feldtests validiert wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Das in Abbildung 2.7a dargestellte Radargramm zeigt das Ergebnis eines Simulationsaufbaues in dem hinter einem unbewehrten Tübbing auf der linken Hälfte eine Stahlplatte als Reflektor angebracht wurde. Die Modellskizze hierfür ist in Abbildung 2.7c beigelegt. Abbildung 2.7b zeigt das Ergebnis der echten Messung des selben Modellaufbaues, allerdings wurde hier die Metallplatte auf der rechten Seite angebracht. Abbildung 2.7d zeigt ein Foto während des Messvorganges. In beiden Radargrammen ist die durch die Metallplatte hervorgerufene Phasenumkehr an der Tübbing-Metall-Grenze deutlich erkennbar. Auf das Prinzip der Phasenumkehr unter bestimmten Bedingungen wird in Kapitel 4.1.5 näher eingegangen.

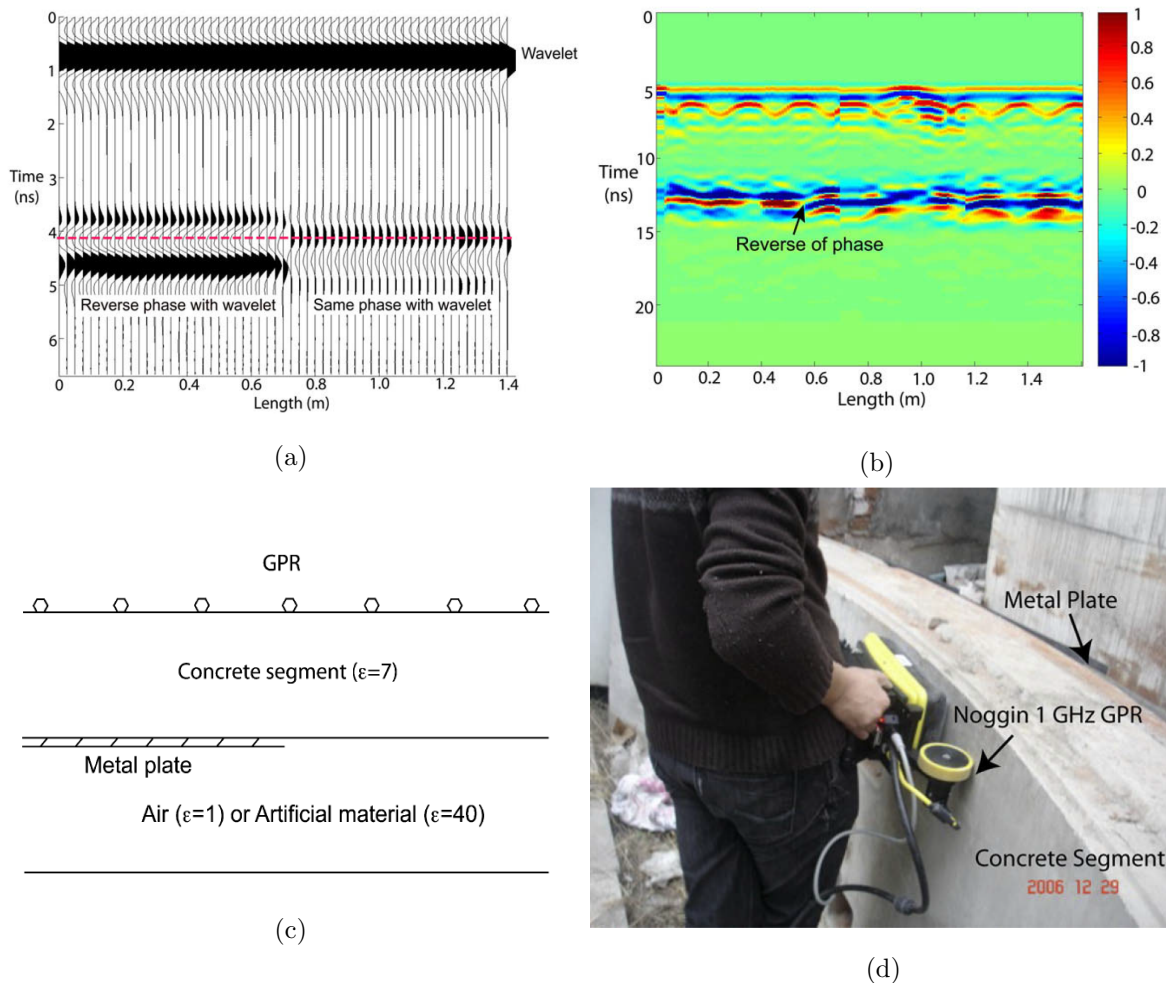


Abbildung 2.7: Vergleich einer numerischen Simulation und eines Feldtests bei 1000 MHz
 (a) numerische Simulation mit Stahlplatte auf linker Hälfte hinter Tübbing
 (b) Messung an echtem Tübbing mit Stahlplatte hinter rechter Hälfte des
 Betonsegmentes (c) Prinzipskizze zum numerischen Modellaufbau (d) Foto
 des Messaufbaues am Tübbing (Zhang et al., 2010).

Abbildung 2.8a zeigt das Radargramm einer Messung an 3 freistehenden Tübbing. Das Ende des Tübbings ist bei 10 ns gut zu erkennen. Auch die Bewehrung ist stark abgebildet. Die Grenzen der Tübbinge sind mit weißen, strichlierten Linien markiert. Abbildung 2.8b zeigt ebenfalls 3 Tübbinge, welche im Gebirge verbaut sind und bei denen der Ringspalt mit Mörtel verfüllt wurde. Aufgrund der in Abbildung 2.8a zu erkennenden Laufzeit von 8.4 ns durch den Tübbing wurde dessen Permittivität errechnet und mit 12.97 angegeben. Die errechnete Permittivität für 20 Tage alten Mörtel wurde mit 16 angegeben. Somit hat der Permittivitätsunterschied zwischen Mörtel und Tübbing einen Wert von 3, was nur zu einer schwachen Reflexion an der Schichtgrenze führt. Der Boden hat eine Permittivität von

34. Die Schichtgrenze Mörtel-Boden ist bei 15-16 ns dargestellt und wegen des Unterschieds der Permittivität gut zu erkennen.

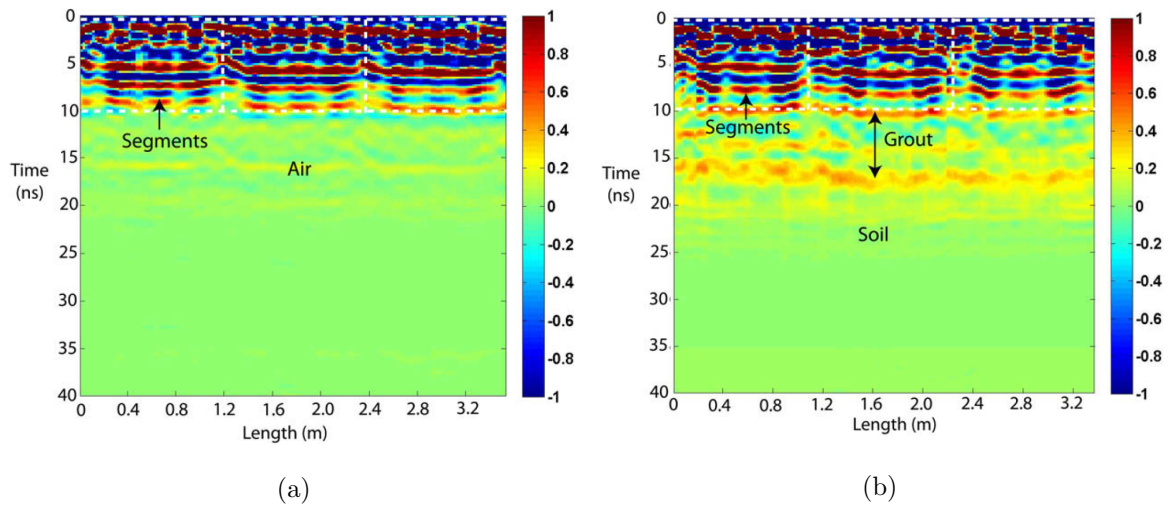


Abbildung 2.8: Feldmessung mit 500 MHz an (a) freistehendem Tübbing mit Luft dahinter (b) eingebautem Tübbing mit 20 Tage ausgehärtetem Mörtel als Hinterfüllungsmedium (Zhang et al., 2010)

Die Ergebnisse von Zhang et al. (2010) zeigen dass die Detektion der Ringspaltfüllung möglich ist. In deren Umfeld haben sich 500 MHz Arbeitsfrequenz als am besten geeignet herausgestellt.

Xie et al. (2007) beschreiben die Untersuchung von eingebrachten Mörteln hinter stahlbewehrten Betonsegmenten im Shanghai-Metrotunnel. Die Untersuchungen wurden mit 200 MHz und 500 MHz Bodenradar-Geräten durchgeführt. Die Frequenzen wurden gewählt, um Betonsegmente mit Dicken von 35 - 100 cm durchdringen zu können. Abbildung 2.9 zeigt die in den Tübbingungen eingebaute Stahlbewehrung. Das in Abbildung 2.10 abgebildete Radargramm wurde mit 200 MHz aufgenommen. Als Antennenoffset wurden 0.6 m gewählt. Mit dem Feldtest wurde gezeigt, dass mit Hilfe eines 200 MHz Bodenradars die Mörtel-Boden Grenze noch in einer Tiefe von bis zu 100 cm detektiert werden kann.



Abbildung 2.9: Bewehrung der Tübbinge (Xie et al., 2007).

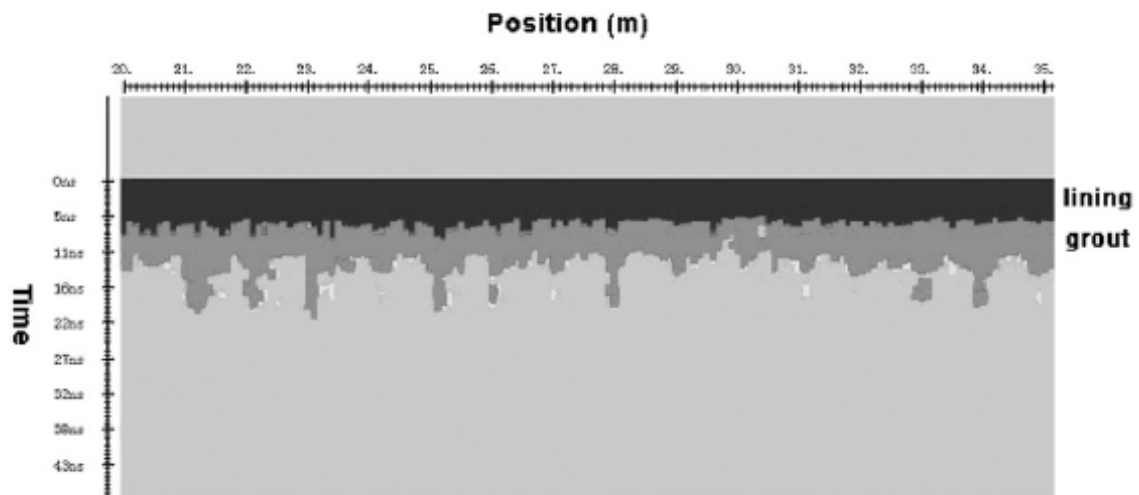


Abbildung 2.10: Radargramm mit 200 MHz, bei 35 cm Tübbingdicke und durchschnittlich 30 cm Mörtelmächtigkeit (Xie et al., 2007).

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die genaue Abstimmung der Auflösung und Eindringtiefe durch die passende Antennenwahl, die Möglichkeit Schichtgrenzen und Mächtigkeiten zu bestimmen, Hohlräume zu erkennen sowie eine schnelle Messdurchführung die Vorteile des Bodenradars sind (Karlovesk et al., 2012).

2.1.2 Seismik

Seismische Verfahren könnten ebenfalls eingesetzt werden, um diese Fragestellung zu bearbeiten. Die Seismik nutzt die Fähigkeit elastischer Körper Schwingungen weiterzugeben. Nutzbar werden die elastischen Eigenschaften von Körpern in diesem Sinne dadurch, dass an Grenz-

flächen die angeregten seismischen Wellen reflektiert, gebeugt oder gestreut werden. Durch die gezielte Anregung seismischer Wellen und die Messung der Laufzeiten von Reflexionen kann ein Untergrundmodell erstellt werden. Dies ist möglich, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Medium materialspezifisch ist (Knödel et al., 2005, S. 425-429).

Ebenso wie bei den elektromagnetischen Verfahren können im Vorhinein die Eigenschaften der verwendeten Medien bestimmt werden. Da die Laufzeit durch den Betontübbing konstant bleibt, lässt sich in den hergestellten Seismogrammen der zu untersuchende Abschnitt sehr genau eingrenzen. Allerdings ist der störende Einfluss der Bewehrung noch nicht ermittelt.

In Cassidy et al. (2011) wurde gezeigt, dass es möglich ist, mittels Ultraschall Objekte hinter 30 cm starken stahlbewehrten Betonsegmenten zu erkennen. Ebenso wurde festgehalten, dass bei Ultraschall-Untersuchungen die Auswahl der Frequenz oder einer besonderen Messanordnung entfallen. Ein Überblick über die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in relevanten Materialien ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Wie in Karlovsek et al. (2012) beschrieben, bietet das Ultraschallverfahren eine kostengünstige Möglichkeit, flächendeckend Messungen durchzuführen, mit denen sich die Mächtigkeit des Betons und Mörtels feststellen lassen. Allerdings verlangsamt sich die Messdurchführung durch den nötigen Kontakt des Messgerätes mit der Oberfläche des Materials und die hohe Anzahl der Messdurchgänge. Da es sich um ein punktförmiges Messverfahren handelt, müssen entsprechend viele Messungen durchgeführt werden, um ein Untergrundmodell zu erhalten. Auch weisen die Messungen eine schlechte Beständigkeit und Reproduzierbarkeit auf.

Tabelle 2.1: Seismische Geschwindigkeiten nach Knödel et al. (2005, S. 462 f.) und Bergmeister et al. (2014, S. 258).

Material	Geschwindigkeit $v_p[\frac{m}{s}]$
Beton	~ 3700
Kies feucht	750-1250
Schotter wassergesättigt	1300-2000
Wasser	1430-1590
Luft	310-360

2.1.3 Impact-Echo-Verfahren

Aggelis et al. (2008) beschreiben die Erfassung von Hohlräumen in einem mit Mörtel verfüllten

Ringspalt mittels Impact-Echo-Verfahren. Das Impact-Echo-Verfahren nutzt die Gesetze der Seismik und detektiert an Schichtgrenzen entstehende Reflexionen. Die Anregung erfolgt durch Hammerschläge, wie in Abbildung 2.11 dargestellt wird. Die Stärke der Reflexionen ist abhängig von den Eigenschaften der durchdrungenen Medien. In Abbildung 2.12 ist eine Prinzipskizze zu der Ausbreitung der angeregten Wellen gegeben. Ein Laufzeitdiagramm des Impact-Echo-Verfahrens ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

Der Vorteil des Impact-Echo-Verfahrens ist die einfache, kostenarme Messmethodik. Die punktweise Messung macht eine schnelle vollständige Abdeckung eines Messbereiches jedoch unmöglich. Eine Messung kann nur bei gutem Kontakt zwischen den Schichten erfolgen (Karlovsek et al., 2012). Da in dieser Diplomarbeit der Fokus auf Perlkies als Hinterfüllungsmedium liegt, ist aufgrund der Notwendigkeit eines durchgängigen Kontaktes zwischen den Schichten, diese Methode nicht anwendbar.



Abbildung 2.11: Messanordnung bei Impact-Echo-Verfahren (Aggelis et al., 2008)

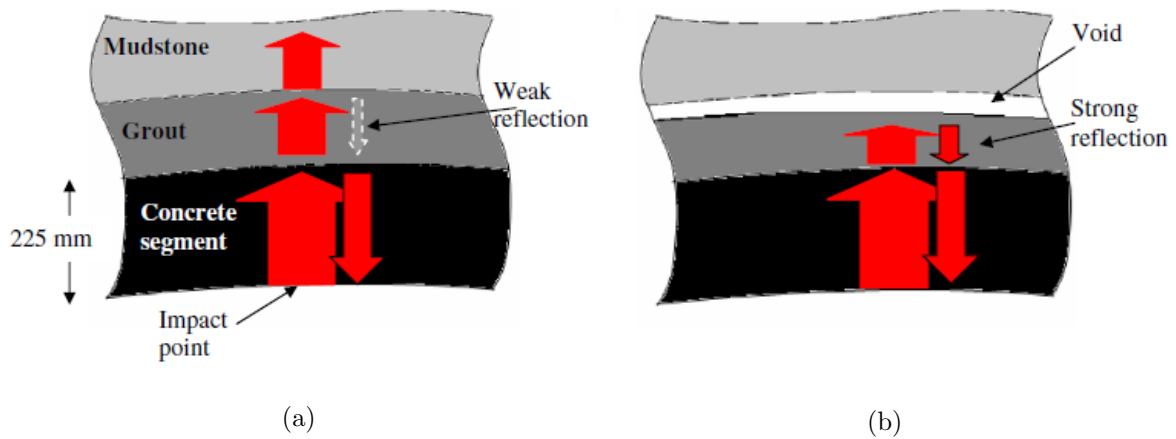


Abbildung 2.12: Reflexionen bei Impact-Echo-Verfahren bei (a) vollständiger (b) unvollständiger Verfüllung (Aggelis et al., 2008)

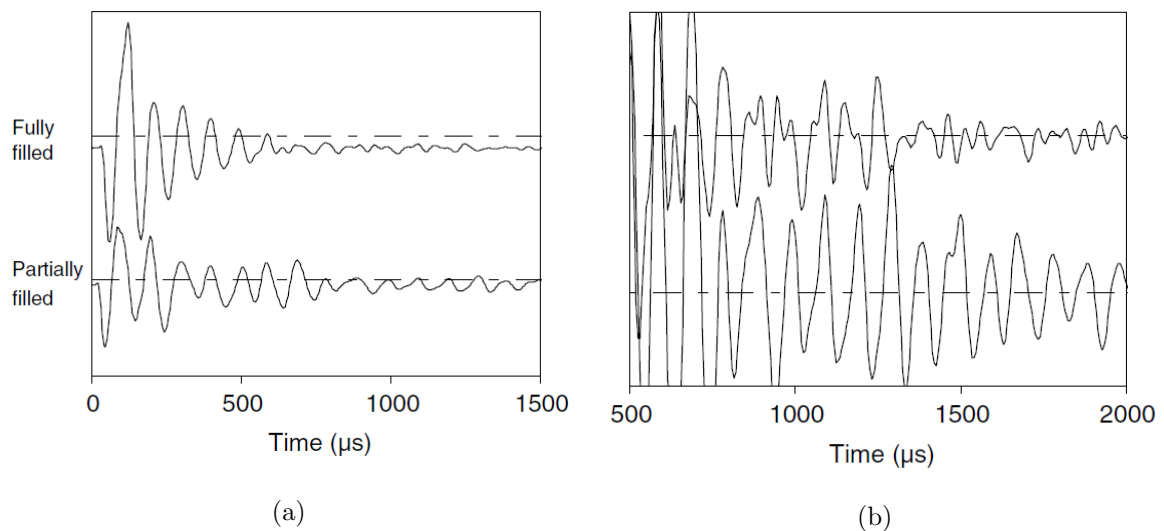


Abbildung 2.13: Laufzeitdiagramm unterschiedlicher Verfüllungszustände (a) bei einem Schwellenwert des Maximums von 10% (b) Vergrößerung ab einer Laufzeit von 500 μs bei einem Schwellenwert von 0.1% (Aggelis et al., 2008).

Auf Grund der beschriebenen Nachteile und Vorteile der drei vorgestellten Verfahren, stellt sich die Verwendung eines Bodenradars als die vielversprechendste Methode heraus, um die Problematik der Überprüfung der Ringspaltverfüllung in Zukunft lösen zu können. Wegen der unterschiedlichen geologischen Gegebenheiten der bereits durchgeführten Studien und der verwendeten Materialien zu Rückverfüllung, ist es notwendig weitere Simulationen durchzuführen. Durch die Simulationen sollen die bestehenden Ergebnisse verifiziert werden und die Vorarbeit für Feldtests in Österreich geliefert werden.

3 Aufgabenstellung

Da eine vollständige Verfüllung des Ringspalt es nicht garantiert werden kann, ist es notwendig, diesen laufend zu überprüfen. Die Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2009, S. 60 f.) legt in der aktuell gültigen Richtlinie für Tübbingsysteme aus Beton fest, dass die Überprüfung der Ringspaltverfüllung über die Menge des eingebrachten Materials und die an der Kreisring-Innenseite sichtbar werdenden Auswirkungen einer unvollständigen Verfüllung erfolgen soll.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden folgende Ziele festgelegt:

- Literaturstudie möglicher zerstörungsfreier Verfahren zur qualitativen Ermittlung des Bettungszustandes hinter Tübbingschalen bei Einsatz von Perlkieshinterfüllungen.
- Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur qualitativen Darstellung des Bettungszustandes.
- Numerische Simulation verschiedener Bettungsansätze und Evaluierung des Einflusses der Bewehrung.

In Kapitel 2.1 wurden Verfahren vorgestellt, die nach aktuellem Stand der Technik die Möglichkeit bieten, den Bettungszustand von Tübbingen zerstörungsfrei zu ermitteln. Aufgrund dieser Ergebnisse wird das Bodenradar als am besten geeignet erachtet, um Messungen in ausreichender Qualität durchführen zu können. Die numerischen Simulationen werden in Kapitel 5 beschrieben und deren Ergebnisse in Kapitel 6 dargestellt.

4 Grundlagen elektromagnetischer Wellen

4.1 Bodenradar

Das Bodenradar

[...] ist ein elektromagnetisches Impulsreflexionsverfahren (EMR), das auf ähnlichen Grundlagen wie die Reflexionsseismik und die Entfernungsmessung mit Sonar und Radar beruht (Knödel et al., 2005, S. 389).

Es werden kurze elektromagnetische Impulse ausgesendet, welche an Schichtgrenzen oder Gegenständen im Untergrund reflektiert werden. Gemessen werden dabei die Laufzeiten der Wellen und die Amplituden der elektrischen Feldstärke. Elektromagnetische Wellen werden reflektiert, wenn ein genügend großer Unterschied der elektrischen Eigenschaften zwischen den verschiedenen Materialien besteht. Die wichtigsten Parameter, welche das Verhalten einer elektromagnetischen Welle in einem Medium bestimmen, sind die Dielektrizitätskonstante ϵ , die Leitfähigkeit σ und die magnetische Permeabilität μ . Für geotechnische Fragestellungen werden Arbeitsfrequenzen von etwa 10 - 1000 MHz verwendet. Als Arbeitsfrequenz wird meist die Mittelfrequenz f_m des erzeugten Wellenspektrums angegeben. Je nach Aufgabenstellung muss die Arbeitsfrequenz passend gewählt werden. Mit Erhöhung der Frequenz steigt auch die Auflösung des Radargrammes. Da elektromagnetische Signale in den zu durchdringenden Medien gestreut und absorbiert werden, ist deren Eindringtiefe begrenzt. Die Eindringtiefe ändert sich mit den Eigenschaften des Mediums, ist aber auch maßgeblich abhängig von der Frequenz, mit welcher sie negativ korreliert. Durch die mögliche hohe Pulsfolge der Signale können quasikontinuierliche, profilhafte Messungen durchgeführt werden. Da die Messergebnisse in Echtzeit dargestellt werden können, ist eine sofortige Interpretation in gewissem Rahmen möglich (Knödel et al., 2005, S. 389-390).

4.1.1 Maxwell Gleichungen

Die Maxwellschen Gleichungen setzen die magnetische Feldstärke, die magnetische Flussdichte, die elektrische Feldstärke und die elektrische Strom-, und Raumladungsdichte miteinander in Beziehung (Knödel et al., 2005, S. 75).

Die partiell-differenzielle Darstellung elektromagnetischer Felder und Beziehungen (Gleichungen 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4) wurde aus Jol (2009, S. 6) entnommen.

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{D} = q \quad (4.3)$$

$$\bar{\nabla} \times \bar{B} = 0 \quad (4.4)$$

Das Faraday'sche Gesetz (Gleichung 4.1) setzt den elektrischen Feldvektor mit der Änderungsrate des magnetischen Feldvektors in Beziehung. Das modifizierte Ampere'sche Gesetz in Gleichung 4.2 drückt aus, auf welche Art eine von Strom durchflossene Fläche von Magnetfeldlinien umgeben wird. Gleichung 4.3 beschreibt das Gauß'sche Gesetz für elektrische Felder und erläutert, wie elektrische Feldlinien in einer positiven Ladung ihren Ursprung haben und sich bei einer negativen Ladung treffen. Das in Gleichung 4.4 angeführte Gauß'sche Gesetz für Magnetfelder schließt die Existenz isolierter magnetischer Pole aus, da es besagt, dass der magnetische Fluss durch jede beliebige geschlossene Fläche null ist (Tipler et al., 2015, S. 983).

4.1.2 Welleneigenschaften

Sowohl Absorption als auch Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle sind abhängig von ihrer Frequenz. Diese Frequenzabhängigkeit bringt Änderungen der Pulsform sowohl bei der Reflexion und Brechung an Grenzflächen als auch während der Ausbreitung selbst mit sich (Knödel et al., 2005, S. 391 f.).

Die Maxwell-Gleichungen für das elektrische Feld lassen sich bei einer harmonischen transversalen Welle, die sich in z-Richtung ausbreitet, wie in 4.5 und 4.6 dargestellt lösen (von Hippel, 1954, S. 20).

$$E(t) = E_0 * e^{(i\omega t - \gamma z)} \quad (4.5)$$

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (4.6)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in einem Material errechnet sich durch

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.7)$$

wobei

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)} \quad (4.8)$$

(Knödel et al., 2005, S. 393).

4.1.3 Materialmodell

Die Materialgleichungen (Gleichungen 4.9, 4.10 und 4.11 nach (Jol, 2009, S. 6)) legen die durchschnittlichen Reaktionen eines Materials auf induzierte elektromagnetische Felder dar. Die Permittivität beschreibt die innerhalb eines elektrischen Feldes stattfindenden Ladungsverschiebungen in einer Materialstruktur. Freie Ladungsbewegungen unter Vorhandensein eines elektrischen Feldes werden durch $\tilde{\sigma}$ dargestellt. Aufgrund des Widerstandes gegen den Ladungsfluss kommt es zu Energieverlust. Die magnetische Permeabilität skizziert, wie das

innere atomare und molekulare Moment auf ein magnetisches Feld reagieren. Die relative Permittivität setzt, wie in Gleichung 4.12 beschrieben, die Permittivität eines Materials mit jener des Vakuums in Verbindung (Jol, 2009, S. 6-7).

$$\tilde{\varepsilon} = \overline{D}/\overline{E} \quad (4.9)$$

$$\tilde{\sigma} = \overline{J}/\overline{E} \quad (4.10)$$

$$\tilde{\mu} = \overline{B}/\overline{H} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0 \quad (4.12)$$

4.1.4 Materialeigenschaften

Für die meisten Anwendungen sind Änderungen der elektrischen Materialeigenschaften, der Permittivität ε und der Leitfähigkeit σ am stärksten von Bedeutung. Änderungen der Permeabilität μ haben meist weit weniger Einfluss. Bei einem σ von 0 gäbe es keinen Verlust, und die Signale würden ungehindert in große Tiefen vordringen. In der Praxis kommen Medien mit niedrigem elektrischen Verlust allerdings selten vor. Im Bereich von 10 MHz bis 1 GHz ist Wasser das am stärksten polarisierbare natürliche Medium. Da sein Vorhandensein in beinahe allen natürlichen Materialien, welche Porenräume aufweisen, gegeben ist, hat es auch einen großen Einfluss auf deren elektrische Eigenschaften. Mit seiner Permittivität von 80 sorgt es für starke Kontraste zwischen wasserlosen und wasserführenden Medien (Jol, 2009, S. 7-8).

Gerade bei Fragestellungen im Tunnelbau muss auf diese Thematik besonders geachtet werden, da ein wasserführendes Gebirge keine Seltenheit ist und somit auch die elektrischen Eigenschaften des Perlkieses als poröses Medium davon stark beeinflusst werden.

4.1.5 Reflexion, Transmission und Diffraktion bei der Wellenausbreitung

Trifft eine elektromagnetische Welle auf die Grenzfläche zweier Medien, welche sich in ihren elektrischen Eigenschaften unterscheiden, resultiert daraus eine reflektierte und eine gebrochene Welle. Die geometrischen Abhängigkeiten dieser Wellen gleichen denen in der Seismik und können ebenfalls durch das Brechungsgesetz beschrieben werden (Knödel et al., 2005, S. 395-397). Daraus resultiert, dass für den reflektierten Teil der Welle r gilt:

$$r = \frac{Z_2 \cos \phi - Z_1 \cos \psi}{Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \psi} \quad (4.13)$$

und für den transmittierten Teil t gilt:

$$t = \frac{2 Z_2 \cos \phi}{Z_2 \cos \phi + Z_1 \cos \psi} \quad (4.14)$$

wobei ϕ der Einfallswinkel, ψ der Brechungswinkel und Z_1 und Z_2 die elektrischen Wellenwiderstände sind. Bei senkrecht einfallenden Wellen, lässt sich 4.13 vereinfachen zu:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.15)$$

Unter verlustarmen Bedingungen kann 4.15 auch als

$$r \simeq \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \simeq \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad (4.16)$$

ausgedrückt werden, wobei v_1 und v_2 für die Geschwindigkeiten der Wellen in den Medien 1 und 2 stehen. Der Reflexionskoeffizient r ist 0, wenn sich die elektromagnetische Welle in Medium 1 ebenso schnell ausbreitet wie in Medium 2. In der Folge tritt keine Reflexion auf (Knödel et al., 2005, S. 395-397).

Zur Übersicht sind in Tabelle 4.1 einige Medien mit ihrer relativen Permittivität abgebildet.

Abbildung 4.1a zeigt das Radargramm eines Modellaufbaus, in dem auf der linken Hälfte nach 40 cm eine 2 cm mächtige Metallplatte angebracht ist und auf der rechten Seite nur Luft vorliegt. Abbildung 4.1b ist die Single-Tray-Analyse des Radargramms an den Positionen der orangen und blauen Linie. Wie in 4.1b zu erkennen ist, kommt es an der Position der Metallplatte zu einer Phasenumkehr der elektromagnetischen Welle. Dieses Phänomen ist auf den negativen Reflexionskoeffizienten an der Grenze Luft - Metallplatte zurückzuführen.

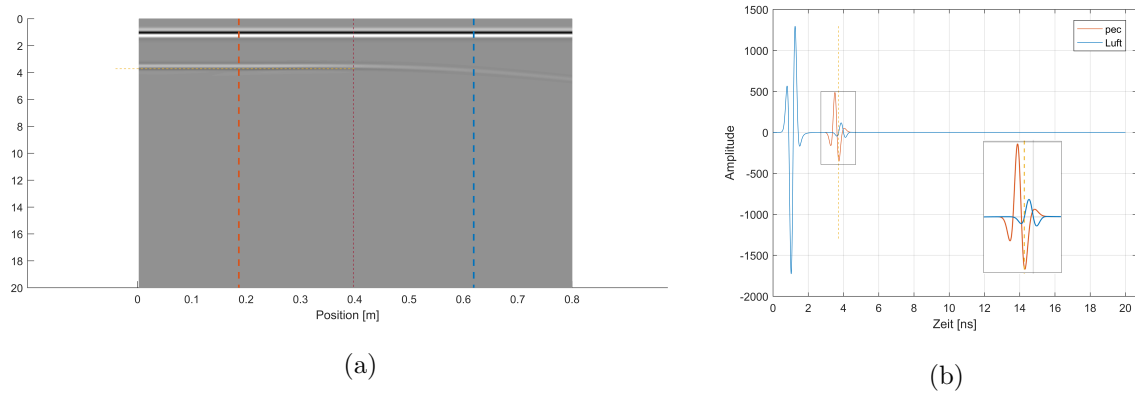


Abbildung 4.1: Änderung eines Wavelets durch Reflexion an einer Schichtgrenze mit Leitfähigkeitsänderung von Luft („free_space“) zu Metall („pec“) bei 1600 MHz. Details in Abbildung 5.2.

Tabelle 4.1: Permittivität ausgesuchter Materialien nach Meredith (1998, S. 28 ff.), Hippel (1995) und Salam & Rahman (2016, S. 208).

Medium	ϵ_r
Vakuum	1
Luft	1
Wasser (20 C, 0-3 GHz)	80
Kies	5,5
Beton	5,5
trockener Granit	5
nasser Granit	6,5
trockener Sand	4-6
nasser Sand	30
Eis	3
trockene Erde	4
feuchte Erde	29

5 Numerische Simulation

Aufgrund des komplexen Messbereiches wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit numerische Simulationen verschiedener Bettungsszenarien durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Frequenzen und Messumgebungen auf die Resultate ermittelt.

Die Berechnungen wurden mit der Software gprMax (2016) durchgeführt. Bei gprMax (2016) handelt es sich um eine Open-Source Software, mit deren Hilfe die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in beliebigen Medien simuliert werden kann. Hierbei werden die Maxwell-Gleichungen mit Hilfe der Finite-Differenzen-Methode gelöst. Die Software wird in gprMax (2016) genauer beschrieben.

Für die Simulation musste ein Grundgerüst der gewünschten Messumgebung erstellt werden. Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft die Anordnung der digitalen Modelle.

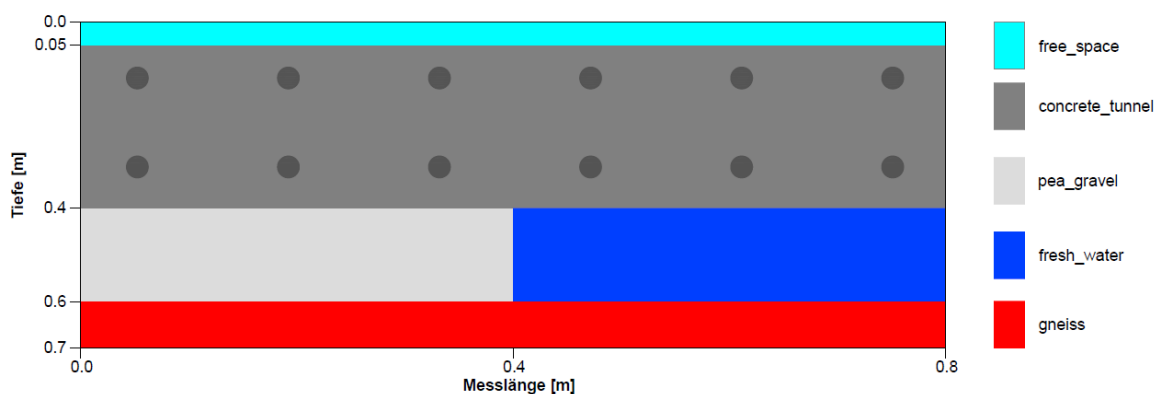


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Messbereiches

Als Wellenform wurde die des Mexikanischen Hutes gewählt. Ein Beispiel für diese Ricker-waveform ist in Abbildung 5.2 gegeben. In Abbildung 5.3 ist zudem die Ausbreitung eines Wavelets in einem Modell ohne Bewehrung dargestellt. In den ersten beiden Bildern propagiert ein Wavelet durch den Betontübbing. Der Ringspalt ist auf der linken Seite mit Perlkies verfüllt und auf der rechten Seite mit Wasser. Im dritten und vierten Bild lässt sich die starke

Reflexion an der Tübbing-Wasser Grenze erkennen, während sich die Welle auf der linken Seite beinahe ungehindert durch den Perlkies fortpflanzt und nur eine leichte Reflexion auslöst. Die letzten beiden Bilder zeigen das langsame Ausbreiten des Wavelets durch den mit Wasser gefüllten Hohlraum und die Entstehung von sekundären Reflexionen.

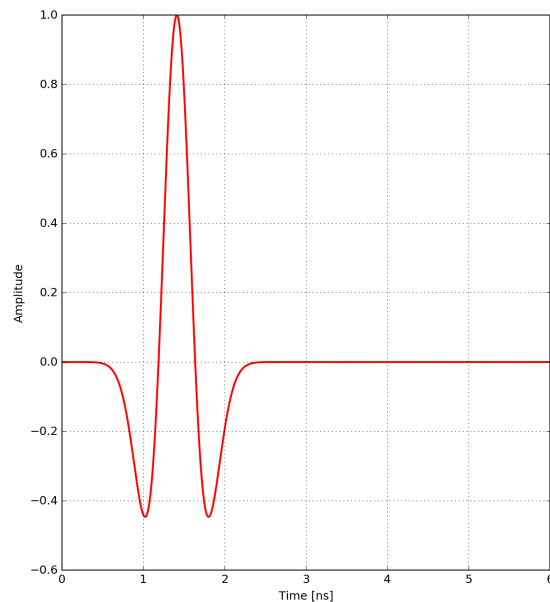


Abbildung 5.2: Beispiel für ricker wavelet (gprMax, 2016)

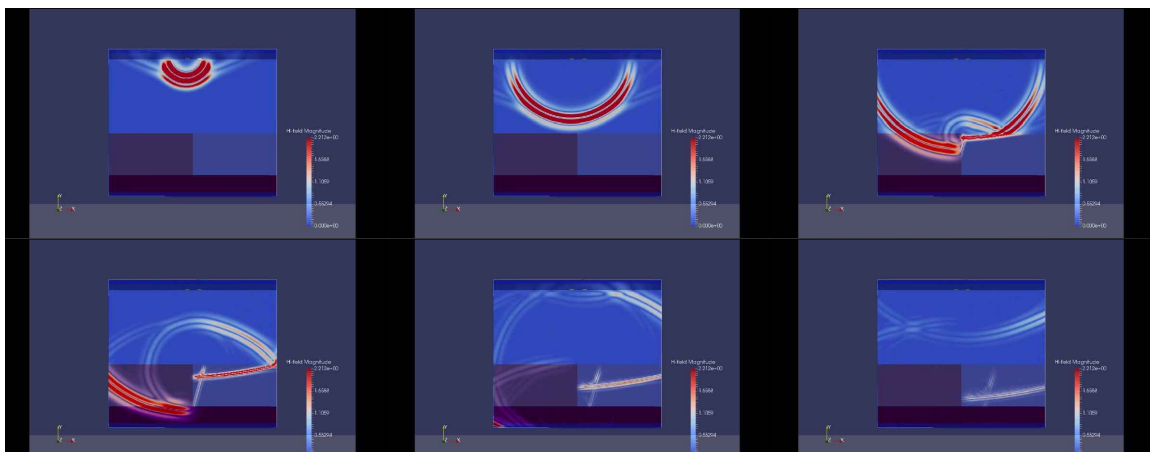


Abbildung 5.3: Wellenpfad in einem Modell ohne Bewehrung

Die von gprMax verwendeten Eingangsdaten müssen als Code in einer Textdatei programmiert werden. Ein Beispiel für einen solchen Code ist in Abbildung 5.4 gegeben. Das Programm erkennt nur Codezeilen, die mit einem # beginnen, als Befehl. Alle Angaben werden in SI-Einheiten getätigt. „title“ legt den Titel der Ausgabedatei fest. „domain“ beschreibt die Ausdehnung des Modells in x, y und z Richtung. „dx_dy_dz“ bestimmt die Auflösung des

digitalen Modells in x, y, und z Richtung. Alle folgenden Abmessungsangaben können nur „dx_dy_dz“ entsprechen, oder ein Vielfaches davon sein. „time_window“ legt fest wie lange der Detektor pro Messung aktiviert ist.

„material“ beschreibt die Eigenschaften und den Namen der verwendeten Medien in der Reihenfolge f1 f2 f3 f4 f5 fest wobei f1 die Permittivität, f2 die Leitfähigkeit, f3 die relative Permeabilität, f4 der magnetische Verlust und f5 die Bezeichnung des Materials ist.

„waveform“ bestimmt die Art der simulierten Antenne, deren Frequenz und deren Bezeichnung. „hertzian_dipole“ definiert die Polarisierung und die Position der Antenne im Modell. „rx“ legt die Position des Empfängers im Modell fest. „src_steps“ und „rx_steps“ bestimmen die Schrittweite und Richtung in die sich Sender und Empfänger bei einem B-Scan (ein B-Scan besteht aus mehreren A-Scans welche eine Einzelmessung darstellen) zwischen den Messungen bewegen.

„box“ erstellt eine blockartige Umgebung, die mit dem gewünschten Medium gefüllt wird. Die Ausdehnungen der Box werden durch 6 Koordinaten beschrieben, welche die linke untere vordere und rechte obere hintere Ecke in 3D definieren. „cylinder“ erstellt einen Zylinder dessen Höhe und Position von 6 Koordinaten definiert werden, die 2 Punkte im Raum beschreiben zwischen denen der Zylinder aufgespannt wird. Der Radius wird durch einen zusätzlichen Wert angegeben.

Für jedes Modell wurde eine passende Codedatei erstellt, deren Einstellungen den gewünschten Modelldetails entsprechen. Insgesamt wurden über 150 solcher Dateien angelegt und zur Ausführung gebracht.

```
#title: model_mb_deckend_14cm_1600mhz_pea_gravel_und_fresh_water
#domain: 1 0.8 0.0025
#dx_dy_dz: 0.0025 0.0025 0.0025
#time_window: 20e-9

#material: 6 0 1 0 half_space
#material: 7 0.01 1 0 concrete_tunnel
#material: 80 0.5 1 0 fresh_water
#material: 6 0.001 1 0 pea_gravel
#material: 8.5 0.001 1 0 gneiss

#waveform: ricker 1 1.60E+09 my_ricker
#hertzian_dipole: z 0.1 0.7 0 my_ricker
#rx: 0.16 0.7 0
#src_steps: 0.0025 0 0
#rx_steps: 0.0025 0 0

#box: 0 0 0 1 0.1 0.0025 gneiss
#box: 0 0.1 0 0.5 0.3 0.0025 pea_gravel
#box: 0.5 0.1 0 1 0.3 0.0025 fresh_water
#box: 0 0.3 0 1 0.65 0.0025 concrete_tunnel
#box: 0 0.65 0 1 0.8 0.0025 free_space
|
untere bewehrung
#cylinder: 0 0.33 0 0 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.14 0.33 0 0.14 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.28 0.33 0 0.28 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.42 0.33 0 0.42 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.56 0.33 0 0.56 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.7 0.33 0 0.7 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.84 0.33 0 0.84 0.33 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.98 0.33 0 0.98 0.33 0.0025 0.01 pec

obere bewehrung
#cylinder: 0 0.6 0 0 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.14 0.6 0 0.14 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.28 0.6 0 0.28 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.42 0.6 0 0.42 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.56 0.6 0 0.56 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.7 0.6 0 0.7 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.84 0.6 0 0.84 0.6 0.0025 0.01 pec
#cylinder: 0.98 0.6 0 0.98 0.6 0.0025 0.01 pec
```

Abbildung 5.4: Codebeispiel für gprMax

5.1 Aufbau der Modelle

Die Modellierungen wurden so durchgeführt, dass der Sender zu Beginn der Simulation an der Position 0 der Messstrecke steht und der Empfänger am Ende der Simulation genau am Ende der Messstrecke. Dies wird in Abbildung 5.5 skizziert. Dadurch gilt für alle Modelle, dass die wahre Messlänge die angegebene Modelllänge abzüglich des Offsets ergibt. Wenn nicht bei der Modellbeschreibung anders angegeben, wurde als Simulationszeit 20 ns und die Messstrecke entlang des Kreisbogens des Tübbingringes (Abbildung 5.6) gewählt. Details zu den Parametern bei den unterschiedlichen Frequenzen sind in Tabelle 5.1 dargestellt. In Tabelle 5.2 sind die Materialeigenschaften angegeben. Die Durchmesser der Bewehrungsseisen betragen 1 cm. Der zu verfüllende Hohlraum wurde konstant mit 20 cm Mächtigkeit eingestellt. Um reale Bedingungen zu schaffen, wurde ein luftgefüllter Abstand von 5 cm zwischen Sender/Empfänger und der Oberfläche des Betontübbings eingefügt. Die Medien „free_space“ und „pec“ sind in „gprMax“ voreingestellte Standards, wobei „free_space“ die Materialeigenschaften des luftgefüllten Hohlraumes repräsentiert. Als „fresh_water“ wird in den Modellen der wassergefüllte Hohlraum beschrieben. „Pec“ wurde herangezogen, um die Bewehrung zu simulieren. Als bergseitige Begrenzung des Ringspaltes wurde, um eine für Österreich relevante geologische Situation zu erzeugen, eine 10 cm mächtige Gneisschicht eingefügt, welche in den Modellen „gneiss“ genannt wird. „Concrete_tunnel“ bezeichnet den Betontübbing und „pea_gravel“ den Perlkies.

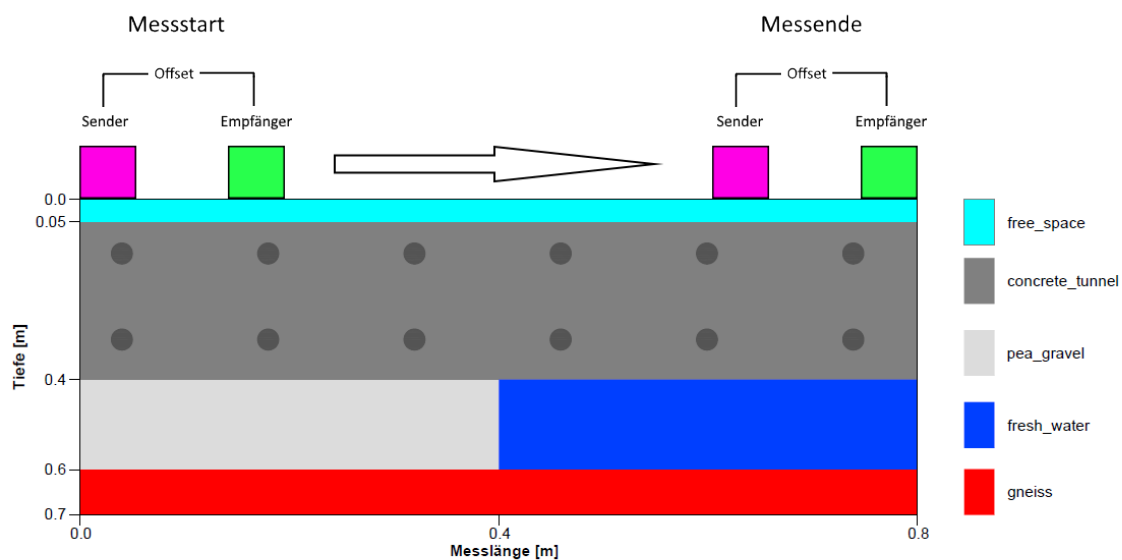


Abbildung 5.5: Anordnung Sender und Empfänger während des Messdurchganges

Tabelle 5.1: Frequenzabhängige Details der Modelle

	1600 MHz	1000 MHz	900 MHz	400 MHz
Messungen	296	217	129	128
Auflösung in x, y und z Achse [m]	0.0025	0.00333	0.0025	0.0025
Messungen / m	400	300	200	200
Antennenoffset [m]	0.06	0.076	0.152	0.16

Tabelle 5.2: Verwendete Materialeigenschaften

Medium	ϵ_r	σ	μ_r	σ_*
concrete_tunnel	7	0,01	1	0
pea_gravel	6	0,001	1	0
free_space	1	0	1	0
wasser	80	0,5	1	0
gneiss	8,5	0,001	1	0
pec	1	1e6	1	0

5.1.1 Betrachtung der Laufzeiten und Amplituden ohne Einfluss der Bewehrung

Um ungestörte Wellenpfade zu erhalten, auf denen die Laufzeiten gut ersichtlich sind, wurde die Bewehrung in den Modellen entfernt. Die Dicke des Tübbings beträgt 35 cm. Diese Modelle eignen sich gut um die Laufzeiten der elektromagnetischen Wellen in den Medien genau abzulesen, da keine Störung durch die Bewehrung auftritt. Die Ausdehnung der Modelle wurde mit 0.8 m in der Horizontalen und mit 0.7 m in der Vertikalen festgelegt.

5.1.2 Parameterstudie: Variation der Bewehrungsabstände

In diesem Modellierungsschritt wurde der Einfluss der Bewehrungsabstände auf die Erkennbarkeit des Hinterfüllungsmaterials evaluiert. Hierfür wurden Modelle mit Bewehrungsabständen von 14 cm bis 6 cm angefertigt. Die Tübbingdicke beträgt dabei 35 cm. Die horizontale Ausdehnung der Modelle beträgt 0.8 m, die vertikale 0.7 m. Die Laufzeiten der elektromagnetischen Wellen wurde in der Simulation für 20 ns verfolgt. Dieser Zeitraum beinhaltet zumindest die direkte Reflexion aller relevanten Schichtgrenzen.

5.1.3 Variation der Tübbingdicke

In einer weiteren Modellreihe wurde die Tübbingdicke auf 50 cm erhöht, um die Möglichkeit eines potentiellen Einsatzes des Bodenradars bei stärkeren Tübbingungen zu überprüfen. Alle anderen Parameter sind unverändert.

5.1.4 Evaluierung eines Messbereiches mit verminderter Bewehrung

In dieser Modellreihe wurde die Möglichkeit untersucht, eine Messtrecke in Vortriebsrichtung anzulegen wie in Abbildung 5.6 dargestellt wird. Es kommen immer wieder Tübbinge zum Einsatz, deren hohe Bewehrungsdichte eine erfolgreiche Messung verhindern (siehe Kapitel 6.2). Um dennoch derartig stark bewehrte Tübbinge messtauglich zu machen, können einzelne Bewehrungslagen entlang des Kreisbogens ausgelassen werden. Ein modifizierter Tübbing sollte dieselben statischen Anforderungen erfüllen können wie ein vollständig bewehrter. Für diesen Zweck wurde angenommen, dass ein Tübbing verwendet wurde, bei dem an entsprechenden Stellen ein entsprechender Abstand im Bewehrungsnetz frei gelassen wurde. Die Bewehrungsabstände zwischen den Lücken wurden mit 6 cm absichtlich eng gewählt (siehe Abbildung 6.19). Verwendet wurden 3 Modellbahnenabstände mit 15 cm, 20 cm und 25 cm Breite. Als Hinterfüllungsmaterial wurde das Medium „pea_gravel“ verwendet. Als Hohlraumfüllung wurde sowohl „fresh_water“ als auch „free_space“ simuliert. Die Messbahnen wurden, um den schlechtesten Fall zu simulieren, in Vortriebsrichtung angelegt und schneiden in der Folge den bewehrungsverminderten Bereich des Tübbings im rechten Winkel.

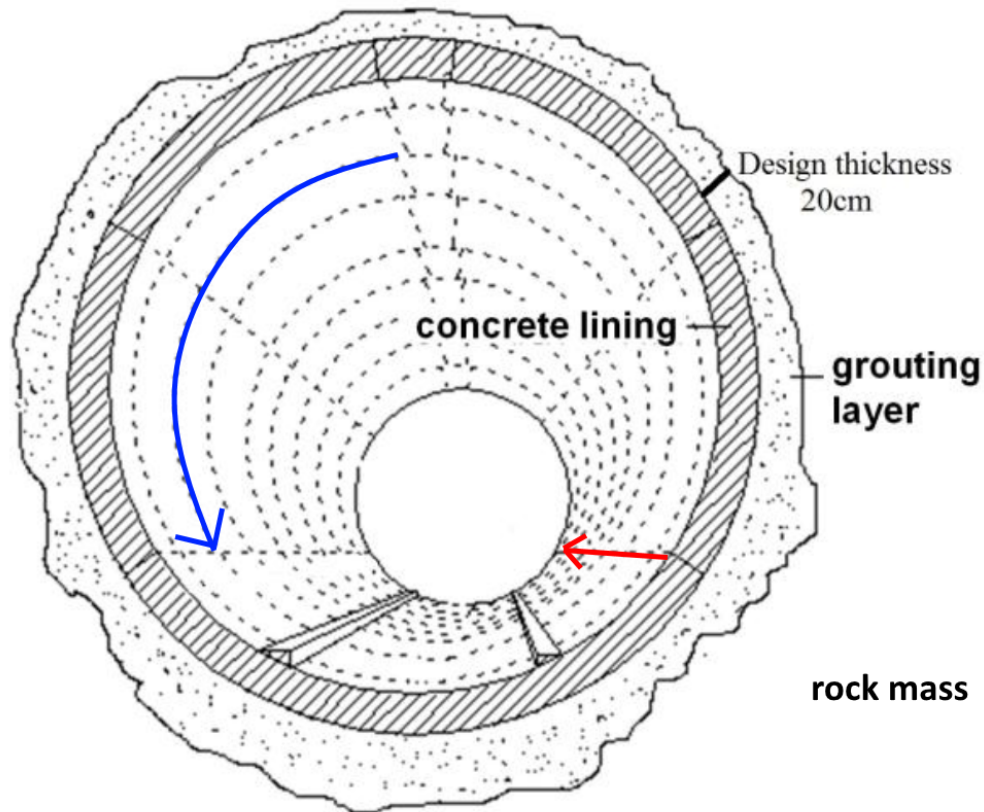


Abbildung 5.6: Messrichtung der Modelle. Es kann entlang des Kreisbogens des Tübbingringes (blauer Pfeil) oder in Vortriebsrichtung (roter Pfeil) gemessen werden. Geändert nach GPR (2012).

5.2 Nachbearbeitung der Laufzeitdiagramme

Die Ausgabe der Daten der Software „gprMax“ erfolgt im Dateiformat „hdf5“, welches optimiert ist, um große und komplexe Datensammlungen zu verwalten (The HDF Group, 2016).

Die Daten wurden um bessere Darstellbarkeit zu gewährleisten, mit der Software Matlab (2016) bearbeitet.

Die in Formel 4.7 aus Kapitel 4.1.2 beschriebene Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde herangezogen, um die Positionen der Materialübergänge und der Bewehrungen im Radargramm zu errechnen. Die eingezeichneten Linien in den Laufzeitdiagrammen stützen sich auf diese Berechnungen. Durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle in einem Medium mit bekannter Mächtigkeit lässt sich die Zeit errechnen, die die Welle benötigt um dieses Medium zu durchqueren. Die im Radargramm abzulesende Laufzeit einer Schichtfläche

ist mit dem Faktor 2 multipliziert, da sich die Welle von der Antenne zu der Schichtfläche und wieder zurück zum Empfänger bewegt hat. In Tabelle 5.3 sind die errechneten Geschwindigkeiten und Laufzeiten aufgelistet. Die Laufzeiten im Radargramm beziehen sich auf die angegebenen Mächtigkeiten. Die Positionen der Bewehrungen wurden von der Innenseite des Tübbings aus berechnet. Die Angaben zu „Bewehrung außen“ mit 0.32 m und 0.47 m beziehen sich auf die bergseitige Bewehrung für die Tübbinge mit den Mächtigkeiten 0.35 m und 0.5 m.

Tabelle 5.3: Geschwindigkeits und Laufzeitberechnungen der verwendeten Medien.

Medium	Mächtigkeit [m]	Geschwindigkeit [m/ns]	Laufzeit im Radargramm [ns]
Luft	0.05	0.2998	0.3336
Betonübbing	0.35	0.1133	6.178
Betonübbing	0.5	0.1133	8.826
Perlkies	0.20	0.1224	3.268
Wasser	0.20	0.0335	11,952
Luft	0.20	0.2998	1.334
Bewehrung innen	0.05	0.1133	0.882
Bewehrung außen	0.32	0.1133	5.648
Bewehrung außen	0.47	0.1133	8.296

Das Setzen eines Nullpunktes im Laufzeitdiagramm ist notwendig, um korrekte Laufzeitberechnungen durchführen zu können (Yelf, 2004). Der Empfehlung von Yelf (2004) folgend

wurde der größte positive Peak in der direkten Welle detektiert und dessen Position als Nullpunkt festgelegt um die hohlraumseitige Oberfläche der Tübbinge zu bestimmen. Dadurch konnte der Versatz zwischen der rein rechnerisch ermittelten Position einer Schichtgrenze und der realen Position als Korrekturwert addiert werden. Da alle Modelle derselben Frequenz dieselben Abmessungen und Auflösungen haben, ist diese Vorgehensweise durchgehend anwendbar. Die in Abbildung 5.7 eingezeichneten grünen Linien markieren die rechnerisch ermittelte Laufzeit bis zum Modellnullpunkt. Die roten Linien markieren den größten positiven Peak, der als Referenzpunkt herangezogen wurde. Die hierfür verwendeten direkten Wellen zwischen Sender und Empfänger wurden für jede Frequenz isoliert modelliert und werden im Weiteren als „direkte Welle“ bezeichnet.

5.2.1 Subtraktion der direkten Welle

Die unbearbeiteten Ergebnisse der Modellierung mit „gprMax“ werden von dem Ausschlag der direkten Welle zwischen Sender und Empfänger dominiert. Die darauf folgenden Reflexionen sind dadurch nicht zu erkennen, wie in Abbildung 5.10a gezeigt wird. Durch das Abziehen der Amplitude der direkten Welle im Laufzeitdiagramm erreicht man eine im Verhältnis stärker ausgeprägte Darstellung der Reflexionen im weiteren Laufzeitbereich. In Abbildung 5.7 sind die direkten Wellen als „A-Scan“ (oder auch single-tray) abgebildet. Ein A-Scan entsteht, wenn die vom Empfänger detektierten Signale gegen die Zeit geplottet werden. In der Regel wird während eines A-Scans die Position von Sender und Empfänger nicht verändert. Durch das Abziehen der direkten Welle bleibt in den Modellen mit Tübbing als erster Peak ausschließlich die Reflexion an der Tübbingoberfläche übrig. Da sich die elektromagnetische Welle an dieser Stelle von einem Medium mit niedriger Permittivität in ein Medium mit höherer Permittivität ausbreitet ist die Reflexion invers.

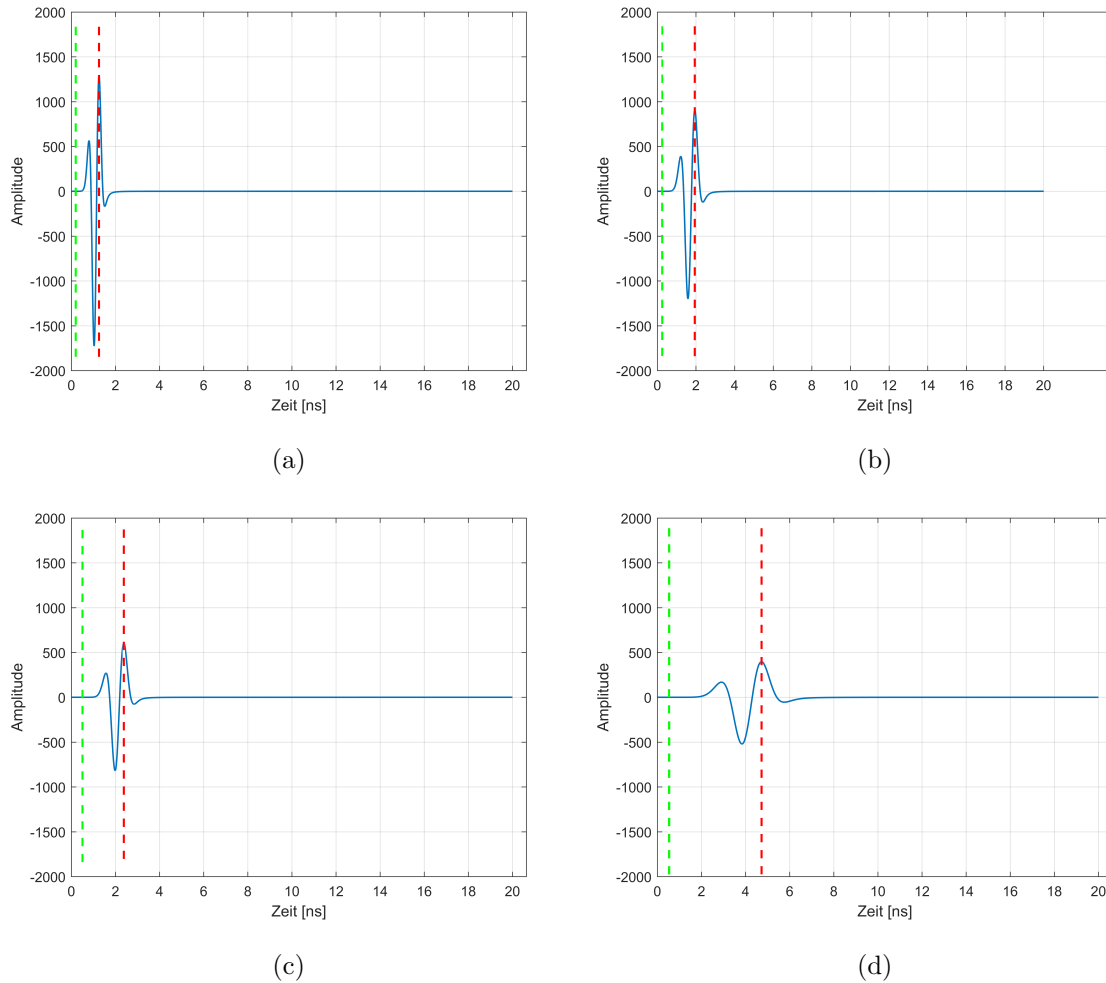


Abbildung 5.7: Direkte Welle von Sender zu Empfänger bei (a) 1600 MHz, (b) 1000 MHz, (c) 900 MHz und (d) 400 MHz.

5.2.2 Time-Gain-Methode

Aufgrund der kontinuierlichen Dämpfung, hervorgerufen durch die durchdrungenen Medien, nimmt die Signalstärke mit der Eindringtiefe stetig ab. Aus diesem Grund sind reflektierte Amplituden bei größeren Laufzeiten entsprechend schwächer ausgeprägt als bei niedrigen Laufzeiten. Zur Verstärkung dieser Amplituden werden diese mittels der „Time-Gain-Methode“ verstärkt. Die Kompensation dieses Signalverlustes ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Hierbei wird die Signalstärke in Abhängigkeit der Laufzeit mit einer vordefinierten Funktion multipliziert (Jol, 2009, S. 34 f.).

Die Kompensationskurve wird durch die Formel 5.1 beschrieben. Hierbei richtet sich z_{max} nach dem größten Ausschlag der Rohdaten. $limit$ beschreibt den Punkt aus y_{var} , an dem die

Kurve endet und in eine horizontale Linie übergeht. Für die Anwendung der „Time-Gain-Methode“ auf Rohdaten wurde für den Parameter z_{max} ein Wert von 1800 verwendet. Bei der Anwendung auf Ergebnisse der Subtraktionsmethode wurde z_{max} auf 500 gesetzt. In beiden Fällen wurde $limit$ auf 1200 und der Exponent exp auf 2 gesetzt. Die Kompensationskurve wird anhand der Formel 5.1 errechnet, wobei y_{var} der Position der aktuell berechneten Zahl in dem Datensatz entspricht und $komp_tg$ dem dazugehörigen Kompensationswert, welcher mit dem Rohwert multipliziert wird.

$$komp_tg = y_{var}^{exp} * \frac{z_{max}}{limit^{exp}} \quad (5.1)$$

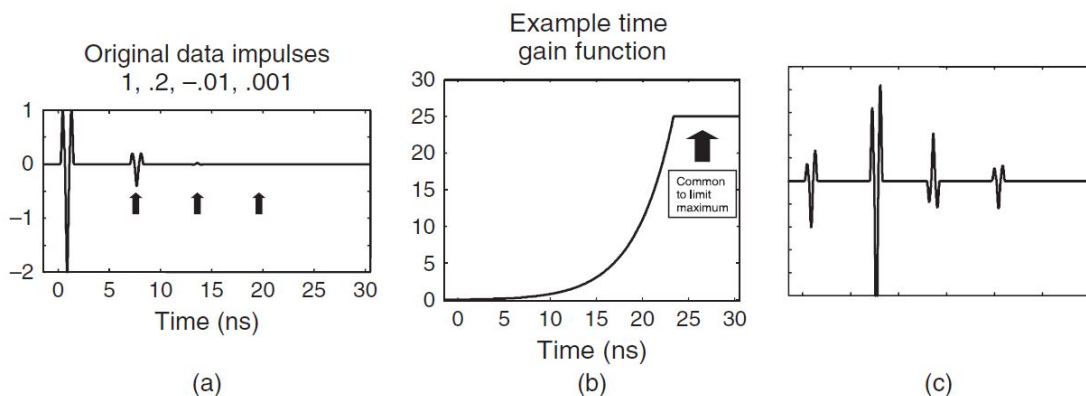


Abbildung 5.8: Time-Gain-Berechnung entnommen aus Jol (2009) S. 35 zeigt (a) ein Radarogramm ohne Bearbeitung, (b) die Kompensationskurve, (c) das Radarogramm nach Multiplikation mit der Kompensationskurve

5.2.3 Anwendung der Nachbearbeitung

Bei der Kombination der Methoden wurden für die Time-gain-Methode immer die Ergebnisse der Subtraktionsmethode verwendet. Die Abbildungen 5.9 und 5.10 zeigen die Auswirkungen der Nachbearbeitung auf die Daten. Die Abbildungen 5.9a, 5.9b und 5.9c zeigen die Single-Tray-Analysen der Abbildungen 5.10a, 5.10b und 5.10d. Die Positionen der entnommenen A-Scans sind in Abbildung 5.10 durch die vertikalen gestrichelten Linien in orange und blau markiert. Dieselben Farben wurden in den Single-tray-Analysen passend verwendet, um die Daten darzustellen. Die vertikalen orangenen Linien in den A-Scans markieren die Oberflächen

des Tübbings, während die blauen für die Positionen der Bewehrungslagen stehen. In Abbildung 5.10 wurde allerdings keine Bewehrung simuliert.

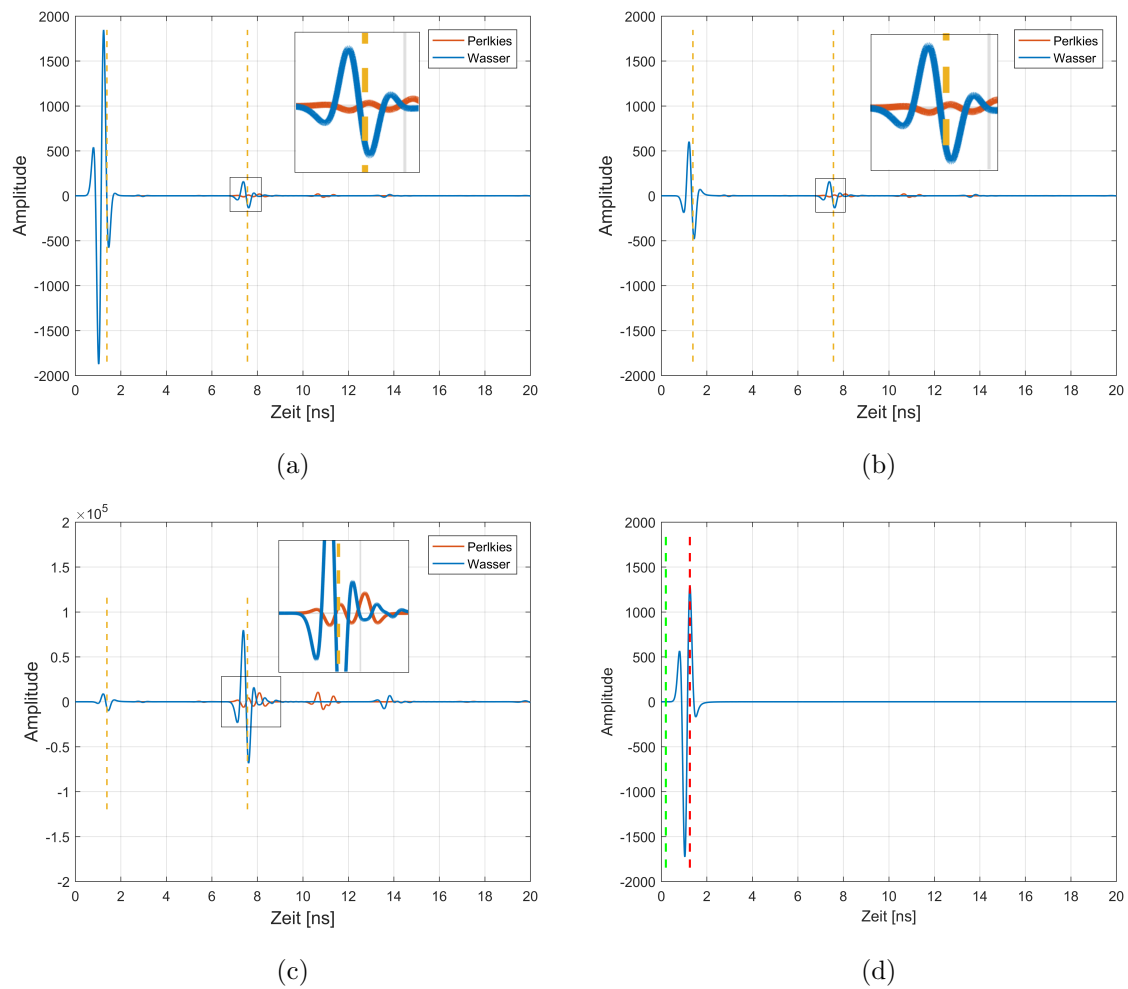


Abbildung 5.9: Single-tray-Analyse. (a) Rohdaten, (b) Subtraktions-Methode, (c) Subtraktion und Time-gain kombiniert und (d) direkte Welle. Für 1600 MHz ohne Bewehrung und Wasser als Hohlraumfüllung.

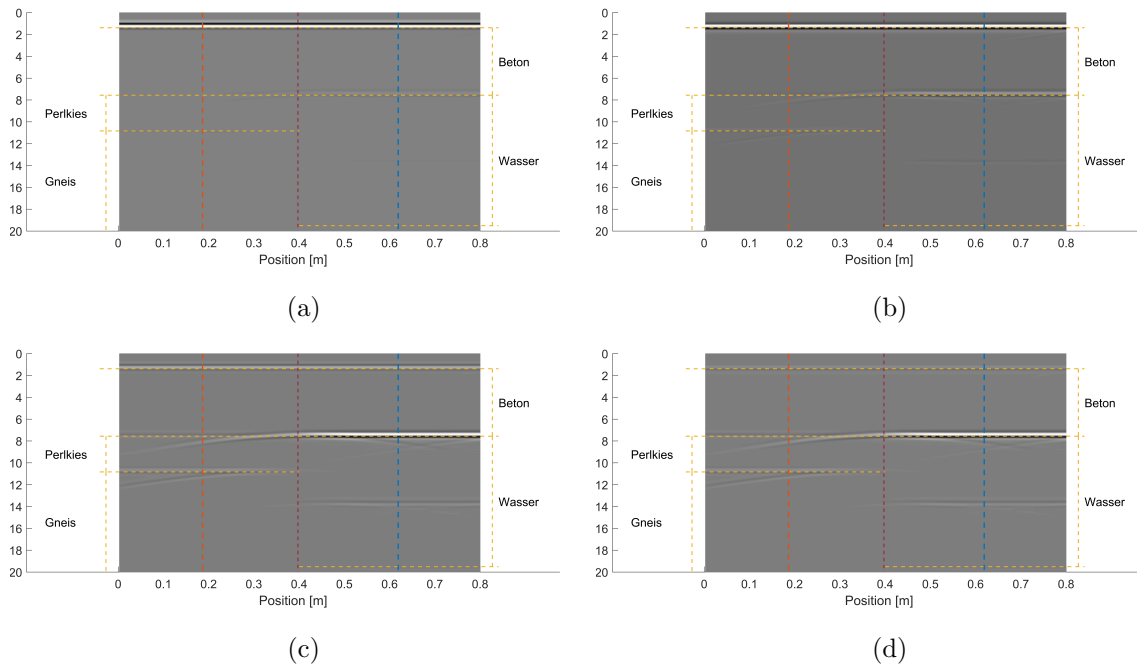


Abbildung 5.10: Auswirkungen der Nachbearbeitung. (a) Rohdaten, (b) Subtraktions-Methode, (c) Time-gain-Methode und (d) Subtraktion und Time-gain kombiniert. Für 1600 MHz ohne Bewehrung und Wasser als Hohlraumfüllung.

Abbildung 5.11a zeigt die Rohdaten eines Modells mit 14 cm Bewehrungsabstand bei 1600 MHz. Das Laufzeitdiagramm wird von der Amplitude der direkten Welle bei 1.5 ns dominiert. Die ab 2 ns auftretenden Schatten der Bewehrungslagen sind schwach erkennbar. Die Grenze zwischen dem Betontübbing und dem Wasser gefüllten Hohlraum, rechts der rot gestrichelten Mittellinie ist nicht erkennbar. Durch die Subtraktion der direkten Welle in Abbildung 5.11b sind die Bewehrungslagen besser zu sehen. Die invertierte Reflexion an der Tübbingoberseite kann bei 1.5 ns deutlich erkannt werden. Hier liegt nun ein weißer Peak zeitlich vor dem Schwarzen. Die Tübbing-Wasser Grenze ist direkt an der orange gestrichelten Markierung rechts der Mittellinie zu erkennen. Abbildung 5.11c zeigt die Anwendung der Time-Gain-Methode auf die Rohdaten. Durch die Verstärkung der Daten im hinteren Laufzeitbereich ist die zweite Bewehrungslage, gekennzeichnet durch die blaue horizontale Linie bei 7.5 ns, gut zu erkennen. Die Tübbing-Wasser Grenze ist ebenfalls verstärkt im Vergleich zu den Abbildungen 5.11a und 5.11b. In 5.11d wird die Kombination der Subtraktionsmethode mit der Time-Gain-Methode gezeigt. Die tunnelseitige Tübbingoberfläche ist durch die Subtraktion der direkten Welle wieder invertiert dargestellt. Durch die Anwendung der Time-Gain-Methode ist die bergseitige Bewehrungslage und die direkt dahinter liegende Grenze Betontübbing-

Ringspalt stark verstärkt. An der links von der Mittellinie liegenden Tübbing-Perlkies Grenze ist aufgrund des geringen Unterschiedes der dielektrischen Eigenschaften keine Reflexion erkennbar.

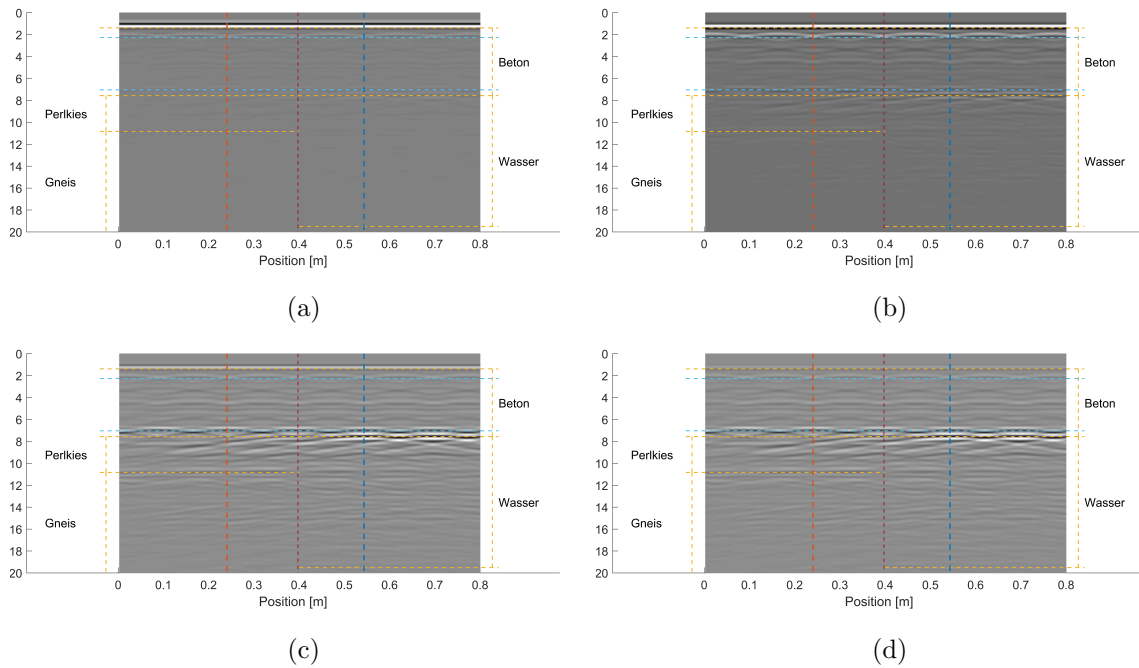


Abbildung 5.11: Auswirkungen der Nachbearbeitung (a) Rohdaten, (b) Subtraktions-Methode, (c) Time-gain-Methode und (d) Subtraktion und Time-gain kombiniert. Für 1600 MHz, 14 cm Bewehrungsabstand und Wasser als Hohlraumfüllung.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Positive Amplituden werden in den Laufzeitdiagrammen weiß, negative schwarz abgebildet. Aufgrund der regelmäßigen Bedingungen liegt die bergseitige Tübbingoberfläche mit der in Kapitel 5.1 beschriebenen Eigenschaften konstant bei 7,5 ns. Die in den Radargrammen durch vertikale gestrichelte Linien angezeigten Positionen der A-Scans wurden so gewählt, dass sie bei vorhandener Bewehrung genau auf halber Strecke zwischen zwei Bewehrungslagen liegen. An diesen Positionen ist der Einfluss der Bewehrung am wenigsten störend. Da in den präsentierten Daten die direkte Welle bereits abgezogen wurde, ist der erste Peak invertiert.

6.1 Betrachtung der Laufzeiten und Amplituden ohne Einfluss der Bewehrung

Um einen ungestörten Einblick in die Reflexionen der Schichtgrenzen zu geben, wurden idealisierte Modelle ohne Bewehrung erstellt. Diese sind in den Abbildungen 6.1 und 6.2 mit 1600 MHz Arbeitsfrequenz und den Hohlräumfüllungen Wasser beziehungsweise Luft dargestellt. Die Positionen der aus den Radargrammen entnommenen A-Scans sind als vertikale gestrichelte orange und blaue Linien gekennzeichnet. Die in den Radargrammen horizontal verlaufenden gestrichelten Linien zeigen die Grenzen der Medien. Diese Grenzen wurden während der Datenbearbeitung in Matlab mit Hilfe der Gleichungen 4.7 und 4.8, welche in Kapitel 4.1.2 beschrieben sind, ermittelt.

In Abbildung 6.1b lässt sich die Phasenumkehr an der Tübbing-Wasser-Grenze erkennen, da hier der positive (weiße) Peak zeitlich vor dem negativen (schwarzen) liegt. Der Beginn und das Ende des Tübbings ist durch die vertikalen, orangen Linien gekennzeichnet. An der Tübbing-Perlkies-Grenze tritt diese Phasenumkehr nicht auf, da die Permittivität von Perlkies geringer ist als die des Tübbings. Da sowohl Perlkies als auch Luft eine geringere

Permittivität als jene der Tübbing aufweisen, ist in Abbildung 6.2b am Ende des Tüblings das Signal für beide Fälle nicht invertiert (negativer Peak vor positivem). Durch den stärkeren Kontrast an der Tübbing-Luft-Grenze ist die Amplitude rechts der Mittellinie stärker ausgeprägt. Bei 9 ns ist die Grenze Luft-Gneis durch eine stark invertierte Reflexion erkennbar. Die hohe Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im Medium Luft führt dazu, dass die Reflexionen der Grenzen des luftgefüllten Hohlräumtes einen geringen zeitlichen Abstand aufweisen. Die Reflexion an der Perlkies-Gneis Grenze liegt links der Mittellinie bei 11 ns.

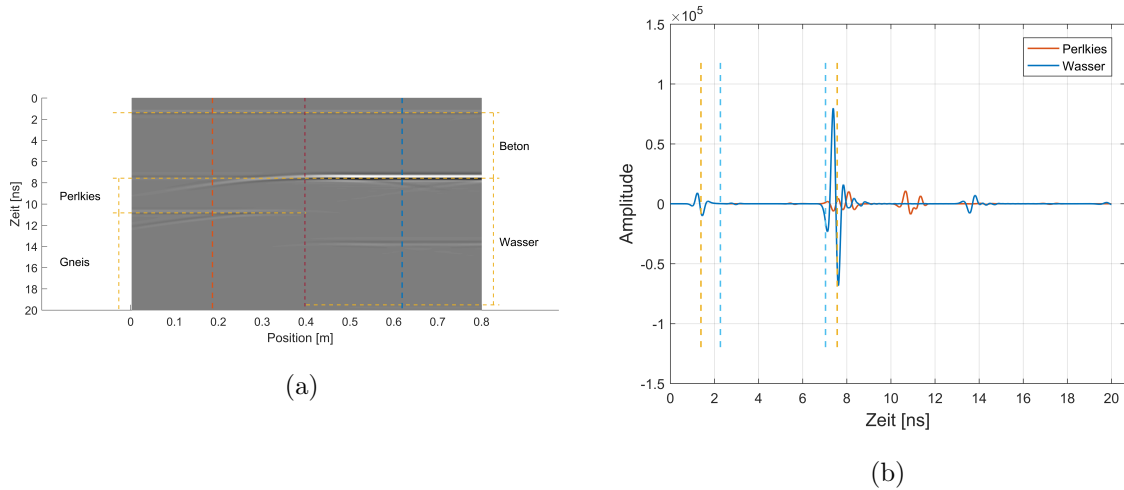


Abbildung 6.1: Modelle ohne Bewehrung bei 1600 MHz und Wasser als Hohlräumfüllung.

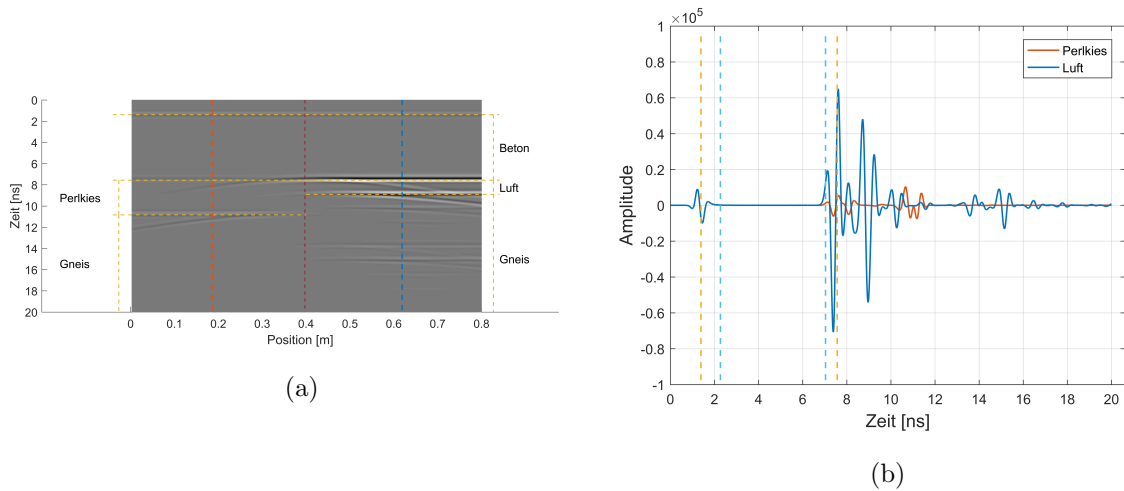


Abbildung 6.2: Modelle ohne Bewehrung bei 1600 MHz und Luft als Hohlräumfüllung.

6.2 Parameterstudie: Variation der Bewehrungsabstände

Diese Parameterstudie wurde erstellt, um den Einfluss der Bewehrungsdichte auf die Darstellbarkeit der Grenzflächen zu ermitteln. Als Hinterfüllungsmedium wurde auf der linken Modellseite Perlkies verwendet. Die rechte Modellhälfte wurde mit Luft oder Wasser als Hohlraumfüllung modelliert. In der Abbildung 6.3 ist die Abnahme der Bewehrungsabstände von 14 cm bis 6 cm bei 1600 MHz und Wasser als Hohlraumfüllung dargestellt. Die Bewehrung ist in den Radargrammen durch blaue horizontale Linien markiert.

In Abbildung 6.3a wurde ein Bewehrungsabstand von 14 cm simuliert. Die tunnelseitige Bewehrung liegt bei 2 ns und die bergseitige bei 7 ns. Der Übergang Tübbing - Hohlraum ist durch die Phasenumkehr deutlich als negativer Ausschlag erkennbar, da der Permittivitätsunterschied zwischen Beton und Wasser 73 beträgt. Dieser Ausschlag ist negativ, da die elektromagnetische Welle von einem Medium mit niedriger Permittivität in ein Medium mit hoher Permittivität propagiert. Dieser Zusammenhang ist durch die Formel 4.16 in Kapitel 4.1.5 belegt. Da die Differenz der Permittivität zwischen Beton und Perlkies nur 1 beträgt, kommt es an dieser Schichtgrenze zu keinem differenzierbaren Ausschlag. An der Grenze Perlkies - Gneis ist ein schwacher positiver Ausschlag zu erkennen.

Abbildung 6.3b zeigt bei 12 cm Bewehrungsabstand noch keine nennenswerte Verschlechterung des Auflösungsvermögens bezüglich der Tübbing-Wasser-Grenze. Allerdings ist bereits hier der Übergang Perlkies - Gneis nicht mehr erkennbar. Abbildung 6.3c hat bereits einen Bewehrungsabstand von 10 cm. Hier scheint der Negativausschlag der Tübbing-Hohlraum-Grenze nicht mehr als durchgehende Linie auf. Bei einem Bewehrungsabstand von 8 cm wie in Abbildung 6.3d gezeigt, ist die besprochene Grenze als schwach ausgeprägte Linie erkennbar. 6 cm Bewehrungsabstand lassen keinerlei Unterscheidung der Medien zu, wie in 6.3e ersichtlich ist. Hier dominieren die Schatten der Bewehrungseisen das gesamte Radargramm. In keinem der abgebildeten Modelle ist die Grenze Wasser - Gneis erkennbar. Die Single-Tray-Analyse in Abbildung 6.4 zeigt deutlich die starke Zunahme von Störungen durch eine engmaschigere Bewehrung.

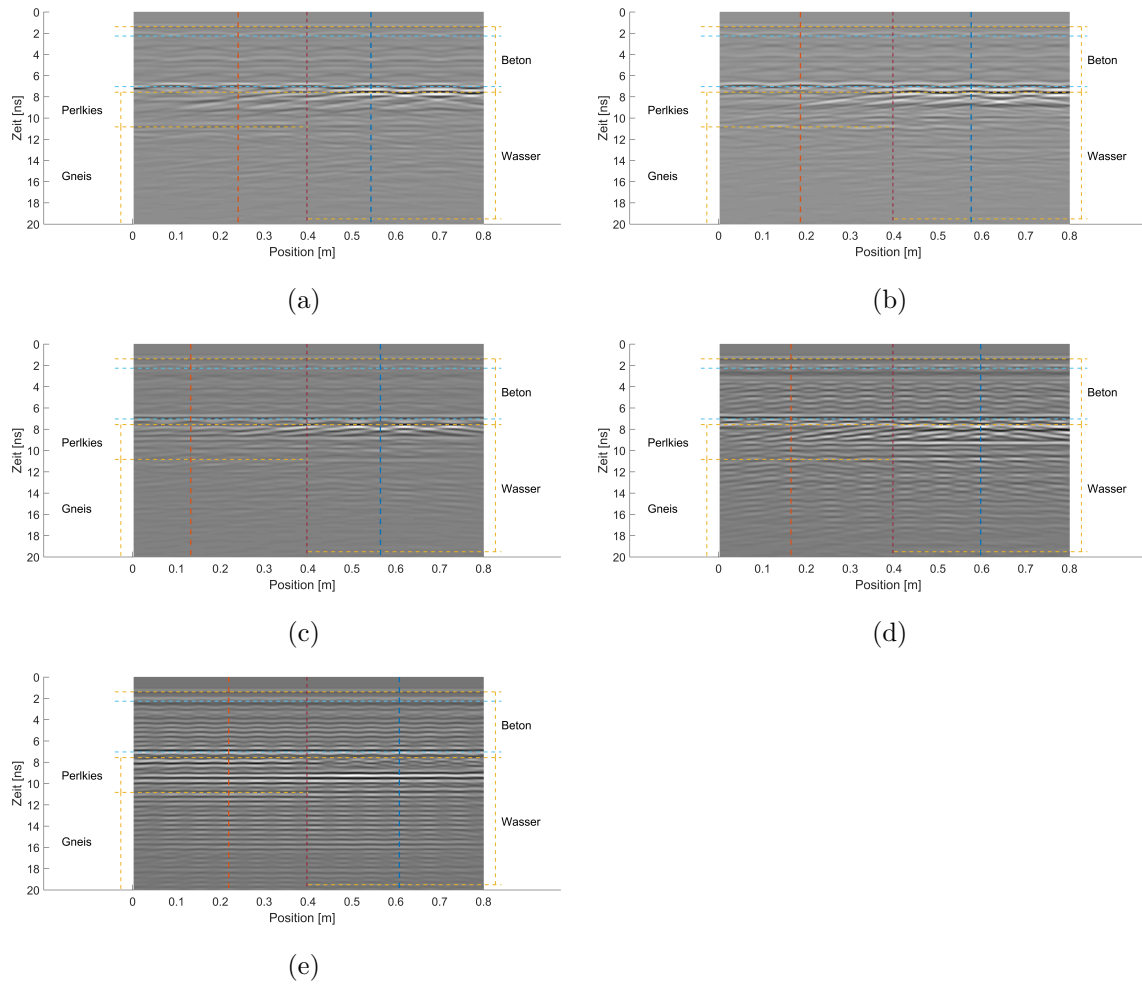


Abbildung 6.3: Modelle mit Bewehrung bei 1600 MHz, Wasser als Hohlräumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.

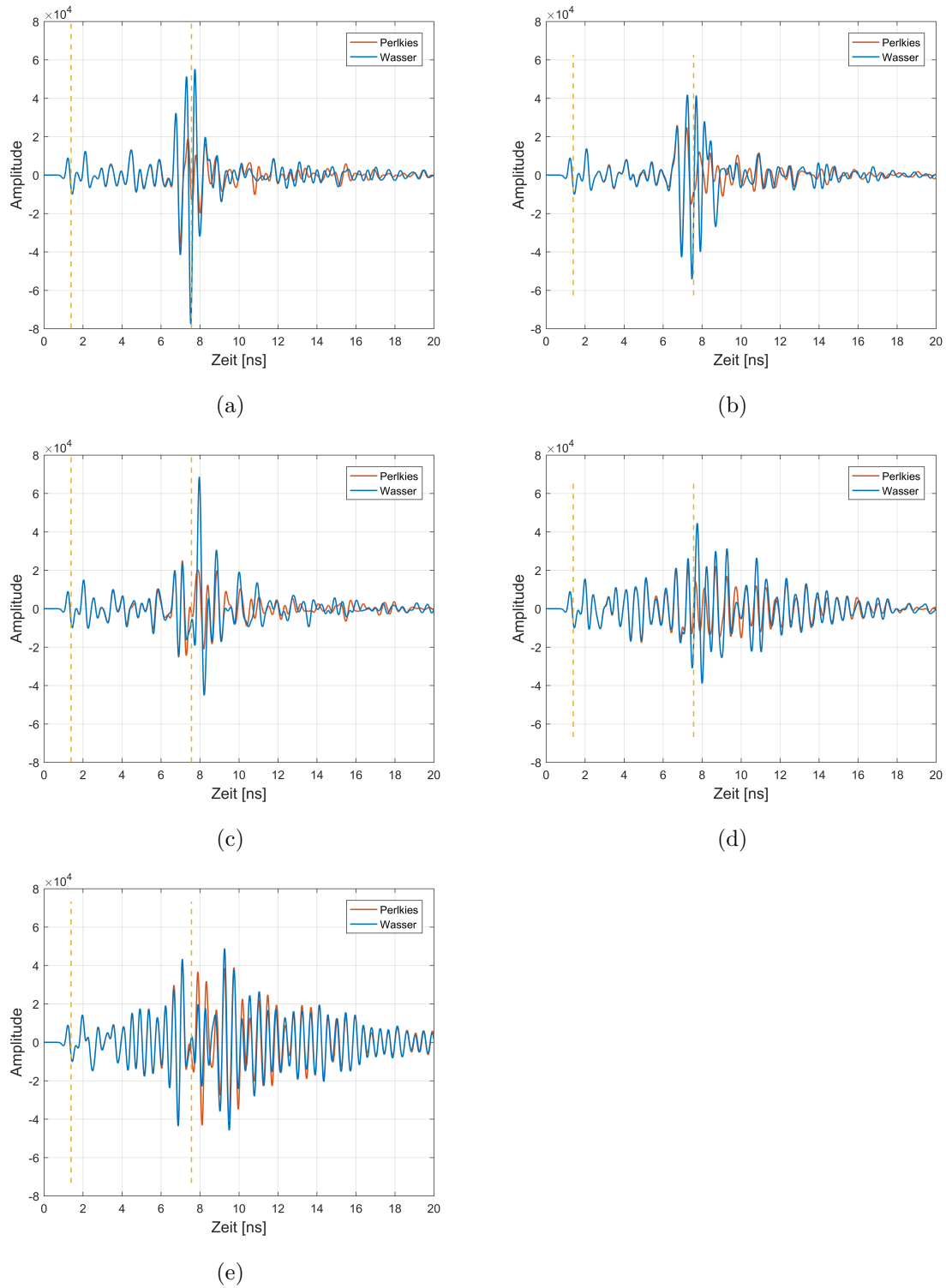


Abbildung 6.4: Single-Tray-Analyse mit Bewehrung bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.

Den Abbildungen 6.5 und 6.6 liegen dieselben Modelle wie den vorangegangenen zugrunde, je-

doch wurde hier der Perlkies dem luftgefüllten Hohlraum gegenübergestellt. Dadurch kommt es an der Kontaktfläche mit dem Tübbing zu einem positiven Ausschlag, da sich die elektromagnetische Welle hier von einem Medium höherer Permittivität in ein Medium niedriger Permittivität ausbreitet. Bei 8,5 ns liegt, bedingt durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft, die Grenze Luft - Gneis. Dieser Übergang ist aufgrund der Medieneigenschaften durch einen negativen Peak gekennzeichnet. Auch in dieser Anordnung lassen sich bei einem Bewehrungsabstand von weniger als 10 cm keine Aussagen über den Verfüllungsgrad des Ringspaltes treffen.

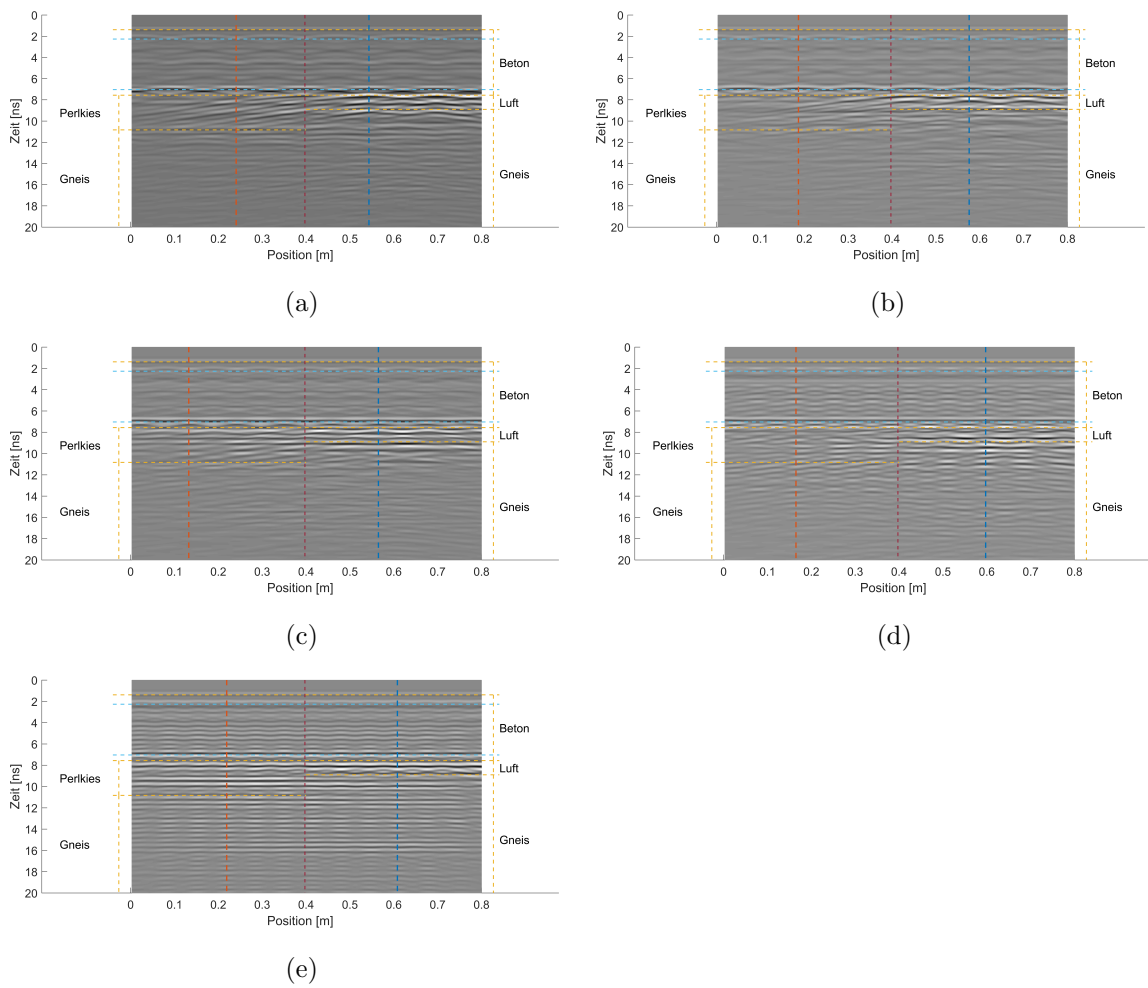


Abbildung 6.5: Modelle mit Bewehrung bei 1600MHz, Luft als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.

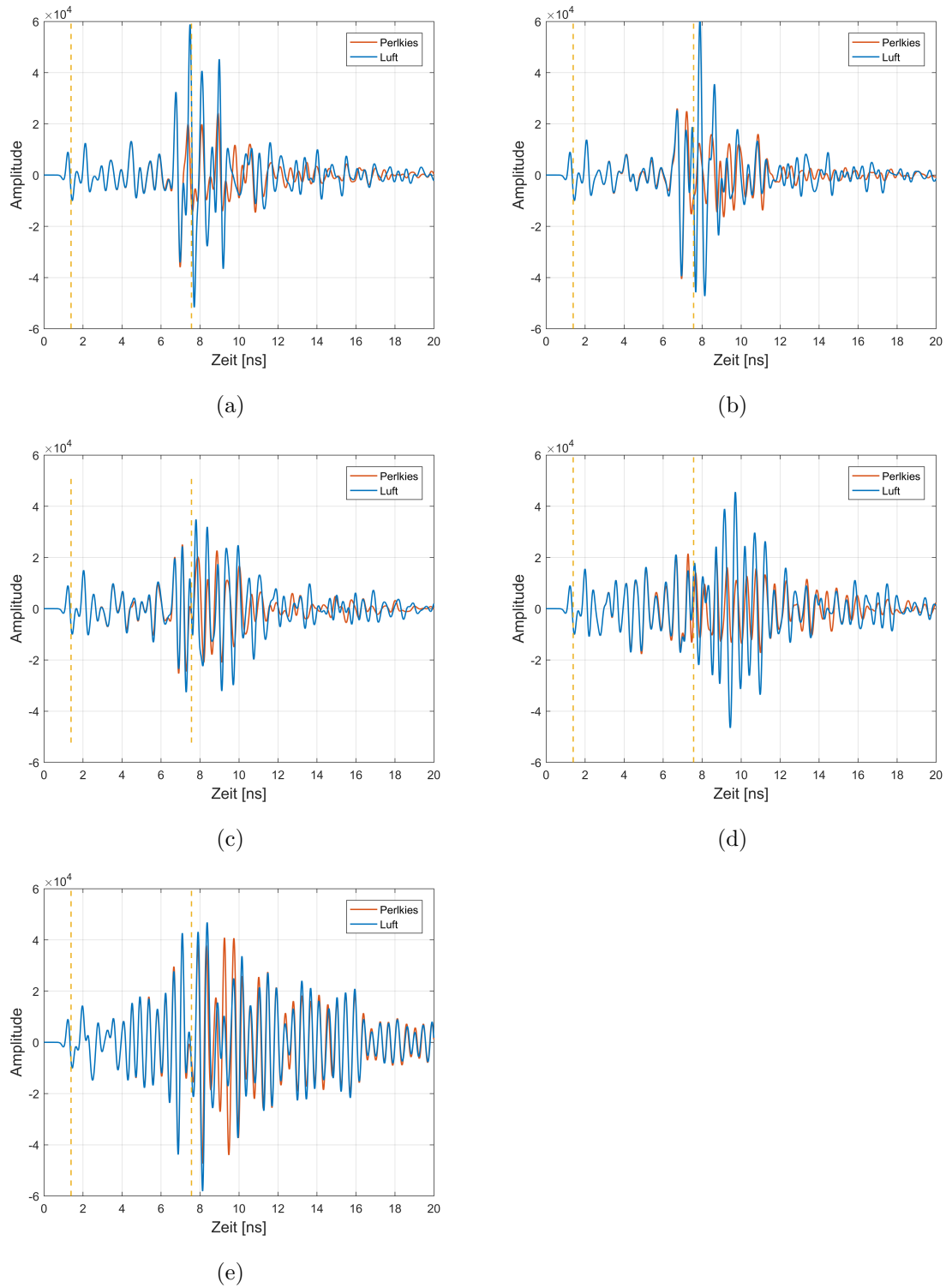


Abbildung 6.6: Single-Tray-Analyse mit Bewehrung bei 1600 MHz, Luft als Hohraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm, (b)12 cm, (c)10 cm, (d)8 cm und (e)6 cm.

Abbildung 6.7 zeigt die Amplituden der einzelnen Medien am Übergang Tübing - Ringspalt. Während sich für das Medium Wasser der Trend abzeichnet bei abnehmendem Bewehrungsab-

stand an Intensität zu verlieren, ist dies bei den Medien Luft und Perlkies nicht zu erkennen. Perlkies zeigt sogar eine Zunahme der Intensität. Von der Annahme ausgehend, dass sich bei größerer Bewehrung durch die Störungen die Amplituden angleichen, wurde Abbildung 6.8 erstellt. Hier werden die Verhältnisse der in Abbildung 6.7 gezeigten Werte zueinander dargestellt. Die blaue Linie repräsentiert das Verhältnis der Medien Wasser und Luft. An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass sich die Absolutwerte der beiden Medien bei abnehmenden Bewehrungsabständen annähern. Ähnliches gilt für den Vergleich Perlkies - Luft. Der Vergleich von Wasser und Luft zeigt keinerlei Tendenzen. Der Vergleich einzelner Peaks an diesem Punkt gestaltet sich schwierig, da die Bewehrung vor allem bei Bewehrungsabständen unter 10 cm störend wirkt. Dabei kommt es über die gesamte Messlänge zu einer Angleichung der Ausschläge wie in den Abbildungen 6.4c, 6.4d und 6.4e zu sehen ist. Hier schlagen nach dem Tübbing die Amplituden beider Medien synchron aus, obwohl an der Tübbing - Ringspalt Grenze bei Wasser eine Phasenumkehr stattfindet und bei Perlkies nicht. Dies legt den Schluss nahe, dass die für diese Laufzeit erhaltenen Reflexionen überwiegend nicht von der Grenze Tübbing - Ringspalt stammen, sondern durch Pendeln von Reflexionen zwischen den Bewehrungsseisen entstehen.

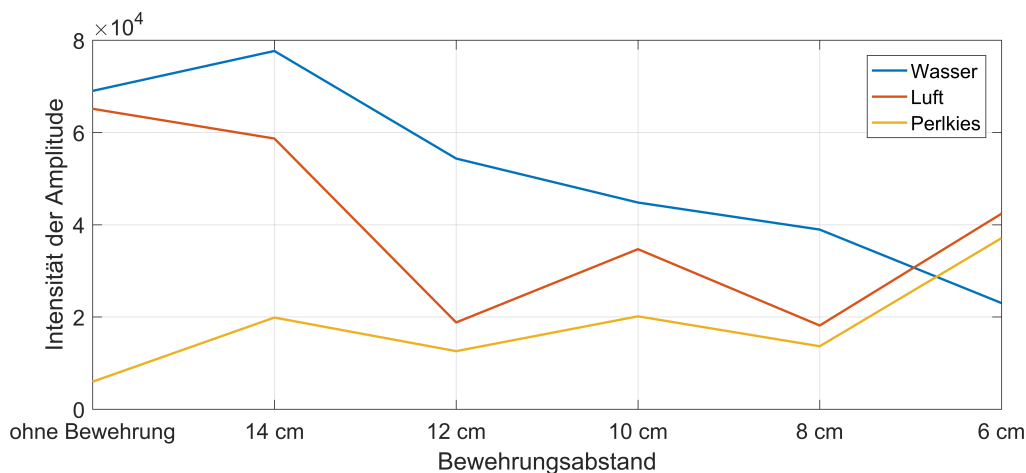


Abbildung 6.7: Absolutwerte der Amplituden am Ende des Tübbings bei 1600 MHz und abnehmendem Bewehrungsabstand

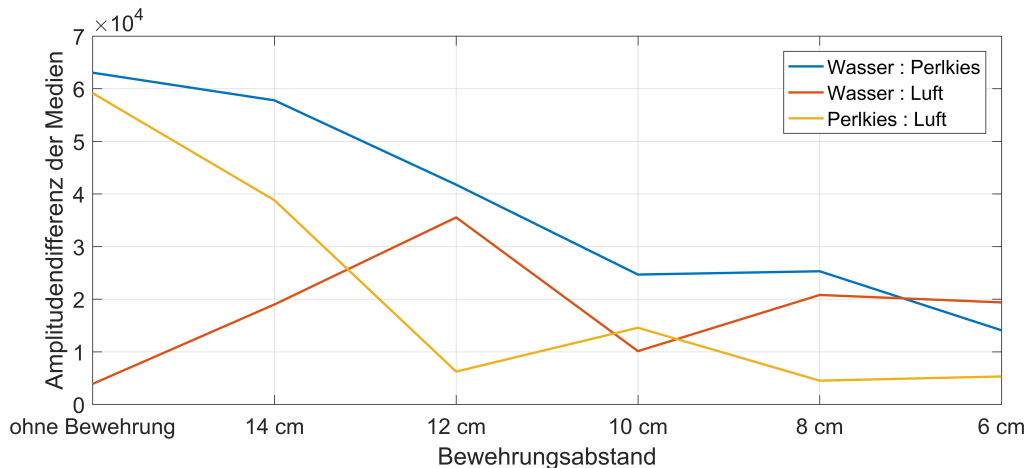


Abbildung 6.8: Vergleich der Amplituden am Ende des Tübbings bei 1600 MHz und abnehmendem Bewehrungsabstand

Aufgrund der besseren Darstellbarkeit der Ergebnisse (siehe Kapitel 6.3) wurden in diesem Kapitel ausschließlich Modelle mit einer Frequenz von 1600 MHz präsentiert. Sowohl die hier gezeigten Modelle, als auch jene mit alternativen Frequenzen, sind dem Anhang beigelegt.

6.3 Parameterstudie: Variation der Arbeitsfrequenz

In diesem Abschnitt werden Modelle mit unterschiedlichen Frequenzen verglichen. Unterhalb des Tübbings befindet sich auf der linken Hälfte der mit Perlkies gefüllte und rechts der mit Wasser bzw. Luft gefüllte Ringspalt. Hierbei wird der erwartete Ausschlag an den Schichtgrenzen aufgezeigt. Prinzipiell steigt bei höheren Frequenzen das Auflösungsvermögen. Im Gegenzug dazu sinkt jedoch die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen. Für jede Messanordnung wurden Berechnungen mit 4 verschiedenen Arbeitsfrequenzen durchgeführt. Die folgenden Abbildung vergleichen die Frequenzen 1600 MHz, 1000 MHz, 900 MHz und 400 MHz.

Während in den Abbildungen 6.9a und 6.10a die Beton-Wasser-Grenze mit 1 ns aufgelöst ist, wird dieselbe Grenze in 6.9d und 6.10d über einen Bereich von 4 ns dargestellt, da sich bei abnehmenden Frequenzen die Wellenlänge erhöht. Die Abnahme des Auflösungsvermögens lässt sich anhand der Single-Tray-Analyse in Abbildung 6.10 gut nachvollziehen. In Abbildung 6.11 zeigt sich, dass die Frequenzen 1600 MHz und 1000 MHz gut sichtbare Materialgrenzen darstellen, während 900 MHz und insbesondere 400 MHz für eine verlässliche Auflösung zu gering sind. Dies zeigt sich auch dadurch, dass in Abbildung 6.12 bei abnehmender Frequenz

die Ähnlichkeit der Amplituden von Perlkies und Wasser zunimmt.

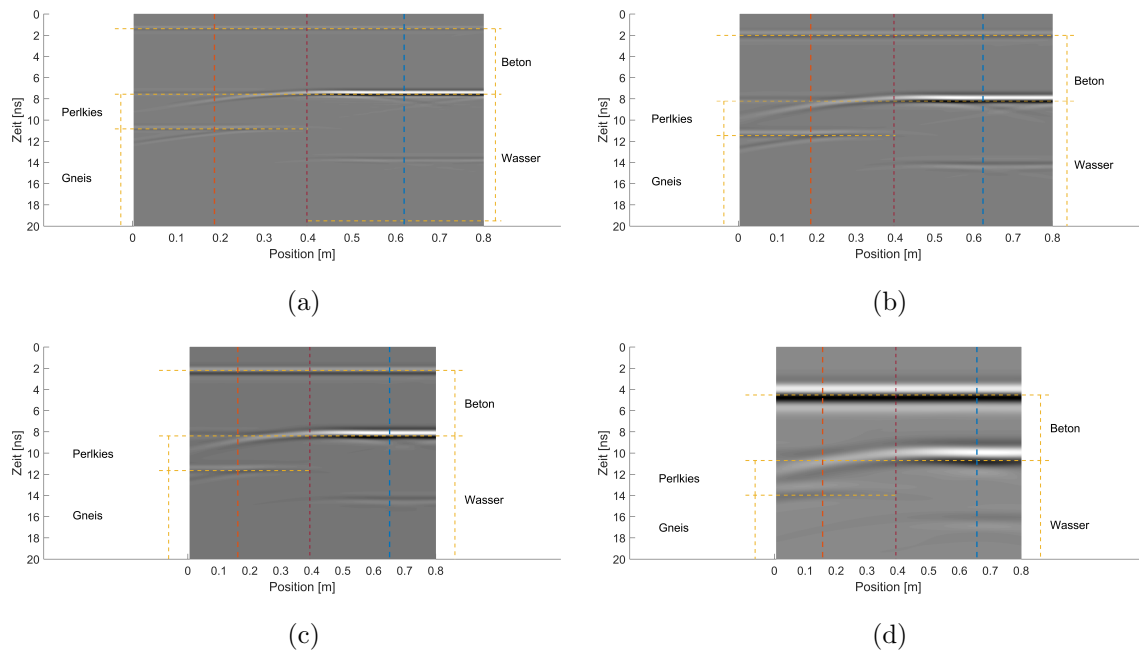
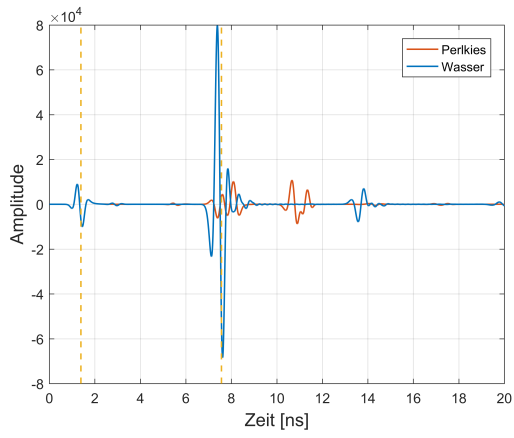
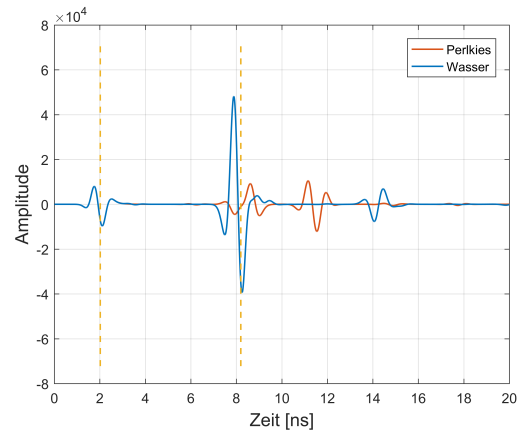


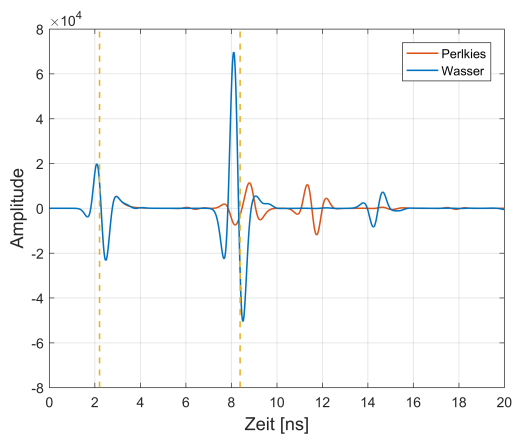
Abbildung 6.9: Modelle ohne Bewehrung, Wasser als Hohraumfüllung bei (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz



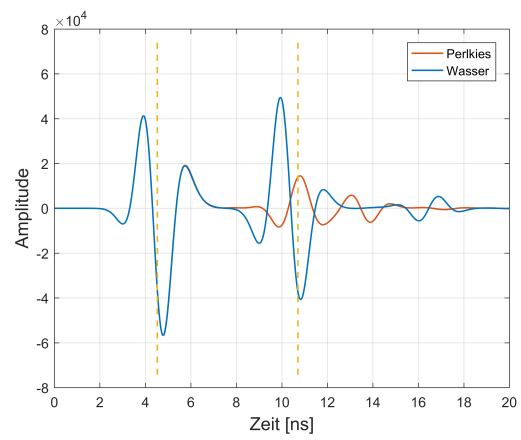
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 6.10: Modelle ohne Bewehrung, Wasser als Hohlräumfüllung bei (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz

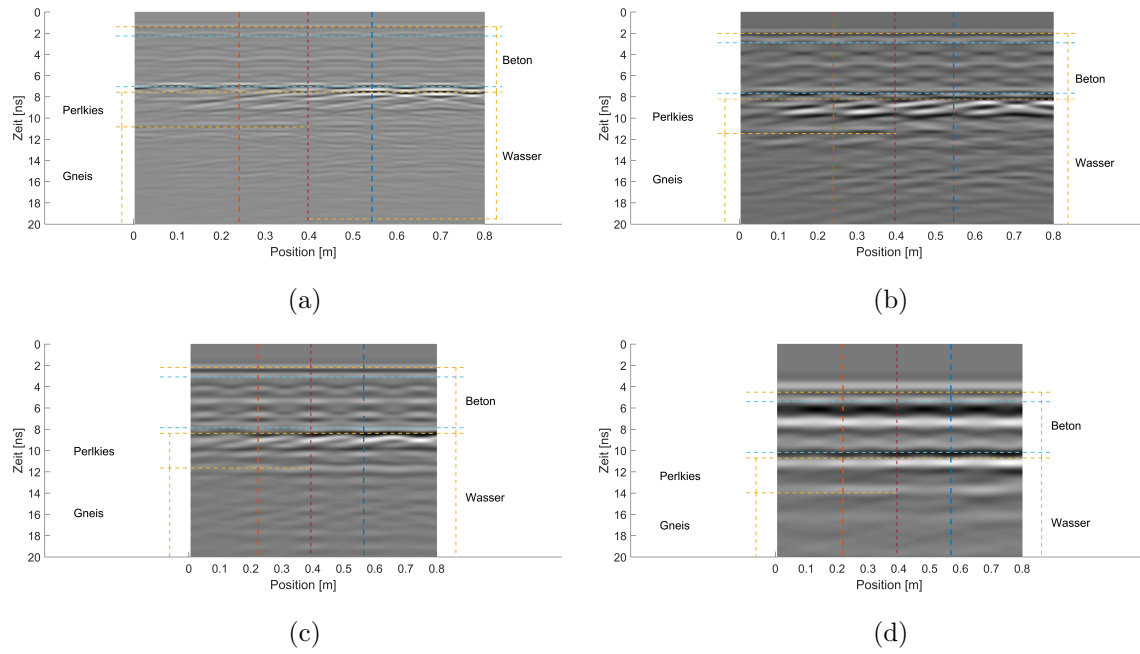


Abbildung 6.11: Modelle mit Bewehrungsabstand 14 cm, Wasser als Hohlraumfüllung bei
 (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz

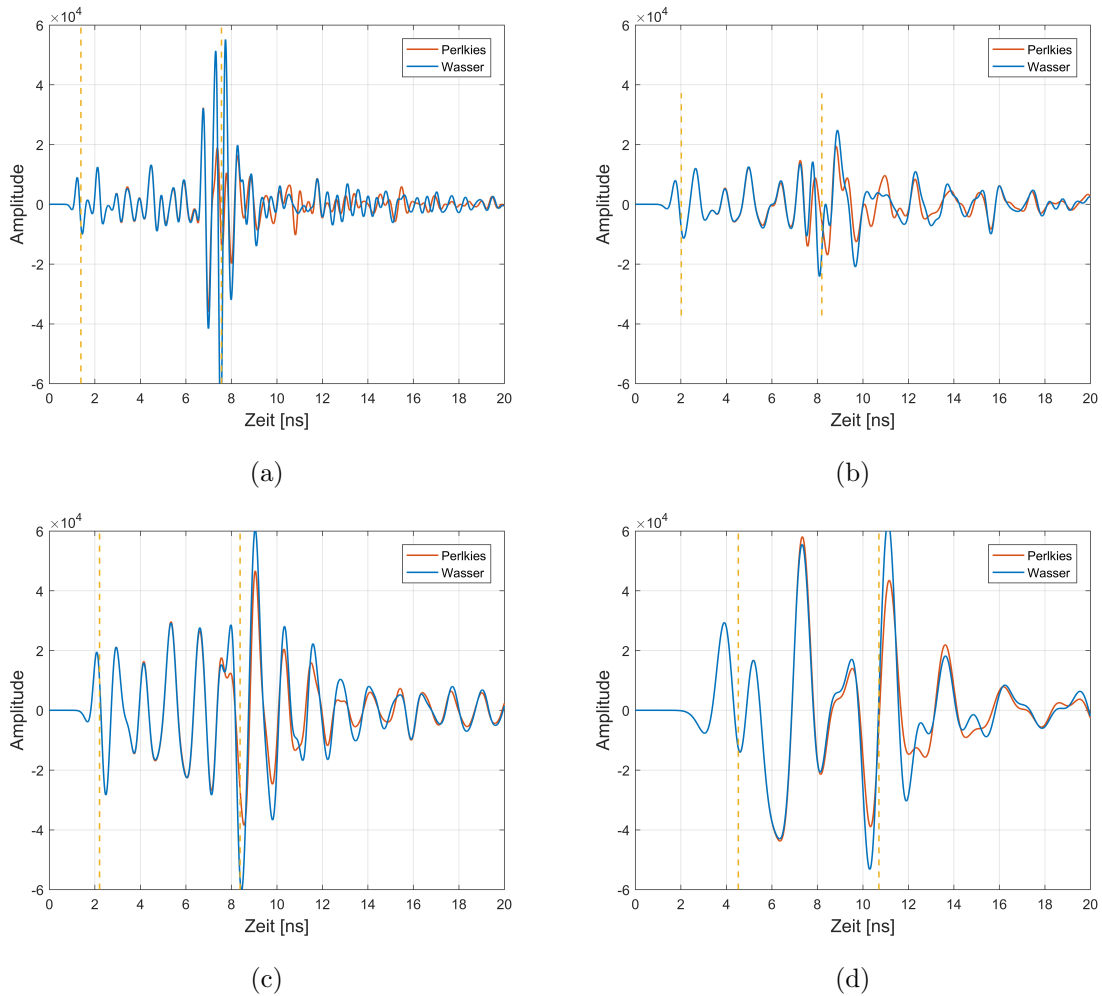


Abbildung 6.12: Modelle mit Bewehrungsabstand 14 cm, Wasser als Hohraumfüllung bei
 (a)1600 MHz, (b)1000 MHz, (c)900 MHz und (d)400 MHz

6.4 Variation der Tübbingdicke

In dieser Modellstrecke wurde die Mächtigkeit des Tübbings auf 50 cm erhöht, wodurch die Tübbing-Ringspalt-Grenze bei 10 ns erscheint. Auch der veränderte Abstand der Bewehrungslagen zueinander hat Einfluss auf die Ergebnisse, da sich die Geometrie innerhalb des Tübbings verschiebt. Dieser beträgt nun 43 cm. Es wurden Bewehrungsabstände von 14 cm und 10 cm verwendet. In 6.13a ist die Grenze Tübbing-Wasser noch gut zu erkennen, ebenso die Tübbing-Luft Grenze in 6.15a. Bei 10 cm Bewehrungsabstand ist der Übergang Tübbing-Hohlraum, wie in 6.13b und 6.15b gezeigt, nicht mehr als durchgehende Linie dargestellt. Hier beginnen die erhöhten Abstände zwischen den beiden Bewehrungslagen negativ Einfluss zu nehmen. Die in den Abbildungen 6.14 und 6.16 gezeigten Single-Tray-Analysen zeigen, dass

bei 14 cm Bewehrungsabstand das Rauschen am bergseitigen Tübbingende deutlich geringer ausfällt als bei jenen mit 10 cm Bewehrungsabstand. In den Abbildungen 6.17 und 6.18 sind anhand des Modellaufbaues mit Wasser als Hinterfüllungsmedium bei 14 cm Bewehrungsabstand auch die Frequenzen 1000 MHz, 900 MHz und 400 MHz dargestellt. Bei 1000 MHz in Abbildung 6.17a ist die Grenze Tübbing-Wasser noch gut zu erkennen. In der dazugehörigen Single-Tray-Analyse in Abbildung 6.18a ist der Peak bei 10.5 ns deutlich ausgeprägt. Bei den abnehmenden Frequenzen lässt sich die besagte Grenze nicht mehr eindeutig identifizieren. In den Single-Tray-Analysen 6.18b und 6.18c sind die Ausschläge am bergseitigen Tübbingende nicht mehr markant und verschwimmen in den Störgeräuschen.

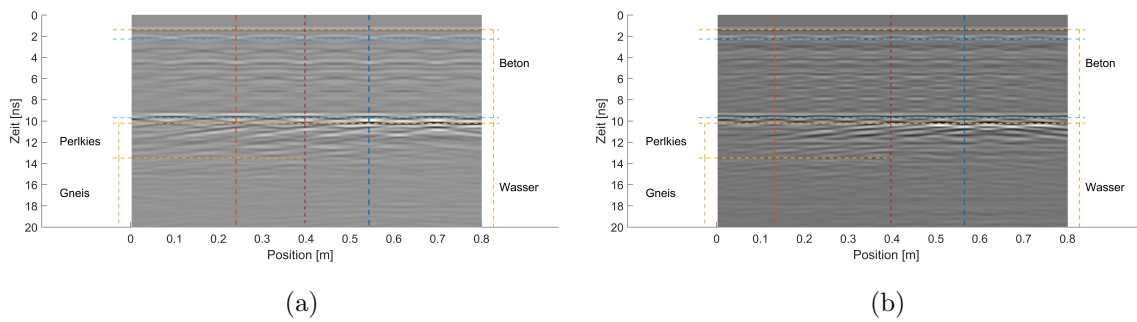


Abbildung 6.13: Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.

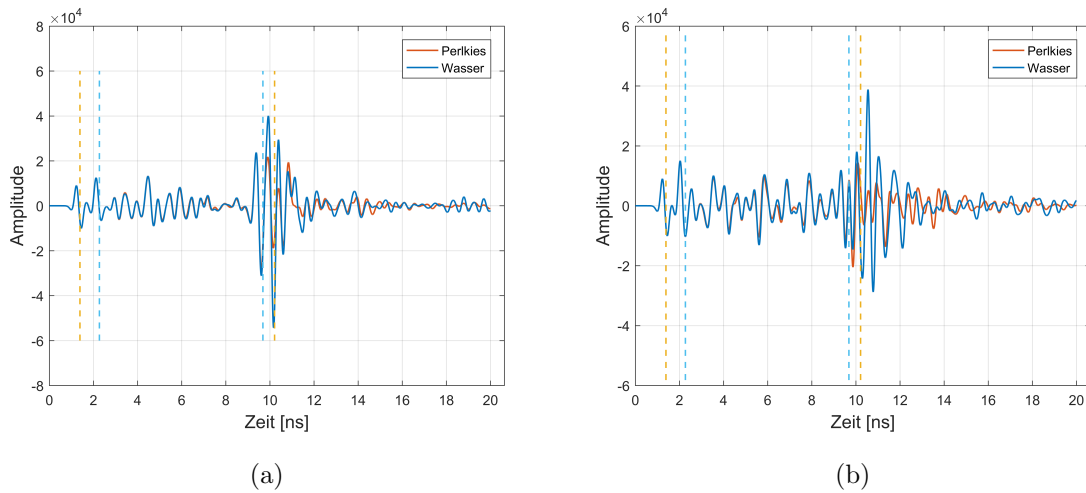


Abbildung 6.14: Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei 1600 MHz, Wasser als Hohlraumfüllung, Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.

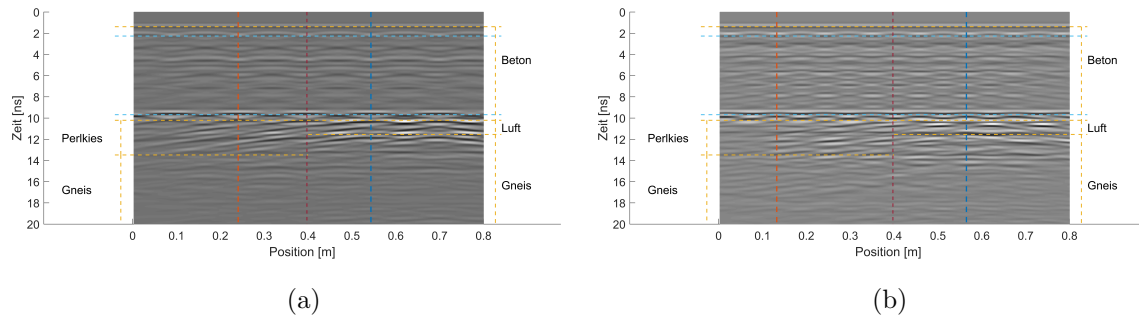


Abbildung 6.15: Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit, Bewehrung bei 1600 MHz, Luft als Hohraumfüllung. Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.

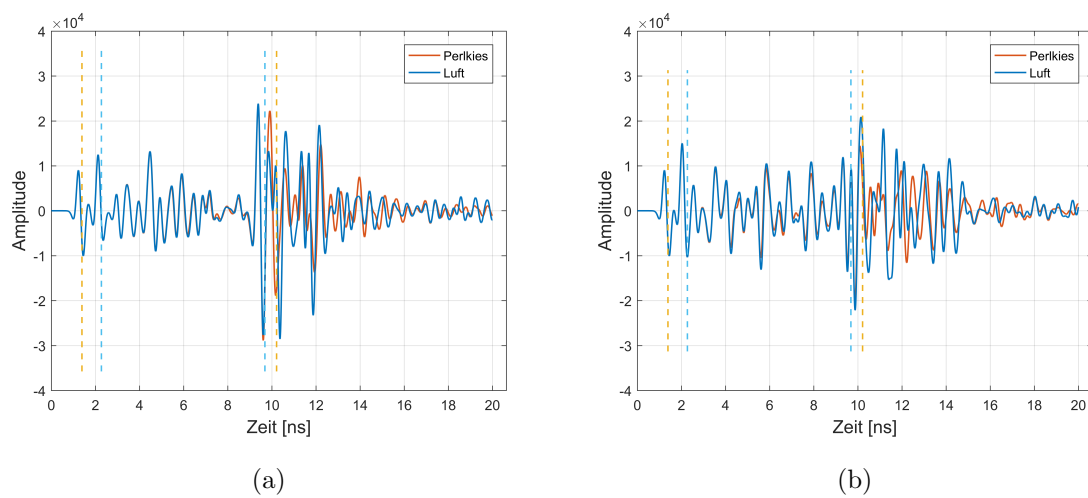


Abbildung 6.16: Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei 1600 MHz, Luft als Hohraumfüllung, Bewehrungsabstände bei (a)14 cm und (b)10 cm.

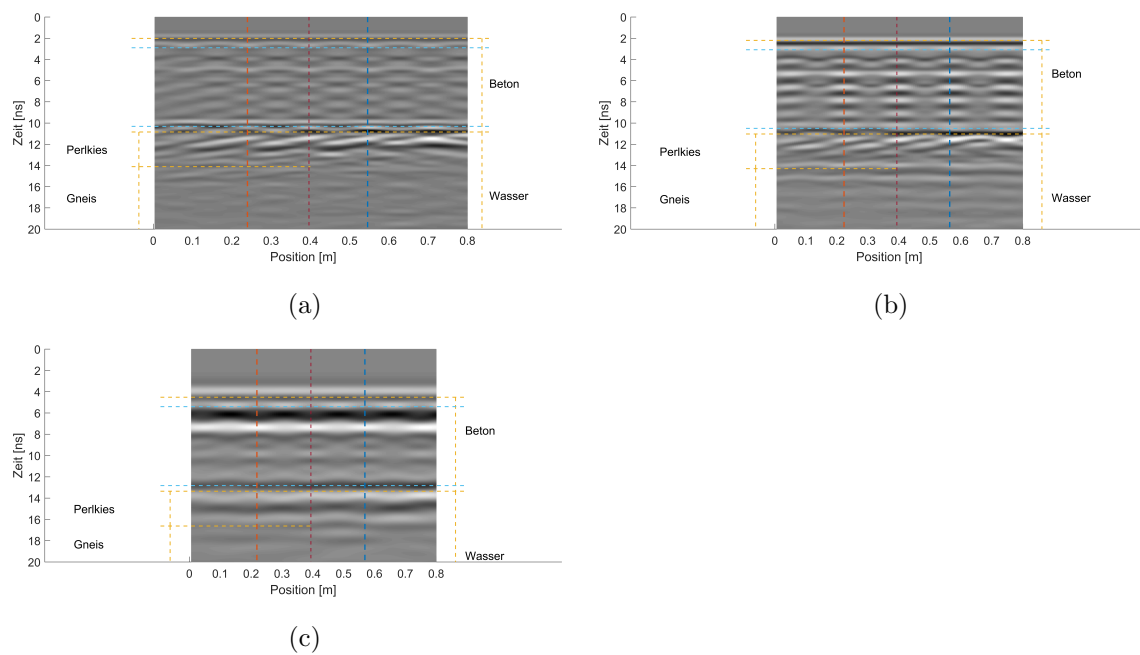


Abbildung 6.17: Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei abnehmenden Frequenzen, Wasser als Hohraumfüllung, Bewehrungsabstand bei 14 cm (a) 1000 MHz (b) 900 MHz und (c) 400 MHz.

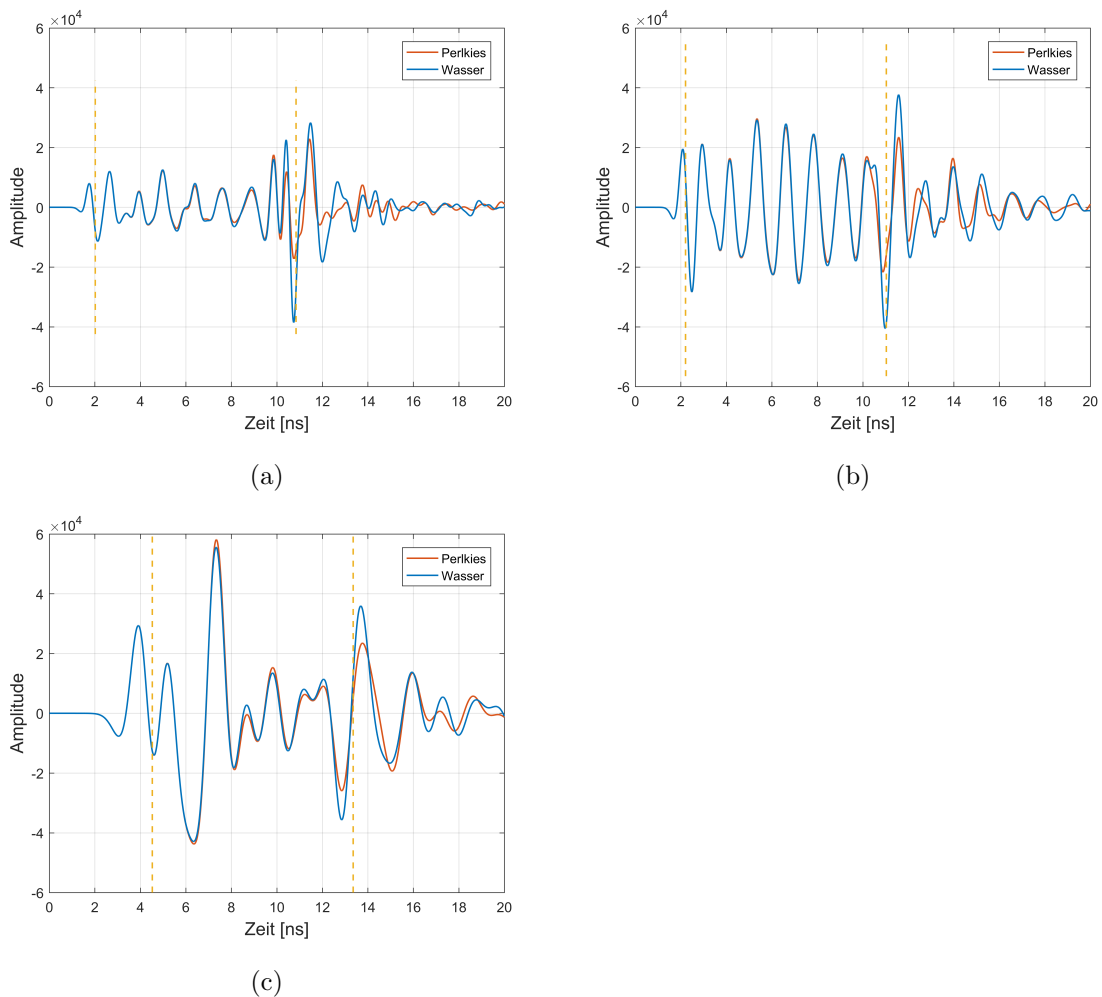


Abbildung 6.18: Modelle mit erhöhter Tübbingmächtigkeit bei abnehmenden Frequenzen, Wasser als Hohlräumfüllung, Bewehrungsabstand bei 14 cm (a) 1000 MHz (b) 900 MHz und (c) 400 MHz.

6.5 Evaluierung eines Messbereiches mit verminderter Bewehrung

Abbildung 6.19 zeigt eine Modellskizze zu den in diesem Kapitel vorgestellten Simulationen. Die Aussparungen in der Bewehrung sind in den Abbildungen 6.20 und 6.21 gut zu erkennen. Die Unterscheidung zwischen Perlkies, Wasser oder Luft als Medium hinter dem Tübbing ist auch bei 15 cm breiten Aussparungen noch möglich. Der vertikale Bewehrungsabstand in diesem Modell beträgt 28 cm, da der Tübbing eine Dicke von 35 cm besitzt. Die Mittelpunkte der Aussparungen im Bewehrungsgeflecht liegen in Abbildung 6.20 auf der linken Seite bei 0.5 m und 1.8 m. In Abbildung 6.21 liegen diese bei 0.4 m auf der linken Seite und auf der

rechten Seite bei 1.6 m. Die Abbildungen 6.22, 6.23 und 6.24 zeigen den Modellfall mit 15 cm breiter Aussparung bei 1000 MHz, 900 MHz und 400 MHz. Bei 1000 MHz ist eine eindeutige Unterscheidung der Hinterfüllungsmedien möglich. Bei den niedrigeren Frequenzen ist dies nicht mehr der Fall.

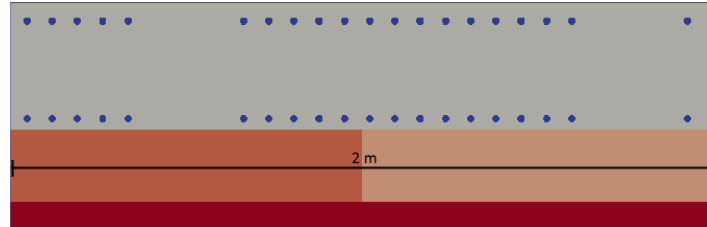


Abbildung 6.19: Skizze Modell Aufbau mit verminderter Bewehrung

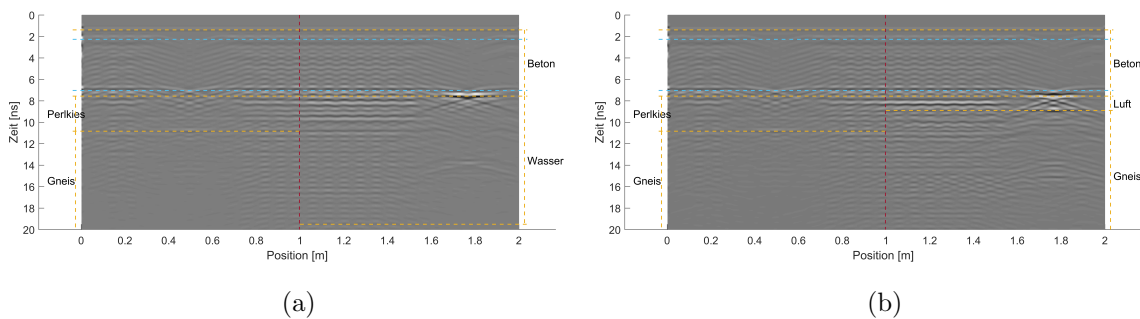


Abbildung 6.20: Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 25 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 1600 MHz, Hohraumfüllung (a) Wasser (b) Luft

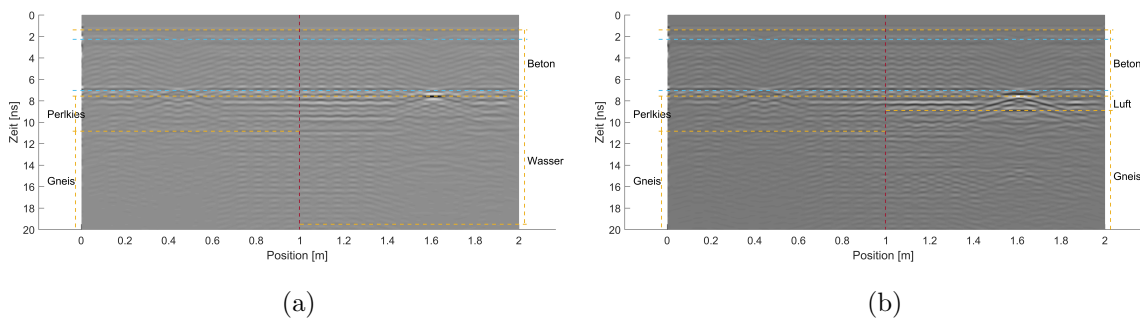


Abbildung 6.21: Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 1600 MHz, Hohraumfüllung (a) Wasser (b) Luft

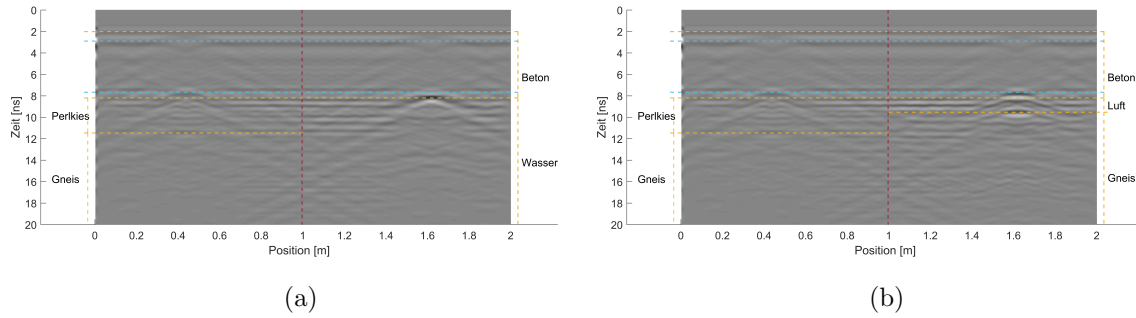


Abbildung 6.22: Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 1000 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft

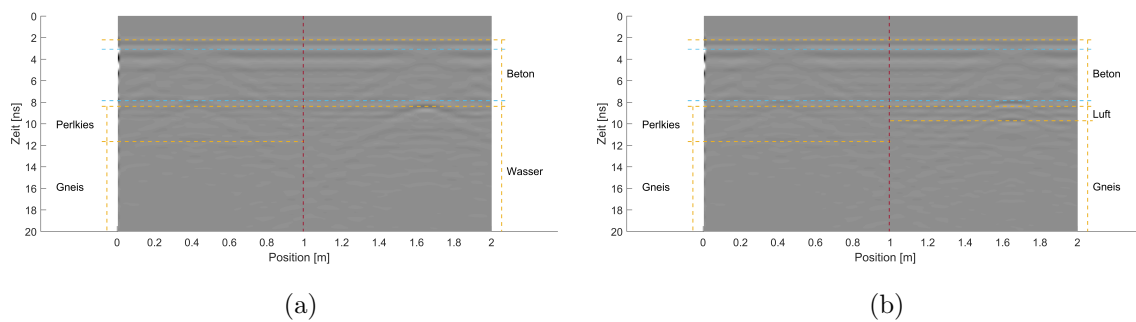


Abbildung 6.23: Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 900 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft

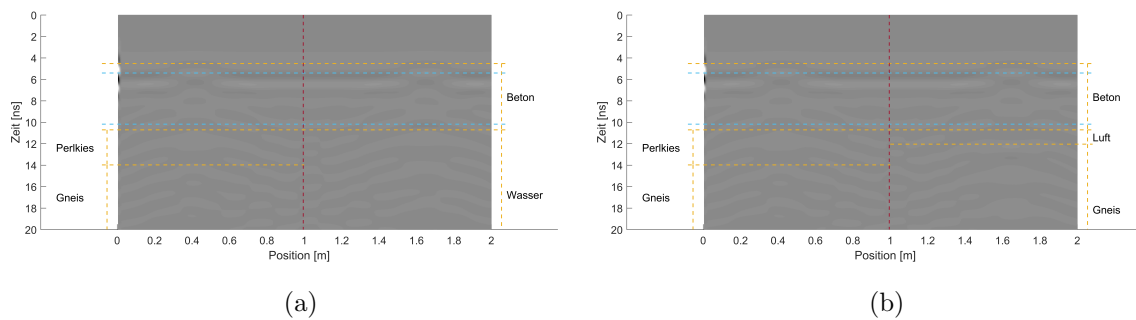


Abbildung 6.24: Messstrecke in Vortriebsrichtung bei 15 cm breiter Messbahn (ohne Bewehrung) und 400 MHz, Hohlraumfüllung (a) Wasser (b) Luft

6.6 Validierung der numerischen Simulationen

In diesem Kapitel werden die erstellten Modelle mit bereits vorliegenden Ergebnissen aus anderen Studien verglichen, um die Plausibilität der Modelle zu gewährleisten. Die Daten der

im Folgenden dargestellten numerischen Simulationen wurden ausschließlich mit der Time-Gain-Methode verstärkt. Die von Zhang et al. (2010) verwendeten Tübbinge haben eine Mächtigkeit von 35 cm und nur eine Bewehrungslage mit einem Bewehrungsabstand von 20 cm.

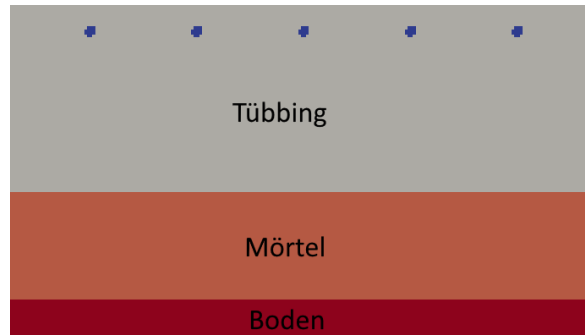


Abbildung 6.25: Schematische Darstellung eines Messaufbaues in Zhang et al. (2010).

Abbildung 6.26a zeigt ein numerisches Modell, das mit denselben Parametern errechnet wurde wie alle anderen Modelle mit 1000 MHz in dieser Arbeit. Es wurden dafür 300 Messungen pro Meter simuliert, der Antennenoffset beträgt 0.076 m und die Auflösung des Modells in x, y und z Achse liegt bei 0.00333 m. Auf der linken Hälfte der Tübbingrückseite wurde eine Metallplatte simuliert, um eine starke Reflexion zu erzeugen. Die Permittivität des Tübbings wurde entsprechend den Feldmessungen von Zhang et al. (2010) auf 10.34 gesetzt, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Die in Abbildung 6.26b gezeigte Feldmessung, bei der die Metallplatte an der rechten Hälfte des Tübbings angebracht ist, weist dieselbe Durchlaufzeit für den Tübbing auf wie die modellierte Variante in Abbildung 6.26a. Abbildung 6.26c zeigt die von Zhang et al. (2010) für denselben Fall erstellte Simulation, mit der Metallplatte an der linken Tübbinghälfte. Hier ist die in allen Teilen der Abbildung 6.26 auftretende Phasenumkehr an der Metallplatte gut zu erkennen. Ebenso ist in der Hälfte ohne Metallplatte die reflektierte Welle nicht invertiert.

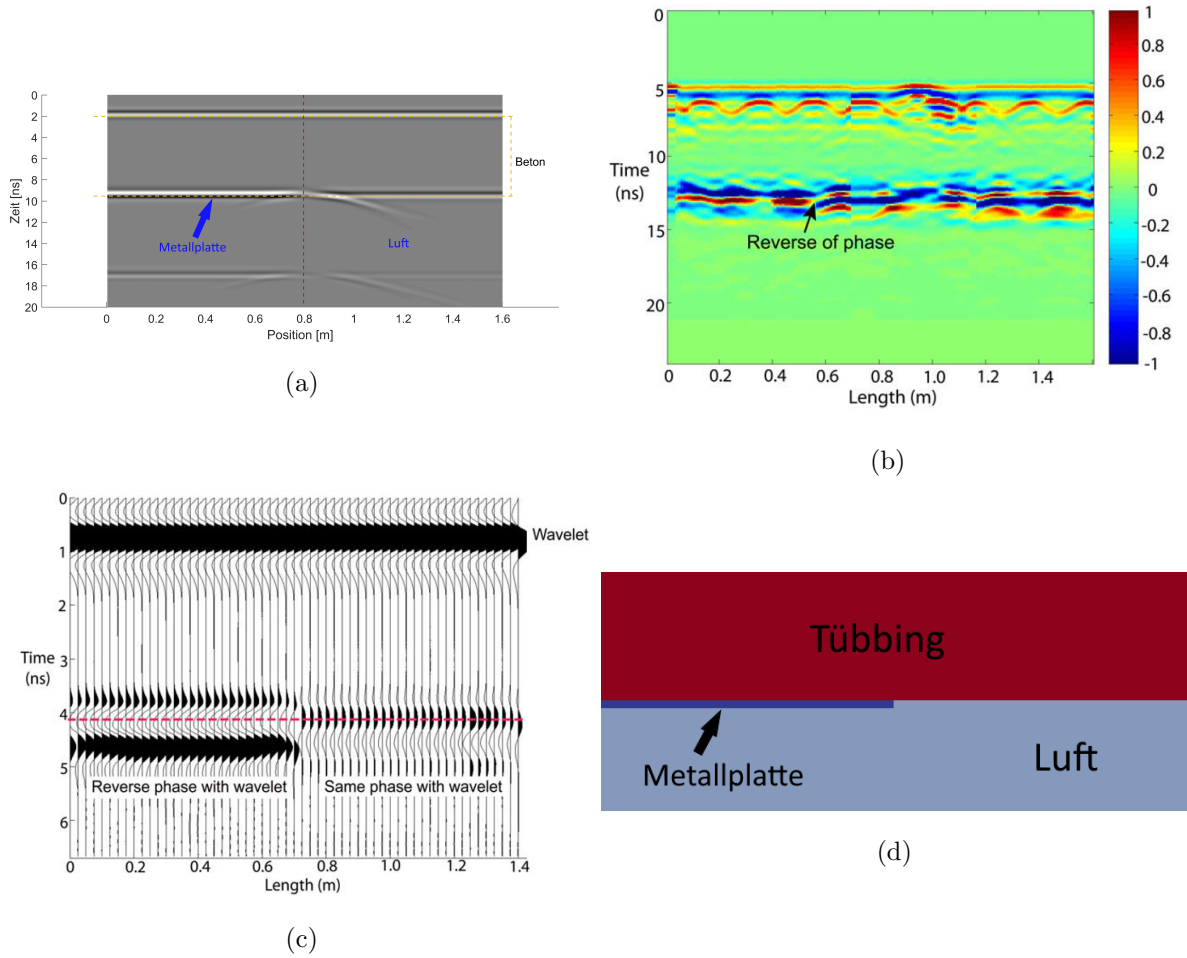


Abbildung 6.26: Vergleich eines numerischen Modells und einer Feldmessung mit Tübbingmächtigkeit 35 cm, (a) Numerische Simulation mit 1000 MHz, Metallplatte an linker Hälfte. (b) Feldmessung mit 1000 MHz, Metallplatte an rechter Hälfte von Zhang et al. (2010). (c) Numerische Simulation, Metallplatte an linker Hälfte von Zhang et al. (2010). (d) Modellskizze zu numerischer Simulation

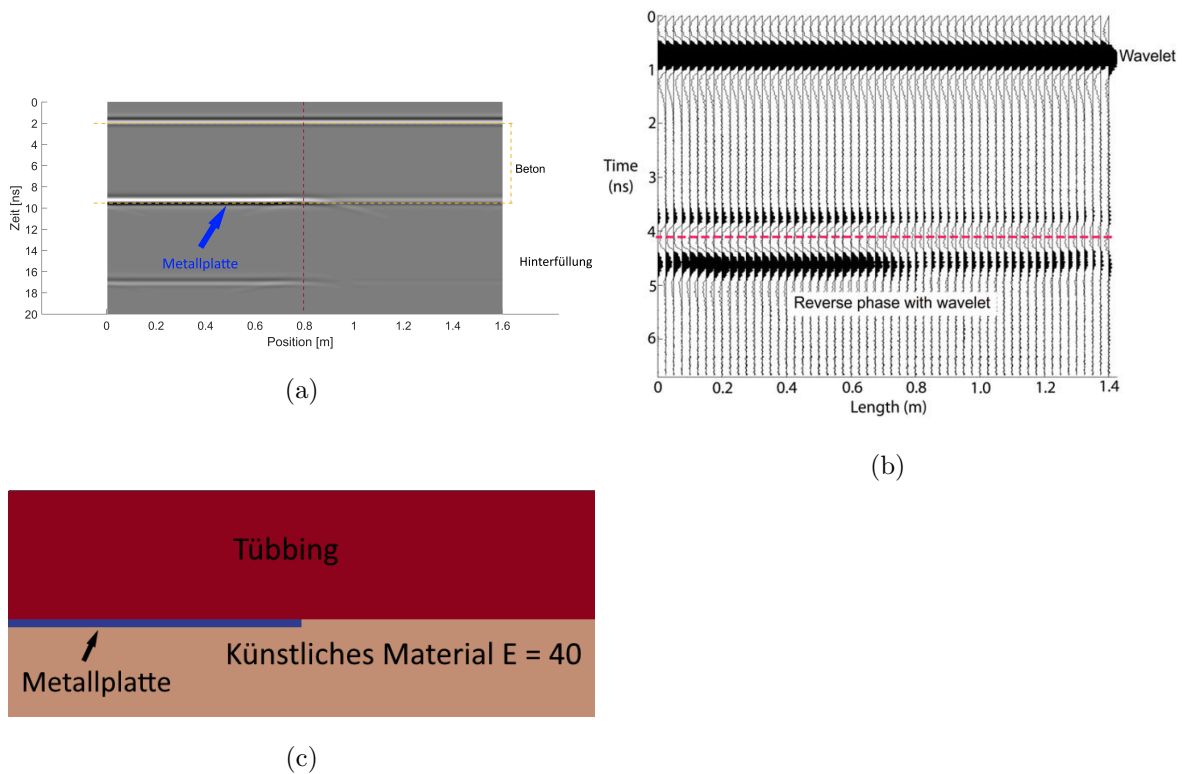


Abbildung 6.27: Vergleich eines numerischen Modells und einer Feldmessung mit Tübbingmächtigkeit 35 cm, (a) Numerische Simulation mit 1000 MHz, Metallplatte an linker Hälfte und künstliches Hinterfüllungsmaterial ($\epsilon = 40$). (b) Numerische Simulation, Metallplatte an linker Hälfte und Künstliches Hinterfüllungsmaterial ($\epsilon = 40$) von Zhang et al. (2010). (c) Skizze zum Modellaufbau

Das in Abbildung 6.28a gezeigte Ergebnis einer numerischen Simulation wurde auf Basis der im Feld ermittelten Parameter von Zhang et al. (2010) erstellt. Als Frequenz wurde 1600 MHz gewählt, da hier die Auflösung in den vorhergegangenen Simulationen am Besten war. Die Permittivität des Tübbings wurde auf 12.97 gesetzt. Als Hinterfüllungsmedium wurde Mörtel mit einer Permittivität von 16 gewählt, entsprechend den Berechnungen von Zhang et al. (2010). Die Permittivität des Bodens ist 34. Abbildung 6.28b zeigt das Ergebnis einer Feldmessung 20 Tage nach der Mörtelinjektion in den Ringspalt von Zhang et al. (2010) mit 500 MHz. Die Mächtigkeit des Mörtels wurde mit 18.8 cm-22.5 cm errechnet.

Die Laufzeit der elektromagnetischen Welle durch den Tübbing ist in beiden Radargrammen mit 8.5 ns ablesbar. Die Grenze des Mörtels zum Boden ist in beiden Fällen gut dargestellt. Der Übergang Tübbing-Mörtel ist aufgrund des weniger starken Unterschieds der dielektri-

schen Eigenschaften durch geringere Peaks markiert. Die Schatten der Bewehrungseisen sind in der gesamten Tübbinglaufzeit gut zu erkennen, enden aber mit dem Übergang Tübbing-Mörtel.

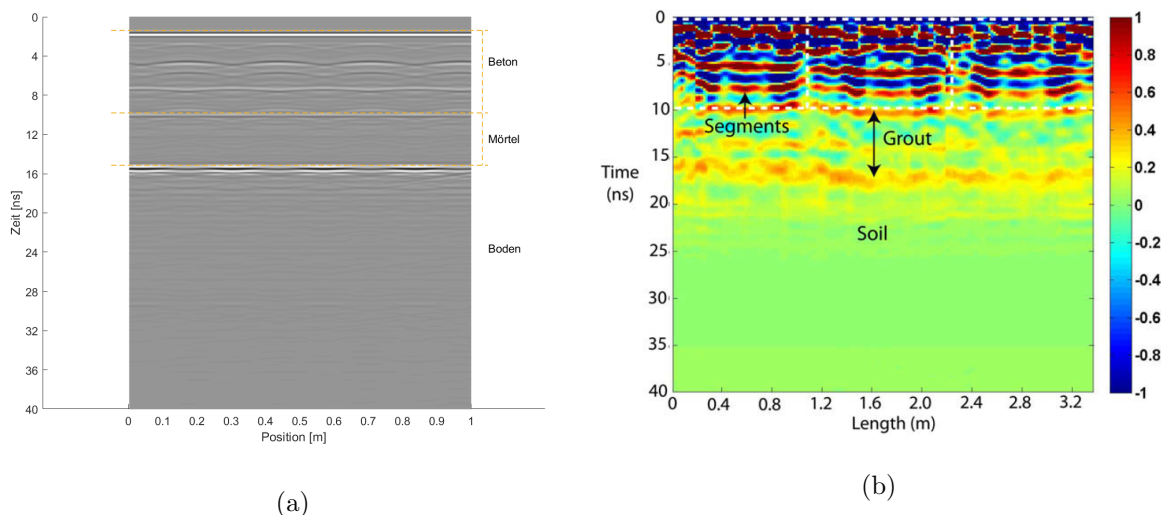


Abbildung 6.28: Vergleich eines numerischen Modells und einer Feldmessung mit Tübbingmächtigkeit 35 cm, (a) 1600 MHz, Mörtelmächtigkeit 20 cm (b) 500 MHz, Mörtelmächtigkeit 18.8 cm-22.5 cm, Fig.21 in Zhang et al. (2010).

Im Zuge der Interpretation der numerischen Simulationen hat sich herausgestellt, dass sich die Frequenzen von 1600 MHz und 1000 MHz am besten dazu eignen, um Hohlräume hinter Tübbing von 35 cm - 50 cm Dicke darzustellen. Diese Erkenntnisse decken sich mit den von Lalagüe et al. (2016) und Crocco (2010) getätigten Aussagen bezüglich der besseren Darstellung bei höheren Frequenzen und kürzeren Laufzeiten. Im Gegensatz hierzu konnten Zhang et al. (2010) in siltigem Boden Messungen bis zu einer Tiefe von über einem Meter durchführen.

Die korrekten Positionen, der eingezeichneten Schichtgrenzen in den Radargrammen, untermauern ebenfalls die Korrektheit der durchgeführten Simulationen. Durch die, während der Nachbearbeitung, durchgeführten Laufzeitberechnungen, (Beschreibung in Kapitel 5.2) konnten die simulierten Laufzeiten überprüft werden.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Bodenradar zur Detektion von Hohlräumen im Ringspalt prinzipiell ein geeignetes Werkzeug ist. Das limitierende Element der Messprozedur ist die Bewehrung. Hierbei gilt, dass bei einer Tübbingdicke von 35 cm Bewehrungsabstände unter 10 cm kein zufriedenstellendes Ergebnis zulassen, da ab hier die Schatten der Bewehrungsseisen das Laufzeitdiagramm dominieren. Als vielversprechendste Arbeitsfrequenz in der untersuchten Umgebung wurde 1600 MHz ermittelt. Diese Frequenz bietet genügend Auflösungsvermögen, um die unterschiedlichen Medien korrekt zu erkennen. Eine Unterscheidung der Medien war ebenfalls möglich. Vor allem ein luftgefüllter Hohlraum hat das Potential, eindeutig identifiziert zu werden, da in diesem Fall in kurzem Abstand (abhängig von der Wellengeschwindigkeit im medium Luft und der Ausdehnung des Hohlraumes) ein zweiter markanter Peak folgt, welcher der Hohlraum-Berg Grenze entspricht. Dadurch ist es ebenfalls möglich den Abstand des Tübbings zum umgebenden Gebirge zu ermitteln. Sollte sich in der Praxis die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen bei einer Frequenz von 1600 MHz als zu stark erweisen, sind 1000 MHz als Alternative in Betracht zu ziehen, da die Auflösung in diesem Frequenzbereich noch akzeptabel ist. Im Falle eines mit Luft gefüllten Hohlraumes kann auch die Grenze zum anstehenden Gestein abgebildet werden, wodurch auf die Maße des Ringspalt geschlossen werden kann. Eine Erhöhung der Tübbingdicke auf 50 cm erlaubt die Hinterfüllungsmedien zu detektieren. Allerdings konnte bereits ab einer Bewehrungsdichte von 10 cm eine Verschlechterung der Darstellbarkeit festgestellt werden. Auch die Simulationen mit Frequenzen unter 1000 MHz lieferten ungenügende Ergebnisse.

Die Evaluierung eines Messbereiches mit verminderter Bewehrung hat ergeben, dass es möglich ist auch bei Tübbing mit einem Bewehrungsabstand von 6 cm Aussagen über den Hinterfüllungsgrad zu erhalten, wenn einzelne Bewehrungsbahnen bei der Herstellung der Tübbinge freigelassen werden. So kann durch eine in Vortriebsrichtung verlaufende Messstrecke eine punktweise Überprüfung des Ringspalt stattfinden, oder durch Messen entlang des Tübbingringes eine vollständige Aufnahme der Messstrecke erfolgen.

Durch die Gegenüberstellung eigener Modelle mit Daten von Simulationen und Feldtests aus der Literatur konnte die Glaubwürdigkeit der Simulationen untermauert werden. Vor allem das identische Verhalten der reflektierten Wellen bezüglich der Inversion und die korrekten Laufzeiten bei unterschiedlichen Permittivitäten legen nahe, dass sich die getroffenen Aussagen in Feldtests beweisen lassen werden.

In Zukunft sollten zur Untermauerung und Überprüfung der Simulation Feldmessungen durchgeführt werden. Ebenso ist es notwendig, die Permittivitäten der verwendeten Materialien experimentell zu bestimmen. Der Einfluss von Bergwasser auf die Darstellbarkeit des Perlkieses und die Unterscheidung von mit Wasser gefüllten Hohlräumen wurde in den Simulationen nicht untersucht, könnten in der Praxis jedoch von Belang sein. Aufgrund der theoretischen Herangehensweise sind Störfaktoren wie elektrische Felder, die durch Stromleitungen oder die Tunnelbohrmaschine selbst hervorgerufen werden, in dieser Arbeit nicht erfasst worden und sollten in der Praxis überprüft werden.

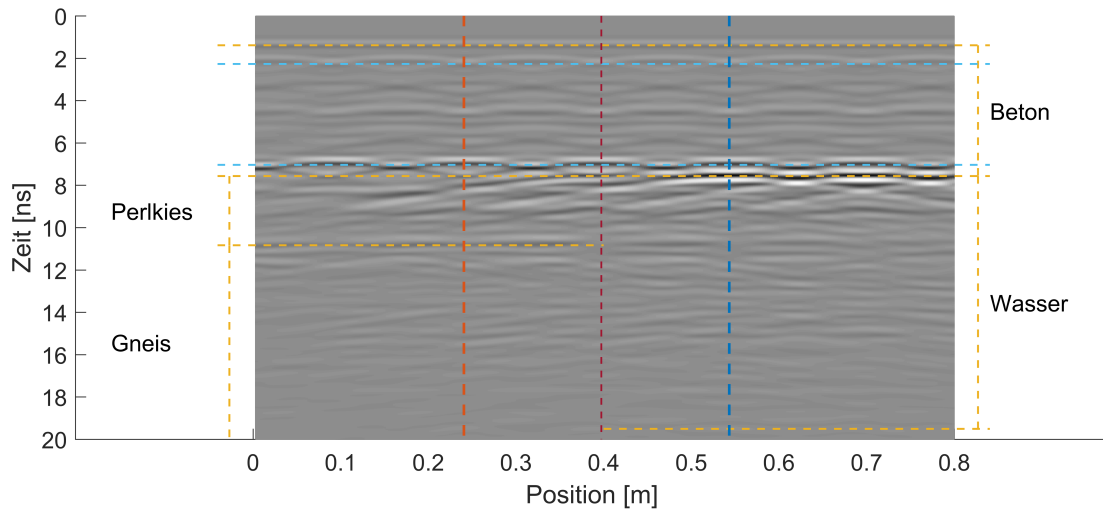
Literaturverzeichnis

- Aggelis, D. G., Shiotani, T., & Kasai, K. (2008). Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(6), 629–637.
- Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wamp, ouml, & rner, J.-D. (2014). *Beton-Kalender 2012: Schwerpunkte ; Infrastrukturbau, Befestigungstechnik, Eurocode 2* (2. Aufl. ed.). Beton-Kalender (VCH) *. s.l.: Ernst Sohn.
- Cassidy, N. J., Eddies, R., & Dods, S. (2011). Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 74(4), 263–276.
- Crocco, L. (Ed.). (2010). *13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2010: Determination of space behind pre-cast concrete elements in tunnels using GPR*. Piscataway, NJ: IEEE.
- GPR (2012). *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2012): Accurate Thickness Estimation of a Backfill Grouting Layer behind Shield Tunnel Lining by CMP Measurement using GPR*. Piscataway, NJ: IEEE.
- gprMax (2016). Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar. *Computer Physics Communications*.
- Henzinger, M. R., Radončić, N., Moritz, B. A., & Schubert, W. (2016). Backfill of segmental lining - state of the art, redistribution behaviour of pea gravel, possible improvements / tÜbbingbettung - stand der technik, umlagerungsverhalten von perlkiess, verbesserungspotenzial. *Geomechanics and Tunnelling*, 9(3), 188–199.
- Herrenknecht AG (2016). Hg. v. herrenknecht ag. online verfügbar unter <http://www.herrenknecht.com>, zuletzt geprüft am 16.02.2017.
- Hippel, A. R. v. (op. 1995). *Dielectric materials and applications*. London [etc.]: Artech House.

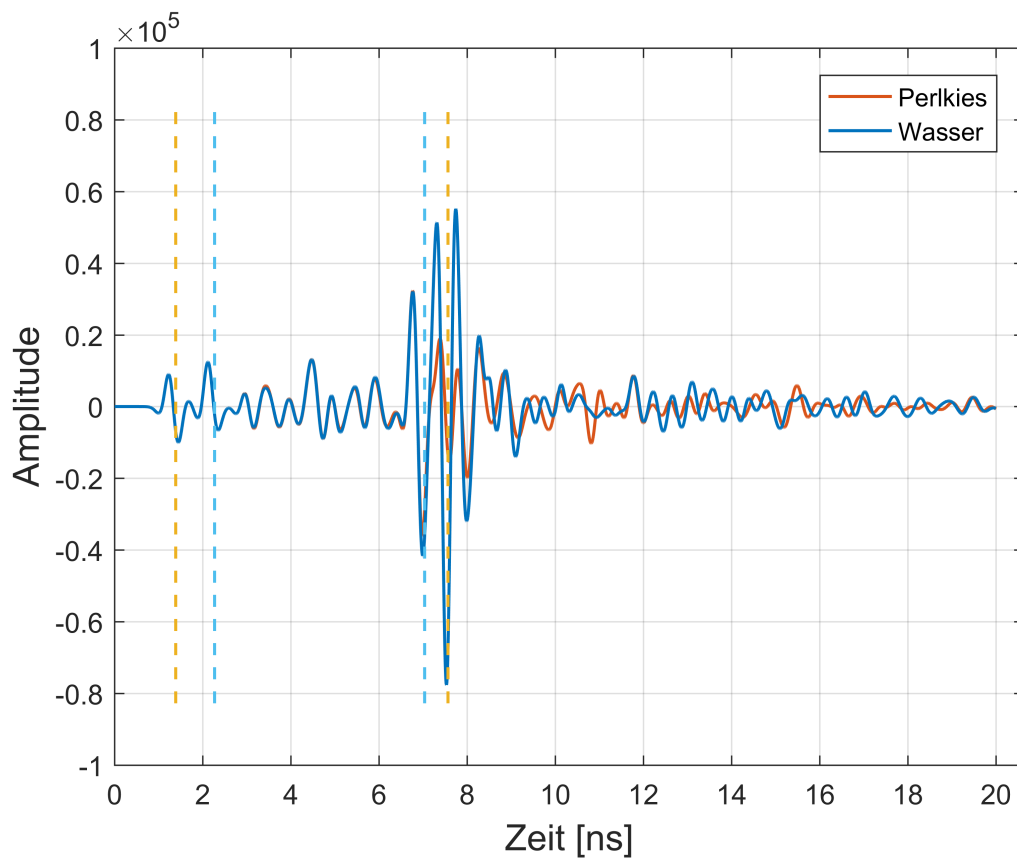
- Jol, H. M. (Ed.). (2009). *Ground penetrating radar theory and applications* (1. ed. ed.). Amsterdam u.a.: Elsevier.
- Karlovesek, J., Scheuermann, A., & Willimas, D. J. (2012). Investigation of voids and cavities in bored tunnels using gpr. In *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2012)*, (pp. 496–501)., Piscataway, NJ. IEEE.
- Knödel, K., Krummel, H., & Lange, G. (2005). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten: Geophysik (German Edition)* (2nd ed. ed.). Dordrecht: Springer.
- Lalagüe, A. (2015). *Use of ground penetrating radar for transportation infrastructure maintenance*. Dissertation, Norwegian University of Science and Technology.
- Lalagüe, A., Lebens, M. A., Hoff, I., & Grøv, E. (2016). Detection of rockfall on a tunnel concrete lining with ground-penetrating radar (gpr). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *49*(7), 2811–2823.
- Matlab (2016). : The mathworks inc., version: R2016a.
- Meredith, R. (1998). *Engineer's handbook of industrial microwave heating* (1. ed. ed.), volume 25 of *IEE power engineering series*. London: The Inst. of Engineering and Techn.
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2009). *Richtlinie - Tübbingsysteme aus Beton*. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik.
- Poso, A. & Windshügel, B. (2014). *Beton-Kalender 2014: Schwerpunkte: Unterirdisches Bauen ; Grundbau ; Eurocode 7* (2. Aufl. ed.). Beton-Kalender (VCH) *. s.l.: Ernst Sohn.
- Salam, M. A. & Rahman, Q. M. (2016). *Power Systems Grounding*. Springer Singapore.
- The HDF Group (1997 - 2016). Hierarchical data format, version 5.
- Tipler, P. A., Mosca, G., Wagner, J., & Kommer, C. (Eds.). (2015). *Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure* (7. Aufl. ed.). Berlin: Springer Spektrum.
- von Hippel, A. R. (1954). *Dielectrics and waves*. Cambridge, Massachusetts: Wiley.
- Xie, X., Liu, Y., Huang, H., Du, J., Zhang, F., & Liu, L. (2007). Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the shanghai metro line, china. *Journal of Geophysics and Engineering*, *4*(3), 253–261.

-
- Yelf, R. (2004). Where is true time zero? *Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar*, (1), 158–162.
- Zhang, F., Xie, X., & Huang, H. (2010). Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 99–107.

Anhang A

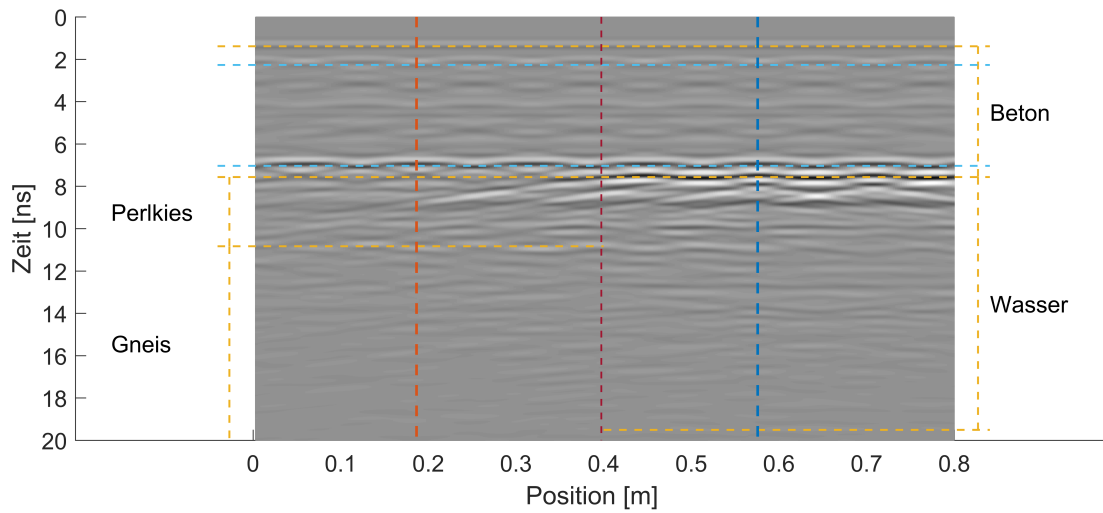


(a)

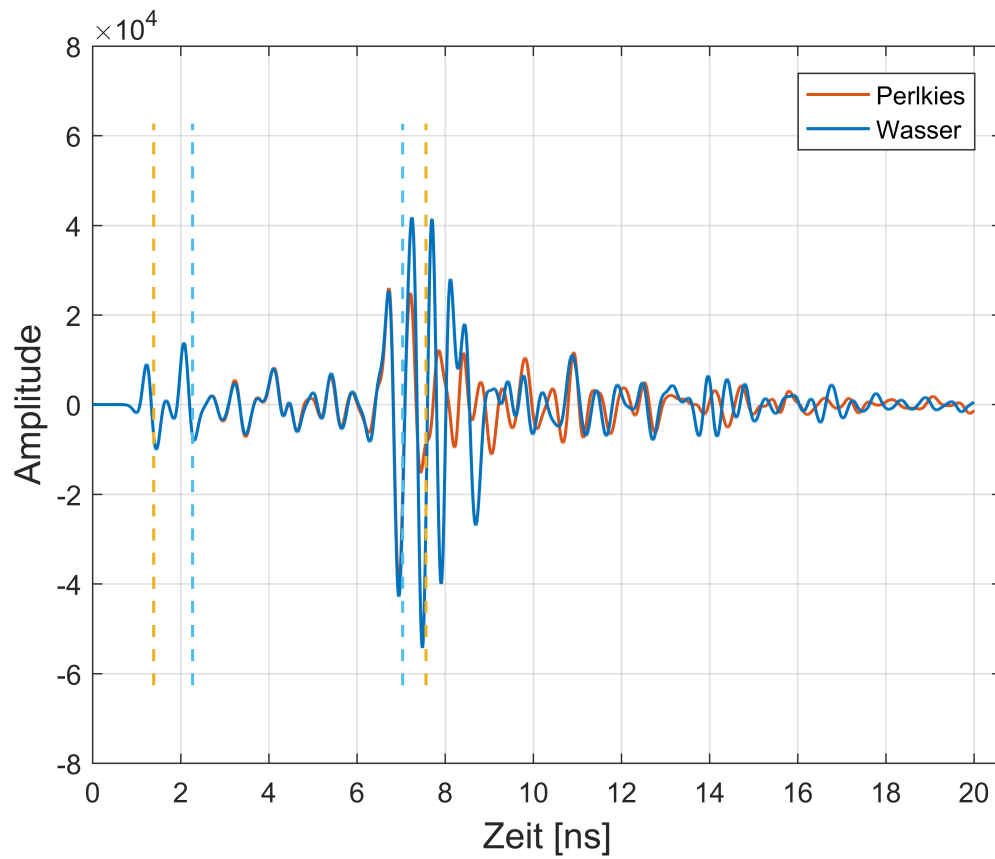


(b)

Abbildung 7.1: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

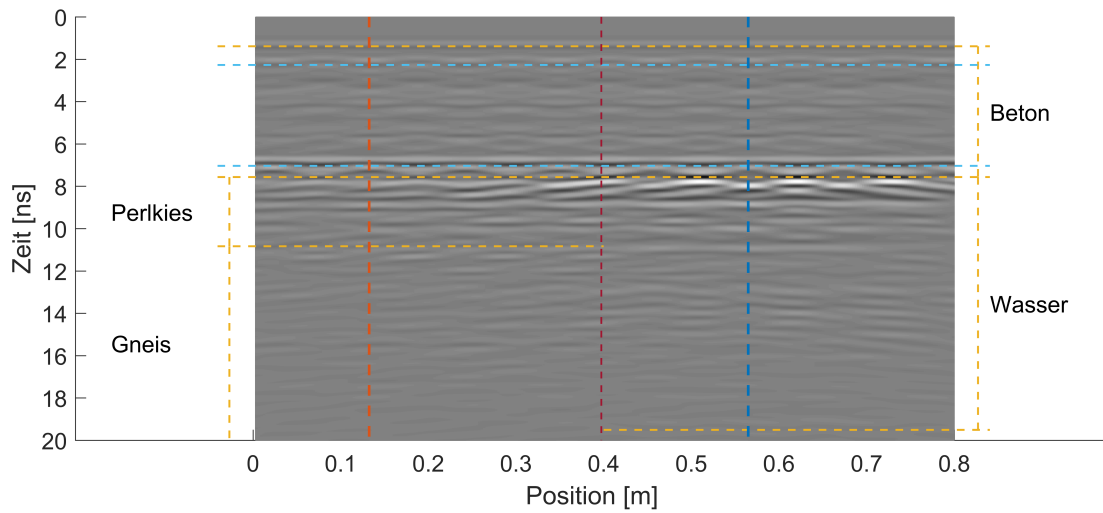


(a)

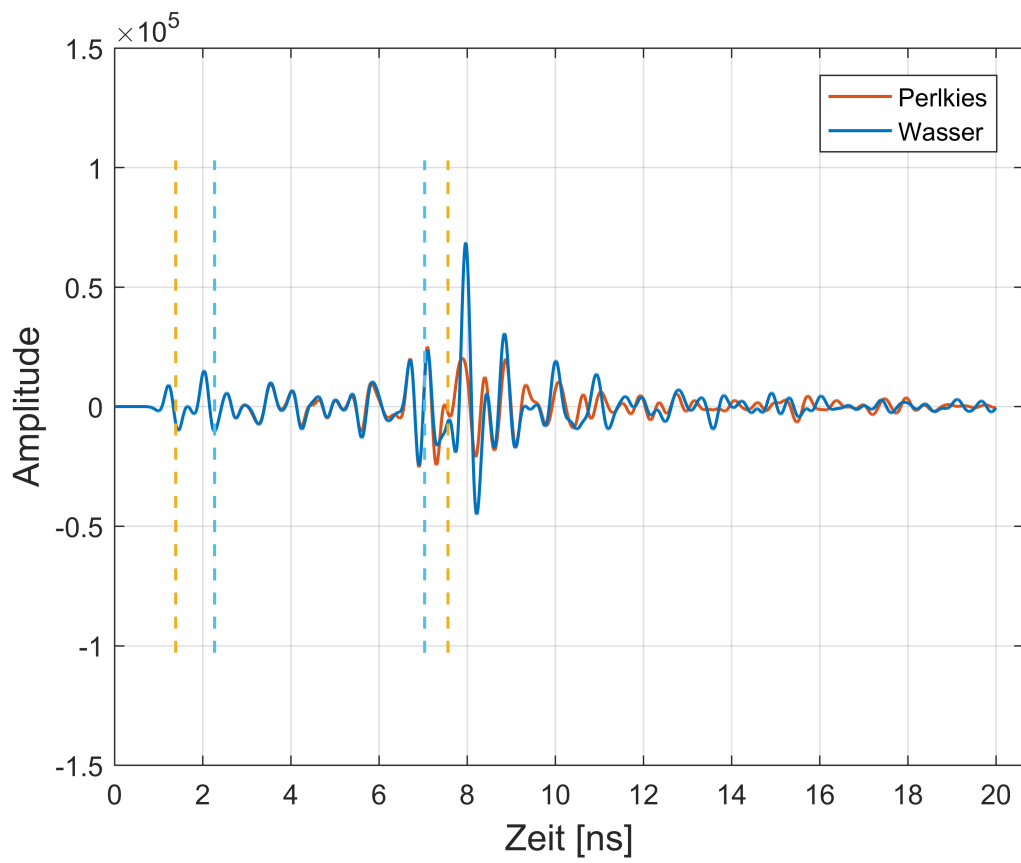


(b)

Abbildung 7.2: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

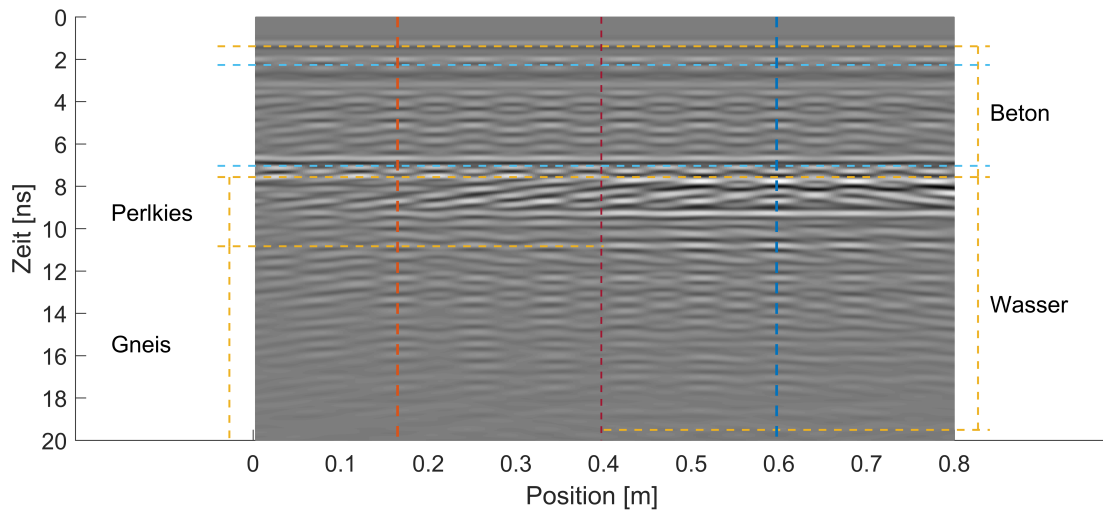


(a)

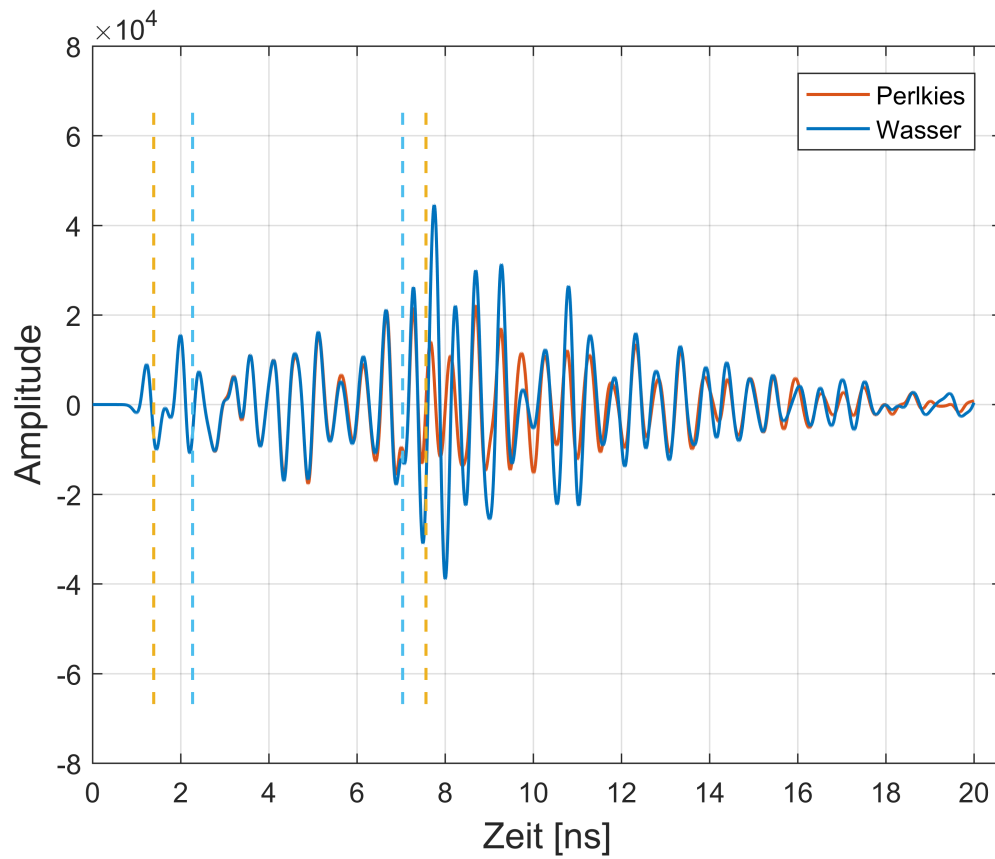


(b)

Abbildung 7.3: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

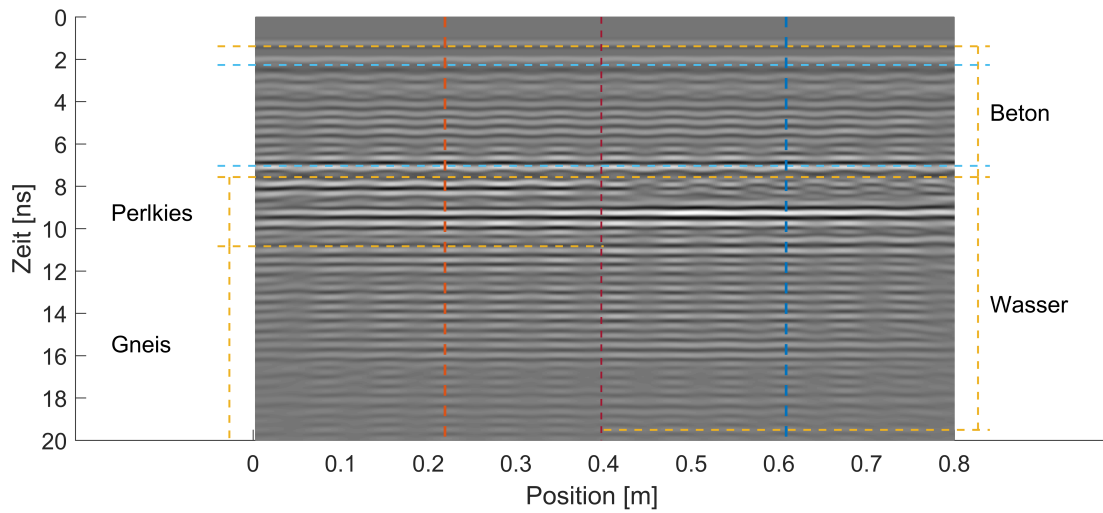


(a)

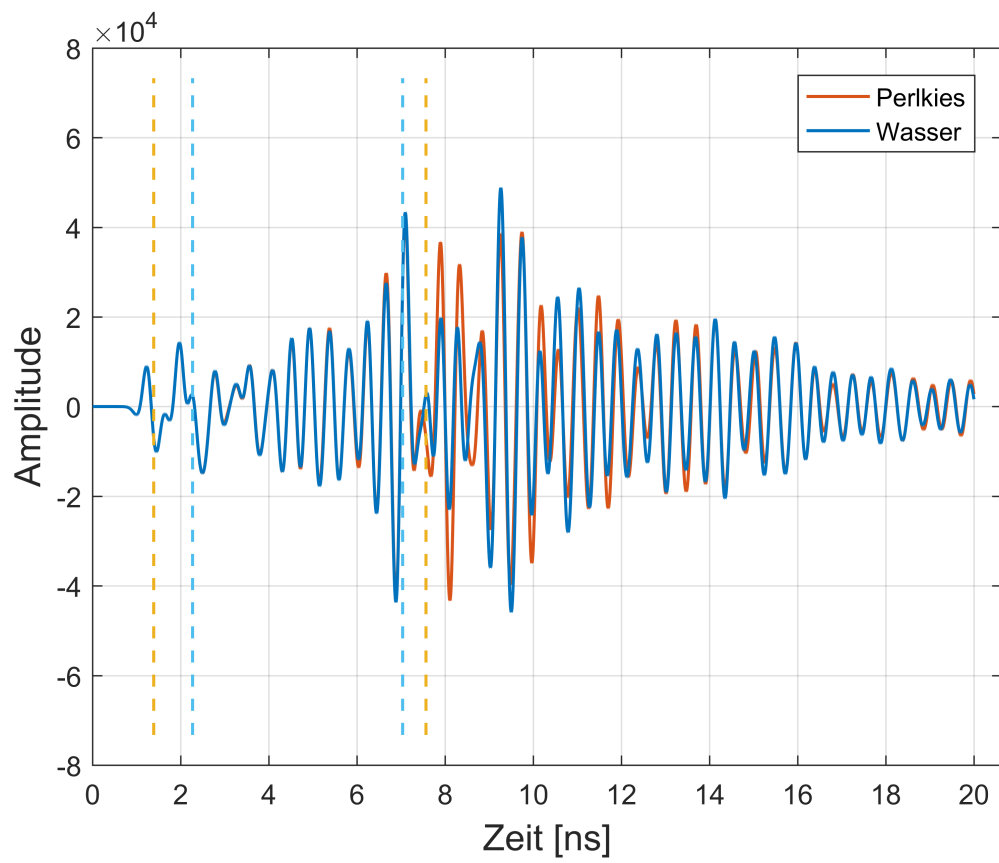


(b)

Abbildung 7.4: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 8 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

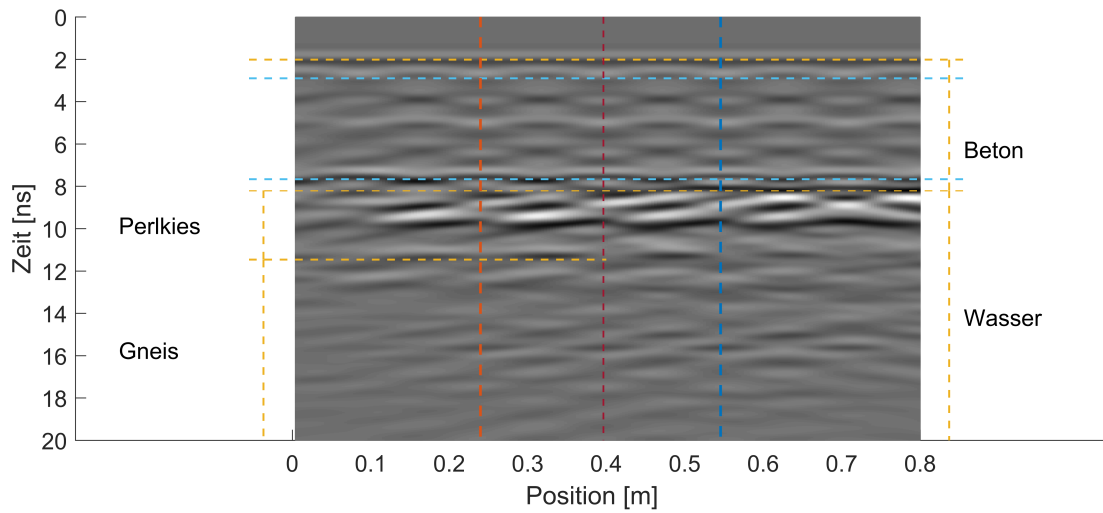


(a)

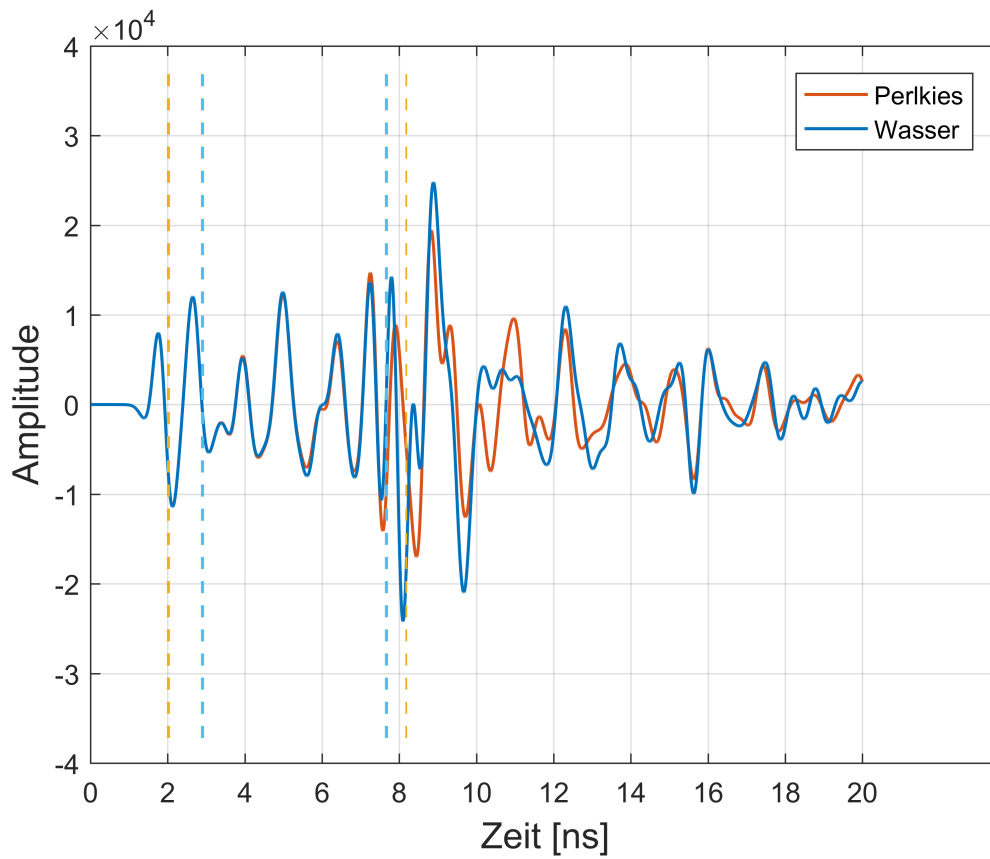


(b)

Abbildung 7.5: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 6 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

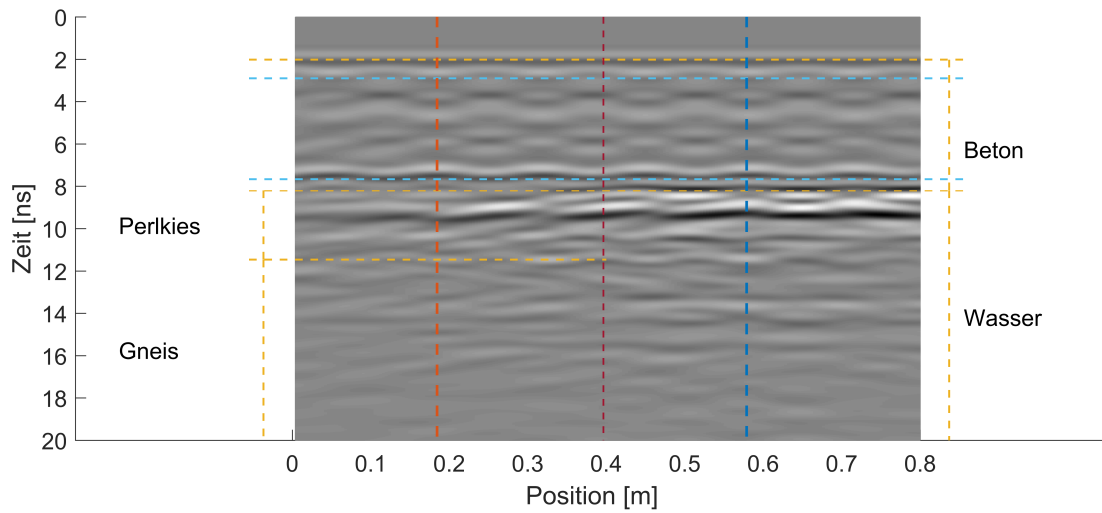


(a)

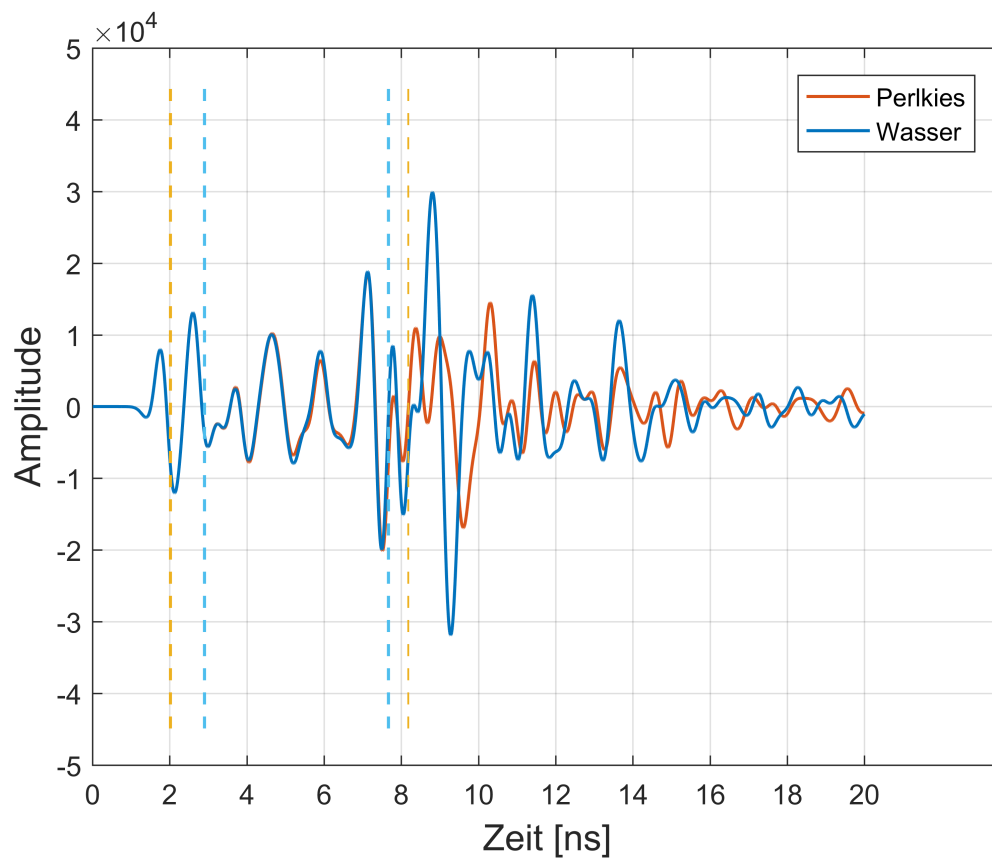


(b)

Abbildung 7.6: Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

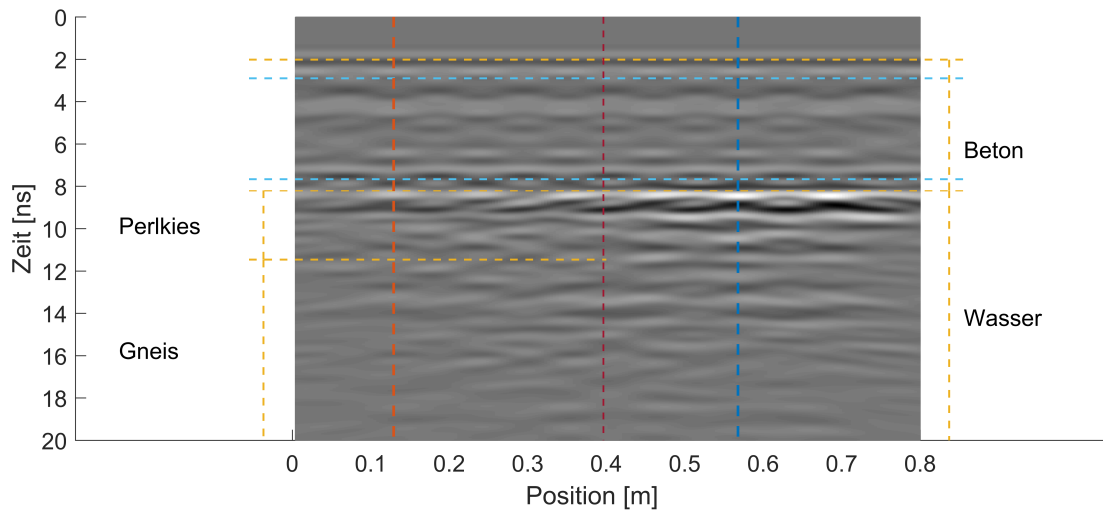


(a)

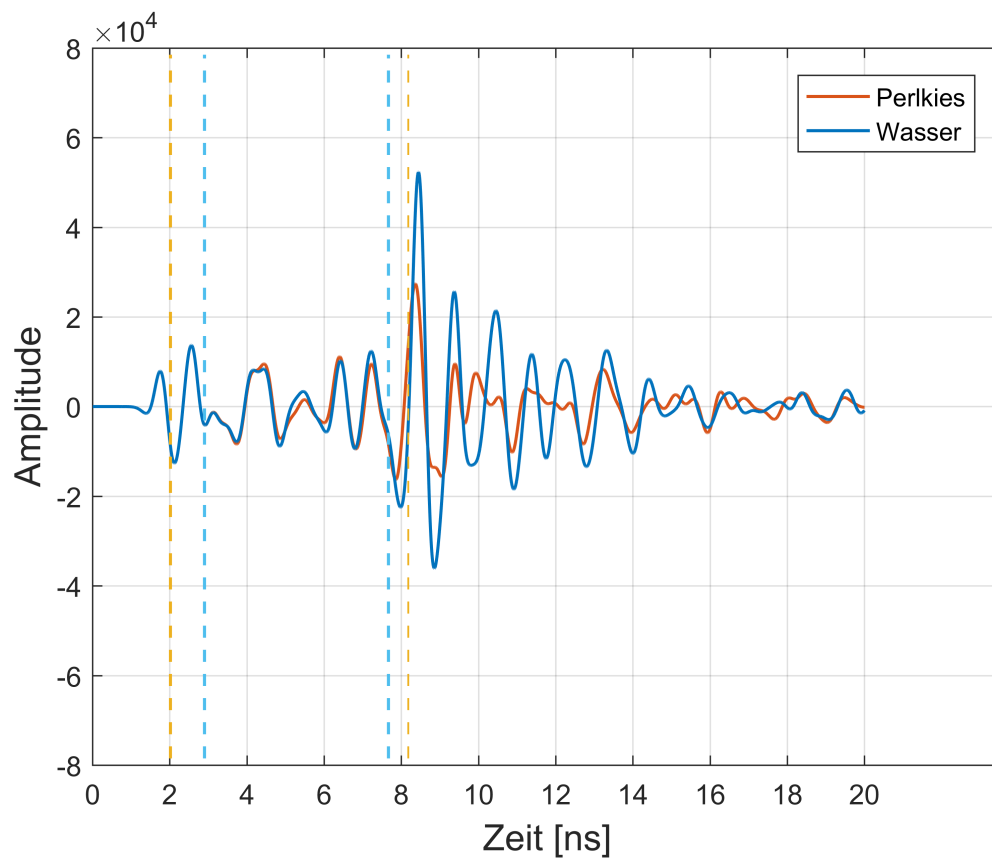


(b)

Abbildung 7.7: Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

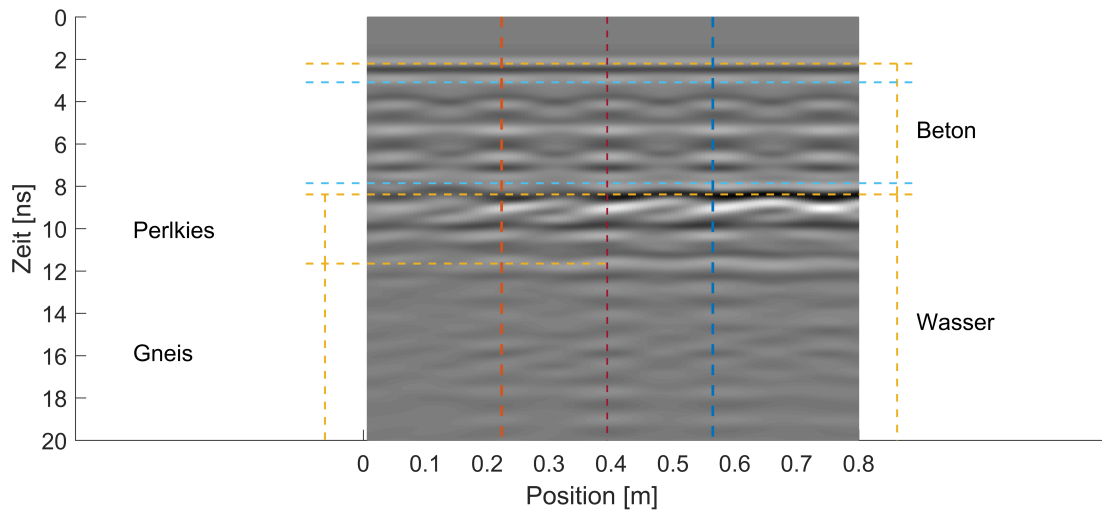


(a)

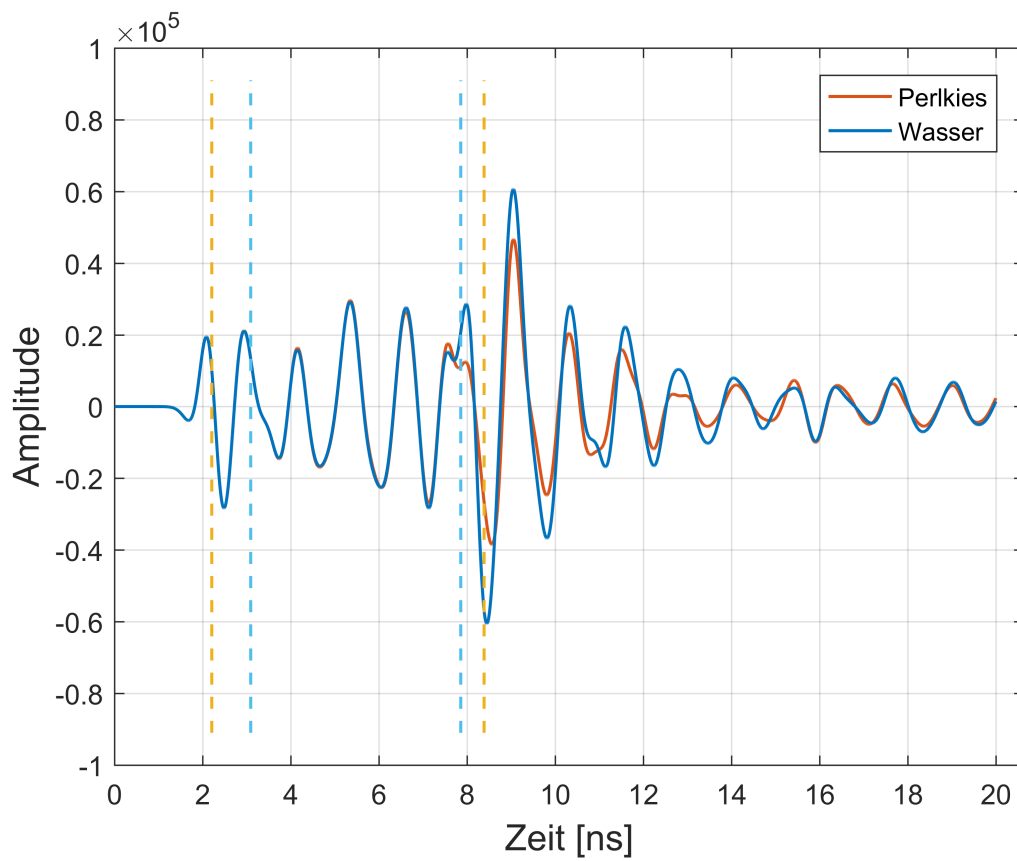


(b)

Abbildung 7.8: Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

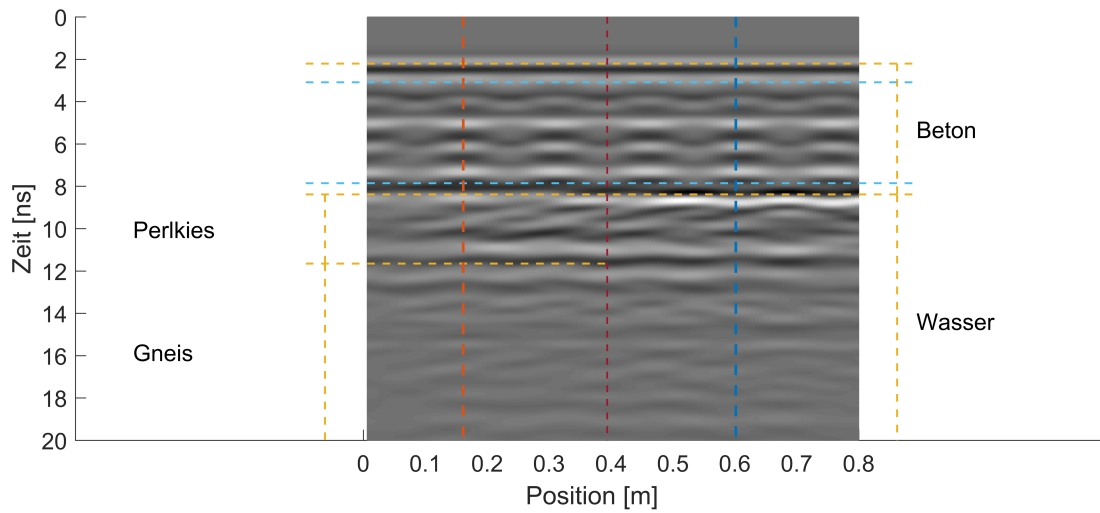


(a)

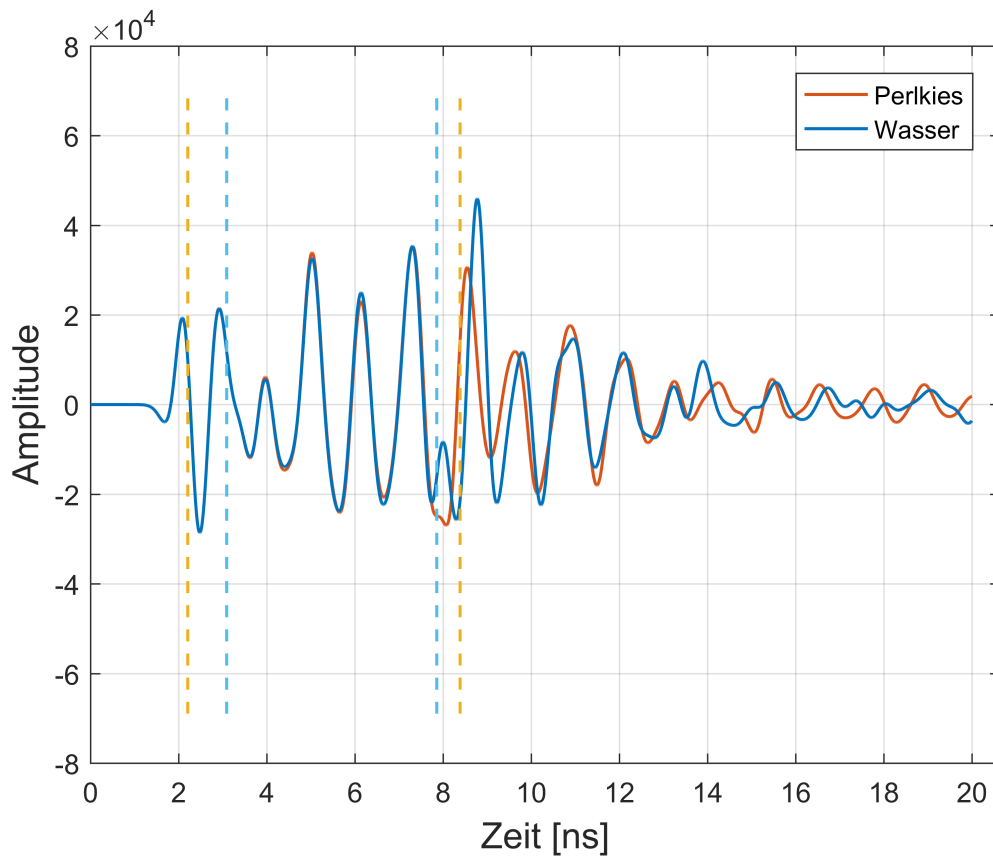


(b)

Abbildung 7.9: Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

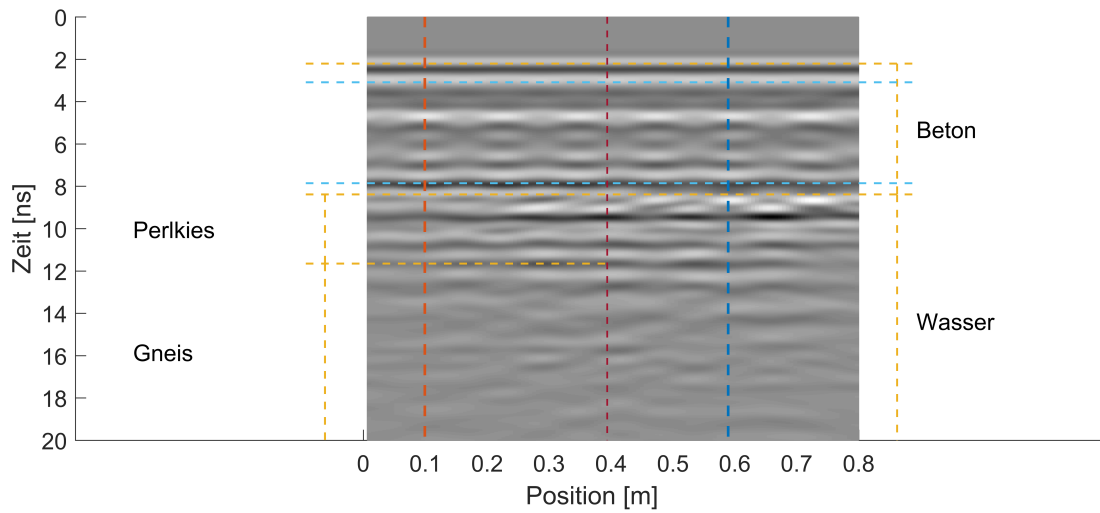


(a)

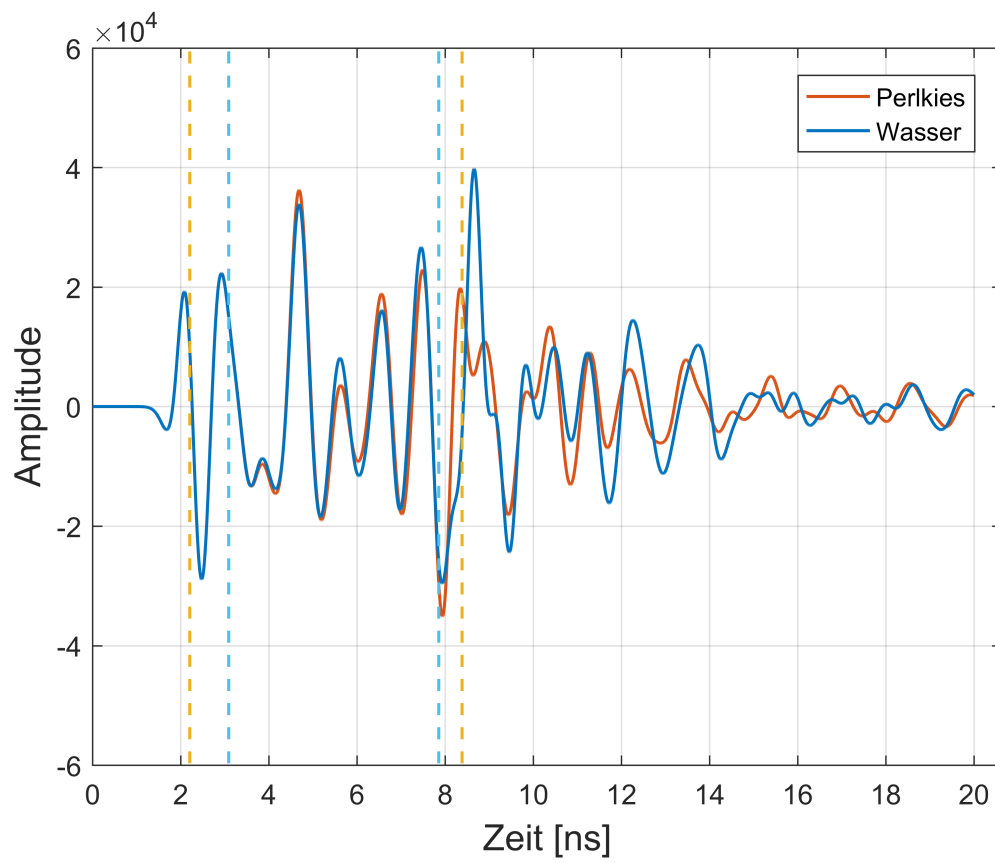


(b)

Abbildung 7.10: Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

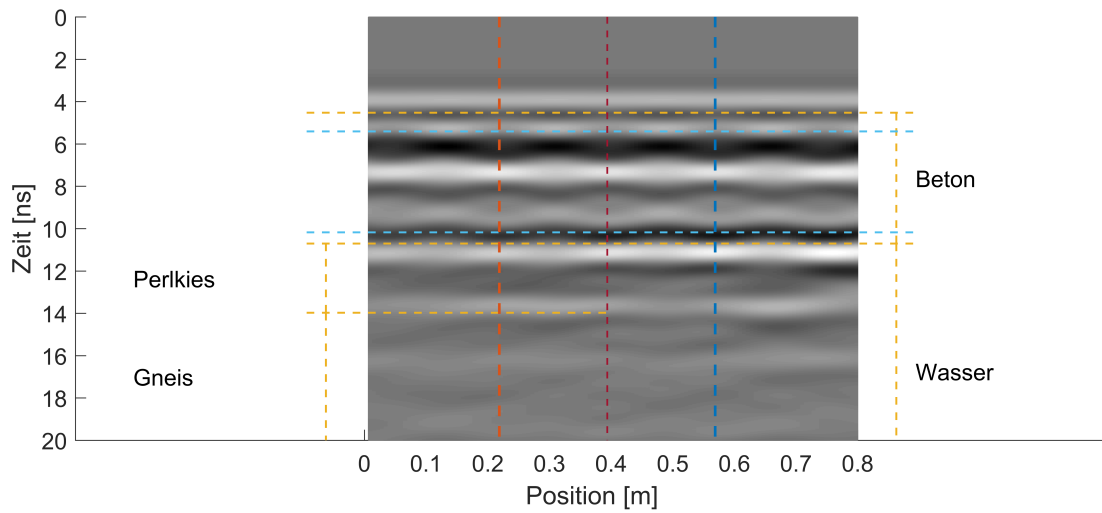


(a)

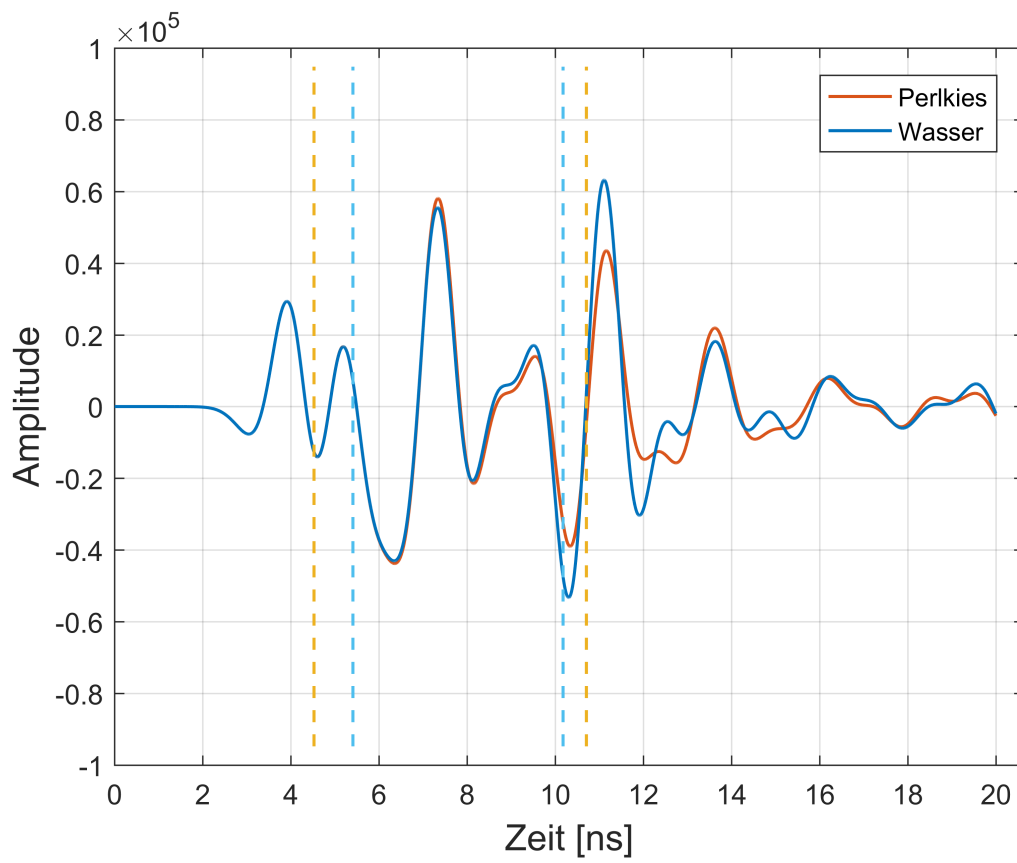


(b)

Abbildung 7.11: Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

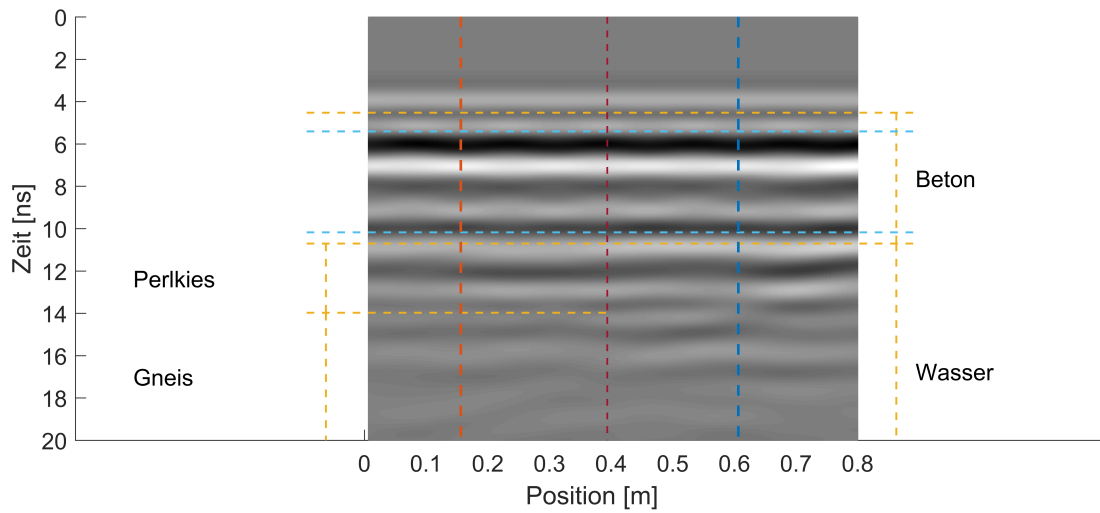


(a)

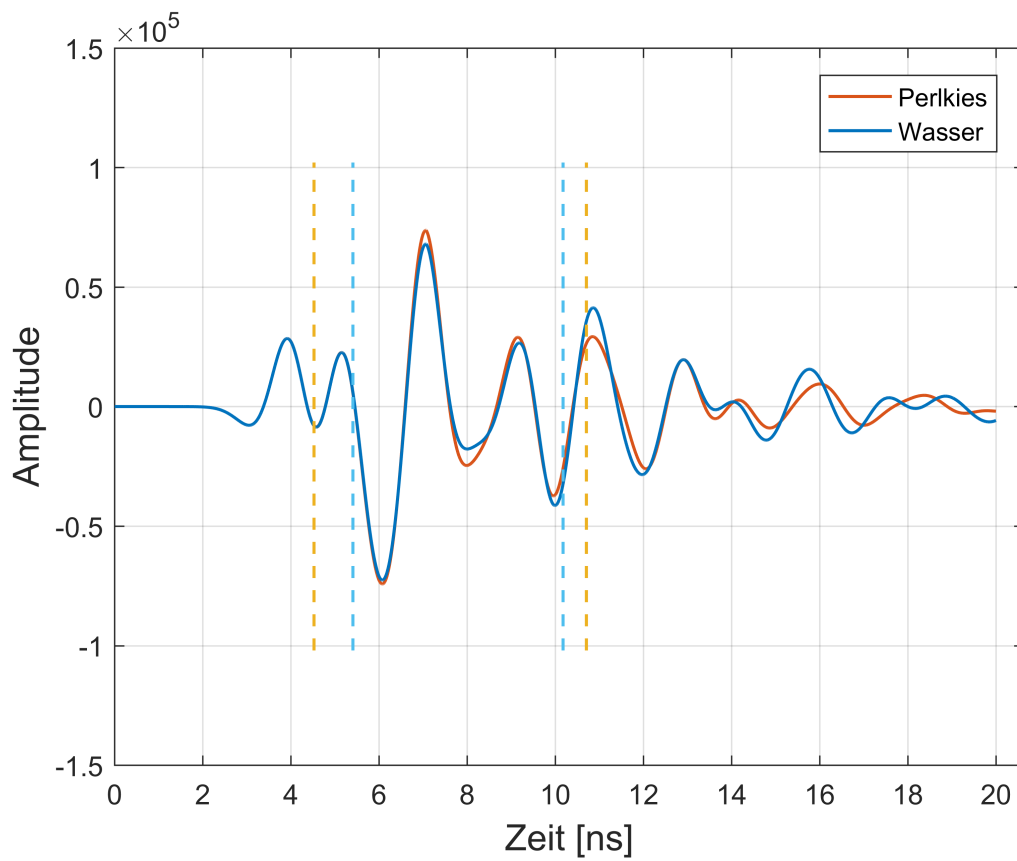


(b)

Abbildung 7.12: Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

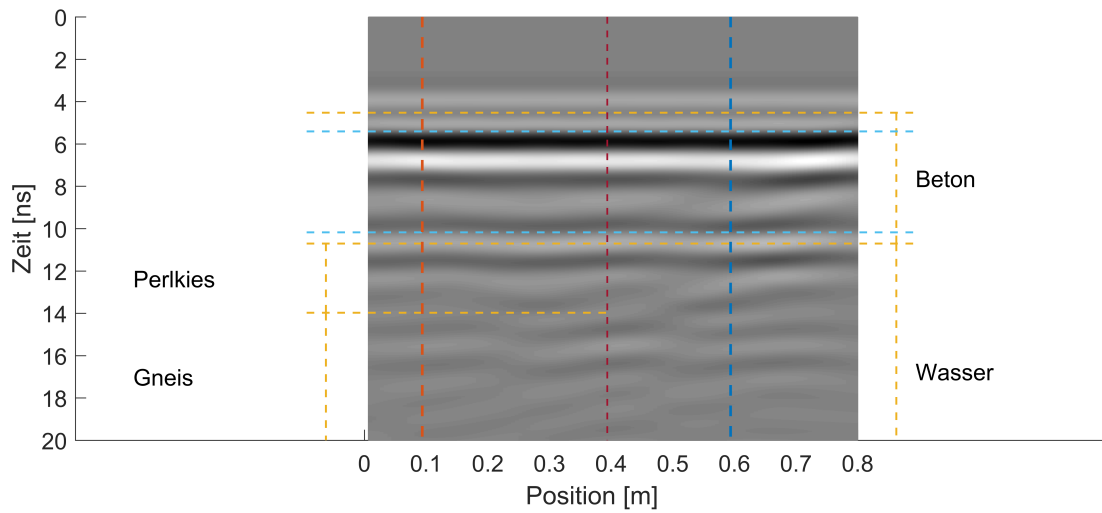


(a)

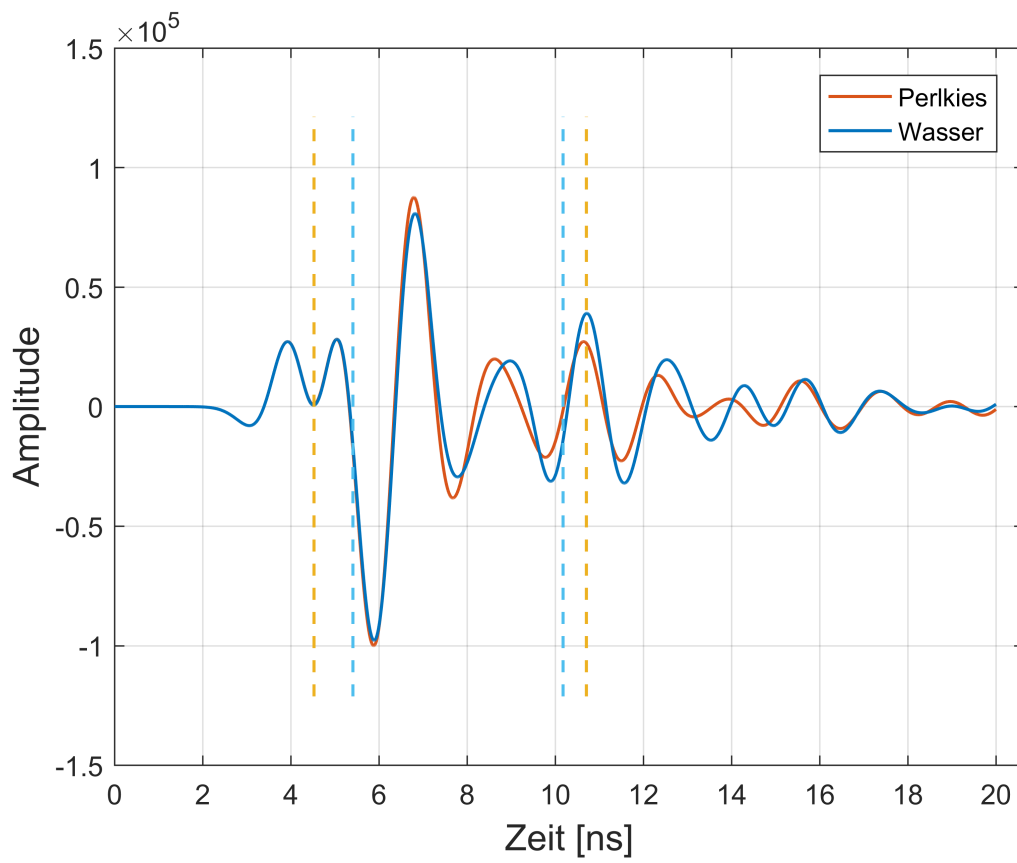


(b)

Abbildung 7.13: Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Wasser



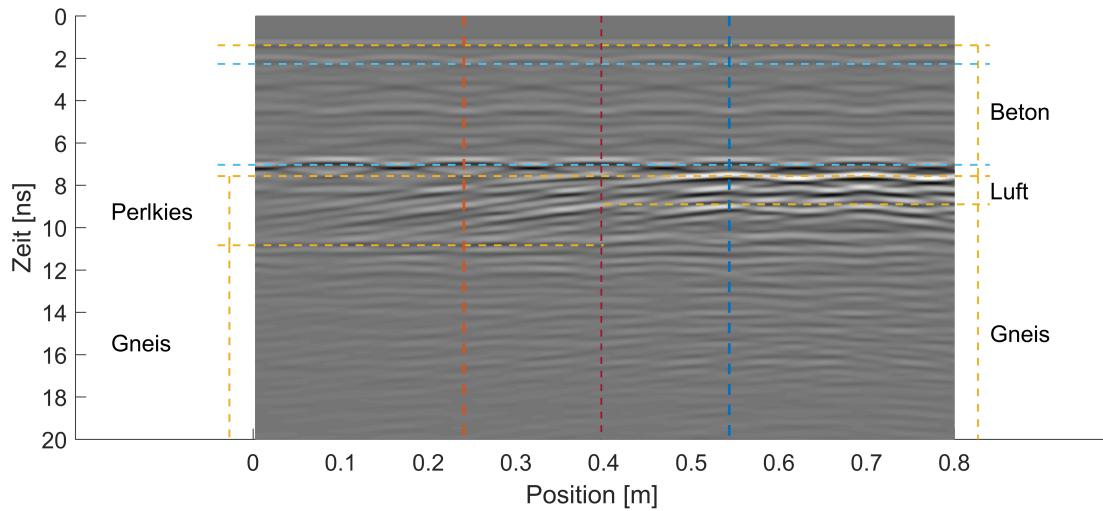
(a)



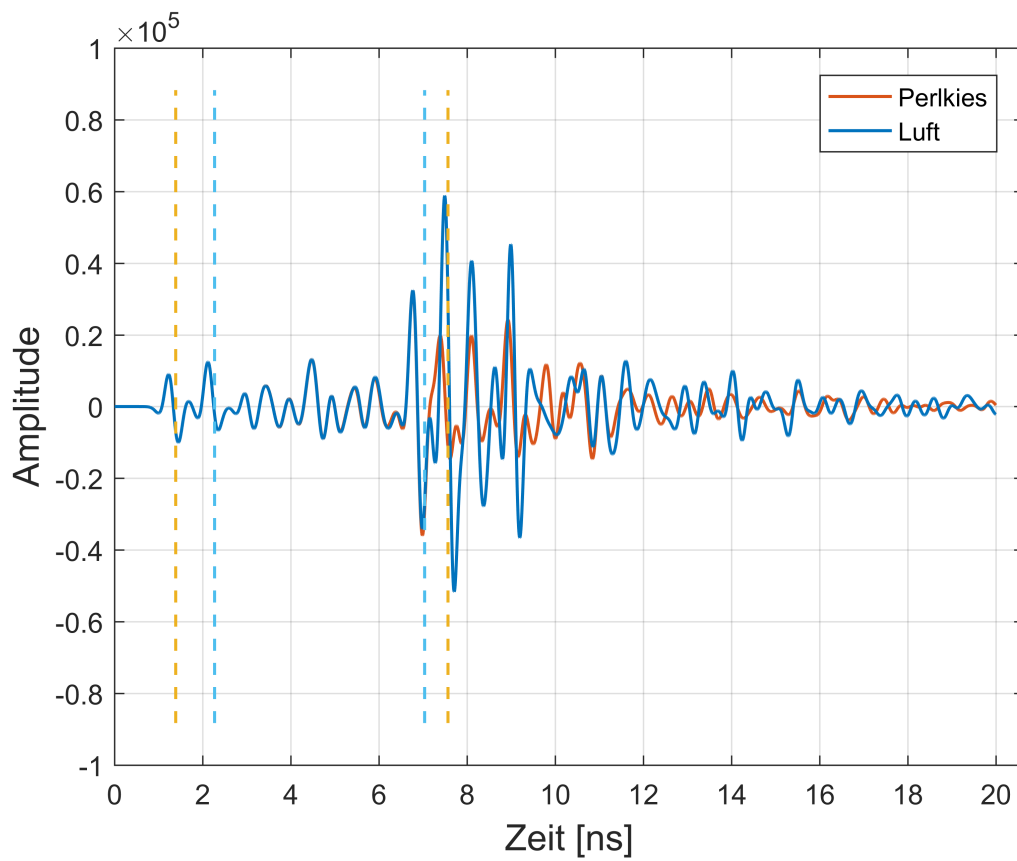
(b)

Abbildung 7.14: Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

Anhang B

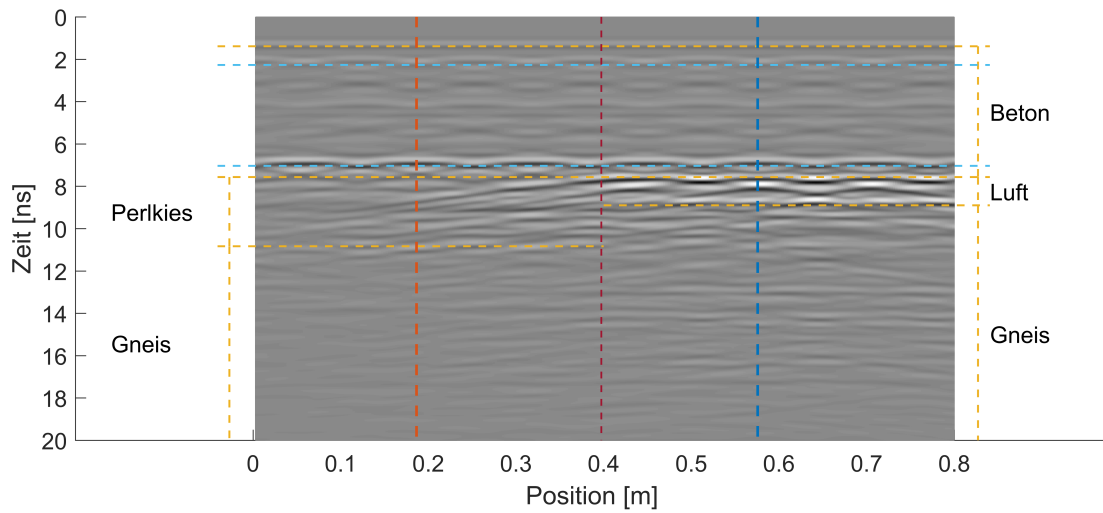


(a)

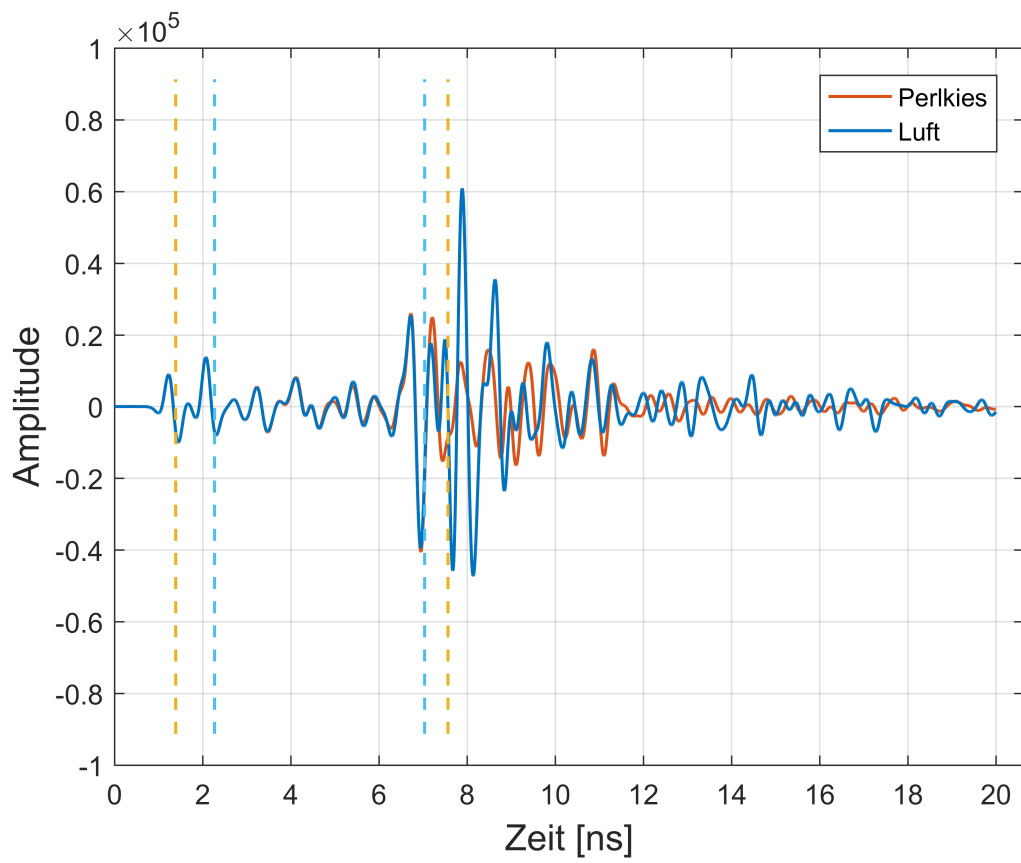


(b)

Abbildung 7.1: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft

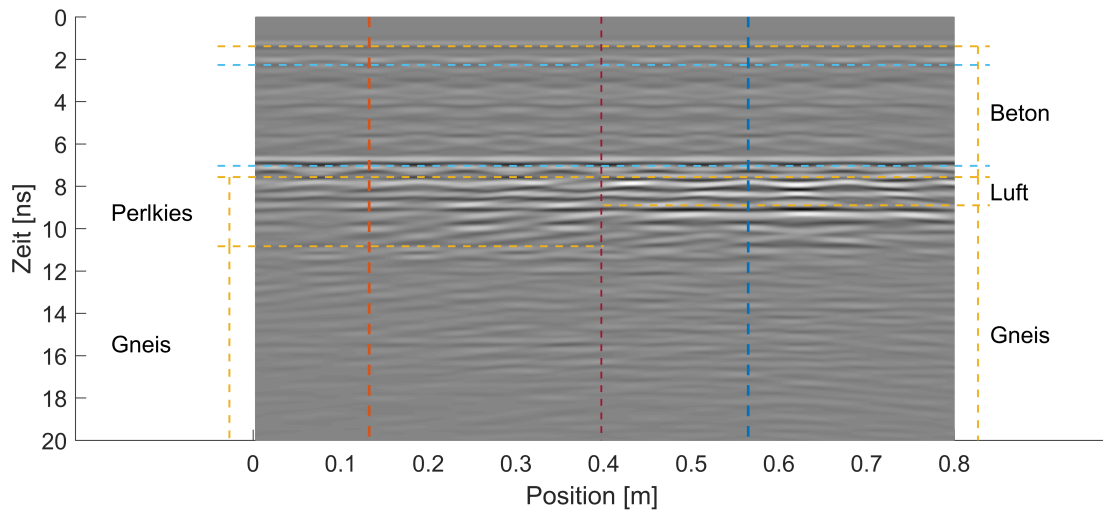


(a)

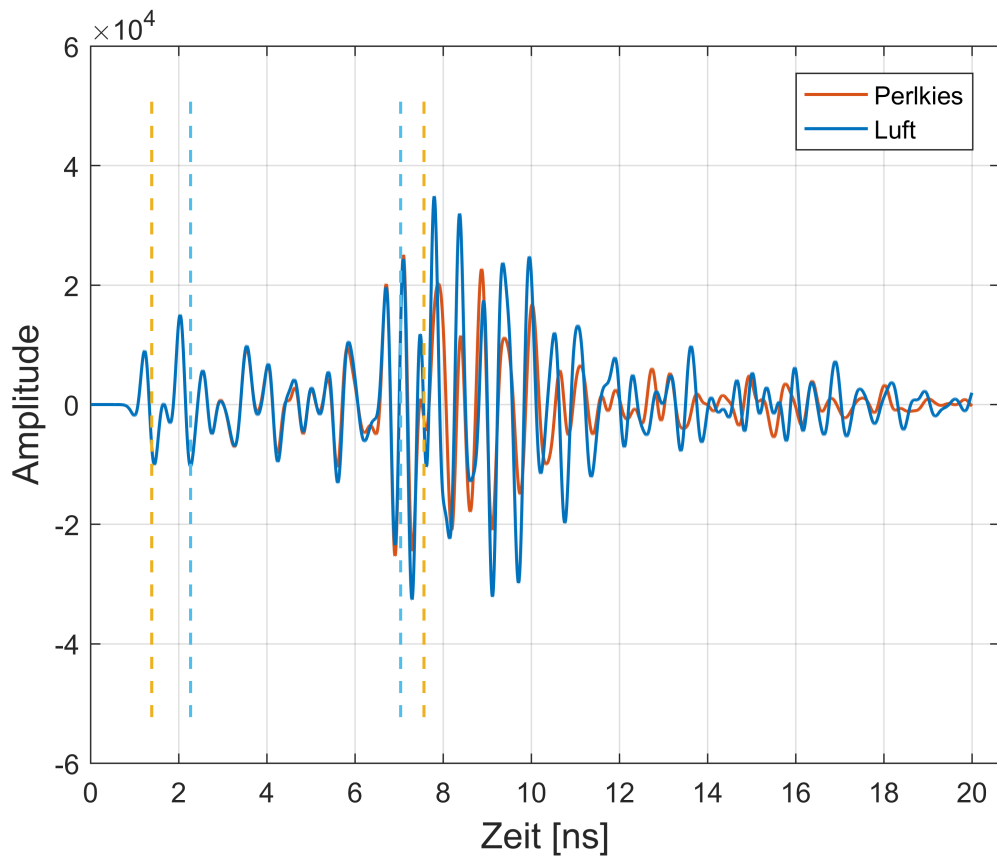


(b)

Abbildung 7.2: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft

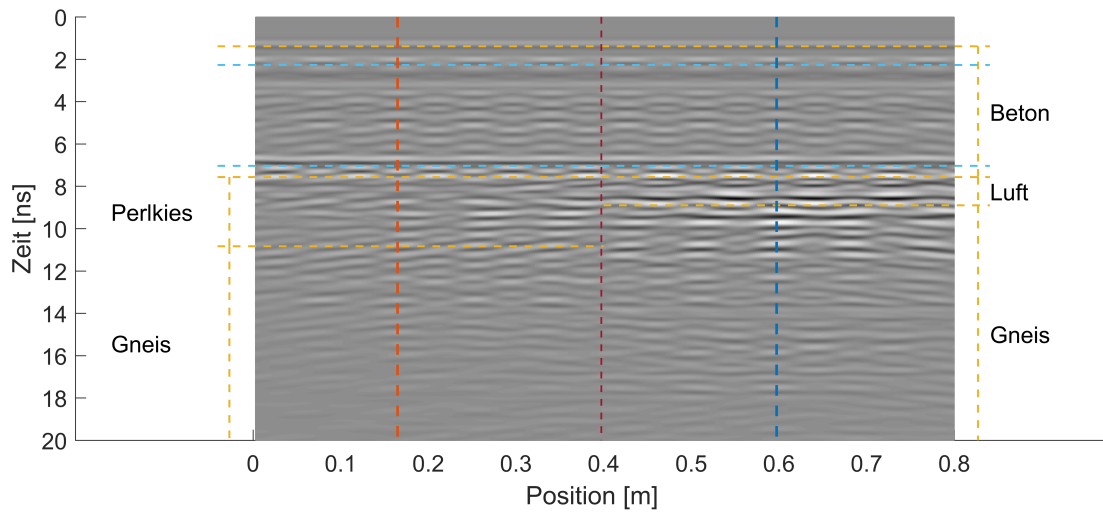


(a)

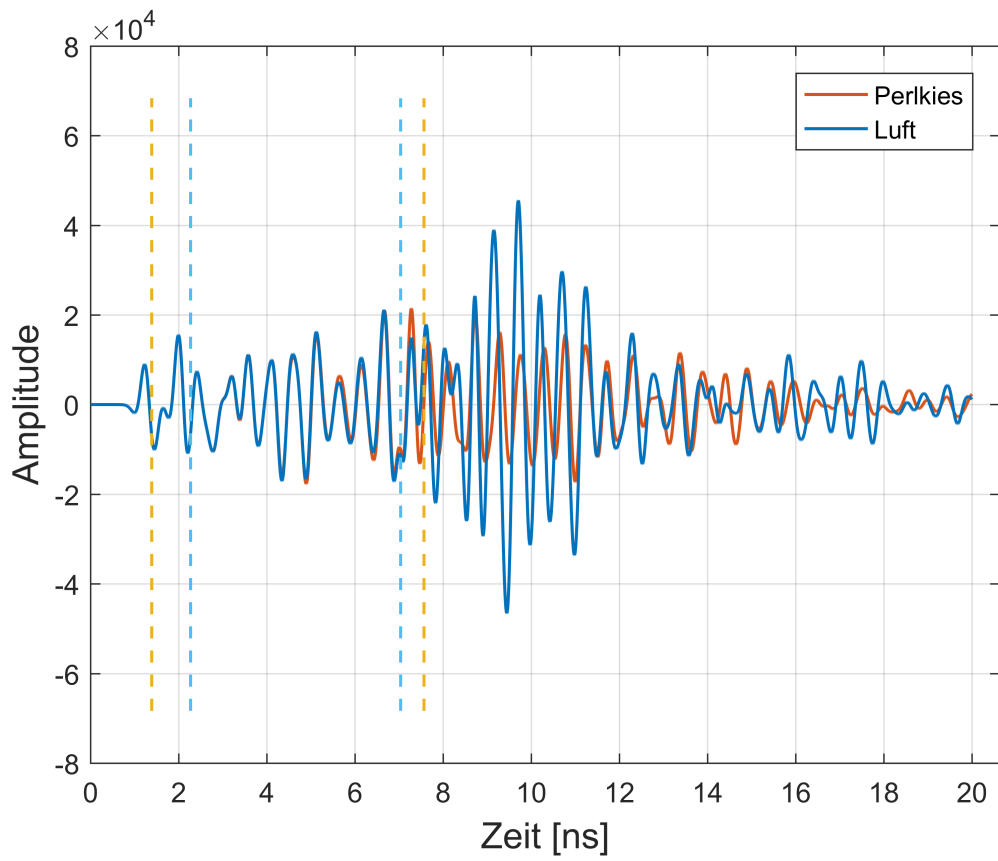


(b)

Abbildung 7.3: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft

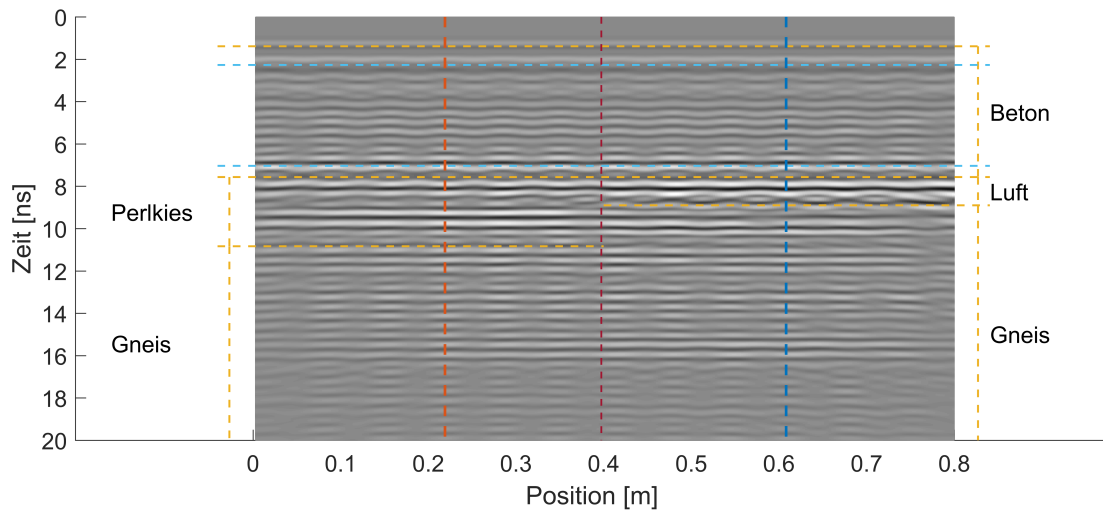


(a)

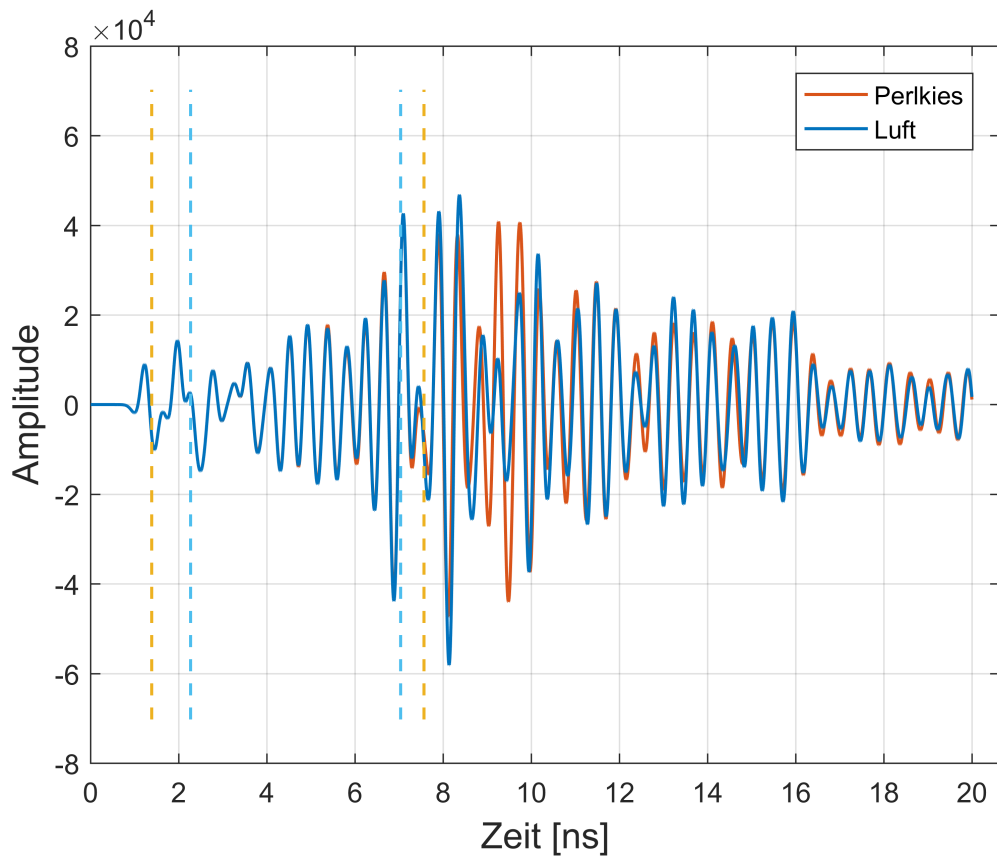


(b)

Abbildung 7.4: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 8 cm, Hohlraumfüllung: Luft

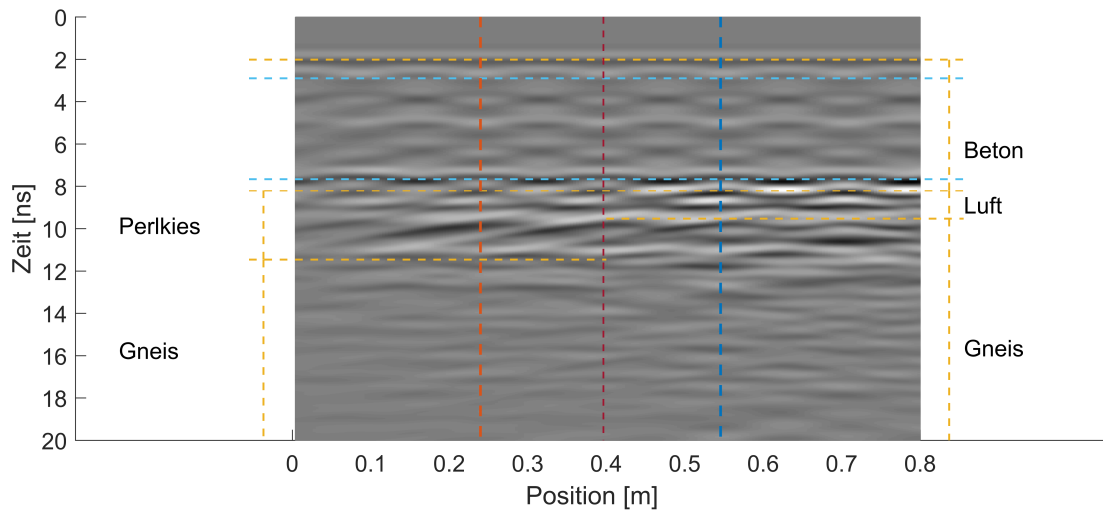


(a)

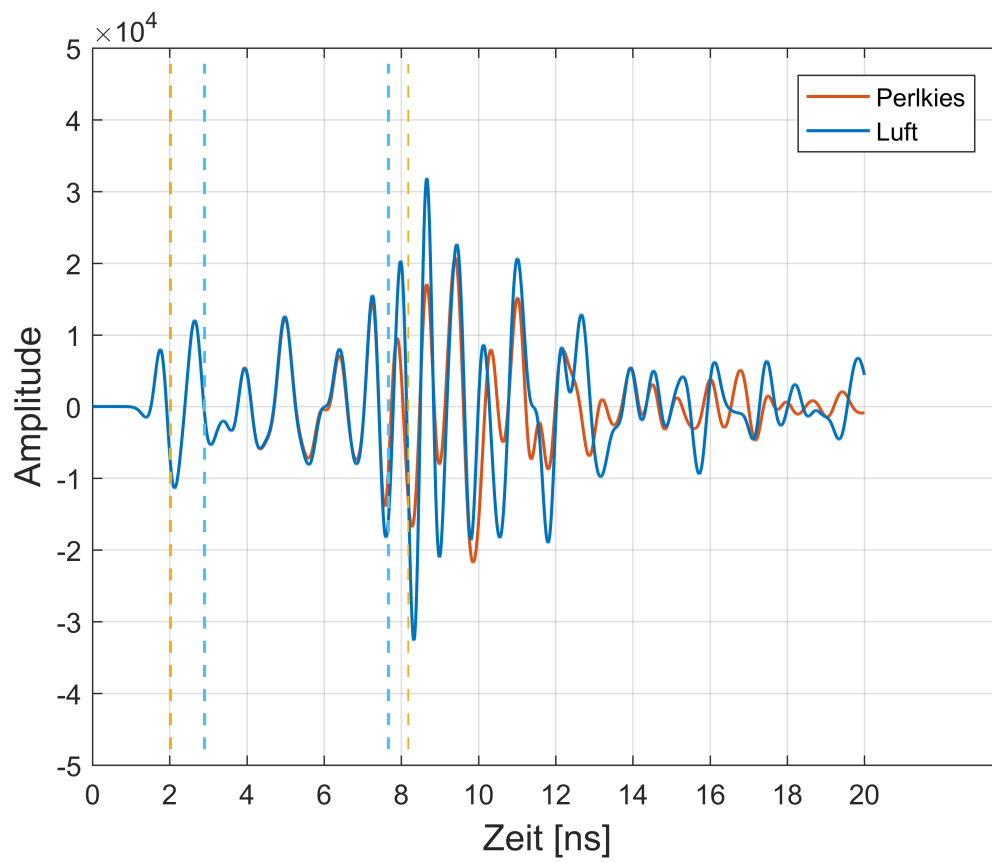


(b)

Abbildung 7.5: Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 6 cm, Hohlraumfüllung: Luft

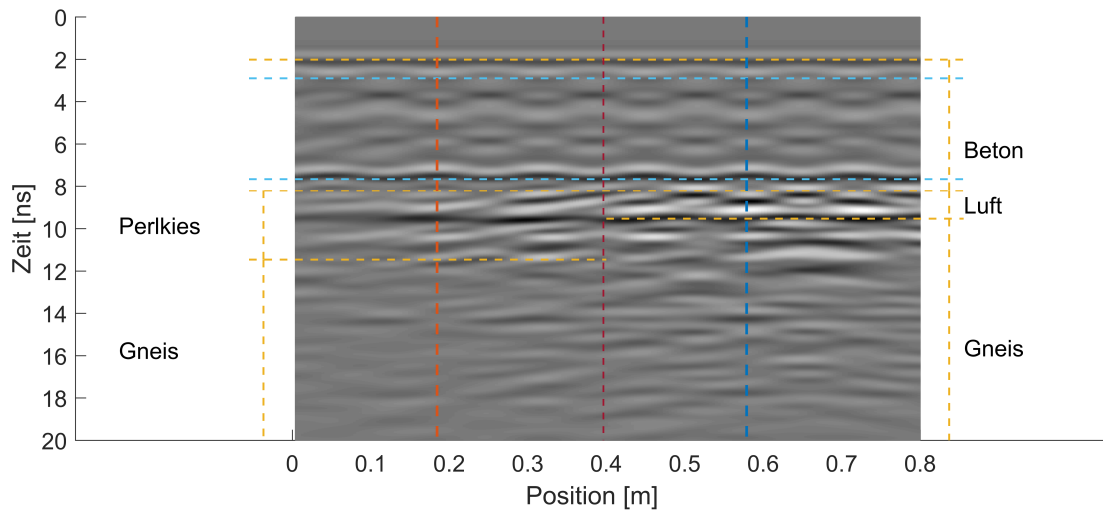


(a)

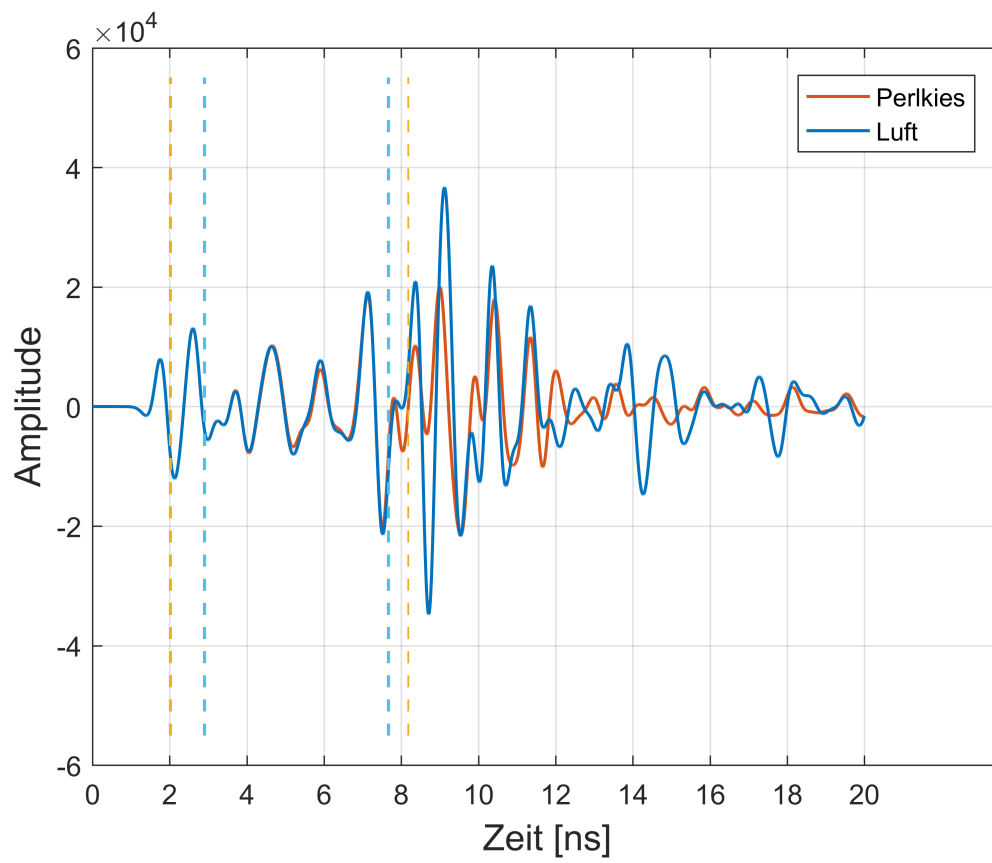


(b)

Abbildung 7.6: Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft

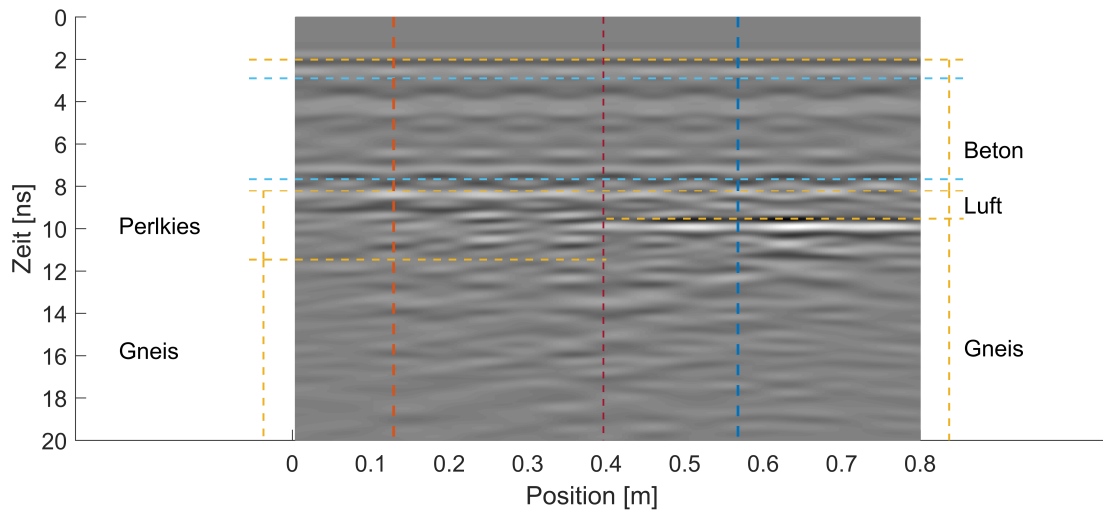


(a)

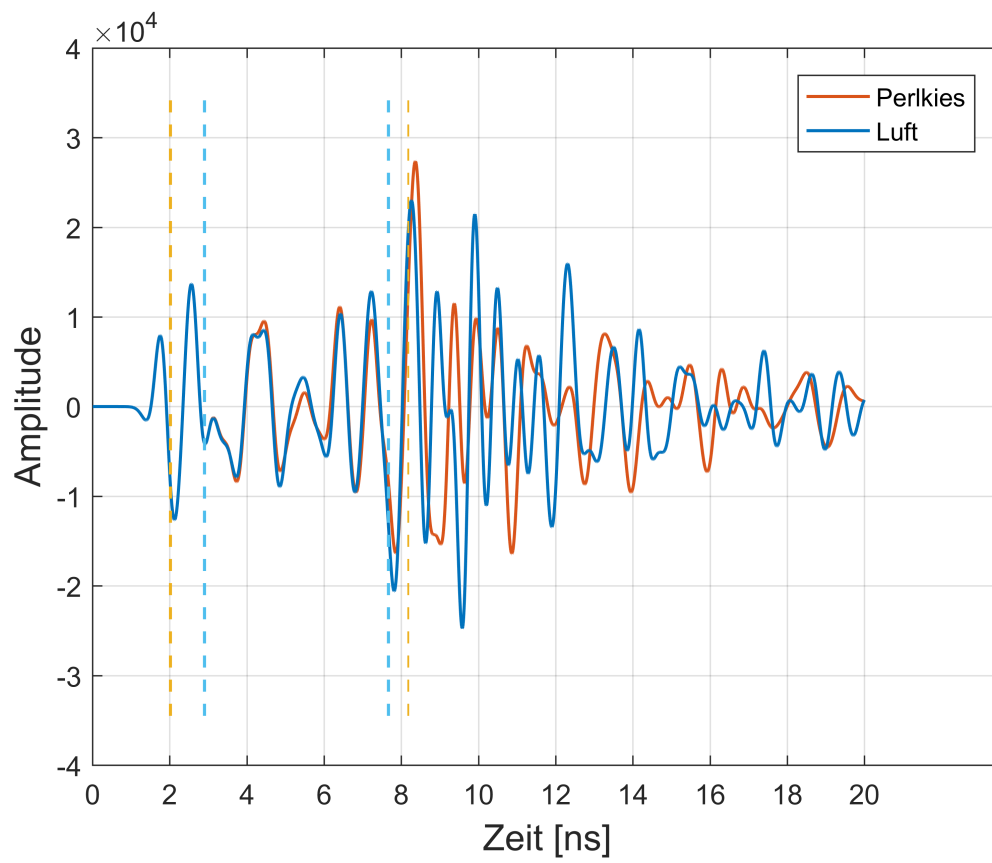


(b)

Abbildung 7.7: Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft

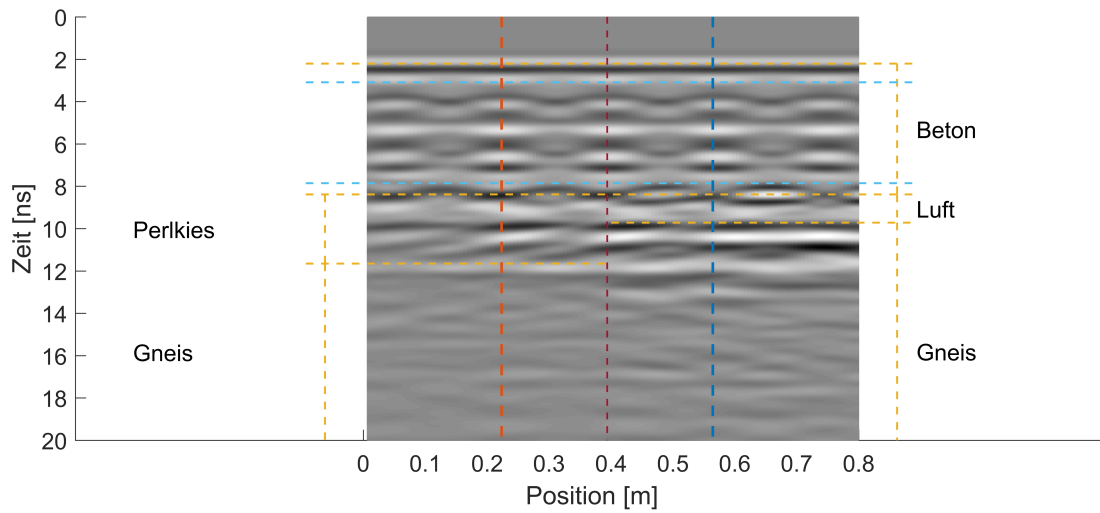


(a)

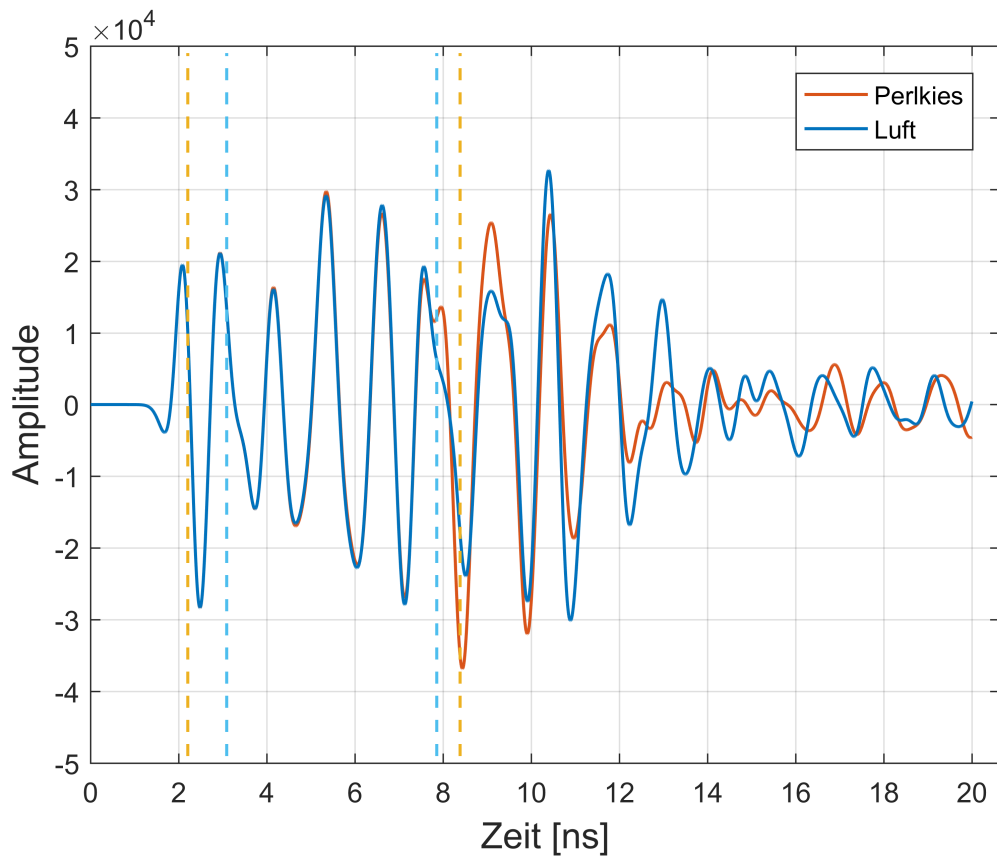


(b)

Abbildung 7.8: Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft

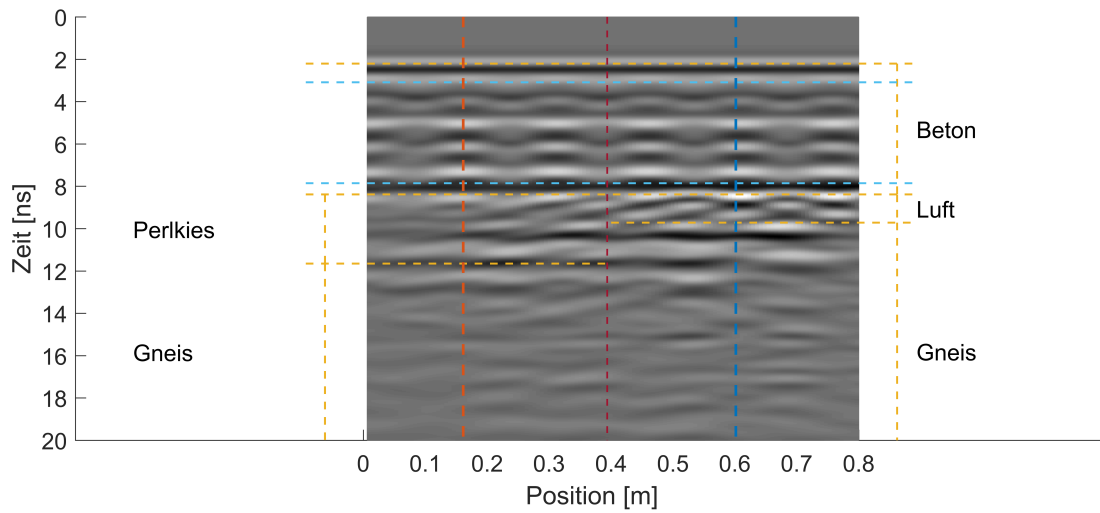


(a)

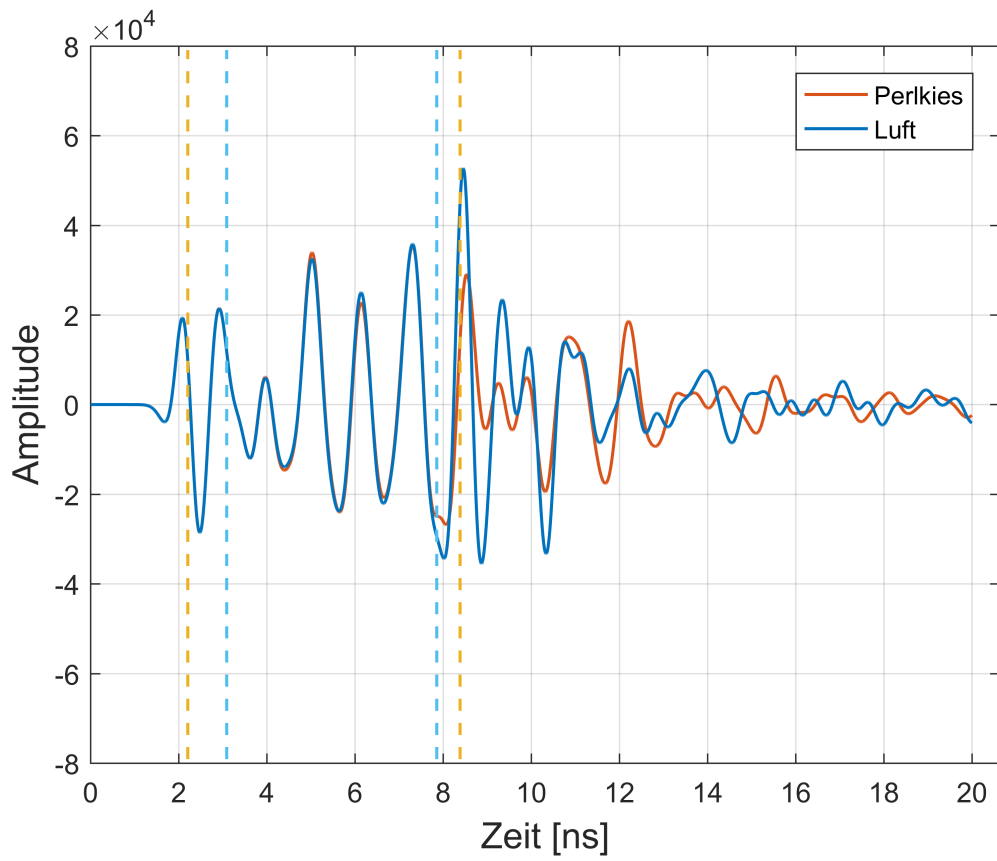


(b)

Abbildung 7.9: Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft

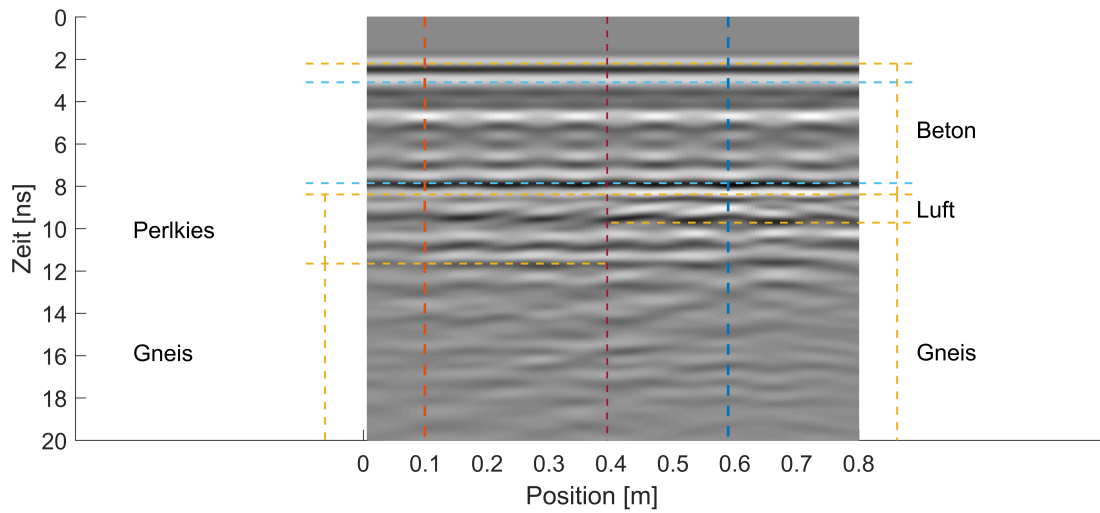


(a)

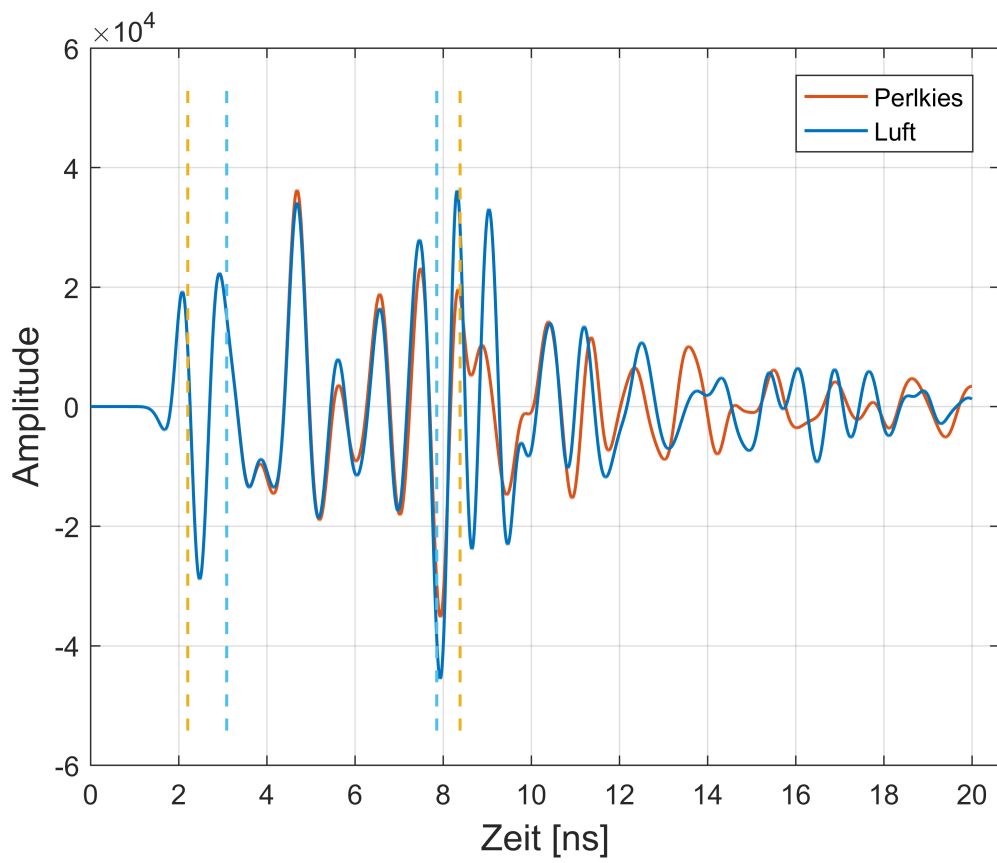


(b)

Abbildung 7.10: Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft

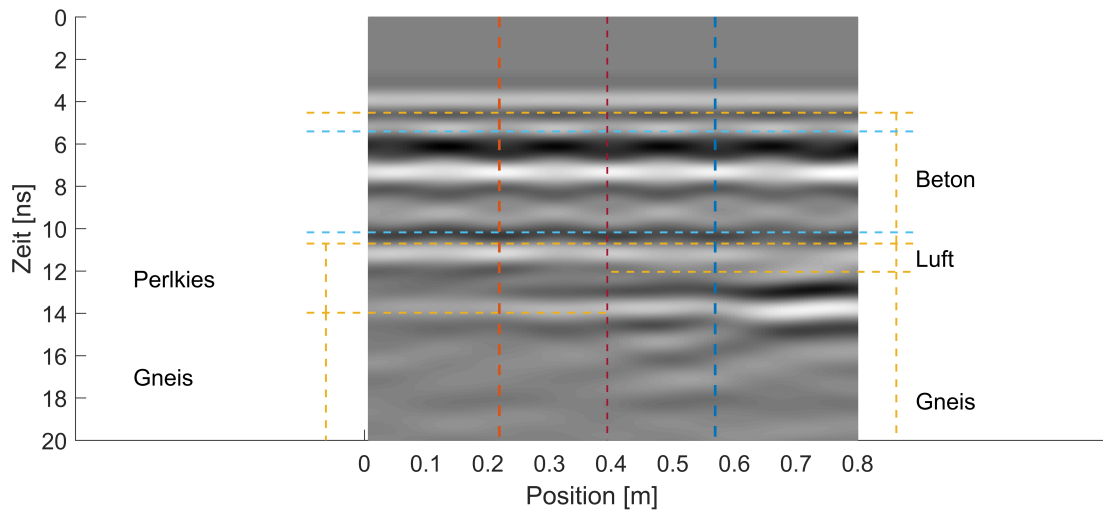


(a)

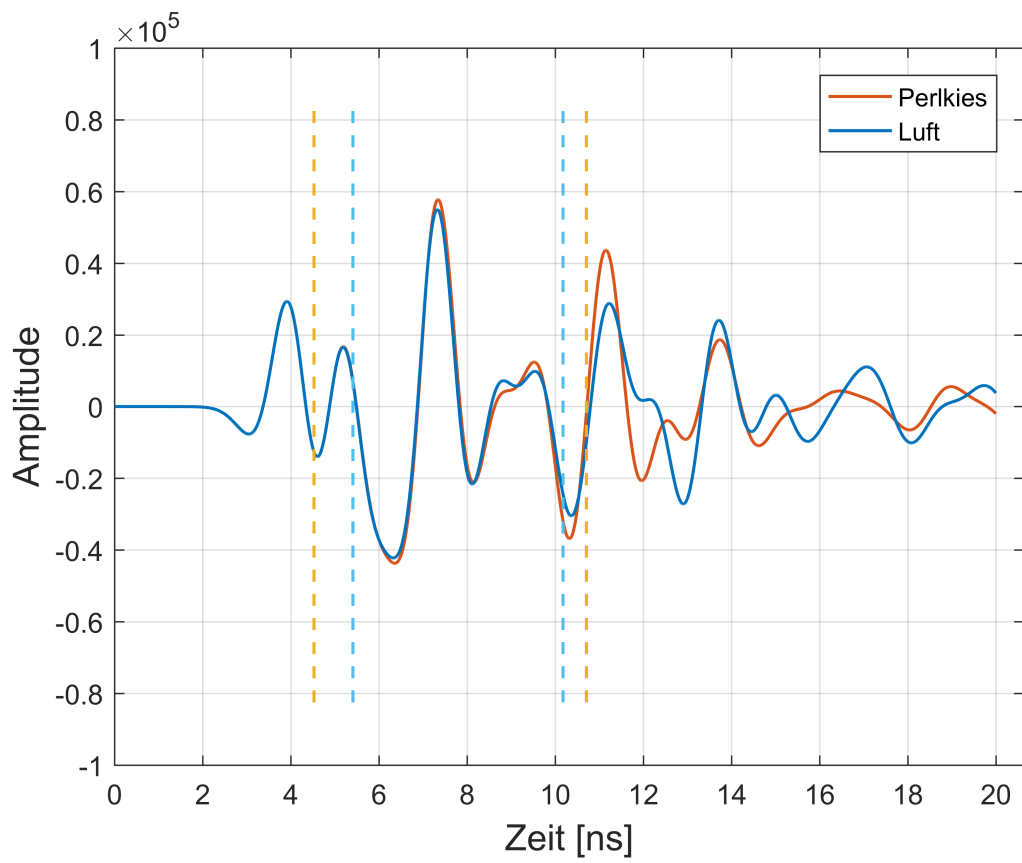


(b)

Abbildung 7.11: Frequenz: 900 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft

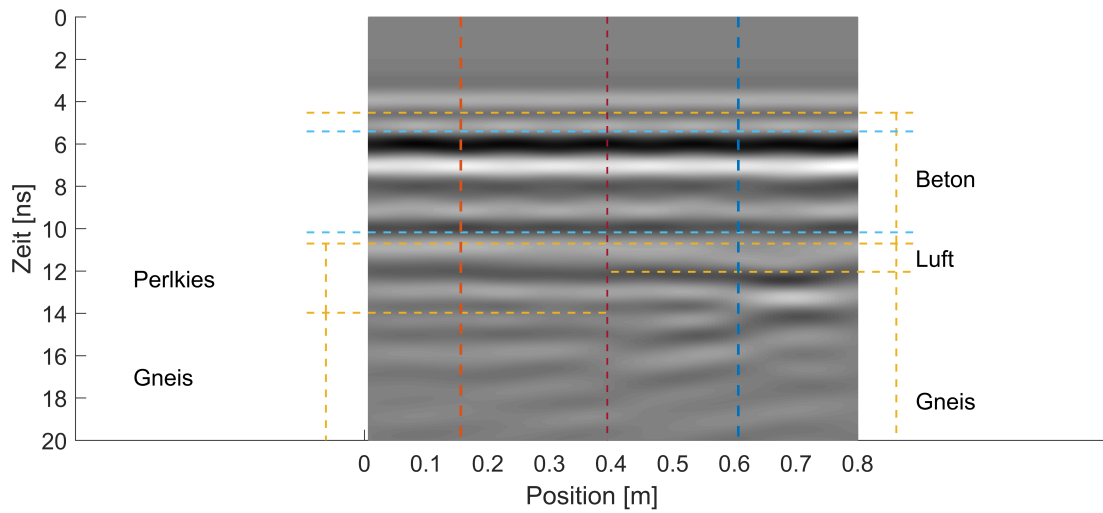


(a)

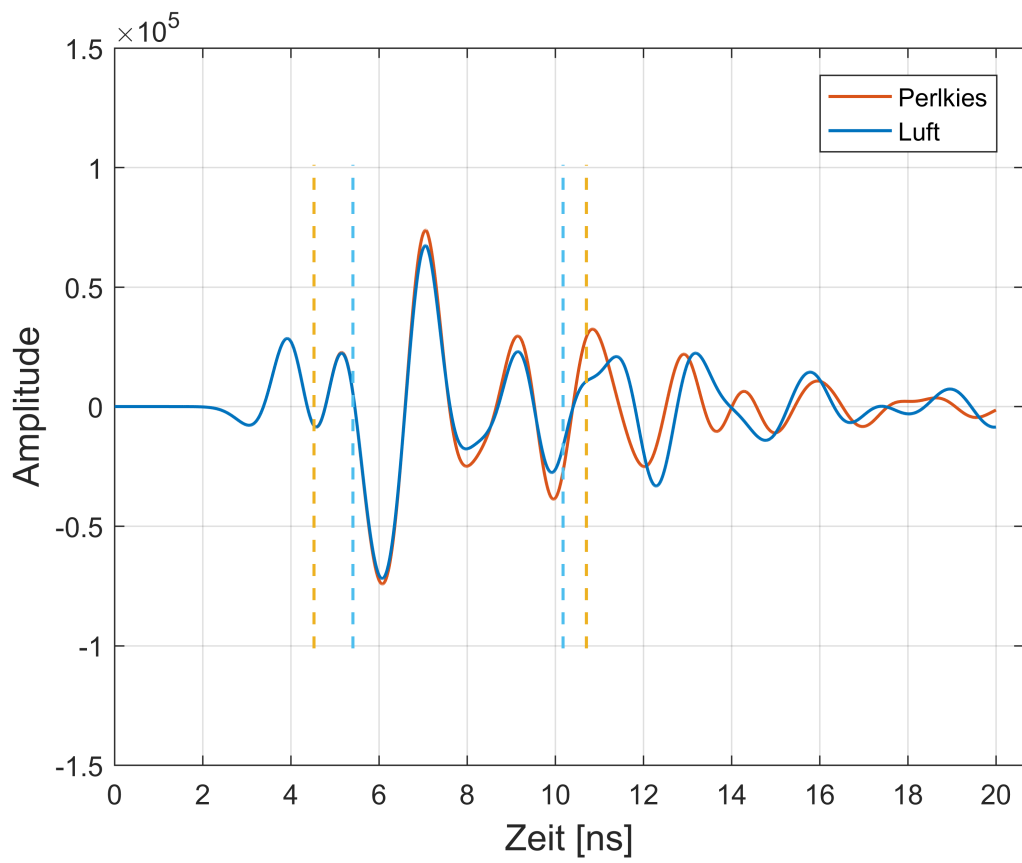


(b)

Abbildung 7.12: Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft

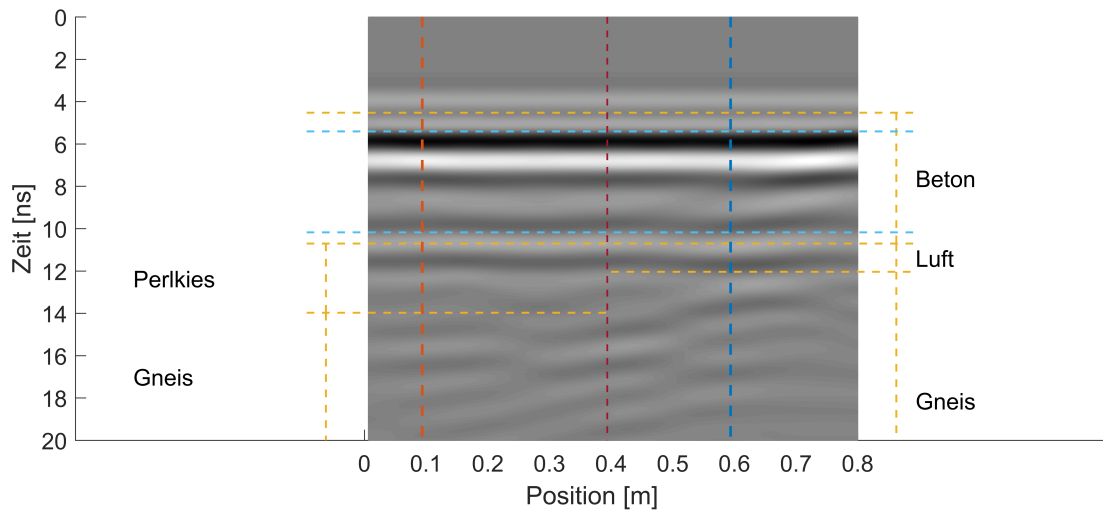


(a)

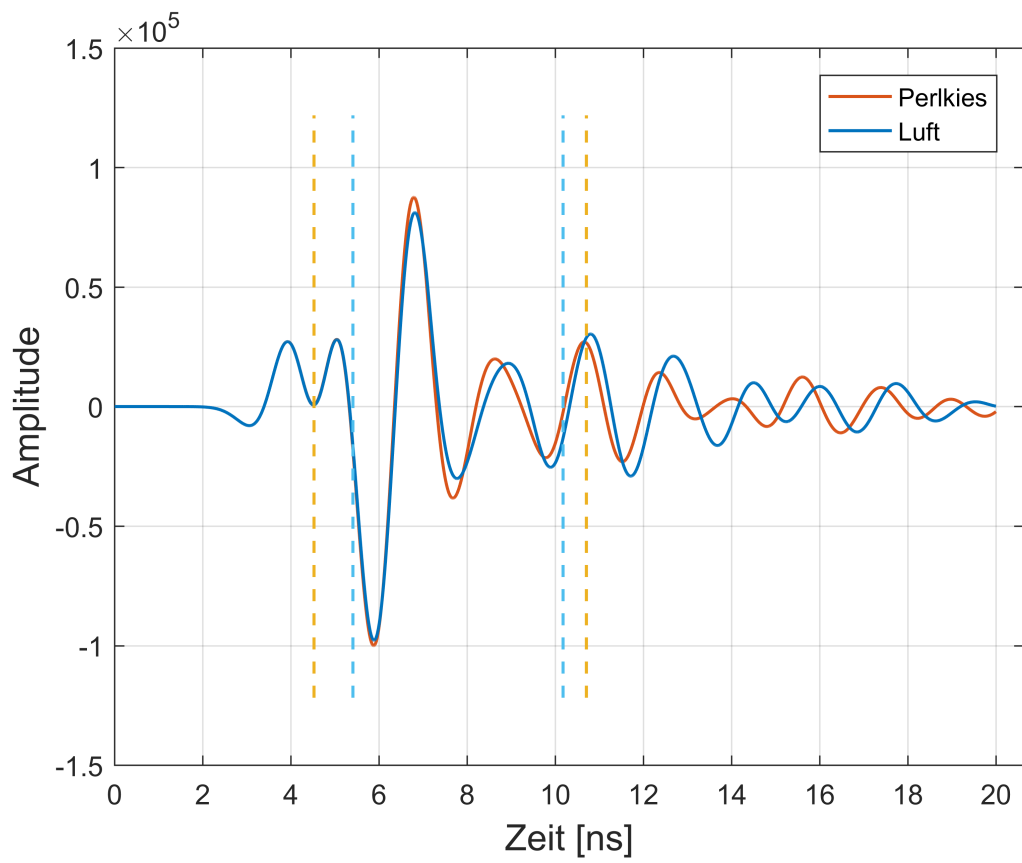


(b)

Abbildung 7.13: Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 12 cm, Hohlraumfüllung: Luft



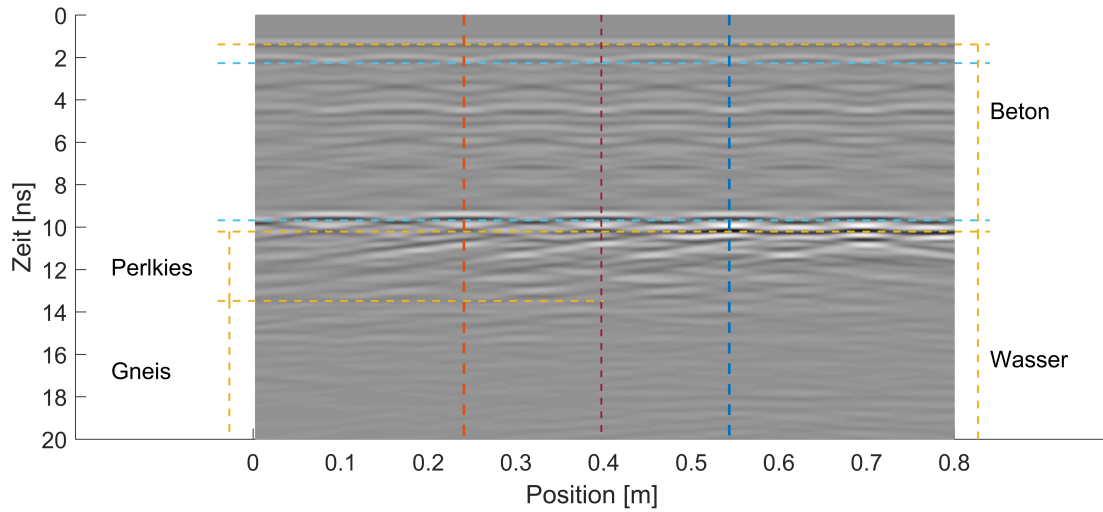
(a)



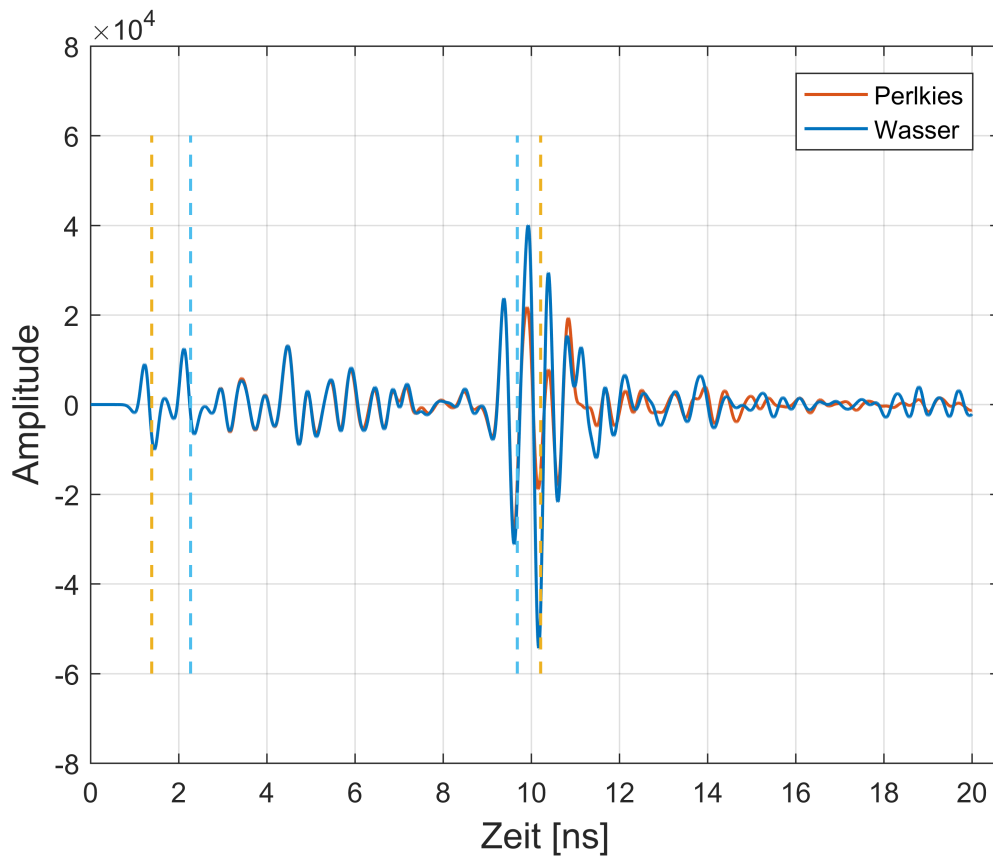
(b)

Abbildung 7.14: Frequenz: 400 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft

Anhang C

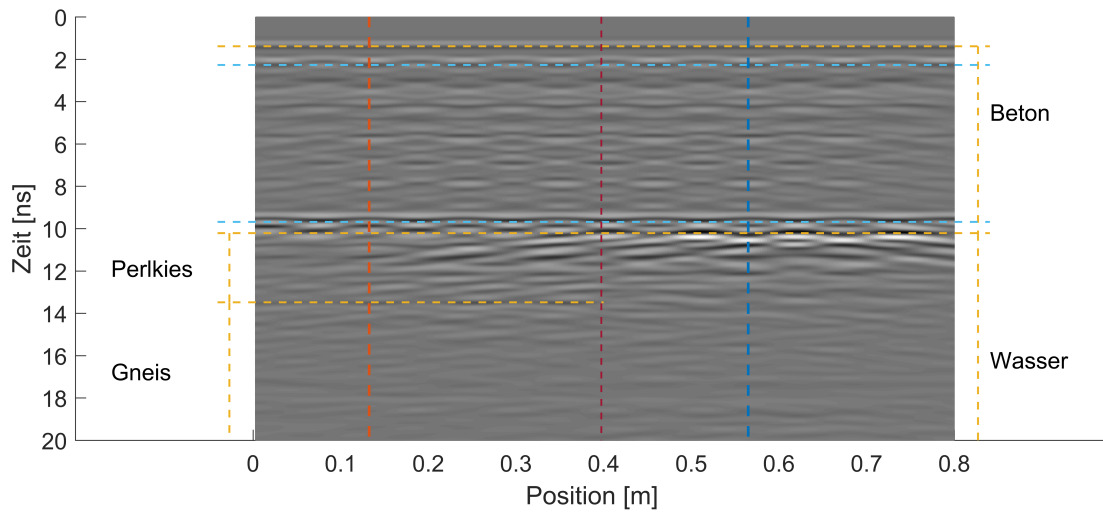


(a)

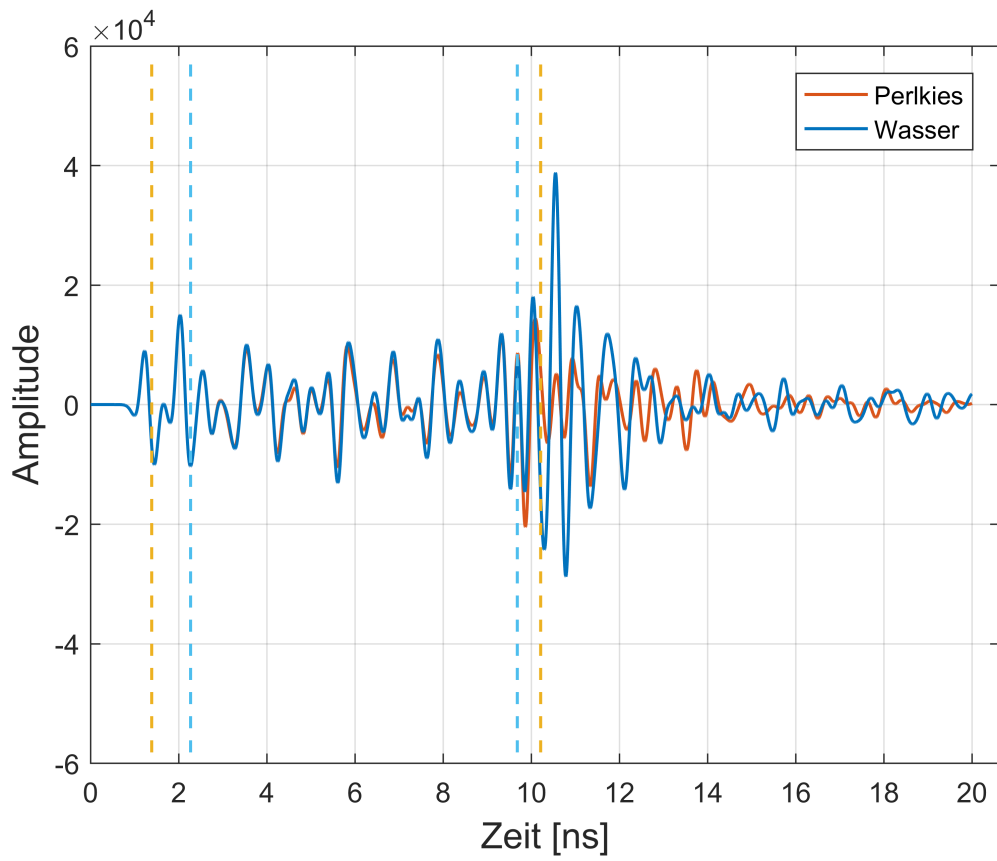


(b)

Abbildung 7.1: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

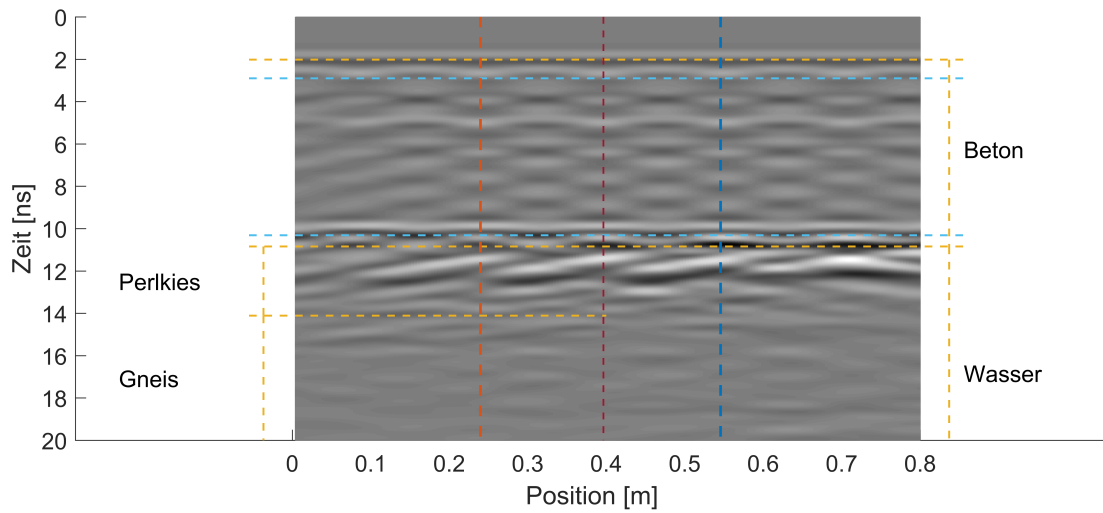


(a)

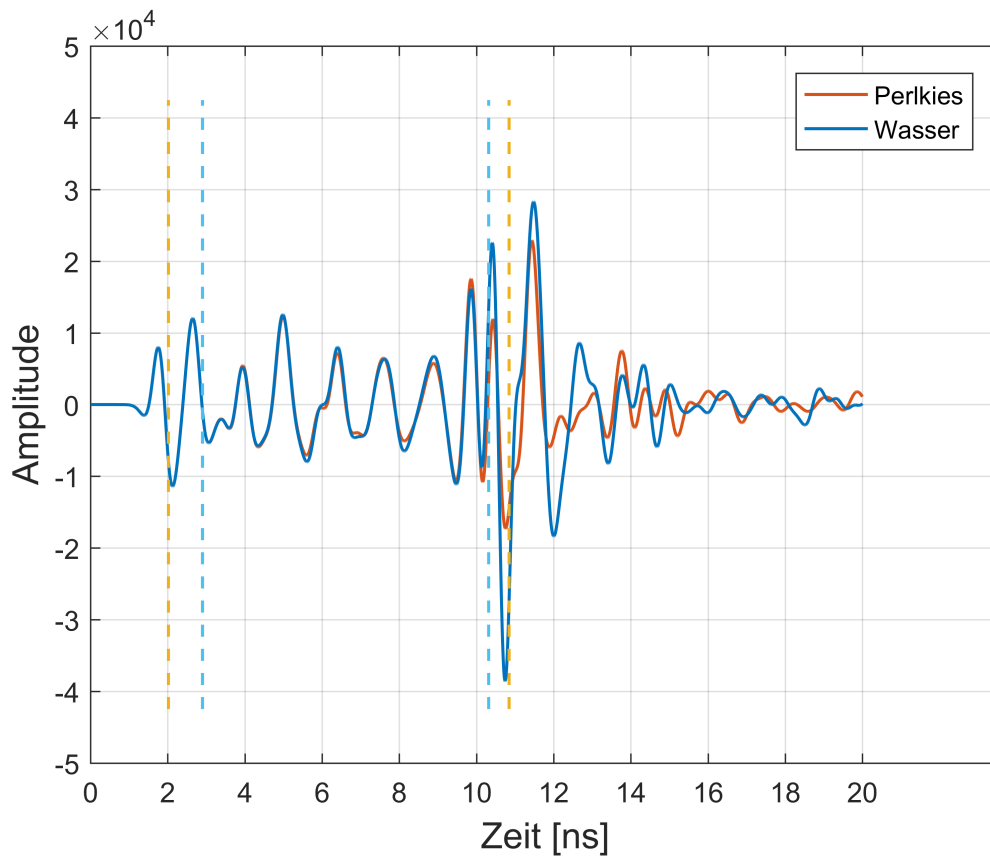


(b)

Abbildung 7.2: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

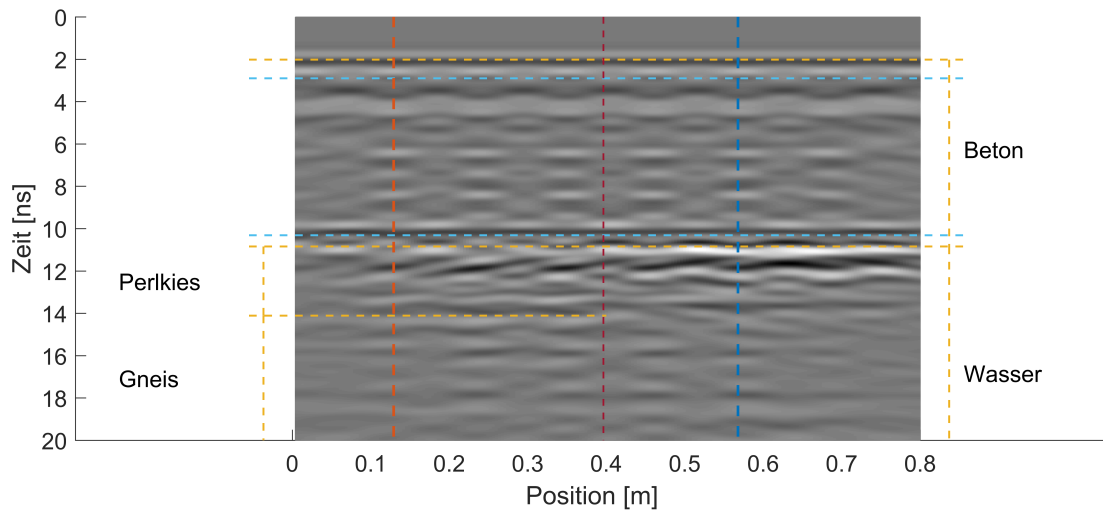


(a)

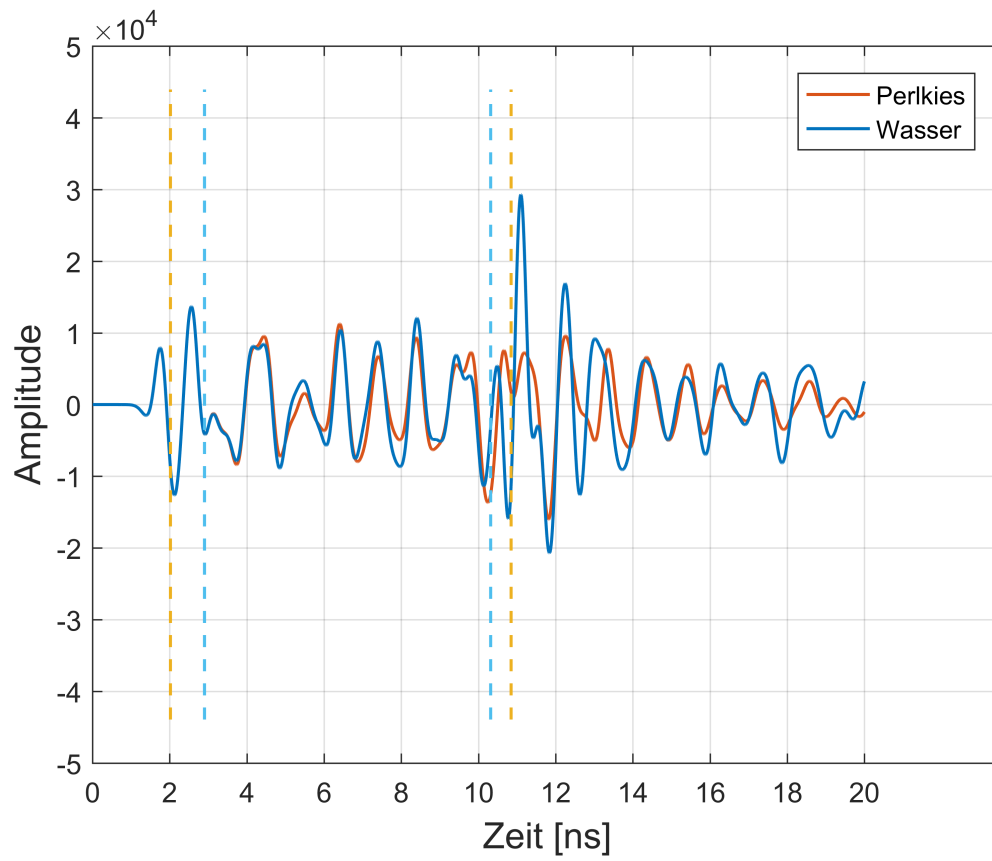


(b)

Abbildung 7.3: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

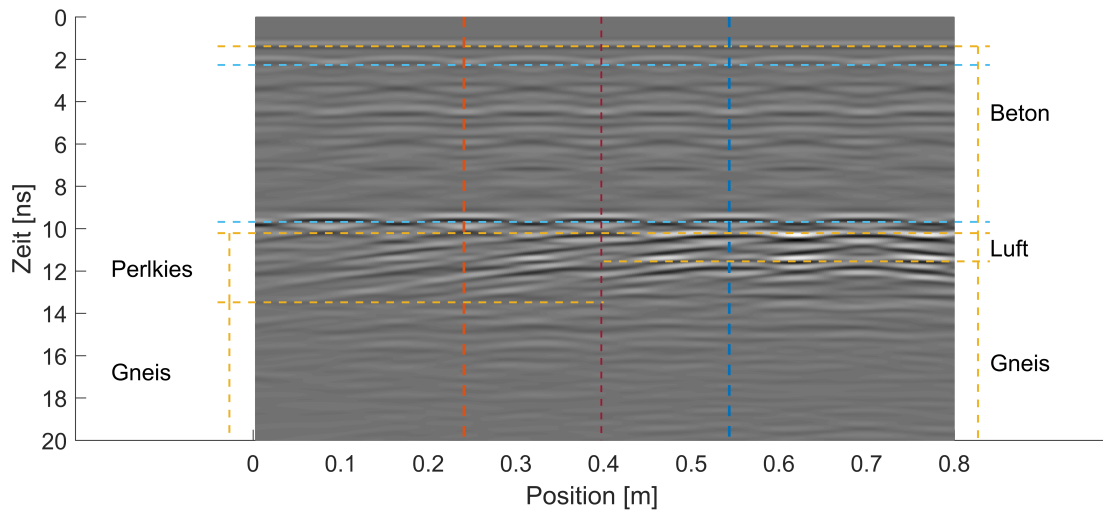


(a)

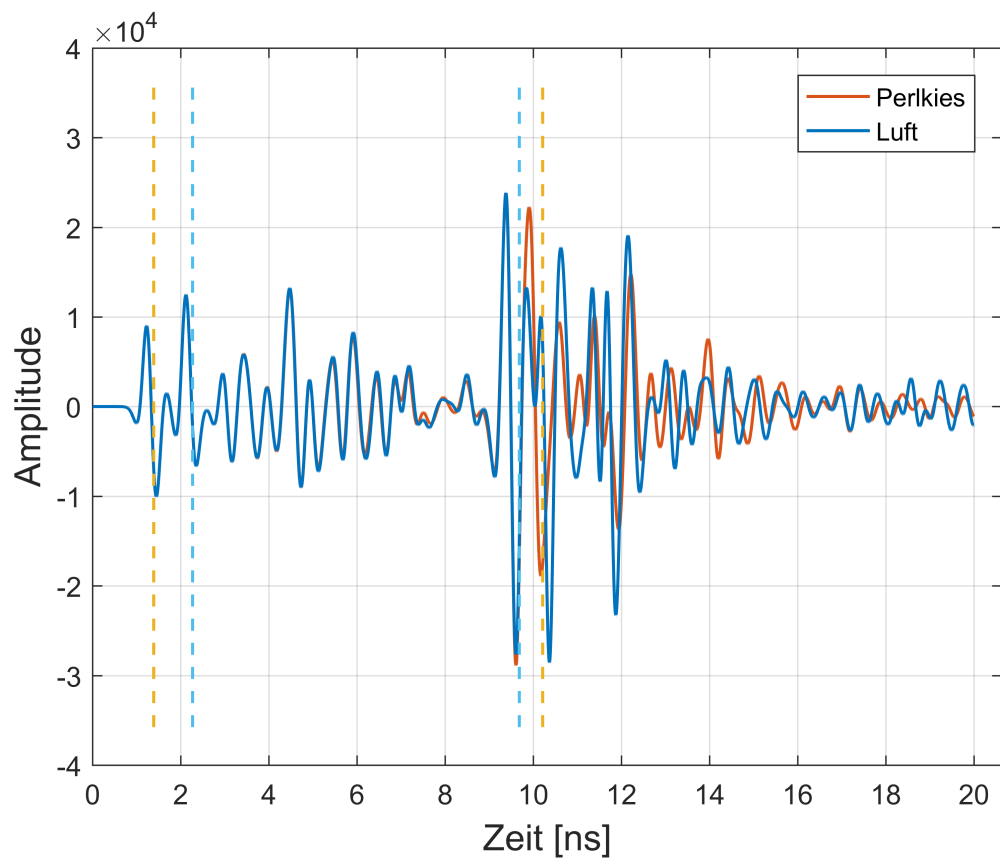


(b)

Abbildung 7.4: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Wasser

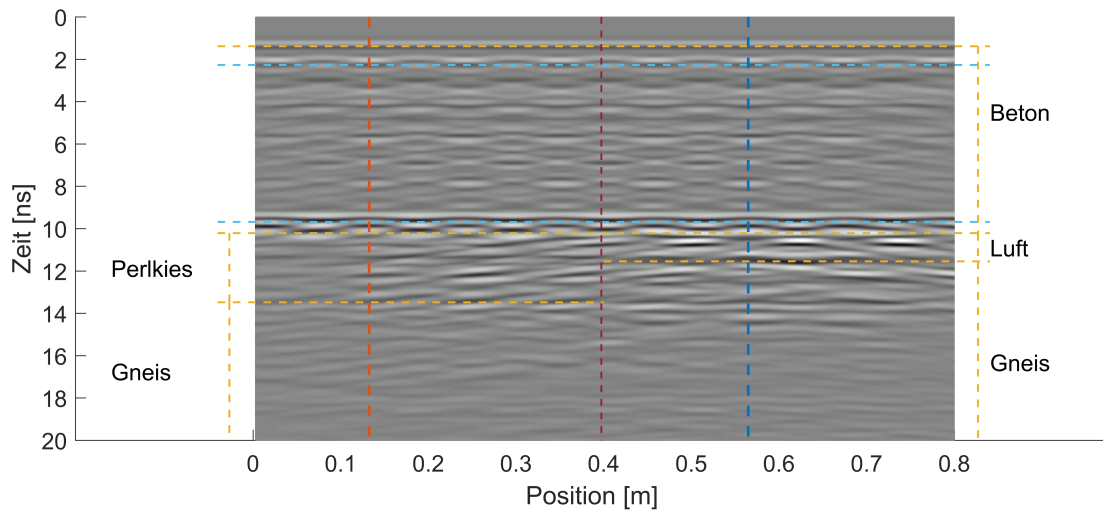


(a)

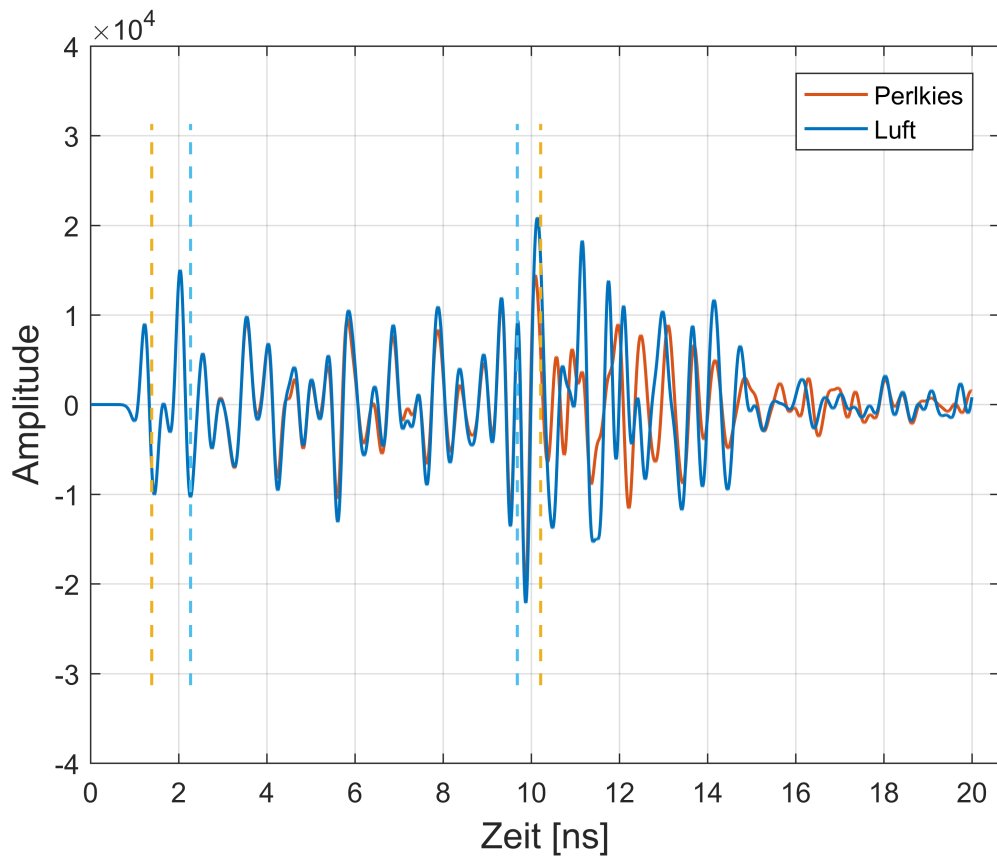


(b)

Abbildung 7.5: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft

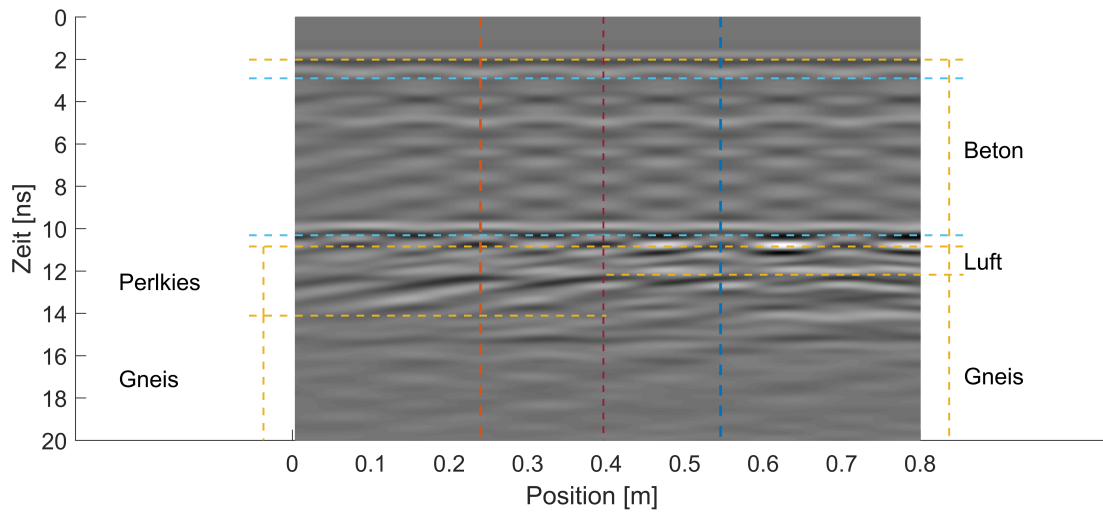


(a)

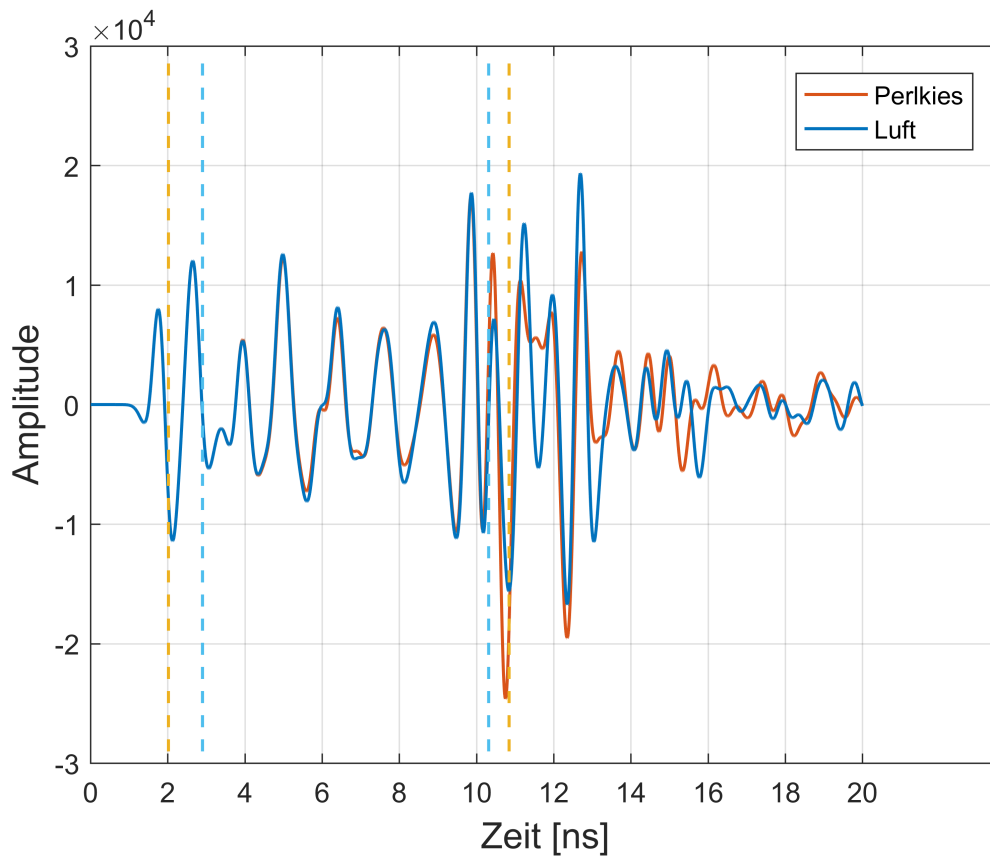


(b)

Abbildung 7.6: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft

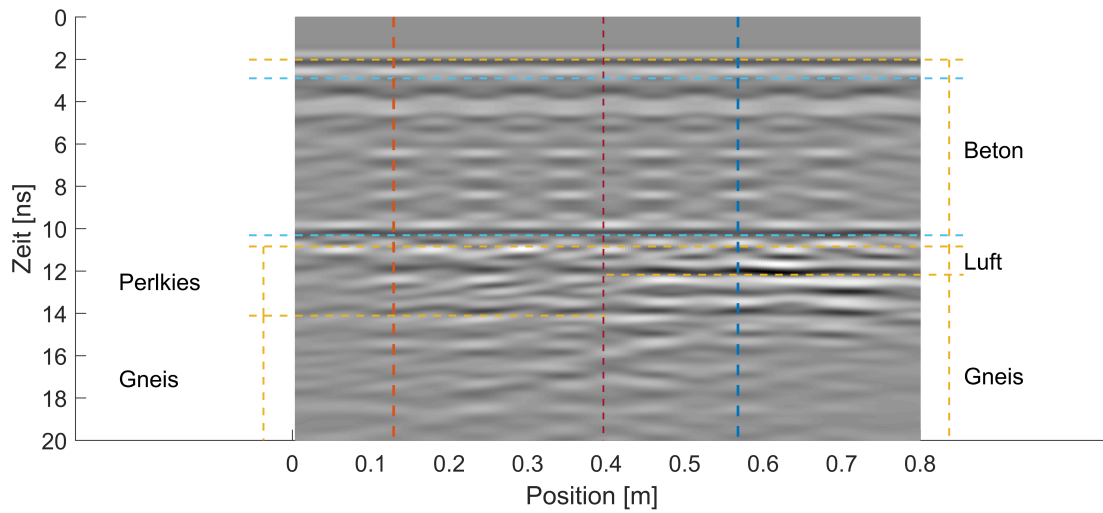


(a)

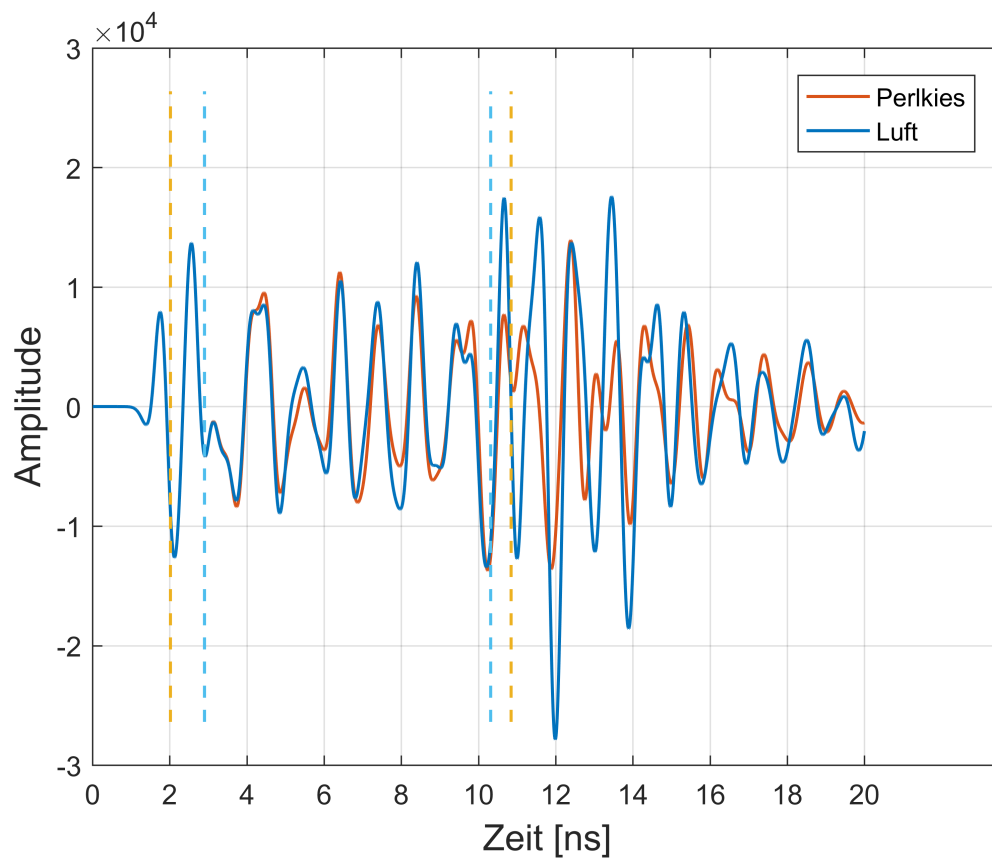


(b)

Abbildung 7.7: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 14 cm, Hohlraumfüllung: Luft

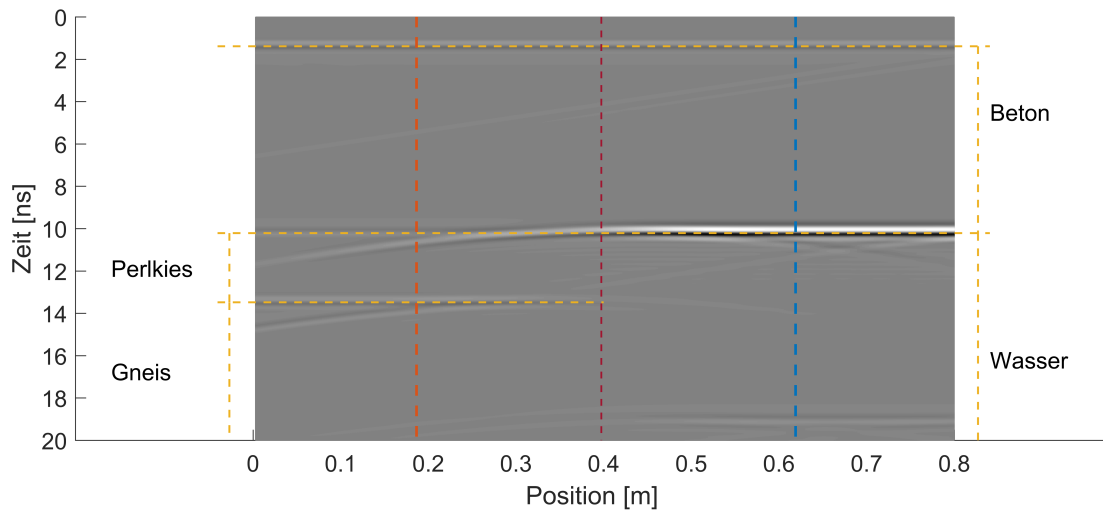


(a)

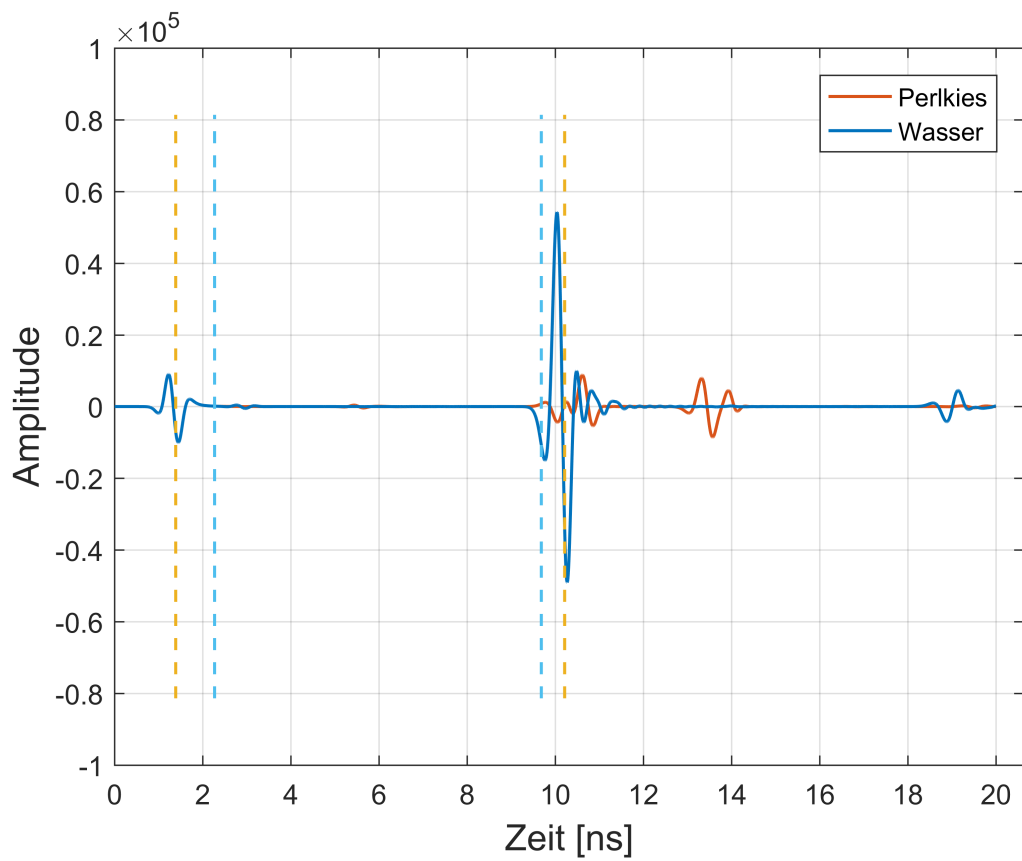


(b)

Abbildung 7.8: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, Bewehrungsdichte: 10 cm, Hohlraumfüllung: Luft

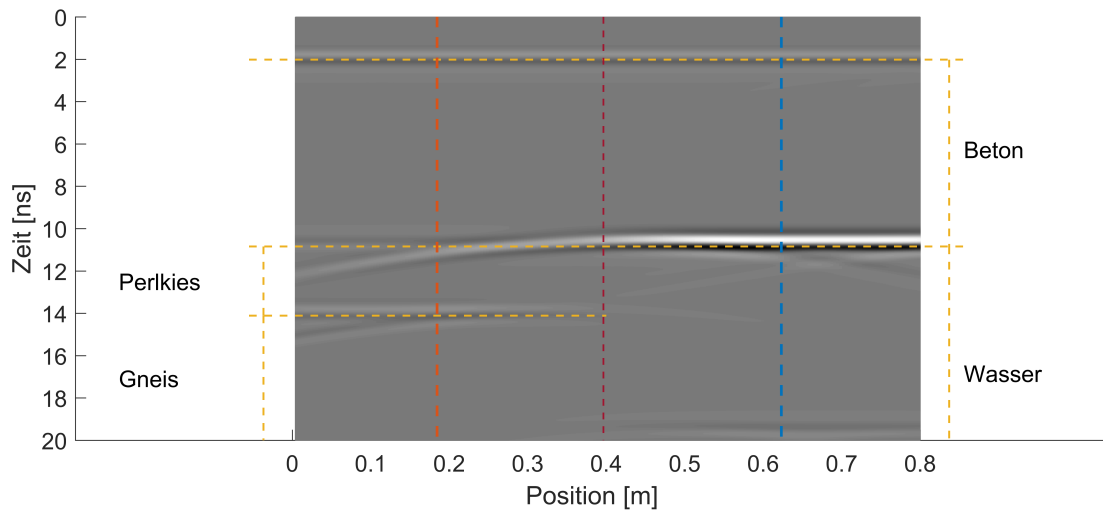


(a)

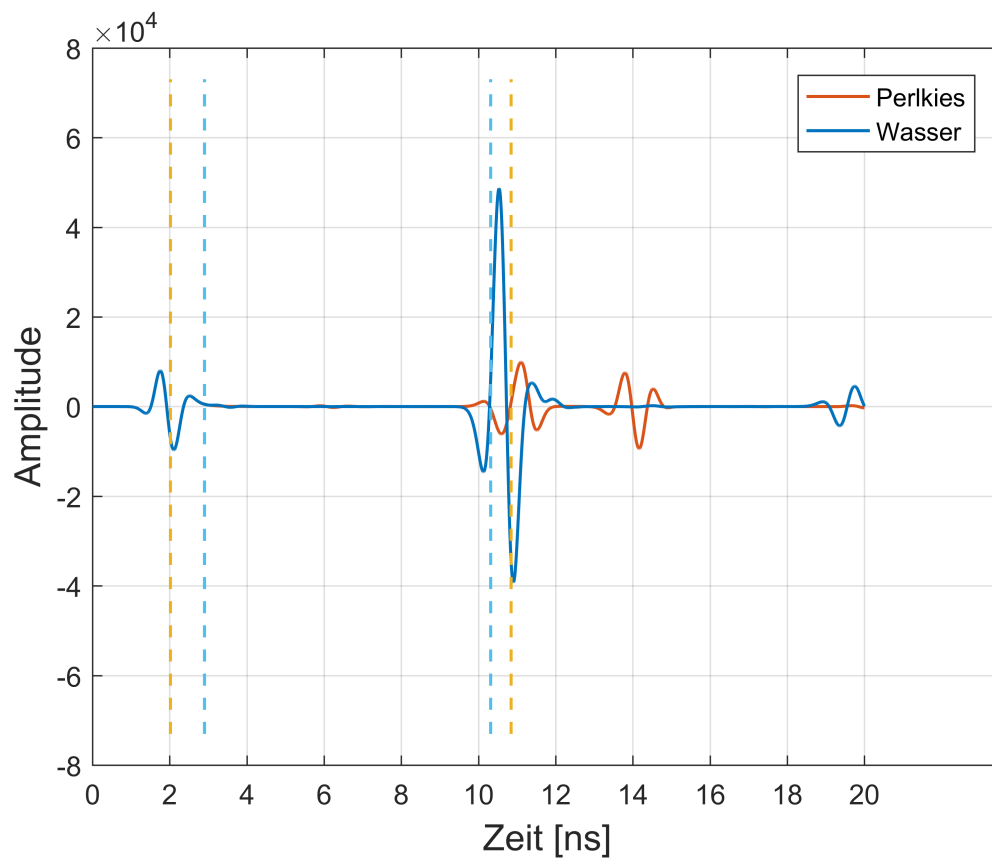


(b)

Abbildung 7.9: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser

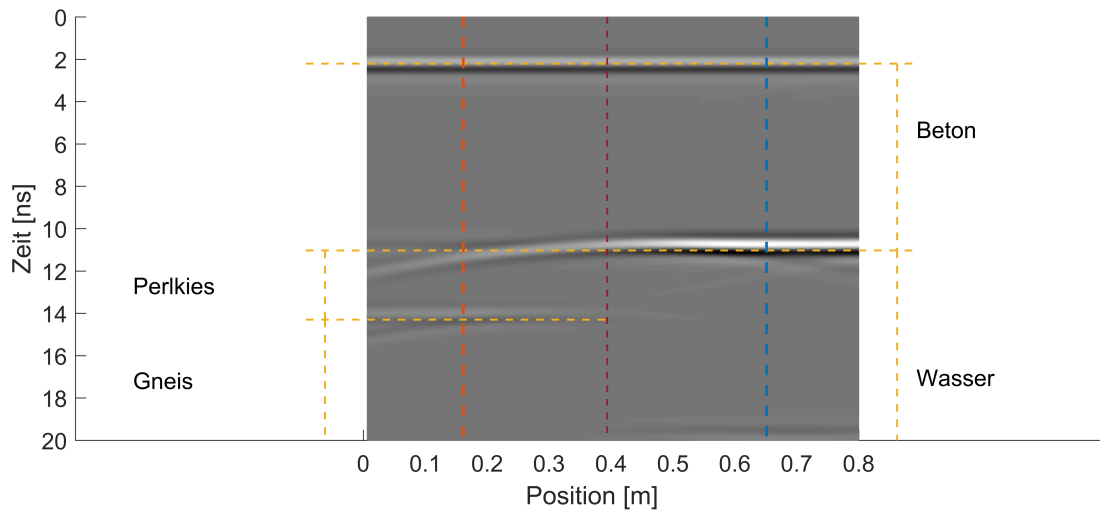


(a)

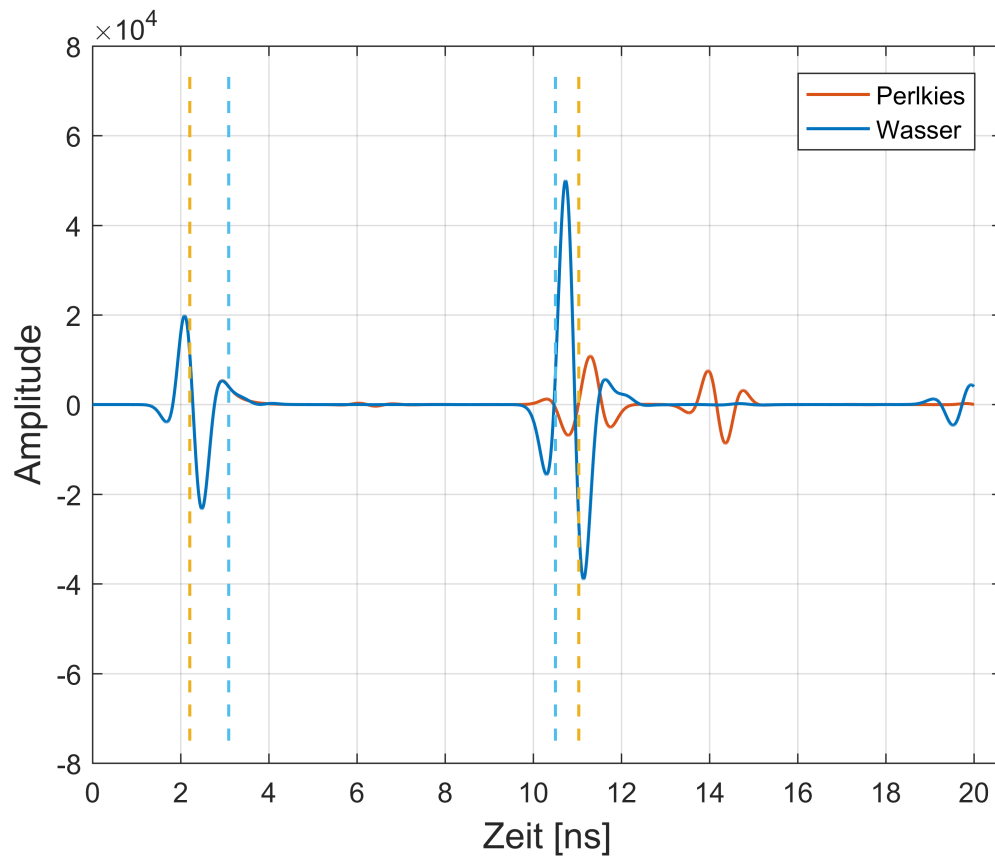


(b)

Abbildung 7.10: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser

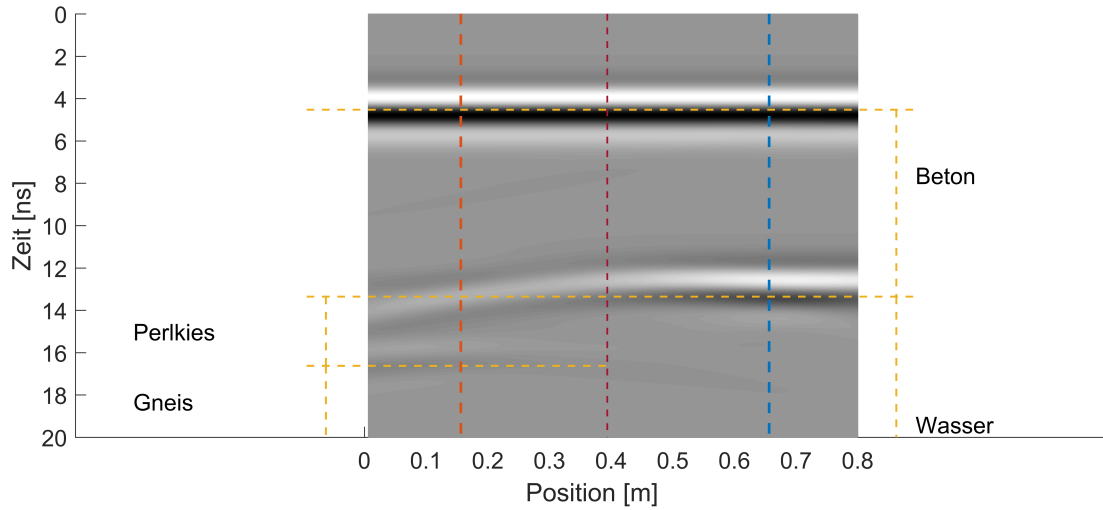


(a)

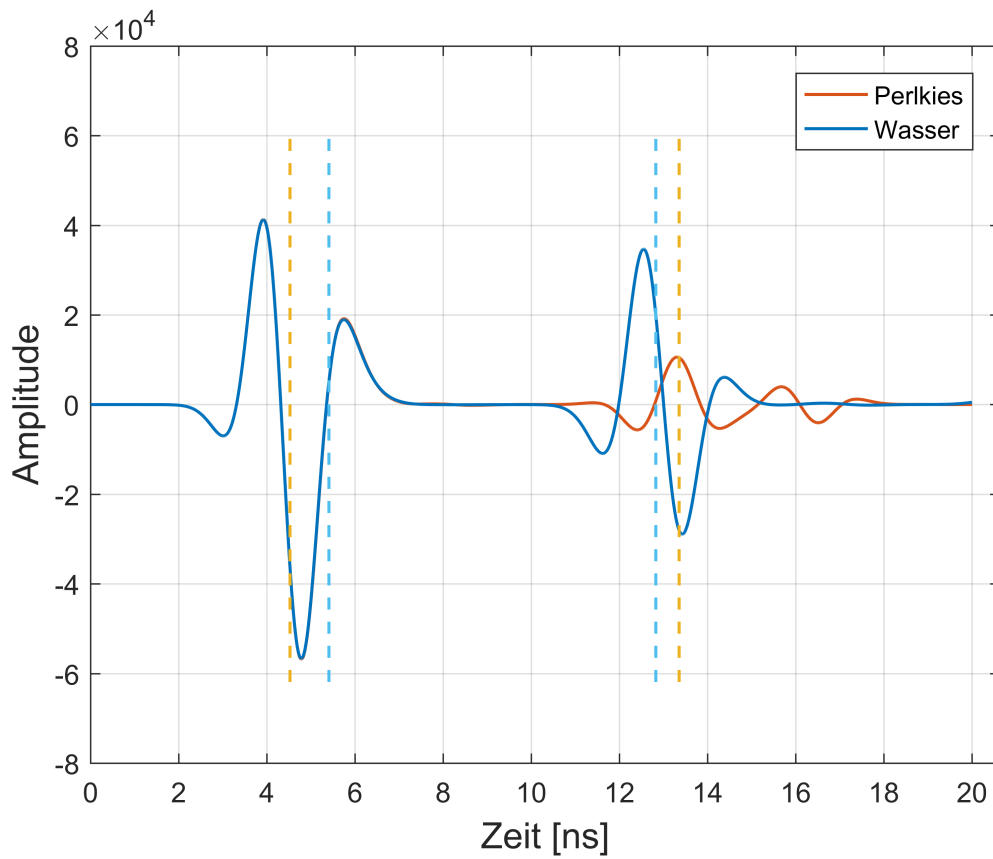


(b)

Abbildung 7.11: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 900 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser

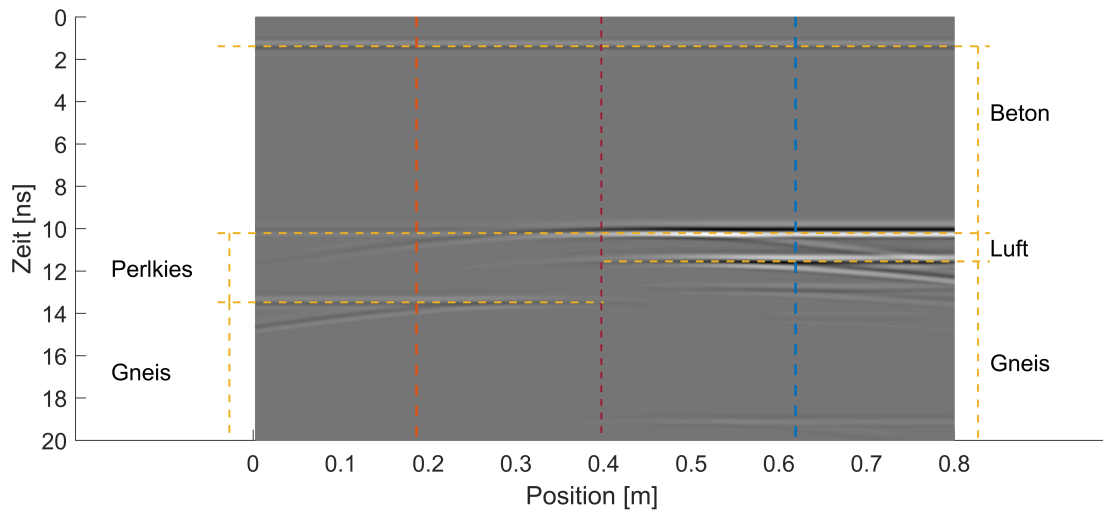


(a)

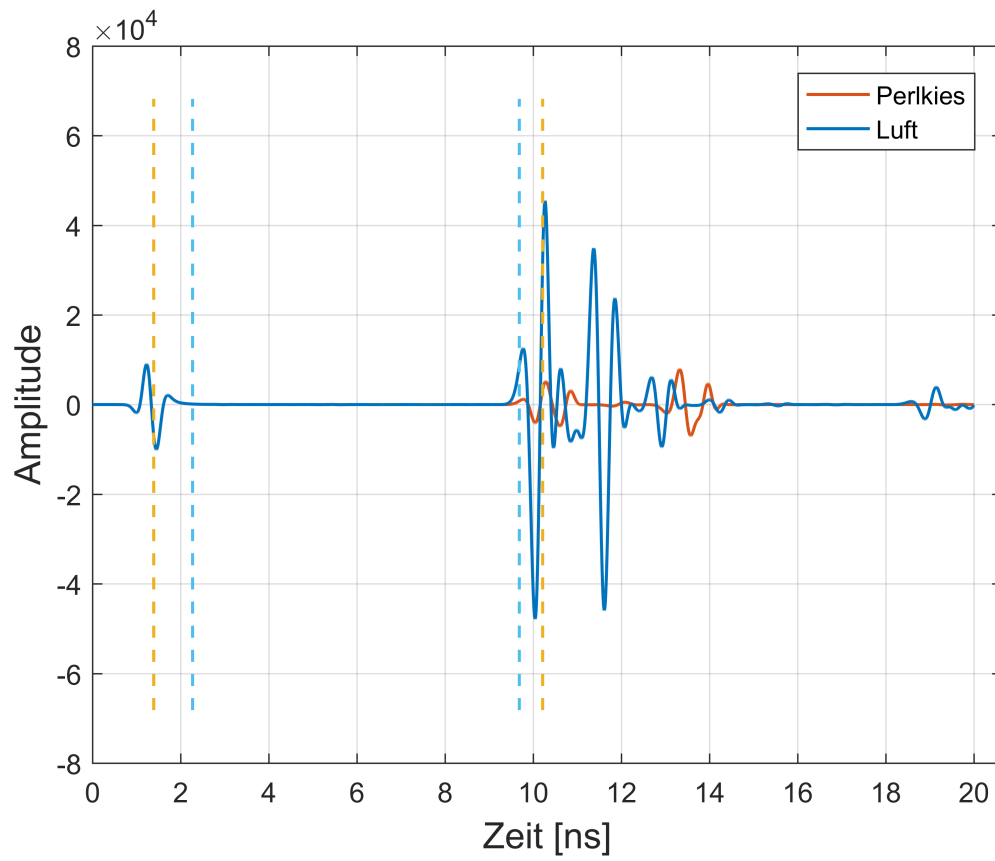


(b)

Abbildung 7.12: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 400 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Wasser

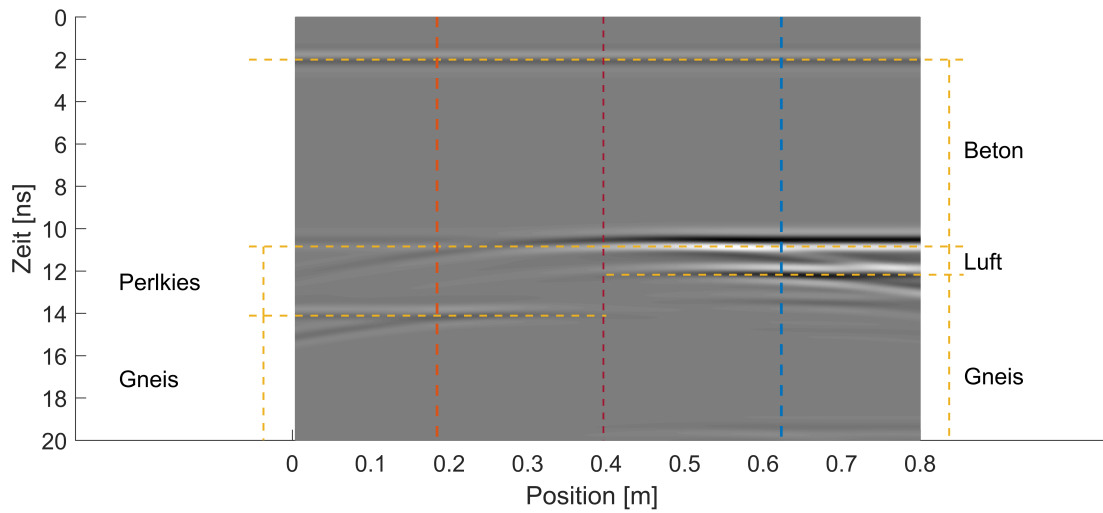


(a)

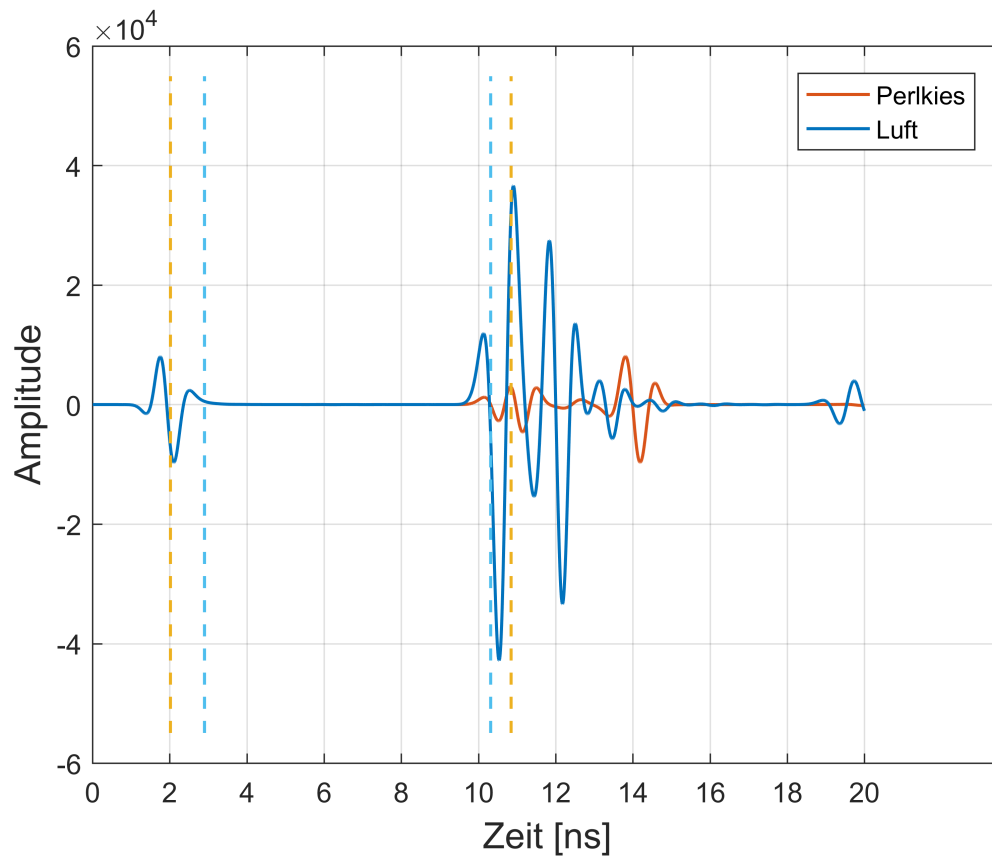


(b)

Abbildung 7.13: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1600 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft

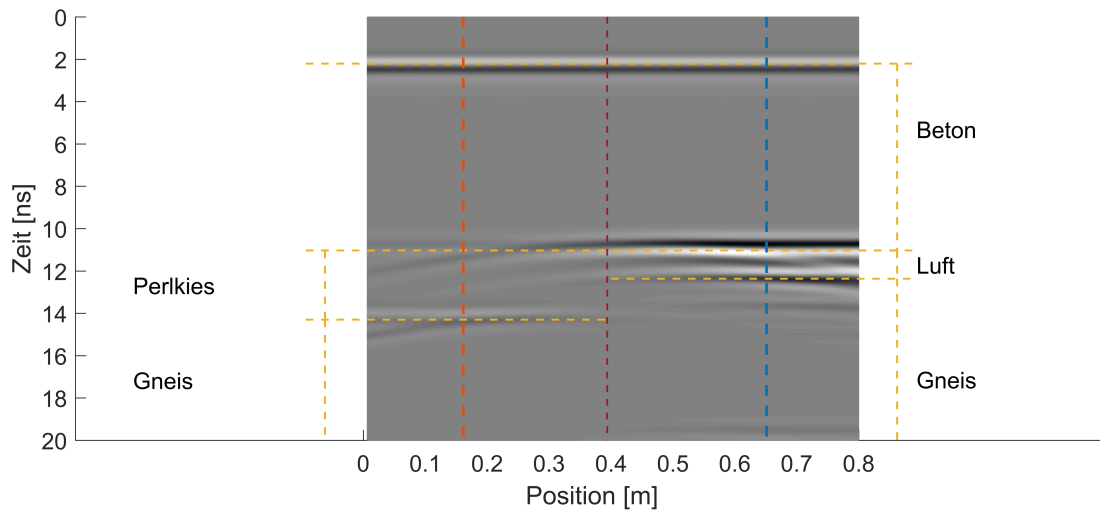


(a)

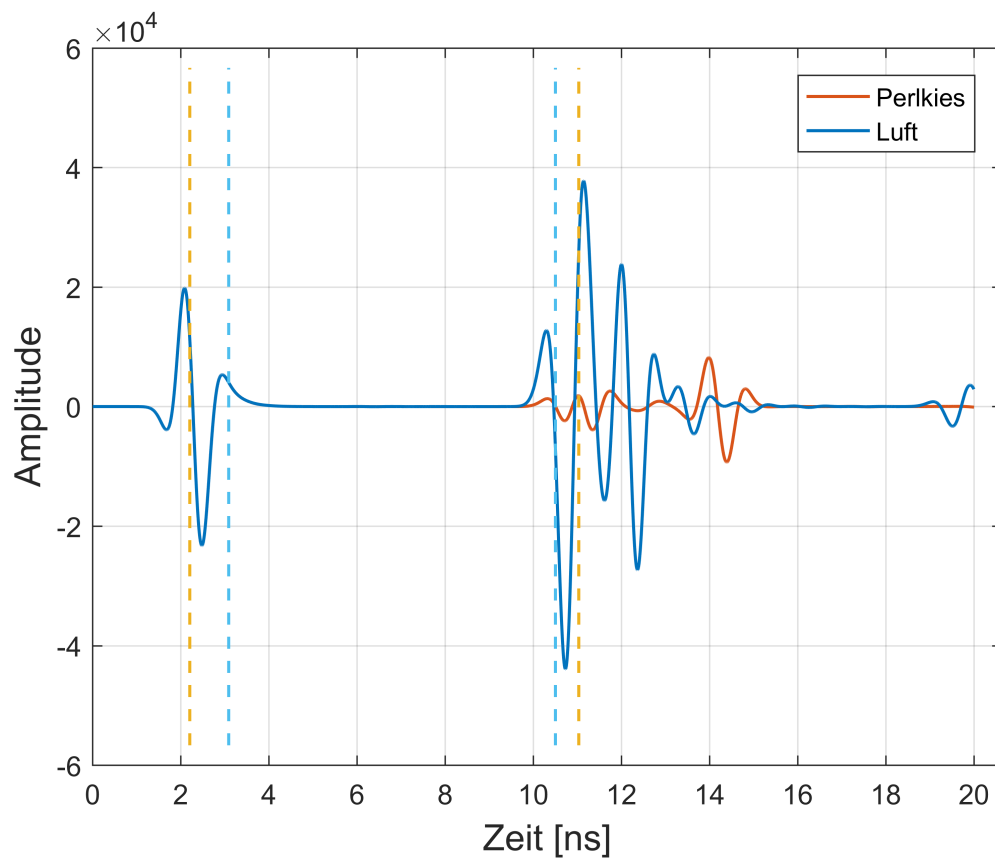


(b)

Abbildung 7.14: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 1000 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft

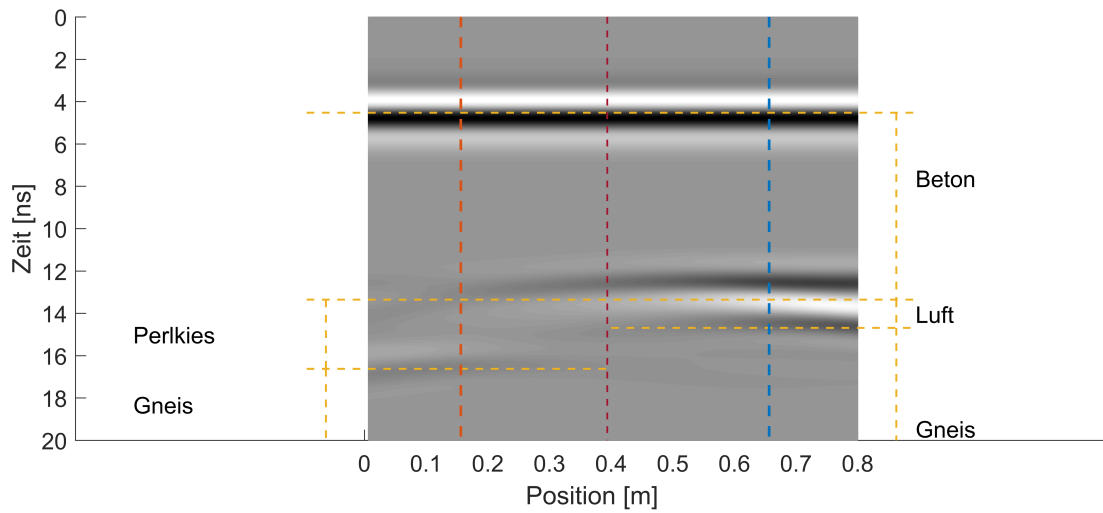


(a)

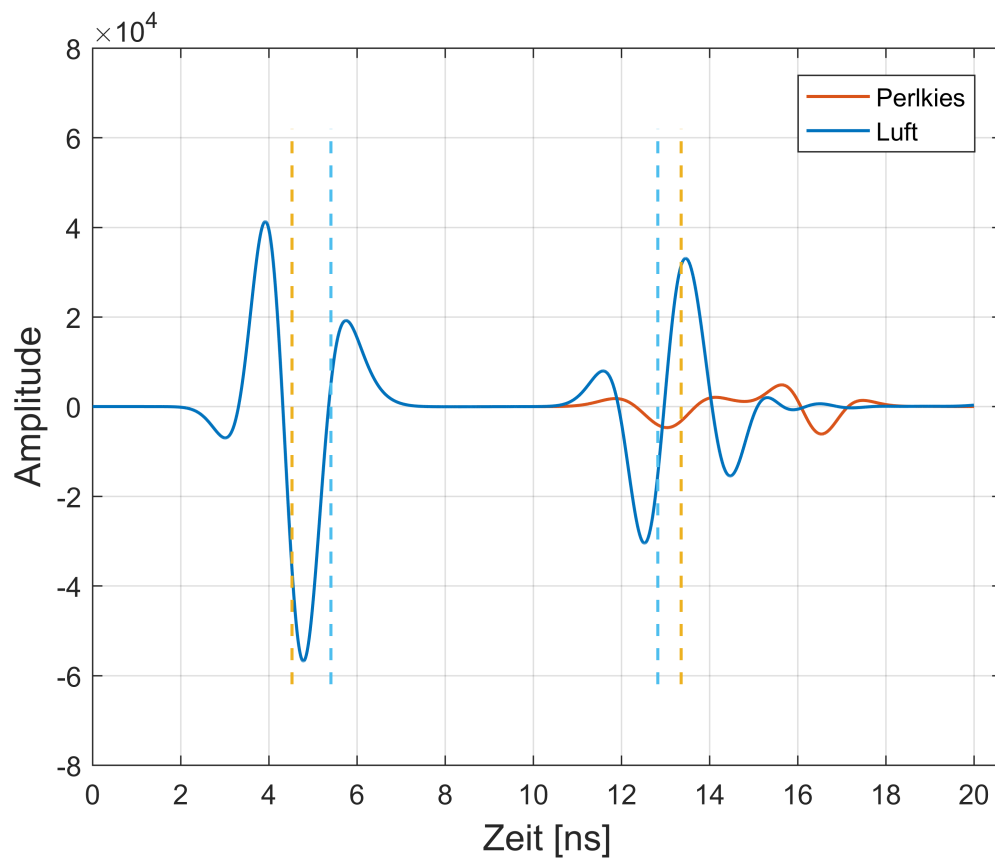


(b)

Abbildung 7.15: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 900 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft



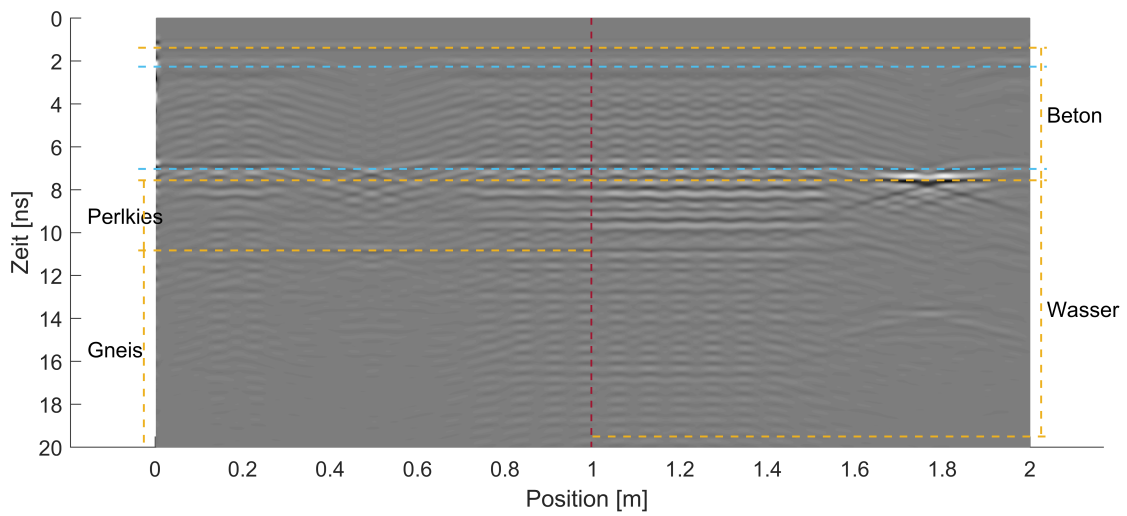
(a)



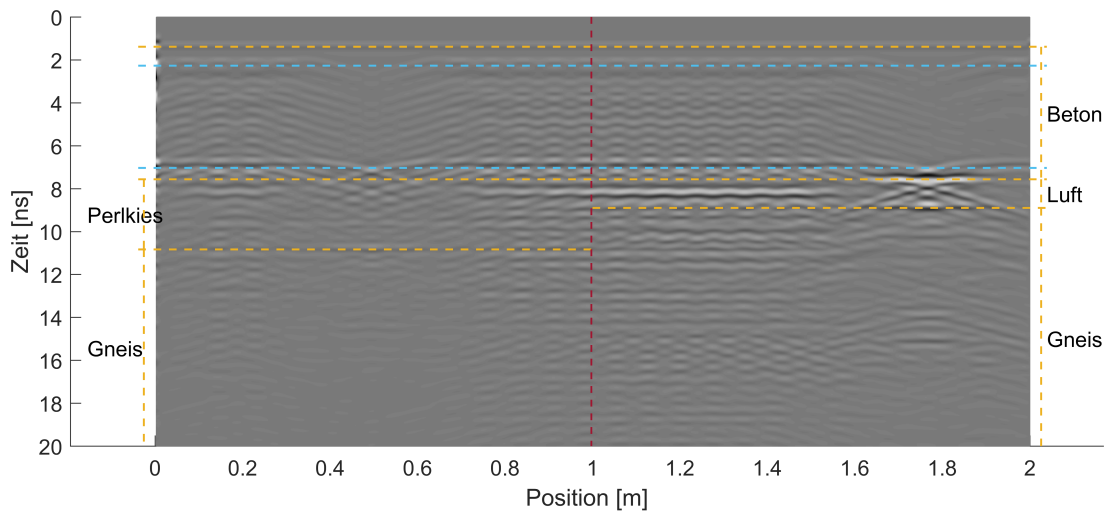
(b)

Abbildung 7.16: Tübbingmächtigkeit: 50 cm, Frequenz: 400 MHz, ohne Bewehrung, Hohlraumfüllung: Luft

Anhang D

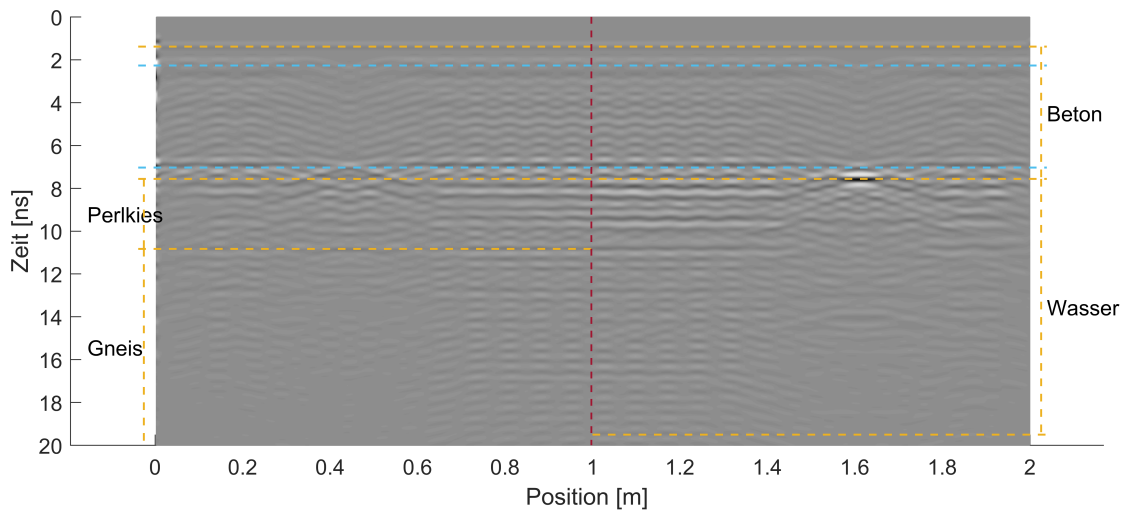


(a)

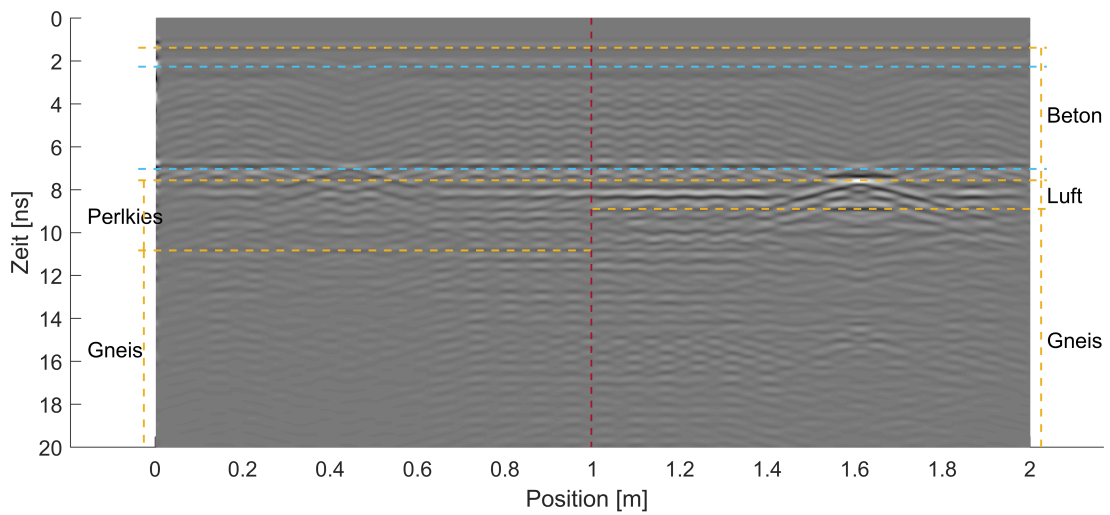


(b)

Abbildung 7.1: Frequenz: 1600 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft

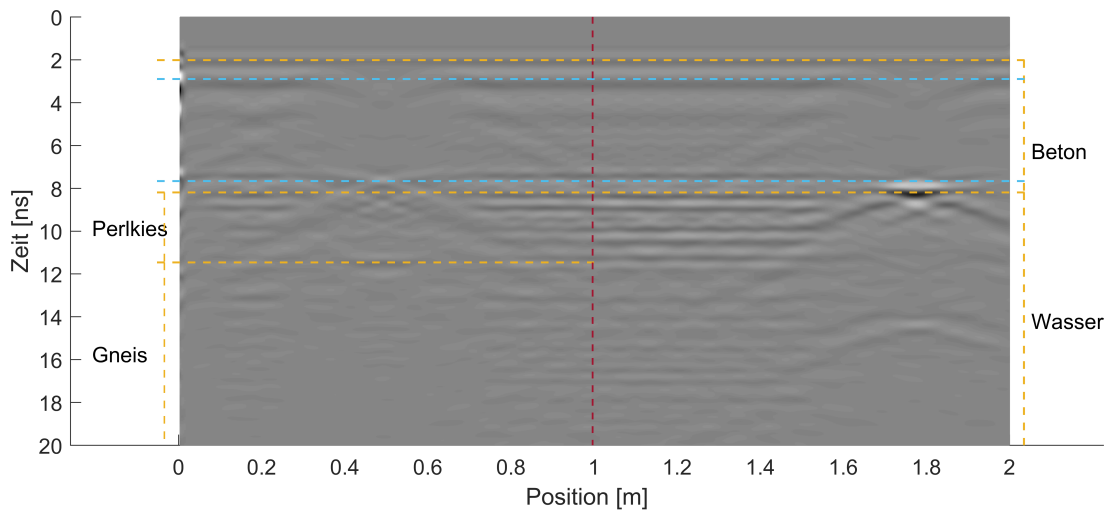


(a)

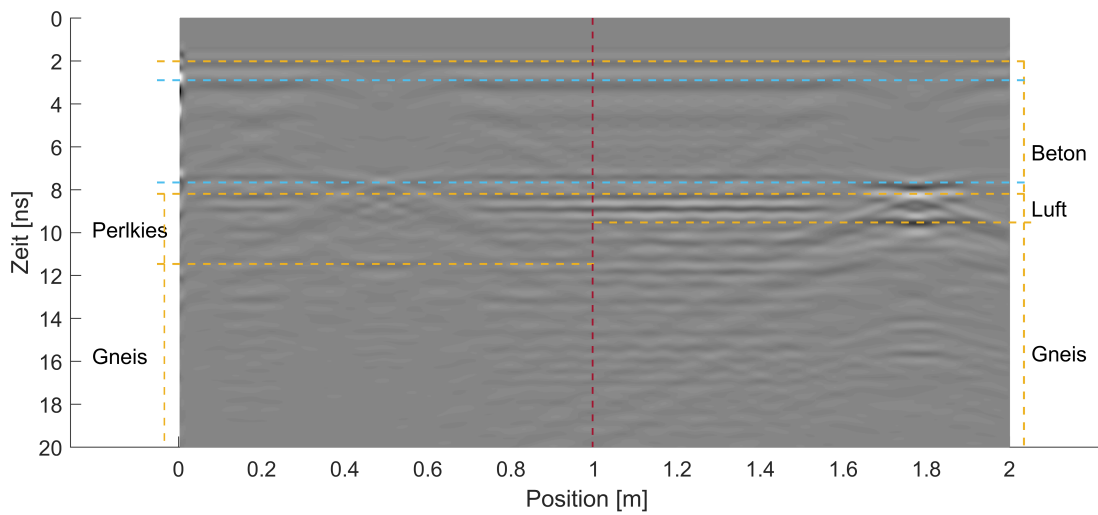


(b)

Abbildung 7.2: Frequenz: 1600 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft

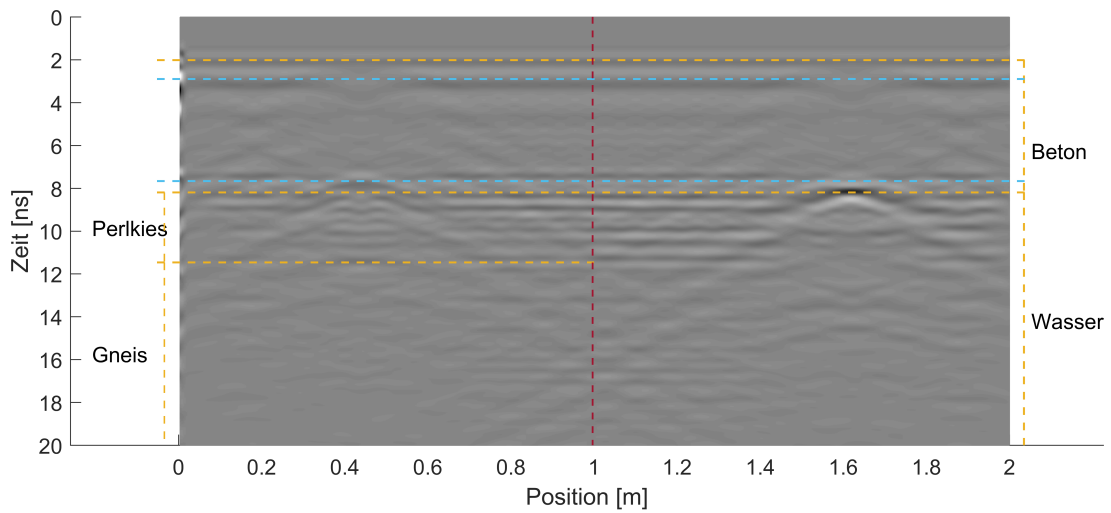


(a)

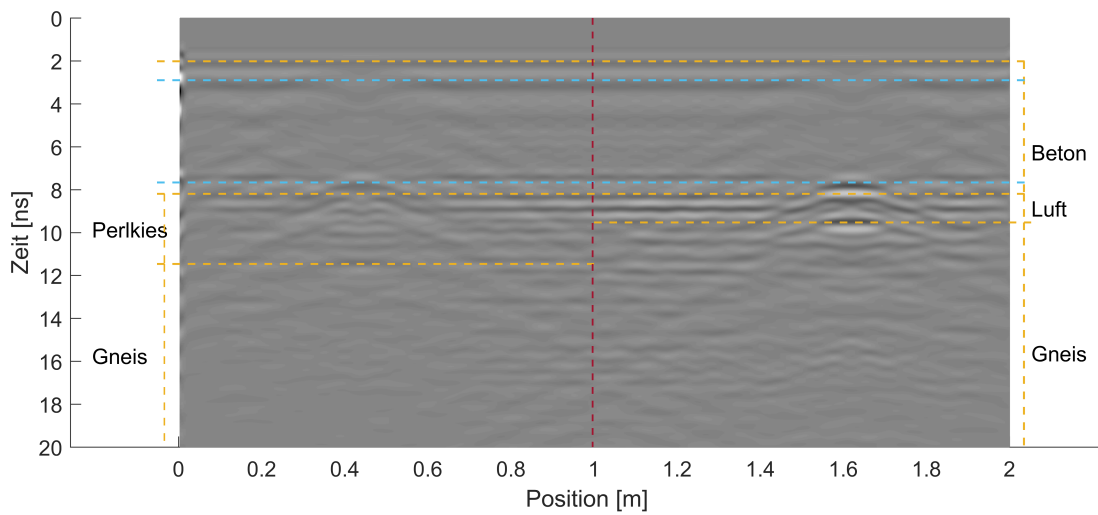


(b)

Abbildung 7.3: Frequenz: 1000 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft

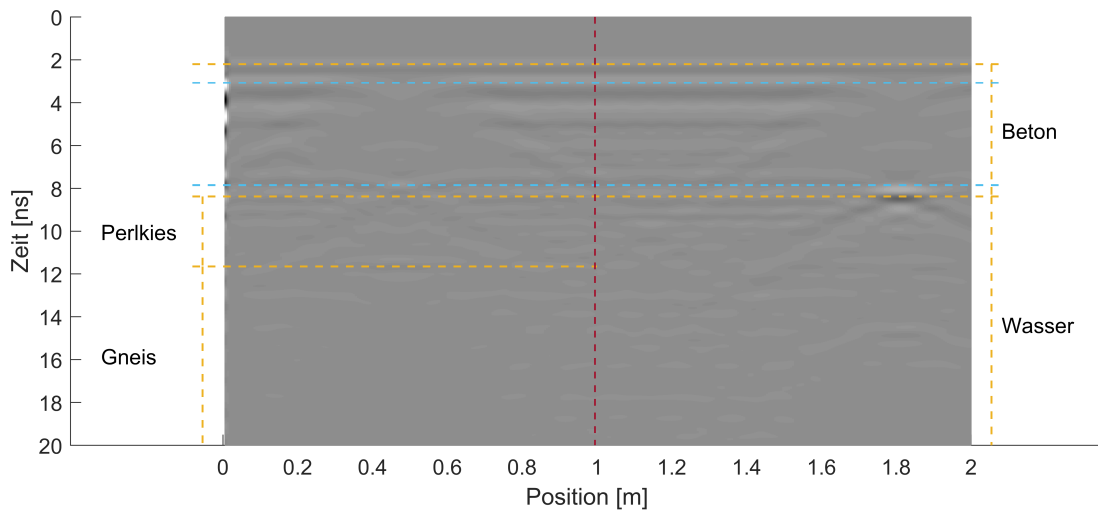


(a)

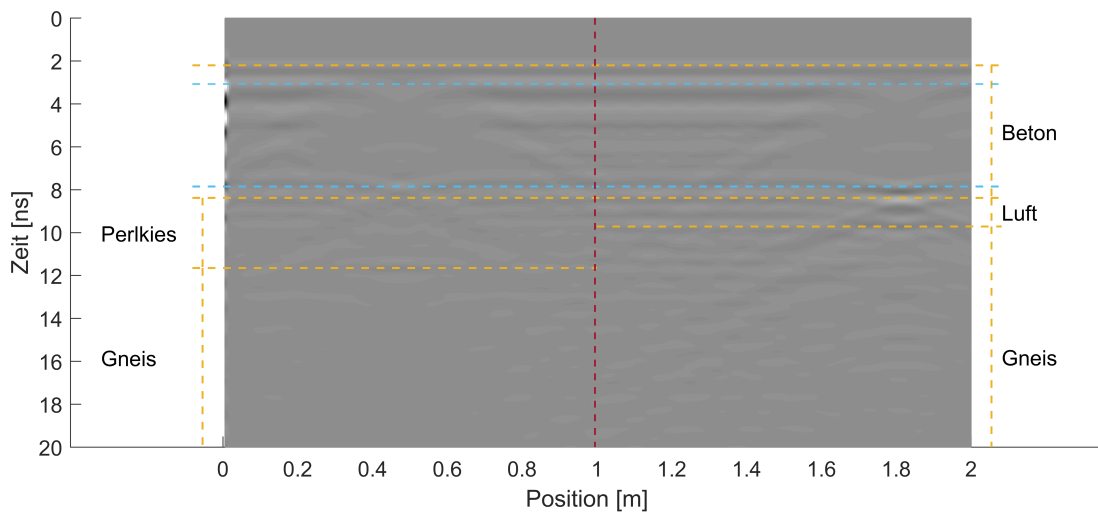


(b)

Abbildung 7.4: Frequenz: 1000 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft

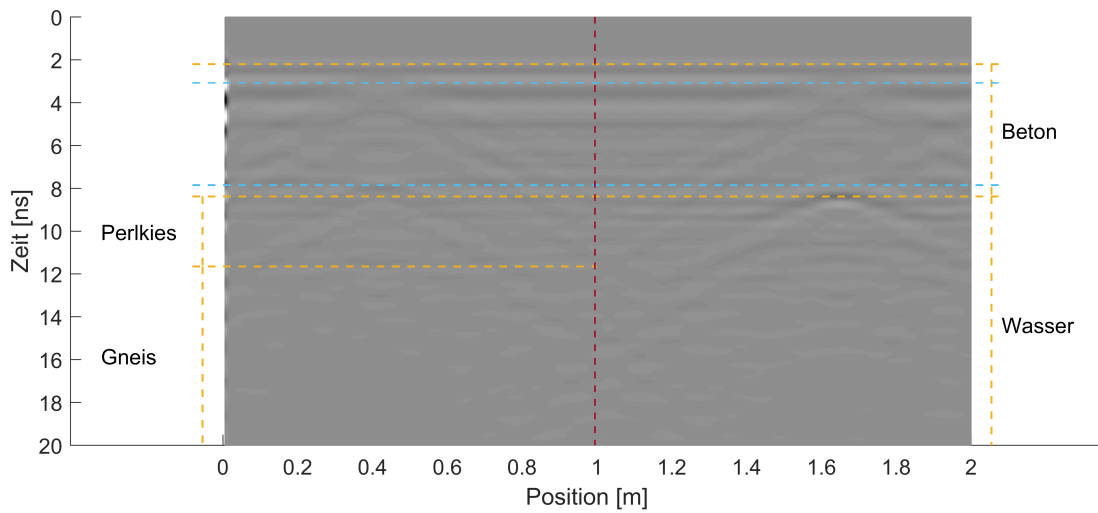


(a)

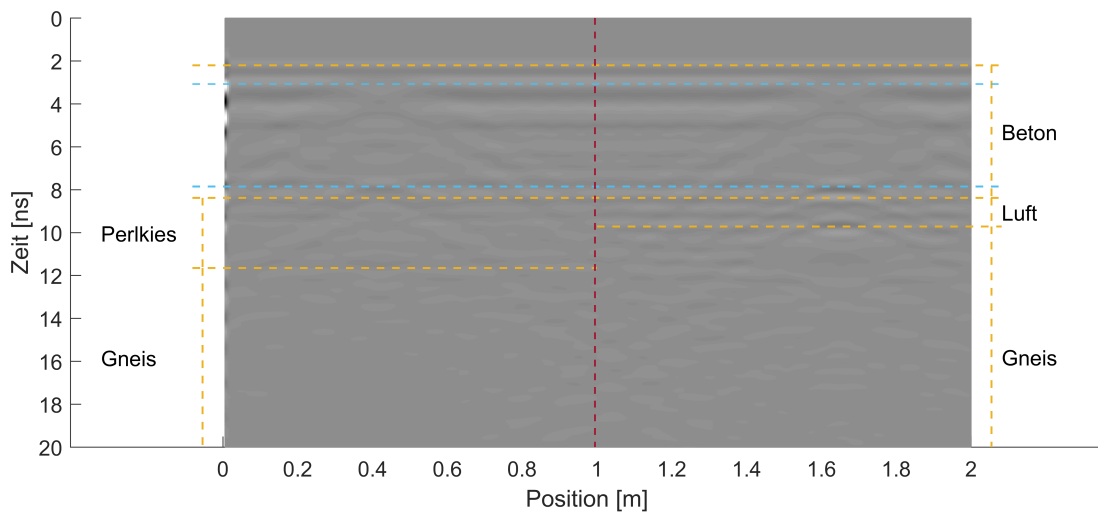


(b)

Abbildung 7.5: Frequenz: 900 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft

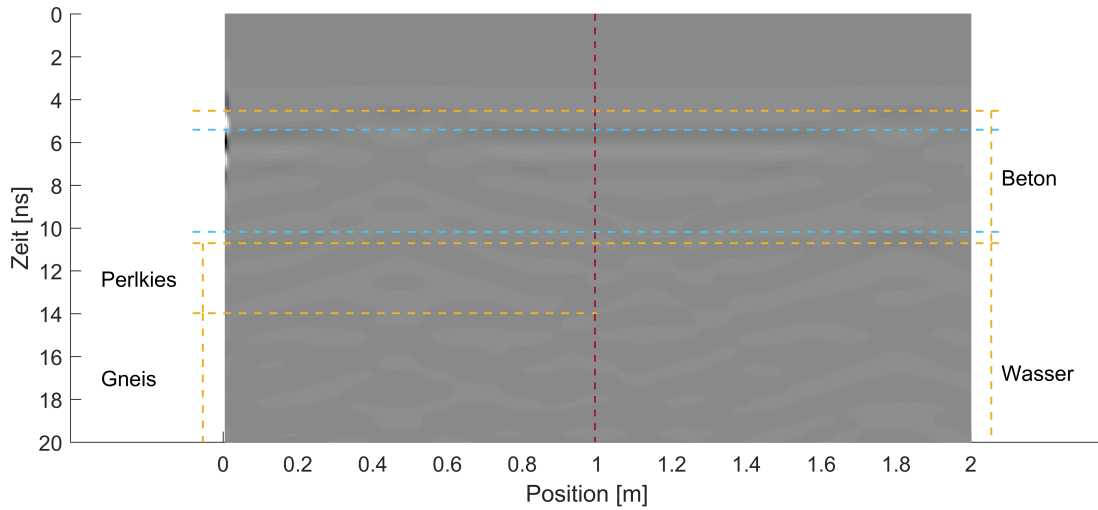


(a)

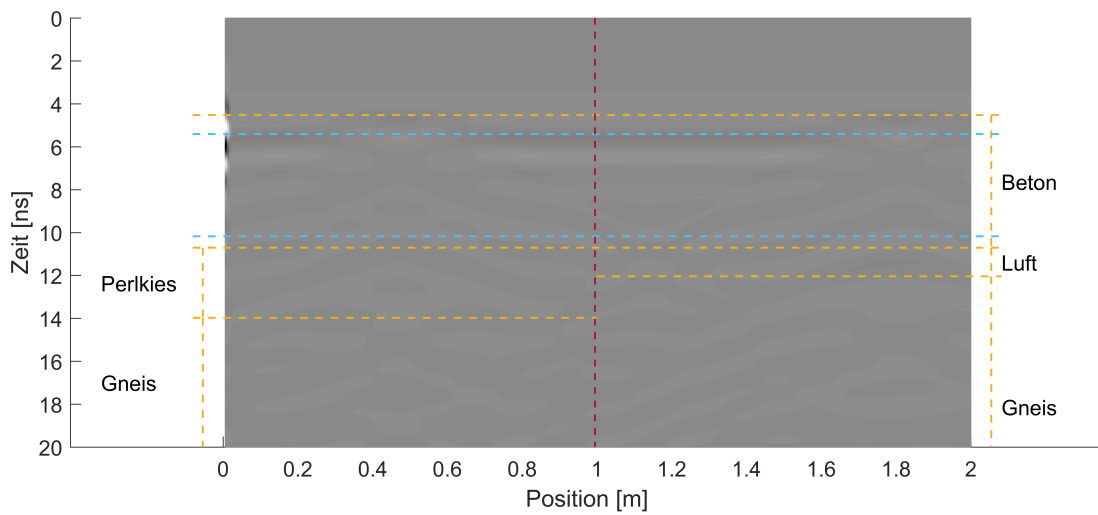


(b)

Abbildung 7.6: Frequenz: 900 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft



(a)



(b)

Abbildung 7.7: Frequenz: 400 MHz, Messbahn: 25 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft

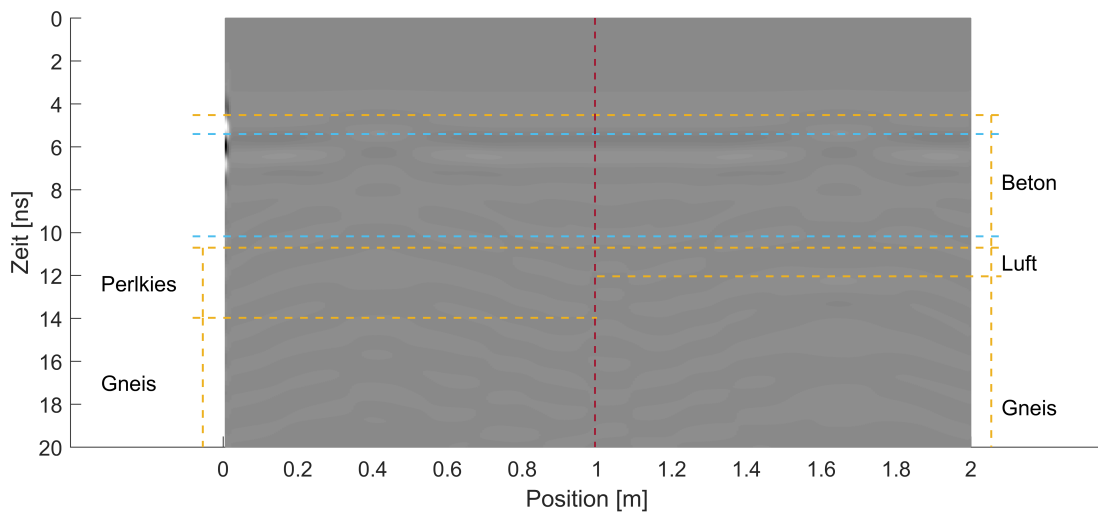
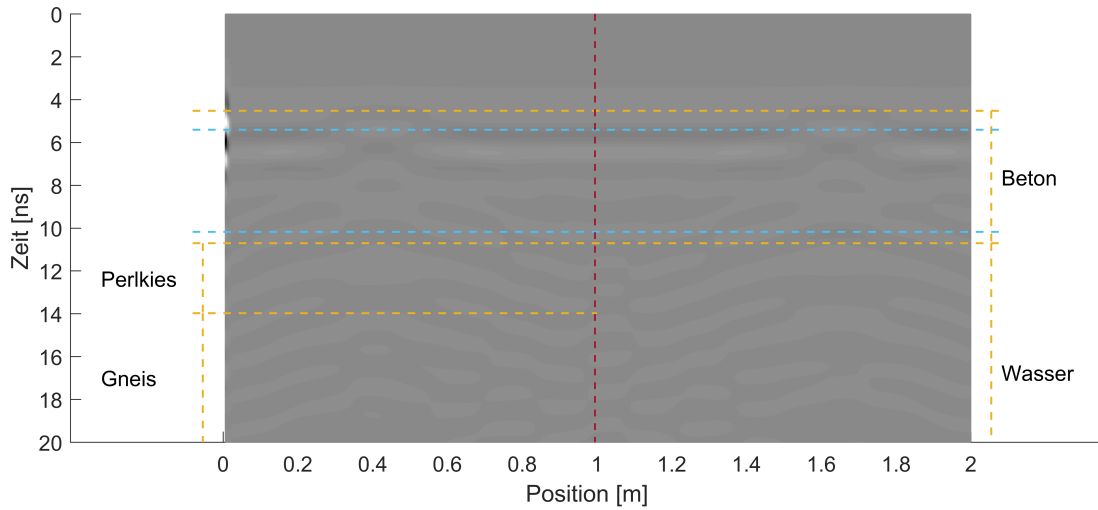


Abbildung 7.8: Frequenz: 400 MHz, Messbahn: 15 cm, Hohlraumfüllung: (a) Wasser und (b) Luft