

Diploma Thesis

Monitoring of a test track made in paving slab construction

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

DIPLOMARBEIT

Monitoring einer Teststrecke in Pflasterplattenbauweise

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Lanschützer Johannes

Matr.Nr.: 01225925

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ronald Blab**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Lukas Eberhardsteiner**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Gusshausstraße 28/230, A-1040 Wien

Wien, im Juni 2021



Kurzfassung

Der Einsatz der Pflasterbauweise hat in den letzten Jahren vor allem innerstädtisch immer mehr an Beliebtheit gewonnen. Nicht nur aufgrund der Vielfalt an Material, Form und Farbe werden Pflasterflächen für verkehrsberuhigte Straßen und Plätze verwendet, sondern auch die positiven Effekte auf Umwelt und Mikroklima sind hervorzuheben.

In der gegenständlichen Arbeit wird zunächst ein ausführlicher Überblick über die theoretischen Grundlagen der Pflasterbauweise gegeben. Um den Aufbau und die Funktionsweise zu verdeutlichen, erfolgt, nach der Klärung wichtiger Begriffe, zunächst eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Bauweisen. Aus der historisch gewachsenen ungebundenen Bauweise (Regelbauweise) ist im Laufe der Zeit die gebundene und in weiterer Folge die gemischte Bauweise hervorgegangen. Wie bei fast allen Verkehrsflächen handelt es sich bei Pflasterflächen um mehrschichtige Aufbauten. Die einzelnen Schichten des Oberbaus und die üblicherweise eingesetzten Materialien sowie Anforderungen an diese werden ebenfalls beleuchtet.

In weiterer Folge befasst sich diese Diplomarbeit mit der Frage, welche Bedeutung die Bauweise und die Stärke der Pflasterplatten auf das Verhalten einer Pflasterfläche bei direktem Witterungseinfluss haben. Dafür wurden mittels eines Feldversuches Daten über einen Zeitraum von 21 Monaten gesammelt und anschließend ausgewertet. Für das Monitoring wurden Sensoren an verschiedenen Positionen verbaut. Diese zeichnen zum einen die Temperatur im Aufbau (Platte, Bettung, Drainbeton) und zum anderen die Horizontalverschiebungen der einzelnen Flächen an der Oberfläche auf. Zusätzlich wurden Temperatur- und Niederschlagsdaten sowie die Bodenfeuchte berücksichtigt. Weiters soll die Durchführung von Tragfähigkeitsversuchen mittels Fallgewichtsdeflektometer Aufschluss über die Unterschiede zwischen den Bauweisen geben. Die Ergebnisse werden in Form von Diagrammen dargestellt, miteinander verglichen und anschließend interpretiert.

Abstract

The use of paving stone and paving slab road surfaces has become increasingly popular in recent years, especially in inner cities. Paved surfaces are used for traffic-calmed streets and squares not only because of the variety of materials, shapes and colours, but also because of the positive effects on the environment and microclimate.

In the present thesis, firstly, a detailed overview of the theoretical basics of pavement construction is provided. In order to clarify the structure and function of paving, a detailed description of the different construction methods is given after the clarification of important terms. Over the course of time, the historically developed unbound construction method (standard construction method) has evolved into the bound and, subsequently, the mixed construction method. As with almost all pavements, paved surfaces are multi-layer structures. The individual layers of the superstructure and the materials usually used as well as their requirements are also examined.

Subsequently, this thesis addresses the question of what the significance of the construction method and the thickness of the paving slabs is on the behaviour of a paved surface under the direct influence of weather conditions. For this purpose, data was collected over a period of 21 months by means of a field test and subsequently evaluated. Sensors were installed at various positions for the monitoring. These recorded the temperature in the structure (slab, bedding, drain concrete) on the one hand and the horizontal displacements of the individual surfaces on the other. In addition, temperature and precipitation data as well as soil moisture were taken into account. Furthermore, the execution of bearing capacity tests by means of falling-weight deflectometers should provide information about the differences between the construction methods.

The results are presented in the form of diagrams, compared with each other and then interpreted.

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde am Institut für Verkehrswissenschaften im Forschungsbereich Straßenwesen an der Technischen Universität Wien zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs verfasst.

Mein Interesse für das Straßenwesen begann schon während meiner technischen Ausbildung in der Höheren Technischen Bundeslehranstalt Krems und hat sich über das Bachelor- und Masterstudium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität stets gehalten. Aus diesem Grund bereitete mir das spannende und praxisnahe Thema besondere Freude.

Ich möchte mich herzlich bei meinen Betreuern Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab und Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Lukas Eberhardsteiner für die Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit bedanken. Besonderer Dank gilt Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Lukas Eberhardsteiner, der mir vor allem in den finalen Wochen mit großem Engagement und hilfreichen Ratschlägen zur Seite stand.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Christa und Christian Lanschützer. Ohne deren Unterstützung und Verständnis wäre das Studium nicht möglich gewesen. Zusätzlich bedanke ich mich bei meinen Geschwistern und meiner Partnerin, welche mir während dieser sehr herausfordernden Zeit immer eine seelische Stütze waren.

Inhalt

1	EINLEITUNG.....	7
1.1	Problemstellung	7
1.2	Zielsetzung.....	8
2	PFLASTERBAUWEISE	9
2.1	Begriffsbestimmungen.....	9
2.2	Anwendungsbereiche und Anforderungen an Pflasterdecken.....	11
2.2.1	Anwendungsbereiche von Pflasterdecken.....	11
2.2.2	Anforderungen an Pflasterdecken.....	13
2.2.3	Vergleich der Pflasterbauweise mit anderen Deckenarten	13
2.3	Aufbau von Pflasterdecken.....	15
2.4	Bauweisen.....	16
2.4.1	Ungebundene Bauweise.....	16
2.4.2	Gebundene Bauweise.....	17
2.4.3	Gemischte Bauweise.....	17
2.5	Verwendete Materialien – Arten und Anforderungen	18
2.5.1	Pflastermaterialien.....	18
2.5.1.1	Naturwerkstein.....	19
2.5.1.2	Betonwerkstein	25
2.5.1.3	Kombiplatten.....	29
2.5.1.4	Klinker.....	29
2.5.1.5	Verbandsarten	31
2.5.2	Bettungsmaterial.....	34
2.5.3	Fugenmaterial.....	36
2.5.4	Tragschichten.....	37
2.6	Herstellungsgrundsätze.....	39
2.6.1	Einbau der Tragschichten.....	39
2.6.2	Herstellung der Randeinfassung.....	40
2.6.3	Einbau der Bettung.....	40
2.6.4	Verlegen des Pflasters	41
2.6.5	Herstellung der Fugenfüllung	42
2.7	Prüfungen.....	44
3	MATERIALTECHNISCHE GRUNDLAGEN.....	45
3.1	Materialkennwerte.....	45
3.1.1	Druckfestigkeit	45
3.1.2	Haftzugfestigkeit.....	45
3.1.3	Biegezugfestigkeit	45
3.1.4	E-Modul.....	45
3.1.5	Frost-Tausalz-Widerstand.....	46
3.1.6	Thermischer Ausdehnungskoeffizient.....	46

3.1.7	Wärmeleitfähigkeit.....	46
3.1.8	Spezifische Wärmekapazität	46
3.1.9	Wärmeübergangskoeffizient.....	47
3.2	Thermische Beanspruchungen.....	47
3.2.1	Wärmestrahlung	47
3.2.2	Konvektion.....	47
3.2.3	Wärmeleitung.....	47
4	FELDVERSUCH.....	48
4.1	Beschreibung des Testfelds	48
4.1.1	Instrumentierung	49
4.2	Messdatenanalyse.....	51
4.2.1	Auswahl der Monate und Tagesextrema	53
4.2.2	Analyse der Verschiebung im Feld	55
4.2.2.1	Lufttemperatur-Extremwert August 2019	55
4.2.2.2	Lufttemperatur-Extremwert Jänner 2020	63
4.2.3	Analyse der Bodenfeuchte im Feld	72
4.2.3.1	Niederschlags-Extrema August 2019	72
4.3	Tragfähigkeitsmessungen.....	75
4.3.1	Messprogramm	75
4.3.2	Auswertung und Bewertung der Tragfähigkeit	76
4.3.3	Einsenkungsmodul	77
5	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT.....	79
5.1	Feldversuch.....	79
5.2	Fazit	81
6	VERZEICHNISSE.....	82
6.1	Literaturverzeichnis	82
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	84
6.3	Tabellenverzeichnis	86

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Das Fortschreiten der Klimaveränderung wird mit jedem Jahr zu einem immer größeren Problem. Dabei wird weltweit händierend nach Lösungen gesucht, um die geforderten Klimaziele nur ansatzweise zu erreichen. Bei den aktuellen Entwicklungen kommt man bei dieser Thematik an dem Schlagwort ‚Bodenversiegelung‘ nicht vorbei. Bis zum Jahr 2019 wurden in Österreich rund 7% der Landesfläche und 18% des Dauersiedlungsraumes verbraucht, in Summe sind in etwa 41% der für Siedlungs- und Verkehrszwecke in Anspruch genommenen Fläche versiegelt. 2019 wurde pro Tag eine Fläche von 13 Hektar verbaut. Hitze, Überschwemmungen, Grundwasserarmut und fehlende Staubbindingfunktion sind nur wenige der Folgen. [1][2][3]

Durch die Anordnung von durchlässigen Pflasterflächen gelingt es, Boden nicht zu versiegeln bzw. zu entsiegeln und so wertvolles Regenwasser im Untergrund – gefiltert durch den Oberbau – versickern zu lassen. Das Wasser wird gespeichert und so kann an heißen Tagen durch die Verdunstungsenergie ein kühleres Mikroklima erzeugt und zusätzlich die Kanalisation entlastet werden. [4] Auch bei der Herstellung, Instandhaltung und Instandsetzung werden weniger CO₂-Emissionen freigesetzt als bei anderen Bauweisen. [5]

Aber nicht nur der ökologische Nutzen ist groß, sondern auch gestalterisch haben Pflasterbefestigungen aufgrund der Vielfalt an Material, Form und Farbe einiges zu bieten. In den letzten Jahren wurde vor allem im innerstädtischen Raum bei der Neugestaltung von Plätzen und Straßen auf Pflaster gesetzt, weil sie optisch ansprechend sind und einen positiven soziokulturellen Effekt erzeugen. Neben den eben erwähnten Vorteilen, kann die auch die gebundene Ausführung der Pflasterbauweise zusätzlich mit guter Tragfähigkeit und geringem Wartungsaufwand überzeugen. [5]

Der Aufbau für eine Pflasterbefestigung besteht aus mehreren Schichten, wobei jede Schicht spezielle Anforderungen erfüllen muss. Angepasst an die zu erwartende Verkehrsbelastung gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, eine Pflasterfläche herzustellen. Über die Jahre hat sich die historisch gewachsene ungebundene Bauweise etabliert und wird in diversen Normen und Richtlinien als Regelbauweise geführt. [6] Hierbei wird unabhängig von den Tragschichten – diese können gebunden oder ungebunden ausgeführt werden – ungebundenes Bettungs- und Fugenmaterial verwendet.

Mit der Verwendung von hydraulischen Bindemitteln hat sich die gebundene Bauweise entwickelt, bei der – wie der Name schon verrät – gebundenes Bettungs- und Fugenmaterial verwendet wird. Trotz der schon häufigen Anwendung wird sie gemeinsam mit der gemischten Bauweise in den Regelwerken noch als Sonderbauweise angeführt. [6]

Die gebundene Bauweise bringt viele Vorteile mit sich und daher wird stetig an der Vereinheitlichung und Einarbeitung der Planungsgrundsätze in die Regelwerke gearbeitet.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher auch mit dem Vergleich der Verhaltensweisen der Bauweisen unter bestimmten Voraussetzungen.

1.2 Zielsetzung

Welche Bedeutung haben die Pflasterbauweise und die Dicke der Pflasterplatten auf das Verhalten einer Pflasterfläche bei direktem Witterungseinfluss?

Ziel der Diplomarbeit ist, diese Frage zu beantworten und das Verhalten von Pflasterbefestigungen unter direktem Witterungseinfluss anhand eines Feldversuches zu analysieren. Untersucht wird ein 15 m langes Testfeld, welches sich aus zwei Flächen und drei verschiedenen Aufbauvarianten zusammensetzt. Diese Aufbauten unterscheiden sich in ihrer Bauweise und/oder der Pflasterplattendicke. Ein Bereich ist in gebundener Bauweise unter Verwendung von hydraulischem Bindemittel mit 8 cm dicken Natursteinplatten ausgeführt. Die anderen beiden Bereiche sind in ungebundener Bauweise hergestellt, wobei ein Teil ebenfalls 8 cm und der andere Teil 14 cm dicke Natursteinplatten aufweist.

Für das Monitoring wurden Sensoren an verschiedenen Positionen verbaut. Diese zeichnen zum einen Temperatur, Bodenfeuchte sowie elektrische Leitfähigkeit in unterschiedlichen Schichten, und zum anderen die Horizontalverschiebung der einzelnen Flächen auf. Die Aufzeichnung der Daten erstreckt sich über den Zeitraum Juli 2019 bis März 2021. Mit den Temperatur- und Niederschlagsdaten der Wetterstation vor Ort, fließen zusätzliche Daten in die Auswertung.

Es wird untersucht, wie die verschiedenen Aufbauten auf Einflüsse wie Temperatur und Feuchtigkeit reagieren und ob sich wesentliche Unterschiede erkennen lassen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Zusammenhang zwischen Temperatur, Verschiebung und Bodenfeuchte gelegt. Zusätzlich wird mit einem Tragfähigkeitsversuch (FWD-Versuch) das Tragverhalten der Schichten und eine etwaige Änderung über die Zeit untersucht.

Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wird zunächst ein Überblick über die theoretischen Hintergründe der Pflasterbauweise gegeben. Im ersten Schritt werden Begriffe erklärt, Anwendungsbereiche und Anforderungen angeführt, um dann näher auf die korrekte Ausführung von Pflasterflächen und die verschiedenen Bauweisen einzugehen. Des Weiteren werden Materialien und ihre Anforderungen vorgestellt und die korrekte Bauausführung einer Pflasterfläche erklärt. Im zweiten Teil der Arbeit wird der Feldversuch im Detail beschrieben. Die ausgewerteten Daten werden mittels Diagrammen dargestellt und aufschlussreich interpretiert. Am Ende erfolgen eine Bewertung der Ergebnisse und ein anschließendes Fazit.

2 PFLASTERBAUWEISE

2.1 Begriffsbestimmungen

Pflasterung

Unter einer Pflasterung versteht man eine Befestigung von Straßen- und Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Materialien wie Naturstein, Betonstein oder Klinker. Pflaster wird vor allem im innerstädtischen Bereich zur architektonischen Gestaltung von Straßen und Plätzen und allgemein für Verkehrsflächen mit geringer Belastung verwendet. Neben der Unterscheidung der Materialien werden verschiedene Steinformate und Bauweisen ausgeführt.

Pflasterstein

Stein, dessen größte Gesamtlänge 30 cm nicht überschreitet und dessen Dicke größer als ein Drittel der größten Gesamtlänge ist. [10]

Pflasterplatte

Platte, deren größte Gesamtlänge mehr als 15 cm beträgt und deren Dicke höchstens ein Drittel der größten Gesamtlänge ist. [10]

Verband

Sich wiederholende, regelmäßige oder unregelmäßige Anordnung von Steinen in Abhängigkeit von der Stein- oder Plattengröße. [10]

Pflastern

Manuelles Hineintreiben von Pflastersteinen oder Pflasterplatten in eine Bettung aus Sand Mörtel. [10]

Verlegen

Auflegen von Pflastersteinen oder Pflasterplatten mit geringen Dickentoleranzen auf eine profilgerechte Bettung aus Sand oder das Einbetten von Rand- oder Bordsteinen in eine Mörtelbettung. [10]

Versetzen

Einbetten von Randeinfassungen in eine Betonbettung. [10]

Fuge

Je nach Bauweise erforderlicher Abstand zwischen den Pflastersteinen oder Pflasterplatten. Die Unterteilung erfolgt in Längs-, Quer-, Stoß- und Bewegungsfuge. Die Fugenfüllung kann ungebunden oder gebunden erfolgen.

Bettung

Die Bettung definiert jene Schicht, auf der die Pflastersteine oder Pflasterplatten aufliegen. Sie kann ungebunden oder gebunden ausgeführt werden.

Tragschicht

Die Tragschicht ist jene Schicht in der Pflasterbauweise, auf der die Bettung aufgebracht wird und über die die Einwirkungen aufgenommen und in den Untergrund weitergeleitet werden.

Oberbau

Der Oberbau setzt sich aus den Tragschichten und der Pflasterdecke zusammen.

Pflasterdecke

Die Pflasterdecke besteht im Allgemeinen aus der Bettung und den darauf liegenden Pflastersteinen oder Pflasterplatten. Sie kann durch die Wahl der Fugenfüllung und dem Bettungsmate-

rial durchlässig oder undurchlässig ausgeführt werden und man unterscheidet drei Bauweisen: Ungebundene Bauweise, Gebundene Bauweise, Gemischte Bauweise.

Ungebundene Bauweise

Pflastersteine bzw. Pflasterplatten werden in eine Bettung ohne Zusatz eines Bindemittels verlegt. Auch die Fugenfüllung wird ohne Bindemittelzusatz hergestellt. Die darunter liegenden Oberbauschichten sind dauerhaft wasserdurchlässig auszuführen. [15]

Gebundene Bauweise

Pflastersteine bzw. Pflasterplatten werden in eine Bettung aus Mörtel, d.h. mit Zusatz eines Bindemittels verlegt. Bei Pflasterplatten ist dabei auf die kraftschlüssige Verbindung zwischen Platte und Bettung zu achten. Die Fugenfüllungen werden aus Fugenmörtel d.h. mit Zusatz eines Bindemittels hergestellt. Die darunterliegenden Oberbauschichten sind dauerhaft wasserdurchlässig auszuführen. [15]

Gemischte Bauweise

Pflastersteine bzw. Pflasterplatten werden in eine Bettung ohne Zusatz eines Bindemittels verlegt. Die Fugenfüllung wird gebunden hergestellt. Die darunterliegenden Oberbauschichten sind dauerhaft wasserdurchlässig auszuführen. [15]

Bautyp

Art der Ausführung der oberen Tragschicht (ungebundene Obere Tragschicht, gebundene Obere Tragschicht z.B. Pflasterdrainbeton). [10]

2.2 Anwendungsbereiche und Anforderungen an Pflasterdecken

Schon im Mittelalter und vor allem in Zeiten des Römischen Reiches wurden die ersten Verkehrsflächen mit Pflastersteinen befestigt. Die Entstehung von Siedlungen und Städten hat die Notwendigkeit einer dauerhaften Befestigung der Straßen und Plätze mit sich gebracht. Mit der Nutzung von immer schwerer werdenden Fahrzeugen gewann auch die Tragfähigkeit – und somit die Qualität der Tragschicht – mehr an Bedeutung. [16]

Heute sind die Anwendungsmöglichkeiten für Pflasterdecken ausgesprochen vielfältig. Grundsätzlich ist zwischen zwei wesentlichen Anforderungen zu unterscheiden, dass (i) die Pflasterfläche einer zu erwartenden Belastung standhalten muss und (ii) gestalterische Ansprüche bestehen.

2.2.1 Anwendungsbereiche von Pflasterdecken

Bei Überlegungen zu den Anwendungsmöglichkeiten von Pflasterdecken können nach RVS 08.18.01 [6] drei Einsatzbereiche unterschieden werden: **öffentlich, gewerblich, privat**. In nachfolgender Aufzählung sind typische Anwendungsbeispiele angeführt:

- **Öffentliche Flächen:**
 - Straßen und Verkehrsflächen mit untergeordneter Belastung
 - Fußgängerzonen mit und ohne Ladeverkehr
 - Wohnstraßen
 - Plätze
 - Kreisverkehre
 - Parkanlagen
 - Rad- und Gehwege
 - Böschungsbefestigungen
- **Gewerbliche Flächen:**
 - Container- und Lagerflächen
 - Gastronomie
 - Hafenstraßen
- **Private Flächen:**
 - Innenhöfe
 - Gehwege
 - Einfahrten, Parkanlagen
 - Gartenanlagen

Tabelle 2.1 zeigt einen Auszug aus der RVS 03.08.63 [7], welcher die möglichen Anwendungsbereiche von Pflasterbefestigungen bezogen auf die maßgebende Verkehrsbelastung und daraus resultierender Lastklassenzuordnung überblicksweise darstellt.

Tabelle 2.1: Anwendungsbereiche Pflastersysteme [7]

Lastklasse ²⁾	Bemessungsrelevante Beanspruchung BNLW ¹⁾	Zugeordnete Verkehrsflächen nach [17]
LK0,4	>0,1 bis 0,4	<ul style="list-style-type: none"> • Sammelstraßen • Fußgängerzonen mit schwerem Ladeverkehr, ständig benutzte Parkflächen für LKW- und Busverkehr • Verkehrsflächen in Nebenanlagen für PKW und LKW
LK0,1	>0,05 bis 0,1	<ul style="list-style-type: none"> • Anliegerstraßen • Fußgängerzonen • Ständig benutzte Parkflächen für Pkw-Verkehr und geringen LKW- und Busverkehr • Gelegentlich benutzte Parkflächen für LKW- und Busverkehr
LK0,05	0,05	<ul style="list-style-type: none"> • Anliegerstraßen • Befahrbare Wohnwege • Ständig benutzte Parkflächen für Pkw-Verkehr • Gelegentlich benutzte Parkflächen für LKW- und Busverkehr • Verkehrsflächen für PKW in Nebenanlagen und Nebenbetrieben an Bundesstraßen • Ländliche Verbindungswege mit größerer Verkehrsbedeutung
-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Gelegentlich benutzte Parkflächen für PKW-Verkehr • Radwege • Gehwege • Hofflächen • Feuerwehruzufahren • Lagerflächen ohne oder mit geringem Schwerlastverkehr • Ländliche Verbindungswege mit geringerer Verkehrsbedeutung • Ländliche Wirtschafts- und Fahrwege

1) Bemessungsnormlastwechsel (BNLW) = Mio. äquivalente 100 kN-Achsübergänge im zugrunde gelegten Nutzungszeitraum

2) Lastklassen gemäß RVS 03.08.63 [7]

2.2.2 Anforderungen an Pflasterdecken

Die Anforderungen an Pflasterdecken sind abhängig von deren Einsatzbereich. Je nach Verkehrsbelastung oder ästhetischen Ansprüchen sind unterschiedliche Tragschichten, Bettungs- bzw. Fugenmaterialien und Steineigenschaften zu wählen.

Um die Bedürfnisse des Verkehrswegenutzers bei der Nutzung einer Verkehrsfläche erfüllen zu können, müssen nach [18] folgende Kriterien erfüllt werden:

- **Bautechnische Anforderungen:**
Eine Pflasterdecke muss tragfähig, dauerhaft, verformungsstabil, frostsicher, abriebfest und bei jeder Witterung herstellbar sein sowie einen guten Verbund aufweisen.
- **Sicherheit:**
Aus verkehrstechnischer Sicht wird Ebenheit (längs und quer), Griffigkeit und Helligkeit gefordert.
- **Wirtschaftlichkeit:**
Eine lange Nutzungsdauer soll bei möglichst geringen Herstell- und Erhaltungskosten gegeben sein.
- **Umweltschutz:**
Generell ist der Flächenbedarf auf ein Minimum zu beschränken. Bei der Anwendung von wasserdurchlässigen Pflasterbefestigungen ist auf die ordnungsgemäße Entwässerung zu achten.
- **Ästhetik:**
Auf Wunsch kann der Ästhetik (Farbe, Form, etc.) besonders Rechnung getragen werden.
- **Komfort:**
Der Nutzungskomfort muss für jeden Verkehrsteilnehmer gegeben sein.

2.2.3 Vergleich der Pflasterbauweise mit anderen Deckenarten

Mit der Verwendung von Beton und Asphalt für Deckschichten im Straßenbau haben sich neben der Pflasterdecke im Laufe der Zeit neue Varianten und Aufbauten entwickelt. Diese werden in der RVS 03.08.63 [7] als Bautype bezeichnet. Keiner der Bautypen ist für alle Verwendungszwecke gleich gut geeignet, da sich das Gebrauchsverhalten und die Eigenschaften stark unterscheiden.

Shackel, B. hat in [19] eine Vergleichstabelle angeführt, um die Vor- und Nachteile von Betonsteinpflaster-, Asphalt- und Betondecken zu verdeutlichen (siehe **Tabelle 2.2**).

Tabelle 2.2: Vergleich von Betonsteinpflaster mit anderen Deckenarten [19]

Eigenschaften	Deckenart		
	Betonsteinpflaster	Asphalt	Beton
Kosten			
Energieverbrauch	gering	hoch	gering
Kosten			
- Herstellung	mittel	gering	hoch
- Erhaltung	gering	hoch	mittel
- Wiederverwendung	günstig, einfach wiederverwendbar	mittel	mittel
Gestaltung			
Erscheinungsbild	sehr gut: Farbe, Textur, Verlegemuster	schlecht	mittel: wenige Möglichkei- ten für Farben und Texturen
Herstellung und Erhaltung			
Gerätebedarf	gering, einfaches Gerät	vielfältige maschinell- e Ausrüstung	Fertiger
Bauzeit	mittel	kurz	länger (Betonerhär- tung)
Aufgrabungen und Wiederherstellung	einfach von Hand	Aufbruchhammer und neues Mischgut erforderlich	schwierig und teuer
Wiederverwendung	einfach, ohne Aufbereitung	Aufbereitung erforderlich	Aufbereitung erforderlich
Nutzung			
Dauerhaftigkeit	gut	mittel	gut
Widerstand gegen			
- Hohe Achslasten	sehr gut	gut	sehr gut
- Punktlasten	sehr gut	schlecht	sehr gut
- Schubbelastung	gut	schlecht	sehr gut
- Kraftstoffe und Öle	gut	schlecht	gut
Griffigkeit	befriedigend bei $v \leq 60$ km/h	befriedigend	gut

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Pflasterdecken gegenüber anderen Deckenarten viele Vorteile aufweisen. Günstige und einfache Herstellung, enorme Material- und Gestaltungsvielfalt und flexibles Verformungsverhalten bei großen Horizontallasten sind nur wenige der vielen Vorzüge. Unbedingt hervorzuheben ist die unkomplizierte und kostengünstige Instandhaltung und Wiederverwendung, was unter dem ökologischen Aspekt viele Pluspunkte bringt. [5]

2.3 Aufbau von Pflasterdecken

Für die Herstellung von Pflasterflächen ist ein hohes Maß an Fachwissen und Sorgfalt erforderlich. Wie bei allen anderen Verkehrsflächen, ist auch in der Pflasterbauweise ein mehrschichtiger Aufbau erforderlich. Jede Schicht für sich muss ordnungsgemäß ausgeführt werden, damit die Funktionsweise des gesamten Aufbaus gewährleistet werden kann.

Nachstehend werden die erforderlichen Schichten für die sachgemäße Herstellung einer Pflasterfläche von unten nach oben erläutert:

Die unterste Schicht ist der sogenannte **Unterbau**. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um den natürlich gewachsenen Boden. Sollte dieser keine ausreichende Tragfähigkeit vorweisen, müssen eventuell Bodenverbesserungsmaßnahmen getroffen werden. Der Unterbau dient als homogene Auflagefläche für den Oberbau.

Die **untere ungebundene Tragschicht** dient als **Frostschuttschicht** und wird auf den Unterbau in verdichteter Form aufgebracht. Das Material muss zusätzlich homogen gemischt und frei von organischen Stoffen, Ton, Müll oder Ablagerungen sein. Die Anforderungen an das Material sind in der RVS 08.15.01 festgelegt. Die Wasserdurchlässigkeit hat bei einem Verhältnis von Wassersäule zu Schichtdicke von $i=8$ mehr als 5×10^{-6} m/s zu betragen. [8] Eine **obere ungebundene Tragschicht** kann bei Aufbauten mit geringer Belastung entfallen.

Das Haupttragelement bildet die **Obere Tragschicht**. Sie soll die Lasten aus der Pflasterdecke aufnehmen und gleichmäßig in den Untergrund verteilen. Die RVS 03.08.63 [7] unterscheidet bei den gebundenen Tragschichten:

- Mit Bindemittel stabilisierte Tragschicht
- Tragschichten aus Pflasterdrainbeton
- Bituminöse Tragschichten

In die **Pflasterbettung** werden die Pflastersteine oder Pflasterplatten verlegt. Je nach Bauweise handelt es sich um ein ungebundenes oder gebundenes Material. Die Schichtdicke beträgt zwischen 2 und 5 cm. [20]

Die letzte Schicht einer Pflasterfläche ergeben die namensgebenden **Pflastersteine oder Pflasterplatten**, welche im Straßenbau auch als Deckschicht bezeichnet wird. Je nach Anforderung unterscheiden sie sich in Abmessung, Form oder Material. Abschließend werden die Fugen zwischen den Steinen oder Platten mit Fugenmaterial verfüllt.

Abb. 2.1 zeigt einen korrekt ausgeführten Oberbau mit Pflasterdecke in ungebundener Bauweise.

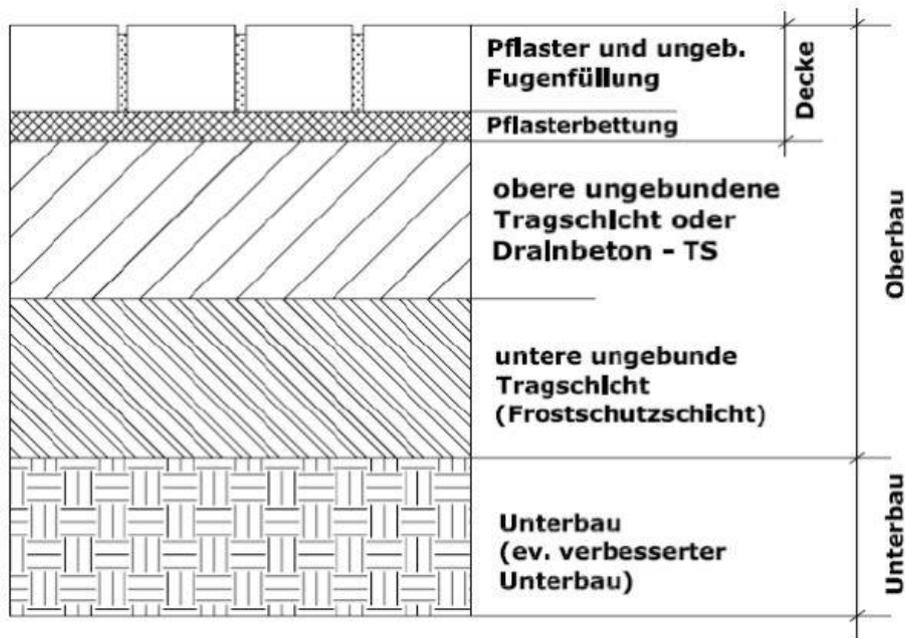


Abb. 2.1: Oberbau mit Pflasterdecke [15]

2.4 Bauweisen

Wie bereits unter 2.1 angeführt, existieren drei mögliche Bauweisen, welche sich in Bettungs- und Fugenmaterial unterscheiden. Die ungebundene Bauweise ist laut RVS 08.18.01 [6] als Regelbauweise definiert.

2.4.1 Ungebundene Bauweise

Die ungebundene Bauweise hat historisch gesehen die größte Bedeutung und wird deswegen in allen Normen und Richtlinien als Regelbauweise betrachtet. Wie bereits unter 2.1 erwähnt, zeichnet sich die Herstellung einer ungebundenen Bauweise dadurch aus, dass sowohl für die Bettung, als auch die Fugenfüllung kein Bindemittel zugesetzt wird. Einzellasten können flächig abgeleitet werden, weil durch das Zusammenspiel von Bettung, Stein/ Platte und Fugenmaterial ein in sich stabiles Tragwerk entsteht. Ungebundene Pflasterflächen werden als flexibel bezeichnet, da sich diese Aufbauten durch ein hohes Maß an Elastizität auszeichnen. Bei unsachgemäßer Ausführung oder zu hoher Belastung können unter Umständen plastische Verformungen (Spurrinnen) verbleiben. [21]

Abb. 2.2 zeigt einen Regelaufbau der ungebundenen Bauweise.

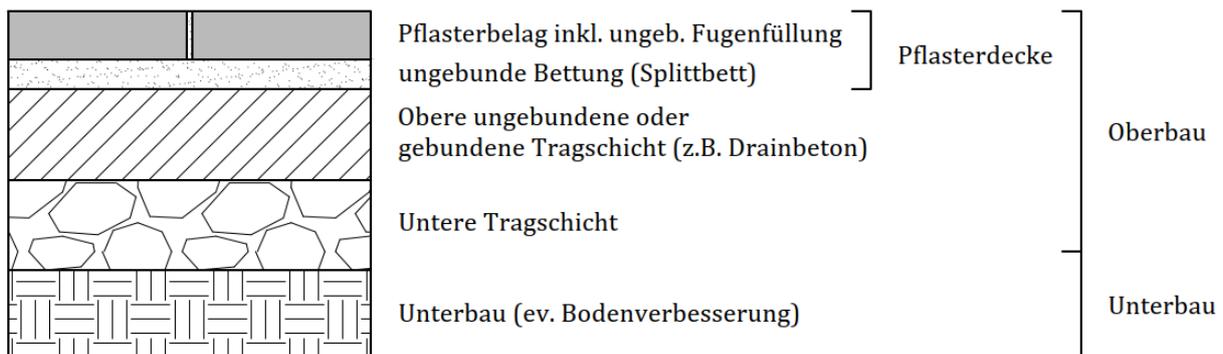


Abb. 2.2: Ungebundene Bauweise

2.4.2 Gebundene Bauweise

In der gebundenen Bauweise werden Bettung und Fugenfüllung unter Verwendung von hydraulischen Bindemitteln – meist Zementmörtel – hergestellt. Die Verlegung von Pflastersteinen und Pflasterplatten erfolgt direkt in eine Bettung aus Mörtel. Nach dem Aushärten der Bettung wird der Fugenmörtel auf voller Fughöhe eingebracht. Im Gegensatz zur ungebundenen Bauweise ist die gepflasterte Fläche in der gebundenen Bauweise nicht flexibel ausgebildet. Dehnfugen und/oder Entspannungszonen sind daher unbedingt vorzusehen. Das Auftreten von temperaturbedingten Rissen in den Fugen ist allerdings unvermeidbar. Thermische Beanspruchungen durch große Temperaturunterschiede sind jedenfalls bei der Planung zu beachten. [6][21]

Abb. 2.3 zeigt einen Regelaufbau der gebundenen Bauweise.

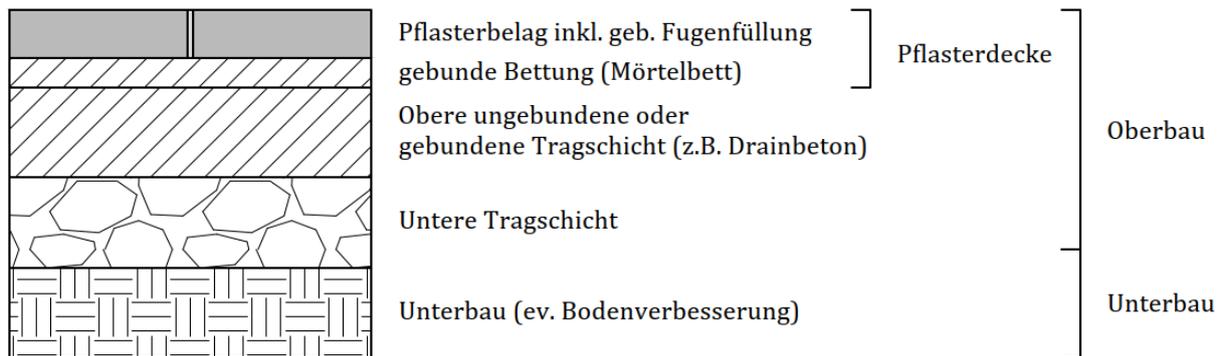


Abb. 2.3: Gebundene Bauweise

2.4.3 Gemischte Bauweise

Die gemischte Bauweise zeichnet sich dadurch aus, dass die Steine oder Platten in eine ungebundene Bettung verlegt werden und die Fugenfüllung anschließend unter Zusatz von Bindemitteln hergestellt wird. Die Belastbarkeit ist geringer als bei anderen Bauweisen und daher sollte sie nur für begangene oder gering befahrene Flächen mit PKW-Verkehr gewählt werden. Auch hier sind Fugenrisse durch thermische Beanspruchungen unvermeidbar. [6][21]

Abb. 2.4 zeigt einen Regelaufbau der gemischten Bauweise.

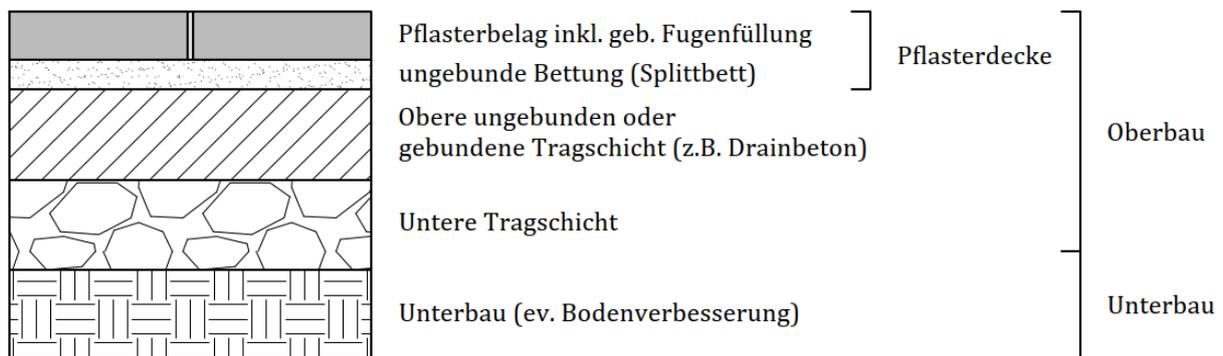


Abb. 2.4: Gemischte Bauweise

Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die Eigenschaften und die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Bauweisen. Bei Überlegungen zu der Wahl der Bauweise, sind demnach viele Faktoren zu beachten. [6][21]

Tabelle 2.3: Vergleich der Bauweisen gemäß RVS 08.18.01 [6]

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

Die Ungebundene Bauweise besticht durch die einfache Bauausführung und die geringeren Kosten für Herstellung, Instandhaltung und Sanierung. Wie in der Einleitung (siehe 1.1) erwähnt, hat sie ausgesprochen positive Auswirkungen auf das Mikroklima durch die Entsiegelung von Flächen. Bei zu hohen Belastungen oder unsachgemäßer Ausführung kann es aber zu großen Verformungen kommen.

Die hohe Belastbarkeit und die einfache Reinigung der gebundenen Bauweise machen sie neben den vielen Gestaltungsmöglichkeiten zu einer guten Alternative zu Beton- oder Asphaltdecken. Die teure Herstellung und Instandhaltung und schwierige Sanierung sind neben der unvermeidbaren Rissbildung in den Fugen jedoch als Negativaspekte hervorzuheben.

Die Vorteile der gemischten Bauweise liegen darin, dass bei untergeordneten Flächen durch die Befestigung kein Fugenbewuchs und somit eine gute Reinigung möglich ist. Für höher belastete Flächen ist aufgrund fehlender Tragfähigkeit nicht geeignet.

2.5 Verwendete Materialien – Arten und Anforderungen

2.5.1 Pflastermaterialien

Bei der Materialwahl bieten Optik, Farbe, Pflasterformat, Verlegemuster usw. eine enorme Vielfalt an gestalterischen Möglichkeiten. Neben diesen Aspekten sind die Eigenschaften und Funktionalität des Materials von großer Bedeutung. Jede Verkehrsfläche hat ihre eigenen Nutzungs- und Belastungsanforderungen, welche vom Baustoff erfüllt werden müssen. Witterungs-, Tausalz- und Abriebbeständigkeit, Bruchfestigkeit, Gleit- und Rutschhemmung, aber auch der Reinigungs- und Pflegeaufwand im Unterhalt gehören zu den wichtigsten Eigenschaften einer fertigen Pflasterfläche.

Die RVS 08.18.01 [6] unterscheidet vier Arten von Pflastermaterialien:

- **Naturwerkstein**
- **Betonwerkstein**
- **Kombiplatten**
- **Klinker**

2.5.1.1 Naturwerkstein

Für die Verwendung von Natursteinen als Pflastersteine, sind Gesteine mit ausreichender Festigkeit zu verwenden. Hierfür werden am häufigsten Granit aber auch Quarzit, Basalt, Basaltlava, Porphyry, Grauwacke oder Diabas verwendet [22].



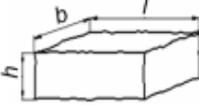
Abb. 2.5: Beispiel Natursteinpflaster [23]

Gemäß ÖN B 3108 [11] erfolgt die Einteilung in:

- **Pflasterplatten,**
- **Groß- und Kleinpflastersteine,**
- **Mosaikpflastersteine** und
- **Randeinfassungssteine.**

Die normgemäßen Abmessungen sind **Tabelle 2.4** bis **Tabelle 2.7** zu entnehmen.

Tabelle 2.4: Pflasterplatten – ÖN B 3108 [11]

Sorte	Type	Nenn-Maß			Durchschnittliche Stück-masse etwa	Bedarf für 1 m ² Fläche etwa	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme
		Breite <i>b</i>	Dicke <i>h</i>	Länge <i>l</i>			
		cm	cm	cm			
Pflasterplatten 	PP1	24	8	24	12	15,5	Oberfläche: Auftrittsflächen geflammt, gestockt, gestrahlt, gespalten Lagerflächen gleichlaufend zur Auftrittsfläche, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend PP1 bis PP2: Seitenflächen gespalten oder Seitenflächen gesägt ^a , Mindestrauigkeit gestrahlt ab Verwendungsklasse 4 gemäß Tabelle 8 PP3 bis PP6: Seitenflächen gesägt ^a , Mindestrauigkeit gestrahlt ab Verwendungsklasse 4 gemäß Tabelle 8 Qualitätsanforderung: gemäß ÖNORM EN 1341 sowie Tabelle 8 Übernahme: nach Fläche, einschließlich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm
	PP2	24	8	36	18	10,5	
	PP3	32	10	32	27	9,0	
	PP4	32	10	48	41	6,1	
	PP5	48	12	48	73	4,1	
	PP6	48	12	72	110	2,8	

^a Zulässig nur für die Verwendungsklassen 0, 1, 2 und 3 gemäß Tabelle 8.

Tabelle 2.5: Großpflastersteine – ÖN B 3108 [11]

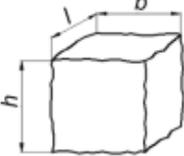
Sorte	Type	Nenn-Maß			Durchschnittliche Stück-masse etwa	Bedarf für 1 m ² Fläche etwa	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme	
		Breite <i>b</i>	Dicke <i>h</i>	Länge <i>l</i>				
		cm	cm	cm				
Großpflastersteine 	GPS1	18	18	18	16	27	Oberfläche: allseits gespalten Nur bei GPS4 und GPS6 gilt: Auftrittsflächen geflammt, gestockt, gestrahlt; Lagerflächen gleichlaufend zur Auftrittsfläche, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend; Seitenflächen gespalten oder Seitenflächen gesägt, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend Qualitätsanforderungen: gemäß ÖNORM EN 1342 sowie Tabelle 8 Übernahme: nach Masse - nur bei GPS4 und GPS6 nach Fläche -, einschließlich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm	
	GPS2			27	23	18		
	GPS3		13	18	11	27		
	GPS4			27	17	18		
	GPS5		9	18	8	27		
	GPS6			27	12	18		
	GPS7		16	16	16	11		33
	GPS8				24	16		23

Tabelle 2.6: Kleinpflastersteine – ÖN B 3108 [11]

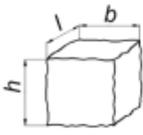
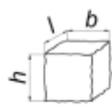
Sorte	Type	Nenn-Maß			Durchschnittliche massebezogene Fläche	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme
		Breite <i>b</i>	Dicke <i>h</i>	Länge <i>l</i>		
		cm	cm	cm	m ² /t	
Kleinpflastersteine 	KPS1	7	7	7	6,5	Oberfläche: allseits gespalten
	KPS2	9	9	9	5,0	Qualitätsanforderungen: gemäß ÖNORM EN 1342 sowie Tabelle 8
	KPS3	11	11	11	4,2	Übernahme: nach Masse

Tabelle 2.7: Mosaikpflastersteine – ÖN B 3108 [11]

Sorte	Type	Nenn-Maß			Durchschnittliche massebezogene Fläche	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme
		Breite <i>b</i>	Dicke <i>d</i>	Länge <i>l</i>		
		cm	cm	cm	m ² /t	
Mosaikpflastersteine 	MPS1	4,5	4,5	4,5	9,0	Oberfläche: allseits gespalten Qualitätsanforderungen: nur T2 gemäß ÖNORM EN 1342 sowie Tabelle 8 Übernahme: nach Masse

Jede Pflasterbefestigung ist durch eine Randeinfassung zu begrenzen. Gemäß ÖN B 3108 [11] werden Randeinfassungssteine in Leistensteine und Randsteine mit und ohne Anlauf unterteilt. Formen, Abmessungen und Anforderungen werden nachfolgend in **Tabelle 2.8** bis **Tabelle 2.10** angeführt.

Tabelle 2.8: Leistensteine – ÖN B 3108 [11]

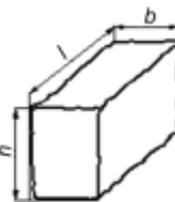
Sorte	Type	Nenn-Maß			Durchschnittliche längenbezogene Masse	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme
		Breite <i>b</i>	Höhe <i>h</i>	Länge <i>l</i>		
		cm	cm	cm	kg/m	
Leistensteine 	LS1	11	15	30 bis 100	44	Oberfläche: allseits gespalten
	LS2	11	17		50	Schnurkante: eine Längskante mit einer Genauigkeit von ± 6 mm von der theoretischen Geraden auf eine Länge von 50 cm.
	LS3	11	19		55	Qualitätsanforderungen: gemäß ÖNORM EN 1343 sowie Tabelle 8
	LS4	13	19		66	
	LS5	11	23		67	Übernahme: in ungebundenen Längen nach Meter einschließlich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm
	LS6	13	23		79	

Tabelle 2.9: Randsteine ohne Anlauf – ÖN B 3108 [11]

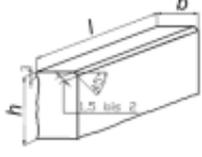
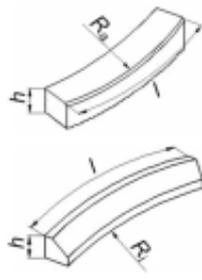
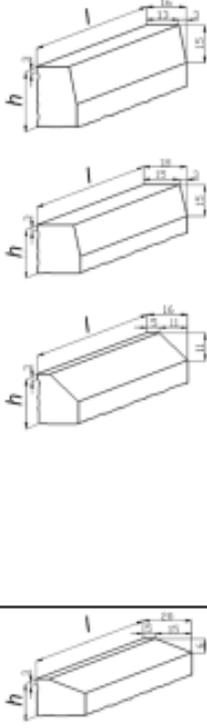
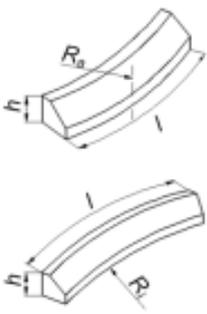
Sorte	Type	Nenn-Maß			Durchschnittliche längenbezogene Masse kg/m	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme
		Breite b cm	Höhe h cm	Länge l cm		
Randsteine ohne Anlauf 	ROA1	15	24	70 bis 150	99	Auftritts- und Ansichtsfläche: gestockt, geflammt oder gestrahlt
	ROA2	16	20		85	Lagerflächen und Rückseite: gleichlaufend zur Auftritts- oder Ansichtsfläche, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend
	ROA3	18	20		95	Kopfflächen: vollflächig, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend
	ROA4	20	20		106	Vorderkante: unter 45° etwa 1,5 cm gleichmäßig breit abgefast.
	ROA5	20	24		127	Qualitätsanforderungen: gemäß ÖNORM EN 1343 sowie Tabelle 8
	ROA6	30	20		159	Für Passstücke sind kürzere Werkstücke mit einer Länge von mindestens 50 cm zulässig.
	ROA7	32	24		204	Übernahme: in ungebundenen Längen nach Meter einschließlich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm
Bogenrandsteine ohne Anlauf 	Abmessungen den Typen ROA1 bis ROA7 entsprechend				Die Kopfflächen müssen radial verlaufen. Alle Flächen sind wie bei den geraden Steinen zu bearbeiten. Es sind jedoch her- stellungsbedingte Unterschiede in der Sichtflächenbearbeitung (gestockt – gestrahlt) zulässig. Bei Bestellung ist der Radius der bearbeiteten Vorderseite (An- sichtsfläche) anzugeben, und zwar: <ul style="list-style-type: none"> - R_a (Außenradius), wenn die längere Seite des Steines, - R_i (Innenradius), wenn die kürzere Seite des Steines als Ansichtsfläche bearbeitet ist. Übernahme nach Meter, gemessen an der Ansichtsfläche, einschließ- lich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm	

Tabelle 2.10: Randsteine mit Anlauf – ÖN B 3108 [11]

Sorte	Type	Nenn-Maß				Durchschn. längenbezogene Masse kg/m	Oberfläche, Qualitätsanforderungen und Übernahme
		Breite b	Höhe h	Anlauf (Schräge)	Länge l		
		cm	cm	cm	cm		
Randsteine mit Anlauf 	RMA1	oben 15 unten 18	20	3/15	70 bis 150	89	<p>Auftritts- und Ansichtsfläche: gestockt, geflammt oder gestrahlt</p> <p>Lagerflächen und Rückseite gleichlaufend zur Auftritts- oder Ansichtsfläche, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend</p> <p>Kopfflächen: vollflächig, Mindestrauigkeit gestrahlt entsprechend</p> <p>Qualitätsanforderungen: gemäß ÖNORM EN 1343 sowie Tabelle 8</p> <p>Für Passstücke sind kürzere Werkstücke mit einer Länge von mindestens 50 cm zulässig.</p> <p>Übernahme: in ungebundenen Längen nach Meter einschließlich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm</p>
	RMA2	oben 13 unten 16	20	3/15		79	
	RMA3	oben 13 unten 16	24	3/15		96	
	RMA4	oben 5 unten 16	20	11/11		69	
	RMA5	oben 5 unten 16	24	11/11		86	
	RMA6	oben 5 unten 20	15	15/6		68	
Bogenrandsteine mit Anlauf 	Abmessungen den Typen RMA1 bis RMA6 entsprechend					<p>Die Kopfflächen müssen radial verlaufen. Alle Flächen sind wie bei den geraden Steinen zu bearbeiten. Es sind jedoch herstellungsbedingte Unterschiede in der Sichtflächenbearbeitung (gestockt – gestrahlt) zulässig.</p> <p>Bei Bestellung ist der Radius der bearbeiteten Vorderseite (Ansichtsfläche) anzugeben, und zwar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - R_a (Außenradius), wenn die längere Seite des Steines, - R_i (Innenradius), wenn die kürzere Seite des Steines <p>als Ansichtsfläche bearbeitet ist.</p> <p>Übernahme nach Meter, gemessen an der Ansichtsfläche, einschließlich einer theoretischen Fugenbreite von 1 cm</p>	

Anforderungen an Naturwerksteine

Lt. RVS 08.18.01 [6] sind die Anforderungen an Naturwerksteine wie folgt in **Tabelle 2.11** gegliedert:

Tabelle 2.11: Anforderungen an den Naturwerkstein [6]

Eigenschaft	Prüfnorm
Leistungsanforderungen zur Produktkennzeichnung und Konformitätsbewertung	ÖNORMEN EN 1341, 1342, 1343
Abmessungen und mechanische Anforderungen	ÖNORM B 3108
Widerstand gegen Frost-Tauwechsel bei Einwirkung von Salzen	ÖNORM EN 1367-6

In der ÖN B 3108 [11] sind die Anforderungen an die Gesteinseigenschaften geregelt. Die **Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel** für Platten, Steine und Randeinfassungen wird mit der ÖN EN 12371:2010 geprüft. Hierbei darf der Festigkeitsabfall nach 56 Frost-Tau-Wechseln nicht mehr als 20% betragen. Weiters ist die **Beständigkeit gegen Taumittelangriff** zu prüfen. In der Gegenwart von Tausalzen wird der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel gemäß ÖN EN 1367-6 geprüft, wobei der Masseverlust höchstens 10% betragen darf.

Eine weitere wesentliche Anforderung wird bei Naturwerksteinen an die Festigkeit gestellt. Gemäß **Tabelle 2.12** [11] werden in Abhängigkeit der Fahrzeugbelastung bzw. des Verwendungszweckes **Verwendungsklassen** definiert.

Tabelle 2.12: Klassen in Abhängigkeit von der üblichen Anwendung [11]

Verwendungsklasse	Belastung	Verwendungszweck
0	keine	Dekoration
1	gering	private Nutzung; nur begangen und nicht befahren, z.B. Balkone
2	mäßig	privat genutzte Gärten oder Terrassen
3	Fahrzeuge bis 3,5 t ^a	private Garagen- und Hauszufahrten
4	Fahrzeuge bis 7,5 t ^a	Gewerblich genutzte Flächen, z.B. Gastronomiebereiche, Verkaufsflächen
5		Gewerblich genutzte Flächen mit erhöhten Anforderungen, z.B. bei Nutzung von Be- und Entladegeräten
6	alle Fahrzeuge	Öffentlicher Raum; gewerblich genutzte Flächen mit Lkw-Verkehr; Industrieanlagen; Befahrung durch Gabelstapler

^ahöchstzulässige Gesamtmasse

Tabelle 9 der ÖN B 3108 [11] weist den Verwendungsklassen Mindestanforderungen zu:

- Biegefestigkeit von Pflasterplatten und Randeinfassungen
- Druckfestigkeit von Pflastersteinen
- Abriebwiderstand
- Griffbarkeit

2.5.1.2 Betonwerkstein

Betonpflastersteine wurden ursprünglich als kostengünstiger Ersatz für Naturstein oder Klinker entwickelt. Heute haben sie durch die einfache Herstellung und die unzähligen Gestaltungsmöglichkeiten eine sehr große Bedeutung. Sie werden im Betonwerk aus einer Mischung von Zement, Zuschlag und Wasser in die unterschiedlichsten Formen, Farben und Größen gegossen.



Abb. 2.6: Beispiel Betonpflastersteine [24]

Gemäß Shackel, B. [25] können Betonpflastersteine aufgrund ihres Verbundes bzw. ihrer Wirkungsweise wie folgt eingeteilt werden:

Steine mit Horizontalverbund

Bei dieser Form erfolgt die Kraftübertragung lediglich über die Seitenflächen der Steine. Die Verlegung von Steinen mit Horizontalverbund ist die am häufigsten angewendete Variante, da zum einen die Herstellungskosten gering sind und zum anderen die Verlegung selbst aufgrund der kleinen Abmessungen und des geringen Gewichts sehr einfach ist. Die Steine wiegen weniger als 4,5 kg und weisen bei einer typischen Länge von 225 mm ein Breiten-Längen-Verhältnis von 0,5 auf.

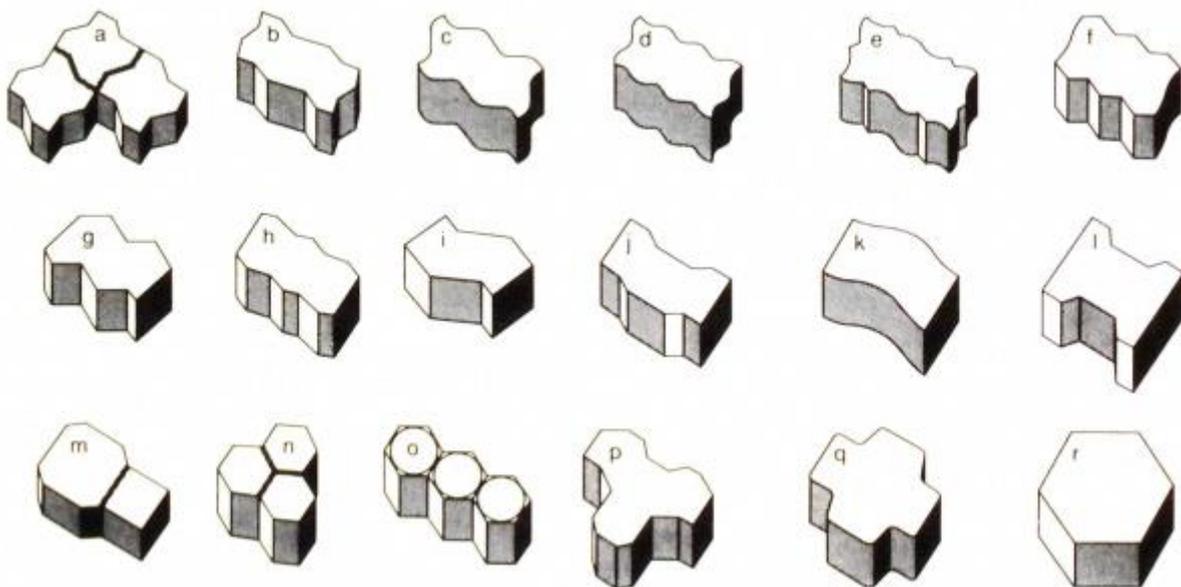


Abb. 2.7: Steine mit Horizontalverbund [25]

Steine und Platten mit Vertikalverbund

Die Steine erzeugen durch schräge Vorsprünge und Vertiefungen, welche um den Rand des Steines gezogen sind, einen vertikalen Verbund. Durch ihre komplizierte geometrische Form sind die Steine bzw. Platten aufwendiger herzustellen und teurer als solche mit Horizontalverbund. Mit einer Länge von bis zu 300 mm und einer Dicke von mindestens 100 mm ist die Verlegung zwar schwierig, jedoch erreicht der Aufbau dadurch eine hohe Belastbarkeit.

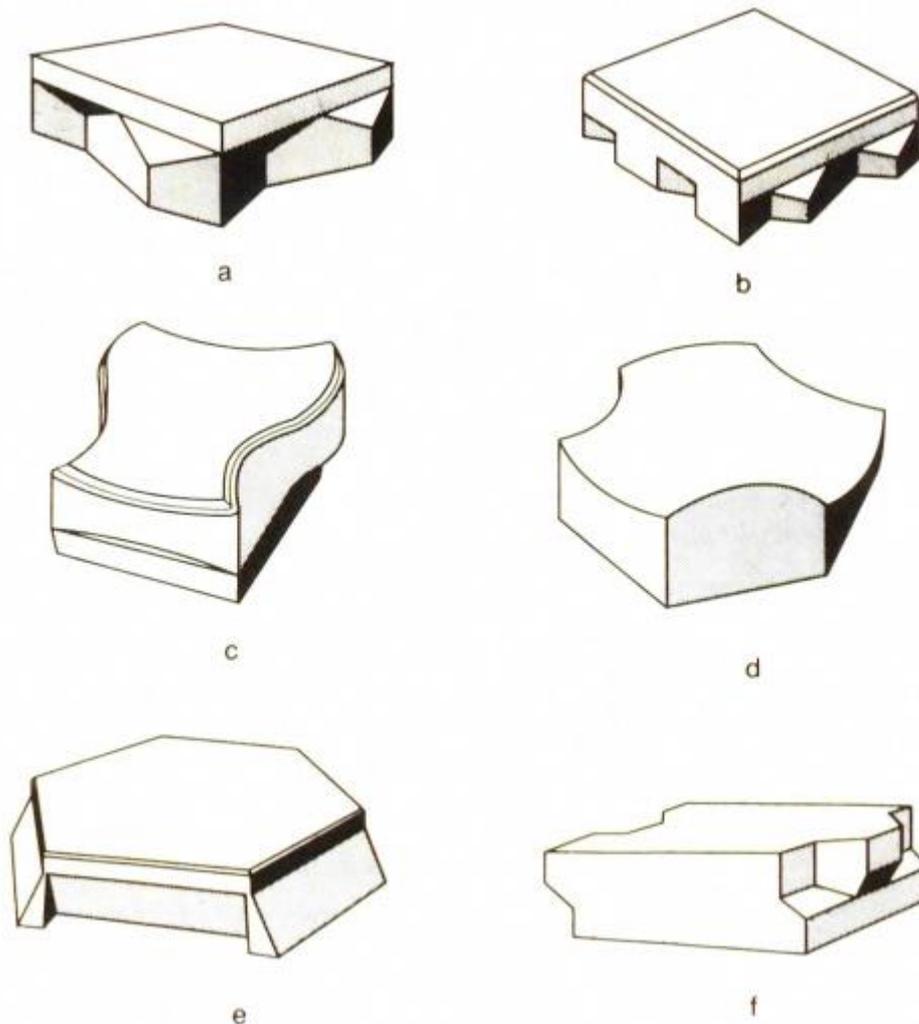


Abb. 2.8: Verbundsteine und Platten mit vertikalem Verbund [25]

Ökologische Steine

Vor allem für landschaftsgestalterische Zwecke werden durchlässige Pflasterungen verwendet. Hierbei handelt es sich um Betonsteine verschiedener Formen, welche sich durch Öffnungen, die sogenannten Kammern charakterisieren lassen. Die Unterteilung erfolgt in Rasensteine und Rasengittersteine. Zum einen fördert diese Form das Wachstum von Gräsern und Kräutern und zum anderen wird eine effektive und schonende Ableitung des Regenwassers in den Untergrund erreicht.

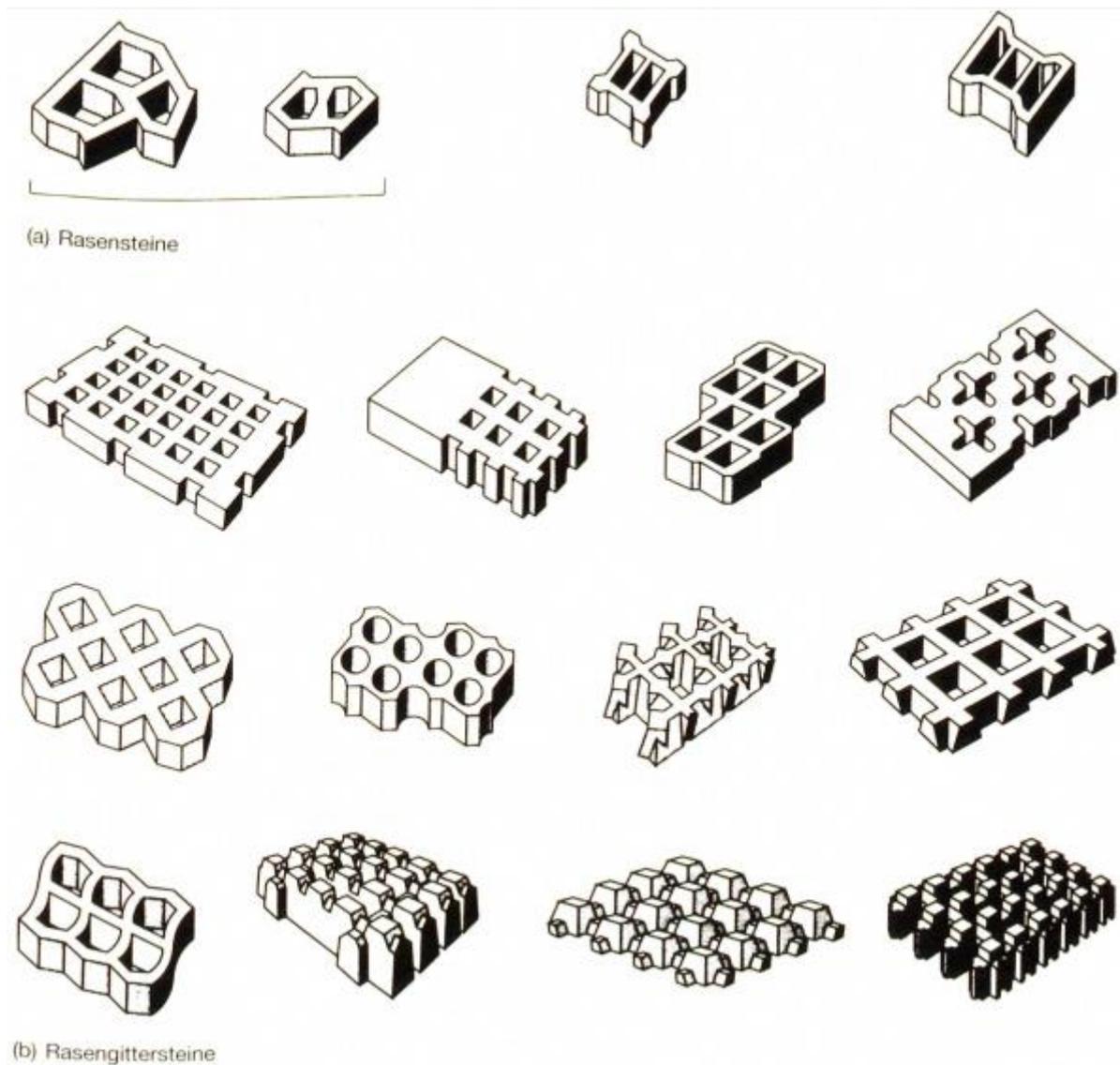


Abb. 2.9: Rasensteine und Rasengittersteine [25]

Nicht alle Steintypen sind unter Verkehrsbelastung gleich wirksam. Bei der enormen Vielfalt dient lt. Shackel, B. [26] die **Abb. 2.10** als Hilfestellung bei der Auswahl. Je nach Einsatz und Belastung können die Betonsteine in die Kategorien A, B und C unterteilt werden.

- Kategorie A: Die Steine dieser Kategorie verhindern durch ihre Geometrie und den Rundumverbund ein Öffnen der Fugen in Längs- und Querrichtung und somit einen optimalen Verbund.
- Kategorie B: Sind Verbundsteine, welche nur auf zwei Seiten ineinandergreifen und somit einen hohen Widerstand parallel zur Längsachse aufweisen.
- Kategorie C: In dieser Kategorie weisen die Steine gerade Seitenflächen auf und greifen somit auf keiner Seite ineinander. Hier wird der Verbund nur über die Maßhaltigkeit und das sachgerechte Verlegen erreicht.

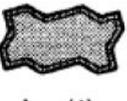
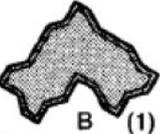
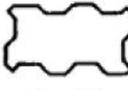
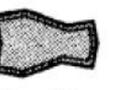
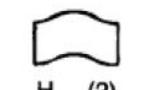
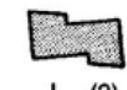
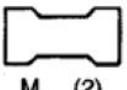
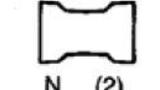
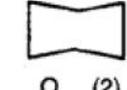
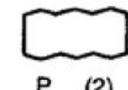
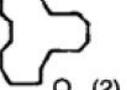
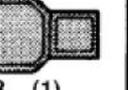
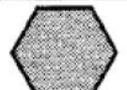
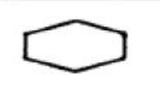
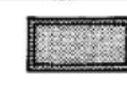
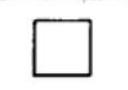
Kategorie A	 A (1)	 B (1)	 C (1)	 D (1)	 E (1)	 F (1)
Kategorie B	 G (2)	 H (2)	 I (2)	 J (2)	 K (2)	 L (2)
	 M (2)	 N (2)	 O (2)	 P (2)	 Q (2)	 R (1)
Kategorie C	 S (2)	 T (2)	 U (2)	 V (2)		
Bemerkungen	(1) geeignet für viele Verbände einschließlich Fischgrät		(2) nur für Läuferverband geeignet		 Steine, für die bekannte Untersuchungen zur Lastverteilung oder unter Verkehr durchgeführt wurden	

Abb. 2.10: Klassifikation von Betonverbundpflastersteinen [26]

Anforderungen an Betonwerksteine

Lt. RVS 08.18.01 [11] sind die Anforderungen an Betonwerksteine wie folgt in **Tabelle 2.13** gegliedert:

Tabelle 2.13: Anforderungen an den Betonwerkstein

Eigenschaft	Prüfnorm
Leistungsanforderungen zur Produktkennzeichnung und Konformitätsbewertung	ÖNORMEN EN 1338, 1339, 1340
Tausalzbeständigkeit und Widerstand gegen Abrieb	ÖNORM B 3258

Die ÖNORM EN 1338 [12] schreibt für die **Form und Maße** von Betonwerksteinen gewisse Grenzabmessungen und Abweichungen von Ebenheit und Wölbung vor. Da Beton kein natürlicher Werkstoff ist, werden besondere Voraussetzungen an die **physikalischen und mechanischen Eigenschaften** gesetzt:

- Witterungswiderstand
 - Wasseraufnahme

Tabelle 2.14: Wasseraufnahme [12]

Klasse	Kennzeichnung	Wasseraufnahme Masse-%
1	A	Keine Anforderung
2	B	≤ 6

- Frost-Tausalz-Widerstand: bei häufigem Kontakt mit Tausalzen müssen die Anforderungen nach **Tabelle 2.15** erfüllt werden.

Tabelle 2.15: Frost-Tausalz-Widerstand [12]

Klasse	Kennzeichnung	Masseverlust nach der Frost-Tausalz-Prüfung kg/m ²
3	D	≤ 1,0 Als Mittelwert mit keinem Einzelwert > 1,5

- Spaltzugfestigkeit
Gemäß ÖNORM EN 1338 [12] ist die charakteristische Spaltzugfestigkeit T nach Anhang F zu bestimmen. Sie darf nicht geringer sein, als 3,6 MPa, kein Einzelergebnis darf weniger als 2,9 MPa betragen und die Bruchlast muss größer als 250 N/mm sein.
- Abriebwiderstand
Dieser wird mit dem Abriebverfahren mit breiter Schleifscheibe nach Anhang G der ÖNORM EN 1338 [12] oder alternativ mit dem Prüfverfahren nach Böhme lt. Anhang H bestimmt. Das Ergebnis dieser Verfahren sind die Abriebwiderstandsklassen nach **Tabelle 2.16**.

Tabelle 2.16: Abriebwiderstandsklassen [12]

Klasse	Kennzeichnung	Anforderung	
		Bestimmt mit dem Prüfverfahren nach Anhang G	Alternativ bestimmt nach dem Prüfverfahren nach dem Anhang H
1	F	Keine Anforderung	Keine Anforderung
2	H	≤ 23 mm	≤ 20.000 mm ³ /5.000 mm ²
3	I	≤ 20 mm	≤ 18.000 mm ³ /5.000 mm ²

- Gleit-/Rutschwiderstand
Gemäß ÖNORM EN 1338 [12] besitzen Pflastersteine aus Beton ausreichenden Gleit-/Rutschwiderstand, sofern die Oberfläche nicht geschliffen oder poliert wird.
- Brandbeanspruchung
Pflastersteine aus Beton besitzen ohne Prüfung das Brandverhalten der Klasse A1 [12].

2.5.1.3 Kombiplatten

Kombiplatten sind eine Kombination aus Naturstein und Betonstein. Dabei werden Betonsteine- bzw. Betonplatten mit einer 2 bis 3 cm dicken Natursteinauflage beschichtet [15][27]. So werden die Eigenschaften der verschiedenen Materialien optimal ausgenutzt.

Anforderungen an Kombiplatten

Lt. RVS 08.18.01 [6] setzen sich die Anforderungen an Kombiplatten aus jenen der Naturwerksteine und der Betonwerksteine zusammen. Zusätzlich ist für den Kleber bzw. Verbindungsmörtel die Haftzugfestigkeit bzw. Abreißfestigkeit nachzuweisen, insbesondere bei Frost-Tausalz-Belastung und bei mechanischer, thermischer bzw. chemischer Beanspruchung. Für große Beanspruchungen kann der Trägerbeton auch mit einer Bewehrung ausgeführt werden.

2.5.1.4 Klinker

Die Pflasterklinkersteine werden im Werk durch Brennen von einem Gemisch aus Ton/Lehm, und Wasser hergestellt. Bei Klinker wird durch Sinterung die Wasseraufnahmefähigkeit be-

grenzt und somit Frostbeständigkeit erreicht. Die Farbauswahl bei Klinker ist sehr groß und wird durch den Eisen- oder Mangan-gehalt des Ausgangsmaterials bestimmt. Man unterscheidet Klinkerpflastersteine und Klinkerpflasterplatten, wobei Platten nicht für befahrene Bereiche zulässig sind. Klinkerpflaster wird heute eher für untergeordnete Zwecke verwendet. [22][27]



Abb. 2.11: Beispiel Klinkerpflaster [28]

Anforderungen an Klinkerpflaster

Lt. RVS 08.18.01 [6] sind die Anforderungen an Klinkerpflastersteine- und platten in der ÖNORM EN 1344 geregelt.

- Frost-Tauwiderstand
- Biegebruchlast
- Abriebwiderstand
- Rutsch-Gleitwiderstand

2.5.1.5 Verbandsarten

Als sogenannter Verband wird das Verlegemuster der Pflastersteine oder Pflasterplatten bezeichnet. Er ist neben der Steinform, Steingröße, Bauweise und dem Material ein wesentlicher Faktor für die Lastabtragung und Dauerhaftigkeit einer Pflasterdecke. Die nachfolgenden **Abb. 2.12** und **Abb. 2.13** zeigen die in der RVS 08.18.01 [6] angeführten Verbandsarten.

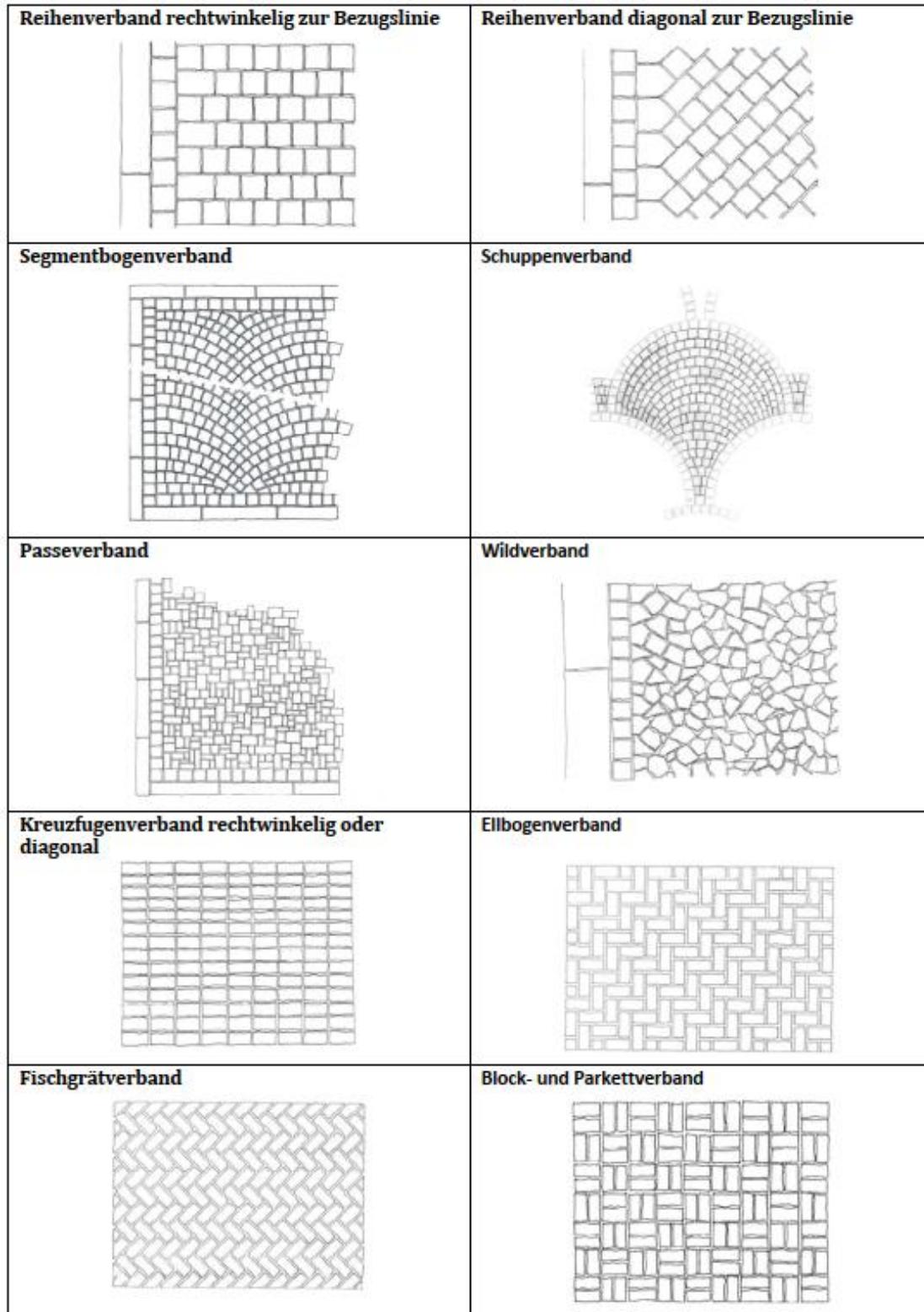


Abb. 2.12: Verbandsarten von Pflastersteindecken gemäß RVS 08.18.01 [6]

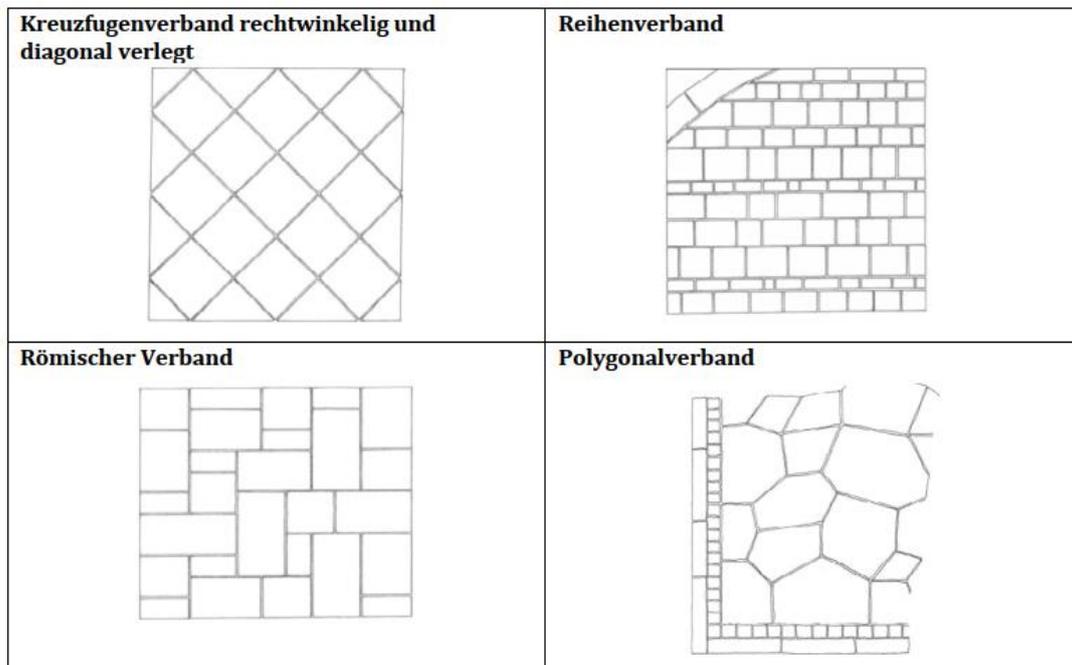


Abb. 2.13: Verbandsarten von Pflasterplattendecken gemäß RVS 08.18.01 [6]

Anhang 3 und 4 der RVS 08.18.01 [6] führen für jede Verbandsart die jeweiligen Anforderungen an die Pflastersteine bzw. -platten sowie Verbandsregeln für die Ausführung an. Zusätzlich wird angegeben, wie (gut) die Verbandswirkung erfolgt. Je nachdem, wie die Steine bzw. Platten zueinander liegen und wie gut der Verbund dieser ist, ändert sich das mechanische Verhalten der Schicht. Zusätzlich hat die Orientierung des Musters zur Verkehrsrichtung Einfluss auf das Langzeitverhalten der Pflasterfläche. [29]

Da nicht jede Steinform für jeden Verband geeignet ist, soll die **Tabelle 2.17** gemäß RVS 08.18.01 [6] eine Hilfestellung für die Wahl des Verbandes bieten.

Den Einfluss des Verbandes auf die Tragfähigkeit von Pflasterdecken in der ungebundenen Bauweise zeigt **Tabelle 2.18**.

Tabelle 2.17: Verbandsarten in Abhängigkeit von Steinform und -größe gemäß RVS 08.18.01 [6]

VERBANDSARTEN \ STEINFORM	STEINFORM							
	Großstein ab 14 cm Kantenlänge	Kleinstein 7/7/7 bis 11/11/11	Mosaikstein	Flusssteine, Wackensteine*)	Unregelmäßige Bruchsteine bzw. Polygonalplatten	Quadratische Steine oder Platten mit Bindersteinen	Rechteckige Steine oder Platten mit Bindersteinen	Rechteckige oder quadratische Steine oder Platten mit unterschiedlichen Formaten
Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie	+	0	0	0	-	+	+	+
Segmentbogenverband	0	+	+	0	-	-	-	-
Schuppen- bzw. Tulpenverband	-	+	+	0	-	-	-	-
Passeverband	-	+	+	-	-	-	-	-
Fischgrätverband	0	-	-	-	-	-	+	0
Blockverband	-	-	-	-	-	-	+	-
Kreuzfugenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie	0	0	0	-	-	0	0	-
Römischer Verband	-	-	-	-	-	-	-	+
Wildverband	-	-	-	+	+	-	-	-
Polygonalverband	-	-	-	-	+	-	-	+

*) in Abhängigkeit von Steinform und -größe

Legende:

+ empfehlenswert

0 machbar / nicht empfehlenswert

- nicht machbar

Tabelle 2.18: Zusammenhang zwischen Verbandsarten und Tragfähigkeit von Pflastersteindecken in ungebundener Bauweise [6]

Verbandsarten	Tragfähigkeit			
	gut	mittel	gering	Für LKW-befahrbare Verkehrsflächen nicht geeignet
Reihenverband rechtwinkelig zur Bezugslinie	x			
Reihenverband diagonal zur Bezugslinie	x			
Segmentbogenverband	x			
Schuppenverband			x	
Passeverband		x		
Fischgrätverband	x			
Block- und Parkettverband				x
Kreuzfugenverband				x
Römischer Verband		x		
Wildverband			x	
Polygonalverband				x

Abschließend zum Kapitel Verbandsarten sei noch erwähnt, dass es durch die Formvielfalt z.B. bei Betonverbundsteinen (siehe **Abb. 2.10**) die Möglichkeit von Spezialverbänden gibt, welche nicht unter die Verbandsarten aus **Abb. 2.12** und **Abb. 2.13** fallen.

2.5.2 Bettungsmaterial

Wie in **Kapitel 2.3** beschrieben, kann die Bettung je nach Bauweise ungebunden oder gebunden ausgeführt werden.

Ungebundenes Bettungsmaterial

Für die Regelbauweise wird ungebundenes Bettungsmaterial verwendet. Dabei sind gebrochene Gesteinskörnungen $C_{90/3}$ der Korngruppen 2/4 oder 2/8 aus natürlichen Gesteinen zu verwenden. Die Wasserdurchlässigkeit der verdichteten Bettung hat mehr als $5 \cdot 10^{-5}$ m/s zu betragen und die Schichtdicke beträgt lt. RVS 03.08.63 [7] 40 mm. Gemäß RVS 08.18.01 [6] haben die Gesteinskörnungen den Kriterien der ÖNORM EN 13242 zu entsprechen und für Qualitätsanforderungen gilt die ÖNORM B 3132 (siehe **Tabelle 2.19**). Zusätzlich hat das Material durch Orientierung an den Sieblinienbereichen aus Anhang 1 (Abb. 5 und 6) der RVS filterstabiles Verhalten vorzuweisen.

Tabelle 2.19: Anforderungen an ungebundenes Bettungsmaterial [6]

Kriterien	Mindestanforderungen
Korngrößenverteilung	G _C 85-15
Kornform von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-4	SI ₂₀
Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-5	C _{90/3}
Gehalt an Feinanteilen in groben Gesteinskörnungen (d ≥ 1 und D > 2 mm)	f ₂
Widerstand gegen Zertrümmerung von grober Gesteinskörnung gemäß ÖNORM EN 1097-2, geprüft an der Kornklasse 8/11 für die LK1,3 gemäß RVS 03.08.63 oder bei ÖPNV.	LA ₂₀
Widerstand gegen Zertrümmerung von grober Gesteinskörnung gemäß ÖNORM EN 1097-2, geprüft an der Kornklasse 8/11 für die LK0,4, LK0,1 und LK 0,05 gemäß RVS 03.08.63.	LA ₂₅
Wasseraufnahme	WA ₂₄₁
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit *)	F1

*) nur wenn WA₂₄₁ nicht erfüllt ist

Gebundenes Bettungsmaterial

Für das Gebundene Bettungsmaterial wird nach RVS 08.18.01 [6] entweder bauseitig gemischter Bettungsmörtel oder Bettungswerktrockenmörtel verwendet.

- Bauseitig gemischter Bettungsmörtel:
Darunter werden Gemische aus Zement und Gesteinskörnungen verstanden. Der Zementgehalt soll mindestens 250kg/m³ betragen und der W/B-Wert hat zwischen 0,35 und 0,40 zu liegen.
- Bettungswerktrockenmörtel
Hierbei handelt es sich um werkseitig trockengemischte, qualitätsüberwachte Fertigmörtel mit garantierter Beständigkeit gegen Frost.

Die Mindestanforderungen an Mörtel können im Labor oder auf der Baustelle überprüft werden (siehe **Tabelle 2.20**).

Tabelle 2.20: Anforderungen an gebundenes Bettungsmaterial [6]

Mindestanforderungen im Labor hergestellten Prismen (40x40x160 mm) bzw. Scheiben DN 200 mm	
Druckfestigkeit	≥ 12 MPa
Biegezugfestigkeit	≥ 2,5 MPa
Dichte im eingebauten Zustand	≥ 1.750 Mg/m ³
Wasserdurchlässigkeit (bei einem Verhältnis der Wassersäule zu Schichtdicke von i=4)	≥ 5.10 ⁻⁵ m/s
Nachweis der Frostbeständigkeit	
Mindestanforderung für auf der Baustelle hergestellte Scheiben DN 200 mm	
Druckfestigkeit	≥ 6 MPa
Dichte im eingebauten Zustand	≥ 1.750 Mg/m ³
Wasserdurchlässigkeit (bei einem Verhältnis der Wassersäule zu Schichtdicke von i=4)	≥ 5.10 ⁻⁵ m/s

2.5.3 Fugenmaterial

Wie auch bei der Bettung, wird die Fugenfüllung je nach Bauweise ungebunden oder gebunden ausgeführt. Die zu verwendenden Materialien und Anforderungen sind dem für die Bettung sehr ähnlich, die Unterschiede werden nachfolgend erklärt.

Ungebunden

Für die Regelbauweise wird ungebundenes Fugenmaterial verwendet und dabei sind gebrochene Gesteinskörnungen C_{90/3} der Korngruppen 0/4 oder 0/8 aus natürlichen Gesteinen zu verwenden. Im Gegensatz zum Bettungsmaterial ist somit ein gewisser Feinanteil erforderlich. Das Größtkorn darf nicht größer als 40 % bis 50 % der maximal zulässigen Fugenbreite sein.

Wie bei der Bettung haben die Gesteinskörnungen gemäß RVS 08.18.01 [6] den Kriterien der ÖNORM EN 13242 zu entsprechen und für Qualitätsanforderungen gilt die ÖNORM B 3132 (siehe **Tabelle 2.21**). Zusätzlich hat das Material durch Orientierung an den Sieblinienbereichen aus Anhang 2 (Abb. 7 und 9) der RVS filterstabiles Verhalten vorzuweisen.

Tabelle 2.21: Anforderungen an ungebundenes Fugenmaterial [6]

Kriterien	Mindestanforderungen
Korngrößenverteilung	G _F 85, G _A 85
Kornform von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-4	SI ₂₀
Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-5	C _{90/3}
Feinanteil in feinen Gesteinskörnungen (d = 0 und D ≤ 6,3 mm)	max. f ₁₆ ¹⁾
Feinanteil in Gesteinskörnungsgemischen (d = 0 und D > 6,3 mm)	max. f ₁₆ ¹⁾
Widerstand gegen Zertrümmerung von grober Gesteinskörnung gemäß ÖNORM EN 1097-2, geprüft an der Kornklasse 8/11 für die LK1,3 gemäß RVS 03.08.63 oder bei ÖPNV.	LA ₂₀
Widerstand gegen Zertrümmerung von grober Gesteinskörnung gemäß ÖNORM EN 1097-2, geprüft an der Kornklasse 8/11 für die LK0,4, LK0,1 und LK 0,05 gemäß RVS 03.08.63.	LA ₂₅
Wasseraufnahme	WA ₂₄ 1
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit ²⁾	F1

1) Wenn der Gehalt an Feinanteilen < 0,063 mm mehr als 7 M-% beträgt, ist der Nachweis der Frostsicherheit gemäß ÖNORM B 4811 mittels Mineralkriteriums am angelieferten Material gemäß ÖNORM B 4810 zu erbringen.

2) Nur, wenn WA₂₄1 nicht erfüllt ist.

Gebunden

Für die gebundene und gemischte Bauweise wird hydraulisch gebundenes Fugenmaterial verwendet. Hierbei handelt es sich Zementmörtel, welche im Werk als trockengemischte Fertigmörtel hergestellt werden. Die Druckfestigkeit darf keinesfalls größer sein als die der Steine oder Platten und muss an die auftretende Belastung angepasst sein. **Tabelle 2.22** zeigt die unter Laborbedingungen geprüften Anforderungen an das Fugenmaterial.

Tabelle 2.22: Anforderungen an gebundenes Fugenmaterial [6]

Mindestanforderungen im Labor geprüft	
Druckfestigkeit	≥ 25 MPa < 40 MPa
Biegezugfestigkeit	≥ 5MPa
Nachweis der Frostbeständigkeit	
Nachweis der Tausalz widerstandsfähigkeit	

2.5.4 Tragschichten

Wie unter **Kapitel 2.3** beschrieben, wird bei Tragschichten im Straßenbau zwischen ungebundenen und gebundenen unterschieden.

Für ungebundene Tragschichten gelten die Bestimmungen der RVS 08.15.01 [8]. Es werden gemäß ÖNORM EN 13242 unter Berücksichtigung der ÖNORM B 3132 Gesteinskörnungsgemische

aus natürlichen und rezyklierten oder industriell hergestellten Gesteinskörnungen verwendet. Das Material muss ausreichend verdichtbar und tragfähig sein. Die weiteren Anforderungen sind in Tabelle 1 der RVS 08.15.01 angeführt.

Die RVS regelt nicht nur Anforderungen an das Material, sondern auch an die eingebaute Tragschicht. **Tabelle 2.23** zeigt die Grenzwerte für E-Modul, Proctordichte, Sollhöhe und Ebenheit der Schicht und die Zuordnung zu den Lastklassen.

Tabelle 2.23: Mindestanforderungen an ungebundene Tragschichten [8]

		ungebundene Obere Tragschicht					ungebundene Untere Tragschicht			ungebundene Tragschichten ohne gebundene Überbauung		
		für alle LK		LK II bis VI			für alle LK					
Kennwert	Klasse Prüfnorm	U1 ²⁾	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	
E_{v1} ³⁾	ÖNORM B 4417	≥ 120 MN/m ²	≥ 90 MN/m ²			≥ 75 MN/m ²	≥ 72 MN/m ²		≥ 60 MN/m ²	keine Anforderung, bzw. im Bauvertrag festzulegen		
E_{v2}/E_{v1} ³⁾	ÖNORM B 4417	$\leq 2,2$										
D_{Pr}	ÖNORM B 4414-2	≥ 103 %					≥ 101 %					
Sollhöhe ³⁾	—	± 2 cm ⁴⁾					± 3 cm					
Ebenheit ³⁾	ÖNORM EN 13036-8, 4-m-Richtlatte	≤ 15 mm/4 m					—					

¹⁾ Bei Nichterreichen des geforderten Wertes E_{v2}/E_{v1} sind geeignete Maßnahmen zu setzen. In Zweifelsfällen gilt der Verdichtungsgrad D_{Pr} .

²⁾ U1 umfasst auch die Zentralgemischte Kantkörnung gemäß Bautype 2 der RVS 03.08.63

³⁾ Für die ungebundene Tragschicht auf ländlichen Straßen mit gebundener Überbauung ist der Grenzwert $E_{v1} \geq 60$ MN/m² mit $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ oder $E_{v1} \geq 45$ MN/m² mit $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$ einzuhalten. Im maßgeblichen Bauvertrag sind die Verdichtungsanforderungen zu präzisieren. Für die Sollhöhe ist eine Genauigkeit von ± 4 cm, für die Ebenheit ≤ 20 mm/4 m einzuhalten.

⁴⁾ Bei Höhegebundenheit der Fahrbahnoberkante (z.B. bei Anschlussstraßen, Ortsgebieten mit Einbauten, Randsteinen, in Tunneln) ist die Sollhöhe jedenfalls mit einer Genauigkeit von ± 1 cm einzuhalten.

Eine ungebundene Tragschicht darf im eingebauten Zustand nicht mehr als 45 cm dick sein und hat Mindestanforderungen zu E-Modul, Verformungsmodul, Proctordichte, Sollhöhe und Ebenheit zu erfüllen.

Bei der Pflasterbauweise hat jede Tragschicht eine Wasserdurchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-6}$ m/s (bei einem Verhältnis von Wassersäule zu Schichtdicke von $i=8$) vorzuweisen. [6] Aus diesem Grund wird für die gebundene Tragschicht im Regelfall Pflasterdrainbeton verwendet. Hierfür werden Gesteinskörnungen mit Zement unter der Rezepturempfehlung aus der RVS 08.18.01 [6] gemischt und in einer Schichtdicke von maximal 20 cm eingebaut. Sollte die erforderliche Schicht größer als 20 cm sein, muss nass in nass mehrlagig eingebaut werden. Die Durchlässigkeit muss mit einem Ausschüttversuch überprüft werden. Die Eignung anderer gebundener oberer Tragschichten ist im jeweiligen Anwendungsfall zu überprüfen.

2.6 Herstellungsgrundsätze

Wie in **Kapitel 2.3** und **Abb. 2.1** bereits angeführt, ist es für die fachgerechte Ausführung einer Pflasterbauweise notwendig, den o.a. Schichtaufbau sachgemäß herzustellen. Die Baugrundsätze der einzelnen Schichten sind in den nachstehenden Kapiteln gemäß RVS 03.08.63 [7] zusammengefasst.

2.6.1 Einbau der Tragschichten

Zu Beginn muss der Untergrund auf ausreichende Tragfähigkeit geprüft und im gegebenen Fall einer Bodenverbesserung unterzogen werden um den Anforderungen nach RVS 08.03.01 [9] zu entsprechen. Nach der Überprüfung, ob der Untergrund ausreichend tragfähig ist, sind die zu erwartenden Belastungen zu berechnen und mit Hilfe der Bemessungstabellen aus der RVS 03.08.63 [7] Bautypen PF1 bis PF8 festzulegen. Je nach Anforderung an den Aufbau lassen sich die Tragschichten wie folgt unterteilen:

- Ungebundene Tragschicht
 - Ungebundene untere Tragschicht = Frostschuttschicht
 - Ungebundene obere Tragschicht
- Gebundene Tragschicht – ersetzt die ungebundene obere Tragschicht
 - Tragschicht aus Pflasterdrainbeton
 - (Bituminöse Tragschicht)

Wie unter **2.5.4** beschrieben wird bei Pflasterflächen für die gebundene Tragschicht Pflasterdrainbeton verwendet, da eine gewisse Wasserdurchlässigkeit gewährleistet sein muss.

Der Einbau aller Tragschichten erfolgt je nach Größe der Fläche händisch oder mittels Fertiger. Für die Verdichtung sind geeignete Verdichtungsgeräte in Abhängigkeit der Schichtdicke zu verwenden.

Bei allen Schichten ist darauf zu achten, dass das Material den Anforderungen entspricht und dass dieses mit dem geforderten Verdichtungsgrad eingebaut wird. Gegebenenfalls ist lagenweiser Einbau erforderlich. Bei der Herstellung der Tragschichten ist jedenfalls auf die projektgemäße Höhenlage und Ebenheit zu achten und dass kein spurfahrender Verkehr zugelassen ist. [15]



Abb. 2.14: Herstellung einer Tragschicht [30]

2.6.2 Herstellung der Randeinfassung

Wie der Name schon sagt, dienen Randeinfassungen zur Begrenzung von Pflasterflächen. Alle Arten von Pflastersteinen oder -platten sind mit einer Randeinfassung einzuspannen. Dabei wird diese in ein Mörtelbett auf einem Kofferbeton (erhärtete Betonunterlage) versetzt.

Die Unterkante der Randeinfassung muss jedenfalls tiefer liegen als die die Unterkante der angrenzenden Pflastersteindecke. Die Absatzhöhe darf maximal 75 % des Nennmaßes der Steinhöhe betragen und eine Mindesteinspannung von 5 cm muss eingehalten werden. [6]

Neben Randsteinen werden auch Saum-, Leisten-, Raseneinfassungs-, Groß- und Kleinsteine verwendet. Zu Zwecken der Entwässerung ist es möglich, die Randeinfassung als Spitzgräben oder Mulden auszuführen. Ausführungsbeispiele und Regelquerschnitte sind im Anhang 5 der RVS 08.18.01 angeführt. [6]



Abb. 2.15: Versetzen einer Randeinfassung [31]

2.6.3 Einbau der Bettung

Nach Fertigstellung der Tragschichten und Randeinfassungen beginnt die Herstellung der Pflasterdecke. Wesentlichen Einfluss auf das Gebrauchsverhalten des gesamten Aufbaus hat die Bettung. Wie unter 2.3 beschrieben, kann diese je nach Bauweise ungebunden oder gebunden ausgeführt werden.

Ungebunden

Für die Regelbauweise wird ungebundenes Bettungsmaterial verwendet, wobei Materialien nach 2.5.2 zu verwenden sind. Die Schichtdicke beträgt lt. RVS 03.08.63 [7] 40 mm. Ist die Bettungsschicht zu dick, kann es zu einer Verformung unter Verkehrsbelastung kommen (Spurinnenbildung); ist die Schicht zu dünn ausgeführt, wird die Verzahnung der Pflastersteine erschwert.



Abb. 2.16: Herstellung einer ungebundenen Bettung händisch li. [32] und maschinell re. [33]

Gebunden

Für die gebundene Pflasterbettung werden die unter 2.5.2 beschriebenen Bettungsmörtel oder Bettungswerk trockenmörtel verwendet. Abhängig von der Größe der Fläche wird die Bettung händisch mit Abziehlatten oder maschinell mittels Fertiger hergestellt.



Abb. 2.17: Herstellung einer gebundenen Bettung [34]

2.6.4 Verlegen des Pflasters

Mit der Verlegung der Pflastersteine oder Pflasterplatten wird die typische Oberfläche der Pflasterdecke hergestellt. Materialien und Anforderungen sind im **Kapitel 2.5.1** angeführt. Je nach Größe der zu verlegenden Fläche und Format des Pflasters, wird händisch oder maschinell mit Vakuumbedieneinheit oder Verlegemaschine verlegt.



Abb. 2.18: Händische Verlegung maschinelle li. [35] und maschinelle Verlegung mit Verlegemaschine re. [36]

2.6.5 Herstellung der Fugenfüllung

Wie auch bei der Bettung wird die Fugenfüllung je nach Bauweise ungebunden oder gebunden ausgeführt.

Ungebunden

Bei der ungebundenen Bauweise wird das Bettungsmaterial (siehe 2.5.3) in die Fugen eingebürstet und eingeschlämmt, wobei die Steine naturfeucht sein sollten. Die Fugenbreite beträgt 3 bis 5 mm und durch vollständiges Verfüllen der Fuge soll ein kontinuierlicher Fugenschluss hergestellt werden. Nach dem Verfüllen wird die Fläche mittels Rüttelgeräten mit Kunststoffbelag abgerüttelt, wodurch es zu einer Verdichtung des Fugenmaterials kommt. Die Fläche ist so oft zu Verfüllen und Rütteln, bis kein Nachsetzen der Fugenfüllung zu beobachten ist.



Abb. 2.19: Einbürsten des ungeb. Fugenmaterials li. und Rütteln der Fläche [37]

Ein wesentliches Kriterium bei der ungebundenen Bauweise ist die Filterstabilität. Alle eingesetzten Materialien müssen zueinander filterstabil sein (siehe Abb. 2.20). Atanasova beschäftigt sich in der Diplomarbeit ‚Filterstabilität von Bettungs- und Fugenmaterial von Pflasterdecken‘ ausführlich mit diesem Thema. [38]

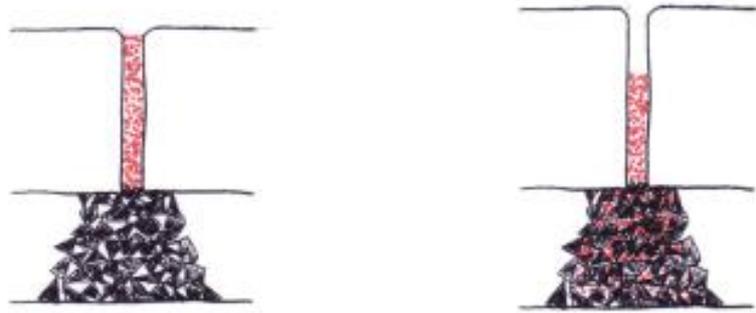


Abb. 2.20: Filterstabiles (li.) und nicht filterstabiles Material (re.) [15]

Gebunden

Für die gebundene und gemischte Bauweise wird hydraulisch gebundenes Fugenmaterial verwendet. Beim Verfugen sind die Steine oder Platten jedenfalls vorzunässen und/oder ggf. vorzubehandeln. Gemäß ÖN B 2214 ist die Fuge durch mehrmaliges Einbringen mit dem Fugenmaterial auf volle Höhe zu füllen. Unmittelbar danach muss die Fläche gerüttelt und die Oberfläche grob gereinigt werden. Nach mehrmaligem Verfüllen und Rütteln wird die Fuge nass auf nass verschlossen und die Fläche von überschüssigem Fugenmaterial befreit. [6][10]



Abb. 2.21: Einbringen des gebundenen Fugenmaterials [39]

2.7 Prüfungen

Die Prüfungen für Pflasterflächen sind in RVS 08.18.01 [6] und ÖN B 2214 [10] geregelt. Grundsätzlich wird zwischen Eignungsprüfung, Kontrollprüfung, Konformitätsprüfung und Übernahmeprüfung unterschieden. Letztere beinhaltet eine Vielzahl an Prüfungen, welche unter bestimmten Voraussetzungen unterschiedlich oft durchgeführt werden müssen (siehe **Tabelle 2.24**).

Tabelle 2.24: Übernahmeprüfungen und Anzahl der Prüfungen [10]

Art der Prüfung	Prüflosgröße und Anzahl der Prüfungen		
	≤ 500 m ²	> 500 m ²	Einlassungen
Lage- und Höhentoleranz	2	1 x je 250 m ²	1 x je 100 m
Formabweichungen	-	-	1 x je 100 m
Querneigung	2	1 x je 250 m ²	
Längsneigung der Rinne	-	-	
Ebenheit	2	1 x je 250 m ²	
Höhengleiche Anschlüsse	X	X	
Versatz	X	X	
Fugenbreiten	X	X	
Verbandsregeln	X	X	
Fugenfüllung	X	X	
Mörtelprüfung	-	1 x je 1.000m ²	1 x je 1.000m
Materialanforderungen	-*)	X	1 x je 250 m

*) Bei besonderen Anforderungen an die Materialien ist die Prüflosgröße entspr. herabzusetzen

3 MATERIALTECHNISCHE GRUNDLAGEN

In den folgenden Kapiteln werden Definitionen zu essenziellen Materialkennwerten und physikalischen Vorgängen erläutert, welche für die Pflasterbauweise relevant sind.

3.1 Materialkennwerte

Wie in der vorliegenden Arbeit bereits mehrfach beschrieben, sind für die Herstellung von Pflasterflächen je nach Bauweise verschiedene Materialien notwendig. Die wichtigsten Kennwerte werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. [27]

3.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist ein sehr bedeutsamer Kennwert für Pflastersteine bzw. -platten und wird nach **Gl. 1** bestimmt:

$$f_c = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Gl. 1}$$

F_{max}...Höchstlast [N]
A...Fläche [mm²]

3.1.2 Haftzugfestigkeit

Wie in **Kapitel 2.4** beschrieben, werden bei der gebundenen und gemischten Bauweise hydraulische Bindemittel für das Fugen- bzw. Bettungsmaterial verwendet. Wesentlicher Kennwert hierfür ist die Haftzugfestigkeit, welche die Verbindung zwischen Fugenmaterial und Stein/Platte bzw. Bettungsmaterial und Stein/Platte beschreibt. Die Gesteinsart ist von wesentlicher Bedeutung. [27]

Die Haftzugfestigkeit wird nach **Gl. 2** bestimmt:

$$f_u = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Gl. 2}$$

F_{max}...Bruchlast [N]
A...Fläche [mm²]

3.1.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit ist die Festigkeit eines Baustoffes bei gleichzeitigem Auftreten von Biegung und Zug und kann im Labor mittels 3- oder 4-Punkt-Biegezugversuch bestimmt werden. Sie ist bei der Pflasterbauweise für die Pflastersteine bzw. -platten und den Drainbeton relevant. Die Berechnung erfolgt nach **Gl. 3** [27]:

$$f_{ct} = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Gl. 3}$$

F_{max}...Bruchlast [N]
A...Fläche [mm²]

3.1.4 E-Modul

Der Elastizitätsmodul ist ein wesentlicher Materialkennwert, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei linear elastischem Verhalten beschreibt. Sowohl bei den Pflasterma-

aterialien, als auch bei allen eingebauten Schichten werden Anforderungen an den E-Modul gestellt. Er wird nach dem Hookeschen Gesetz definiert:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Gl. 4}$$

E...Elastizitätsmodul

σ ...Spannung [N/mm²]

ε ...elastische Dehnung [%]

Mit der Steigerung des E-Moduls nimmt die Spannung bei gleicher Dehnung proportional zu. Je größer die Steifigkeit eines Baustoffes ist, desto geringer ist die elastische Verformung bei gleicher Belastung.

3.1.5 Frost-Tausalz-Widerstand

Bei Verwendung von Baustoffen mit Taumittelkontakt ist der Widerstand gegen dieses nachzuweisen und somit für die Pflastersteine bzw. -platten von Bedeutung. Die Prüfung der Tausalzbeständigkeit erfolgt grundsätzlich mit einer definierten NaCl-Lösung. Je nach Material sind die Prüfungen in unterschiedlichen Normen geregelt. Siehe auch **Kapitel 2.5**. [27]:

3.1.6 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der thermische Ausdehnungskoeffizient beschreibt das Verhalten eines Stoffes bezüglich der Veränderung seiner Abmessungen bei Temperaturveränderungen und ist daher für alle gebundenen Schichten und Pflastermaterialien wichtig.

$$\alpha(t) = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad \text{Gl. 5}$$

$\alpha(t)$...linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Werkstoffes [K⁻¹]

ΔL ...Ausdehnung oder Schrumpfung bei Erwärmung oder Abkühlung [mm]

L_0 ...Länge bei Ausgangstemperatur [mm]

ΔT ...Temperaturbereich zwischen erster und zweiter Messung [°C]

3.1.7 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ beschreibt den Transport von Wärmeenergie durch einen Körper und ist daher für alle gebundenen Schichten und Pflastermaterialien wichtig. Sie hat die Einheit W/(m²K).

Der Wert der Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von Material, Porengehalt, Porenart und Feuchte. Beispielsweise liegen die Werte für λ bei Beton zwischen 1,15-2,50 W/(m²K) und für Granit bei ca. 2,80 W/(m²K). [27]

3.1.8 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c bezeichnet die Energiemenge, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um ein 1 K zu erwärmen.

$$c = \frac{J}{kgK} \quad \text{Gl. 6}$$

Bei Beton liegt der Wert c bei ca. 0,84 kJ/kgK und bei Granit bei ca. 0,75 kJ/kgK.

3.1.9 Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient beschreibt die Fähigkeit eines flüssigen oder gasförmigen Mediums, Wärme von der Oberfläche eines Stoffes abzuführen. Er ist abhängig von der Geometrie, der Art des Fluids, der Oberflächenbeschaffenheit und der Strömungsgeschwindigkeit. **Gl. 7** zeigt die Ermittlung der Wärmemenge unter Berücksichtigung des Wärmeübergangskoeffizienten. [27]

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad \text{Gl. 7}$$

Q...Wärmemenge

α ...Wärmeübergangskoeffizient

A...Größe der Übergangsfläche

t...Zeit, Dauer des Wärmeübergangs

ΔT ...Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Medium

3.2 Thermische Beanspruchungen

Bei Temperaturunterschieden innerhalb eines Mediums oder zwischen verschiedenen Medien tritt immer das Bestreben nach Temperaturnausgleich auf. Es fließt Wärmeenergie und somit wird das kältere Medium wärmer und das wärmere Medium kälter.

Durch thermische Beanspruchungen kommt es abhängig vom Material zu mehr oder weniger großen Dehnungen. Werden die Dehnungen behindert, kommt es zu Spannungen, welche zu Schäden führen. Dieses Phänomen ist vor allem bei der gebundenen Bauweise von Bedeutung, da durch das starre Verhalten unter Temperaturbeanspruchung zwangsläufig Risse entstehen. [40]

Die Wärmeübertragung kann gemäß [40] auf drei verschiedene Arten erfolgen:

3.2.1 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, welche ein Objekt abhängig von Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit abgibt oder aufnimmt. Die Strahlungsenergie wird beim Auftreffen auf Materie in Wärmebewegung der Moleküle umgesetzt und somit erfolgt die Erwärmung nur unmittelbar auf der bestrahlten Fläche. Die Strahlung kann durch strahlungsundurchlässige Stoffe abgeschirmt werden. [40]

3.2.2 Konvektion

Wärme kann mit der Bewegung von gasförmigen oder flüssigen Medien mitgeführt werden. Die Bewegung wird durch Druckunterschiede (Wind) oder die lokalen Temperaturen (thermischer Auftrieb) aufgrund der Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur beeinflusst. Das Aufsteigen von Warmluft bei Heizkörpern und das Abfallen von kalter Luft an Fenstern im Winter ist ein bekanntes Beispiel dafür. [40]

3.2.3 Wärmeleitung

Unter Wärmeleitung versteht man den Wärmefluss in einem Feststoff über Moleküle durch einen Temperaturunterschied. Diese Art des Energietransports erfolgt hauptsächlich in festen Stoffen und ist für den Wärmetransport über Bauteile sehr wesentlich. [40]

4 FELDVERSUCH

Dieser Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der in **Kapitel 1.2** erwähnten Teststrecke und dem damit verbundenen Versuchsaufbau. Die Aufgaben des Feldversuchs umfassten die Konzeption und bauliche Herstellung eines Testfeldes, die laufende Auswertung und Analyse der Messdaten über einen Zeitraum von 21 Monaten und Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD jeweils im Herbst der Jahre 2019 und 2020.

Hergestellt wurde das Testfeld am Rande des Forschungsparks der Firma Baunit in Wopfung 156, 2454 Waldegg. Die Fläche ist 15 m lang und setzt sich aus zwei jeweils 1,80 m breiten Feldern zusammen. Bei gleichem Plattenformat ist ein Feld in gebundener Bauweise, das andere Feld in ungebundener Bauweise ausgeführt, wobei das ungebundene Feld zwei unterschiedliche Plattenstärken aufweist. Für alle drei Pflasterflächen wurden Natursteinpflasterplatten (60/60 cm), die gleichen Fugenbreiten (10 mm) und dieselben Bettungs- (GK8) und Fugenmörtel (GK2) verwendet. Somit ergeben sich für die Teststrecke drei verschiedene Varianten:

- **Variante 1:** Gebundene Bauweise auf Drainbeton – 8 cm Natursteinplatte
- **Variante 2:** Ungebundene Bauweise auf Drainbeton – 8 cm Natursteinplatte
- **Variante 3:** Ungebundene Bauweise auf Drainbeton – 14 cm Natursteinplatte

Die Oberbauvarianten mit dem Aufbau der einzelnen Schichten sind in **Abb. 4.1** dargestellt.



Abb. 4.1: Oberbauvarianten

Für das Monitoring wurden Sensoren an verschiedenen Positionen verbaut. Diese zeichnen zum einen Temperatur und Bodenfeuchte in unterschiedlichen Schichten, und zum anderen die Horizontalverschiebung der einzelnen Flächen auf. Die Aufzeichnung der Daten erstreckt sich über den Zeitraum Juli 2019 bis März 2021.

Die genauen Abmessungen und die Instrumentierung werden im **Kapitel 4.1** näher ausgeführt.

4.1 Beschreibung des Testfelds

In **Abb. 4.2** ist das Testfeld mit der Aufteilung der Oberbauvarianten dargestellt. Die Verlegung der Pflasterplatten erfolgte im Reihenverband. An einem Ende des Testfeldes wurde ein starres Widerlager vorgesehen um Ausdehnungen in dieser Richtung zu verhindern. Das andere Ende des Testfeldes wurde frei gelassen, um hier Ausdehnungen zuzulassen. Aufgrund der vorliegenden Platzverhältnisse wurden die zwei Pflasterflächen jeweils mit einer Länge von 15 m und einer Breite von 1,80 m geplant. Um seitliche Einflüsse auszuschließen, wurden die Felder ohne Randeinfassung aber mit einem Abstand von ca. 20 cm nebeneinander angeordnet.

Abb. 4.3 zeigt das Testfeld vor Ort mit Blick vom starren zum beweglichen Ende.

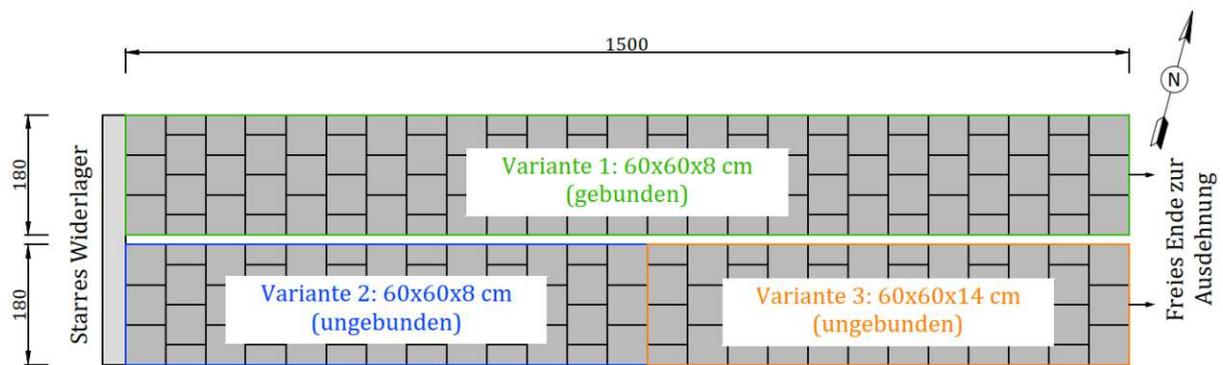


Abb. 4.2: Layout Testfeld

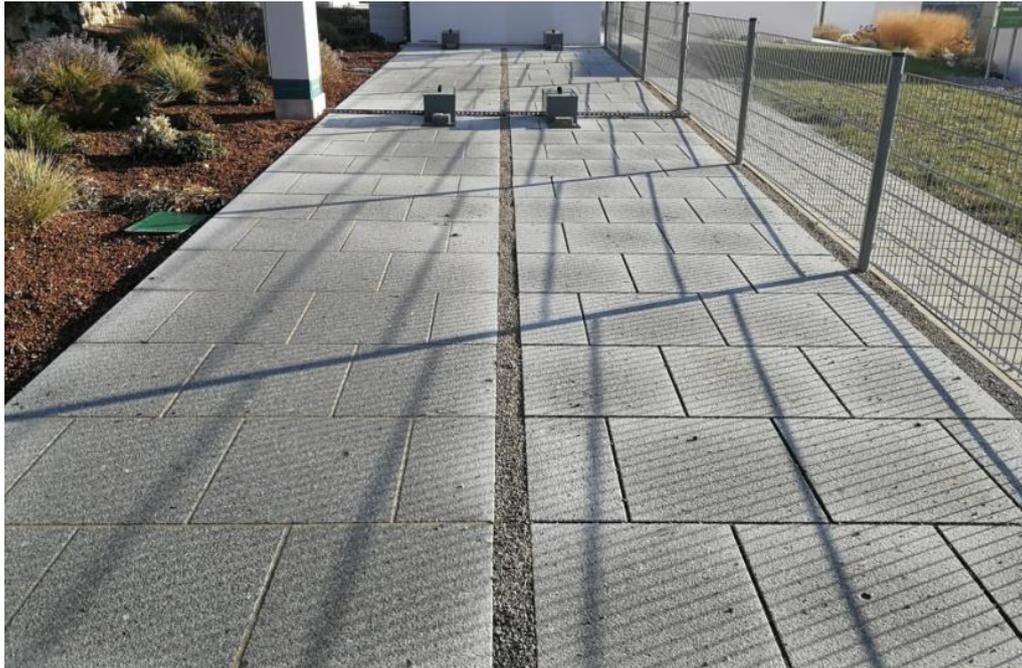


Abb. 4.3: Überblick Testfeld

4.1.1 Instrumentierung

Zur kontinuierlichen Erfassung der tatsächlichen Verschiebungen unter klimatischen Bedingungen wurden auf jeder Pflasterfläche zwei Lasersensoren zur Distanzmessung inkl. Reflektor angeordnet. Je einer in Feldmitte (ca. 7,5 m) und einer am Feldende in der vorletzten Pflasterreihe (ca. 15 m). Um die Abhängigkeit der Verschiebungen von der Temperatur zu erfassen, wurden in den Oberbauvarianten 1 und 2 Temperatursensoren in drei Schichttiefen eingebaut (Oberfläche, Bettung und Tragschicht). In **Abb. 4.4** ist die Lage der Sensoren im Grundriss und im Querschnitt dargestellt. Insgesamt wurden 4 Wenglor CP35MHT80 Laserdistanzsensoren und 6 PT100 Temperatursensoren verbaut.

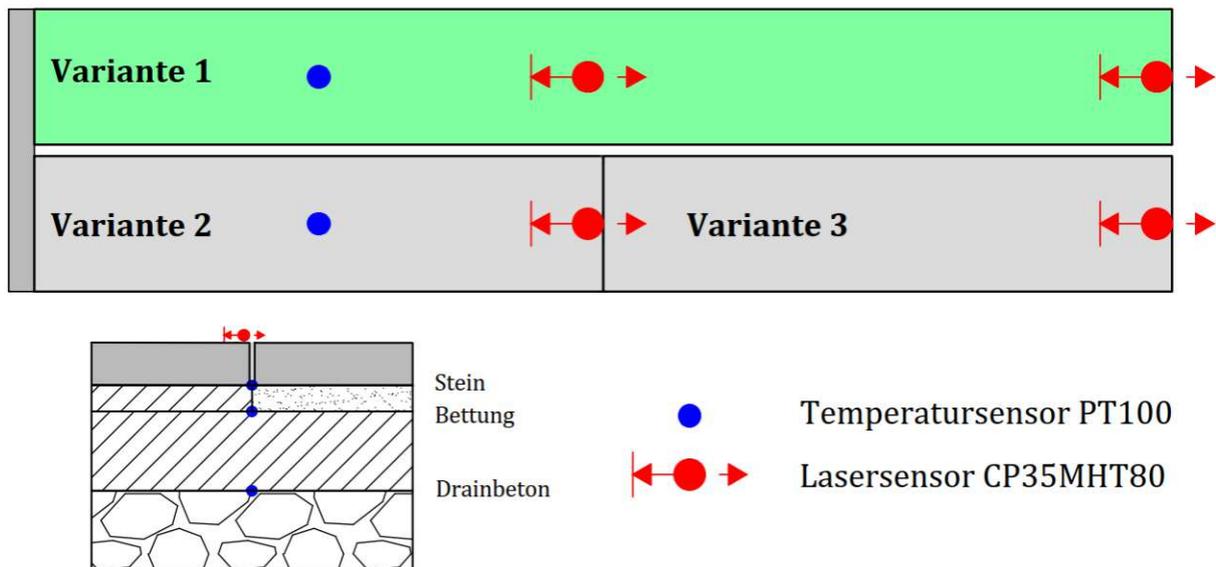


Abb. 4.4: Instrumentierung

In der ungebundenen Variante wurden zusätzlich Bodenanalysesensoren der Firma *Scantronic Mugrauer GmbH* zur Überwachung und Analyse der Feuchtigkeit, der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur im Boden an drei verschiedenen Stellen verbaut, wobei für die Auswertung nur die Daten der Bodenfeuchte herangezogen wurden. Nachstehende Aufzählung beschreibt die Positionen der Sensoren:

- oberhalb Drainbeton unter der Fuge
- oberhalb Drainbeton unter der Platte
- unterhalb Drainbeton unter der Fuge

Damit kann der Feuchteintrag in der ungebundenen Bauweise und ein möglicher Zusammenhang von Temperatur, Feuchtigkeit und Verschiebung hergeleitet werden.

Ergänzend wurden vom angrenzenden Viva-Forschungspark die Daten der Wetterstation (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Regenmenge, Windrichtung und Windgeschwindigkeit) zur Verfügung gestellt, wobei nur die Daten der Lufttemperatur und der Niederschlagsmenge für die Auswertung berücksichtigt wurden.

4.2 Messdatenanalyse

Die Messdaten des Testfeldes sowie der Wetterstation wurden für die Auswertung als Stundenwerte in einer Datenbank abgespeichert. Die aktuelle Analyse umfasst einen Zeitraum von 21 Monaten (01.07.2019 bis 31.03.2021). Beim Start der Datenerfassung herrschte eine Lufttemperatur von ca. 20 °C und alle Distanzsensoren wurden auf die Verschiebung 0,00 mm zurückgesetzt.

Für die bessere Lesbarkeit dieses Kapitels und zur Orientierung in den nachfolgenden Darstellungen ist in **Tabelle 4.1** eine Legende mit Farb- und Liniencodes angeführt.

Tabelle 4.1: Legende Auswertungen

Auswertung	Farbe	Linie
Lufttemperatur Wetterstation	Lila	Linie mit Quadraten
Aufbautemperatur geb. 8cm - PFLASTERPLATTE (Var. 1)	türkis	durchgezogen
Aufbautemperatur geb. 8cm - BETTUNG (Var. 1)	türkis	strichliert
Aufbautemperatur geb. 8cm - DRAINBETON (Var. 1)	türkis	punktiert
Aufbautemperatur ungeb. 8cm - PFLASTERPLATTE (Var. 2)	blau	durchgezogen
Aufbautemperatur ungeb. 8cm - BETTUNG (Var. 2)	blau	strichliert
Aufbautemperatur ungeb. 8cm - DRAINBETON (Var. 2)	blau	punktiert
Bodenfeuchte oberhalb Drainbeton FUGE (Var. 2)	grün	durchgezogen
Bodenfeuchte oberhalb Drainbeton unter PLATTE (Var. 2)	grün	strichliert
Bodenfeuchte unterhalb Drainbeton Fuge (Var. 2)	grün	punktiert
Temperatur (Bodenfeuchtesensor) oberhalb Drainbeton FUGE (Var. 2)	grau	Linie mit Quadraten durchgezogen
Temperatur (Bodenfeuchtesensor) oberhalb Drainbeton unter PLATTE (Var. 2)	grau	Linie mit Quadraten strichliert
Temperatur (Bodenfeuchtesensor) unterhalb Drainbeton Fuge (Var. 2)	grau	Linie mit Quadraten punktiert
Niederschlag Wetterstation	lavendel	Linie mit Punkten
Relativverschiebung geb. 8cm - FELDMITTE (Var. 1)	orange	durchgezogen
Relativverschiebung geb. 8cm - FELDENDE (Var. 1)	orange	strichliert
Relativverschiebung ungeb. 8cm - FELDMITTE (Var. 2)	gelb	durchgezogen
Relativverschiebung ungeb. 14cm - FELDENDE (Var. 3)	gelb	strichliert

Bei der Überprüfung der Daten und Darstellung der Monatsmittelwerte über den gesamten Analysezeitraum, wurden sowohl bei den im Aufbau verbauten Temperatur-, als auch bei den Verschiebungssensoren Auffälligkeiten hinsichtlich Plausibilität erkannt.

Die aufgezeichneten Temperaturen im Aufbau beginnen in allen Schichten ab August 2020 stark zu fallen. Im Herbst 2020 reichen die Temperaturen in den Schichten von -10 °C bis -30 °C, wobei die Tendenz auch nach den Wintermonaten stark fallend ist (siehe **Abb. 4.5**). Lediglich der Sensor im Drainbeton in der ungebundenen Variante 2 zeigt realistische Werte. Nach Abgleich mit den Temperaturaufzeichnungen der Wetterstation und Rücksprache mit Verantwortlichen von Baunit, konnte ein Defekt an den Temperatursensoren festgestellt werden.

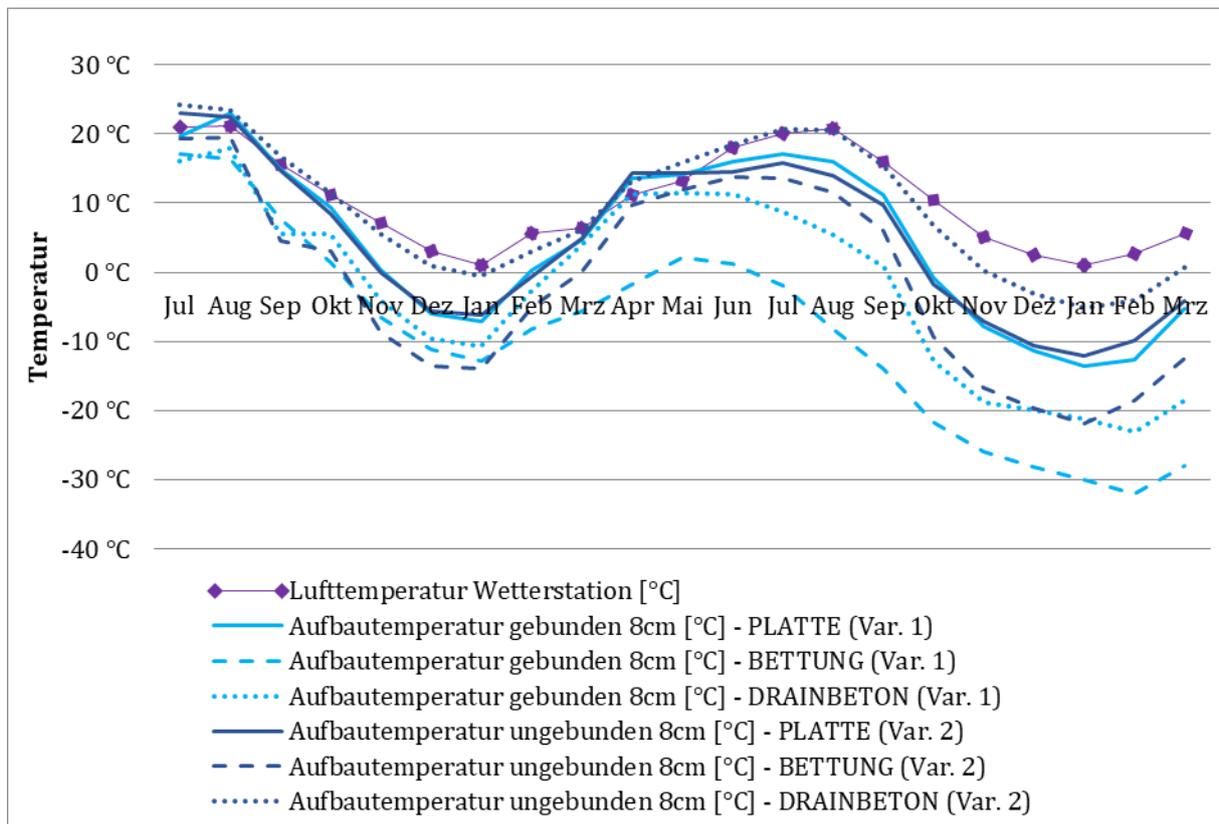


Abb. 4.5: Aufbau- und Lufttemperatur über gesamten Analysezeitraum

Im ersten Aufzeichnungsjahr erscheinen die Daten der Verschiebungssensoren plausibel. Am 24.09.2019 wurden für die Durchführung eines Tragfähigkeitsversuches die Lasersensoren in Feldmitte abmontiert und nach der Versuchsdurchführung wieder sachgemäß montiert. Im Anschluss muss der Sensor wieder auf null gesetzt werden.

Ab August 2020 wurden sowohl beim Verschiebungssensor der gebundenen, als auch der ungebundenen Variante in Feldmitte äußerst starke und nicht nachvollziehbare Sprünge beobachtet. Änderungen von Dehnung und Stauchung dieser Art innerhalb kurzer Zeit sind nicht realistisch (siehe **Abb. 4.6**).

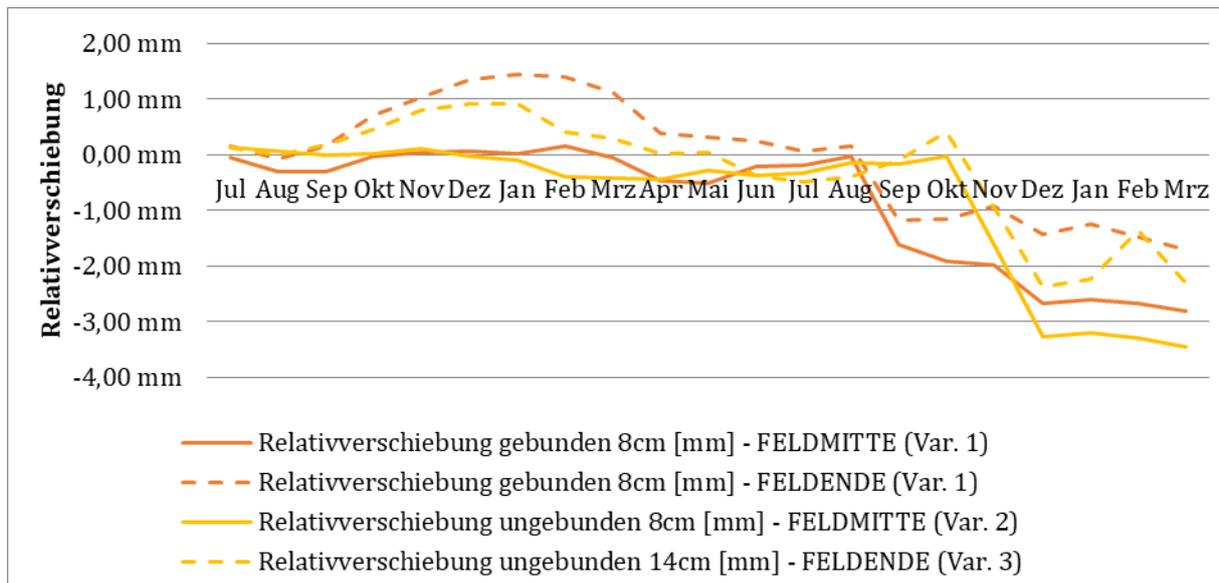


Abb. 4.6: Verschiebungsverlauf über gesamten Analysezeitraum

Die Daten des Bodenfeuchtesensors wurden halbstündlich über denselben Zeitraum aufgezeichnet. Dabei sind Ausfälle von Oktober 2019 bis Dezember 2019, von Juli 2020 bis November 2020 und Teilausfälle von Jänner 2021 bis April 2021 zu beobachten. In **Abb. 4.7** sind beim Vergleich mit der Lufttemperatur der Wetterstation die Ausfälle klar ersichtlich.

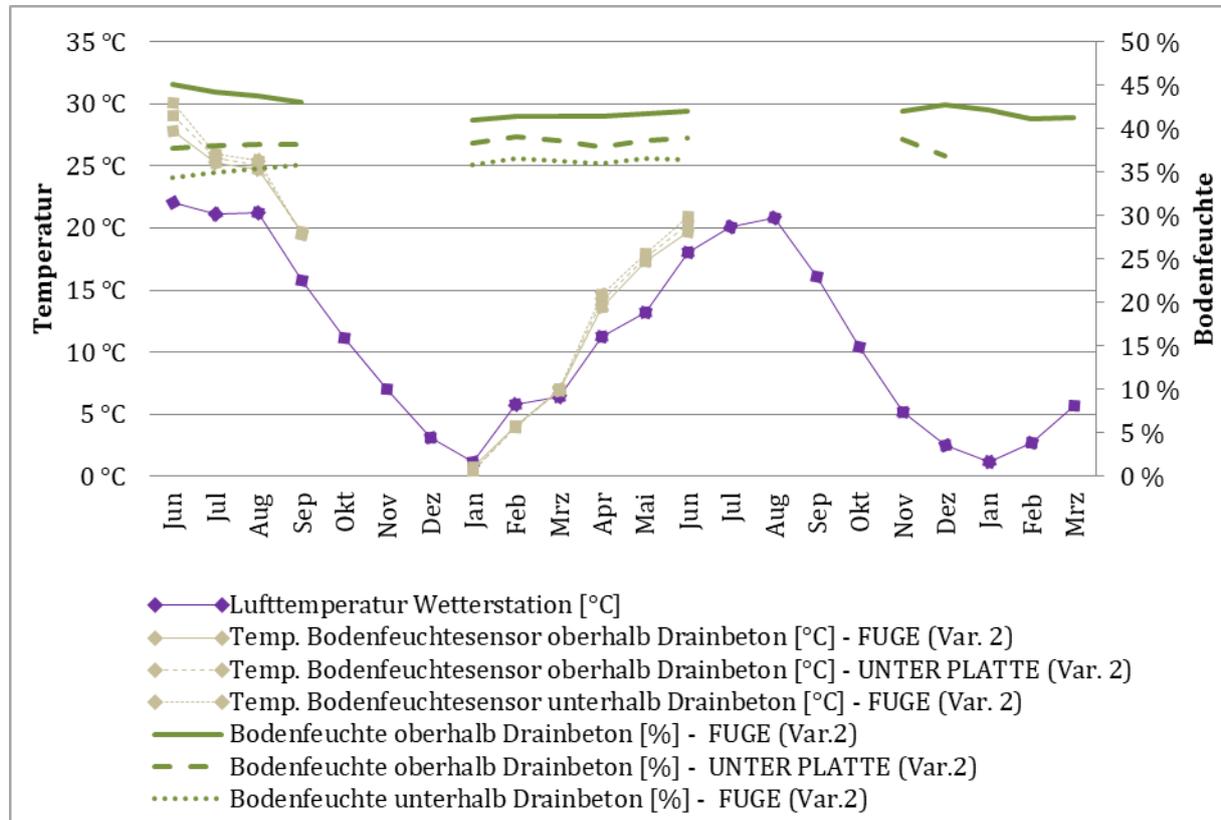


Abb. 4.7: Bodenfeuchtesensor und Lufttemperatur über gesamten Analysezeitraum

Aufgrund der oben angeführten Punkte ist eine aufschlussreiche und verlässliche Auswertung der Daten über den gesamten Messzeitraum nicht möglich bzw. sinnvoll. Die Analyse der Daten erfolgt daher für ausgewählte Monate, in denen die Daten augenscheinlich realistisch sind.

4.2.1 Auswahl der Monate und Tagesextrema

Die Auswahl der Monate und Tage mit Extremwerten erfolgt anhand von Jahres- und Monatsübersichten. Wie bereits erwähnt, liefern einige Sensoren in gewissen Zeiträumen keine oder unplausible Werte. Bei der Auswahl der im Detail ausgewerteten Zeiträume wurde daher darauf geachtet, dass diese für die jeweilige Jahreszeit repräsentativ sind.

In einem ersten Schritt wurde erkannt, dass der Jänner im Schnitt immer der kälteste Monat war und dass im August sowohl hohe Temperaturwerte als auch Niederschlagsmengen auftraten (siehe **Abb. 4.8**).

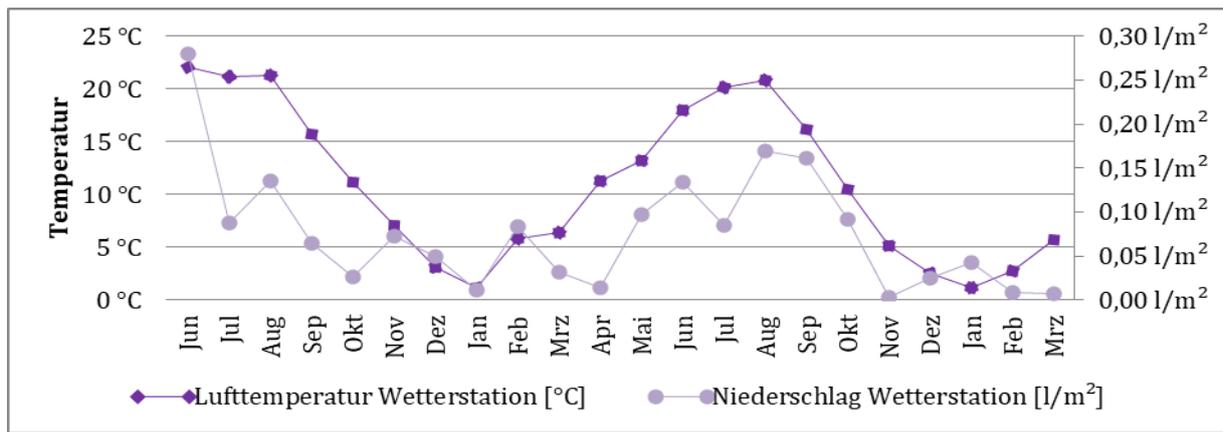


Abb. 4.8: Lufttemperatur- und Niederschlagsverlauf der Monatsmittelwerte über gesamten Analysezeitraum (Juni 2019 bis März 2021)

Da Monatsmittelwerte keine Extremereignisse beschreiben, wurden im nächsten Schritt die Stundenmittelwerte über den gesamten Messzeitraum betrachtet (sh. **Abb. 4.9** und **Abb. 4.10**).

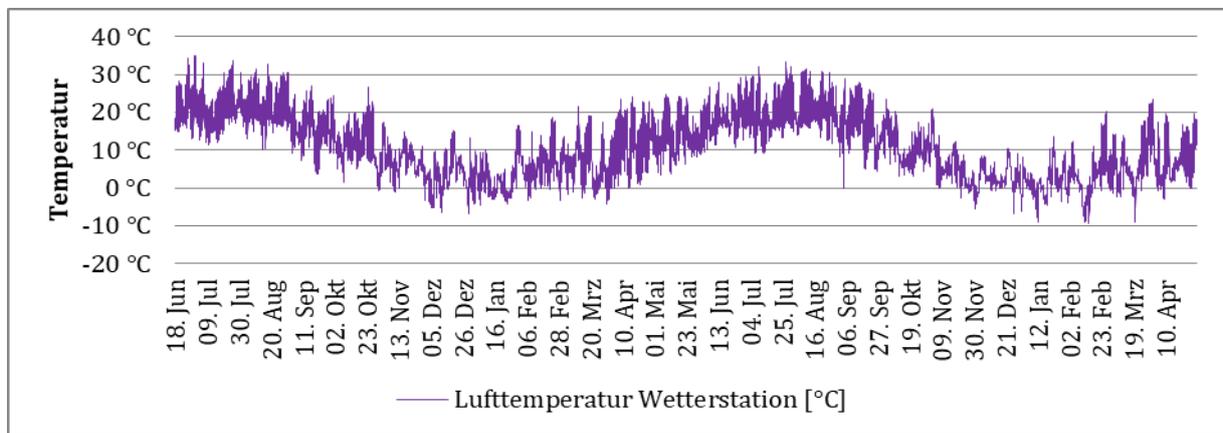


Abb. 4.9: Lufttemperatur-Extrema (Stundenmittelwerte) über gesamten Analysezeitraum (Juni 2019 bis März 2021)

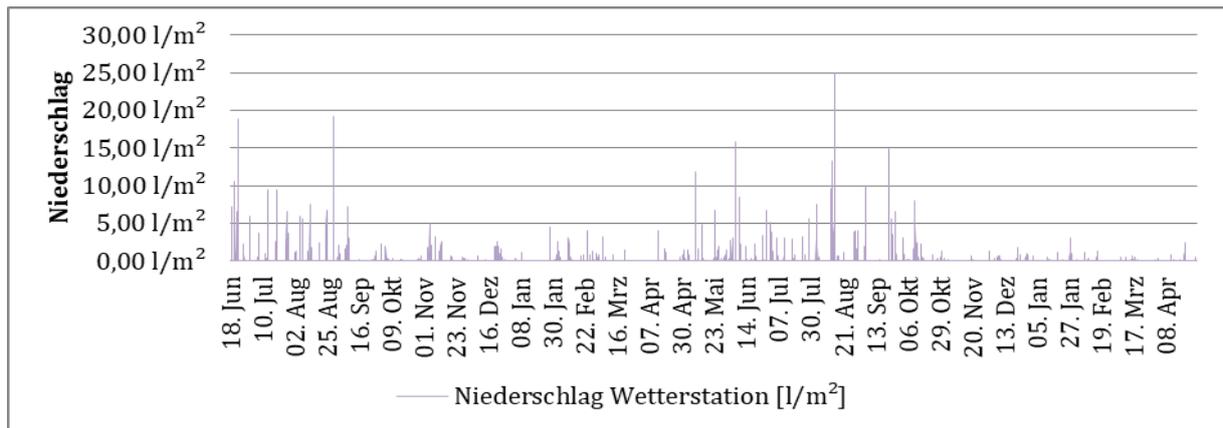


Abb. 4.10: Niederschlags-Extrema (Stundenmittelwerte) über gesamten Analysezeitraum (Juni 2019 bis März 2021)

Um möglichst extreme Wettersituationen und vermeintlich starke Auswirkungen dieser auf das Testfeld zu analysieren, werden die Monate **August 2019** und **Jänner 2020** für die Detailanalyse ausgewählt. Zusätzlich werden die Verläufe jener Tage der oben angeführten Monate ausgewertet, an denen Lufttemperatur- oder Niederschlagsextrema auftreten. Die so selektierten Ext-

remwerte werden in weiterer Folge für die detaillierte Auswertung in **Kapitel 4.2.2** und **4.2.3** herangezogen.

4.2.2 Analyse der Verschiebung im Feld

Untersucht werden die Verschiebungen der unterschiedlichen Oberbauvarianten, jeweils in Feldmitte und relativ gesehen am Feldende. Die Verläufe der oben erwähnten Monate werden in Diagrammen dargestellt und interpretiert. Um die Bewegung der einzelnen Teilflächen besser beurteilen zu können, werden die Verschiebungen in Relation zur Verschiebung zu Beginn des jeweils betrachteten Zeitraums dargestellt, das heißt, alle Verschiebungen beginnen bei 0,00 mm.

Die Kernfragen dieses Kapitels sind, welche Auswirkung die Lufttemperatur auf die Horizontalverformung der Pflasterflächen hat und wie die verschiedenen Varianten reagieren.

Für die Auswertung und Interpretation der Horizontalverschiebungen ist vorab zu erwähnen, dass für die Monatsverläufe die Relativverschiebungen anhand der Sensorwerte berechnet wurden.

Bei den Tagesverläufen erfolgt die Darstellung der Verschiebung anhand der Änderungen der Relativverschiebungen. Diese wird als Differenzenquotient definiert. Dabei bedeuten positive Werte eine Dehnung des untersuchten Feldes, während negative Werte einer Stauchung entsprechen (**Abb. 4.20**).

An den Extremtagen wurde eine maximale Änderung der Relativverschiebung von **0,3 mm** gemessen. Die Bewegungen der einzelnen Flächen liegen generell im Zehntelmillimeterbereich und sind somit äußerst gering. Bei den Darstellungen der Verschiebungskurven ist daher unbedingt auf die Größenordnung zu achten. Eine Dehnung von 0,3 mm bezogen auf die halbe Feldlänge von 7,5 m ergibt eine Längenänderung von **0,004 %** und ist somit vernachlässigbar klein.

4.2.2.1 Lufttemperatur-Extremwert August 2019

Monatsverläufe Verschiebung

Abb. 4.11 zeigt den Verlauf der Verschiebungen des gesamten Testfeldes als Stundenmittelwerte über den Monat August 2019. Der Wechsel von Stauchung und Dehnung ist klar ersichtlich, wobei die Werte an keinem Tag mehr als ± 1 mm betragen. Bei der ungebundenen Bauweise sind größere Bewegungen als bei der gebundenen Bauweise zu beobachten. Dies ist auf die Verklebung der Pflasterplatten (über die Bettung) mit der Drainbetontragschicht und die damit einhergehende größere Steifigkeit des gebundenen Aufbaus zurückzuführen. Zwischen 10.08.19 02:00 Uhr und 12.08.19 07:00 Uhr wurde die Aufzeichnung der Daten unterbrochen. Da der Verlauf danach plausibel erscheint und die Tagesextrema gegen Ende des Monats auftraten, kann dieser Ausfall ignoriert werden.

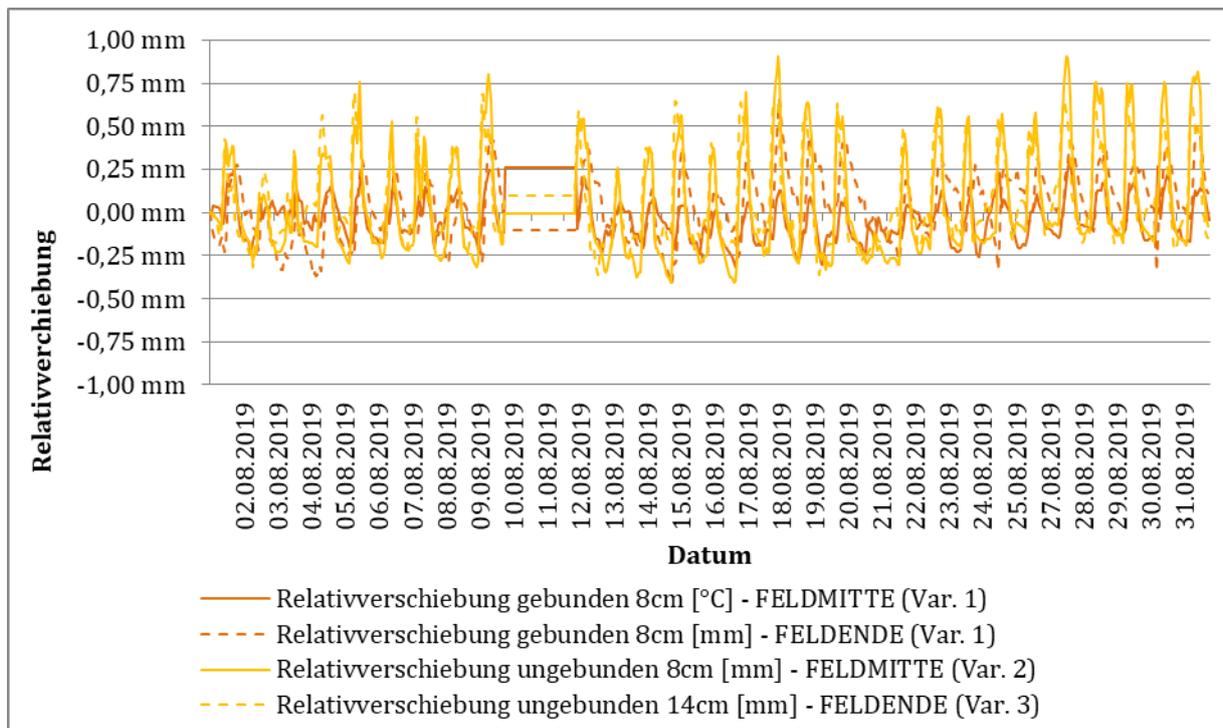


Abb. 4.11: Relativverschiebung aller Flächen August 2019

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Verschiebungskurven in **Abb. 4.12** und **Abb. 4.13** nach gebunden und ungebunden aufgeteilt.

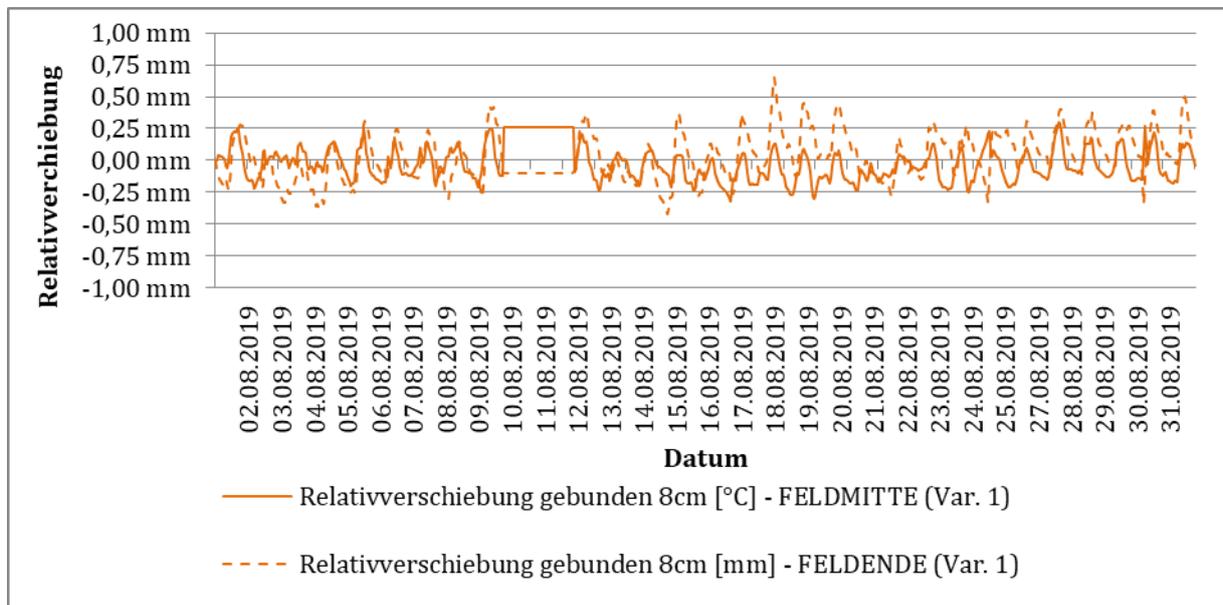


Abb. 4.12: Relativverschiebung der gebundenen Fläche August 2019

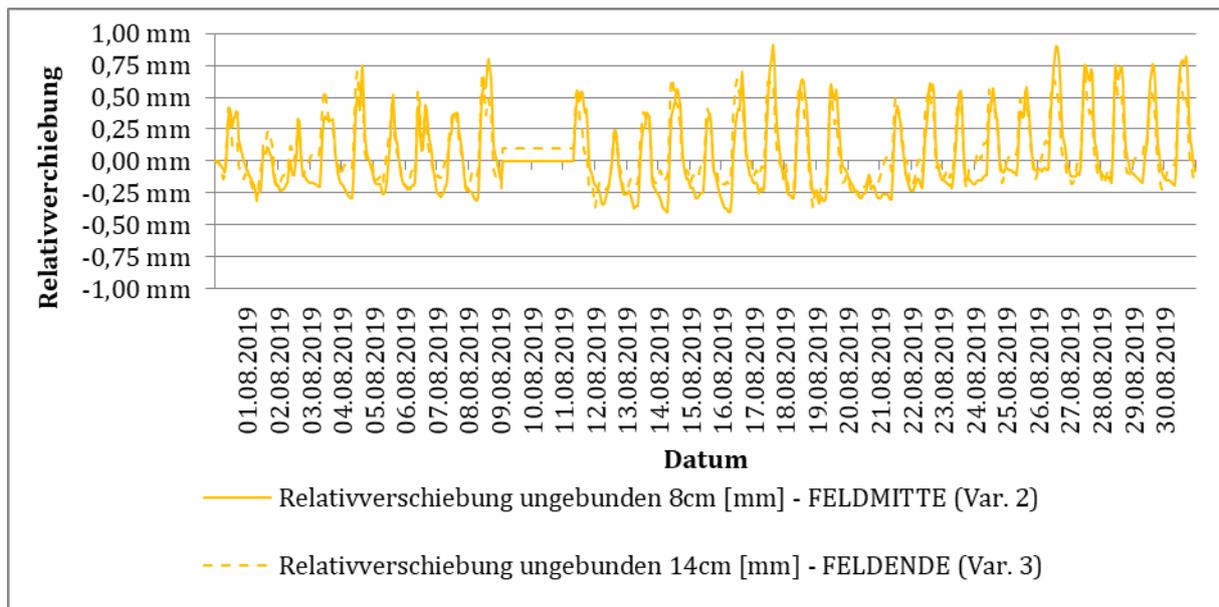


Abb. 4.13: Relativverschiebung der ungebundenen Fläche August 2019

Monatsverläufe Temperatur

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Temperaturverläufe der einzelnen Aufbauten dargestellt und mit der Lufttemperatur verglichen. In **Abb. 4.14** sind die Tagesschwankungen deutlich zu erkennen, welche sich auch mehr oder weniger parallel in den Schichten wiederfinden. Die größten Schwankungen treten in der Platte auf, da diese der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung am direktesten ausgesetzt sind.

Der Verlauf der Temperatur in der Bettung in der Variante 1 zeigt im Vergleich zur Variante 2 von Beginn an sehr tiefe Werte an und kann somit als defekt angenommen werden. Ebenso auffällig zeigt sich der Sensor im Drainbeton der Variante 2. Dieser zeigt tendenziell zu hohe Werte an.

Im August 2019 reichten die Lufttemperaturen von 10°C bis 33°C.

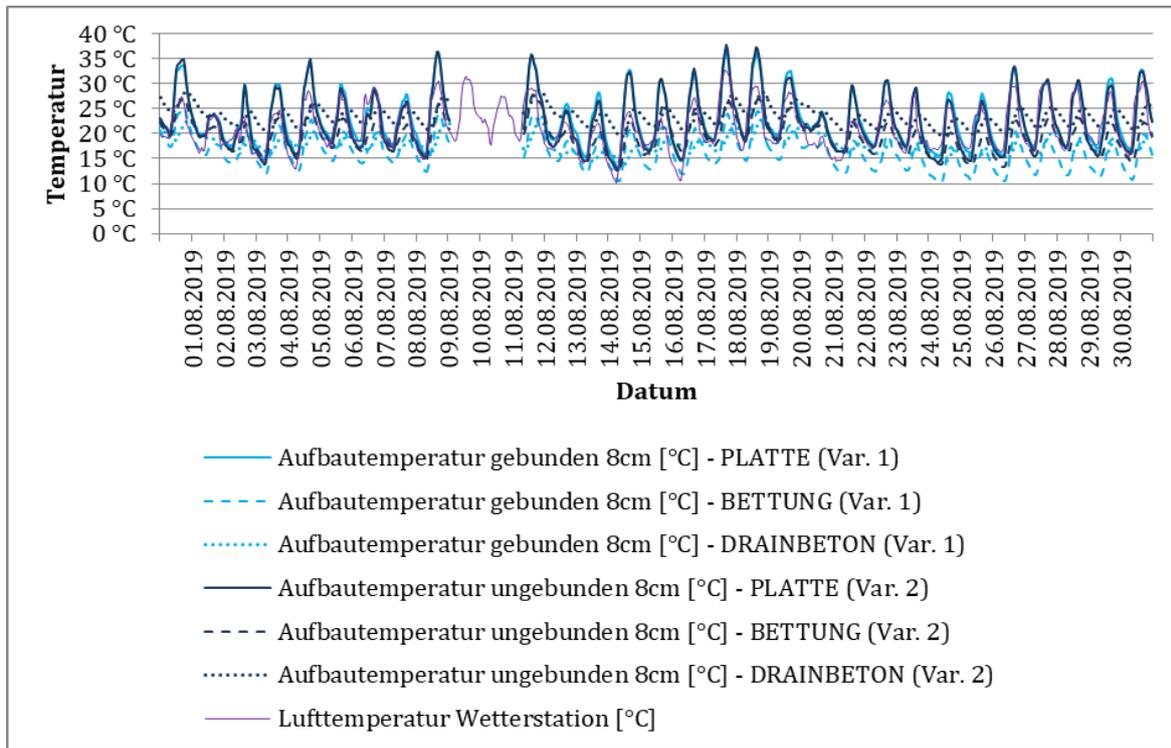


Abb. 4.14: Aufbautemperatur aller Flächen + Lufttemperatur August 2019

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Temperaturverläufe in **Abb. 4.15** und **Abb. 4.16** nach gebunden und ungebunden aufgeteilt.

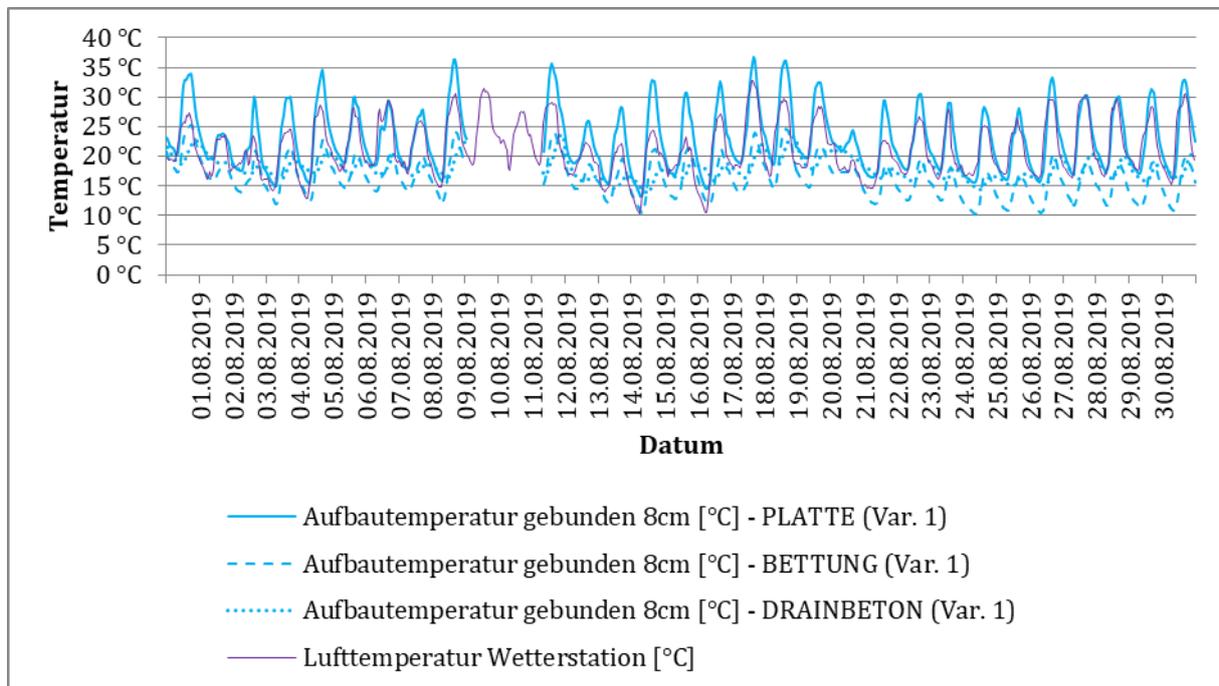


Abb. 4.15: Aufbautemperatur der gebundenen Flächen + Lufttemperatur August 2019

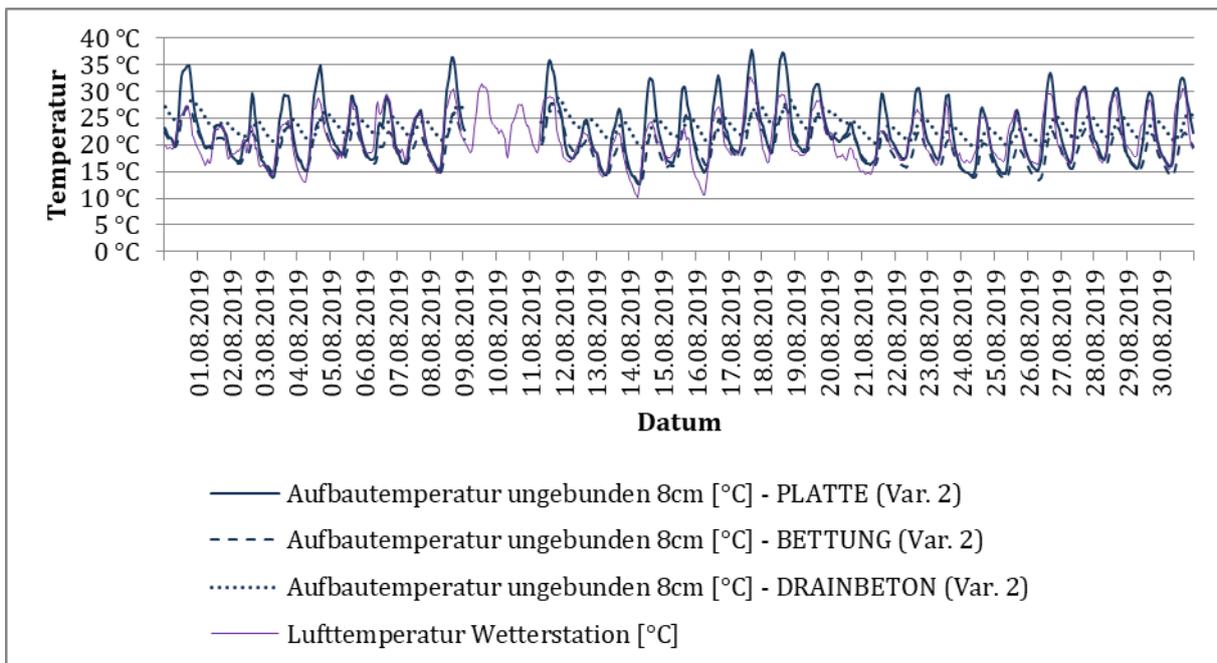


Abb. 4.16: Aufbau­temperatur der ungebundenen Flächen + Lufttemperatur August 2019

Tagesverläufe 18. August 2019 (heißester Tag)

Der Höchstwert der Lufttemperatur wurde am 18. August 2019 mit 33°C gemessen. Die einzelnen Verläufe der Temperaturen im Aufbau (siehe Abb. 4.17) zeigen plausible Werte an, da sie dem Verlauf der Lufttemperatur folgen. Die Plattentemperatur erreicht maximal 38 °C und übersteigt somit das Tagesmaximum der Lufttemperatur um ca. 5 °C, was unter Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung nachvollziehbar ist. Bettung und Drainbeton der ungebundenen Variante weisen höhere Temperaturen auf als jene der gebundenen Variante. Da die ungebundene Bauweise auch an Tagen ohne Niederschlag immer eine gewisse Bodenfeuchte aufweist, kann man davon ausgehen, dass diese als Wärmespeicher dient und so die Temperatur erhöht.

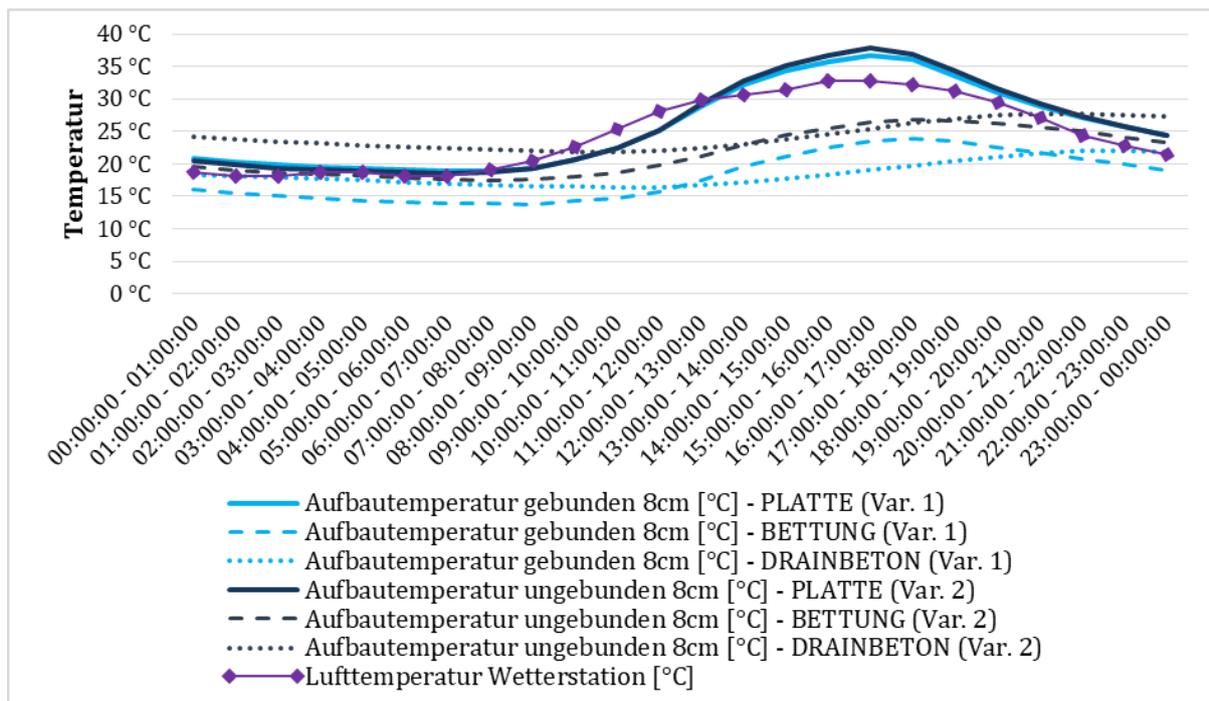


Abb. 4.17: Aufbau­temperatur aller Schichten + Lufttemperatur 18.08.19

Auch hier wurde aufgrund einer besseren Übersichtlichkeit in die gebundene (Abb. 4.18) und ungebundene (Abb. 4.19) Fläche unterteilt.

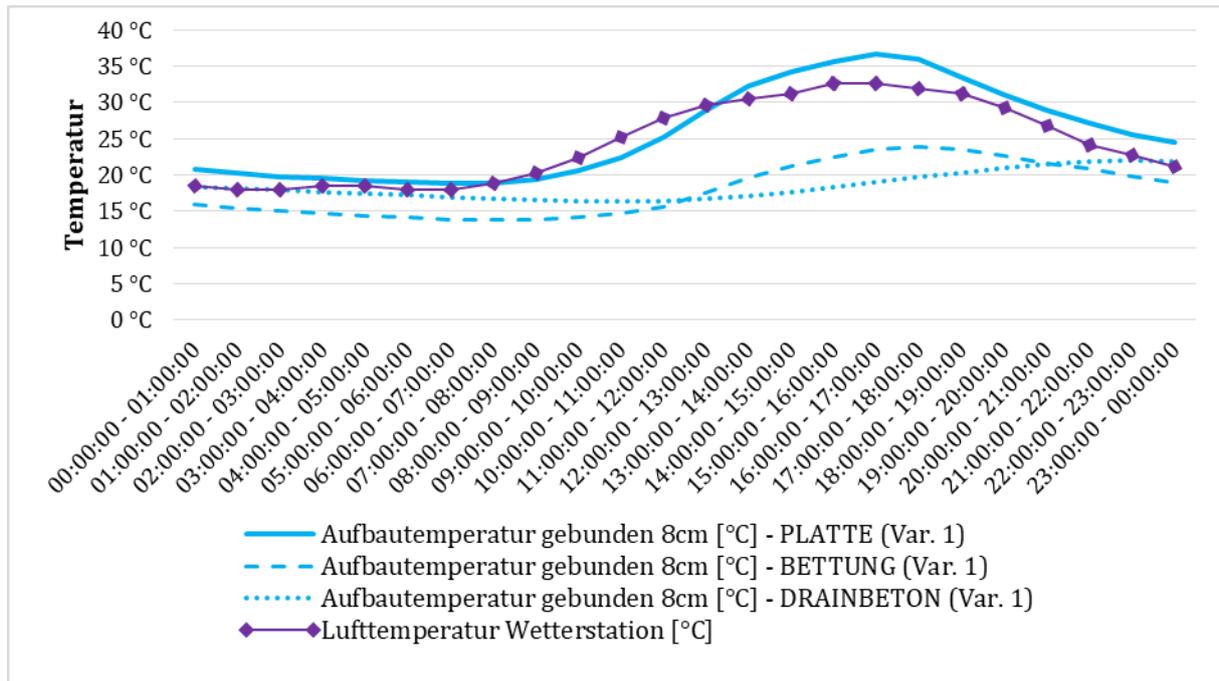


Abb. 4.18: Aufbautemperatur aller Schichten in der gebundenen Fläche + Lufttemperatur 18.08.19

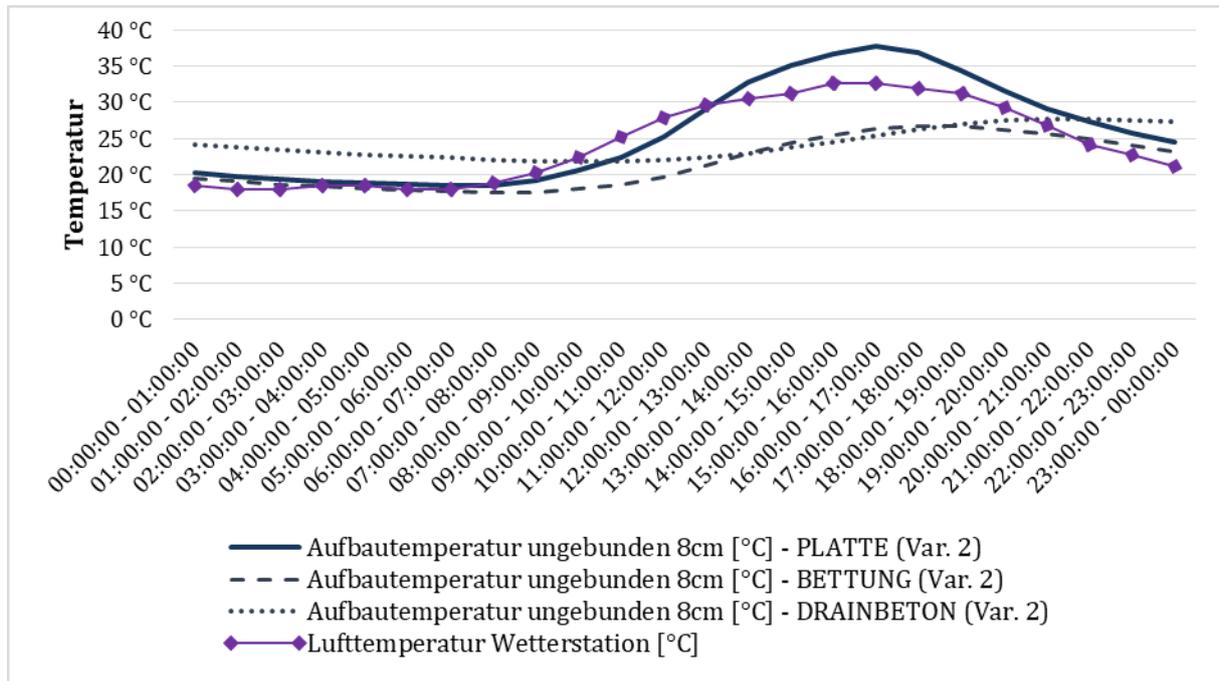


Abb. 4.19: Aufbautemperatur aller Schichten in der ungebundenen Fläche + Lufttemperatur 18.08.19

Betrachtet man die Änderung der Relativverschiebungen über den Tagesverlauf, zeigt sich, dass sich alle Flächen entsprechend dem Lufttemperaturverlauf bewegen. Sinkt die Temperatur, zieht sich das Feld zusammen, steigt sie, dehnt es sich aus. Steigt die Lufttemperatur schneller, so ist auch die Änderung der Relativverschiebung größer (siehe beispielhaft den Zeitraum 9:00 bis 11:00 Uhr in Abb. 4.20).

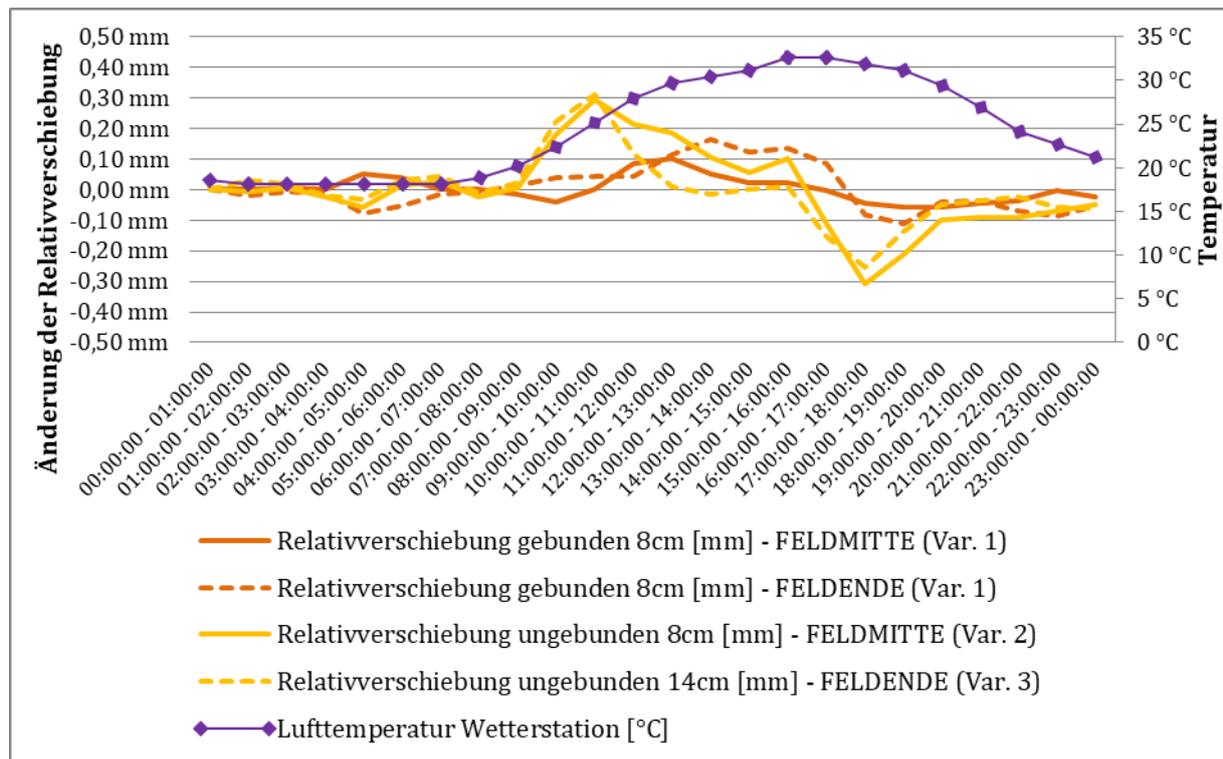


Abb. 4.20: Änderung der Relativverschiebung für alle Flächen 18.08.19

Bei der gebundenen Fläche sind die Verschiebungen sowohl in Feldmitte, als auch am Feldende äußerst gering und verlaufen weitestgehend parallel (siehe Abb. 4.21).

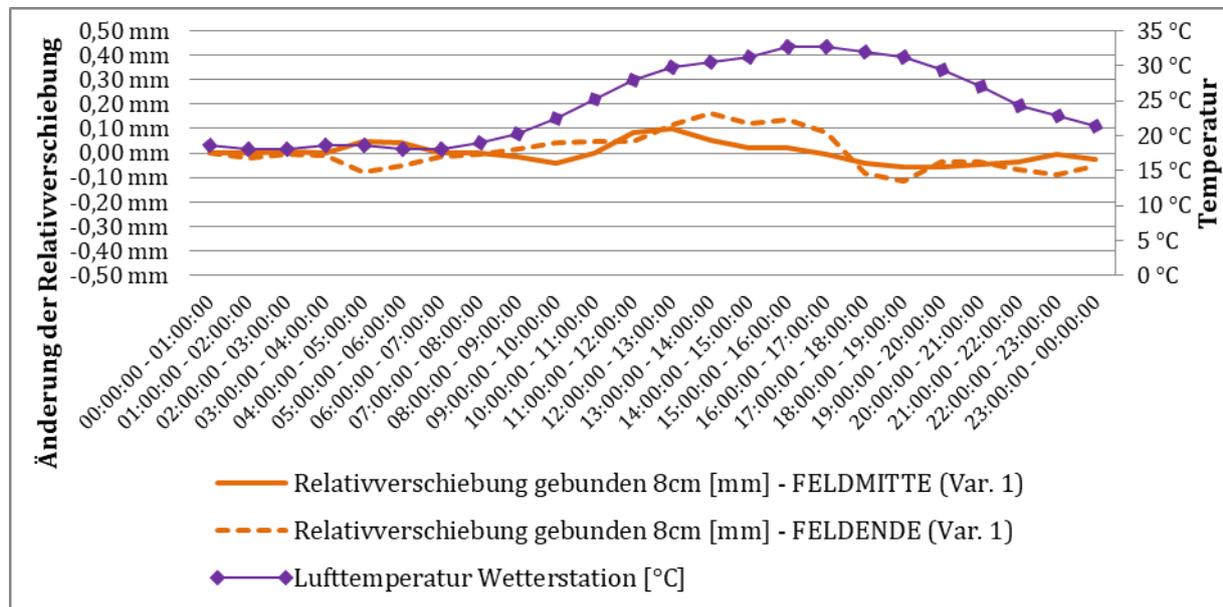


Abb. 4.21: Änderung der Relativverschiebung für die gebundene Fläche 18.08.19

Der Verlauf der ungebundenen Variante ist ebenso plausibel und zeigt, dass sich die weniger starre Bauweise an heißen Tagen etwas stärker ausdehnt (siehe Abb. 4.22).

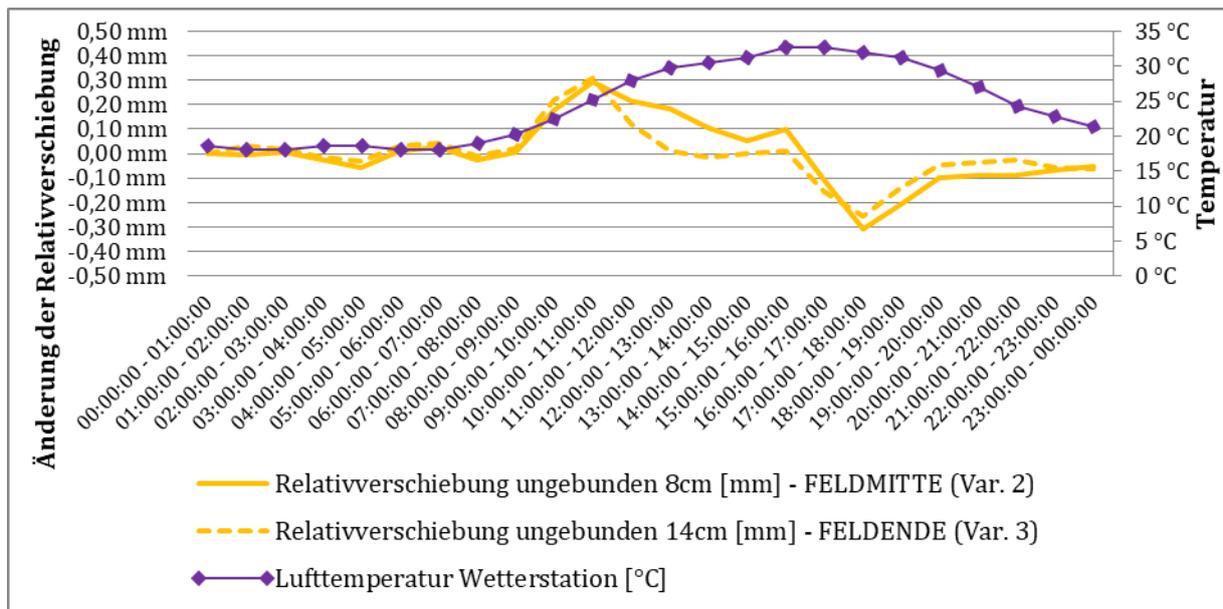


Abb. 4.22: Änderung der Relativverschiebung für die ungebundene Fläche 18.08.19

In **Abb. 4.23** und **Abb. 4.24** werden die Verschiebungen in Feldmitte und am Feldende verglichen. Auch hier ist eindeutig zu sehen, dass die ungebundene Bauweise etwas stärker auf Temperaturänderungen reagiert.

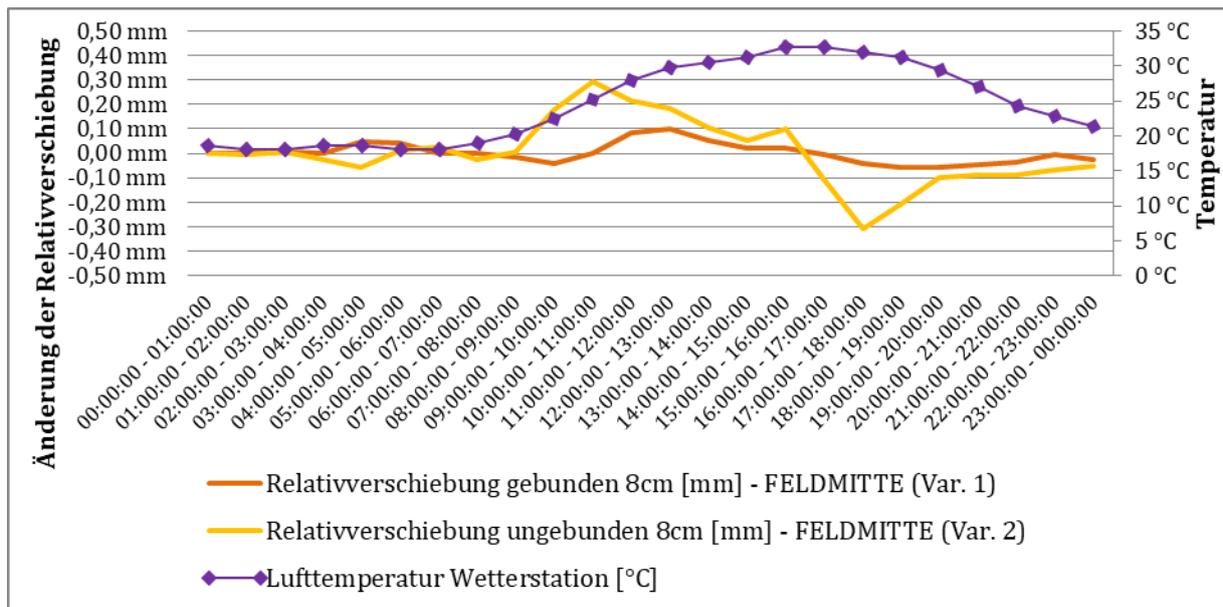


Abb. 4.23: Änderung der Relativverschiebung in Feldmitte 18.08.19

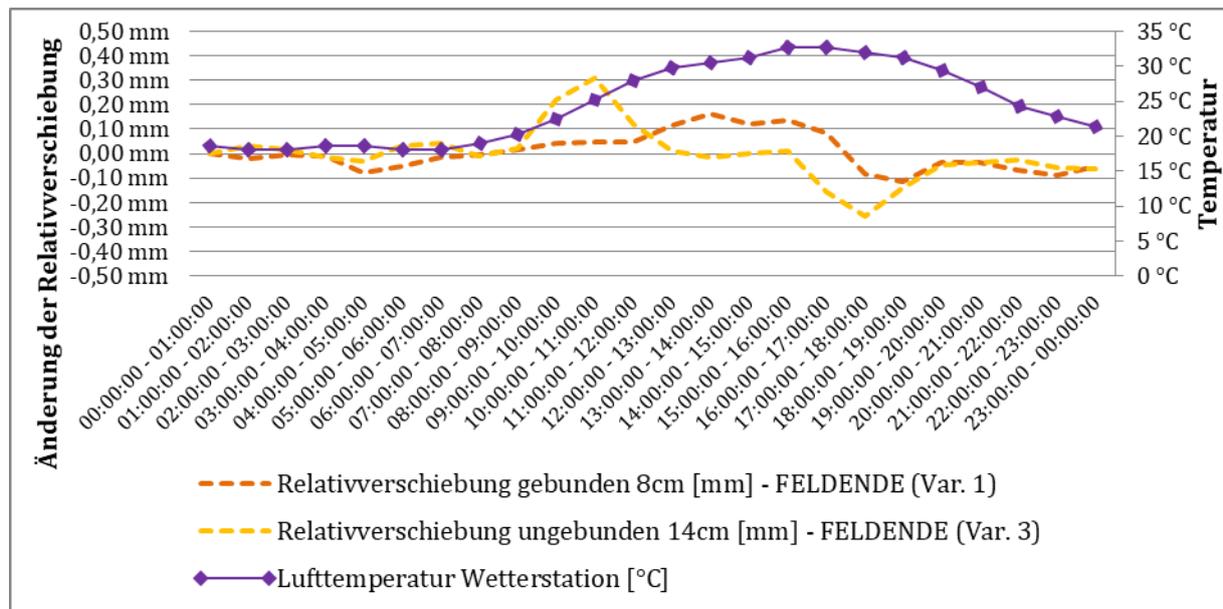


Abb. 4.24: Änderung der Relativverschiebung am Feldende 18.08.19

In Abb. 4.25 wird die Änderung der Relativverschiebung in Feldmitte mit dem Temperaturverlauf in der Platte verglichen. Die Bewegung am Feldende wird hier nicht berücksichtigt, da nur im vorderen Bereich in der Variante 2 Temperatursensoren verbaut sind.

Die Verläufe sind wie schon mehrfach erwähnt plausibel.

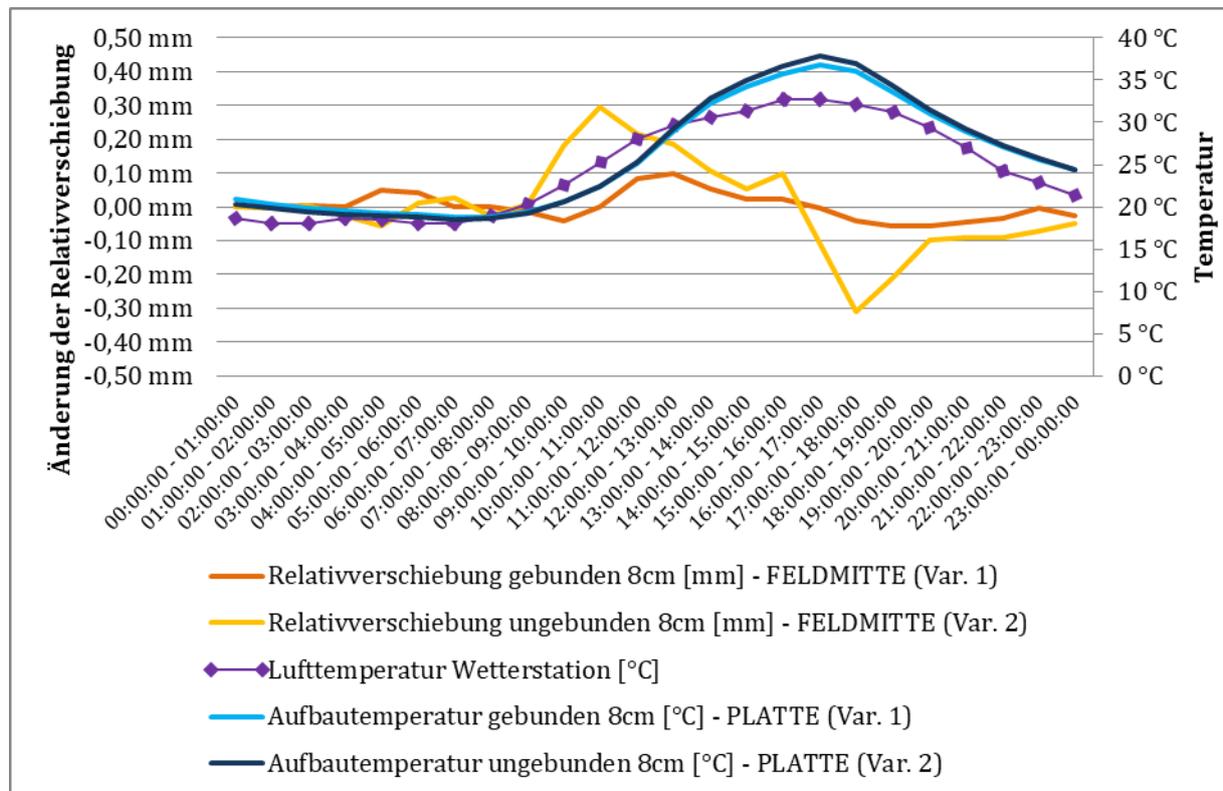


Abb. 4.25: Änderung der Relativverschiebung verglichen mit Temperatur 18.08.19

4.2.2.2 Lufttemperatur-Extremwert Jänner 2020

Analog zu Kapitel 4.2.2.1 sind nachfolgend die Auswertungen der Verschiebungen und Aufbautemperaturen verglichen mit der Lufttemperatur dargestellt.

Monatsverläufe Relativverschiebung

Abb. 4.26 zeigt den Verlauf der Verschiebungen des gesamten Testfeldes als Stundenmittelwerte über den Monat Jänner 2020. Der Wechsel von Stauchung und Dehnung ist klar ersichtlich, wobei die Werte an keinem Tag mehr als ± 1 mm betragen. Im Vergleich zum Sommermonat August 2019 sind die Bewegungen der gebundenen und ungebundenen Bauweise in der gleichen Größenordnung angesiedelt. Gegen Ende des Monats ist bei der ungebundenen Bauweise plötzlich eine verhältnismäßig große Dehnung zu beobachten. Betrachtet man zusätzlich den Lufttemperaturverlauf aus Abb. 4.29, wird ein Temperaturanstieg nach einer Kälteperiode ersichtlich und die Fläche dehnt sich aus. Der Wert der Relativverschiebung ist bei einer Dehnung aufgrund der Anordnung der Sensoren negativ.

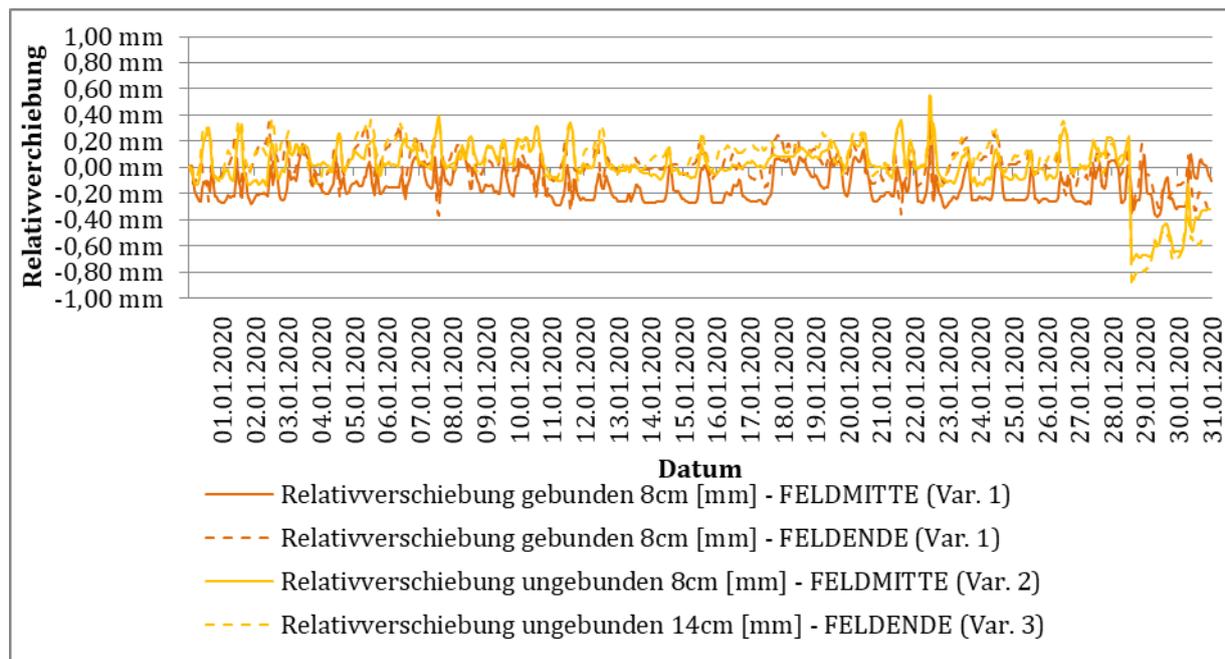


Abb. 4.26: Relativverschiebung aller Flächen Jänner 2020

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Verschiebungskurven in Abb. 4.27 und Abb. 4.28 nach gebunden und ungebunden aufgeteilt.

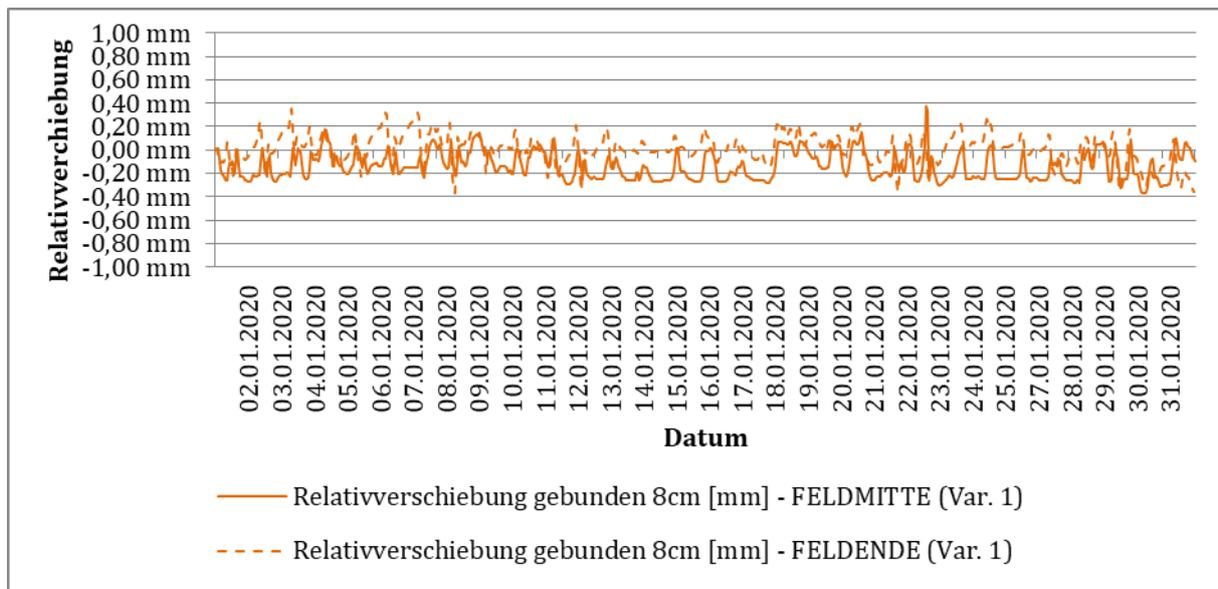


Abb. 4.27: Relativverschiebung der gebundenen Fläche Jänner 2020

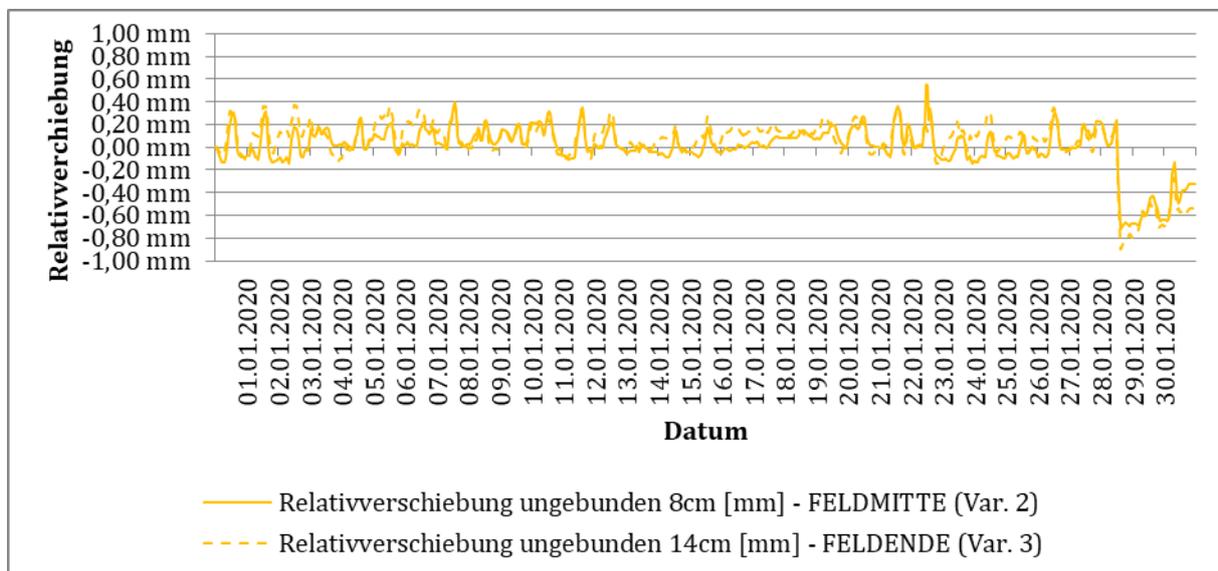


Abb. 4.28: Relativverschiebung der ungebundenen Fläche Jänner 2020

Monatsverläufe Temperatur

Die Lufttemperaturen im Jänner 2020 reichen von ca. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei Betrachtung der Verläufe der Auftemperaturen fällt auf, dass vor allem die Temperaturen in der Bettung der Varianten 1 und 2 und des Drainbetons der Variante 1 im unrealistischen Negativbereich liegen. Für die Bewertung werden diese nicht weiter beachtet. Auch die Werte für die Plattentemperatur scheinen sehr niedrig. Da sich diese in den Monaten nach Jänner scheinbar wieder normalisieren (siehe **Abb. 4.5**), kann davon ausgegangen werden, dass die Sensoren in diesem Zeitraum korrekt aufgezeichnet haben.

Der Verlauf der Drainbetontemperatur in der ungebundenen Variante liegt über den gesamten Monat relativ konstant um die $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und passt gut mit der Lufttemperatur zusammen, da die Drainbetonschicht wenig anfällig auf Temperaturschwankungen ist. (siehe **Abb. 4.29**)

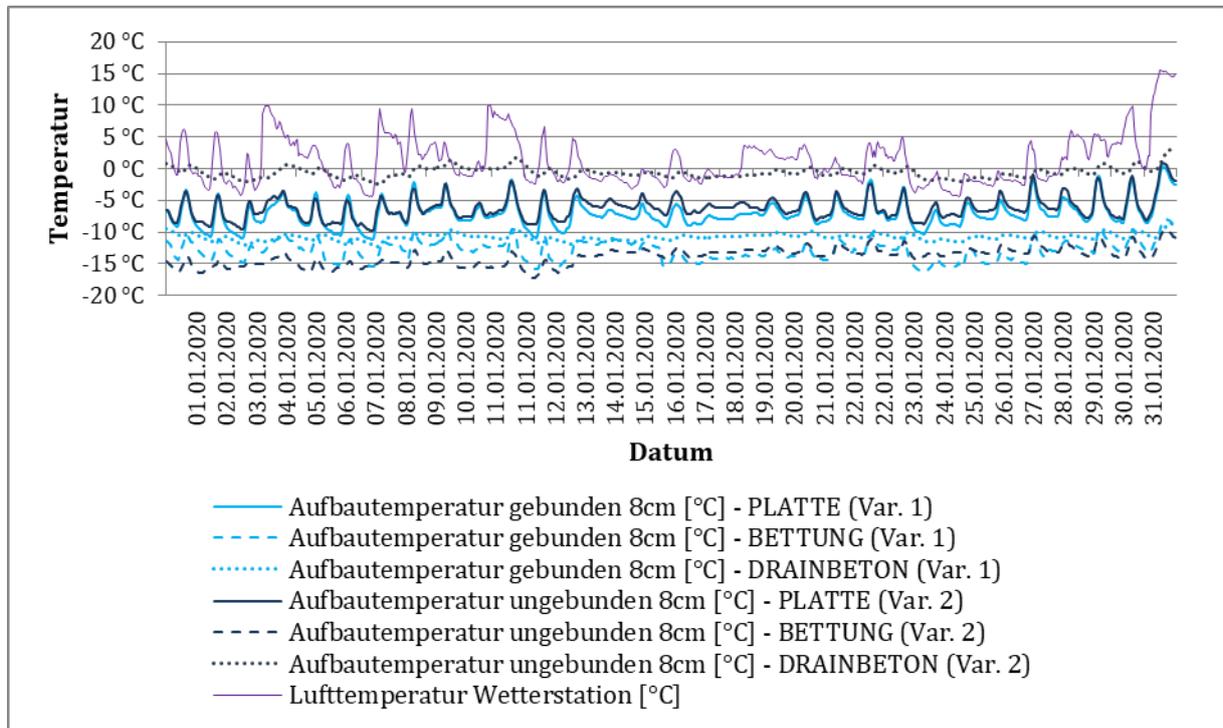


Abb. 4.29: Aufbautemperatur aller Schichten + Lufttemperatur Jänner 2020

Abb. 4.30 und Abb. 4.31 zeigen die Temperaturverläufe unterteilt in die gebundene und ungebundene Variante.

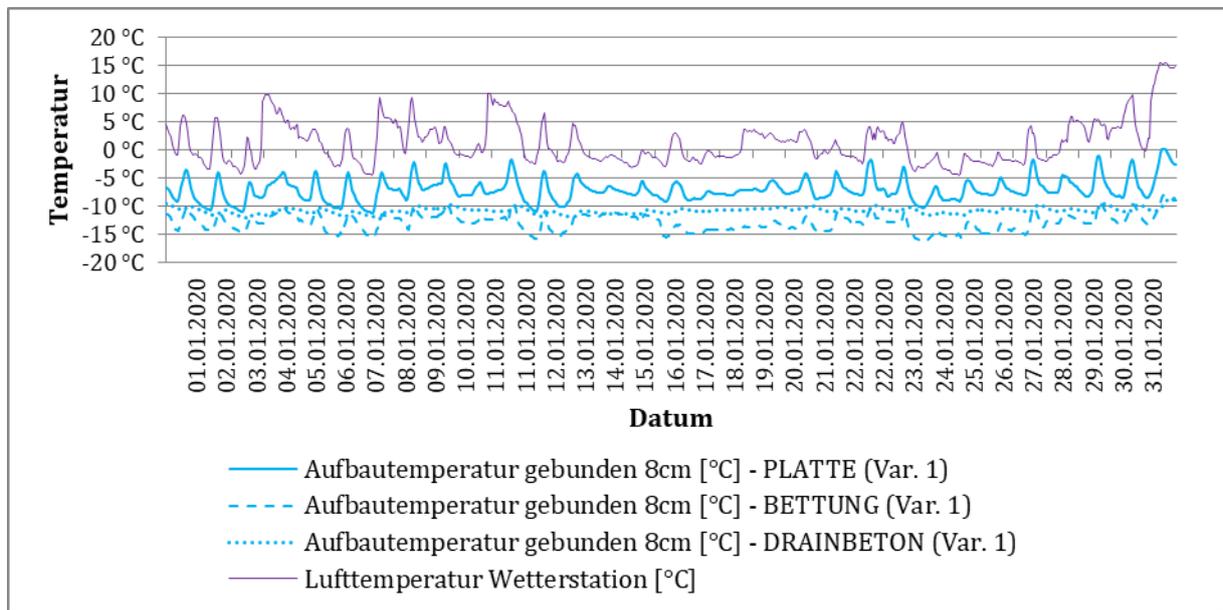


Abb. 4.30: Aufbautemperatur aller Schichten in der gebundenen Fläche + Lufttemperatur Jänner 2020

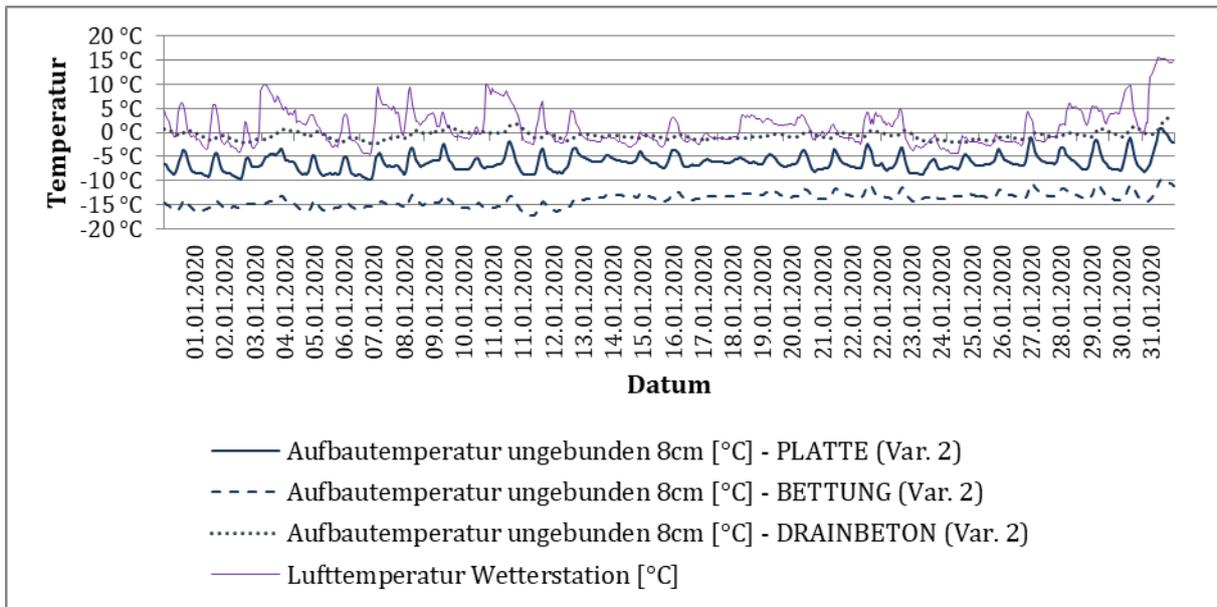


Abb. 4.31: Aufbautemperatur aller Schichten in der ungebundenen Fläche + Lufttemperatur Jänner 2020

Tagesverläufe 25. Jänner 2020 (kältester Tag)

Der Minimalwert der Lufttemperatur wurde am 25. Jänner 2020 mit $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Die Temperaturschwankungen sind im Vergleich zu einem Sommertag äußerst gering und für den Drainbeton der Variante 2 ist der Verlauf sogar konstant.

Die Verläufe der Temperatur in der Bettung für beide Varianten und der Verlauf der Temperatur des Drainbetons der Variante 1 zeigen zu niedrige Werte und deuten somit auf einen Defekt der Sensoren hin. Betrachtet man die Plattentemperatur, scheint der parallele Verlauf zur Lufttemperatur grundsätzlich plausibel. Die Differenz von $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist jedoch auffällig und kann an dieser Stelle nicht bewertet werden.

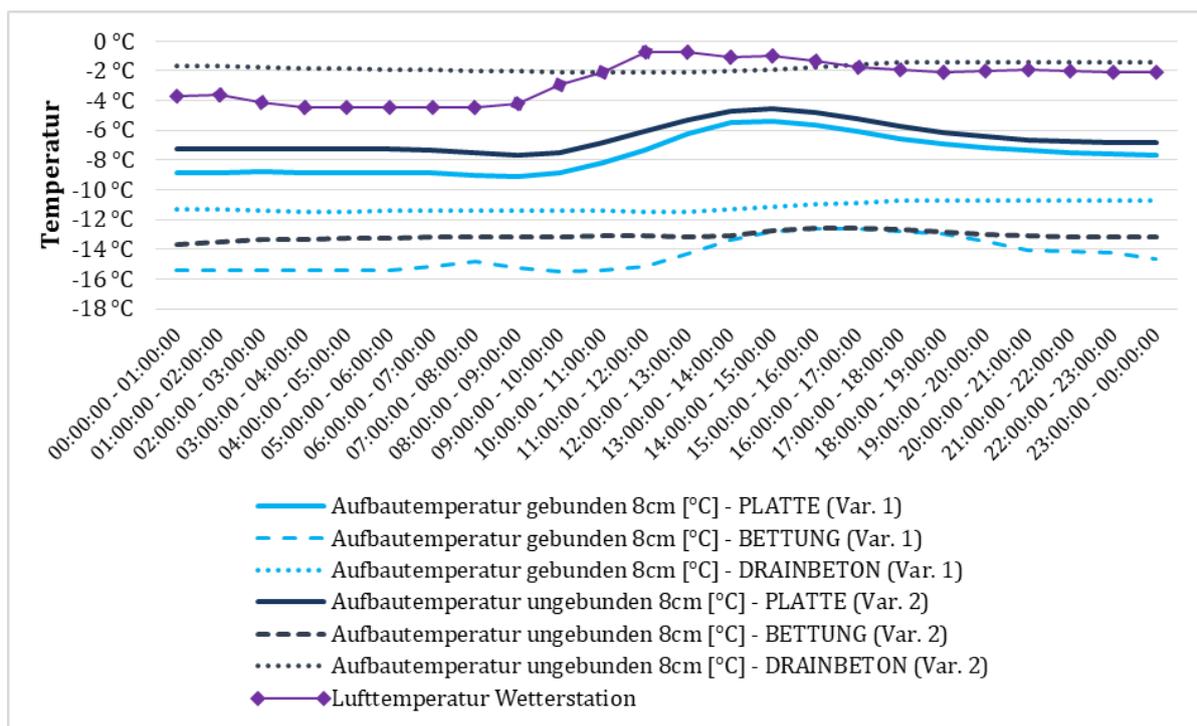


Abb. 4.32: Aufbautemperatur aller Schichten + Lufttemperatur 25.01.20

Analog zu den obigen Darstellungen, werden in **Abb. 4.33** und **Abb. 4.34** die Temperaturverläufe in gebunden und ungebunden aufgeteilt, um die gesonderte Betrachtung zu erleichtern.

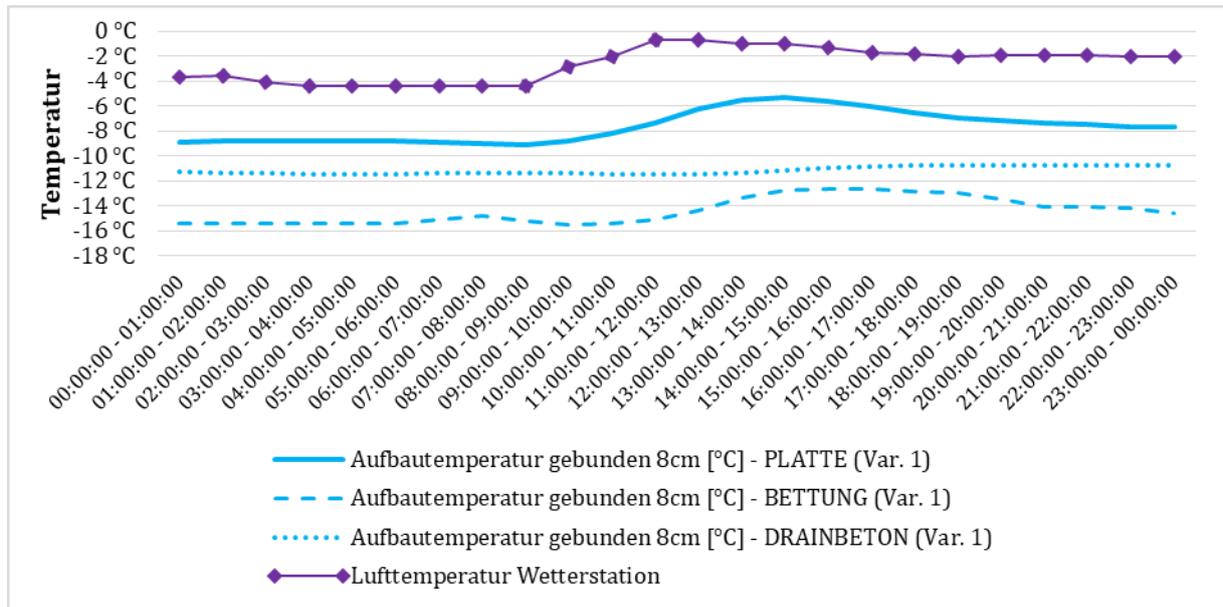


Abb. 4.33: Aufbautemperatur aller Schichten in der gebundenen Fläche + Lufttemperatur 25.01.20

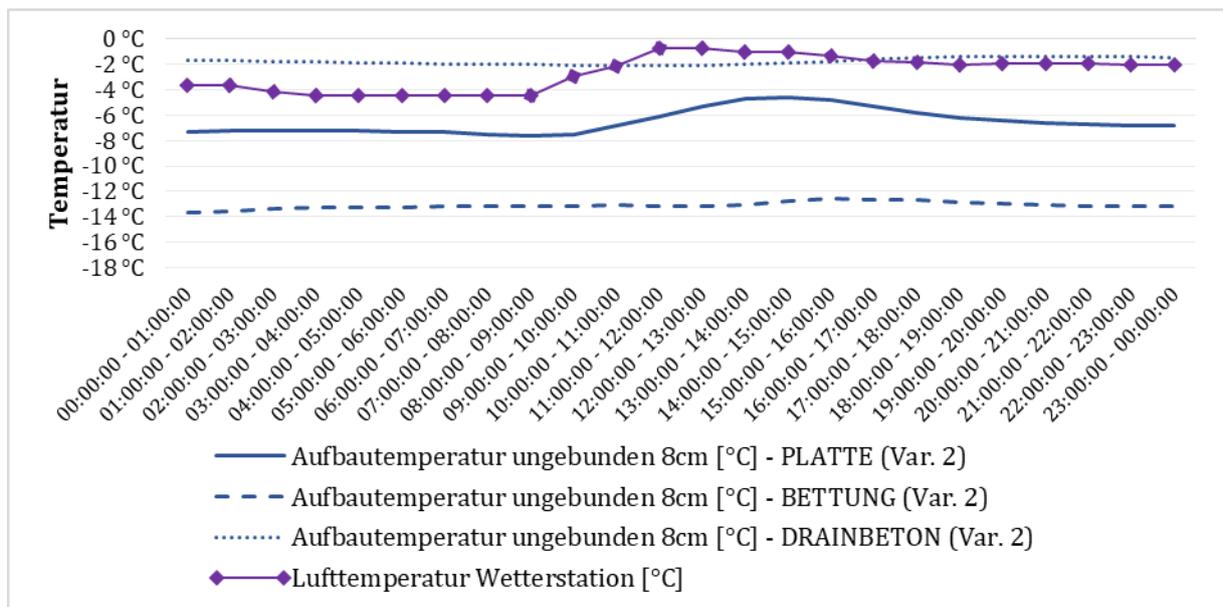


Abb. 4.34: Aufbautemperatur aller Schichten in der ungebundenen Fläche + Lufttemperatur 25.01.20

Bei Betrachtung der Änderung der Relativverschiebungen über den Tagesverlauf, zeigt sich analog zum heißesten Tag im August 2019, dass sich alle Flächen mit dem Lufttemperaturverlauf bewegen. Sinkt die Temperatur, zieht sich das Feld zusammen, steigt sie, dehnt es sich aus.

Da die Lufttemperatur am 25.01.20 relativ konstant im Negativbereich liegt und daher wenig schwankt, ist auch die Bewegung des Testfeldes äußerst gering. Änderungen der Relativverschiebungen von 0,1 mm sind vernachlässigbar klein.

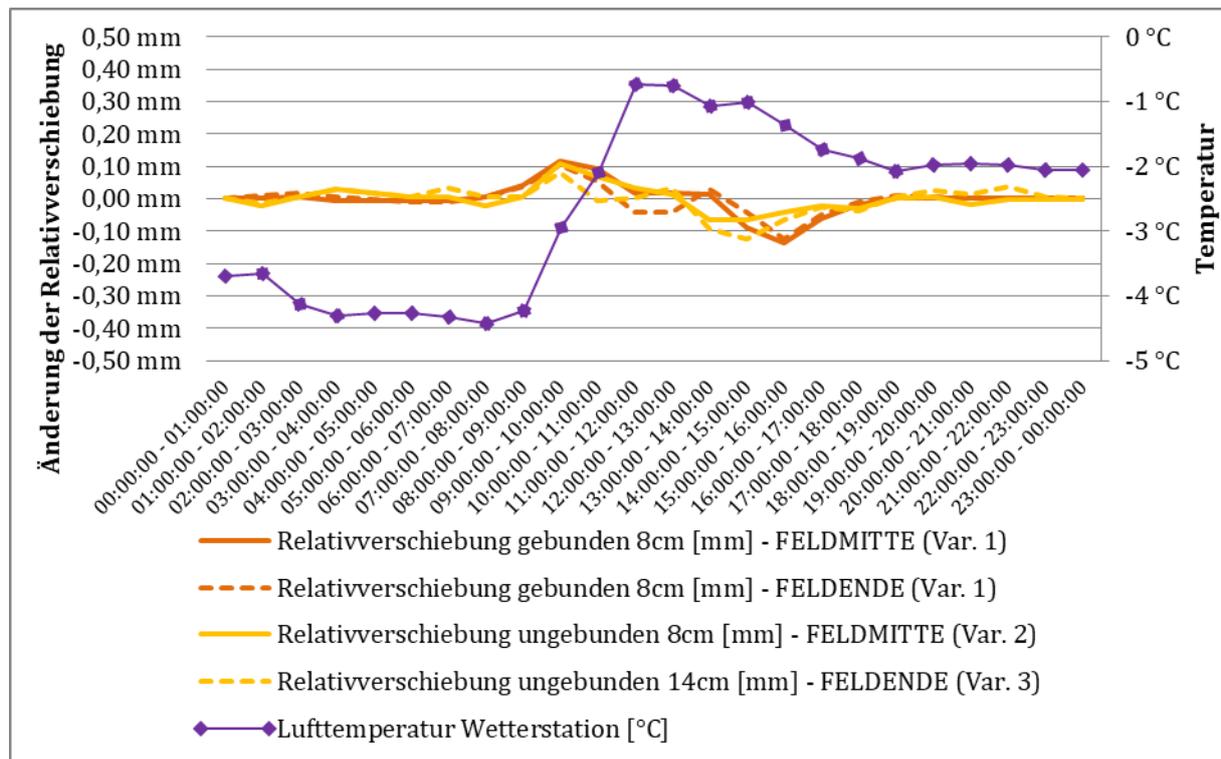


Abb. 4.35: Änderung der Relativverschiebung aller Flächen 25.01.20

Der Verlauf der Verschiebungen der gebundenen Fläche ist sehr konstant und es sind keine gravierenden Unterschiede zur ungebundenen Fläche zu erkennen. Die Bewegung kann wie oben erwähnt, vernachlässigt werden. (siehe Abb. 4.36 und Abb. 4.37)

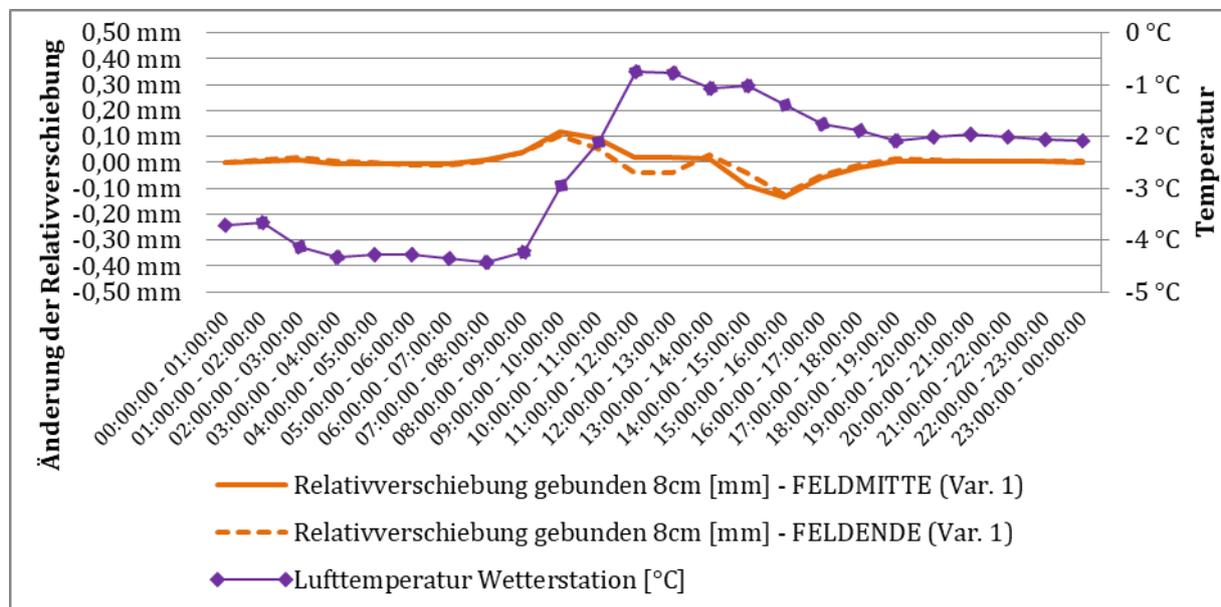


Abb. 4.36: Änderung der Relativverschiebung der gebundenen Fläche 25.01.20

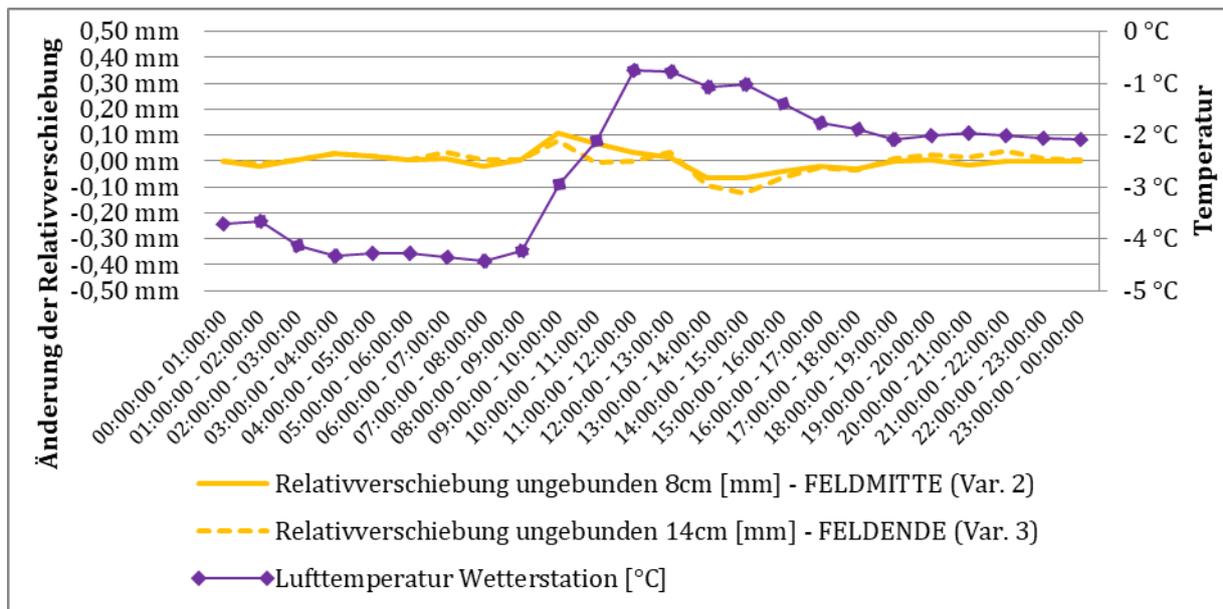


Abb. 4.37: Änderung der Relativverschiebung der ungebundenen Fläche 25.01.20

Auch die Vergleiche in Feldmitte und am Feldende zeigen keine Auffälligkeiten. Das leicht verzögerte Auftreten der Maximalwerte ist in dieser Größenordnung nicht erwähnenswert. (siehe **Abb. 4.38** und **Abb. 4.39**)

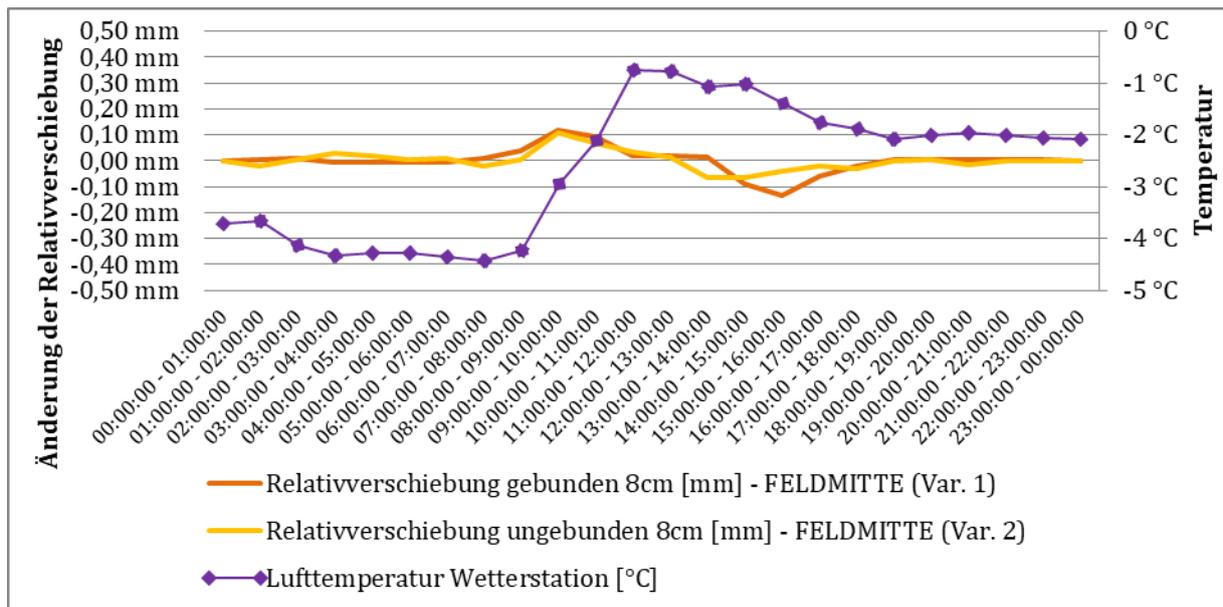


Abb. 4.38: Änderung der Relativverschiebung in Feldmitte 25.01.20

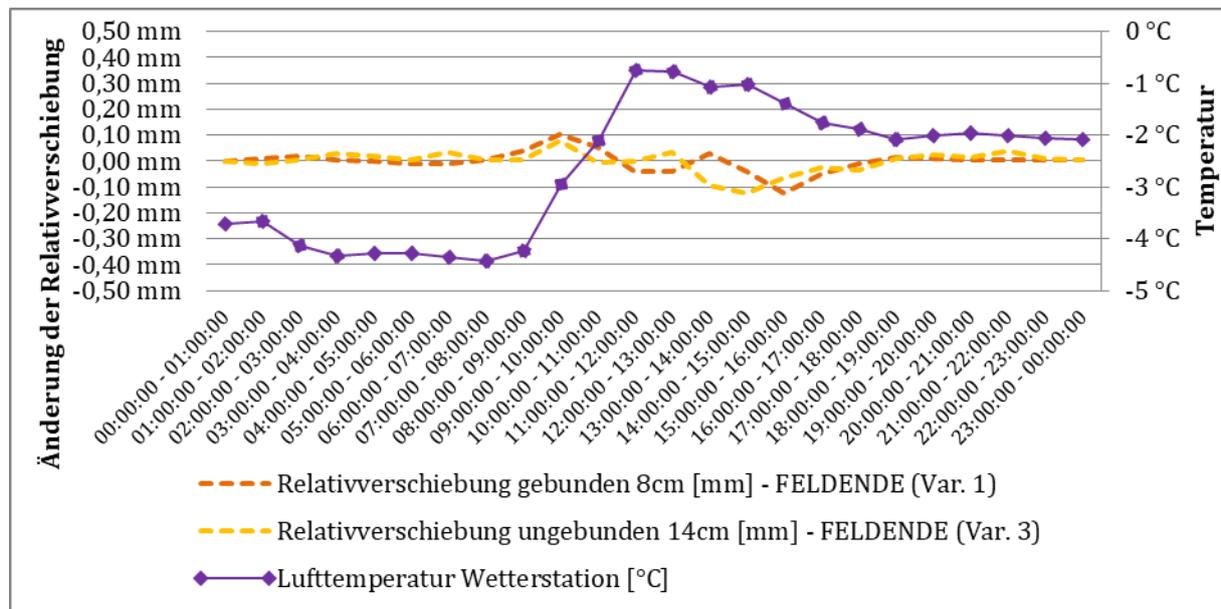


Abb. 4.39: Relativverschiebung am Feldende 25.01.20

Analog zum heißesten Tag wird in **Abb. 4.40** die Änderung der Relativverschiebung in Feldmitte mit dem Temperaturverlauf in der Platte verglichen. Die Bewegung am Feldende wird hier nicht berücksichtigt, da nur im vorderen Bereich in der Variante 2 Temperatursensoren verbaut sind. Die Änderung der Relativverschiebung ist im Vergleich Luft- und Plattentemperatur plausibel. Die Differenz der Temperaturverläufe bleibt jedoch auch an dieser Stelle fraglich.

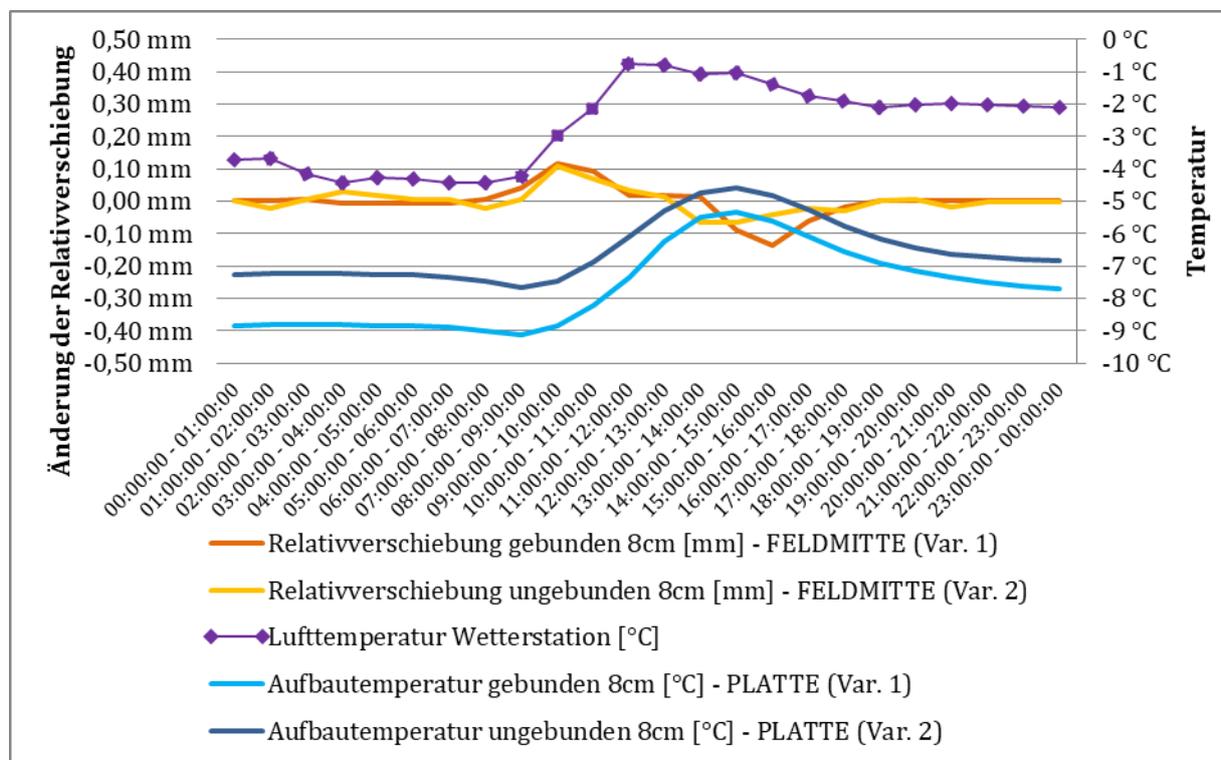


Abb. 4.40: Änderung der Relativverschiebung verglichen mit Temperatur 25.01.20

4.2.3 Analyse der Bodenfeuchte im Feld

Wie eingangs in **Kapitel 4.1.1** erwähnt, wurden die Bodenanalysesensoren in drei Positionen verbaut und messen jeweils Bodenfeuchte, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit, wobei nur die Werte der Bodenfeuchte herangezogen werden. Die Auswertung soll zeigen, wie sich Feuchtigkeit im Aufbau verteilt und welche Zusammenhänge sich zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag herleiten lassen.

Für die Analyse der Bodenfeuchte in der ungebundenen Bauweise wurde wie in **Kapitel 4.2.1** beschrieben, der Monat August 2019 untersucht, da hier im Gesamtverlauf die extremsten Regenereignisse festgestellt wurden.

Die Schwankung der Feuchtigkeit im Boden beträgt bei keinem Ereignis mehr als 5 %. Daraus lässt sich schließen, dass die Oberflächenentwässerung gut funktioniert.

4.2.3.1 Niederschlags-Extrema August 2019

Monatsverlauf

In **Abb. 4.41** sind zum einen Zeitpunkt und Intensität der Niederschläge im August 2019 und zum anderen die Auswirkungen auf die Bodenfeuchte an verschiedenen Positionen zu sehen. Die Feuchtigkeit in der ungebundenen Fuge ist naturgemäß am höchsten und weist auch nach Regenereignissen die stärksten Reaktionen auf, während der Verlauf der Sensoren unter der Platte und unterhalb des Drainbetons eher gedämpft ist. Die Differenz der Bodenfeuchte gemessen oberhalb und unterhalb des Drainbetons unter einer Fuge beträgt ca. 10% und ändert sich über den Monatsverlauf nicht merklich.

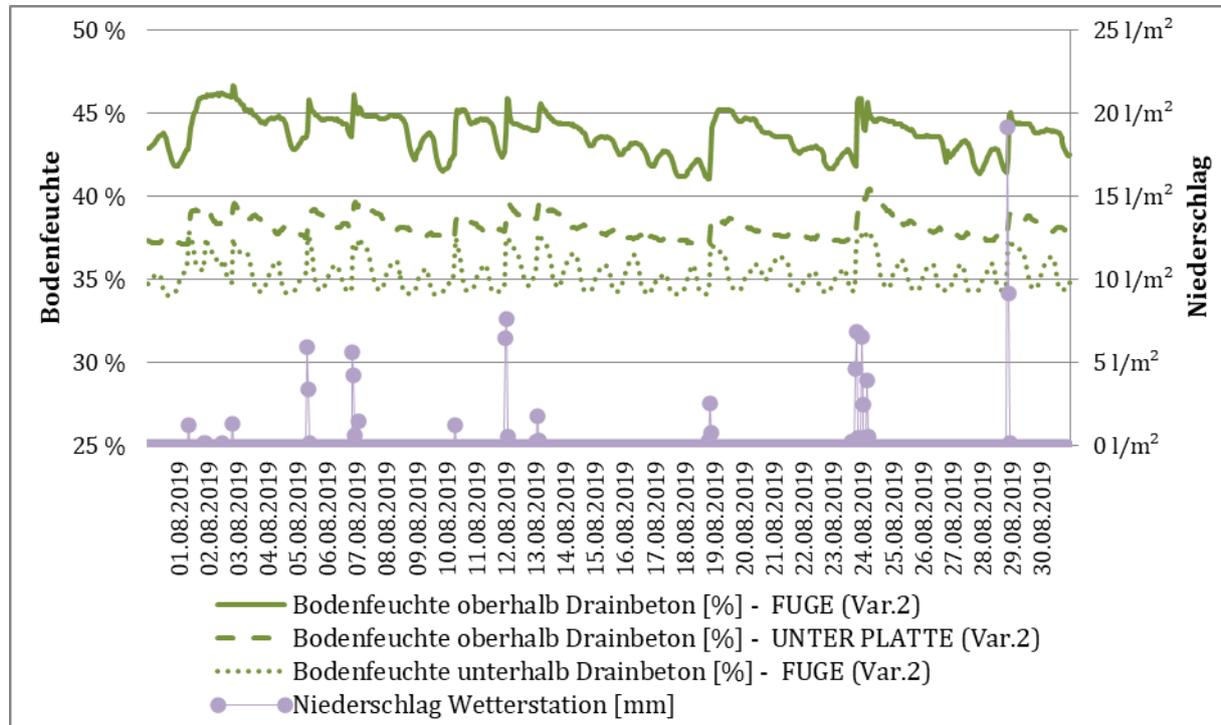


Abb. 4.41: Bodenfeuchte ungebundene Fläche und Niederschlag August 2019

Für die Untersuchung von Extremereignissen und deren Einfluss auf die Bodenfeuchte wurden das Starkregenereignis am 29.08.19 und das Dauerregenereignis von 24. auf 25.08.19 gewählt. Um die Auswirkungen von diesen Ereignissen besser interpretieren zu können, wurde für die

Tagesauswertung ein Zeitraum von 48 h gewählt. So kann besser analysiert werden, wie sich die Bodenfeuchte in den einzelnen Schichten ändert.

Tagesverlauf Starkregenereignis 29.-30. August 2019

Am 29.08.19 sind zwischen 20 und 23 Uhr rund 20 l/m^2 Regen gefallen.

Nach **Abb. 4.42** ist der Feuchtegehalt in der Fuge und unter der Platte **vor dem Regen** auf konstantem Niveau von ca. 38 % und unterhalb des Drainbetons ca. 34 %. **Während dem Regenereignis** steigt die Bodenfeuchte oberhalb des Drainbetons weniger als unterhalb an und der Wert ist zum Höhepunkt sogar auf gleichem Niveau. In **Abb. 4.41** sind generelle Tagesschwankungen unterhalb des Drainbetons zu beobachten. Während die ungebundene Bettung die Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum speichert, ist die Fähigkeit des Drainbetons, Wasser aufzunehmen und schnell wieder abzuleiten, **nach dem Niederschlag** zu erkennen. Die Bodenfeuchte oberhalb des Drainbetons bleibt auf dem höheren Niveau, während der Sensor unter der Drainbetonschicht nach ca. 12 h wieder den Ursprungswert anzeigt.

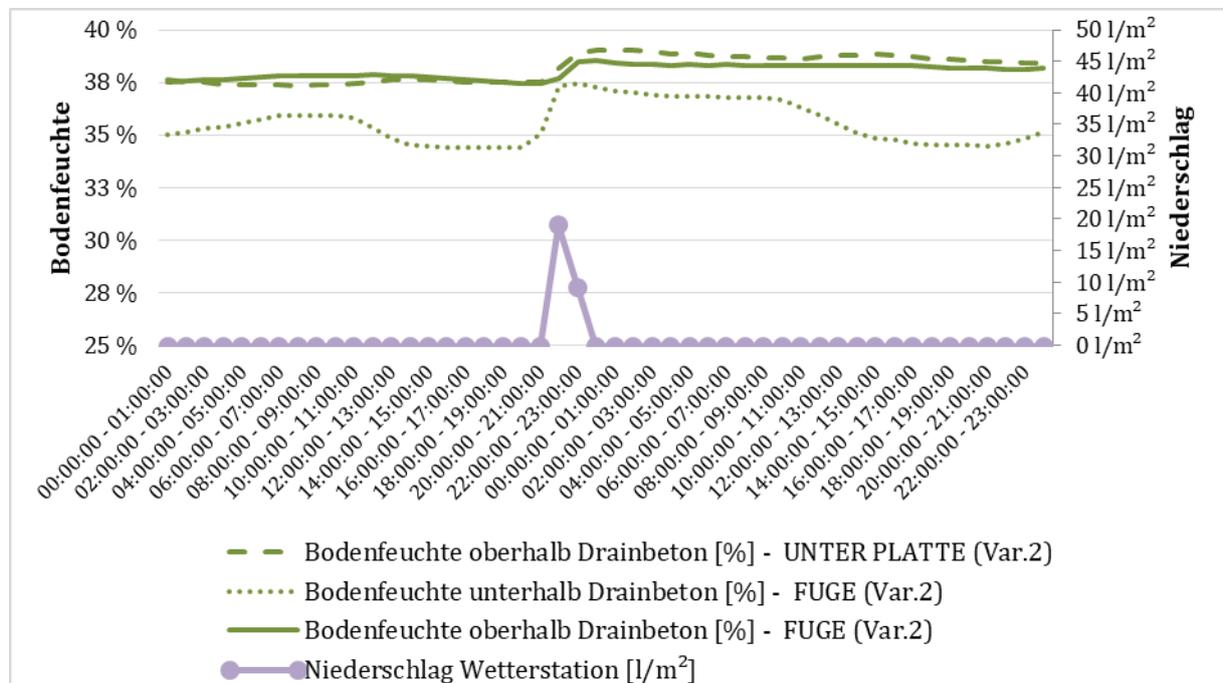


Abb. 4.42: Vergleich Bodenfeuchte und Niederschlag bei Starkregenereignis am 29.08.2019

Tagesverlauf Dauerregenereignis 24.-25. August 2019

Von 24.08.19 16:00 Uhr bis 25.08.19 06:00 regnete es am Testfeld mit kurzen Pausen durchgängig mit bis zu 10 l/m^2 . **Abb. 4.43** zeigt den Verlauf des Dauerregens.

Mit den ersten Tropfen steigt die Bodenfeuchte in der Fuge ober- und unterhalb des Drainbetons schlagartig an. Aufgrund der geringeren Regenintensität benötigt die Feuchtigkeit ein wenig Zeit, um sich in der Bettung zu verteilen. Daher stieg die Feuchtigkeit unter der Platte kontinuierlich bis zum schlussendlich fast identen Niveau wie in der Fuge an.

Auch hier ist die Funktionsweise des Drainbetons klar ersichtlich (siehe oben).

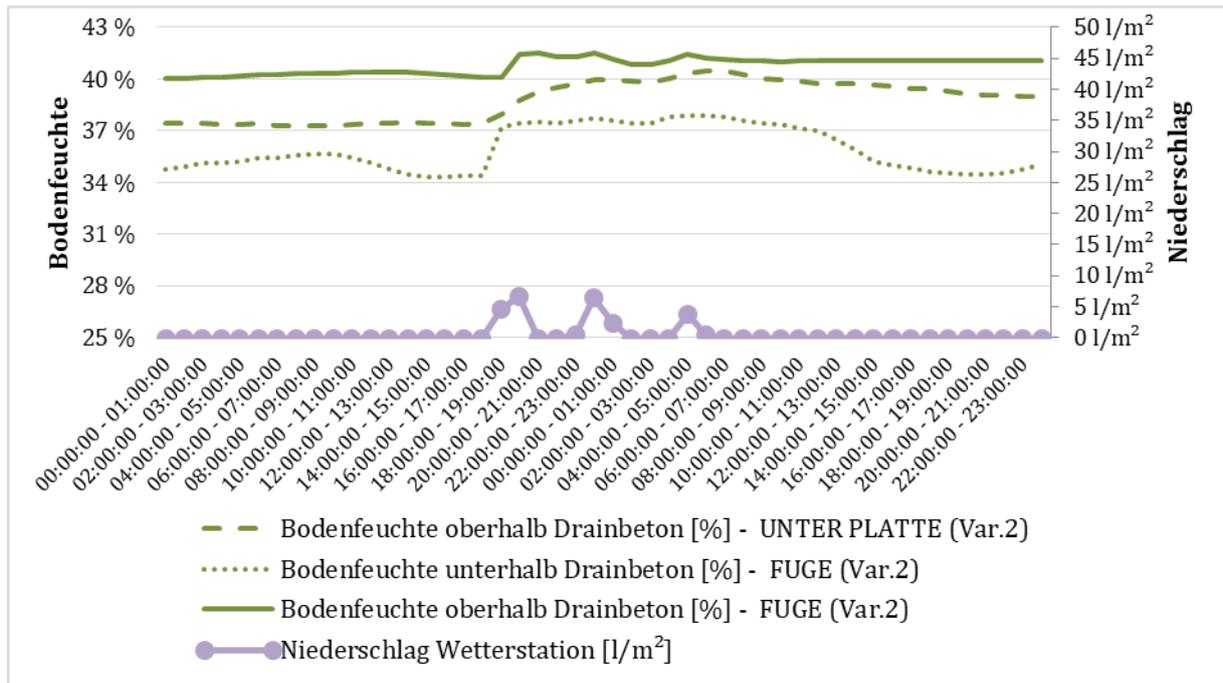


Abb. 4.43: Vergleich Bodenfeuchte und Niederschlag bei Dauerregenereignis 24.-25.08.19

4.3 Tragfähigkeitsmessungen

An den drei Varianten des Testfeldes wurden Tragfähigkeitsmessungen mit dem Fallgewichtsdeflektometer (FWD) durchgeführt. Die erste Messung erfolgte am 24.09.2019 und die zweite am 13.11.2020. Zum einen kann so die Tragfähigkeit der drei verschiedenen Oberbauvarianten bewertet und verglichen, und zum anderen eine etwaige Änderung dieser analysiert werden.

In diesem Kapitel wird gezielt auf den Unterschied der Tragfähigkeit der drei Aufbauvarianten des Testfeldes eingegangen. Abschließend wird der Einsenkungsmodul untersucht und wie sich dieser über den Betrachtungszeitraum ändert.

4.3.1 Messprogramm

Die Messung mittels FWD ist bei Pflasterplattenflächen nur in Plattenmitte sinnvoll. Für die Auswertungen wurde auf jeder Oberbauvariante ein Messpunkt in Plattenmitte mit jeweils drei Messungen für den Laststoß 100 kN gewählt.

In **Abb. 4.44** sind die genauen Lagen der Messpunkte MP1-1, MP2-1 und MP2-2 für alle Flächen dargestellt. Die Lastzentren befinden sich vom Widerlager aus für MP1-1 in Reihe 7 (~3,90 m), MP2-1 in Reihe 19 (~11,10 m) und MP2-2 in Reihe 7 (~3,90 m). Die Messungen wurden jeweils in der Mitte der jeweiligen Platte ($\pm 5\text{cm}$) durchgeführt.

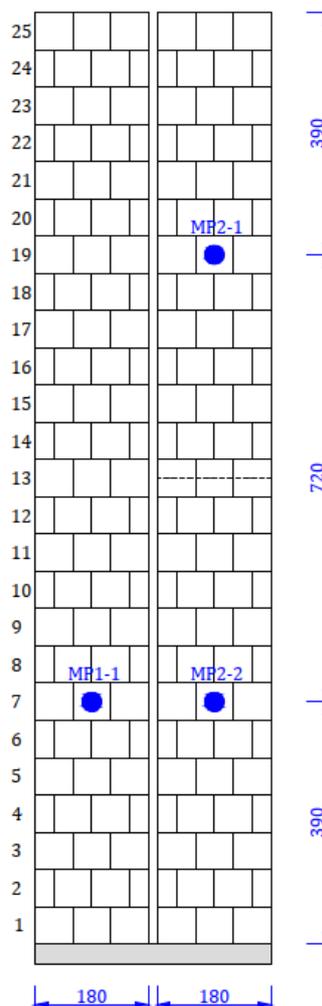


Abb. 4.44: Lage der Messpunkte für Tragfähigkeitsversuche

4.3.2 Auswertung und Bewertung der Tragfähigkeit

Für die drei Varianten 1, 2 und 3 wurde jeweils der Messwert des letzten Schlages (Laststoß 100 kN) für alle Messpunkte (MP1-1, MP2-1, und MP2-2) zur Bewertung herangezogen. In **Abb. 4.45** und **Abb. 4.46** sind die Verformungsmulden beschrieben durch die Deflektion für jede Fläche von 0 bis 1800 mm Abstand vom Lastzentrum für die Jahre 2019 und 2020 dargestellt.

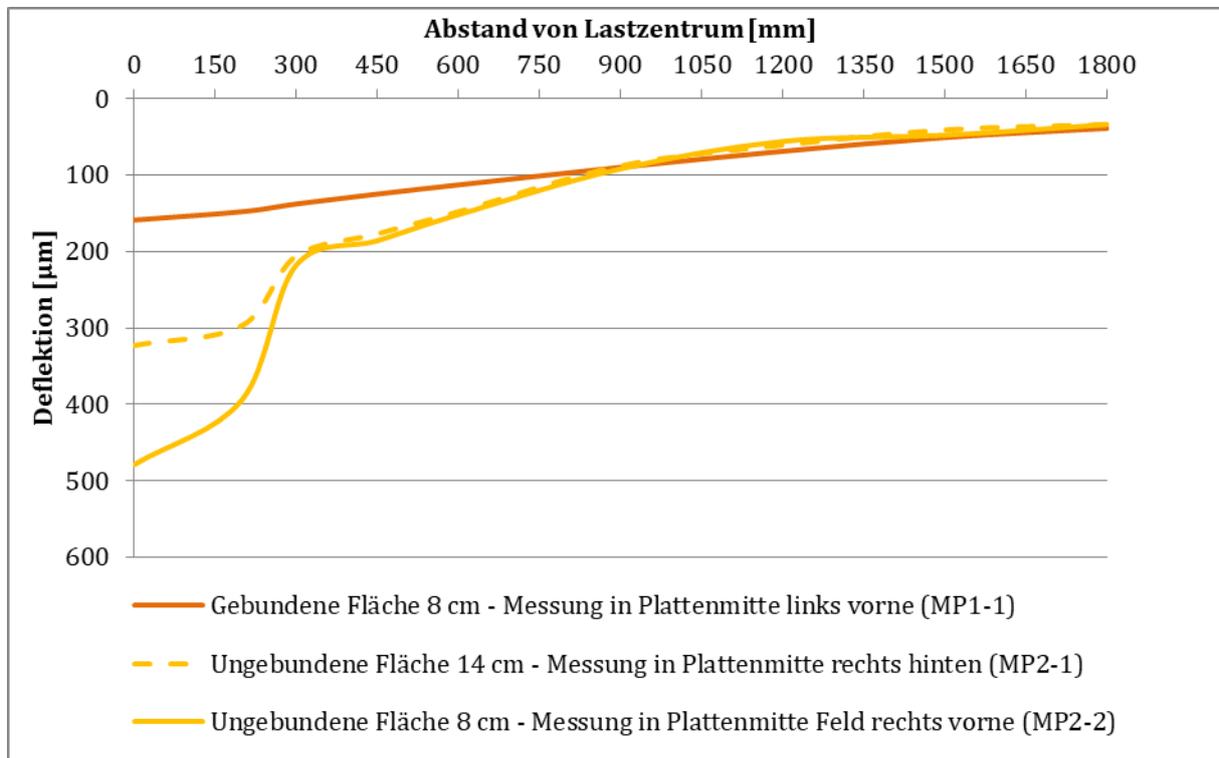


Abb. 4.45: Verformungskurve für 2019

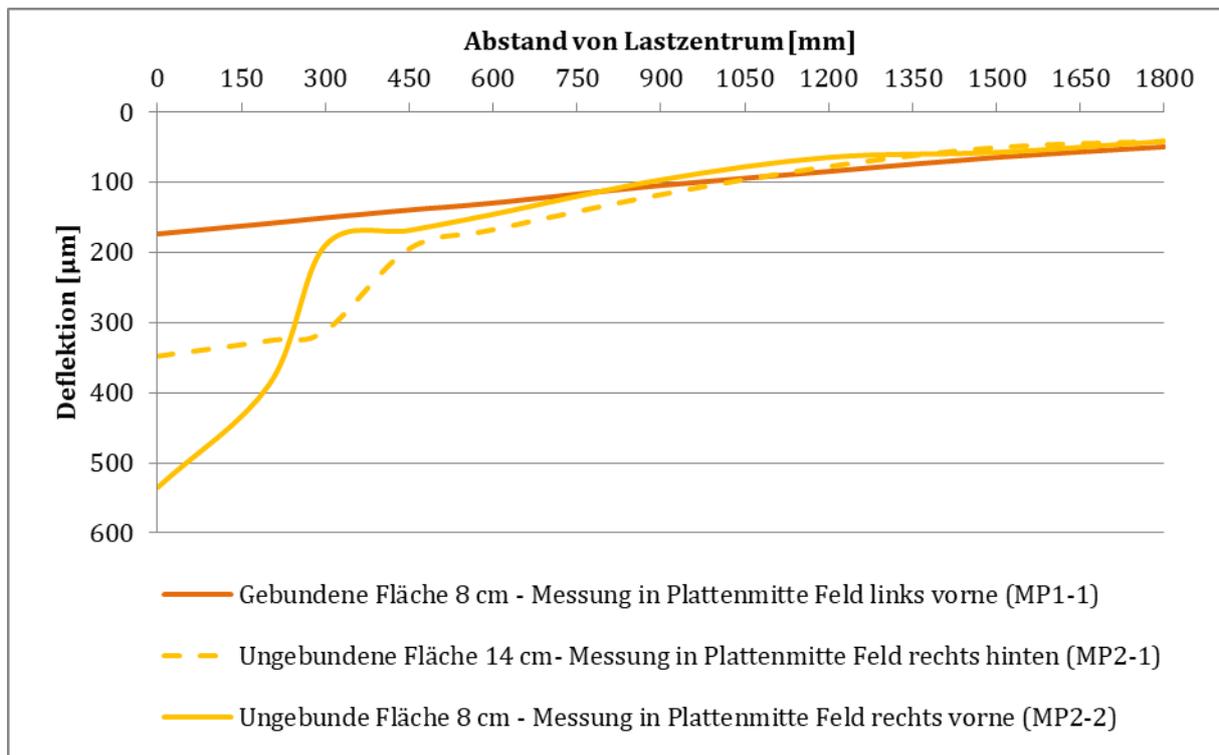


Abb. 4.46: Verformungskurve für 2020

Die Verläufe der Verformungsmulden zeigen sehr gut die Unterschiede der Bauweisen und Bau-typen. Die geringsten Verformungen im Bereich des Lastzentrums wurden bei der gebundenen Bauweise (Variante 1) gemessen. Bei der ungebundenen Bauweise mit 8 cm Platten (Variante 2) sind die Einsenkungen im Lastzentrum bereits fast dreimal so groß wie bei der Variante 1, wäh- rend die ungebundene Bauweise mit den 14 cm Platten (Variante 3) genau dazwischen liegt.

Bei den Aufbauten in ungebundener Bauweise ist der Einfluss der Plattengeometrie klar ersicht- lich. Aufgrund der Plattenabmessungen von 60x60 cm ist in einem Abstand von 300 mm vom Lastzentrum (Fuge) ein Sprung im Verlauf der Einsenkungsmulde zu erkennen. Da dieser Sprung in der Einsenkungsmulde für die gebundene Variante nicht ersichtlich ist, kann von einer verbesserten lastverteilenden Wirkung in der gebundenen Bauweise ausgegangen werden. In einem größeren Abstand vom Lastzentrum (ab ca. 900 mm) treten keine relevanten Unterschie- de zwischen den ungebundenen und gebundenen Varianten auf.

Der Vergleich zwischen 2019 und 2020 zeigt kaum Unterschiede bei der Deflektion. Bei 300 mm Abstand vom Lastzentrum weist die Variante 3 2020 eine etwas größere Deflektion auf als 2019. Das kann zum einen an der nicht identen Messposition liegen oder der Aufbau hat sich ein wenig verfestigt und kann somit die Last gleichmäßiger verteilen. Aber auch hier sind die Unterschiede kaum erwähnenswert.

4.3.3 Einsenkungsmodul

Um die Ergebnisse aus **Kapitel 4.3.2** besser interpretieren zu können, wird anhand des Einsen- kungsmoduls unter Berücksichtigung der aufgebrachtten Spannung aus dem FWD-Versuch und der Dicke der Pflasterplatten der Widerstand gegen die elastische Verformung des Aufbaus be- rechnet. Somit ist der Einsenkungsmodul ein Maß für die Steifigkeit des gesamten Aufbaus. Bei Messungen mit dem FWD erfolgt die Berechnung nach RVS 03.08.64 und **Gl. 8** wie folgt:

$$M_{D1} = \frac{\sigma_{FWD}}{\varepsilon_{FWD}} \quad \text{Gl. 8}$$

mit:

$$\sigma_{FWD} = \frac{F}{r^2 \pi} \quad \text{Gl. 9}$$

und

$$\sigma_{FWD} = \frac{D_1}{1000 \cdot d_{Platte}} \quad \text{Gl. 10}$$

D_1 ...Einsenkung direkt unter der Platte [μm]

d_{Platte} ...Dicke der Platte [cm]

F ...Aufgebrachte Last [N]

r ...Radius Lastplatte FWD [mm]

ε_{FWD} ...Verformung des Pflasteraufbaus unter dem Zentrum der Lastplatte [-]

σ_{FWD} ...Kontaktspannung unter der Lastplatte [N/mm^2]

Bei der Berechnung des Einsenkungsmoduls wurden die Werte für alle Aufbauten ermittelt und anschließend die Jahre 2019 und 2020 verglichen. Aus **Abb. 4.47** ist ersichtlich, dass die gebundene Bauweise (Variante 1) mit über 700 N/mm² den höchsten Wert aufweist. Die ungebundene Bauweise mit der gleichen Plattenstärke (Variante 2) hingegen erreicht nur ein Drittel dieses Wertes. Die ungebundene Bauweise mit 14 cm dicken Platten kommt mit über 600 N/mm² sehr nahe an die Variante 1 heran.

Beim Vergleich der Einsenkungsmoduln von 2019 und 2020 zeigt sich ein leichter Rückgang, wobei sich alle Werte in der gleichen Größenordnung reduzieren.

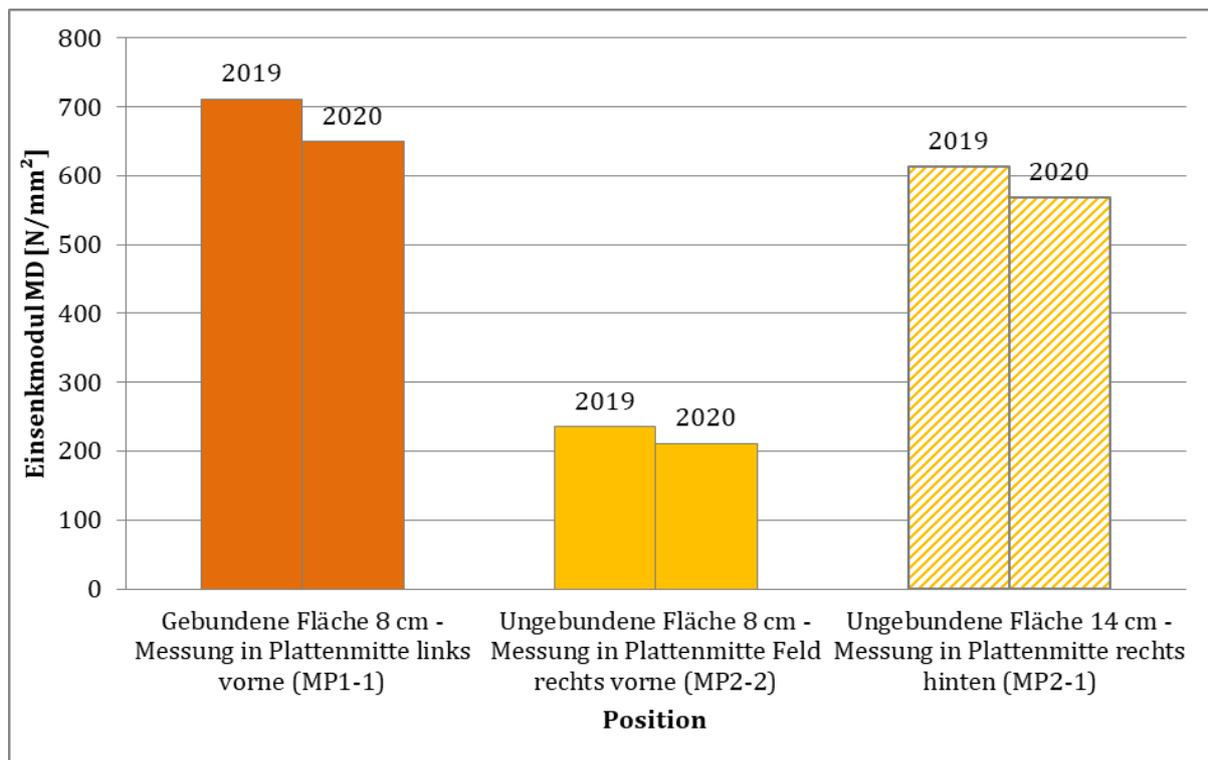


Abb. 4.47: Vergleich Einsenkungsmodul der FWD Versuche aus 2019 und 2020

5 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Der Einsatz der Pflasterbauweise hat in den letzten Jahren vor allem innerstädtisch immer mehr an Beliebtheit gewonnen. Bei verkehrsberuhigten Straßen und vor allem Plätzen glänzen gepflasterte Flächen durch ihre positiven soziokulturellen Effekte, welche sie aufgrund ihrer Vielfalt an Material, Form und Farbe mit sich bringen. Durch die Anordnung von durchlässigen Pflasterflächen gelingt es, Boden nicht zu versiegeln bzw. zu entsiegeln und so wertvolles Regenwasser im Untergrund versickern zu lassen. Das Wasser wird gespeichert, wodurch an heißen Tagen durch die Verdunstungsenergie ein kühleres Mikroklima erzeugt und zusätzlich die Kanalisation entlastet werden können. Aber nicht nur die durchlässige ungebundene Ausführung (Regelbauweise), sondern auch die gebundene Variante weist durch ihre gute Tragfähigkeit, geringen Wartungsaufwand und unzählige Gestaltungsmöglichkeiten viele Vorteile auf.

In der gegenständlichen Diplomarbeit wurde in einem ersten Schritt die Pflasterbauweise allgemein vorgestellt. Neben einschlägiger Fachliteratur erfolgte die Ausarbeitung der Arbeit vor allem unter Zuhilfenahme der gültigen RVS-Richtlinien und ÖNormen.

Um den Aufbau und die Funktionsweise zu verdeutlichen, erfolgte zunächst nach der Klärung wichtiger Begriffe, eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Bauweisen. Aus der historisch gewachsenen ungebundenen Bauweise (Regelbauweise) hat sich im Laufe der Zeit die gebundene und in weiterer Folge die gemischte Bauweise entwickelt. Wie bei fast allen Verkehrsflächen, handelt es sich bei Pflasterflächen um mehrschichtige Aufbauten. Die einzelnen Schichten des Oberbaus mit ihren Materialien und Anforderungen wurde ebenfalls beleuchtet.

In einem zweiten Schritt wurde auf die Frage eingegangen, welche Bedeutung die Bauweise und die Dicke der Pflasterplatten auf das Verhalten einer Pflasterfläche bei direktem Witterungseinfluss haben. Dafür wurde ein Testfeld im Forschungspark der Firma Baunit in Wopfung 156, 2454 Waldegg hergestellt. Es erfolgte ein Monitoring über einen Zeitraum von 21 Monaten von Juli 2019 bis März 2021.

5.1 Feldversuch

Die Fläche ist 15 m lang und setzt sich aus zwei jeweils 1,80 m breiten Feldern zusammen. Bei gleichem Plattenformat ist ein Feld in gebundener Bauweise, das andere Feld in ungebundener Bauweise ausgeführt, wobei das ungebundene Feld zwei unterschiedliche Plattenstärken aufweist. Somit ergeben sich drei Varianten für die Auswertung:

- **Variante 1:** Gebundene Bauweise auf Drainbeton – 8 cm Natursteinplatte (60x60 cm)
- **Variante 2:** Ungebundene Bauweise auf Drainbeton – 8 cm Natursteinplatte (60x60 cm)
- **Variante 3:** Ungebundene Bauweise auf Drainbeton – 14 cm Natursteinplatte (60x60 cm)

Für das Monitoring wurden Sensoren an verschiedenen Positionen verbaut. Diese zeichnen zum einen die Temperatur im Aufbau (Platte, Bettung, Drainbeton) und zum anderen die Horizontalverschiebung der einzelnen Teilflächen an der Oberfläche auf. Zusätzlich wurden in der

Variante 3 Analysesensoren verbaut, mit deren Hilfe in der ungebundenen Fuge und unter der Platte die Bodenfeuchte gemessen wurden.

Nachdem die Rohdaten in Microsoft Excel auf einheitliche auswertbare Form gebracht wurden, konnten über den gesamten Zeitraum immer wieder Ausfälle oder unrealistische Werte bei den eingebauten Sensoren erkannt werden. Mit den Temperatur- und Niederschlagsdaten der Wetterstation des Forschungsparks war es möglich, diese fehlerhaften bzw. fehlenden Daten zu kompensieren. Daher wurden mit August 2019 und Jänner 2020 einzelne Monate für die Detailanalyse ausgewählt. Zusätzlich wurden die Verläufe jener Tage der oben angeführten Monate ausgewertet, an denen Lufttemperatur- oder Niederschlagsextrema auftraten:

- Heißester Tag: 18.08.2019
- Kältester Tag: 25.01.20
- Starkregenereignis: 29.08.19
- Dauerregenereignis: 24.-25.08.19

Temperatur

Die Schwankung der Tageswerte ist an heißen Tagen wesentlich größer als an kalten. Diese spiegeln sich auch in den Auftautemperaturen wider. Je näher die Schicht an der Oberfläche ist, desto stärker reagiert sie auf Lufttemperaturänderungen. Die Temperatur im Drainbeton weist somit den konstantesten Verlauf auf und kann je nach Tages- oder Jahreszeit unter oder über der Lufttemperatur liegen. Generell liegen die Temperaturen in der Bettung und im Drainbeton der ungebundenen Variante leicht über jenen der gebundenen. Diese Tatsache kann mit dem Wassergehalt in der ungebundenen Bauweise zusammenhängen.

Verschiebungen

Bei Betrachtung der Verschiebungen sind die Zusammenhänge mit der Lufttemperatur klar ersichtlich. Bei einem Temperaturanstieg kommt es ohne wirkliche Verzögerung zu einer Ausdehnung der Flächen, während ein Temperaturabfall zu einer Stauchung der Fläche führt. An heißen Sommertagen bewegt sich die ungebundene Fläche stärker als die gebundene, an kalten Wintertagen ist dieser Unterschied nicht zu beobachten. Daraus lässt sich schließen, dass die ungebundene Bauweise stärker auf Schwankungen der Lufttemperatur reagiert.

Es ist jedoch zu erwähnen, dass sich die Bewegungen der Flächen im Promillebereich bewegen und daher vernachlässigbar klein sind.

Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchtesensoren messen den Feuchtegehalt unter einer Fuge unterhalb bzw. oberhalb der Drainbetontragschicht und unter der Platte oberhalb des Drainbetons. Die Feuchtigkeit in der Fuge steigt bei einem Regenereignis naturgemäß plötzlich an. Während eines Starkregens erhöht sich auch die Feuchtigkeit unter der Platte ruckartig und weist für kurze Zeit nach dem Niederschlag sogar höhere Feuchtigkeit als unter der Fuge auf. Bei Dauerregen hingegen steigt die Bodenfeuchte unter der Platte kontinuierlich an, weil es aufgrund der geringeren Regenintensität und der Größe der Platte etwas Zeit braucht, bis sich die Feuchtigkeit in der Bettung verteilt. Bei allen Niederschlagsereignissen sind der Zweck und die Funktionsfähigkeit des Drai-

nbetons zu beobachten, da die Abgabe der aufgenommenen Feuchtigkeit in den Unterbau schon nach wenigen Stunden erfolgt.

Tragfähigkeit

Im September 2019 und im November 2020 wurden mit dem FWD Tragfähigkeitsversuche an allen drei Varianten in Plattenmitte durchgeführt. Die höchste Tragfähigkeit wurde bei der gebundenen Bauweise (Variante 1) ermittelt, die ungebundene Variante 2 hat nur gut ein Drittel dieses Wertes erreicht. Bei der ungebundenen Bauweise mit 14 cm Platten (Variante 3) konnten annähernd die Werte der Variante 1 erreicht werden. Eine relevante Veränderung der Tragfähigkeit zwischen den Messungen ist nicht zu beobachten.

5.2 Fazit

Durch die Analyse der Monitoringdaten können Schlüsse über das Verhalten der Pflasterbauweise bei direkter Bewitterung getroffen werden.

Die durch Temperatur und Niederschlag hervorgerufenen Verschiebungen sind äußerst gering und für das vorliegende Testfeld vernachlässigbar klein. Die ungebundene Bauweise weist bei großen Temperaturschwankungen zwar mehr Bewegung auf, kann diese aufgrund ihrer Flexibilität aber schadlos ertragen.

Bei gleicher Plattendicke zeigt die gebundene Bauweise eine erheblich größere Tragfähigkeit. Dies muss bei der ungebundenen Bauweise daher durch Erhöhung der Plattendicke kompensiert werden.

Die Funktionalität der wasserabführenden Wirkung von Drainbeton bei der Verwendung als gebundene Tragschicht konnte anhand der Bodenfeuchtesensoren gezeigt werden. Die Aufnahme von Oberflächenwasser erfolgt genauso rasch, wie die Ableitung in den Untergrund. Somit können bei hoher Tragfähigkeit Frostschäden und Setzungen aufgrund von Staunässe vermieden werden.

Abschließend kann resümiert werden, dass die Bauweise der Pflasterdecke (gebunden bzw. ungebunden) das Verhalten unter direkter Witterung – wenn auch nur in geringem Ausmaß - beeinflusst. In weiterer Folge wäre es interessant, zusätzlich die Auswirkungen tatsächlicher Verkehrsbelastungen auf die verschiedenen Bauweisen zu untersuchen.

6 VERZEICHNISSE

6.1 Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/boden/flaecheninanspruchnahme> (Zugriff am 02.04.2021)
- [2] <https://www.gbv-aktuell.at/news/427-baustein-gegen-klimawandel-bodenversiegelung-eindaemmen> (Zugriff am 02.04.2021)
- [3] <https://kurier.at/chronik/oesterreich/13-hektar-pro-tag-verbaut-bodenversiegelung-bedroht-lebensraum/400930700> (Zugriff am 02.04.2021)
- [4] <https://baustoffbeton.at/betonflaechen/mehr-lebensqualitaet-durch-betonpflaster-entsiegelte-flaechen-fuer-urbanes-klima/>
- [5] Forum Qualitätspflaster (FQP) – *Qualitätspflaster - Lebensgefühl für alle, S.8-9*

**Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS):
Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (FSV), Wien.**

- [6] RVS 08.18.01 – Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen, Ausgabe 05/2020
- [7] RVS 03.08.63 – Oberbaubemessung, Ausgabe 06/2016
- [8] RVS 08.15.01 – ungebundene Tragschichten, Ausgabe 07/2010
- [9] RVS 08.03.01 – Erdarbeiten, Ausgabe 10/2010

ÖNI: Österreichischen Normungsinstitut, Wien:

- [10] ÖNORM B 2214: Pflasterarbeiten – Werkvertragsnorm, Ausgabe 04/2020
- [11] ÖNORM B 3108: Natürliche Gesteine – Einfassungs- und Pflastersteine – Abmessungen, Ausgabe 05/2014
- [12] ÖNORM EN 1338: Pflastersteine aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren, Ausgabe 01/2007
- [13] ÖNORM EN 1339: Platten aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren, Ausgabe 01/2007
- [14] ÖNORM EN 1340: Bordsteine aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren, Ausgabe 01/2007
- [15] Blab R, et al. Skriptum zur LVA "Straßenbau und Straßenerhaltung". 2020.
- [16] Shackel, B.: *Handbuch Betonsteinpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung*, S.11, 1996
- [17] Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (BDZ): *Regenwasserversickerung durch Pflasterflächen, Zement-Merkblatt Straßenbau* S.15, Köln, 06/2003, <http://www.bdzement.de>
- [18] Hristova, P.: *Durchlässige Pflasterdecken – Einsatzbedingungen und Anwendungsmöglichkeiten in Österreich*, 2009
- [19] Shackel, B.: *Handbuch Betonsteinpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung*, S.25, 1996
- [20] Tis- Tiefbau Ingenieurbau, Straßenbau - *Dauerhafte und belastbare Pflasterflächen: Grundregeln der Verarbeitung*, Ausgabe 7-8/2010
- [21] Forum Qualitätspflaster (FQP) – *Bauweisen*, <https://www.fqp.at/bauweisen> (Zugriff am 15.03.2021)

- [22] Bauwissen online: *Pflasterbeläge*, <https://www.bauwion.de/wissen/aussenraum/befestigte-flaechen/612-pflasterbelaege> (Zugriff am 17.03.21)
- [23] <https://www.steinfritz.de/pflastersteine/muka-pflastersteine-viandro-antik> (Zugriff am 24.03.2021)
- [24] <https://www.kann.de/produkte/s/74-universalverbundstein/>
- [25] Shackel, B.: *Handbuch Betonsteinpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung*, S.28-32, 1996
- [26] Shackel, B.: *Handbuch Betonsteinpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung*, S.85-88, 1996
- [27] Yoncheva, N.: *Pflasterbefestigungen in gebundener Bauweise*, 2015
- [28] <https://www.klinker.de/produkte/pflasterklinker/>
- [29] Shackel, B.: *Handbuch Betonsteinpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung*, S.89-90, 1996
- [30] <https://www.heidelbergcement.de/de/tragschichten>
- [31] <https://www.probst-handling.com/de/produkte/details/verlegemaschine-vm-301-pavermax>
- [32] <https://www.soll-galabau.de/aktuelle-news/ansicht-aktuelles/datum/2016/10/17/neues-leichtes-hand-abziehsystem-von-hunklinger.html>
- [33] <https://www.laserplanum.hpage.com/index.html>
- [34] <https://www.haeusler.co.at/produkte/terrasse/verarbeitung/moertelbett/>
- [35] <https://www.bauxpert.com/heimwerker/pflastersteine-verlegen/>
- [36] <https://www.probst-handling.com/de/produkte/details/verlegemaschine-vm-301-pavermax>
- [37] <https://www.wienerberger.de/informationen/pflaster/verarbeitung-pflasterklinker.html>
- [38] Atanasova, A.: Filterstabilität von Bettungs- und Fugenmaterial von Pflasterdecken
- [39] <https://www.schadeundsohn.de/bauen/sakret-baustoffe/373-pflaster-verfugen-leicht-gemacht-%E2%80%93-sakret-pflasterfugenm%C3%B6rtel-pf-1>
- [40] Riccabona, C.; Bednar, T.: *Baukonstruktionslehre 4 – Bauphysik*, S.9-10, 2010

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Oberbau mit Pflasterdecke [15].....	16
Abb. 2.2: Ungebundene Bauweise.....	16
Abb. 2.3: Gebundene Bauweise.....	17
Abb. 2.4: Gemischte Bauweise.....	17
Abb. 2.5: Beispiel Natursteinpflaster [23].....	19
Abb. 2.6: Beispiel Betonpflastersteine [24].....	25
Abb. 2.7: Steine mit Horizontalverbund [25].....	25
Abb. 2.8: Verbundsteine und Platten mit vertikalem Verbund [25].....	26
Abb. 2.9: Rasensteine und Rasengittersteine [25].....	27
Abb. 2.10: Klassifikation von Betonverbundpflastersteinen [26].....	28
Abb. 2.11: Beispiel Klinkerpflaster [28].....	30
Abb. 2.12: Verbandsarten von Pflastersteindecken gemäß RVS 08.18.01 [6].....	31
Abb. 2.13: Verbandsarten von Pflasterplattendecken gemäß RVS 08.18.01 [6].....	32
Abb. 2.14: Herstellung einer Tragschicht [30].....	39
Abb. 2.15: Versetzen einer Randeinfassung [31].....	40
Abb. 2.16: Herstellung einer ungebundenen Bettung händisch li. [32] und maschinell re. [33]... 41	41
Abb. 2.17: Herstellung einer gebundenen Bettung [34].....	41
Abb. 2.18: Händische Verlegung maschinelle li. [35] und maschinelle Verlegung mit Verlegemaschine re. [36].....	42
Abb. 2.19: Einbürsten des ungeb. Fugenmaterials li. und Rütteln der Fläche [37].....	42
Abb. 2.20: Filterstabiles (li.) und nicht filterstabiles Material (re.) [15].....	43
Abb. 2.21: Einbringen des gebundenen Fugenmaterials [39].....	43
Abb. 4.1: Oberbauvarianten.....	48
Abb. 4.2: Layout Testfeld.....	49
Abb. 4.3: Überblick Testfeld.....	49
Abb. 4.4: Instrumentierung.....	50
Abb. 4.5: Aufbau- und Lufttemperatur über gesamten Analysezeitraum.....	52
Abb. 4.6: Verschiebungsverlauf über gesamten Analysezeitraum.....	52
Abb. 4.7: Bodenfeuchtesensor und Lufttemperatur über gesamten Analysezeitraum.....	53
Abb. 4.8: Lufttemperatur- und Niederschlagsverlauf der Monatsmittelwerte über gesamten Analysezeitraum (Juni 2019 bis März 2021).....	54
Abb. 4.9: Lufttemperatur-Extrema (Stundenmittelwerte) über gesamten Analysezeitraum (Juni 2019 bis März 2021).....	54
Abb. 4.10: Niederschlags-Extrema (Stundenmittelwerte) über gesamten Analysezeitraum (Juni 2019 bis März 2021).....	54
Abb. 4.11: Relativverschiebung aller Flächen August 2019.....	56
Abb. 4.12: Relativverschiebung der gebundenen Fläche August 2019.....	56
Abb. 4.13: Relativverschiebung der ungebundenen Fläche August 2019.....	57
Abb. 4.14: Aufbautemperatur aller Flächen + Lufttemperatur August 2019.....	58
Abb. 4.15: Aufbautemperatur der gebundenen Flächen + Lufttemperatur August 2019.....	58
Abb. 4.16: Aufbautemperatur der ungebundenen Flächen + Lufttemperatur August 2019.....	59
Abb. 4.17: Aufbautemperatur aller Schichten + Lufttemperatur 18.08.19.....	59
Abb. 4.18: Aufbautemperatur aller Schichten in der gebundenen Fläche + Lufttemperatur 18.08.19.....	60
Abb. 4.19: Aufbautemperatur aller Schichten in der ungebundenen Fläche + Lufttemperatur 18.08.19.....	60
Abb. 4.20: Änderung der Relativverschiebung für alle Flächen 18.08.19.....	61
Abb. 4.21: Änderung der Relativverschiebung für die gebundene Fläche 18.08.19.....	61
Abb. 4.22: Änderung der Relativverschiebung für die ungebundene Fläche 18.08.19.....	62
Abb. 4.23: Änderung der Relativverschiebung in Feldmitte 18.08.19.....	62
Abb. 4.24: Änderung der Relativverschiebung am Feldende 18.08.19.....	63
Abb. 4.25: Änderung der Relativverschiebung verglichen mit Temperatur 18.08.19.....	63
Abb. 4.26: Relativverschiebung aller Flächen Jänner 2020.....	64
Abb. 4.27: Relativverschiebung der gebundenen Fläche Jänner 2020.....	65

Abb. 4.28: Relativverschiebung der ungebundenen Fläche Jänner 2020..... 65

Abb. 4.29: Aufbautemperatur aller Schichten + Lufttemperatur Jänner 2020..... 66

Abb. 4.30: Aufbautemperatur aller Schichten in der gebundenen Fläche + Lufttemperatur Jänner 2020..... 66

Abb. 4.31: Aufbautemperatur aller Schichten in der ungebundenen Fläche + Lufttemperatur Jänner 2020 67

Abb. 4.32: Aufbautemperatur aller Schichten + Lufttemperatur 25.01.20..... 67

Abb. 4.33: Aufbautemperatur aller Schichten in der gebundenen Fläche + Lufttemperatur 25.01.20 68

Abb. 4.34: Aufbautemperatur aller Schichten in der ungebundenen Fläche + Lufttemperatur 25.01.20 68

Abb. 4.35: Änderung der Relativverschiebung aller Flächen 25.01.20 69

Abb. 4.36: Änderung der Relativverschiebung der gebundenen Fläche 25.01.20..... 69

Abb. 4.37: Änderung der Relativverschiebung der ungebundenen Fläche 25.01.20 70

Abb. 4.38: Änderung der Relativverschiebung in Feldmitte 25.01.20..... 70

Abb. 4.39: Relativverschiebung am Feldende 25.01.20 71

Abb. 4.40: Änderung der Relativverschiebung verglichen mit Temperatur 25.01.20 71

Abb. 4.41: Bodenfeuchte ungebundene Fläche und Niederschlag August 2019 72

Abb. 4.42: Vergleich Bodenfeuchte und Niederschlag bei Starkregenereignis am 29.08.2019 73

Abb. 4.43: Vergleich Bodenfeuchte und Niederschlag bei Dauerregenereignis 24.-25.08.19 74

Abb. 4.44: Lage der Messpunkte für Tragfähigkeitsversuche 75

Abb. 4.45: Verformungskurve für 2019..... 76

Abb. 4.46: Verformungskurve für 2020..... 76

Abb. 4.47: Vergleich Einsenkmodul der FWD Versuche aus 2019 und 2020 78

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Anwendungsbereiche Pflastersysteme [7].....	12
Tabelle 2.2: Vergleich von Betonsteinpflaster mit anderen Deckenarten [19].....	14
Tabelle 2.3: Vergleich der Bauweisen gemäß RVS 08.18.01 [6].....	18
Tabelle 2.4: Pflasterplatten – ÖN B 3108 [11]	20
Tabelle 2.5: Großpflastersteine – ÖN B 3108 [11]	20
Tabelle 2.6: Kleinpflastersteine – ÖN B 3108 [11].....	21
Tabelle 2.7: Mosaikpflastersteine – ÖN B 3108 [11].....	21
Tabelle 2.8: Leistensteine – ÖN B 3108 [11]	21
Tabelle 2.9: Randsteine ohne Anlauf – ÖN B 3108 [11].....	22
Tabelle 2.10: Randsteine mit Anlauf – ÖN B 3108 [11].....	23
Tabelle 2.11: Anforderungen an den Naturwerkstein [6].....	24
Tabelle 2.12: Klassen in Abhängigkeit von der üblichen Anwendung [11]	24
Tabelle 2.13: Anforderungen an den Betonwerkstein	28
Tabelle 2.14: Wasseraufnahme [12]	28
Tabelle 2.15: Frost-Tausalz-Widerstand [12].....	29
Tabelle 2.16: Abriebwiderstandsklassen [12].....	29
Tabelle 2.17: Verbandsarten in Abhängigkeit von Steinform und -größe gemäß RVS 08.18.01 [6]	33
Tabelle 2.18: Zusammenhang zwischen Verbandsarten und Tragfähigkeit von Pflastersteindecken in ungebundener Bauweise [6]	34
Tabelle 2.19: Anforderungen an ungebundenes Bettungsmaterial [6]	35
Tabelle 2.20: Anforderungen an gebundenes Bettungsmaterial [6]	36
Tabelle 2.21: Anforderungen an ungebundenes Fugenmaterial [6].....	37
Tabelle 2.22: Anforderungen an gebundenes Fugenmaterial [6].....	37
Tabelle 2.23: Mindestanforderungen an ungebundene Tragschichten [8]	38
Tabelle 2.24: Übernahmeprüfungen und Anzahl der Prüfungen [10].....	44
Tabelle 4.1: Legende Auswertungen.....	51