

Diploma Thesis

Development of an innovative measurement scheme for the determination of permanent deformations in unbound pavement constructions

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Entwicklung eines innovativen Messschemas zur Ermittlung bleibender

Verformungen in ungebundenen Pflasterbefestigungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Gilles Evers

Matr.Nr.: 11930501

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ronald Blab**
Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Lukas Eberhardsteiner**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E230-03, A-1040 Wien

Wien, im April 2022

Eidesstaatliche Erklärung

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.

Datum

Unterschrift



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Diplomarbeit und während des ganzen Studiums unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei Frau Diplom-Ingenieurin Franziska Gober und Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lukas Eberhardsteiner bedanken, die mich während der Erstellung der Diplomarbeit unterstützt haben und mir bei der Durchführung der Laborversuche stets zur Seite standen.

Zusätzlich dazu möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Firma Nievelt bedanken, die es mir ermöglicht haben die Versuche durchzuführen.

Mein größter Dank geht an meine Eltern, meine Schwester und meine Freundin die immer für mich da waren und mich unterstützt haben, wie und wo sie nur konnten. Immer ein offenes Ohr und nette Worte haben mich stets in schwierigen Situationen beruhigt und zurück auf den richtigen Weg gebracht.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Paved surfaces have been used on traffic routes for several millennia. Nowadays, however, they are reaching their limits due to high motorisation and ever-increasing loads, especially unbound paving beds, which according to the current state of the art should only be used for lower load classes. Therefore, it is becoming increasingly important to be able to determine and visualise the permanent deformations in the bedding and in the base courses, especially with regard to damage analysis and maintenance measures.

The present work deals with the development of a measurement scheme to determine and display these deformations. Therefore, based on a literature research on mainly unbound pavements and the ground penetrating radar, laboratory tests are developed. The ground penetrating radar is an electromagnetic device that can record objects and layers in the subsoil. The laboratory tests are carried out to check the suitability of the ground penetrating radar for this application and which materials provide the best possible results as a reflecting layer.

It turned out that a path-controlled recording of the structure is better suited than a point-based measurement and that the insertion of metals between the individual layers provides the best results. The results are presented in this work in the form of radargrams showing the layer structure. However, the evaluation does not yet provide any conclusions about possible permanent deformations in the bedding and the base layer, as the focus was primarily on the development of the methodology and the determination of the layer thicknesses.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Zusammenfassung

Pflasterflächen werden seit mehreren Jahrtausenden auf Verkehrswegen eingesetzt. Heutzutage stoßen sie jedoch durch die hohe Motorisierung und die immer größer werdenden Lasten an ihre Grenzen. Insbesondere ungebundene Pflasterbettungen sind davon betroffen, da diese laut aktuellem Stand der Technik nur für niedrigere Lastklassen verwendet werden sollen. Deshalb wird es immer wichtiger, vor allem im Bezug auf die Schadensanalyse sowie die effizientere Wahl von Instandsetzungsmaßnahmen, die Verformungen in der Bettung und in den Tragschichten bestimmen und visualisieren zu können.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Messschemas um diese Verformungen erfassen zu können. Deshalb werden aufbauend auf einer Literaturrecherche zu ungebundenen Pflasterbefestigungen und dem Georadar, Laborversuche entwickelt. Das Georadar ist ein elektromagnetisches Gerät, welches Objekte und Schichten im Untergrund aufzeichnen kann. Die Laborversuche werden durchgeführt, um zu überprüfen, inwieweit sich das Georadar für diesen Anwendungsfall eignet und welche Materialien für reflektierende Zwischenschichten die bestmöglichen Ergebnisse liefern.

Es konnte festgestellt werden, dass eine weggesteuerte Aufnahme des Versuchsaufbaus sich besser eignet als eine punktförmige Messung und das Einsetzen von Metallfolien beziehungsweise Metallblechen zwischen den einzelnen Schichten die besten Resultate liefert. Die Ergebnisse werden in dieser Arbeit in Form von Radargrammen dargestellt, welche den Schichtaufbau darstellen. Die Auswertung liefert jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch keinen Rückschluss auf mögliche Verformungen in der Bettung sowie in der Tragschicht, da in erster Linie der Fokus auf der Entwicklung der Methodik und der Bestimmung der Schichtdicken lag.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	14
1. EINFÜHRUNG	15
1.1 Aufgabenstellung	15
1.2 Zielsetzung	16
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN PFLASTERBAUWEISE	17
2.1 Pflasterbauweise: Geschichtlicher Hintergrund	17
2.2 Pflasterbauweise Allgemeines	18
2.2.1 Die wichtigsten Regelwerke für Österreich	19
2.2.2 Aufbau von Pflasterdecken	19
2.3 Bauarten	21
2.3.1 Gebundene Pflasterbauweise	22
2.3.2 Gemischte Pflasterbauweise	22
2.3.3 Ungebundene Pflasterbauweise	23
2.3.4 Herstellung einer ungebunden Pflasterfläche	25
2.3.5 Verformungen in ungebundener Pflasterbauweise	26
3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN GEORADAR	29
3.1 Geschichtlicher Hintergrund	29
3.2 Allgemeines	30
3.3 Verfahrensgrundlage	33
3.4 Physikalische Grundlagen	38
3.5 Georadar Auswertung	40
3.6 Forschungsbedarf	42
3.7 Permittivität / Dielektrizitätskonstante	43
3.7.1. Bestimmung der Permittivität	44
4. MESSTAG 1: PUNKTFÖRMIGER VERSUCH	47
4.1. Vorbereitung des Grundgerüsts	47
4.2. Material/Versuchsaufbau	47
4.3. Versuchsdurchführung	56
4.4. Trocknung/Feuchtigkeitsbestimmung	58
4.5 Auswertung	62
4.6. Verbesserungsmöglichkeiten	64
4.7 Fazit Messtag 1	66

5. MESSTAG 2: WEGGESTEUERTER VERSUCH	67
5.1 Vorbereitung des Grundgerüsts	67
5.2 Material/Versuchsaufbau	67
5.3 Versuchsdurchführung.....	73
5.4 Auswertung.....	75
5.5 Verbesserungsmöglichkeiten.....	79
5.6 Fazit Messtag 2	79
6. AUSBLICK.....	81
Literaturverzeichnis.....	83
Anhang	85
Radargramme vom zweiten Messtag.....	85
Eingezeichnete Schichten vom zweiten Messtag	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standardaufbau einer gebundenen Bauweise.....	22
Abbildung 2: Standardaufbau einer gemischten Pflasterbauweise	22
Abbildung 3: Standardaufbau einer ungebundenen Pflasterbauweise	23
Abbildung 4: Verdrückungen in der Pflasterbettung bei zu großer Bettungsdicke [14].....	27
Abbildung 5: Reihenverband	28
Abbildung 6: Diagonalverband	28
Abbildung 7: Fischgrätverband.....	28
Abbildung 8: Anwendungsgebiete Georadarsysteme [21].....	30
Abbildung 9: Georadar Grundprinzip [23].....	32
Abbildung 10: Unterschiedliche Messverfahren des Georadars [28]	34
Abbildung 11: Reflexionsanordnung [20].....	36
Abbildung 12: Beispiel eines Radargrammes [29]	37
Abbildung 13: Radarogramm mit und ohne Migrationsprozess [34]	42
Abbildung 14: Percometer [38]	45
Abbildung 15: Grundgerüst des Versuches.....	47
Abbildung 16: Genereller Querschnitt des Versuchsaufbaus vom ersten Messtag.....	48
Abbildung 17: Anordnung der Waschbetonplatten am ersten Messtag	48
Abbildung 18: Kiste mit Folie und XPS-Platten ausgelegt.....	49
Abbildung 19: Eingelegte Materialien unterhalb der Bettung für den feuchten Aufbau	50
Abbildung 20: Kupferblech.....	51
Abbildung 21: Kupfergitter.....	51
Abbildung 22: Lochblech aus Aluminium	51
Abbildung 23: Lochblech aus Stahl	51
Abbildung 24: Geovlies mit Glasfasereinlage	52
Abbildung 25: Schwarzes Geogitter	52
Abbildung 26: Dünnes Geovlies ohne Einlage	52
Abbildung 27: Dickes Geovlies ohne Einlage	52
Abbildung 28: Beispiel einer der getesteten von Materialanordnung oberhalb der Bettung	53
Abbildung 29: Fertiger Versuchsaufbau	53
Abbildung 30: Für die Versuche verwendetes Georadar	57
Abbildung 31: Georadar im Einsatz.....	57
Abbildung 32: Datenerfassung während der Versuche mittels Laptops mit Aufnahmesoftware und Control Unit.....	58
Abbildung 33: Verwendeter Trockenschrank	59
Abbildung 34: Mit Proben befüllter Trockenschrank	59
Abbildung 35: Rohdaten vom ersten Messtag	63
Abbildung 36: Wasseransammlung am feuchten Versuchsaufbau	65
Abbildung 37: Versuchsstrecken und Richtungen der Durchführung	68
Abbildung 38: Schematische Anordnung der eingelegten Materialien in Draufsicht	68
Abbildung 39: Schematische Anordnung der eingelegten Materialien im Querschnitt.....	69
Abbildung 40: Eingelegtes Material unterhalb der Bettung.....	70
Abbildung 41: Eingelegtes Material oberhalb der Bettung.....	70
Abbildung 42: Fertiger Versuchsaufbau	71
Abbildung 43: Weggesteuerter Versuch mittels Georadar	74

Abbildung 44: Gegenüberstellung der Rohdaten (links) und dem bearbeiteten Radargramm (rechts).....	75
Abbildung 45: Radargramm des Versuches F1.....	76
Abbildung 46: Radargramm des Versuches C1.....	77
Abbildung 47: Radargramm des Versuches B1.....	77
Abbildung 48: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches C1.....	78
Abbildung 49: Radargramm des Versuches A1.....	85
Abbildung 50: Radargramm des Versuches D1.....	85
Abbildung 51: Radargramm des Versuches E1.....	86
Abbildung 52: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches D1.....	86
Abbildung 53: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches A1.....	87
Abbildung 54: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches B1.....	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der drei Pflasterbauweisen [5].....	21
Tabelle 2: Vergleich der drei Pflasterbauweisen Fortsetzung [5].....	21
Tabelle 3: Übersicht für verschiedene Anforderungsprofile [19].....	37
Tabelle 4: Auswahl an Werten für die relative Permittivität [37].....	44
Tabelle 5: Varianten des Versuchsaufbaus vom ersten Messtag im trockenen Aufbau.....	54
Tabelle 6: Varianten des Versuchsaufbaus vom ersten Messtag im feuchten Aufbau.....	55
Tabelle 7: Auflistung aller getesteten Materialanordnungen.....	72

1. EINFÜHRUNG

1.1 Aufgabenstellung

Ungebundene Pflasterbefestigungen werden schon seit tausenden Jahren von Menschen zur Herstellung von Verkehrswegen eingesetzt. Diese Bauweise erwies sich lange als die beste Art und Weise und genügte sehr lange den Anforderungen. Durch die fortschreitende Entwicklung der Technologie sowie dem rasanten Anstieg der Motorisierung, vor allem in den Städten, verlor die Pflasterbauweise immer mehr an Bedeutung als Regelbauweise. Bei übermäßiger Beanspruchung aus Bremsen, Anfahen, Achslasten oder Lenkung kommt es zu bleibenden Verformungen in der Bettung und/oder der Tragschicht und gegebenenfalls Spurrillen. Diese Verformungen unterhalb der obersten Schicht sind sehr schwer von der Oberfläche aus einer bestimmten Schicht zuzuordnen. Es ist möglich mittels einer Messlatte und einem Keil die Verformungen von der Oberfläche aus indirekt zu bestimmen, da sich die Steine selbst nicht verformen. Wenn es eine Möglichkeit gäbe diese Verformungen zerstörungsfrei und ohne Rückbau zu bestimmen, würde dies die Schadensanalyse und die damit einhergehende Bestimmung des Zustandes der jeweiligen Pflasterfläche erheblich vereinfachen. Diese Arbeit soll also Erfahrungen in diesem Bereich sammeln, um eventuell in einem späteren Schritt eine standardisierte Anwendung festlegen zu können.

Das Georadar soll dafür zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich um ein Gerät, welches mithilfe von elektromagnetischen Wellen Objekte und Schichten im Untergrund darstellen kann. Das Georadar soll die Bestimmung der Verformungen schneller und einfacher machen.

Aufbauend auf einer Literaturrecherche zu Pflasterbefestigungen sowie dem Georadar, werden Versuche zur Bestimmung der bestmöglichen Resultate in Bezug auf eine Schichtdickenbestimmung sowie die Bestimmung der Verformungen in ungebundenen Pflasterbefestigungen für diesen Anwendungsfall entwickelt.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Messschema zu entwickeln, welches ermöglicht, in ungebundenen Pflasterbefestigungen Schichten zu lokalisieren und deren Dicke zu bestimmen, sowie Verformungen in der Bettung und in den Tragschichten feststellen zu können. Dies soll mittels eines zerstörungsfreien Messverfahrens ermöglicht werden. Mit Hilfe eines Gerätes, das elektromagnetische Wellen in den Untergrund sendet und die Reflexion mittels einer Empfangsantenne wieder aufnimmt, soll diese Anwendung getestet werden. Das Gerät, welches dies ermöglichen soll, nennt sich Georadar. An zwei Messtagen mit jeweils leicht unterschiedlichem Versuchsaufbau, sowie unterschiedlichem Einsatz des Georadars (Punktmessung, weggesteuert) sollte im straßenbautechnischen Labor der Technischen Universität Wien untersucht werden, inwiefern das Georadar für diesen Anwendungsfall geeignet ist. Der Versuchsaufbau unterscheidet sich dahingehend, dass oberhalb sowie unterhalb der Bettung unterschiedliche Materialien (Metalle und Geotextile) eingebaut werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Versuche soll ein Messschema ermittelt werden und damit verbunden festgestellt werden, welche Materialien sich am besten eignen, um das Georadar bestmöglich einsetzen zu können. Daran anknüpfend soll ein standardisiertes Verfahren zur einheitlichen Ermittlung der Verformungen in ungebundenen Pflasterbettungen erstellt werden.

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN PFLASTERBAUWEISE

Im zweiten Kapitel geht es im Allgemeinen um die Pflasterbauweise. Es wird auf die geschichtliche Entwicklung und Besonderheiten eingegangen. Besonderer Fokus wird auf die ungebundene Bauweise, bezüglich Herstellung einer ungebundenen Pflasterfläche, sowie deren möglichen Verformungen, gelegt. Die ungebundene Pflasterfläche wird in dieser Arbeit im Vordergrund stehen, da in den nachfolgenden Laborversuchen eine vereinfachte Form eines ungebundenen Pflasteraufbaus benutzt und untersucht wird.

2.1 Pflasterbauweise: Geschichtlicher Hintergrund

Schon um 4000 v. Chr. wurden in Mesopotamien die ersten mit heute vergleichbaren Pflasterflächen gebaut. Erst um das Jahr 2500 v. Chr. wurden die Pflasterstraßen auch wirklich als Transportwege benutzt, nämlich zum Transport von Baumaterialien zum Pyramidenbau im heutigen Ägypten. [1]

Mit dem römischen Reich kam es zur Weiterentwicklung dieser Bauweise. Die größten Fortschritte waren das Verlegen der Pflastersteine auf einer verdichteten Unterlage, sowie eine planmäßige Querneigung zur Entwässerung. [1]

Durch die Veränderung der Nutzung, vor allem durch den rasanten Anstieg an motorisierten Gefährten, war die Pflasterbauweise dann nicht mehr als Regelbauweise geeignet. Höhere Geschwindigkeiten und höhere Achslasten ließen die Pflasterbefestigung immer mehr von den Hauptverkehrsachsen verschwinden. [1] Die fugenreiche Gestaltung der Verkehrswege ließ sich schwer reinigen und war unbequemer und unebener als Asphaltstraßen. [2] Die Erfindung des Asphaltmischgutes verdrängte dann die Pflasterbauweise auf viel befahrenen Strecken komplett. [1] Asphalt erwies sich als dauerhafter, leichter zu reinigen und hatte einen geringeren Rollwiderstand. [2]

Heutzutage besteht dank modernster Technologien sogar die Möglichkeit des maschinellen Einbaus der Pflastersteine. [3]

2.2 Pflasterbauweise Allgemeines

Unter der Pflasterbauweise versteht man in der Regel eine Befestigung von Straßen, Wegen und anderen Verkehrsflächen mit verschiedenen Materialien. Zu diesen Materialien zählen beispielsweise Betonstein, Naturstein oder Klinker. Die Pflasterbauweise findet vor allem im innerstädtischen Bereich Anwendung. Diese wird zur architektonischen Gestaltung von Verkehrswegen und Plätzen verwendet, vor allem dort, wo eine geringe Belastung durch den Verkehr vorhanden ist. Neben unterschiedlichen Materialien gibt es auch unterschiedliche Steinformate und Bauweisen. [4] Nachfolgend wird auf die wichtigsten Bestandteile, Bauarten und Begriffe kurz eingegangen.

- Pflasterstein: Stein mit einer maximalen Seitenlänge von 30 cm und einer Dicke von mehr als einem Drittel der Gesamtlänge. [5]
- Pflasterplatte: Platte mit einer minimalen Seitenlänge von 15 cm und einer Dicke die maximal ein Drittel der größten Gesamtlänge beträgt. [5]
- Pflastern: manuelles oder maschinelles platzieren von Pflastersteinen oder Pflasterplatten in eine Bettung bestehend aus Sand oder Mörtel. [5]
- Verlegen: Auflegen von Pflastersteinen oder Pflasterplatten mit geringer Dickentoleranz auf eine profilgerechte Bettung aus Sand oder das Einbetten von Rand- oder Bordsteinen in eine Bettung aus Mörtel. [5]
- Verband: Regelmäßige oder unregelmäßige Anordnung von Steinen in einem sich wiederholenden Muster in Abhängigkeit von der Stein- oder Plattengröße. [5]
- Versetzen: Setzen der Randeinfassung in eine Bettung aus Beton. [5]

Zu den Hauptanwendungsbereichen der Pflasterdecken zählen laut RVS 08.18.01:

- Öffentliche Flächen (Kreisverkehre, Straßen mit untergeordneter Belastung, Böschungsbefestigungen, Plätze, Parkanlagen, Rad- und Gehwege) [6]
- Gewerbliche Flächen (Container- und Lagerflächen, Gastronomie, Hafenstraßen) [6]
- Private Flächen (Innenhöfe, Gehwege, Gartenanlagen, Einfahrten, Parkanlagen) [6]

2.2.1 Die wichtigsten Regelwerke für Österreich

Für Pflasterflächen und Pflasterdecken gelten hauptsächlich folgende Richtlinien und Regelwerke:

- RVS 08.01.01 Pflasterstein- und Pflasterdecken, Randeinfassungen, 2020
- RVS 03.08.63 Oberbaubemessung, 2021
- ÖNORM B 2214 Pflasterarbeiten-Werkvertragsnorm, 2020

2.2.2 Aufbau von Pflasterdecken [3], [4], [7], [8]

Eine sachkundige Verarbeitung, sowie ein hohes Maß an Fachwissen und Sorgfalt sind zur Herstellung belastbarer und dauerhafter Pflasterflächen im Straßenbau notwendig.

Zur Herstellung von Pflasterflächen ist ein mehrschichtiger Aufbau erforderlich. Jede Schicht muss nach den jeweiligen Anforderungen ausgeführt werden, damit der gesamte Aufbau seiner Funktionsweise nachkommen kann.

Der **Untergrund** stellt die unterste Schicht des Aufbaus dar. Hierbei handelt es sich normalerweise um den natürlich gewachsenen Boden. Dieser muss eine ausreichend hohe Tragfähigkeit aufweisen. Ansonsten muss diese mithilfe von Bodenverbesserungen erhöht werden. Der Untergrund stellt die homogene Auflagerfläche des Oberbaus dar, der aus den ungebundenen Tragschichten, der Bettung und der Pflasterung besteht.

Darüber befindet sich im Aufbau die **untere ungebundene Tragschicht**, die als Frostschuttschicht dient und unbedingt wasserdurchlässig, sowie dauerhaft sein muss. Diese untere ungebundene Tragschicht wird auf den Untergrund aufgebracht und verdichtet. Die Anforderungen finden sich in der RVS 08.15.01. Das Material muss homogen gemischt und frei von organischen Stoffen, Ton, Müll und Ablagerungen sein.

Die **obere Tragschicht** kann gebunden oder ungebunden hergestellt werden.

Für die **obere ungebundene Tragschicht** werden Korngemische ohne Bindemittelzugabe eingesetzt und verdichtet.

Die **obere gebundene Tragschicht**, die als Haupttragelement dient, soll die Lasten aus der Pflasterdecke aufnehmen und gleichmäßig in den Untergrund ableiten. Diese wird in der Regel aus gebrochenem Schotter hergestellt, der eine geringere Korngröße aufweist als der in der unteren ungebundenen Tragschicht. Die Tragschicht wird zusätzlich mit einem Bindemittel gebunden. Ein

Gefälle von mindestens 2,5% sollte vorhanden sein, um zu verhindern, dass sich Wasserschichten zwischen der Tragschicht und der Bettung bilden.

Laut RVS 03.08.63 [7] unterscheidet man folgende gebundene Tragschichten:

- Mit Bindemittel stabilisiert
- Pflasterdrainbeton
- Bituminös befestigt

Die **Pflasterbettung** stellt die Unterlage dar, in die Pflastersteine und Pflasterplatten verlegt werden. Je nach Bauart wird die Bettung gebunden oder ungebunden hergestellt. Die Schichtdicke beträgt zwischen 3 und 5 cm.

Die oberste Schicht einer Pflasterfläche besteht aus **Pflastersteinen oder Pflasterplatten**, die im Straßenbau als Deckschicht bezeichnet wird.

2.3 Bauarten

Grundsätzlich gibt es drei Arten bei der Herstellung einer Pflasterfläche. Diese unterscheiden sich durch die Ausführung der Bettung und Fugenfüllung, sowie in der Herstellungsart. Es gibt eine gebundene, eine ungebundene und eine gemischte Bauweise.

Folgende Tabelle zeigt die Unterschiede zwischen den Bauarten, die in der RVS 08.18.01 angegeben sind:

Tabelle 1: Vergleich der drei Pflasterbauweisen [5]

	Ungebundene Bauweise	Gebundene Bauweise	Gemischte Bauweise
Regelbauweise	ja	nein	nein
Belastbarkeit	hoch	hoch	gering
Dimensionierung und Planung	Standard	projektbezogen	projektbezogen
Elastizität	hoch	keine	keine
Sichtbare Spannungsrisse	keine	möglich	möglich
Entsiegelung der Fläche	ja	nein	nein
Verbesserung des Mikroklimas	ja	nein	nein
Reinigung	aufwändig	einfach	einfach

Tabelle 2: Vergleich der drei Pflasterbauweisen Fortsetzung [5]

	Ungebundene Bauweise	Gebundene Bauweise	Gemischte Bauweise
Fugenbewuchs	möglich	gering	gering
Auswaschen der Fugen	möglich	nein	nein
Fugensanierung	einfach	aufwändig	aufwändig
Herstellungskosten	gering	hoch	hoch
Instandhaltungskosten	gering	hoch	hoch
Wiederherstellungskosten	gering	hoch	hoch

2.3.1 Gebundene Pflasterbauweise

Bei der gebundenen Bauweise (siehe Abbildung 1) werden Pflastersteine oder Pflasterplatten in eine Bettung aus Mörtel, also mit Zusatz von hydraulischen Bindemitteln verlegt. Die Fugenfüllung wird aus Fugenmörtel, d.h. ebenfalls mit Zusatz eines Bindemittels, hergestellt. Nach dem Aushärten der Bettung wird auf voller Fugenhöhe der Fugenmörtel eingebracht. Die gebundene Bauweise gilt, im Gegensatz zur ungebundenen Bauweise, als nicht flexible Bauweise. Deshalb sind Dehnfugen und/oder Entspannungszonen unbedingt zu berücksichtigen. Temperaturbedingte Risse, vor allem in den Fugen, sind jedoch unvermeidbar. Die darunter liegenden Oberbauschichten sind dauerhaft wasserdurchlässig auszuführen. [6], [9], [10]

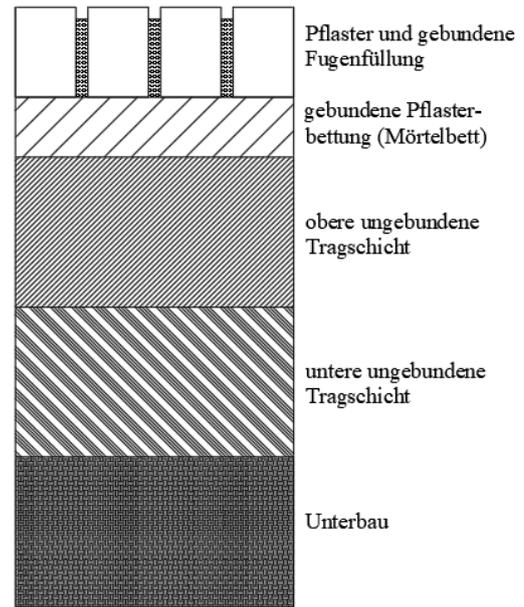


Abbildung 1: Standardaufbau einer gebundenen Bauweise

2.3.2 Gemischte Pflasterbauweise

In der gemischten Bauart (siehe Abbildung 2) wird die Bettung ohne Zusatz eines Bindemittels hergestellt, die Fugenfüllung dafür jedoch gebunden angefertigt. Die darunter liegenden Oberbauschichten sind dauerhaft wasserdurchlässig auszuführen [9]

Im Vergleich zu den anderen beiden Varianten ist die gemischte Bauweise weniger belastbar und sollte deshalb hauptsächlich für begangene oder gering befahrene Flächen eingesetzt werden. [4]

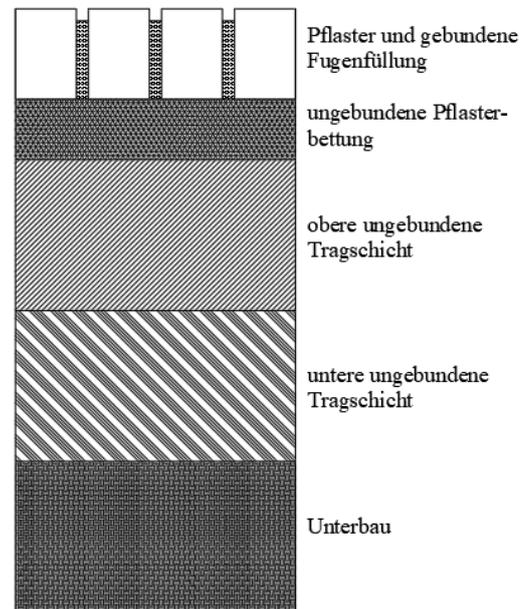


Abbildung 2: Standardaufbau einer gemischten Pflasterbauweise

2.3.3 Ungebundene Pflasterbauweise

In dieser Arbeit wird hauptsächlich auf die ungebundene Pflasterbauweise eingegangen. Auch in späteren Kapiteln bezüglich der Herstellung und der Verformungen, sowie in Kapitel 4 und 5 in den Laborversuchen, wird diese eine wesentliche Rolle spielen.

Die ungebundene Pflasterbauweise (siehe Abbildung 3) stellt die Regelbauweise in Österreich dar und bietet viele ökologische Vorteile. Hier werden Pflastersteine oder Pflasterplatten, bestehend aus Asphaltbeton oder Zementbeton, in eine ohne Zusatz von Bindemitteln hergestellte Bettung verlegt. Die darunter liegenden Oberbauschichten sind dauerhaft wasserdurchlässig auszuführen. [9] [6], [11]

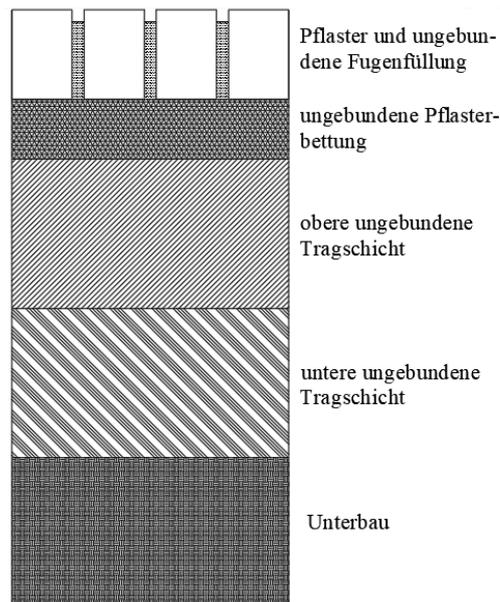


Abbildung 3: Standardaufbau einer ungebundenen Pflasterbauweise

Die ungebundene Pflasterbauweise wird auch als flexibel bezeichnet, da sie ein hohes Maß an Elastizität aufweist. Dies bedeutet, dass bei jeder Belastung Verformungen bzw. Spannungen und Verzerrungen entstehen, die vom Aufbau aufgenommen werden können und nach Entlastung komplett elastisch abgebaut werden. Die Verformungen sind bei Einhaltung der elastischen Grenzwerte nicht dauerhaft. Erst bei Überschreitung der elastischen Grenze werden diese Verformungen zu irreversiblen, plastischen Verformungen. [12]

Die ungebundenen Tragschichten müssen aus natürlichen, rezyklierten oder industriell hergestellten Gesteinskörnungen oder deren Mischungen bestehen. Die verwendeten Körnungen müssen eine CE-Kennzeichnung aufweisen. Das nominelle Größtkorn darf nicht größer sein als $1/3$ der Tragschichtdicke, jedoch 90 mm nicht überschreiten. Die ungebundene Tragschicht darf nach dem Verdichten eine Dicke von 45 cm nicht überschreiten und nur auf dem Unterbauplanum eingebaut werden, wenn dieser den geforderten Verformungsmodul ($E_{v1} \geq 120 \frac{MN}{m^2}$ für Klasse U1; $E_{v1} \geq 90 \frac{MN}{m^2}$ für Klasse U2 – U4; $E_{v1} \geq 75 \frac{MN}{m^2}$ für Klasse U5; $E_{v1} \geq 72 \frac{MN}{m^2}$ für Klasse U6 – U7; $E_{v1} \geq 60 \frac{MN}{m^2}$ für Klasse U8; $\frac{E_{v2}}{E_{v1}} \leq 2,2$) aufweist. Lastklassen U1 bis U5 stehen für ungebundene obere Tragschichten und Lastklassen U6 bis U8 für untere ungebundene Tragschichten. Zusätzlich dazu muss die untere ungebundene Tragschicht so eingebaut werden, dass sie während des Betriebes des Verkehrsweges diesen einwandfrei

entwässern kann. Die geforderte Frostsicherheit, sowie Verdichtung und Tragfähigkeit sind ebenfalls einzuhalten. Zur Sicherstellung einer langen Lebensdauer und einem günstigen Verformungsverhalten, ist nicht nur der Tragfähigkeitswert einzuhalten, sondern insbesondere auch eine Gleichmäßigkeit der Verdichtung. [8]

Die Bettung, bestehend aus natürlichen und gebrochenen Gesteinskörnungen $C_{90/3}$ der Korngruppen 2/4 oder 2/8, hat den Kriterien der ÖNORM EN 13242 zu entsprechen. Zu diesen Kriterien zählen:

- die Korngrößenverteilung (Mindestanforderung: G_{C85-15})
- die Kornform von groben Gesteinskörnungen (Mindestanforderung: SI_{20})
- der Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen (Mindestanforderung: $C_{90/3}$)
- der Gehalt an Feinanteilen in groben Gesteinskörnungen (Mindestanforderung: f_2)
- der Widerstand gegen Zertrümmerung (Mindestanforderung: LA_{20} , LA_{25})
- die Wasseraufnahme (Mindestanforderung: WA_{241})
- die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit (Mindestanforderung: $F1$)

Die Fugenfüllung zwischen den Platten oder Steinen wird ebenso ohne Zusatz von Bindemitteln hergestellt. Hierbei sind gebrochene Gesteinskörnungen $C_{90/3}$ der Korngruppen 0/4 oder 0/8 mit einem Größtkorn, das höchstens 40 – 50 % der maximal zulässigen Fugenbreite entspricht, zu verwenden. [6], [11]

Das Fugenmaterial muss auch bestimmten Kriterien entsprechen, die in der ÖNORM EN 13242:2014 angegeben sind. Diese Kriterien sind:

- die Korngrößenverteilung (Mindestanforderung: G_{F85} , G_{A85})
- die Kornform von groben Gesteinskörnungen (Mindestanforderung: SI_{20})
- der Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen (Mindestanforderung: $C_{90/3}$)
- der Feinanteil in feinen Gesteinskörnungen (Mindestanforderung: $\max f_{16}$) und Gesteinskörnungsgemischen
- der Widerstand gegen Zertrümmerung (Mindestanforderung: LA_{20} , LA_{25})
- die Wasseraufnahme (Mindestanforderung: WA_{241})
- Frost-Tau-Wechselbeständigkeit (Mindestanforderung: $F1$)

Untersuchungen haben ergeben, dass sowohl die Korngrößenverteilung als auch die Kantigkeit des Korns einen großen Einfluss auf das Verhalten des darüberliegenden Pflasters ausüben können. Wichtig dabei sind darunter liegende dauerhaft wasserdurchlässige Oberbauschichten und die geforderte Filterstabilität. Die Standardaufbauten für Pflasterstein- und Pflasterplattendecken werden in der RVS 03.08.63 in die Bautypen PF1 bis PF8 unterschieden. [6], [11]

Laut RVS 03.08.63 wird die Pflasterbauweise in den folgenden Lastklassen eingesetzt: [7]

- LK 1,3
- LK 0,4
- LK 0,1
- LK 0,05

2.3.4 Herstellung einer ungebunden Pflasterfläche

Der erste Schritt ist jeweils die Vorbereitung des Untergrundes und die Herstellung des Unterbauplanums. Dann müssen die untere ungebundene Tragschicht und die obere ungebundene Tragschicht eingebaut und verdichtet werden. Darauf kommt dann die Pflasterbettung. [12]

Es existieren zwei Verlegungsmöglichkeiten von Pflasterflächen im heutigen Straßenbau. Einerseits die manuelle Verlegung per Hand und andererseits die maschinelle Verlegung. Bei beiden Varianten muss zuerst die Randeinfassung hergestellt werden. Zu beiden Varianten gehört das Prüfen der Tragschicht auf ihre Höhenlage, Ebenheit, Wasserdurchlässigkeit und Tragfähigkeit. Der nächste Schritt ist dann die Herstellung der Bettung. [12]

Beim Einbau der Pflastersteine von Hand erfolgt das Verlegen von den jeweils vorher verlegten Steinen aus. Ein Pflasterstein nach dem anderen wird manuell auf das Pflasterbett verlegt. [12]

Zum maschinellen Verlegen des Pflasters muss dieses im vorher abgestimmten Verband auf Paletten angeliefert werden. Heutzutage können Verlegemaschinen eine Fläche zwischen 0,7 und 1,3 m² in einem Arbeitsgang verlegen. Die Bettung muss eine gewisse Vorverdichtung aufweisen, da die Verlegegeräte, die eine gewisse Masse aufweisen, auf den bereits verlegten, in der Bettung liegenden Pflastersteinen fahren, die noch nicht abgerüttelt sind. [12]

Abschließend wird bei beiden Varianten der Fugensand eingefegt und die Pflasterfläche mit einer leichten Vibrationsplatte abgerüttelt. Nach dem Abrütteln, welches auch eine erhebliche

Verdichtung des Fugensandes bewirkt, müssen die Fugen verschlossen werden. Dazu wird der Fugensand mit reichlich Wasser vermengt und eingeschlämmt. [12]

2.3.5 Verformungen in ungebundener Pflasterbauweise

Das Verhalten von ungebundenen Pflasterflächen hängt von vielen Parametern ab. Die wichtigsten sind folgende: [12]

- Steine (Art, Form, Grundrissfläche, Dicke, Oberfläche)
- Fugen (Verlegeverband, Breite, Fugenmaterial)
- Bettung (Dicke, Bettungsmaterial, Korngrößenverteilung, Kornform, Oberflächenrauigkeit, Lagerungsdichte, Wassergehalt)
- Tragschicht (Art, Dicke, Tragfähigkeit, Wasserdurchlässigkeit)

Belastungen werden bei dieser Bauweise flächig abgeleitet und die Pflasterfläche verhält sich elastisch. Spannungen, die einen gewissen Grenzwert nicht überschreiten, führen zu geringen elastischen Verformungen, welche bei Entlastung größtenteils wieder zurückgehen. Durch die mit Sand gefüllten Fugen wird eine Schubkraftübertragung und eine Lastverteilung auf andere Platten ermöglicht. Bei fachgerechter Verlegung haben Betonpflastersteine ein hervorragendes konstruktives Tragvermögen. [2,3] Pflasterdecken weisen unter Verkehr typische elastische Einsenkungen und vertikale Verformungen, sowie horizontale Verschiebungen auf. Bei übermäßiger Beanspruchung aus Bremsen, Anfahren, Achslasten oder Lenkung kann es jedoch zu bleibenden Verformungen und gegebenenfalls Spurrillen kommen. Der Anteil der Pflastersteine an dem gesamten strukturellen Tragvermögen nimmt mit steigender Belastung ab, da die Lasten mit zunehmender Tiefe bis unter die Pflasterdecke reichen. Eine steigende Belastung führt bei Betonsteinpflaster zu einer Erhöhung der Steifigkeit bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes – dem sogenannten lockup –, welcher aus der Verteilung der Betonsteine resultiert. Hat sich dieser lockup-Zustand einmal eingestellt, ist die Befestigung nahezu unempfindlich gegenüber höheren Lasten und häufigeren Lastwechseln. [11], [13]

Die Verformungsstabilität hängt jedoch nicht nur von der Intensität der Belastung aus dem Verkehr ab, sondern auch von anderen Parametern. Zu diesen Parametern zählen die Bettung, die Fugenfüllung, die Form und Abmessung der Pflastersteine sowie die gewählte Verbandsart. [14]

Auf eine gute Verdichtung des Untergrunds und der Tragschichten sowie auf eine Verhinderung der Zweckentfremdung der Pflasterflächen sollte auch Acht gegeben werden. [15]

Vertikale Lasten werden im Wesentlichen an die Bettung abgegeben. Damit nicht stetig anwachsende Verformungen auftreten, dürfen die entstehenden Spannungen in der Bettung und in den Tragschichten nur so groß sein, dass ausschließlich reversible elastische Verformungen entstehen. Bei horizontalen Lasten, die hauptsächlich beim Bremsen und Anfahren entstehen, erfolgt die Kraftübertragung über Reibung an der Oberseite der Pflastersteine. Einen hohen Widerstand gegen horizontale Verschiebungen weisen Pflasterflächen mit hinreichend dicken Steinen, vollständig gefüllten Fugen möglichst geringer Breite, gebrochenem Fugenmaterial mit hinreichend großem Größtkorn und geeigneten Verbänden auf. [12]

Die Pflasterbettung hat die Funktion des Auflagers für die Pflastersteine und muss die eingetragenen Lasten in die obere Tragschicht leiten. Dabei kommt es sehr stark auf die Schichtdicke der Bettung an. Diese sollte im Optimalfall zwischen 3 und 4 cm im verdichteten Zustand betragen. Keinesfalls sollte die Bettung an einer Stelle dünner als 2 cm oder dicker als 5 cm sein (siehe Abbildung 4). Ein häufiger Grund für Verformungen der Pflasterdecke sind ungleichmäßige oder gleichmäßige, aber zu große Bettungsdicken. [14]

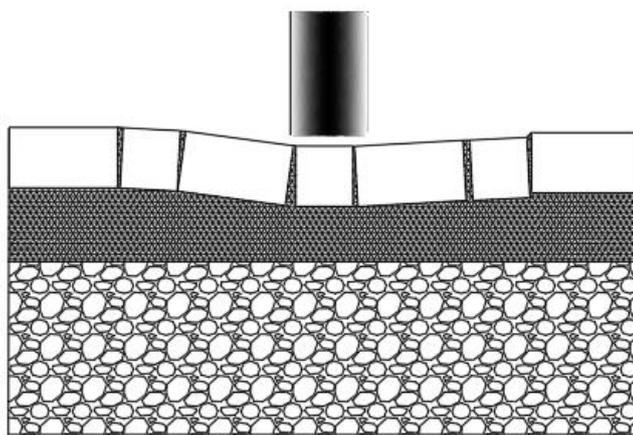


Abbildung 4: Verdrückungen in der Pflasterbettung bei zu großer Bettungsdicke [14]

Die Fugenfüllung hat die Aufgabe, für den nötigen Verschiebungswiderstand zu sorgen. Dies wird erreicht, wenn die Fugenbreite zwischen 3 mm und 6 mm liegt. Die Fugen sollten immer so vollständig wie möglich mit der Fugenfüllung aufgefüllt sein, da es sonst sehr schnell zu Schäden und Verformungen/Verschiebungen kommen kann. Ein Fugenfüllungsgrad von mindestens 85 % sollte eingehalten werden. [14]

Die Steinform sollte bei hohen Belastungen aus Verkehr ein möglichst gedrungenes Format aufweisen und eine Nenndicke von mindestens 80 mm wird empfohlen. [14] Gedrungene Steinformate weisen eine bessere Lastabtragung auf als andere Steinformen. [16]

Verbände mit in Fahrtrichtung versetzten Fugen wie zum Beispiel Läufer- oder Reihenverband (siehe Abbildung 5), eignen sich besonders für Verkehrsflächen, die von Kraftfahrzeugen frequentiert werden. Diagonal zur Fahrbahn angeordnete Verbände, beispielsweise Diagonal- (siehe Abbildung 6) oder Fischgrätverbände (siehe Abbildung 7), weisen eine gute Lastverteilung auf. [14]

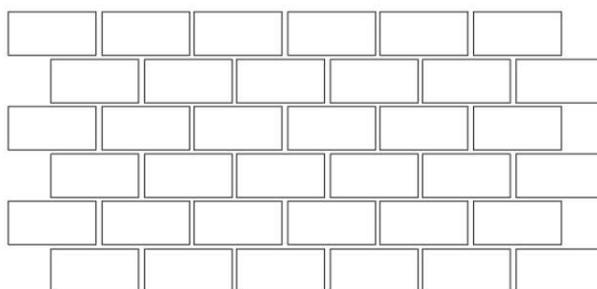


Abbildung 5: Reihenverband

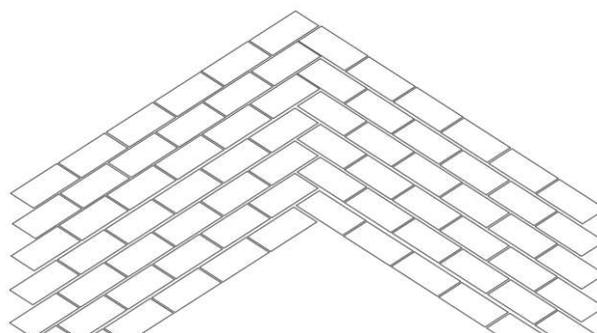


Abbildung 6: Diagonalverband

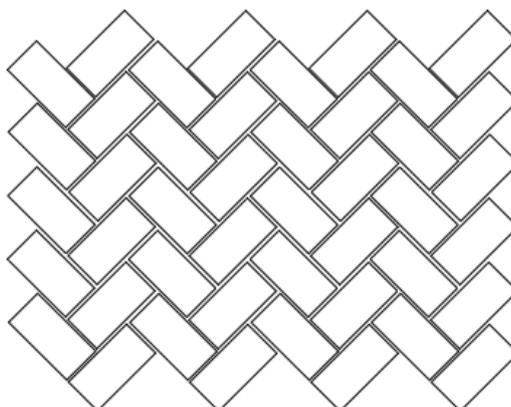


Abbildung 7: Fischgrätverband

3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN GEORADAR

In Kapitel 3 geht es um das Georadar. In diesem Zusammenhang werden der geschichtliche Hintergrund, Merkmale und Besonderheiten sowie das Verfahren selbst erläutert. Zusätzlich dazu werden der physikalische Hintergrund sowie die Auswertungsmöglichkeiten einer Georadarmessung erklärt. Das Georadar nimmt eine wesentliche Rolle in dieser Arbeit ein, da bei allen Laborversuchen ein Georadar zur Durchführung der Messungen verwendet wurde.

3.1 Geschichtlicher Hintergrund

Die Entwicklung des Georadars reicht zurück bis ins Jahr 1904, als Christian Hülsmeier das erste Patent diesbezüglich anmeldete. Die erste Entwicklung des Gerätes sollte metallische Gegenstände in größerer Entfernung detektieren können (z.B. Schiffe). Schon ein paar Jahre später im Jahr 1910 wurde von Leimbach und Löwy ein weiteres Patent angemeldet. Dieses Gerät diente zur Messung des Erdinneren. [17]

Ein weiterer Meilenstein der Georadartechnologie war Mitte der 1970-er Jahre, als die USA Federal Highway Administration den Einsatz des Radars in Tunneln und später an Brücken testete. Das Georadar hat sich kontinuierlich weiterentwickelt, von Ortung und Prüfung bis hin zu Bildgebung und Diagnose. Heutzutage ist mithilfe des Georadars das „Sehen des Unsichtbaren“ möglich. Ebenso hat die wissenschaftliche Abteilung des Verkehrsministeriums in Frankreich mit einer entsprechenden Verarbeitungssoftware und dem Grundstein zu zerstörungsfreier Messung von Schichtdicken einen ähnlichen Ansatz, wie die Federal Highway Administration verfolgt. Heutzutage geht es beim Einsatz von Georadarsystemen nicht nur um die Bestimmung der Schichtdicke, sondern auch um die Erkennung von Anomalien im Zentimeterbereich. (Risse, Hohlräume, Wasserinfiltration oder eingebettete Objekte) [18]

Der Trend entwickelte sich in den letzten Jahren zunehmend hin zur Verbesserung der Visualisierungsmöglichkeiten. Insbesondere die 3D-Visualisierung machte Fortschritte in der Entwicklung. Immer häufiger zur Verwendung kommen Bodenradare mit GPS-Positionsunterstützung, um die jeweilige Aufnahmestandorte sofort mit der zugehörigen Aufnahme zu koppeln. [19]

3.2 Allgemeines

Das Georadar ist in der Literatur auch noch unter folgenden Synonymen bekannt: [20]

- EMR (elektromagnetische Reflexion)
- GPR (Ground penetrating radar)
- Impulsradar

Die Beliebtheit des Georadarsystems lässt sich auf die schnelle Datenerfassung, die Möglichkeit der sofortigen Sichtbarkeit von Resultaten vor Ort sowie der zerstörungsfreien Messdurchführung zurückführen. [18]

Die Anwendungsgebiete des Georadars sind sehr vielfältig und auf Netzebene sowie Projektebene unterteilt, wie in Abbildung 8 zu sehen ist.

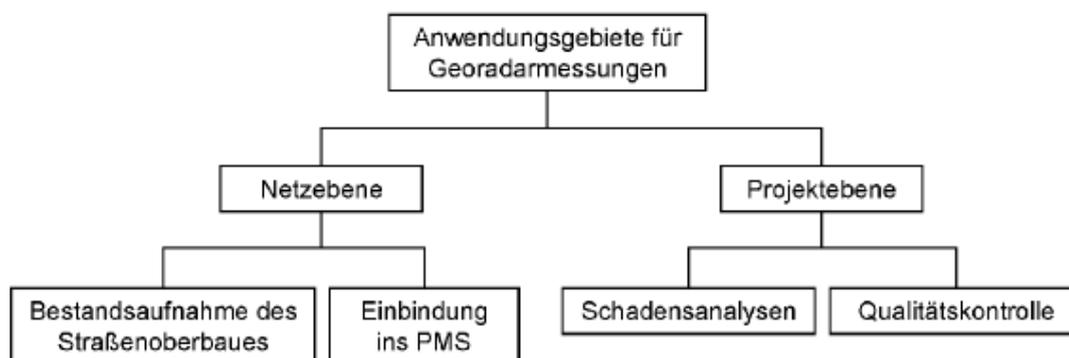


Abbildung 8: Anwendungsgebiete Georadarsysteme [21]

Es gilt verschiedene Untersuchungsmöglichkeiten zu unterscheiden: [21]

- *Untersuchungen des Untergrundes von Straßenbefestigungen*
- *Schadensgutachten*
- *Ableitung von Parametern für die Wahl einer Erhaltungsstrategie für eine effiziente Erhaltungsplanung*
- *Qualitätskontrolle im Straßenneubau*

Die häufigsten Anwendungsgebiete des Georadars sind: [20]

- Beton- und Stahlbetonbau
 - Schlaffe und Spannbewehrung, Bauteilaufbau, Fehlstellen
- Mauerwerk
 - Struktureller Aufbau, Einbauteile, Schadstellen, Feuchte- und Salzverteilung
- Verkehrswege
 - Schichtdicken, Schadstellen
- Erdbauwerke
 - Struktureller Aufbau, gestörter Aufbau
- Altlasten
 - Objekte detektieren
- Baugrund
 - Alte Bauwerksreste, Objekte, Hohlräume, Leitungen
- Geologie
 - Hohlräume, Boden- und Sedimentschichten, Wassertiefen
- Archäologie
 - Objektdetektion, Bauwerksreste

Die Bestandteile konventioneller, heutzutage verwendeter Georadarsysteme sind (siehe Abbildung 9): [22]

- Antenne (Einzelantenne [Sender & Empfänger]) / zwei Antennen [eine als Sender/eine als Empfänger]
- Sender- und Empfangsgerät
- Kontrolleinheit
- Speicher- und Anzeigemodul

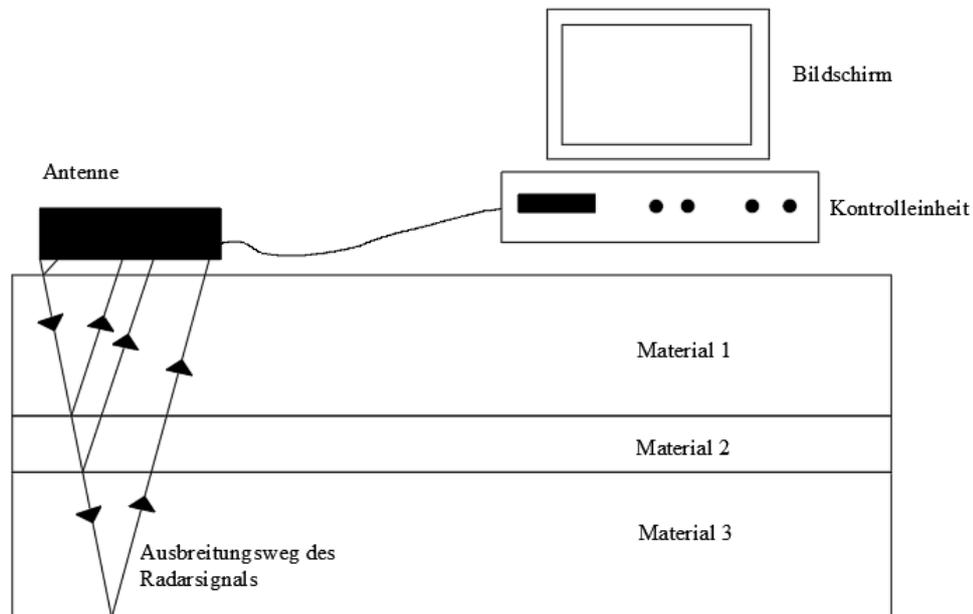


Abbildung 9: Georadar Grundprinzip [23]

Die Antenne ist eine wichtige Komponente in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Georadars. Die gängigsten Georadare verwenden als Sende- sowie Empfangsantenne breitbandige Dipole. [19]

Es existieren zwei Arten von Antennen: luftgekoppelte und bodengekoppelte Antennen. Bei luftgekoppelten Antennen wird die Antenne über der zu untersuchenden Fläche aufgehängt. In bodengekoppelten Systemen befindet sie sich in Bodennähe ohne zwingend Kontakt mit dem Untergrund haben zu müssen. [22] Der klare Vorteil der bodengekoppelten Antenne gegenüber luftgekoppelten Systemen ist die größere Eindringtiefe. [24]

Die Antennen müssen ähnliche Abmessungen haben, wie die Wellenlängen der Signale, was letztlich die Größe der Georadarinstrumente festlegt. [18]

Es gibt zwei Arten von Georadarsystemen. Die erste Art ist ein fahrzeugmontiertes System und die zweite Art ist ein handgeführtes System. [25]

Im Falle von fahrzeugmontierten Georadarsystemen lassen sich große Flächen in kurzer Zeit ohne wesentliche Beeinträchtigung des Verkehrs vermessen. [26]

Häufig verwendete Begriffe in der Literatur im Zusammenhang mit dem Georadar sind: [20]

- **Reflexion:** Teil eines Signals, welcher an einer Diskontinuität (Materialwechsel) zurückgeworfen wird
- **Diffraction:** Teil eines Signals, welcher an (im Vergleich zur Wellenlänge) kleinen Objekten oder an Kanten von ausgedehnten Reflektoren gebeugt und zurückgeworfen wird
- **Reflektor/Diffraktor:** Diskontinuität an der die Reflexion/Diffraction stattfindet (Oberflächen von z.B. Schichten oder Objekten)
- **Transducer:** Sende-Empfänger-Antenne
- **Dominanzfrequenz:** Die Signale des Impulsradars besitzen eine Bandbreite von Frequenzen. Bei der Dominanzfrequenz handelt es sich um die mittlere Frequenz. Sie ist ein wichtiges Unterscheidungskriterium von Antennen
- **Hochfrequenzantennen:** Hochauflösende Antennen mit geringer Eindringtiefe, meist im Einsatz für zerstörungsfreie Prüfungen, Dominanzfrequenz ab ca. 800 MHz, Anhaltspunkt: bis 1 m Reichweite
- **Mittelfrequenzantennen:** Mittelauflösende und eindringende Antennen, häufiger Einsatz für geotechnische Fragestellungen, Dominanzfrequenzen zwischen ca. 200 und 600 MHz, Anhaltspunkt: 2 bis 4 m Reichweite
- **Niederfrequenzantennen:** Gering auflösende Antennen mit großer Reichweite bei geeignetem Untergrund, Einsatz meist für geologische Fragestellungen, Dominanzfrequenzen ca. 25 bis 100 MHz, Anhaltspunkt: 3 - 10 m Reichweite
- **Luftwelle:** I.A. sehr geringer Signalanteil, der sich jedoch ungedämpft in der Luft ausbreitet und auch zu diesbezüglichen Störsignalen führen kann (insbesondere in Gebäuden)

3.3 Verfahrensgrundlage

Das Georadar bietet die Möglichkeit, Strukturen zu untersuchen, deren Schichtdicke zu bestimmen und Objekte im Ober- und Unterbau aufzudecken. Es handelt sich hierbei um ein zerstörungsfreies Messverfahren. Grundlage für das Messverfahren bildet die Reflexion elektromagnetischer Wellen an unterschiedlichen Schichten und Objekten. [21] Elektromagnetische Wellen bestehen aus elektrischen und magnetischen Vektorfeldern, die sich als Welle durch das Material ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Abschwächung, die Polarisationsänderungen und die Umlenkung von Signalen werden durch Unterschiede in den elektrischen und magnetischen

Eigenschaften der untersuchten Materialien bestimmt. [18] Die Wellenausbreitung ist im Wesentlichen von den elektrischen Eigenschaften des untersuchten Mediums abhängig. [20] Aufgrund unterschiedlicher Materialien, Schichtdicken und Dichten in untersuchten Bauteilen kommt es zu unterschiedlicher Absorption und Reflexion der ausgesandten elektromagnetischen Wellen, was zur Visualisierung der Unterschiede in den Schichten mittels Georadar führt. [27]

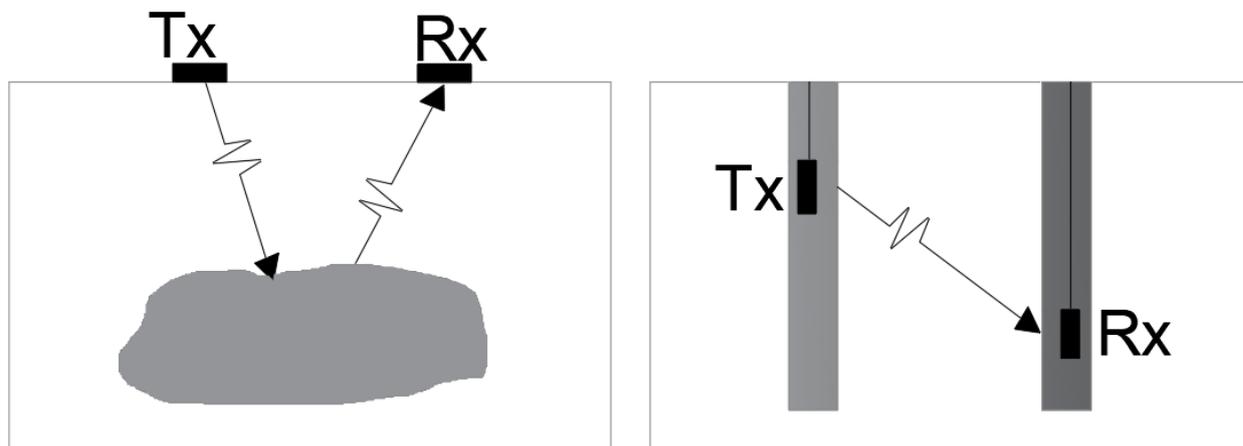


Abbildung 10: Unterschiedliche Messverfahren des Georadars [28]

Es gibt zwei gängige Messverfahren (siehe Abbildung 10). Bei der ersten (linkes Teilbild) wird die reflektierte oder gestreute Energie gemessen. Bei der zweiten (rechtes Teilbild) werden die Auswirkungen auf die durch das Material übertragene Energie beobachtet. [28]

Die Eindringtiefe von Georadarmessungen ist abhängig von folgenden Faktoren: [20]

- **Reflexionskoeffizient:** Eine Reflexion entsteht dort, wo ein Materialkontrast (unterschiedliche Leitfähigkeit, Dichte oder Permittivität) vorhanden ist. Dieser ist bei Metallen am größten. Gegenstände aus Metall sind im Allgemeinen gut erkennbar, können jedoch darunter liegende Schichten/Materialien verdecken.
- **Signalabsorption:** Die elektrische Leitfähigkeit des Mediums hat eine Auswirkung auf die Absorption. Je höher die elektrische Leitfähigkeit, desto größer die Absorption. Die Leitfähigkeit von Böden kann um 10er Potenzen schwanken. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Absorption.
- **Signalstreuung:** Ein homogenes Untersuchungsmedium hilft bei der Erkennung eines Objektes und bei der Reichweite der Radarsignale. Künstliche Auffüllungen (Schutt/Müll) streuen in der Regel stark, natürlicher Boden und kompakter Fels wenig.

- **Entfernung:** Aufgrund der räumlichen Divergenz des Signals nimmt dessen Stärke an der Wellenfront ab.
- **Objektgröße und -form:** Materialien mit einer großen und glatten Fläche reflektieren einen höheren Signalanteil als kleinere raue Flächen. Reflektorflächen, die sehr stark geneigt sind lenken einen Großteil des Signals zur Seite ab und nicht direkt zur Antenne.
- **Signalfrequenzen:** Signale mit einer niedrigen Frequenz haben eine größere Reichweite und Eindringtiefe, jedoch eine geringere Auflösung. Umgekehrt haben Signale mit einer hohen Frequenz eine geringere Reichweite und Eindringtiefe, jedoch eine höhere Auflösung.
- **Messmethodik/Datenverarbeitung:** Die Anordnung der Sender- und Empfängerantenne kann unter Umständen die Reichweite verbessern. Zusätzlich kann eine geeignete digitale Datenverarbeitung durch Nutzsignalerhöhung eine Reichweitenverbesserung zur Folge haben.

Die häufigste Anordnung bei Georadarmessungen ist die Reflexionsanordnung. (siehe Abb. 11) Die Reflexion des ausgesandten Signals findet an Kontrasten statt. Diese Kontraste ergeben sich vor allem durch die unterschiedliche Dielektrizität ε oder Leitfähigkeit σ verschiedener Materialien beziehungsweise Schichten. Für die Reflexionskoeffizienten (Amplitudenverhältnis/Leistungsverhältnis zwischen reflektierter und einfallender Welle beim Übergang in ein anderes Ausbreitungsmedium) kann näherungsweise folgende Formel herangezogen werden: [20]

$$R_{1,2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

Die Wellengeschwindigkeit v ist auch abhängig von der Dielektrizitätskonstante ε und kann näherungsweise berechnet werden zu: [20]

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

mit c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Der Reflektorabstand d , also die Distanz von einer Grenzschicht des untersuchten Mediums zur Antenne kann mittels Laufzeit des Signals t und Wellengeschwindigkeit v berechnet werden: [20]

$$d = \frac{1}{2} \cdot t \cdot v \quad (3)$$

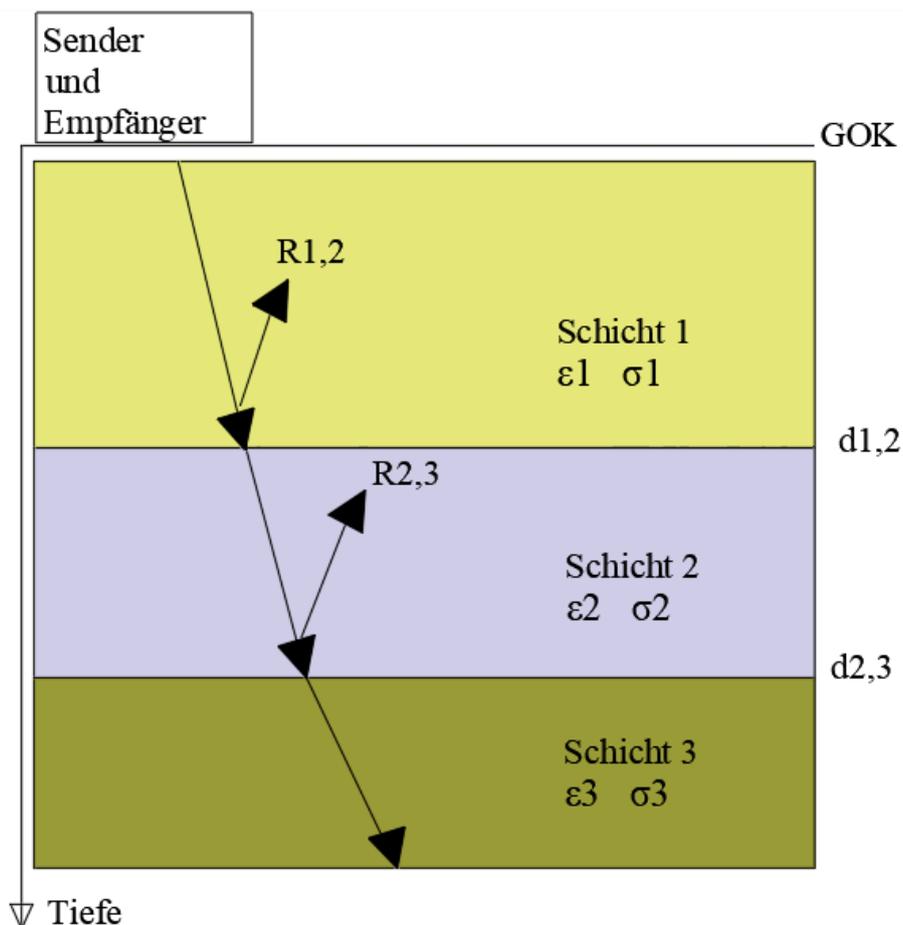


Abbildung 11: Reflexionsanordnung [20]

Der Ablauf des Messvorgangs lässt sich folgendermaßen beschreiben: Die Antenne wird auf das zu untersuchende Medium platziert. Diese Antenne sendet dann je nach Verfahren entweder einen hochfrequenten Impuls oder ein kontinuierliches Signal in das zu untersuchende Medium. Die ausgesandte elektromagnetische Welle breitet sich innerhalb des Mediums aus und wird an den Grenzschichten der unterschiedlichen Materialien reflektiert. Die zugehörige Empfangsantenne an der Oberfläche des Bauteils nimmt die Reflexionen auf. Aufgenommen werden: Laufzeit, Amplitude und Phase der reflektierten Welle. Die Grenzschichten innerhalb eines Aufbaus reflektieren jedoch nicht das gesamte Signal, deshalb kann das restliche, transmittierte Signal auf tiefer liegende Schichten auftreffen und diese detektieren. Wird diese Messung entlang einer Linie wiederholt, so erhält man eine Reihe an Einzelprofilen, die nebeneinander gesetzt zu einer kompletten Darstellung des untersuchten Aufbaus werden. Dieses Ergebnis nennt sich Radargramm. (siehe beispielsweise Abbildung 12) [19]

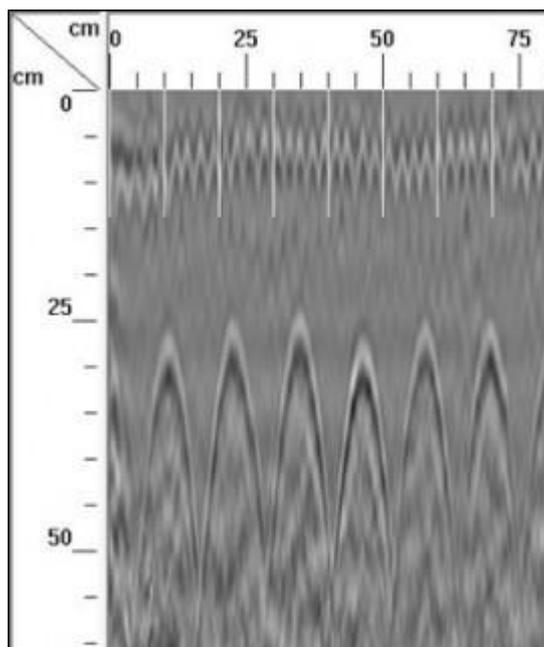


Abbildung 12: Beispiel eines Radargrammes [29]

Es gibt unterschiedliche Senderantennen, die jeweils mit einer anderen Frequenz arbeiten. Der übliche Arbeitsfrequenzbereich liegt zwischen 10 MHz und ca. 5 GHz, weshalb sie als Ultrabreitband Funkwellengeräte bezeichnet werden. [18], [19] Die Erkundungstiefe der Messung hängt von der gewählten Frequenz ab. Für tiefere Messungen eignet sich eine niedrige Frequenz am besten. Bei oberflächennahen Messungen sind höhere Frequenzen passender. Höhere Frequenzen bedeuten aber auch höhere Auflösungen. [30] Je nach Anwendungsfall und gewünschter Präzision ist die richtige Konfiguration und Messfrequenz der Senderantenne zu wählen. (siehe Tabelle 3) [21]

Tabelle 3: Übersicht für verschiedene Anforderungsprofile [19]

Untersuchungsziel	Empfohlene Messfrequenz
Untersuchung des Unterbaus/Untergrundes	400 – 900 MHz
Schichtdickenbestimmung im Oberbau nach dem Raster der RstO. Eindringtiefe von 50 cm muss sichergestellt werden	$\geq 1,0$ GHz
Schichtdickenbestimmung im gebundenen Oberbau	1,0 – 1,5 GHz
Detaillierte Analyse der Struktur im gebundenen Oberbau	1,5 – 2,0 GHz

Die besten Ergebnisse bezüglich Bestimmung der Schichtdicke erhält man, wenn es einen signifikanten Unterschied bei den Dielektrizitätskonstanten zweier Materialien aneinander grenzender Schichten gibt. [22]

Grenzen für die Messung mittels Georadar stellen Metalle dar, da diese zu einer Totalreflexion der elektromagnetischen Impulse führen und somit die ausgesandte Welle nicht in die darunterliegenden Schichten dringen kann. Auch nasse Oberflächen sind ungeeignet, weil es dort teilweise zu einer extremen Signaldämpfung kommen kann. [31]

3.4 Physikalische Grundlagen

Die Grundlagen für die Funktionsweise des Georadars liegen in der elektromagnetischen Theorie, da es sich um ein elektromagnetisches Messverfahren handelt. Mathematisch gesehen hängen die Erzeugung und Ausbreitung elektromagnetischer Felder mittels Maxwell'schen Gleichungen wie folgt zusammen: [25], [28]

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

Wobei gilt:

E = Vektor der elektrischen Feldstärke [V/m];

q = elektrische Ladungsdichte [C/m³];

B = Vektor der magnetischen Flussdichte [T];

J = elektrische Stromdichtevektor [A/m²];

D = elektrische Verschiebungsvektor [C/m²];

t = Zeit [s];

H = magnetische Feldstärke [A/m]

Die Maxwell'schen Gleichungen zeigen die Wechselwirkungen zwischen magnetischen und elektrischen Feldern mithilfe der physikalischen Feldgrößen auf. [25], [28]

Die Leistungsfähigkeit des Georadars, lässt sich mit der Radargleichung beschreiben. Die Radargleichung beinhaltet sämtliche Einflüsse, welche auf die Leistungsfähigkeit des Georadars eine Wirkung haben können. Die Radargleichung definiert die empfangene Leistung in Abhängigkeit von der Sendeleistung, den Reflexionseigenschaften des Zielobjektes und der Entfernung zum Zielobjekt. Die wesentlichen Einflüsse auf den Signalverlust zwischen Sender, Zielobjekt und Empfänger sind die Absorption und Reflexion. Die Absorption hängt größtenteils von der Entfernung zum gemessenen Medium und von der gewählten Frequenz ab. Die Reflexionsfläche des Zielobjektes ist zusätzlich von großer Bedeutung. Die Leistungsverluste V sind das Verhältnis aus der empfangenen Leistung und der gesendeten Leistung: [32]

$$V = \frac{P_E}{P_S} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_E G_S \frac{F}{(4\pi r^2)^2} e^{-4\alpha r} \quad (8)$$

Mit:

P_E = empfangene Signalleistung [W]

P_S = gesendete Signalleistung [W]

λ = abgestrahlte Wellenlänge in Luft [m]

G_E = Antennengewinn der Empfangsantenne

G_S = Antennengewinn der Sendeantenne

F = effektive Reflektorfläche [m²]

r = Entfernung zum Zielobjekt [m]

α = Absorptionskoeffizient [1/m]

3.5 Georadar Auswertung

Die für die Straßenvermessung verfügbare Georadar-Software kann in vier Gruppen unterteilt werden: [24]

- Erfassungssoftware
- Datenverarbeitungssoftware
- Software zur Interpretation und Visualisierung
- Software zur integrierten Straßenanalyse

Das Georadar selbst dient nur zur Erkennung und Ortung von Diskrepanzen oder Schichtdicken in einem Aufbau und liefert keine Bewertung oder Interpretation der Resultate. Der Georadar-Benutzer/Auswerter bewertet und interpretiert die Ergebnisse mit Hilfe einer entsprechenden Computersoftware und fachlichem Wissen. [22]

Ein noch nicht bearbeitetes Radargramm besteht aus einem Primärsignal, einem Nutzsinal und dem Störsignal. Bei der Auswertung geht es darum, das Nutzsinal hervorzuheben, das Störsignal herauszufiltern, den Maßstab zu entzerren und die gemessene Laufzeit des Signals in eine Tiefenangabe umzuwandeln. Bei sehr einfachen Messungen und klaren Daten kann darauf verzichtet werden. Im normalen Anwendungsfall erweist sich eine Filterung zur Unterdrückung von stochastischem sowie kohärentem Rauschen als sinnvoll. [20]

Die Auswertung kann über zwei verschiedene Methoden stattfinden. In der ersten Methode geht es um die Laufzeit des Radarsignals im untersuchten Medium und den zeitlichen Verlauf der Signalamplitude. Bei der zweiten Methode geht es um die automatische Bestimmung der Dielektrizitätskonstante über die Messung der Reflexionskoeffizienten an den Schichtgrenzen. [21]

Mit fortschrittlichen Signalverarbeitungs- und Bildrekonstruktionsverfahren werden diese empfangenen Signale in ein 3D-Bild des Untergrunds umgewandelt, die das Unsichtbare sichtbar machen. [18]

Zu den mehrfach durchlaufenen Signalverarbeitungsprozessen während der Auswertung zählen unter anderem folgende:

Dewow-Filter:

Da bei Georadarmessungen die Sende- und Empfangsantenne sehr nahe beieinander sind, tritt in den Rohdaten öfters ein Effekt auf der als „wow“ bezeichnet wird. Er stellt eine tieffrequente Schwingung dar, die die Radarspur überlagert. Im Verarbeitungsprozess des Dewow-Filters wird dann für jeden abgetasteten Punkt während eines vorgegeben Zeitfensters ein Mittelwert berechnet. Dieser Mittelwert wird anschließend vom jeweiligen Wert des Abtastpunktes abgezogen. [33]

Zeitabhängige Verstärkung:

Mit zunehmender Tiefe des untersuchten Mediums nimmt das Radarsignal ab. Die Echosignale aus größeren Tiefen sind somit weniger gut erkennbar als die aus Oberflächennähe. Deshalb ist bei fast jeder Auswertung eine Verstärkung der Daten notwendig. *Diese sollte so gewählt werden, dass die natürliche Signaldämpfung, die Signalabschwächung durch darüber stattfindende Reflexionen und der geometrische Verlust ausgeglichen werden.* [33]

Migration:

Die elektromagnetischen Wellen von der Sendeantenne werden nicht nur senkrecht in den Boden ausgesendet, sondern weisen auch eine Ausbreitung zur Seite hin auf. Somit können auch Objekte oder Schichten mit dem Georadar erfasst werden, die nicht erwünscht sind. Diese Objekte aus der seitlichen Abstrahlung werden im Radargramm als Diffraktionshyperbeln dargestellt. Das Hauptproblem dabei ist, dass stark geneigte Objekte falsche Informationen zur Lage liefern. Die Migration wird hier angewendet, um dies auszugleichen (siehe Abbildung 13). Mittels Migration werden die Streueffekte räumlich ausgeglichen und die Diffraktionshyperbeln zurück in ihre ursprüngliche Form gesetzt. Zur Durchführung dieses Prozesses muss jedoch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle bekannt sein. [19], [28]



Abbildung 13: Radargramm mit und ohne Migrationsprozess [34]

Das Georadar ist ein indirektes Verfahren, die Daten der Auswertung müssen noch interpretiert werden. Dies erfolgt im Allgemeinen durch geschultes und erfahrenes Personal. Die Interpretation hingegen ist abhängig von den Annahmen und Vorkenntnissen der auszuwertenden Person. Bei sehr schlechter Datenlage sind Fehlinterpretationen und größere Ungenauigkeiten nicht zu vermeiden. Bei normalen Bedingungen kann im Allgemeinen von einer Unsicherheit von bis zu 10 % ausgegangen werden. [20]

3.6 Forschungsbedarf

Da aus Erfahrungsberichten in der Literatur heraussteht, dass es bei der Benutzung und Auswertung sehr stark auf die Erfahrung des jeweils eingesetzten Personals/Benutzers, sowie auf die richtige Wahl des Messsystems ankommt, sollte eine Zertifizierung der Georadarsysteme als auch des Personals, das die Auswertung durchführt, stattfinden. Dies würde die Qualität der Messung und Auswertung erheblich erhöhen, aber auch als Hilfestellung für Auftraggeber dienen. [21]

Des Weiteren wäre ein Schadenskatalog sinnvoll, der visuelle Schäden in Verbindung mit ausgewerteten Georadarbildern setzt. So könnte schneller und sicherer auf möglicherweise erkannte Schäden/Fehler in Schichten aus einem Radargramm geschlossen werden. [21]

Zusätzlich besteht die Möglichkeit weitere Erfahrungen im Bereich der Qualitätskontrolle bei Neubauten zu sammeln, wo Einbaudicken zerstörungsfrei bestimmt und die Homogenität sowie der Hohlraumgehalt (über Berechnung der Dielektrizitätskonstanten) überprüft werden können. Daraus könnte dann ein standardisiertes Vorgehen entwickelt werden, welches systematisch angewendet werden könnte. [21]

3.7 Permittivität / Dielektrizitätskonstante

Die Dielektrizitätskonstante (veralteter Begriff), Permittivität oder dielektrische Leitfähigkeit gibt an, welche Durchlässigkeit ein jeweiliges Material für elektrische Felder hat. Es handelt sich um elektrisch isolierende, polare oder unpolare Materialien, die auch als Dielektrika bezeichnet werden können. Auch Vakuum besitzt eine Permittivität, da sich auch dort elektrische Felder einstellen oder elektromagnetische Felder ausbreiten können. Die Permittivität des Vakuums ϵ_0 ist eine Naturkonstante. [35]

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} = 8,8541788128 * 10^{-12} \frac{As}{Vm} \quad (9)$$

Mit $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ der magnetischen Feldkonstante und $c_0 = 2,99792458 \times 10^8 \frac{m}{s}$ der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Die Permittivität setzt sich aus dem Produkt der Permittivität des Vakuums ϵ_0 und der relativen Permittivität des Materials ϵ_r zusammen. Die relative Permittivität ist die maßgebende Größe im Bezug auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen. Die Permittivität eines Stoffes ist somit ein Vielfaches der Permittivität des Vakuums. [35]

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r \quad (10)$$

Diese ist frequenzabhängig und schwankt somit je nach benutzter Frequenz bei der Bestimmung der dielektrischen Leitfähigkeit. Diese Frequenzabhängigkeit nennt man Dispersion. [35]

Die elektrische Feldstärke \vec{E} und die elektrische Ladungsverschiebung \vec{D} sind parallel in einem elektrischen Feld. Sie unterscheiden sich nur durch einen Proportionalitätsfaktor, die Permittivität. [36]

Mit dem Materialgesetz der Elektrostatik wird der Zusammenhang zwischen Ladungsverschiebung und der elektrischen Feldstärke beschrieben:

$$\vec{D} = \epsilon \times \vec{E} \quad (11)$$

3.7.1. Bestimmung der Permittivität

Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten um die Permittivität eines Materials zu bestimmen. In diesem Kapitel wird kurz auf ein paar Arten eingegangen. In dieser Arbeit werden die Werte für die Permittivität für alle relevanten Materialien aus der Literatur entnommen. In Tabelle 4 ist eine Auswahl an Werten dargestellt. Diese Auswahl betrifft hauptsächlich Materialien, welche auch im Straßenbau Anwendung finden könnten oder in nachfolgenden Laborversuchen benutzt wurden.

Tabelle 4: Auswahl an Werten für die relative Permittivität [37]

Name des Materials	Relative Permittivität bei 100 kHz	Relative Permittivität bei 1 MHz
Aluminium	2,9	
Basalt	2,3	
Bitumen	2,3	
Granit	4,0	
Kalk	2,0	
Kies		2,6
Kupfer	6,0	
Marmor		2,5
Quarzmehl	1,5	
Quarzsand	2,6	
Salzwasser	32,0	
Splitt, fein	2,8	
Wasser	80,3	
Polypropylen (Geovlies)	1,55	

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Permittivität ist das Percometer. Ein Percometer ist ein elektronisches Gerät, welches die Permittivität an Probenoberflächen bestimmen kann. Es handelt sich um ein zuverlässiges, leichtes und einfach zu bedienendes Gerät, welches ein zerstörungsfreies Testverfahren ermöglicht. Der gemessene dielektrische Wert ist der Realteil der komplexen relativen Dielektrizitätskonstante. Er lässt sich aus der Änderung der Grenzkapazität der Sonde berechnen, die durch das zu prüfende Material verursacht wird. [38]

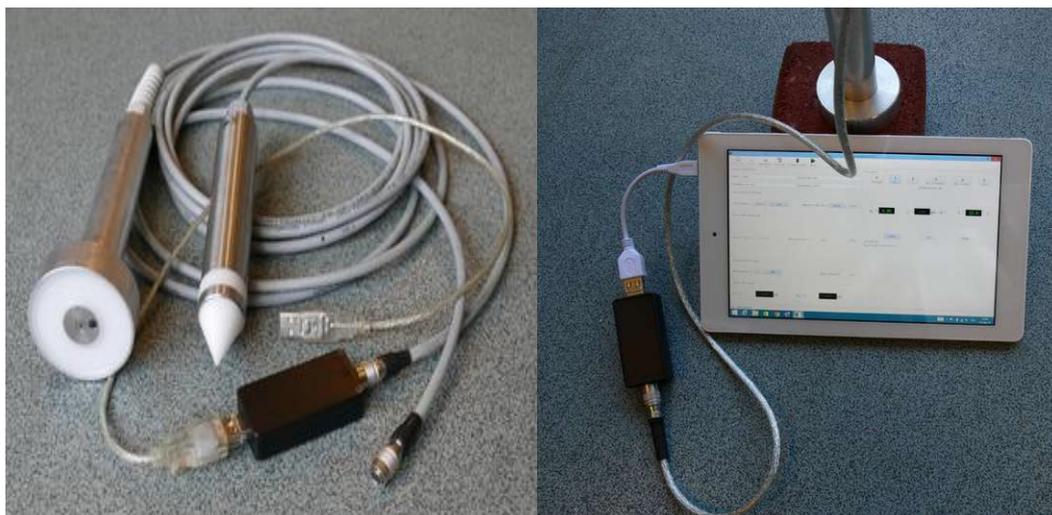


Abbildung 14: Percometer [38]

Eine weitere Möglichkeit ist die Messung mittels Tastkopf und Netzwerkanalysator. Diese Methode nennt man auch offene Koaxialleitung, da der Tastkopf, der als Messkopf eingesetzt wird ein offenes Ende darstellt. Hierzu wird zusätzlich eine Auswertesoftware benötigt und vor der Messung ist eine Kalibrierung notwendig. Die Messungen sind relativ einfach durchzuführen, wenn man im Besitz der notwendigen Apparatur ist. Der Tastkopf wird auf die zu untersuchende temperierte Probe gesetzt und misst die relative Permittivität. Bei dieser Messung ist eine Rauigkeit der Probe bis 25mm zulässig. [39]

Eine dritte Methode ist die Messung mittels Netzwerkanalysator mit Hohlraumresonatoren. Hierbei werden die Resonatoren mit Koaxialkabeln an den Netzwerkanalysator angeschlossen und die elektromagnetischen Wellen mittels Koppelschleifen in die Resonatoren eingekoppelt. [39]



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4. MESSTAG 1: PUNKTFÖRMIGER VERSUCH

In Kapitel 4 wird der erste Messtag beschrieben. Es wird im Detail auf den Aufbau des Versuches, die Materialien und den Ablauf der Messungen eingegangen. Der erste Versuch war ein zeitabhängiger Versuch einer vereinfachten ungebundenen Pflasterbefestigung mittels Georadar. Abschließend werden die Auswertung sowie die Ergebnisse dargestellt.

4.1. Vorbereitung des Grundgerüsts

Als Grundgerüst zum Aufbau des Versuches dienten zwei Kisten aus Holz, welche aus Schaltafeln, Holzstaffeln, Schrauben und Winkeln zusammgebaut wurden. Die Kisten hatten jeweils eine Innenfläche von 1,70 m x 1,20 m, sowie eine Höhe von 24 cm.

Die Unterseite bestand aus zurechtgeschnittenen Schaltafeln auf denen jeweils drei Staffeln übereinander befestigt waren. Die Staffeln wurden mit langen Schrauben zusammengeschrubt und von unten mit Schrauben an der Schaltafel befestigt. Des Weiteren wurden die Kisten zusätzlich mit Winkeln an den Außenecken stabilisiert. (siehe Abbildung 15)



Abbildung 15: Grundgerüst des Versuches

4.2. Material/Versuchsaufbau

Für den Versuch wurde ein mehrschichtiger Aufbau gewählt, der vereinfacht eine ungebundene Pflasterbauweise darstellen sollte. Es wurde pro Kiste und Versuchsreihe je eine trockene und eine feuchte Variante desselben Grundaufbaus eingebaut, wobei mehrere verschiedene eingelegte Materialien in den Versuchen untersucht wurden. Die Materialien wurden jeweils oberhalb und

unterhalb der Bettung eingebracht. Nachfolgend wird dies genauer erläutert. Durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien wurde versucht den Kontrast an den Schichtgrenzen zu erhöhen. Damit sollte im Radargramm des Georadars deutliche und gut erkennbare Unterschiede zwischen den Schichten erzeugt werden.

Der generelle Schichtenaufbau gliederte sich wie folgt (siehe Abbildung 16 und 17):

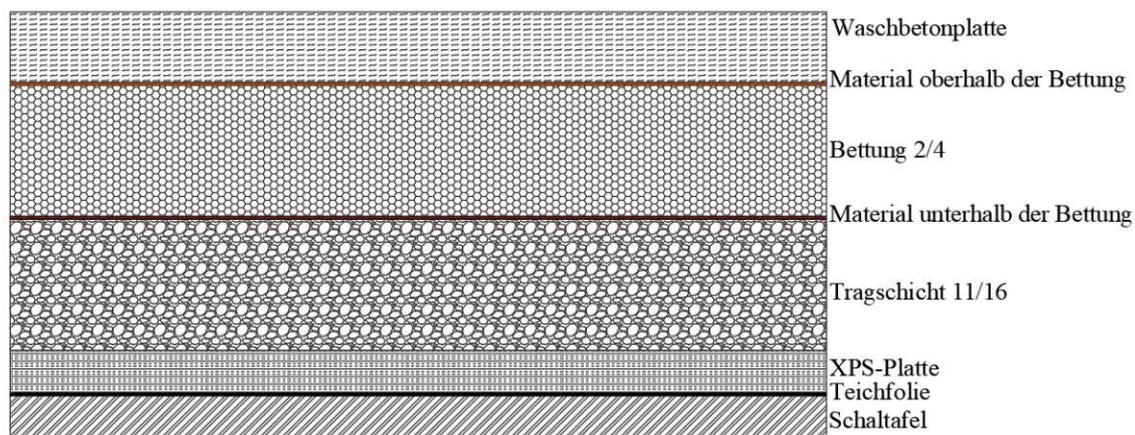


Abbildung 16: Genereller Querschnitt des Versuchsaufbaus vom ersten Messtag

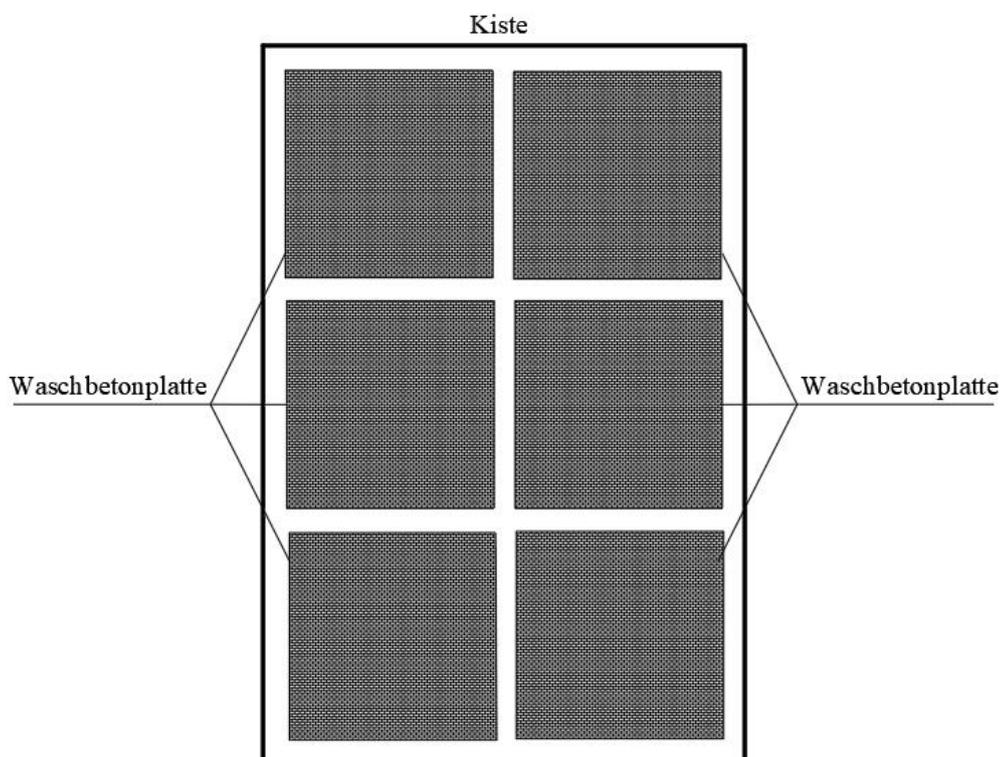


Abbildung 17: Anordnung der Waschbetonplatten am ersten Messtag

In die Kiste wurde zum Abdecken dieser und um ein mögliches Austreten von Wasser vor allem im Falle des feuchten Aufbaus zu verhindern, eine schwarze Teichfolie als Unterlage eingelegt. Auf diese Teichfolie wurden dann zurechtgeschnittene XPS-Platten platziert, sodass die Kiste komplett damit ausgelegt war (siehe Abbildung 18). Diese XPS-Platten dienen zur Herstellung eines ebenen Untergrundes beziehungsweise einer ebenen Oberfläche. Somit wurde gewährleistet, dass der gesamte Aufbau auf einer geraden und ebenen Startfläche aufbaut.



Abbildung 18: Kiste mit Folie und XPS-Platten ausgelegt

In die Kiste mit den trockenen Aufbauten wurde dann eine 4 cm dicke Schotterschicht eingebaut, die eine Woche vor dem Einbau zum Trocknen an der frischen Luft in Wannen gefüllt wurde und dann bei normaler Raumtemperatur zur Lufttrocknung stehen gelassen wurde. Der gewählte Schotter war ein 11/16 Gesteinsgemisch aus gebrochenen Körnern. Dieser Schotter diente in den Versuchen dazu, vereinfacht die obere ungebundene Tragschicht eines realen Aufbaus nachzubilden. Der eingebaute Schotter wurde dann händisch verdichtet, indem eine Person mit kleinen Schritten jede Stelle des Schotters abgegangen ist und somit mit ihrem eigenen Körpergewicht die Verdichtung ausgeübt hat. Die Ebenheit der eingebauten Schicht wurde mittels einer Wasserwaage überprüft.

In die Kiste mit den feuchten Aufbauten wurde ebenfalls eine 4 cm dicke Schotterschicht eingebaut, wobei jeweils 25 kg Gestein mit 1 Liter Wasser vor dem Einbau vermischt und dann eingefüllt wurde. Somit wurde ein Feuchtegehalt von 4 % erreicht, wobei man zusätzlich die bereits vorhandene Feuchtigkeit des Gesteins berücksichtigen muss. Auch hier war der Schotter ein 11/16 Gesteinsgemisch aus gebrochenen Körnern.

Auf diese grobe Schotterschicht wurden dann jeweils unterschiedliche Materialien verlegt (siehe Abbildung 19), die im feuchten und trockenen Aufbau identisch waren. Die eingelegten Materialien wurden in einem vordefinierten Raster verlegt. Dies führt zu einem Längsabstand von je 5 cm und einem Querabstand von je 5,6 cm zum Rand der Kiste beziehungsweise den einzelnen Materialien zueinander. Die eingelegten Materialien hatten jeweils die Abmessungen von 50 cm x 50 cm. Folgende Einlagen wurden gewählt:

- ein Kupferblech,
- ein Kupfergitter welches aus selbstklebendem Kupferband hergestellt wurde mit je 3 cm breiten Streifen und 4 cm Gitterabstand,
- ein Lochblech aus Aluminium,
- ein Geovlies mit Glasfasergitter (Geoverbundwerkstoff bestehend aus einem mechanisch verfestigten Endlosfaservliesstoff aus 100 % Polypropylen, der mit einer Gitterstruktur aus alkalibeständigen Glasfaserfilamenten verstärkt war),
- ein dünnes Geovlies (0,9 mm) ohne Einlage (mechanisch verfestigter Endlosfaservliesstoff aus UV-stabilisiertem Polypropylen)

An die letzte freie Stelle des 3x2 Versuchsrasters wurde kein Material eingelegt.

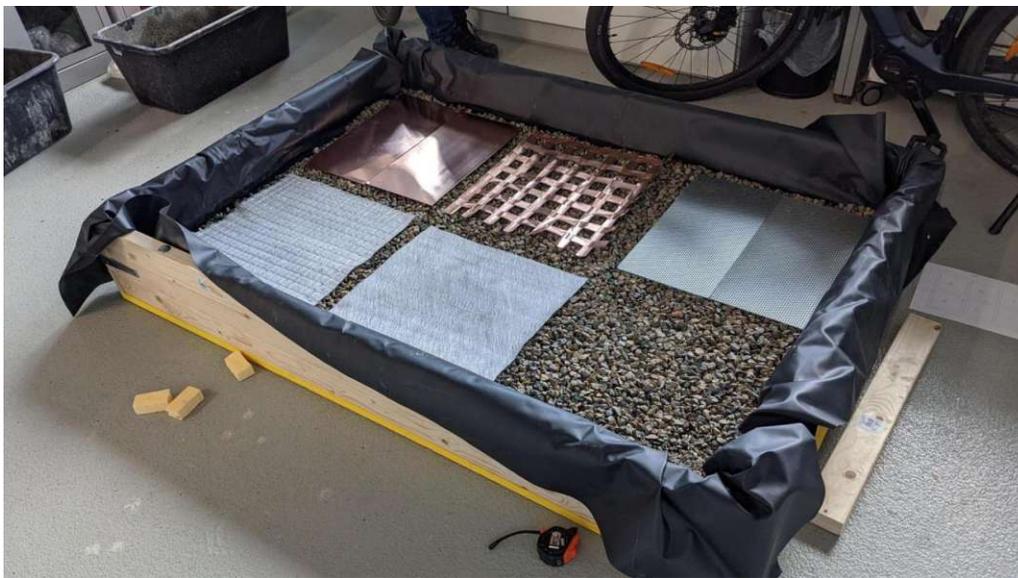


Abbildung 19: Eingelegte Materialien unterhalb der Bettung für den feuchten Aufbau

Auf diese einzelnen Materialien oberhalb der Tragschicht wurde dann ein feinerer Schotter als Bettung für die Pflasterplatten eingebaut. Dieser Schotter wurde auch mit einer Dicke von 4 cm eingebaut und wurde davor ebenso wie der grobe Schotter für den Einbau im trockenen Aufbau getrocknet. Für den feuchten Aufbau wurden erneut je 25 kg Gestein mit 1 Liter Wasser vermischt

(4 % Feuchtigkeit). Der gewählte Schotter war ein 2/4 gebrochenes Gesteinsgemisch. Dieser wurde nach Einbau ebenfalls händisch durch Begehen verdichtet. Auch hier wurde die Ebenheit der Schicht mittels einer Wasserwaage überprüft.

Auf diese feinere Schotterschicht wurde ebenfalls in einem Längsabstand von je 5 cm zum Rand und zwischen den einzelnen Materialien sowie einem Querabstand von je 5,6 cm unterschiedliches Material eingebaut (siehe Abbildung 28). In der Folge werden alle Materialien aufgelistet, die oberhalb von der Bettung eingebaut wurden. Der ursprüngliche Plan war es, alle Materialien so untereinander zu tauschen, dass jedes Material einmal an der Oberseite mit allen Materialien unterhalb der Bettung gemessen werden könnte. Jedes Material unterhalb der Bettung sollte mit allen möglichen Materialien oberhalb der Bettung kombiniert werden.

Die benutzten Materialien waren folgende:

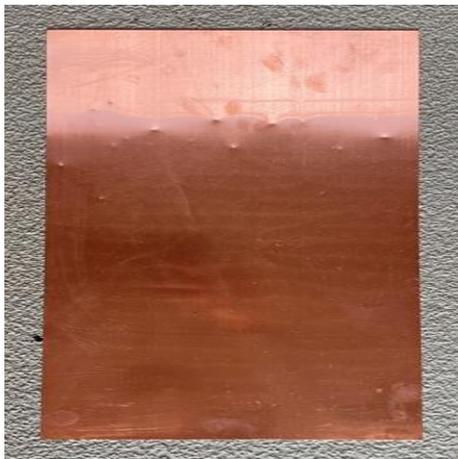


Abbildung 20: Kupferblech

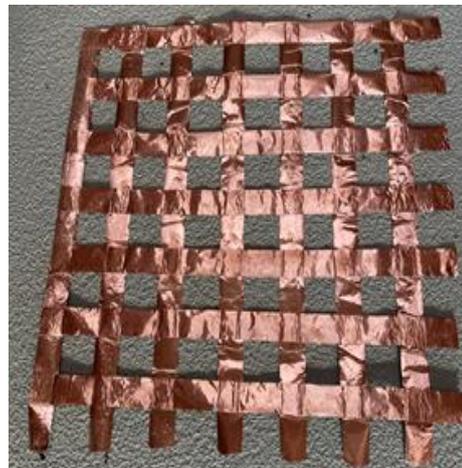


Abbildung 21: Kupfergitter

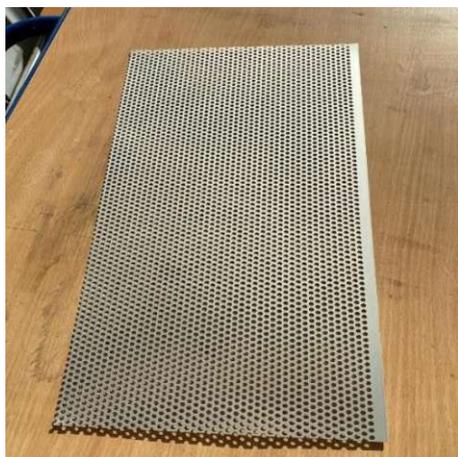


Abbildung 22: Lochblech aus Aluminium

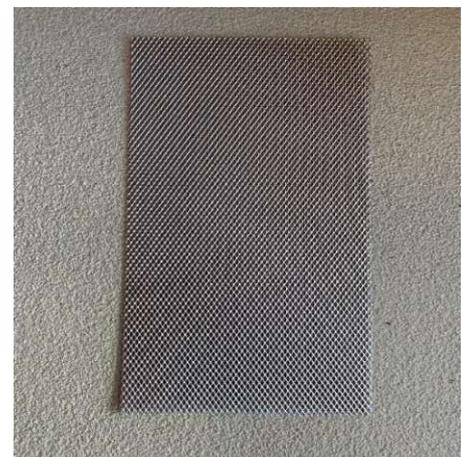


Abbildung 23: Lochblech aus Stahl

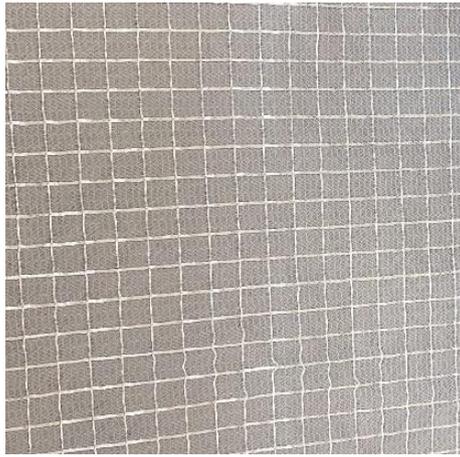


Abbildung 24: Geovlies mit Glasfasereinlage



Abbildung 25: Schwarzes Geogitter



Abbildung 26: Dünnes Geovlies ohne Einlage

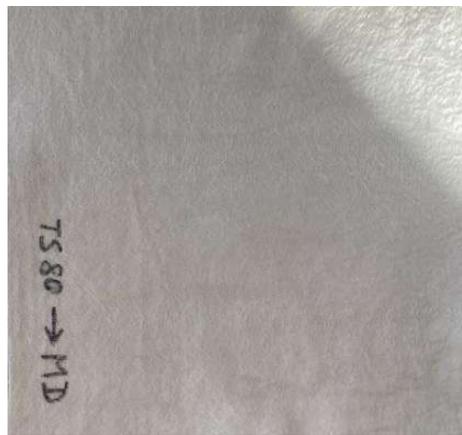


Abbildung 27: Dickes Geovlies ohne Einlage

Für den trockenen sowie für den feuchten Aufbau wurden somit verschiedene Varianten der Materialanordnung oberhalb und unterhalb der Bettung getestet. Ziel des Einsatzes dieser verschiedenen Materialien war die Feststellung der Visualisierungsmöglichkeiten mittels Georadar bei unterschiedlichen Materialien. Da die Metalle eine andere Permittivität aufweisen als die anderen Materialien (Geotextilien), wurde sich dort ein stärkerer und besser ersichtlicher Unterschied in den Bildern erwartet, die mit dem Georadar aufgezeichnet wurden. Bei der Literaturrecherche wurde festgestellt, dass Metalle viel stärker reflektieren als nichtmetallische Werkstoffe und deshalb bei der Auswertung der Rohdaten des Georadars bessere Ergebnisse liefern sollten. Zusätzlich wurden die Geovliese und das Geogitter getestet, da diese Materialien schon häufig Anwendung im Straßenbau finden. Somit würden diese, durch das bereits vorhandene Wissen zur Anwendung dieser Stoffe im klassischen Straßenbau, bei positiven Ergebnissen einen Vorteil haben.



Abbildung 28: Beispiel einer der getesteten von Materialanordnung oberhalb der Bettung

Auf diese 50 cm x 50 cm großen Flächen aus unterschiedlichen Materialien wurden dann Waschbetonplatten mit den Abmessungen von 49,7 cm x 49,7 cm x 3,7 cm verlegt. (siehe Abbildung 29)



Abbildung 29: Fertiger Versuchsaufbau

Nach jedem Versuchsdurchlauf, also nach Messung von 6 Versuchsaufbauten pro Kiste, wurden die Waschbetonplatten heruntergenommen und die Materialien im Uhrzeigersinn oberhalb der Bettung ausgetauscht. Anschließend wurden die Waschbetonplatten wieder auf den Aufbau gelegt und ein neuer Versuchsdurchlauf gestartet. Aufgrund von Zeitmangel konnten nicht alle Kombinationen getestet werden. In Tabelle 5 und Tabelle 6 werden die getesteten Kombinationen für den trockenen sowie den feuchten Aufbau mit einem X markiert.

Tabelle 5: Varianten des Versuchsaufbaus vom ersten Messtag im trockenen Aufbau

Material oberhalb der Bettung	Material unterhalb der Bettung									
	Abkürzung	Kupferblech	Kupfergitter	Lochblech Alu	Lochblech Stahl	Geovlies mit Glasfaser	Geogitter	Dünnes Geovlies	Dickes Geovlies	Kein Material
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kupferblech	A			X	X	X		X	X	X
Kupfergitter	B			X	X	X		X	X	X
Lochblech Alu	C		X		X	X	X	X		X
Geovlies mit Glasfaser	E	X			X	X	X	X		X
Dünnes Geovlies	G	X			X	X	X	X	X	
Kein Material	I				X	X	X	X	X	X

Tabelle 6: Varianten des Versuchsaufbaus vom ersten Messtag im feuchten Aufbau

Material oberhalb der Bettung	Material unterhalb der Bettung									
	Abkürzung	Kupferblech	Kupfergitter	Lochblech Alu	Lochblech Stahl	Geovlies mit Glasfaser	Geogitter	Dünnes Geovlies	Dickes Geovlies	Kein Material
	Abkürzung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kupferblech	A	X	X	X	X	X		X		
Kupfergitter	B		X	X	X	X		X		X
Lochblech Alu	C		X	X	X		X	X		X
Geovlies mit Glasfaser gitter	E		X		X		X		X	X
Dünnes Geovlies	G	X	X	X	X		X		X	
Kein Material	I	X	X		X	X	X		X	

4.3. Versuchsdurchführung

Die erste Versuchsreihe wurde am 26. November 2021 in den Räumlichkeiten des Straßenbaulabors der TU Wien durchgeführt. Die Versuche wurden, mithilfe eines der Georadare der Firma Nievelt durchgeführt. Die Durchführung fand bei normalem Innenraumklima statt. Aufgrund zeitlicher Beschränkungen konnten nicht alle Versuche mit allen Materialkombinationen durchgeführt werden, sondern nur jene, die in Tabelle 5 und Tabelle 6 angeführt sind. Trotz der Zeitknappheit gingen bei den durchgeführten Varianten keine Informationen verloren und es wurde mit der höchstmöglichen Präzision gemessen.

Das eingesetzte Georadar war ein Gerät mit einer bodengekoppelten Antenne und einer Frequenz von 1,6 GHz mit einer Aufzeichnungsrate von 0,5 Sekunden. Nachfolgend befindet sich eine Aufzählung mit den genauen Bezeichnungen der eingesetzten Geräte:

- 1,6-GHz Antenne MALA Ground Coupled Antenna-Shielded (inkl. Handschiebevorrichtung mit Weggeber)
- Mala ProEx Control Unit (RF bzw. Opt. Verbindung)
- Panasonic Toughbook Laptop (MALA-GPR-PC) mit MALA GroundVision Aufnahmesoftware (Dateiformat: *.rd3)
- Akkus

Der Ablauf der einzelnen Versuche wurde immer identisch wiederholt. Zuerst wurde das Georadar in die Mitte einer Waschbetonplatte platziert, um dort eine Messung durchzuführen. Danach wurde das Gerät an der gleichen Platte zur oberen linken Ecke verschoben und eine zweite Messung gestartet. Die Dauer einer einzelnen Messung betrug zwischen 90 und 150 Sekunden mit der angegebenen Bildaufnahmerate von 0,5 Sekunden. Nach diesen zwei Messungen pro Platte ging man zur nächsten Waschbetonplatte über und maß für den nächsten Aufbau nach dem gleichen Schema. Nachdem alle sechs Versuche, der ersten Kiste durchgeführt waren, ging man zur zweiten Kiste, mit den feuchten Aufbauten über.

In der Zwischenzeit wurde die Kiste mit dem trockenen Aufbau umgebaut, indem die Waschbetonplatten aufgehoben und die Materialien oberhalb der Bettung ausgetauscht wurden. Diese Vorgänge wurden so lange wiederholt, bis alle Versuche von beiden Kisten erledigt waren.



Abbildung 30: Für die Versuche verwendetes Georadar

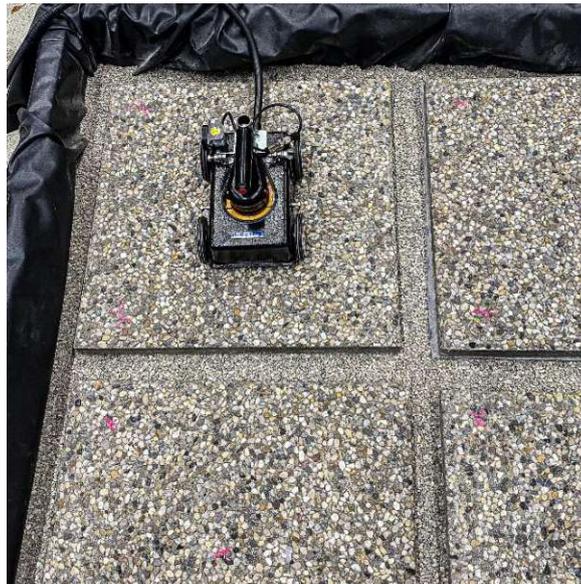


Abbildung 31: Georadar im Einsatz

Während der Versuche wurde ständig Daten mittels eines Laptops und einer CPU, wie in Abbildung 32 zu sehen ist, aufgezeichnet. Diese Rohdaten lieferten schon erste visuelle Querschnittsbilder, die jedoch noch nicht sehr aussagekräftig waren. Diese Daten mussten noch von Fachpersonal mittels spezieller Software nachbearbeitet werden, um aussagekräftigere Bilder zu erhalten.



Abbildung 32: Datenerfassung während der Versuche mittels Laptops mit Aufnahmesoftware und Control Unit

Nach Abschluss aller Messungen wurden zur Feuchtigkeitsbestimmung Proben vom trockenen sowie vom feuchten Bettungs- und Tragschichtmaterial entnommen. Dies wird in Kapitel 4.4 näher beschrieben.

4.4. Trocknung/Feuchtigkeitsbestimmung

Zur Bestimmung der Feuchtigkeit der einzelnen Gesteinskörnungen vom feuchten und trockenen Aufbau, wurden jeweils zwei Proben pro Körnung an verschiedenen Stellen des Versuchsaufbaus entnommen.

Diese Proben, in diesem Fall acht, wurden in einem Trocknungsschrank (siehe Abbildung 33 und 34) bei 120 Grad Celsius für 68 Stunden getrocknet. Vor dem Trocknen wurde jede Probe gewogen und das Gewicht zur späteren Feuchtigkeitsbestimmung notiert. Nach dem Trocknen wurden die Proben wieder abgewogen. Um sicherzugehen, dass eine Probe vollständig getrocknet ist, ist es üblich, die Proben während des Trocknungsvorganges mehrmals zu wiegen, um sicherzustellen, dass die Probe ab einem gewissen Zeitpunkt keinen Massenunterschied zur vorigen Wiegung mehr aufweist und somit vollständig getrocknet ist. Auf diesen Vorgang wurde hier verzichtet. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Proben nach der langen Trocknungsdauer komplett trocken waren.



Abbildung 33: Verwendeter Trockenschrank



Abbildung 34: Mit Proben befüllter Trockenschrank

Zur Bestimmung der Feuchtigkeit der jeweiligen Probe wird wie folgt vorgegangen:

$$m_f = m_{f0} - m_0 \quad (12)$$

$$m_t = m_{t0} - m_0 \quad (13)$$

$$u = \frac{m_f - m_t}{m_t} * 100\% \quad (14)$$

Wobei:

u = Feuchtigkeitsgehalt [35]

m₀ = die Masse des Probenbehälters [35]

m_{f0} = die Masse der feuchten Probe mit Probenbehälter [35]

m_{t0} = die Masse der trocknen Probe mit Probenbehälter [35]

m_f = die Masse der feuchten Probe ohne Probenbehälter [35]

m_t = die Masse der trocknen Probe ohne Probenbehälter [g]

Probe 1: Gesteinsprobe 2/4 aus dem trockenen Aufbau:

$$m_0 = 1282,1 \text{ g}$$

$$m_f = 1238,0 \text{ g}$$

$$m_t = 1232,6 \text{ g}$$

$$u = 0,438 \%$$

Probe 2: Gesteinsprobe 2/4 aus dem trockenen Aufbau:

$$m_0 = 1152,2 \text{ g}$$

$$m_f = 1210,3 \text{ g}$$

$$m_t = 1205,8 \text{ g}$$

$$u = 0,373 \%$$

Mittelwert aus 1 und 2: $u = 0,406 \%$

Probe 3: Gesteinsprobe 11/16 aus dem trockenen Aufbau:

$$m_0 = 1133,1 \text{ g}$$

$$m_f = 1340,8 \text{ g}$$

$$m_t = 1335,7 \text{ g}$$

$$u = 0,381 \%$$

Probe 4: Gesteinsprobe 11/16 aus dem trockenen Aufbau:

$$m_0 = 1187,1 \text{ g}$$

$$m_f = 1130,8 \text{ g}$$

$$m_t = 1126,8 \text{ g}$$

$$u = 0,355 \%$$

Mittelwert aus 3 und 4: $u = 0,368 \%$

Probe 5: Gesteinsprobe 2/4 aus dem feuchten Aufbau:

$$m_0 = 1134,9 \text{ g}$$

$$m_f = 1080,9 \text{ g}$$

$$m_t = 1048,7 \text{ g}$$

$$u = 3,07 \%$$

Probe 6: Gesteinsprobe 2/4 aus dem feuchten Aufbau:

$$m_0 = 1135,3 \text{ g}$$

$$m_f = 1178,0 \text{ g}$$

$$m_t = 1148,1 \text{ g}$$

$$u = 2,60 \%$$

Mittelwert aus 5 und 6: $u = 2,835 \%$

Probe 7: Gesteinsprobe 11/16 aus dem feuchten Aufbau:

$$m_0 = 1133,5 \text{ g}$$

$$m_f = 1471,9 \text{ g}$$

$$m_t = 1440,8 \text{ g}$$

$$u = 2,16 \%$$

Probe 8: Gesteinsprobe 11/16 aus dem feuchten Aufbau:

$$m_0 = 1138,5 \text{ g}$$

$$m_f = 1360,5 \text{ g}$$

$$m_t = 1335,6 \text{ g}$$

$$u = 1,86 \%$$

Mittelwert aus 7 und 8: $u = 2,01 \%$

Die im feuchten Aufbau hinzugefügte Feuchtigkeit von 4 % ist in den einzelnen Schichten nicht ersichtlich. Das Gestein kann die hinzugefügten 4 % Feuchtigkeit nicht aufnehmen. Bei Folgeversuchen sollte eine geringere Feuchtigkeit angestrebt werden.

4.5 Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse des ersten Versuchstages vom 26. November 2021 wurde von der Firma Nievelt und deren Fachpersonal durchgeführt. Mittels einer Auswertesoftware wurden die Rohdaten eingelesen und durch mehrere Filtersetzungen wurde versucht ein klares Bild zu erzeugen, welches ein brauchbares Ergebnis des Versuches liefert.

Zu diesen Filtern zählen:

- Amplitude Level Correction: ein durchschnittlicher Amplitudenpegel wird berechnet und das Signal gefiltert
- Background Removal: das Hintergrundrauschen wird reduziert/unterdrückt
- Signal Amplification: Signalverstärkung und Streuungsdämpfung
- Zusätzliche Filtereinstellungen: Farbanpassungen, Kontrasteinstellungen

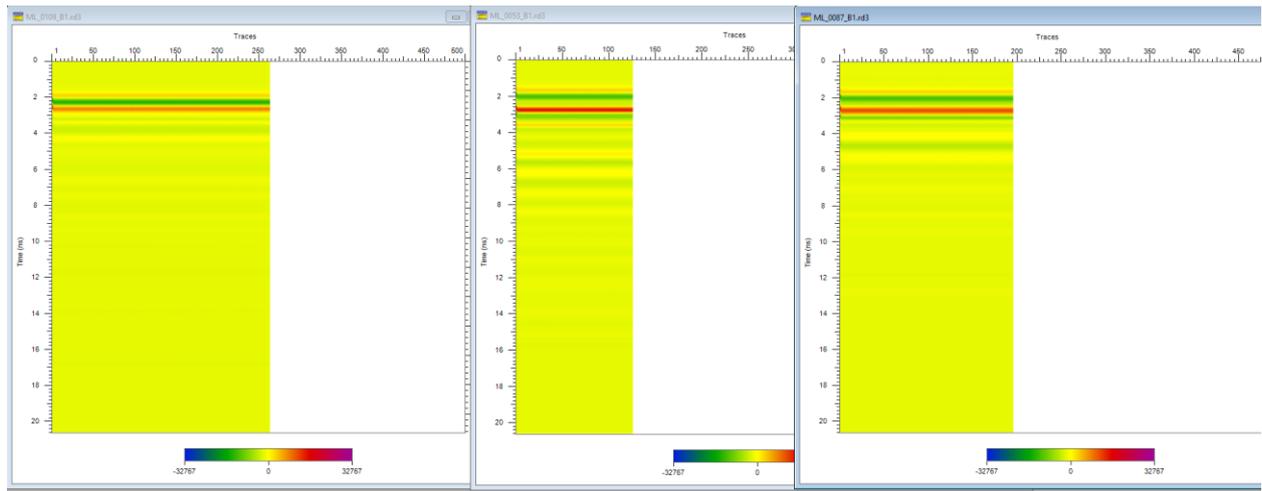


Abbildung 35: Rohdaten vom ersten Messtag

In Abbildung 35 sieht man einen Ausschnitt der Rohdaten die während der Messung fortlaufend aufgenommen wurden. Im linken Teil der Abbildung ist eine Rohdatei zu sehen, bei der oberhalb der Bettung ein Kupferblech und unterhalb der Bettung ein Geovlies eingebaut wurde. In der Mitte ist ein Aufbau mit keinem Material oberhalb der Bettung und einem Kupferblech unterhalb der Bettung zu sehen. Im rechten Teilbild ist ein Aufbau ohne Material oberhalb und unterhalb der Bettung zu sehen, der in diesem Fall als Referenzaufbau gelten sollte.

Diese Rohdaten wurden nach Auswertung mittels Software folgendermaßen interpretiert: Wie zu sehen ist, sind alle Teilbilder grundsätzlich sehr ähnlich vom farblichen Verlauf, sowie Aufbau des Bildes. Das Auswertepersonal versuchte die markanten roten, gelben und grünen Linien in den Rohdaten zu interpretieren. Jedoch konnten in der vorhandenen Tiefenlage keine Informationen auf eine bestimmte Schicht oder ein bestimmtes Material gefunden werden.

Die Ähnlichkeit der Messungen kommt wahrscheinlich daher, dass der Schichtaufbau grundsätzlich immer der gleiche war, mit Ausnahme der wechselnden Schichten oberhalb und unterhalb der Bettung sowie einem feuchten und einem trockenen Aufbau.

Die jeweils eingesetzten Materialien mit nur wenigen Millimetern Stärke sind für eine eindeutige Signaländerung möglicherweise zu dünn. Die Feuchtigkeit spielt vermutlich nur eine untergeordnete Rolle. Der wirkliche Einfluss der Feuchtigkeit kann jedoch nicht abgeschätzt werden, da die Auswertung keine aussagekräftigen Ergebnisse liefert.

Die Metallplatten sollten größtenteils komplett reflektierend sein, was bedeuten würde, dass unterhalb einer Metallplatte kein Bild mehr vorhanden sein dürfte. Es kommt jedoch häufig trotzdem zu Anzeigen in den Rohdaten unterhalb einer Metallplatte, was sich darauf zurückführen

lässt, dass dort Spiegelungen des oberen Bildes entstehen und diese einen potentiellen darunterliegenden Aufbau vortäuschen können.

4.6. Verbesserungsmöglichkeiten

Während der Vorbereitung sowie der Durchführung der Versuche sind einige Optimierungsmöglichkeiten, beziehungsweise nicht optimale Vorgänge aufgefallen.

Beim Einbau des Schotters ist aufgefallen, dass die für mehrere Tage in Wannen an der Luft getrockneten Schottermengen nicht gleichmäßig trocken waren und somit kein homogener Feuchtigkeitszustand im trockenen Gestein herrschte. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die feuchten Gesteinsproben nicht gleichmäßig feucht waren. Dies war bedingt durch den Vorgang des Befeuchtens, bei dem das Gestein in einer Wanne händisch durchmischt wurde und somit nicht überall die gleiche Feuchte ans Gestein verteilt werden konnte. Zur Verbesserung der Trocknung des Gesteinskörnungen wäre es möglich das Gestein auf einer größeren Fläche auszubreiten, damit die Steine nicht zu dicht gelagert sind und zusätzlich dazu könnten diese regelmäßig durchmischt werden, sodass das Gestein mit der kompletten Oberfläche an der Luft trocknen kann. Zur besseren Befeuchtung des Gesteins wäre der Einsatz eines Betonmischers denkbar, der sich kontinuierlich dreht und so die Feuchtigkeit besser und gleichmäßiger verteilt.

Zusätzlich wurde beim Abbau des feuchten Versuches festgestellt, dass sich auf der Teichfolie eine gewisse Menge an Wasser gesammelt hat (siehe Abbildung 36), die somit nicht am Gestein gehaftet hat und „überschüssig“ war. Die 4 % an Wasser, die hinzugefügt wurden, waren somit zu viel und konnten nicht komplett vom Gestein aufgenommen werden. Die Verwendung von weniger Wasser bei der Herstellung des feuchten Aufbaus wäre ein Lösungsvorschlag für dieses Problem.



Abbildung 36: Wasseransammlung am feuchten Versuchsaufbau

Ein weiterer verbesserungsfähiger Aspekt ist die Verdichtung. Es kam nicht zu einer optimalen Verdichtung der jeweiligen Schichten, da diese nur händisch und mit Körpergewicht verdichtet wurden. Es besteht die Möglichkeit mit maschineller Verdichtung zu einer optimaleren Verdichtung zu kommen.

Des Weiteren kam es zu Ungenauigkeiten bei der Auswertung der Daten des Georadars. Einerseits gibt es die Möglichkeit, die Daten mithilfe einer Software automatisch auswerten zu lassen, was aber aufgrund des aktuellen Stands der Technik dieser Software keine genauen Ergebnisse liefert und somit bei der Schichtdickenbestimmung nur eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreicht werden kann. Andererseits kann die Auswertung in dieser Software auch manuell erfolgen, wobei hier die Genauigkeit der Ergebnisse jeweils von der Interpretation und den Fähigkeiten der auszuwertenden Person abhängt, wobei die Genauigkeit auch nicht sehr hoch ist.

4.7 Fazit Messtag 1

Die Punktmessung (zeitabhängige Messung), wie sie am 1. Versuchstag eingesetzt wurde, eignet sich für den benutzten Versuchsaufbau nicht. Es lässt sich aus den Rohdaten und aus den bearbeiteten Bildern kein brauchbares Ergebnis bezüglich Schichtdicken und Unterscheidung der eingelegten Materialien finden. Es ist grundsätzlich nicht möglich überhaupt ein Material im Aufbau aus den Radargrammen zu erkennen.

Im Radargramm sind Änderungen im Schichtaufbau ausschlaggebend, um eine gute Aussage über Schichtdicken und Unterschiede im Aufbau treffen zu können. Dies wird durch das „Überfahren“ verschiedenartiger Aufbauten ermöglicht.

In Kapitel 5 wird der Versuch mittels dynamischen, weggesteuerten Einsatzes des Georadars beschrieben und ausgewertet.

5. MESSTAG 2: WEGGESTEUERTER VERSUCH

In Kapitel 5 geht es um den zweiten Laborversuch, der auch mithilfe eines Georadars durchgeführt wurde, diesmal jedoch mittels eines wegabhängigen Versuches und einem leicht modifizierten Versuchsaufbau. Im Allgemeinen, erweist sich die wegabhängige Messung als präziser im Vergleich zur zeitabhängigen Messung. Das Georadar kann bei dieser Methode Änderungen im Aufbau besser erkennen und darstellen. Zusätzlich dazu, findet die wegabhängige Untersuchung heutzutage häufiger Anwendung in der Praxis.

5.1 Vorbereitung des Grundgerüsts

Zur Durchführung der zweiten Versuchsreihe wurde dasselbe Grundgerüst (Holzkiste) wie am ersten Messtag benutzt. Zur Beschreibung der Kiste und den Abmessungen siehe Kapitel 4.1.

5.2 Material/Versuchsaufbau

Es wurde diesmal auf einen feuchten Aufbau verzichtet, sodass zwei trockene Aufbauten hergestellt wurden. Somit konnten am zweiten Messtag beide Kisten für einen trockenen Aufbau verwendet werden.

Der generelle Aufbau des Versuches, also Waschbetonplatte auf Bettung und Tragschicht war der gleiche wie am ersten Messtag. Am zweiten Messtag stellten je zwei Waschbetonplatten einen Messaufbau dar, wobei unter jeder Waschbetonplatte versetzt oberhalb sowie unterhalb der Bettung auf einer Breite von 25 cm ein Reflektor eingebaut war (siehe Abbildung 37 und 38).

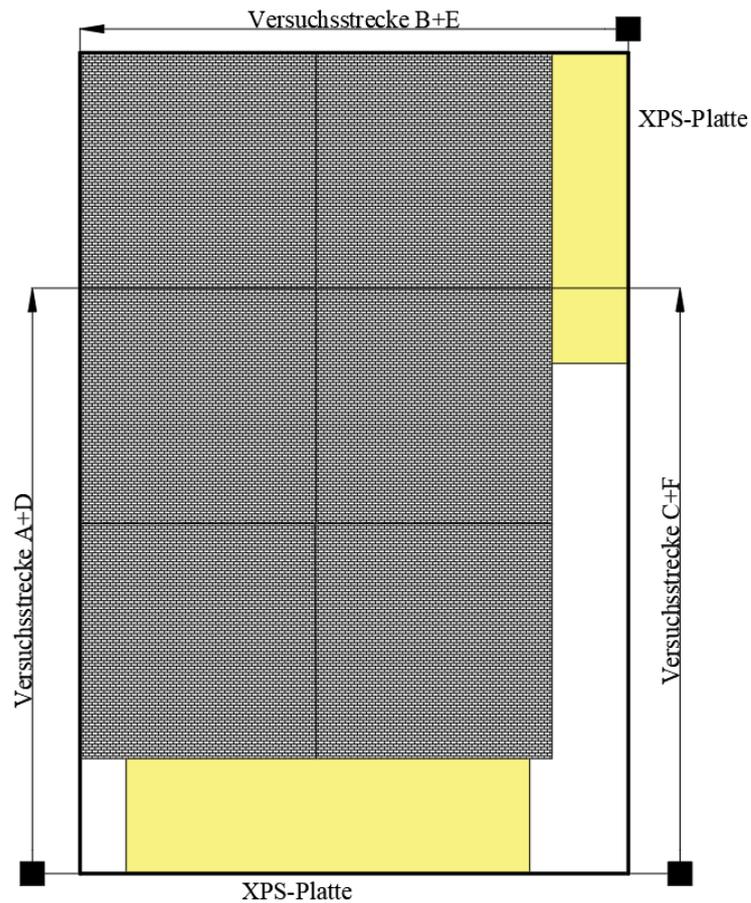


Abbildung 37: Versuchsstrecken und Richtungen der Durchführung

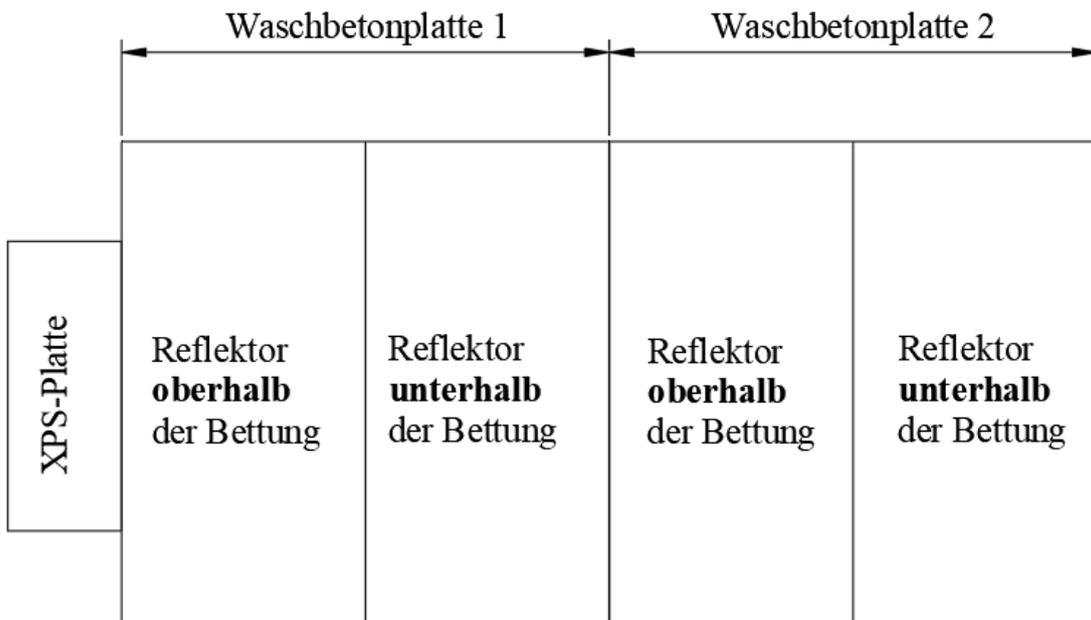


Abbildung 38: Schematische Anordnung der eingelegten Materialien in Draufsicht

In beide Kisten wurden die Teichfolie sowie die XPS-Platten auf der Teichfolie eingelegt. Auf die XPS-Platten wurde die gröbere Gesteinskörnung zur Herstellung einer vereinfachten Tragschicht verlegt. Die Tragschicht hatte wie zuvor eine Schichtdicke von 4 cm. Auf diese vereinfachte Tragschicht wurden wieder die zu untersuchenden Materialien eingelegt (siehe Abbildung 40). Am zweiten Messtag wurden diese jedoch jeweils auf eine Breite von 25 cm eingelegt, dann kam ein Abstand von 25 cm ohne Reflektor, daran anschließend nochmals über eine Breite von 25 cm des gleichen Material und dann wieder 25 cm ohne eingebautem Reflektor.

In Abbildung 39 ist die schematische Anordnung der Materialien im Querschnitt zu sehen. Der Aufbau gliedert sich wie folgt von Schicht zu Schicht von oben nach unten:

- Waschbetonplatte (3,7 cm)
- Reflektor oberhalb der Bettung (orange)
- Bettung (4 cm)
- Reflektor unterhalb der Bettung (rot)
- Tragschicht (4 cm)
- XPS-Platte
- Teichfolie
- Schalttafel

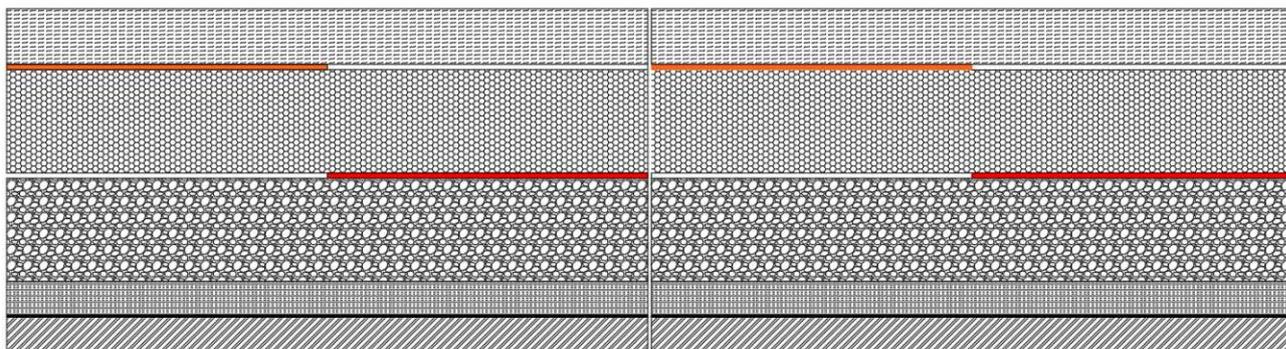


Abbildung 39: Schematische Anordnung der eingelegten Materialien im Querschnitt



Abbildung 40: Eingelegtes Material unterhalb der Bettung

Auf die Tragschicht und die eingelegten Materialien folgte die Bettung, die erneut mit 4 cm Schichtdicke eingebaut wurde. Oberhalb der Bettung wurde dann wieder das zu untersuchende Material auf einer Breite von 25 cm eingelegt, jedoch versetzt zu den unterhalb der Bettung liegenden Materialien (siehe Abbildung 41). So ergibt sich ein versetztes Muster von jeweils einem Reflektor oberhalb der Bettung und einem unterhalb der Bettung.



Abbildung 41: Eingelegtes Material oberhalb der Bettung

Auf diese Materialien sowie die Bettung wurden dann dieselben Waschbetonplatten verlegt wie beim ersten Messtag.

Die eingelegten Materialien waren folgende:

- Kupferblech
- Kupfergitter
- Lochblech aus Aluminium
- Lochblech aus Stahl
- Geovlies mit Glasfasereinlage

Die Materialanordnung der einzelnen Messungen ist in Tabelle 7 dargestellt.

Am zweiten Messtag wurden hauptsächlich metallische Einlagen betrachtet, da diese laut Literaturrecherche die besten Reflexionseigenschaften haben und das Fachpersonal der Firma Nievelt auch davon ausging, dass man höchstens mit Metallen ein aussagekräftiges Ergebnis erzeugen könnte.



Abbildung 42: Fertiger Versuchsaufbau

Wie in Abbildung 42 ersichtlich, wurde vor den jeweiligen Aufbau eine 4 cm dicke XPS-Platte eingelegt. Diese XPS-Platte diente dazu, einen besseren Übergang am Versuchsanfang zu sehen. Die XPS-Platte wird in den Radargrammen deutlich anders dargestellt als der generelle Aufbau. Dadurch wird die Signaländerung von der XPS-Platte zum Aufbau viel deutlicher und besser erkennbar. Zusätzlich dient es in der späteren Auswertung als Referenz, um den Beginn des Versuches definieren zu können. Außerdem ist am Anfang der Messung das Signal noch nicht auf voller Signalstärke und diese kurze Vorlaufrecke dient dazu, das Signal zu stabilisieren und somit eine falsche Anzeige direkt zu Versuchsbeginn zu vermeiden.

Tabelle 7: Auflistung aller getesteten Materialanordnungen

Versuchsnummer	Erstes Material oberhalb der Bettung	Erstes Material unterhalb der Bettung	Zweites Material oberhalb der Bettung	Zweites Material unterhalb der Bettung
A 1	Kupferblech	Kupferblech	Kupferblech	Kupferblech
B 1	Kupfergitter	Kupfergitter	Kupfergitter	Kupfergitter
C 1	Lochblech Stahl	Lochblech Stahl	Lochblech Stahl	Lochblech Stahl
D 1	Lochblech Aluminium	Lochblech Aluminium	Lochblech Aluminium	Lochblech Aluminium
E 1	Geogitter mit Glasfasereinlage	Geogitter mit Glasfasereinlage	Geogitter mit Glasfasereinlage	Geogitter mit Glasfasereinlage
F 1	Kein Material	Kein Material	Kein Material	Kein Material
A 2	Kupferblech	Lochblech Stahl	Kupferblech	Lochblech Stahl
C 2	Lochblech Stahl	Kupferblech	Lochblech Stahl	Kupferblech
C 3	Lochblech Stahl	Lochblech Stahl	Kupferblech	Lochblech Stahl

Für die Versuchsstrecken B und E (siehe Abbildung 37) ist anzumerken, dass dort in Fahrtrichtung der Messung zuerst ein Material unterhalb der Bettung eingelegt war und danach wieder abwechselnd oberhalb und unterhalb. Bei allen anderen Versuchsstrecken wurde zu Beginn der Versuchsstrecke das untersuchte Material oberhalb der Bettung eingelegt und dann abwechselnd unterhalb und oberhalb.

5.3 Versuchsdurchführung

Der zweite Versuch wurde wieder in den Räumlichkeiten des Straßenbaulabors der TU Wien durchgeführt. Die Versuche wurden mithilfe eines der Georadare der Firma Nievelt durchgeführt. Die Versuche fanden bei normalem Innenraumklima am 16.02.2022 statt.

Zur Durchführung dieser Versuche wurde das selbe Georadar benutzt wie in der ersten Versuchsreihe mit denselben dazugehörigen Geräten. (siehe Kapitel 4.3)

Dieses Mal wurden die Versuche mit einem dynamischen, weggesteuerten Aufnahmeverfahren des Georadars durchgeführt. Dieses Aufnahmeverfahren liefert im Allgemeinen für eine Anwendung wie in diesem Versuchsaufbau eine höhere Präzision. Durch das Überfahren des Versuchsaufbaus werden die Unterschiede im Aufbau deutlicher dargestellt. Es kommt zu einer kontinuierlichen Aufnahme des Aufbaus über eine bestimmte Strecke (siehe Abbildung 37). Während der Überfahrt werden die Änderungen im Aufbau sofort erkannt und in den Rohdaten dargestellt. Die Auflösungsrate des Georadars konnte manuell eingegeben werden und wurde mit einem Wert von 0,5 cm festgelegt. Somit zeichnet das Georadar während der Überfahrt alle 0,5 cm ein Bild auf. Diese relativ niedrige Auflösungsrate sorgte dafür, dass die Messung viel detaillierter war als bei Anwendung einer höheren Aufnahmezeit. Damit geht die Fahrgeschwindigkeit des Georadars während der Durchführung einher. Je höher die gewünschte Auflösungsrate, desto langsamer muss das Georadar über den Aufbau bewegt werden. Das Georadar wurde manuell mit einer sehr geringen Geschwindigkeit über die jeweilige Versuchsstrecke geschoben. Die genaue Geschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden, jedoch zeigte der angeschlossene Laptop mittels farblicher Anzeige, ob man sich im optimalen Geschwindigkeitsbereich befand. Würde diese optimale Geschwindigkeit überschritten werden, so würde der Detailgrad und die Auflösung des Radargramms darunter leiden.

Während der Messung misst das Georadar zusätzlich die zurückgelegte Strecke, somit kann bei der Auswertung ein Rückschluss darauf getroffen werden, wo welche Schichten/Materialien im Versuchsaufbau waren. Während der Messung muss nur darauf geachtet werden, dass die Räder des Georadars ständigen Kontakt mit dem Untergrund haben und die Räder nicht durchdrehen, da durch die Radumdrehung ansonsten eine zusätzliche Strecke aufgezeichnet werden würde.

Während der Überfahrt der Waschbetonplatten wurden jeweils die Übergänge zwischen XPS-Platte und Waschbetonplatte beziehungsweise zwischen den beiden Waschbetonplatten mittels Tastendruckes am Laptop markiert, um dies später auch in der Auswertung berücksichtigen zu können.

Das Georadar wurde jeweils auf der XPS-Platte platziert und in Richtung der Messstrecke (siehe Abbildung 43) langsam mit der Hand nach vorne geschoben bis hin zum Ende der Versuchsstrecke.



Abbildung 43: Weggesteuerter Versuch mittels Georadar

Schon während der Versuche lieferte das am Laptop angezeigte Bild der Rohdaten vielversprechende Ergebnisse, die im Anschluss noch weiter ausgewertet wurden.

5.4 Auswertung

Die Auswertung der Versuche vom 16.02.2022 wurden wieder von der Firma Nievelt und deren Fachpersonal durchgeführt.

Es wurde die gleiche Auswertesoftware verwendet, um die Rohdaten zu bearbeiten. Zusätzlich dazu wurden wieder die gleichen Filter benutzt wie schon in Kapitel 4.5 beschrieben.

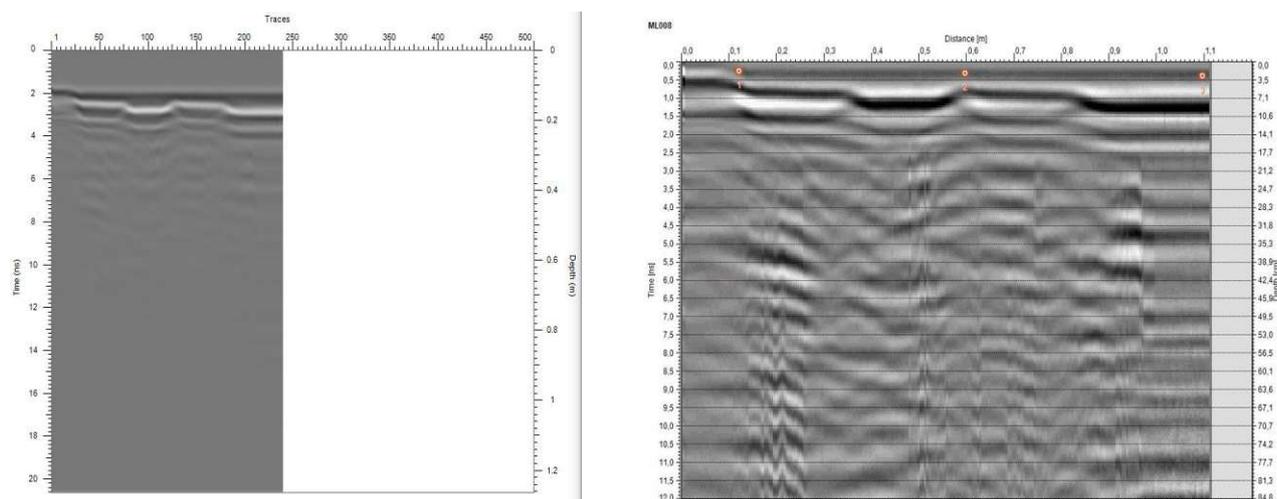


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Rohdaten (links) und dem bearbeiteten Radargramm (rechts)

In Abbildung 44 ist im linken Teilbild eine Abbildung der Rohdaten zu sehen, wie sie während des Versuches aufgezeichnet und zeitgleich am vorhandenen Laptop angezeigt wurde. Rechts ist ein bearbeitetes Bild dargestellt, an dem die Filter angewendet wurden. Die Bilder unterscheiden sich optisch schon dadurch, dass sie mit unterschiedlichen Programmen geöffnet und dargestellt werden. Des Weiteren sind die Achsen unterschiedlich. Im linken Bild stellt die horizontale Achse die sogenannten „Traces“, also die Anzahl an Bildern, die aufgenommen wurden dar. Die linke vertikale Achse stellt die Laufzeit in Nanosekunden dar und die rechte die Tiefe in Meter. Im rechten Bild ist die horizontale Achse die aufgenommene Strecke und die vertikale Achse stellt links die Laufzeit in Nanosekunden und rechts die Tiefe in cm dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die horizontalen, dicken, schwarzen Linien, die das jeweilige metallische Material oberhalb und unterhalb der Bettung darstellen, viel deutlicher im bearbeiteten Bild zu erkennen sind. Zusätzlich wurden im rechten Teilbild die orangefenen Marker eingefügt, die jeweils den Übergang von der XPS-Platte zur Waschbetonplatte sowie die Fuge zwischen zwei Waschbetonplatten zur besseren Orientierung anzeigen.

Im Versuch E1 und F1 (siehe Tabelle 7) kam es zu sehr ähnlichen Resultaten während der Auswertung und Bearbeitung der Rohdaten. Es ist keine Signalabweichung ersichtlich. Der

Übergang von der XPS-Platte zur Waschbetonplatte ist jedoch ausgeprägt und als Diffraktionshyperbel sichtbar. Zusätzlich dazu sind die Übergänge zwischen den Waschbetonplatten gut erkennbar. Die relativ starke Ausprägung der Hyperbel könnte dadurch erklärbar sein, da es kein anderes angrenzendes Material gibt und das Signal nicht weiter beeinflusst wird.

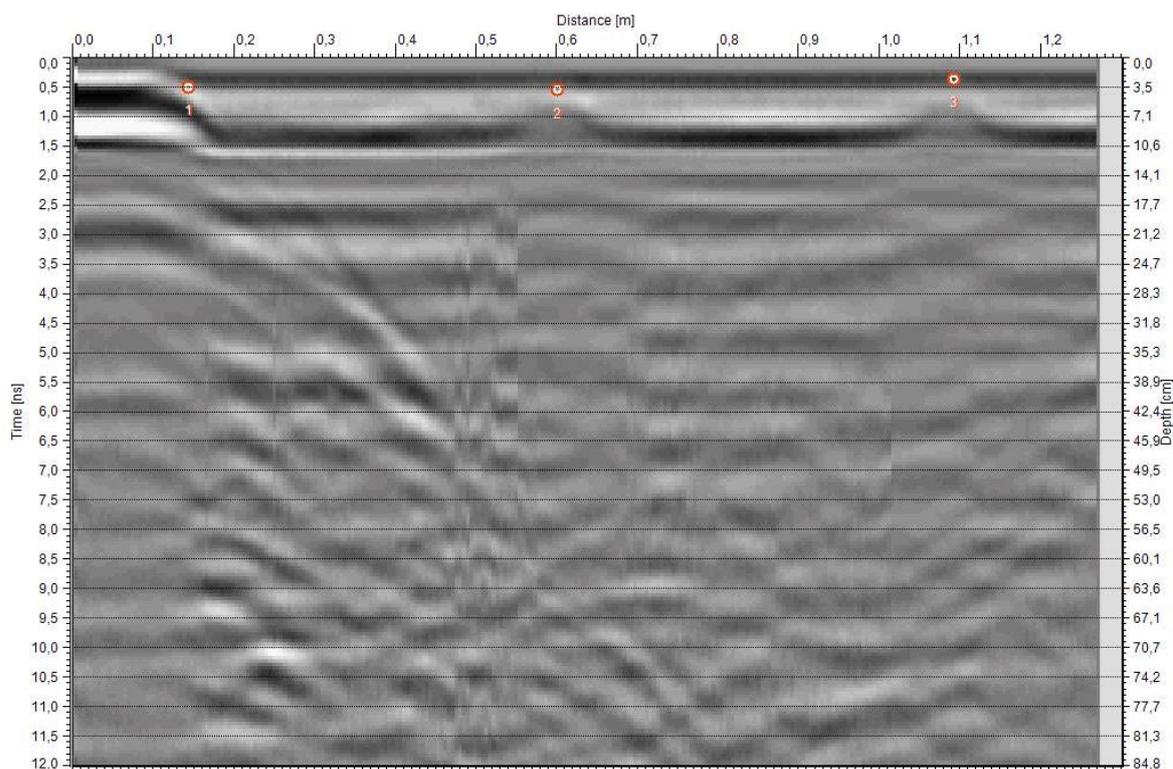


Abbildung 45: Radargramm des Versuches F1

Die Versuche, bei denen Metalle als Einlage verwendet wurden (A1, C1, D1, A2, C2, C3), sind bei der Auswertung auch als relativ identisch anzusehen. Die Signalabweichungen zu den Aufbauten sind eindeutig erkennbar und dem Aufbau zuordenbar. Die Schichtgrenzen der Materialien sind in den Radargrammen sehr gut sichtbar. Die unterschiedlichen Tiefenlagen der Materialien sind gut erkennbar.

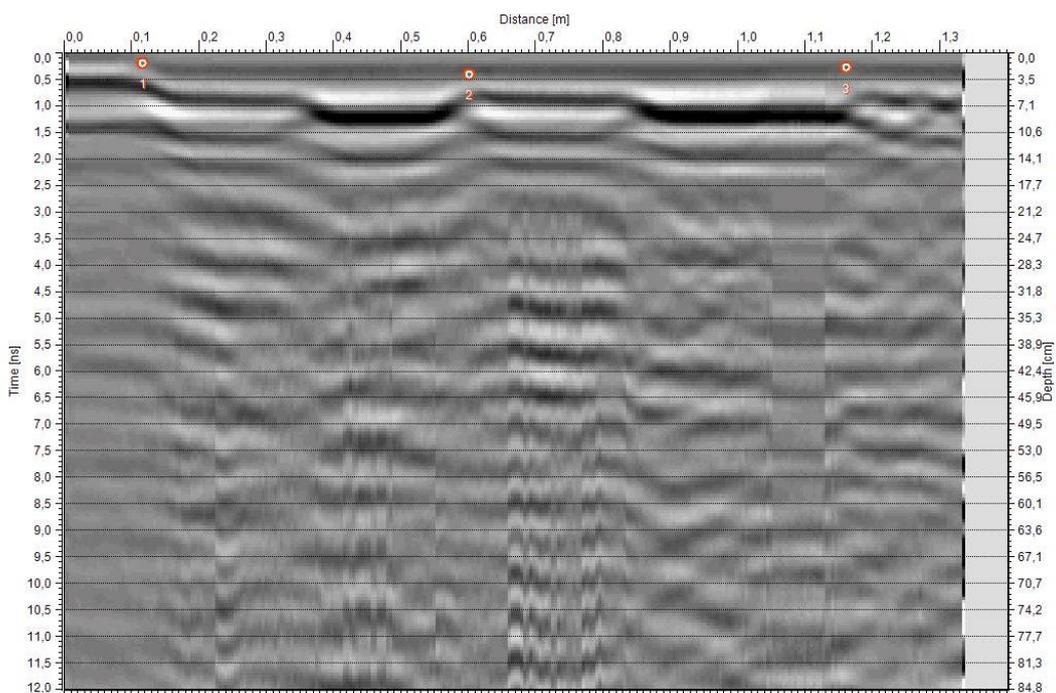


Abbildung 46: Radargramm des Versuches C1

Im Versuch B1, in dem das Kupfergitter zum Einsatz kam, war auch eine Signalabweichung des Radarsignals sichtbar und dem Aufbau zuordenbar. Wie in Abbildung 47 zu sehen, kann man bei einer Distanz von ungefähr 0,3 m bis 0,55 m, also dort wo das Kupfergitter oben lag, sogar die Maschenweite des Kupfergitters erkennen.

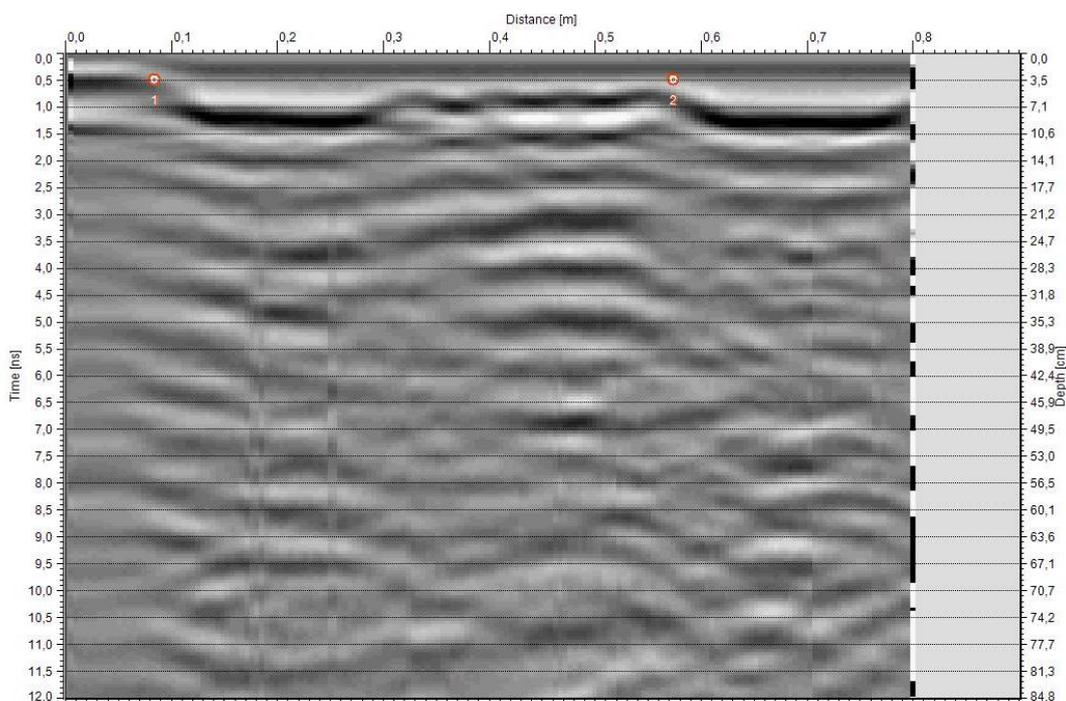


Abbildung 47: Radargramm des Versuches B1

Die Radargramme zu allen anderen Versuchen werden im Anhang dargestellt.

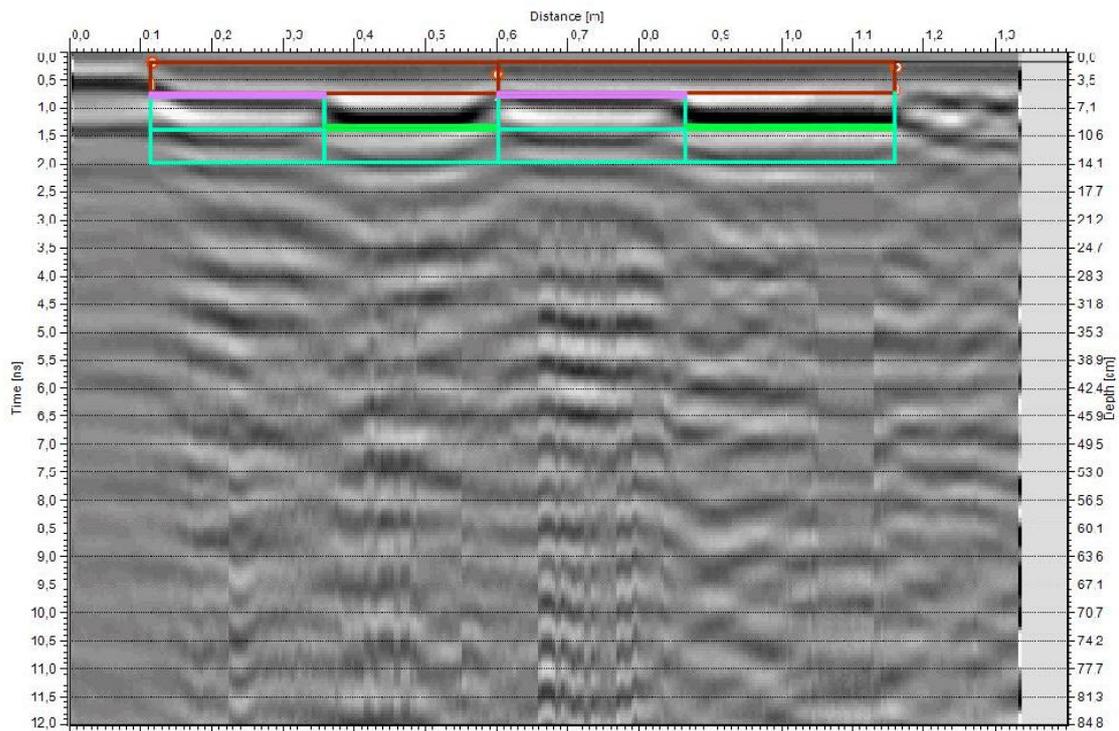


Abbildung 48: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches C1

Nach der Auswertung der Rohdaten und dem Erhalt der bearbeiteten Radargramme wurde versucht, wie in Abbildung 48 ersichtlich, die einzelnen Schichten des Aufbaus einzuzeichnen. Es ist klar erkennbar, dass die Schichten anhand der rechten vertikalen Achse von der Schichtdicke her relativ gut mit dem realen Aufbau übereinstimmen. Vor allem die metallischen Einlagen (lila und grün) lassen sich identifizieren, jedoch sind die Übergänge von Waschbetonplatte (rot) zu Bettung (hellblau) und von Bettung zu Tragschicht (hellblau) nicht identifizierbar. Diese konnten nur mithilfe der bekannten Schichtdicken und der Skala am rechten Rand eingezeichnet werden. Die Schichten korrekt einzuzeichnen stellt sich als schwierig heraus. Die metallischen Einlagen (Reflektoren) werden im Radargramm als „dicke“ schwarze Schicht dargestellt. Bei den eingelegten Materialien, die nur wenige Millimeter dick sind, ist somit schwer zu sagen wo sich die genaue Grenze des Materials im Radargramm befindet. Der Abstand vom Ursprung bis zum Schichtaufbau lässt sich dadurch erklären, dass die Antenne des Georadars wenige Zentimeter über dem Aufbau angebracht war und keinen direkten Kontakt mit der Oberfläche der Waschbetonplatte hatte. Dieser Abstand ist an allen ausgewerteten Versuchen in ähnlichem Ausmaß ersichtlich, wie im Anhang zu sehen ist. Angemerkt werden muss jedoch, dass sich ein Einzeichnen der Schichten in das Radargramm ohne die Kenntnis über den Aufbau (Schichtdicken und Anordnung) als nahezu unmöglich erweist.

5.5 Verbesserungsmöglichkeiten

Wie auch schon in Kapitel 4.6 beschrieben wurden die Gesteinsschichten am zweiten Messtag auf die gleiche Weise verdichtet wie schon am ersten Messtag. Es wurde nur mittels Körpergewicht und schrittweisem abgehen der gesamten Fläche verdichtet. Hier könnte man bei nachfolgenden Versuchen eine maschinelle Verdichtung vorziehen, um einen höheren Verdichtungsgrad zu erreichen.

Ebenfalls wurde die gleiche Software zur Auswertung verwendet, die auch in den ersten Versuchen benutzt wurde, welche nur eine begrenzte Genauigkeit erlaubt.

Ein weiterer Punkt war die Fläche vor dem eigentlichen Versuchsaufbau bestehend aus XPS-Platten zur Erzeugung einer Signalabweichung. Diese Fläche könnte in weiteren Versuchen vergrößert werden. Zusätzlich dazu könnte man auch verschiedene Materialien testen, um zu sehen, ob bei anderen Materialien ein noch größerer Kontrast in den Radargrammen entsteht.

Zusätzlich gilt es beim Faktor der drehenden Reifen zu bedenken, dass die im Radargramm dargestellte Strecke dadurch möglicherweise länger ist als die tatsächlich zurückgelegte. Es gilt immer darauf zu achten, dass das Georadar bei der Überfahrt ständig Kontakt mit dem Untergrund hat. Eine Vereinfachung, um dies zu realisieren wäre die Wahl einer ebeneren Oberfläche.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine noch hochauflösendere Antenne, also mit einer Auflösung unter 0,5 cm für noch bessere und detaillierte Ergebnisse sorgen könnte. Dies könnte vor allem im Falle von Lochblechen interessant sein, um dort das genaue Raster des Lochblechs im Radargramm erkennen zu können. Beispielsweise wäre eine Antenne mit einer Frequenz von 2 GHz eine Option.

5.6 Fazit Messtag 2

Die Durchführung der dynamischen Georadar-Messungen vom 16.02.22 zeigt, dass diese Variante der statischen Punktmessung eindeutig vorzuziehen ist. Die Schichten der eingelegten Materialien sind sichtbar und es ist jeweils erkennbar, wann ein Reflektor oberhalb und wann ein Reflektor unterhalb der Bettung lag. Es ist jedoch nicht erkennbar, ob ein Material wirklich oberhalb oder unterhalb der Bettung liegt, da die Bettung und Tragschicht im Radargramm nicht als eigenständige Schicht dargestellt werden und somit immer die Kenntnis über den genauen Aufbau vorausgesetzt wird, um eine Aussage darüber treffen zu können.

Die metallischen Einlagen führten in jedem Versuch und in jeder Kombination zu einer deutlichen Signaländerung und konnten in den Radargrammen eindeutig zwischen dem Material oberhalb und unterhalb der Bettung unterschieden werden.

Eine nicht metallische Einlage, wie das Geovlies zum Beispiel, liefert keine Signalabweichung und erweist sich daher für diesen Anwendungsfall als nicht brauchbar.

Eine Unterscheidung zwischen den eingelegten Materialien (Aluminium, Kupfer und Stahl) ist in den Radargrammen nicht möglich. Die Signalausprägung ist in allen Fällen zu ähnlich, um eine Aussage darüber treffen zu können.

Eine weitere Unterscheidung zwischen Lochblech und Blech erweist sich als noch schwieriger, da es sich bei den Abstrahlungen in den Untergrund vermutlich um softwarebedingte Signalverstärkungen handelt. Eine Messung mit einer noch höheren Auflösung als die hier eingesetzten 0,5 cm könnte diesbezüglich zu einem möglichen Ergebnis führen.

6. AUSBLICK

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche sowie den beiden durchgeführten Versuchen können weitere Versuche durchgeführt werden. Der Fokus dieser Versuche sollte aber vor allem auf dem weggesteuerten Versuch liegen. Das Georadar scheint das Potenzial zu haben, sich für den hier benötigten Anwendungsfall zu eignen und somit können weitere Untersuchungen darauf aufbauend durchgeführt werden. Jedoch sind Schichtgrenzen im Radarogramm nicht zu erkennen. In dieser Arbeit wurde das Augenmerk hauptsächlich auf die Entwicklung erster Versuche sowie auf die Identifikation einzelner Schichten und Schichtdicken mittels der eingelegten Materialien gelegt und noch nicht auf die Bestimmung eventueller Verformungen im Aufbau. In weiteren Versuchen könnte dann untersucht werden, ob und mit welcher Präzision es möglich ist mittels des Georadars Verformungen in den unterschiedlichen Schichten festzustellen. Des Weiteren wäre es auch interessant herauszufinden, ab wann überhaupt Verformungen oder Unterschiede im Aufbau vom Georadar aufgenommen werden, da im Allgemeinen nur eine Genauigkeit von ungefähr einem Zentimeter erzielbar ist. Dazu wäre der Einsatz einer noch hochauflösenderen Antenne nötig. In weiterer Folge wäre eine noch detailliertere Datenaufnahme möglich und es würde die Möglichkeit bestehen, Veränderungen im Unterbau aufnehmen zu können.

Bezüglich der Materialien und des Aufbaus sollte vor allem auf metallische Materialien zurückgegriffen werden. Die Waschbetonplatten könnten durch Platten mit ebenerer Oberfläche ausgetauscht werden und zur Erleichterung des Auf- und Umbaus durch leichtere Platten ersetzt werden.

Außerdem könnte eine weiterführende Recherche bezüglich der Auswertungssoftware bessere Ergebnisse liefern. Eine andere Software bietet vielleicht noch mehr Visualisierungsmöglichkeiten und eine höhere Genauigkeit. Wie schon in vorherigen Kapiteln beschrieben, hängt die Genauigkeit der Ergebnisse sehr stark von der Auswertesoftware ab. Diesbezüglich wäre eine Weiterentwicklung der vorhandenen Software sicherlich ein guter Ansatz zur Erhöhung der Präzision und Vereinfachung der Handhabung.

Wie schon in Kapitel 3.6 beschrieben, besteht noch einiges an Forschungsbedarf zur Optimierung des Einsatzes von Georadarsystemen. Die starke Abhängigkeit der Genauigkeit bei der Durchführung und Auswertung von Messungen von der Geräteausstattung sowie dem Mess- und Auswertepersonal könnte mittels Schulungen und Zertifizierungen der Messsysteme und des Personals minimiert werden.

Abschließend bleibt zu erwähnen, dass das Georadar sich als Gerät mit großem Potential vor allem in Bezug auf die einfache und schnelle Durchführung der Versuche erwiesen hat. Jedoch ist es zum jetzigen Zeitpunkt nur möglich, diese Versuche in Zusammenarbeit mit bestimmten Firmen durchzuführen. Dies ist wie schon erwähnt einerseits auf das nötige Vorwissen zum Einsatz des Gerätes und der Auswertung zurückzuführen und andererseits auf die hohen Kosten, die eine gesamte Ausrüstung mit sich bringt.

Literaturverzeichnis

- [1] Y. Nevena, „Pflasterbefestigung in gebundener Bauweise“, 2015.
- [2] Ober St.Veit an der Wien, „Die Geschichte der Straßenpflasterung“, November 2018.
<https://www.1133.at/document/view/id/631>
- [3] Tis- Tiefbau Ingenieurbau, Straßenbau, „Dauerhafte und belastbare Pflasterflächen: Grundregeln der Verarbeitung“, August 2010.
- [4] J. Lanschützer, „Monitoring einer Teststrecke in Pflasterbauweise“, 2021.
- [5] „ÖNORM B 2214: Pflasterarbeiten- Werkvertragsnorm, Ausgabe 04/2020“.
- [6] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, „RVS-08.18.01“. 1. Mai 2020.
- [7] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, „RVS 03.08.63 Oberbaubemessung“. 5. Februar 2021.
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, „RVS 08.15.01 ungebundene Tragschichten“.
- [9] R. Blab und L. Eberhardsteiner, „Skript Straßenbau und Straßenerhaltung-Kapitel 6 Pflasterstein- und Pflasterplattenbefestigungen“. TU WIEN, April 2021.
- [10] „Bauweisen“, *Forum Qualitätspflaster*. <https://www.fqp.at/bauweisen> (zugegriffen 15. Januar 2022).
- [11] B. Shakel, *Handbuch Betonsteinpflaster*. Beton-Verlag, 1996.
- [12] H. Mentlein, *Pflasteratlas- Planung, Konstruktion und Herstellung*, 3.Auflage. 2009.
- [13] J. Buchholz, *Gebundene Pflasterbauweisen : thermische Spannungen in Verkehrsflächenbefestigungen der gebundenen Pflasterbauweise*. Kassel University Press, 2011.
- [14] Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V., „Betonstein-Planung und Ausführung“. <https://www.betonstein.org/technik/flaechenbefestigungen-mit-pflasterdecken-aus-beton-ungebundene-ausfuehrung/5-planung-und-ausfuehrung/55-planung-und-ausfuehrung-der-pflasterdecke/>
- [15] Dipl.-Ing. D. Ulonska, „Planung und Ausführung dauerhafter Betonpflasterbauweisen“. Betonverband Straße, Landschaft, garten e.V. (SLG), Bonn, 2007.
- [16] U. Dipl.Ing Dietmar, Betonverband Straße, Landschaft, und Garten e.V. (SLG), Bonn, „Schadensursachen Pflasterbauweise“. 2007.
- [17] A. Jung und Aulbert, „Abstrahlcharakteristiken von Bodenradar-Antennen“.
- [18] W. Wai-Lok Lai, X. Dérobert, und P. Annan, „A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis“, *NDT & E International*, Bd. 96, S. 58–78, Juni 2018, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.04.002.
- [19] J. Dolic, „Bodenradar-Ground Penetrating Radar“, 2015.
- [20] GGU Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH, „Das Georadar“.
- [21] G. Golkowski, „Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues“, S. 21.
- [22] A. Loizosa und C. Platib, „Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches“. 7. November 2006.
- [23] G. Morcoux und E. Erdogmus, „Use of Ground Penetrating Radar for Construction Quality Assurance of Concrete Pavement“. 2009.
- [24] T. Saarenko und T. Scullion, „Road evolution with ground penetrating radar“, Bd. *Journal of Applied Geophysics* 43, 1999.
- [25] M. Hülsbömer, „Strukturanalyse von Asphaltbefestigungen unter Verwendung des Georadarmessverfahrens“, 2020.
- [26] R. Holst und Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, „Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke“. Dezember 2006.
- [27] A. Hasenstab und B. Redmer, „Radiografie im Bauwesen und Kombination anderer ZfP-Verfahren“, *Fachtagung Bauwerksdiagnose*, S. 14, 2016.
- [28] H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, 2009.
- [29] Eigenschenk, „Einblick in den Untergrund mit dem Georadar“. <https://eigenschenk.de/einblick-in-den-untergrund-mit-dem-georadar/>

- [30] S. Villaret, B. Fohböse, J. Jähning, C. Karcher, J. Niessen, und M. T. Buch, *Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten*. 2015.
- [31] A. Hasenstab, G. Jost, A. Taffe, und H. Wiggenhauser, „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen - angewandte Forschung und Praxis“, *DACH-Jahrestagung 2008 in St. Gallen*, S. 13.
- [32] Ir. Wahyudi Widyatmoko Parnadi, „Kennwert-Schätzung aus Georadar-Transmissiondaten“, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2001.
- [33] C. Salat, „Auswertung von Georadarmessungen auf Lockersedimenten des Rio Palancia (Spanien)“, Johann Wolfgang Goethe – Universität in Frankfurt am Main, 2010.
- [34] Apollo Technology Company Limited, „GPR Technology“. <http://www.apollohdd.com/en/Dich-vu-ct.aspx?pg=Dich-vu&cat=13&id=18> (zugegriffen 23. Januar 2022).
- [35] „Permittivität“, 10. November 2021. <https://www.chemie.de/lexikon/Permittivit%C3%A4t.html>
- [36] C. Thomsen und H.-E. Gumlich, *Ein Jahr für die Physik: Newton, feynman und andere*. Wiss.-und-Technik-Verlag, 1998.
- [37] Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. und M. Holdefer, „Relative Dielektrizitätskonstante (DK-Werte) von flüssigen und festen Medien“. Mai 1999.
- [38] Roadscanners, „Percometer, Measuring of dielectric value, electrical conductivity and temperature“. <https://www.roadscanners.com/products/percometer/>
- [39] Dipl.-Ing. C. Persch, „Messung von Dielektrizitätskonstanten im Bereich von 0,2 bis 3 GHz und deren Bedeutung für die Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln“, S. 207, Juni 1997.

Anhang

Radargramme vom zweiten Messtag

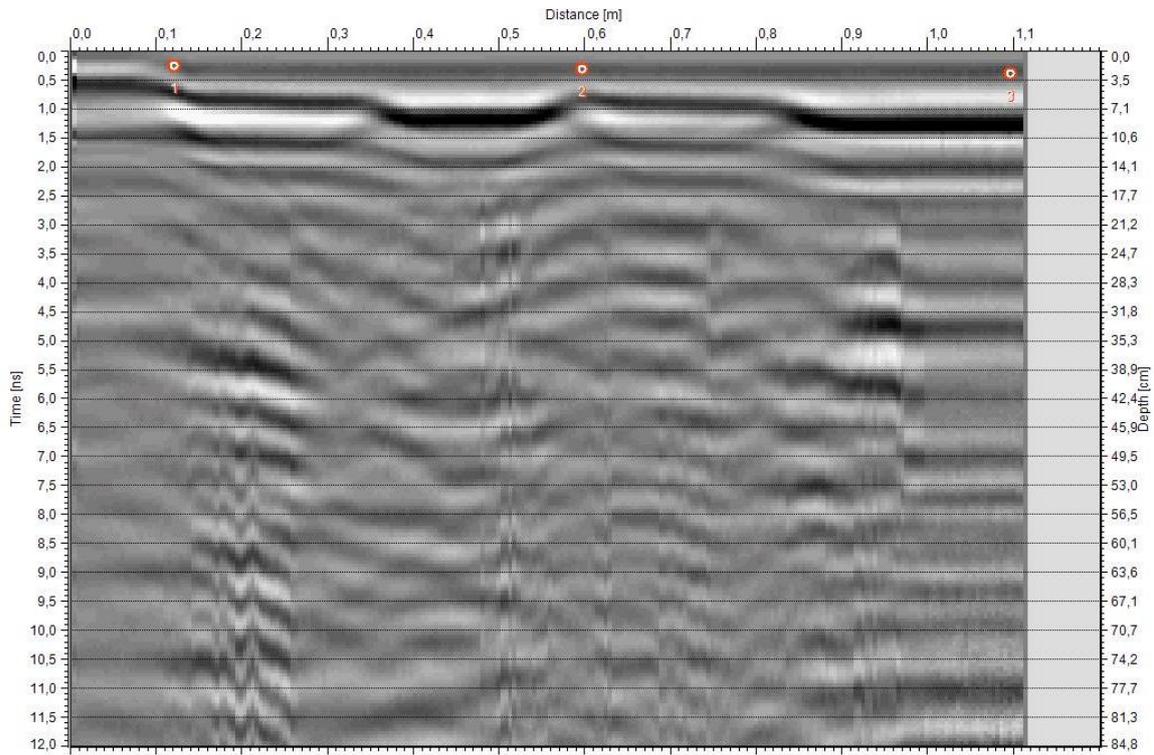


Abbildung 49: Radargramm des Versuches A1

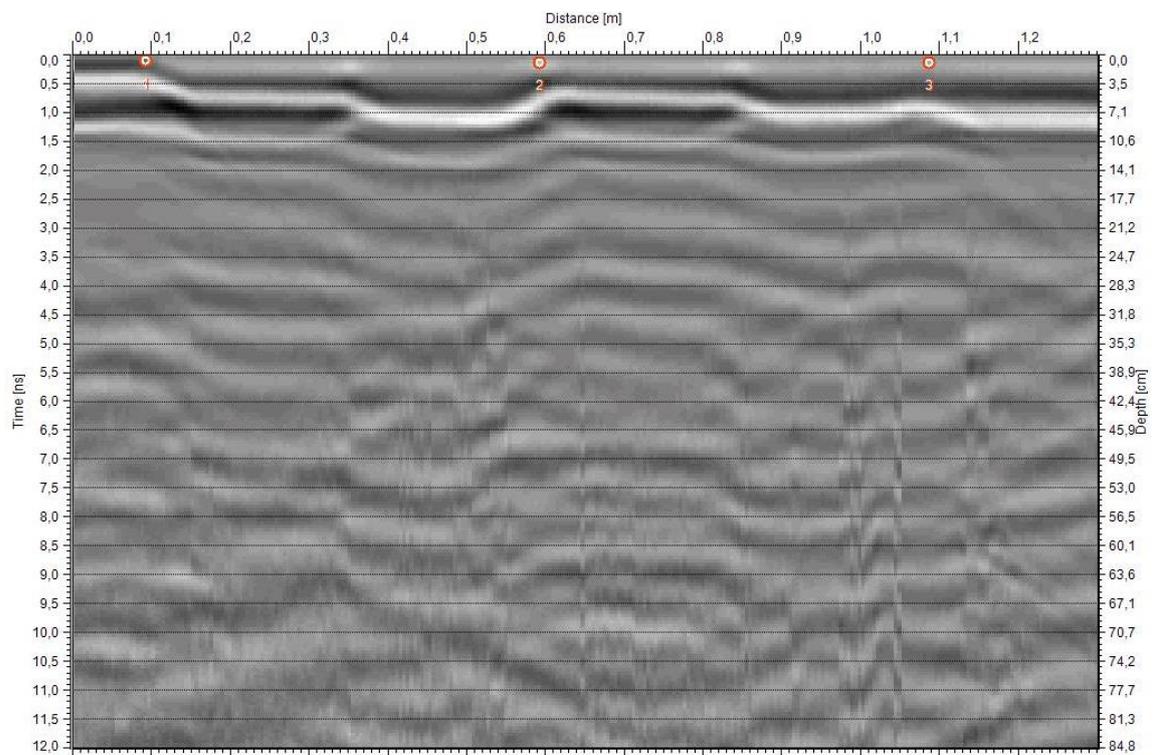


Abbildung 50: Radargramm des Versuches D1

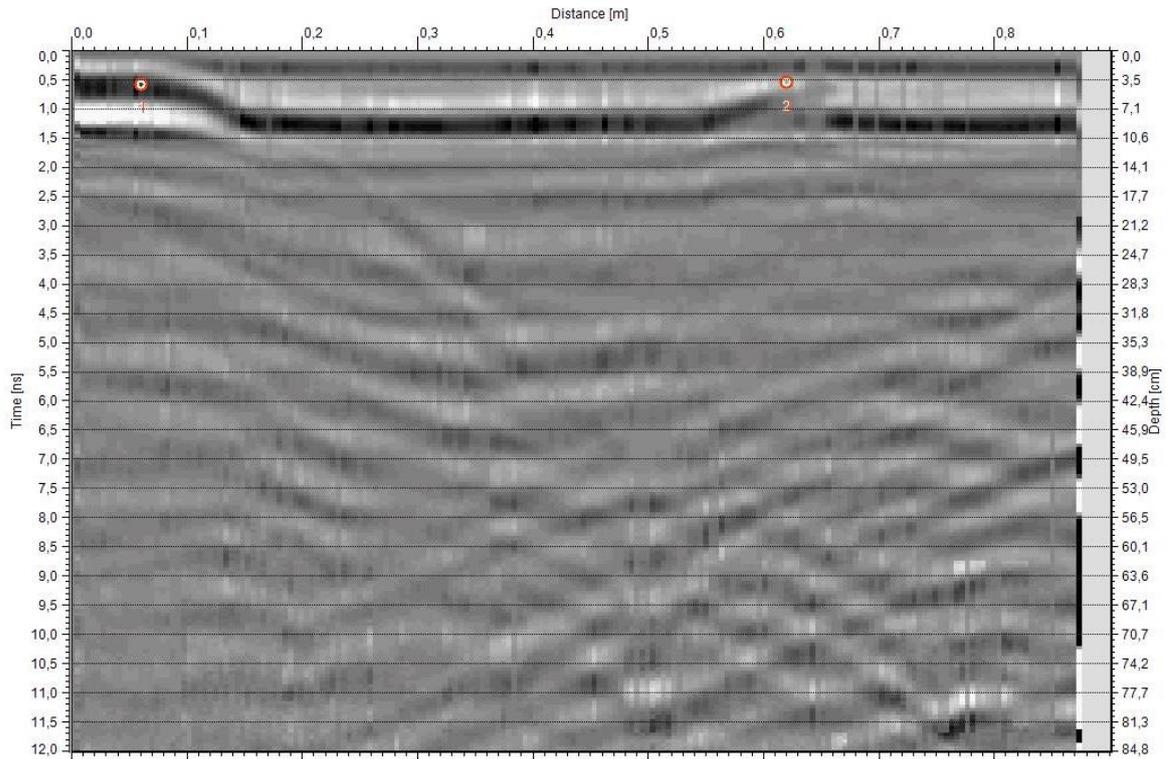


Abbildung 51: Radargramm des Versuches E1

Eingezeichnete Schichten vom zweiten Messtag

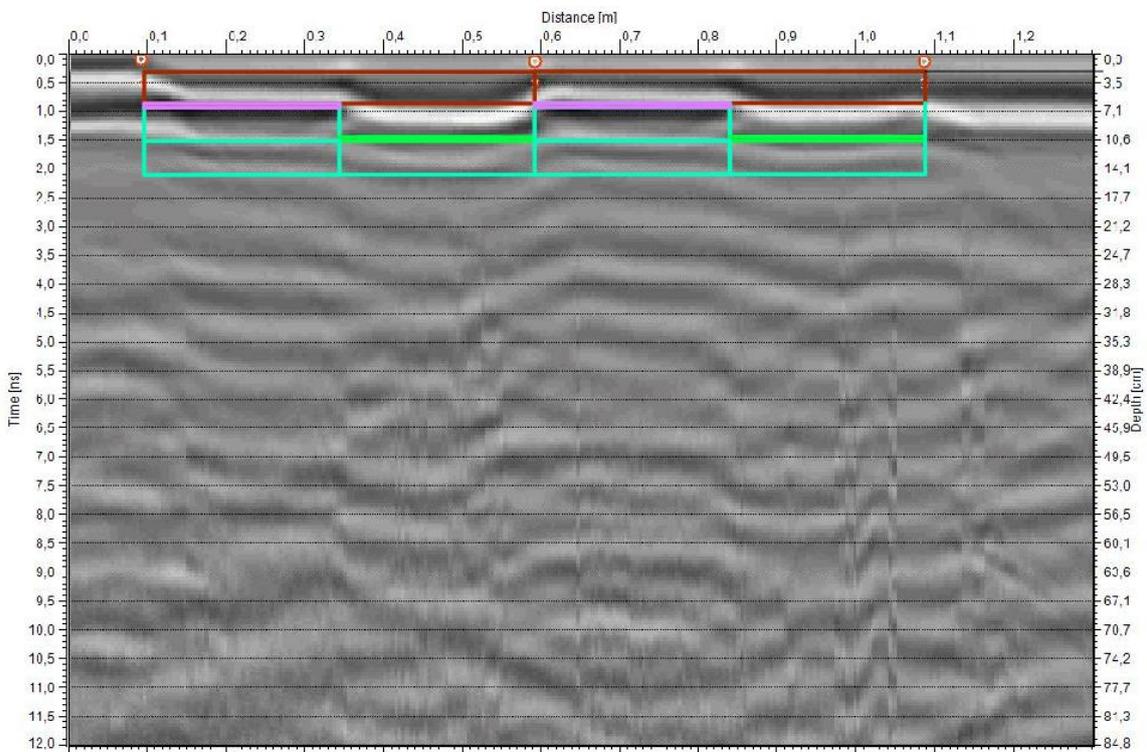


Abbildung 52: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches D1

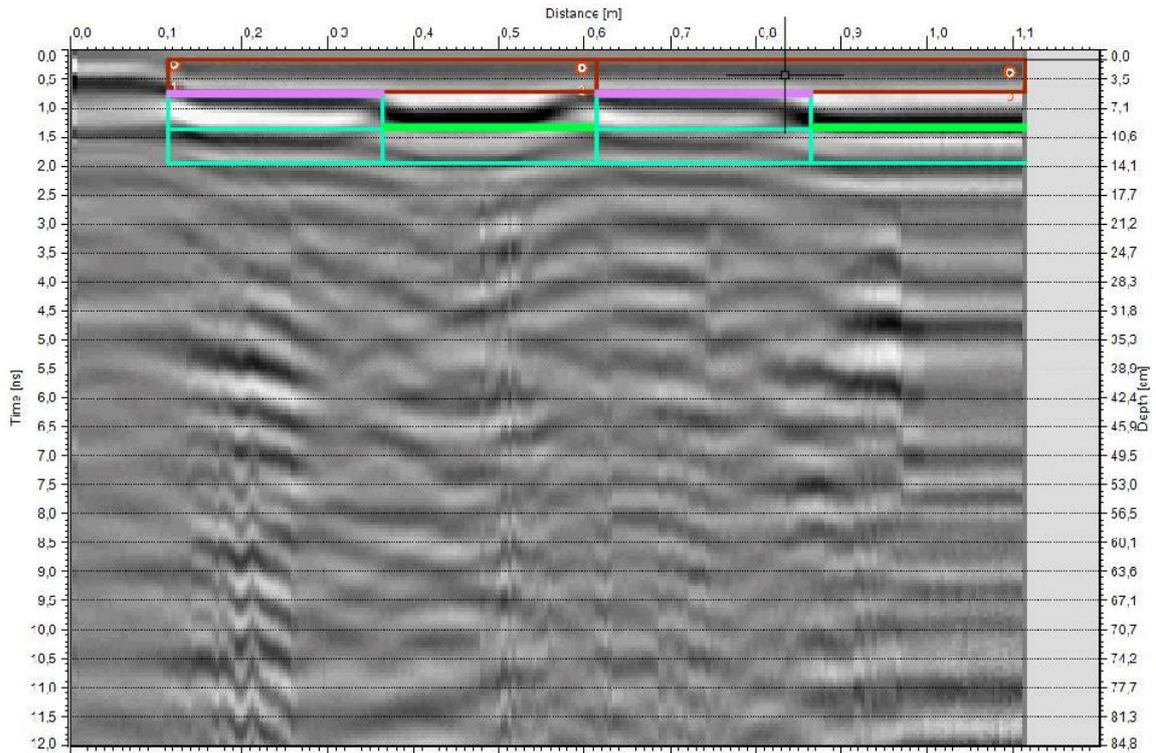


Abbildung 53: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches A1

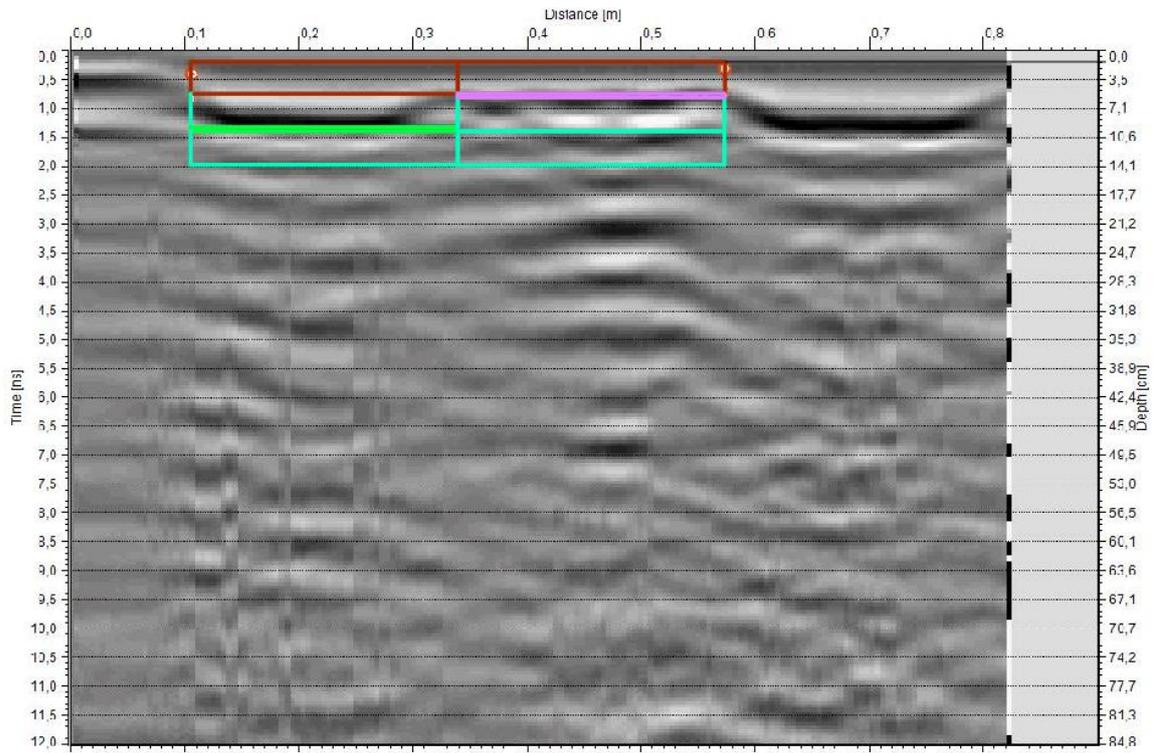


Abbildung 54: Schichtaufbau im Radargramm des Versuches B1