

**DIPLOMARBEIT**

MASTER THESIS

**Dimensionierung von Pflasterbefestigungen mit  
Drainbeton: Prüftechnische Ansprache des  
Ermüdungsverhaltens und numerische Modellierung  
des Gebrauchsverhaltens**

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

Unter der Leitung von

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

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Lukas Eberhardsteiner

E230/3

Institut für Verkehrswissenschaften

Forschungsbereich für Straßenwesen

Eingereicht an der Technischen Universität Wien,

Fakultät für Bauingenieurwesen,

von

**Jesús Oltra Sánchez-Izquierdo**

01643190

Wien, am 14.03.2020

eigenhändige Unterschrift



## Kurzfassung

Mit dem zunehmenden Einsatz von Pflasterbefestigungen in den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Alternativen entwickelt, mit denen solche Strukturen ausgeführt werden können. Aus diesem Grund müssen neue Bemessungsmethoden implementiert werden, die für die verschiedenen Varianten gültig sind. Es gibt Varianten, in denen die obere Tragschicht aus Drainbeton besteht. Ihre Verwendung bietet große Vorteile, da sie eine hohe Tragfähigkeit aufweist und ebenso die Ableitung des Wassers ermöglicht. Einer der wichtigsten Aspekte bei der Dimensionierung von Pflasterbefestigungen ist das Ermüdungsverhalten der Tragschicht, da sie durch dynamische und statische Beanspruchungen vom Verkehr belastet wird.

Diese Arbeit befasst sich mit der Beschreibung des Verhaltens von Pflasterbefestigungen mit Drainbeton als gebundene Tragschicht. Zunächst werden der Aufbau und das Verhalten von Pflasterbefestigungen aus allgemeiner Sicht analysiert. Ebenso werden die Anforderungen und Bedingungen an einzelne Schichten und Materialien, die in der Verordnung festgelegt sind, dargestellt. Das Ermüdungsverhalten von Pflasterdrainbeton unter zyklischer Belastung wird im Anschluss mithilfe von Laborversuchen empirisch analysiert. Das Verständnis sowie die Beurteilung der Antwort dieses Materials auf diese Art von Belastung ist entscheidend für die Dimensionierung von Strukturen mit einer oberen Tragschicht aus Drainbeton.

Eine wesentliche Aufgabe bei der Bemessung von Verkehrswegen ist die Abschätzung der Belastung des Oberbaus durch den Verkehr. Dieser Prozess ist keine leichte Aufgabe, weshalb in der Regel komplexe Werkzeuge wie numerische Simulationsmethoden verwendet werden. Daher wurden alle notwendigen Materialparameter in ein Finite-Elemente-Modell aufgenommen und die entsprechende Belastung simuliert. Zudem wurden verschiedene konstruktive Varianten analysiert und die Größe der Pflasterplatten ebenso wie jene der Tragfähigkeit der unteren Tragschichten variiert.

## Abstract

With the increasing use of block pavements in recent years, a large number of alternatives have been developed with which such structures can be implemented. For this reason, new design methods must be implemented that are valid for the different pavement types. There are types in which the upper base layer is made of drain concrete. Its use offers great advantages, as it provides a high bearing capacity and also allows the water to be drained. One of the most important aspects when designing pavements is the fatigue behavior of the base course, as it is subjected to dynamic and static loads from traffic.

This thesis deals with the description of the behavior of block pavements with a base layer made of drain concrete. First, the composition and behavior of pavements and their various variants are analyzed from a general point of view. The requirements and conditions corresponding to each layer and each material laid down in the regulation are also set out. The fatigue behavior of concrete for long-lasting cyclic loads is then empirically analyzed in laboratory tests. Understanding and assessing the response of this material to this type of stress is critical in determining the dimensioning of this type of structure composed of an upper base layer of pervious concrete.

It is an essential task to know the behavior against traffic loads in order to increase and optimize the use of this type of structures. This process is not an easy task, which is why more complex and precise tools such as numerical simulation methods are usually used. In order to obtain such modelling, all necessary material parameters were recorded and included in a finite element model. In addition, various constructive variants were analyzed and the size of the paving slabs as well as the load-bearing capacity of the lower base layers were varied.

## Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßen- und Flugbetriebsflächenbau an der Technischen Universität Wien zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ronald Blab und Herrn Ass. Prof. Dipl. -Ing. Lukas Eberhardsteiner für die Möglichkeit meine Diplomarbeit am Straßenbauinstitut zu verfassen, bedanken. Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Univ. Ass. Dipl. -Ing. Lukas Eberhardsteiner für die exzellente Betreuung und Unterstützung: seine Ideen, Ratschläge und Feedback während der Ausarbeitung waren überaus hilfreich.

Auch dem Institut für Tragkonstruktionen, Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau möchte ich für die Unterstützung danken – insbesondere Herrn Proj. Ass. Dipl. -Ing. Dr. techn. Wolfgang Träger und allen anderen Mitgliedern des Prüflabors, die mir bei der Herstellung der Laborversuche tatkräftig geholfen haben.

Schließlich möchte mich bei meiner Familie dafür bedanken, dass sie mir eine derart gute Ausbildung ermöglicht hat, um meine Studienziele zu erreichen. Auch meiner Freundin möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen, da sie mich beim Erstellen der Arbeit mental unterstützt und mich stets ermutigt hat.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1	Geschichte und Anwendung von Pflasterdecken.....	7
2.2	Vergleich mit anderen Deckenarten .....	8
<b>3</b>	<b>Aufbau von Pflasterdecken</b> .....	<b>10</b>
3.1	Pflasterplatten und Pflastersteine.....	14
3.1.1	Naturwerksteine .....	14
3.1.2	Betonsteine bzw. -platten .....	15
3.1.3	Verbandsarten .....	18
3.2	Einflüsse von Verkehrslasten .....	20
3.3	Anforderungen an die Baustoffe .....	25
3.3.1	Pflaster .....	25
3.3.2	Bettungs- und Fugenfüllung.....	27
3.3.3	Obere Tragschicht .....	33
3.3.4	Untere Tragschicht.....	37
3.3.5	Unterbau .....	39
3.4	Ungebundene Bauweise.....	40
3.5	Gebundene Bauweise .....	41
3.6	Gemischte Bauweise.....	42
<b>4</b>	<b>Oberbaubemessung</b> .....	<b>43</b>
4.1	Bemessung nach RVS 03.08.63 .....	43
4.2	Standardisierte Oberbauausführung .....	46
<b>5</b>	<b>Materialuntersuchungen</b> .....	<b>49</b>
5.1	Drainbeton als Tragschicht.....	49
5.2	Ermüdung: Allgemein .....	51
5.3	Ermüdungsuntersuchungen im Labor.....	59
5.3.1	Zielsetzung .....	59
5.3.2	Versuchsaufbau .....	59
5.3.3	Versuchsdurchführung .....	61
5.3.4	Versuchsergebnisse.....	64
5.3.5	Inhomogenität des Drainbetons .....	69
<b>6</b>	<b>Struktursimulation</b> .....	<b>73</b>
6.1	Simulationstool.....	73

6.2	Materialparameter.....	75
6.2.1	Betonplatten .....	75
6.2.2	Bettung.....	76
6.2.3	Obere Tragschicht-Drainbeton .....	76
6.2.4	Untere Tragschicht.....	76
6.2.5	Untergrund .....	76
6.3	Interaktionen und Randbedingungen .....	77
6.4	Belastung.....	78
6.5	Finite Elemente-Netz .....	79
6.6	Ergebnisse .....	79
6.6.1	Pflasterdecke .....	79
6.6.2	Bettung.....	83
6.6.3	Obere Tragschicht – Drainbeton.....	85
6.6.4	Verformungen in der unteren ungebundenen Tragschicht.....	86
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>88</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>96</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>98</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>99</b>

## 1 Einleitung

Pflasterbefestigungen werden seit der Antike für den Straßenbau verwendet, da für den Verkehr von Fahrzeugen dauerhafte, feste und sichere Straßen benötigt wurden. Heutzutage bietet dieses System aufgrund der großen Vielfalt an Materialien, Formen und Farben viele Möglichkeiten für den städtischen Bereich. Zudem hat es im Vergleich zu anderen Varianten mehrere ökologische und wirtschaftliche Vorteile. Aus diesen Gründen hat seine Nutzung in den letzten Jahren zugenommen. In Österreich werden zum Beispiel Pflasterbefestigungen in mehr als 40% der Gemeindestraßen verwendet [53].

Das Ziel des Straßenaufbaus ist es, die Verkehrslasten in den Untergrund abzuleiten, ohne dabei die Tragfähigkeit in einer der verschiedenen Schichten zu überschreiten. Pflasterdecken sind Strukturen, die aus verschiedenen Materialschichten bestehen. Das strukturelle Verhalten dieses Systems gilt als flexibel, da es aus miteinander ineinandergreifenden Pflastersteinen besteht [79].

Pflasterbefestigungen bestehen aus Beton- oder Natursteinpflasterplatten verschiedener Abmessungen, die auf einem Sand- oder Mörtelbett ruhen und mit vertikalen Fugen, die mit Sand oder Mörtel gefüllt sind. Pflasterbefestigungen werden gemäß der österreichischen Richtlinie RVS 03.08.63 [73] in der Regel für Bereiche mit geringer Belastung oder wenig Verkehr verwendet. Es bestehen Standardaufbauten im Bemessungskatalog in RVS 03.08. 63 [73] für Bautypen mit ungebundener Tragschicht und mit Tragschicht mit Drainbeton in ungebundener Bauweise. Für die Ableitung dieser Oberbaustandards fehlten entsprechende numerische Modelle, die speziell die realitätsnahe Abbildung der Interaktion zwischen Pflasterplatten und zwischen Pflaster und Bettung berücksichtigen. Aus diesem Grund wird die von Hengl, H. L. [34] geleistete Arbeit als Grundlage und Referenz für die Entwicklung eines numerischen Simulationstools zur Vorhersage des Strukturverhaltens von Pflasterplattenbefestigungen herangezogen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, numerische Modelle zu erstellen, die für gebunde und ungebunde Pflasterplattenbefestigungen geeignet sind. Zudem soll eine numerische Simulation mit nichtlinearem Verhalten, welches der Realität ähnelt, durchgeführt werden. Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt ist das Ermüdungsverhalten des Drainbetons in der Tragschicht. Außerdem wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der es erlaubt, das Ermüdungsverhalten zufolge dynamischer Belastung zu bewerten.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Geschichte und Anwendung von Pflasterdecken

Die Geschichte von Pflasterdecken beginnt mit der Notwendigkeit Verkehrswege zu schaffen, die sicher befahren werden können. In der Vergangenheit wurden Steine in ihrem natürlichen Zustand verwendet. Dies entwickelte sich jedoch zunehmend hin zur Platzierung von geschnitzten Steinblöcken, da dadurch eine bessere Anpassung zwischen den einzelnen Elementen ermöglicht wurde. Diese Nutzung begann mit der Schaffung neuer urbaner Kerne zu wachsen. Mit dem Aufkommen des Automobils wurden allerdings sehr große Flächen aus bearbeitetem Stein benötigt, was sehr hohe Kosten bedeutete. Aus diesem Grund begann man Tonblöcke und später auch Holz zu verwenden. Schließlich entwickelten sich Bauweise aus Beton und Asphalt, welche heute die gängigsten Systeme sind [81].

Diese ersten Nutzungen von Pflasterstraßen gehen auf das Jahr 3000 v. Chr. in Babylon, Kreta, Ägypten und Griechenland zurück [42]. Die wahre Entwicklung dieser Art von Straßen ereignete sich jedoch in der Römerzeit. Damals bestand aufgrund der Erweiterung des Römerreiches der Wunsch, Handelswege zu erweitern und als Verbindung zwischen den verschiedenen Städten des Reiches zu dienen [24]. Von diesem Moment an erlebten Pflastersteine eine große Entwicklung, die sich in komplexere Straßen umwandelte, mit einer Behandlung des Untergrunds und einer bestimmten Disposition, so dass die Wagen einer bestimmten Spur folgten. Darüber hinaus wussten die Römer, dass Wasser ein Problem für diese Art von Straßen darstellte. Daher entwickelten sie Entwässerungssysteme, um eben jenes Problem zu vermeiden. Wie Huurman, M. [41] darlegt, gibt es viele Beispiele, die zeigen, dass die von den Römern errichteten Straßen nach wie vor in einem guten Erhaltungszustand sind, etwa jene in Tamgad, Algerien [41]. Dies lässt uns glauben, dass die Qualität der Konstruktionen für die damalige Zeit recht bemerkenswert war. Offensichtlich sind viele dieser Straßen nach dem Fall des Römischen Reiches außer Betrieb geraten und haben sich aufgrund mangelnder Instandhaltung stark verschlechtert.

Im Mittelalter waren Natursteinpflaster aufwendiger gestaltet und mussten eine Standardspurweite aufweisen, die hauptsächlich in den Straßen der Stadt wichtig war.

In Deutschland entwickelten sich Betonpflastersteine sehr rasch, was auf die Entwicklung von Vibrationskompressor-Maschinen für die Massenproduktion zurückzuführen ist. Dies stellte aufgrund der Formenvielfalt und des im Vergleich zu anderen Pflastersteinarten moderaten Preises (dank der Massenproduktion) einen großen Erfolg dar [81]. Zudem war das Einsatzspektrum sehr breit – es reichte von Fußgängerzonen bis hin zu stark frequentierten Zonen.

Derzeit werden Betonpflastersteine vor allem in städtischen Gebieten eingesetzt, da die Fahrzeuglasten und Geschwindigkeiten dort höher sind.

Es gibt viele Gründe den Einsatz von Pflasterdecken zu erhöhen, denn sie haben viele Vorteile, wie zum Beispiel vergleichbare Herstellungskosten wie andere Bauweisen, eine sehr schnelle Bauzeit und Inbetriebnahme, eine einfache Instandhaltung sowie letztlich, bessere Ästhetik [81]. Daher werden neue Systeme und Bauformen entwickelt, mit dem Ziel, die Bauweise zu optimieren und bessere Antworten auf die Anforderungen sowohl auf der Belastungsebene als auch auf der Qualitätsebene zu erhalten.

Pflastersteine sind in der Regel Beton- oder Natursteinblöcke mit einer Dicke von mehr als 5 cm, die auf einer Bettung verlegt werden, welche korrekt verdichtet und nivelliert werden muss. Die ungebundene Bauweise bezieht sich auf eine Bettung und Fugen, die aus Sand bestehen, während diese bei gebundener Bauweise aus Mörtel besteht.

## **2.2 Vergleich mit anderen Deckenarten**

Konventionelle Pflasterbefestigungen sind eine Konstruktion aus Pflastersteinen, Bettungs- und Fugensand, die auf ungebundene bzw. gebundene Tragschichten gelagert wird [20]. Diese Systeme vereinen und kombinieren einige der Vorteile von starren und flexiblen Belägen. Das Verhalten dieser Art von Strukturen wird aufgrund der Nachgiebigkeit des Sandes (sowohl in der Bettung als auch in den Fugen) als flexibel bezeichnet.

Im Laufe der Geschichte hat sich die Zusammensetzung jeder der Schichten weiterentwickelt, so dass sich neuartige mögliche Varianten ergeben, mit neuen Materialien sowie neuen Formen. Pflasterdecken wurden im Laufe der Geschichte durch das Aufkommen anderer Varianten wie Asphalt und Beton zurückgedrängt. Deren Nutzung ist auf städtische Gebiete und nicht sehr hohe Verkehrsbelastungen beschränkt. Mit dem Einsatz neuer Techniken hat deren Einsatz jedoch in den letzten Jahren abermals deutlich zugenommen. Der Einsatz von Pflasteraufbauten ist jedoch ebenso wie bei anderen Deckenarten nicht für alle Anwendungsfälle optimal. Aus diesem Grund bedarf es einer Bauweise, um verschiedene Varianten vergleichen zu können. Um die wesentlichen Vor- und Nachteile dieser Bauweise gegenüber anderen Deckenarten zu ermitteln, wird die Vergleichstabelle von [81] (siehe Tabelle 1) verwendet. Jene Tabelle stellt die verschiedenen Qualitäten der einzelnen Deckenarten zusammengefasst dar:

Tabelle 1. Vergleich von Betonpflaster mit anderen Deckenarten [81]

Eigenschaften	Betonsteinpflaster	Asphalt	Beton
<u>Kosten</u>	gering	hoch	gering
<b>Energieverbrauch</b>			
<b>Kosten</b>		gering	hoch
<b>Herstellung</b>	mittel	hoch	mittel
<b>Erhaltung</b>	gering	mittel	mittel
<b>Wiederverwendung</b>	günstig einfach wiederverwend-bar		
<u>Gestaltung</u>	sehr gut	schlecht	mittel
<b>Erscheinungsbild</b>	Farbe Textur Verlegemuster		wenig Möglichkeiten für Farben und Texturen
<u>Herstellung und Erhaltung</u>			
<b>Gerätebedarf</b>	gering einfaches Gerät	vielfältige maschinelle Ausrüstung	Fertiger
<b>Bauzeit</b>	mittel	kurz	länger (Betonerhärtung)
<b>Aufgrabungen und Wiederherstellung</b>	einfach von Hand	Aufbruchhammer und neues Mischgut erforderlich	schwierig und teuer
<b>Wiederverwendung</b>	einfach, ohne Aufbereitung	Aufbereitung erforderlich	Aufbereitung erforderlich
<u>Nutzung</u>			
<b>Dauerhaftigkeit</b>	gut	mittel	gut
<b>Widerstand gegen:</b>			
<b>Hohe Achslasten</b>	sehr gut	gut	sehr gut
<b>Punktlasten</b>	sehr gut	schlecht	sehr gut

<b>Schubbelastung</b>	gut	schlecht	sehr gut
<b>Kraftstoffe und Öle</b>	gut	schlecht	gut
<b>Griffigkeit</b>	befriedigend	befriedigend	gut
	bei $v \leq 60$ km/h		

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Pflasterdecken gegenüber anderen Deckenarten Vorteile in Bezug auf das Verhältnis von Kosten und Leistung in verschiedenen Aspekten aufweisen. Dazu gehören etwa Instandhaltungskosten, Wiederverwendung, eine einfache Herstellung und eine positive Nutzung bei Verkehrsbelastungen.

### 3 Aufbau von Pflasterdecken

Eine Befestigung mit Pflaster ist eine Verkehrsfläche, die aus verschiedenen übereinanderliegenden Schichten besteht. Das Hauptziel des Oberbaus ist es, die Lasten möglichst gleichmäßig auf den Untergrund zu verteilen. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Typen und Bauweisen des Pflasterbaus entwickelt, mit dem Ziel diese zu optimieren.

Eine Befestigung mit Pflaster besteht aus den folgenden Schichten [51][21]:

- **Unterbau:** Natürliches Gelände, welches ein bestimmtes Maß an Tragfähigkeit aufweisen muss und gegebenenfalls noch verdichtet werden muss. Der Boden ist so vorbereitet, dass er eine ebene und homogene Auflagefläche für den Oberbau bietet, indem er das organische Material, das diese Schicht enthalten kann, entfernt oder ersetzt.
- **Untere ungebundene Tragschicht:** Schichten, aus ausgewähltem körnigem Material, verdichtet, direkt auf dem Unterbau. Die untere ungebundene Tragschicht muss aus homogen gemischtem, verdichtetem, frostsicherem Material bestehen, das frei von organischen Stoffen, Ton, Müll, Ablagerungen etc. ist. Die Sieblinie des Materials ist in den entsprechenden Richtlinien definiert.
- **Obere Tragschicht:** Haupttrageelement des Aufbaus. Es kann aus körnigem Material mit ungebundener Tragschicht oder aus Drainbeton (gebundene Tragschicht) bestehen.
- **Pflasterbettung:** Stützelement der Pflastersteine, das so konzipiert ist, dass Dickenunterschiede aufgrund von Fertigungstoleranzen ausgeglichen werden.
- **Pflastersteine oder -platten:** Betonfertigteile oder bearbeitete Natursteine, deren Außenfläche nach dem Einbau die Deckschicht der einzubauenden Fläche bildet. Sobald die Pflaster auf der Bettung positioniert sind, benötigen ihre Fugen eine abschließende Füllung, um die Lasten, denen sie durch die

Einwirkung des Verkehrs ausgesetzt sind, auf die angrenzenden Elemente nach unten zu übertragen.

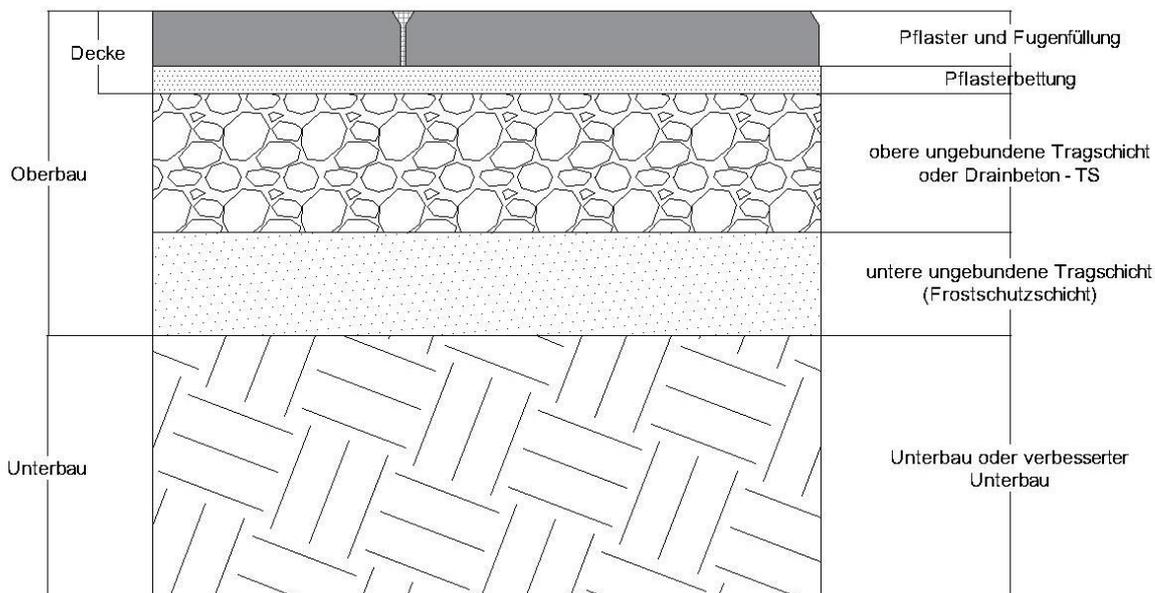


Abbildung 1. Befestigung mit Pflaster

Je nach Material aus dem sich die obere Tragschicht zusammensetzt, kann man zwischen zwei Standardbauweisen für Pflasterbefestigungen unterscheiden. Bei der Dimensionierung dieser Art von Konstruktion müssen bestimmte Faktoren berücksichtigt werden. Der Einfluss auf den Widerstand gegen Verkehrslasten ist in folgender Tabelle [81] dargestellt:

Tabelle 2. Einflussfaktoren auf den Widerstand von Betonsteinpflaster [81]

Schicht im Aufbau	Einflussfaktoren auf den Widerstand gegen Verkehrsbelastung
<b>Betonpflasterstein- bzw. platte</b>	Form Größe Dicke Verlegeverband
<b>Bettungssand</b>	Schichtdicke

	Korngrößenverteilung Kornform (Kantigkeit) Feuchtegehalt
<b>Tragschicht und Unterbau</b>	Mineralstoff Dicke
<b>Untergrund</b>	Bodenart Festigkeit (Tragfähigkeit)

Beim Einsatz der Pflasterbauweise findet man eine große Anzahl von Varianten, bei denen zwischen zwei möglichen Bauweisen unterschieden werden kann – der gebundenen und der ungebundenen Bauweise. Sie unterscheiden sich durch die Art der Fugen- und Bettungsmaterialien.

Tabelle 3. Mögliche Kombinationen für die ungebundene Bauweise [21]

**Alternative mit ungebundener Bauweise**

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Schicht</b>																
Pflasterstein bzw. Pflasterplatte und Sand	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>Obere Tragschicht</b>																
Schotter		+	+	+	+											
Stabilisiert					+	+	+	+								
Asphalt									+	+	+	+				
Drainbeton													+	+	+	+
<b>Untere Tragschicht</b>																

Kies																
Stabilisiert		+			+				+					+		
			+			+				+					+	
Stabilisierter Untergrund				+			+				+					+

Tabelle 4. Mögliche Kombinationen für die gebundene Bauweise [21]

**Alternative mit gebundener Bauweise**

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Schicht</b>																
Pflasterstein bzw. Pflasterplatte und Mörtel	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>Obere Tragschicht</b>																
Schotter		+	+	+	+											
Stabilisiert					+	+	+	+								
Asphalt									+	+	+	+				
Drainbeton													+	+	+	+
<b>Untere Tragschicht</b>																
Kies		+			+					+				+		
Stabilisiert			+			+					+				+	
Stabilisierter Untergrund				+			+					+				+

### 3.1 Pflasterplatten und Pflastersteine

Die oberste Schicht von Pflasterbelägen besteht aus Pflastersteinen oder Pflasterplatten, die mit Hilfe eines Füllmaterials zusammengesetzt werden, um eine durchgehende Oberfläche zu erhalten. Die im Laufe der Geschichte verwendeten Pflastersteine und Pflasterplatten bestanden aus Naturstein, Beton, Klinker und Holz [81]. Heutzutage werden hauptsächlich jene aus Naturstein und Beton zur Verwendung herangezogen. Preislich betrachtet sind Natursteinpflaster am teuersten, gefolgt von Holz- und Klinkerpflastersteinen. Betonsteinpflaster stellen eine kostengünstige Variante dar und bieten dennoch eine Vielzahl von Vorteilen. Diese reichen von den vielen Möglichkeiten an Formen, die das Verhalten dieser Art von Decken verbessern bis hin zu einer größeren Materialhomogenität als bei natürlichen Baustoffen. Schließlich weisen sie eine große Vielfalt an Farben, Formen und Texturen auf, welche den ästhetischen Aspekt begünstigen.

#### 3.1.1 Naturwerksteine

Naturwerksteine werden seit der Antike als Pflaster verwendet. Diese bestehen aus Natursteinen, die eine hohe mechanische Widerstandsfähigkeit, vor allem gegen Druckkräfte aufweisen. Beispiele hierfür sind unter anderem Granit, Basalt oder Gneis. Der typischste Verband, der historisch gesehen verwendet wurde, war der Läufer- oder Fischgrätverband in einem Winkel von  $45^\circ$  [81]. Darüber hinaus wurden sie aber in mehreren Formen nach mechanischen und ästhetischen Kriterien angeordnet [81]. In der Vergangenheit wurde Sand sowohl als Bettung als auch als Fugenfüllstoff verwendet [81]. Dennoch gibt es immer mehr Fälle, in denen ein Vergussmaterial verwendet wird, um die Fugen zu füllen, wie z. B. Zementmörtel.

Eine Klassifizierung der natürlichen Gesteine kann in Abhängigkeit von den Abmessungen vorgenommen werden. Diese sind normgemäß durch die ÖNORM B 3108 [62] [39]:

- Pflasterplatten: Hierbei handelt es sich um rechteckige oder quadratische Stücke, bei denen das Verhältnis zwischen der Länge und der Dicke der Platte größer als 3:1 ist. Zudem wird ein Breite-Länge-Verhältnis von maximal 1:2 empfohlen.
- Großpflastersteine: Diese Art von Stein bezieht sich ebenfalls auf rechteckige oder quadratische Stücke, bei denen das Verhältnis zwischen Länge und Dicke des Steins ca. 1:1 entspricht. Manchmal werden kubische Stücke gebildet. Der Dickenbereich liegt in der Regel zwischen 9 und 18 cm.
- Kleinpflastersteine: Hier ist die Rede von kubischen oder halbkubischen Stücken, die kleiner als die Großpflastersteine sind. Üblicherweise werden Abmessungen zwischen 7 und 11 cm verwendet.

- Mosaikpflastersteine: Die letzte Art der natürlichen Gesteine sind kleinere Steine, aus denen Mosaik hergestellt werden. Die verwendeten Größen liegen zwischen 3 und 6,5 cm pro Seite.

Für Naturpflastersteine gelten die Kriterien für die Biegezugfestigkeit gemäß ÖNORM EN 12372.

### **3.1.2 Betonsteine bzw. -platten**

Wie bereits erwähnt, sind Betonpflastersteine die am häufigsten verwendete Variante. Dies liegt an den großen Vorteilen, die sie gegenüber anderen Materialien bieten. Dazu gehört beispielsweise die Vielfalt der Formen, mit denen sie hergestellt werden können. Diese beeinflussen die Länge der Verbindung in Abhängigkeit von der Geometrie des Pflasters.

Mit dem Ziel, eine Klassifizierung unter den vielen Formen, die auf dem Markt sind, vorzunehmen, können Betonpflastersteine laut Schackel, B. [81] hauptsächlich in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Steine mit Horizontalverbund: Diese bilden die am häufigsten verwendete Variante, da ihr Herstellungspreis niedriger als bei anderen komplexeren Varianten ist. Normalerweise ist die Verlegung dieser Art von Pflastersteinen einfach und kann manuell erfolgen. Das Verhältnis zwischen der Länge und der Breite der Steine liegt in der Regel in einem Verhältnis von 2:1.
- Steine beziehungsweise Platten mit Vertikalverbund: Alle diese Platten haben komplexe Formen, die es ermöglichen, die Teile miteinander zu verbinden. Innerhalb dieser Gruppe können Platten mit zusätzlichem Horizontalverbund hinzugefügt werden. Im Allgemeinen sind diese Formen schwerer und größer als die der vorherigen Gruppe und ihre Ausführung ist meist komplexer. Aus diesen Gründen ist der Einsatz deutlich seltener.
- Ökologische Steine: Steine, die in der Regel aus Beton bestehen und das Wachstum von Gras durch Löcher ermöglichen. Es kann zwischen Rasensteinen und Rasengittersteinen unterschieden werden. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass die Löcher eine bessere Ableitung des Wassers ermöglichen.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Formate von Betonsteinpflaster sowie verschiedene Materialkonfigurationen entwickelt, um den Widerstand gegen vertikale und horizontale Belastungen zu optimieren. Da Pflasterdecken aus einzelnen Elementen bestehen, ermöglichen sie im Vergleich zu anderen Systemen eine einfache Verlegung sowie eine bessere Instandhaltung. Dennoch gibt es verschiedene Varianten, die das Verhalten bei verschiedenen Beanspruchungen in bestimmten Aspekten verbessern.

Betonpflastersteine sind international als A, B und C klassifiziert. Diese werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben [81]:

- Pflastersteine Kategorie A: Aufgrund der Geometrie der Teile und der Anordnung ihrer Fugen ermöglichen Pflastersteine der Kategorie A einen optimalen Verbund – sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung.
- Pflastersteine Kategorie B: Pflastersteine der Kategorie B sind Verbundsteine, bei denen zwei Seiten in Kontakt stehen. Sie erhalten in einigen ihrer Achsen eine bessere Reaktion gegen Parallelverschiebungen.
- Pflastersteine Kategorie C: Pflastersteine der Kategorie C bestehen aus geraden Seitenflächen, die keine gesonderte Verzahnung bieten, um Längs- oder Drehbewegungen zu widerstehen.

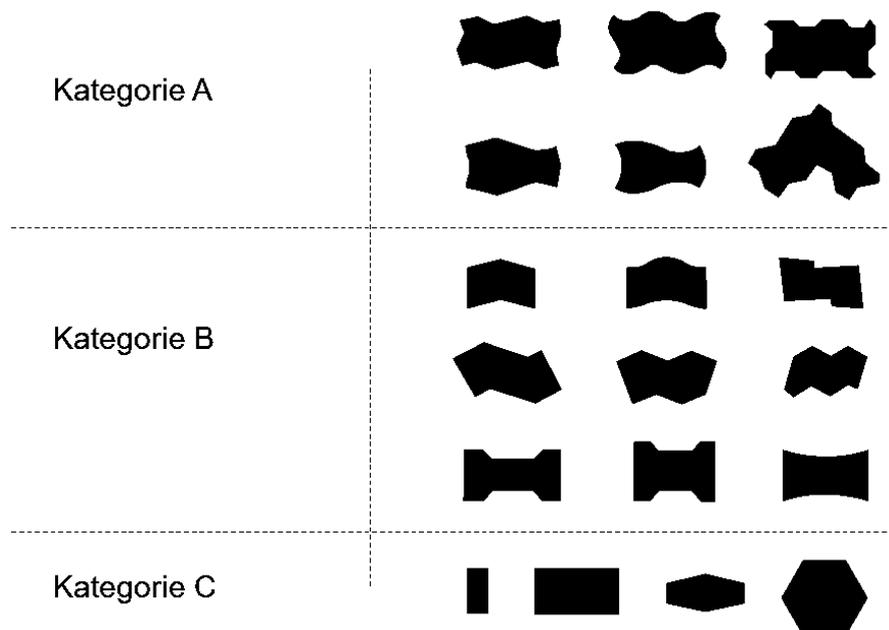


Abbildung 2. Klassifikation der Verbundpflastersteinformen laut Shackel, B. [81][24]

Betonpflasterdecken werden hauptsächlich für Straßen und Durchgänge sowie für Verkehrsflächen und Parkplätze auf Flugplätzen, Flughäfen, Industrieböden und Hafenspazierwegen verwendet.

Andererseits ermöglichen durchlässige Beläge mit Pflastersteinen die Filtration von Wasser, was unzählige Vorteile bringt und noch besser mit einer Tragschicht aus Drainbeton ausgeführt werden kann.

## **Spezifikationen und Tests**

Die bestehenden Vorschriften beziehen sich auf Herstellung, Design und Einbau für die verschiedenen Arten von Anwendungen: Wohngebiete, öffentliche Räume, Straßen, Industriefenengebiete und Flughäfen.

Die Spezifikationen und Tests von Betonpflaster konzentrieren sich in erster Linie auf den Herstellungsprozess, mit dem Ziel, ein Material zu erhalten, das die Mindestqualitätsanforderungen erfüllt, um die Gestaltung des Pflasters zu unterstützen.

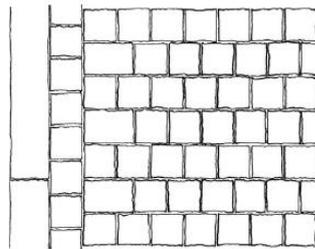
Die Materialien müssen bestimmten Anforderungen entsprechen, welche in den verschiedenen Normen festgelegt sind. Die Pflastersteine müssen die Anforderungen der ÖNORM B 3306 [67] bezüglich der Beständigkeit gegen Auftausalz erfüllen. Hinsichtlich Abriebverlust und Reißfestigkeit gelten die Anforderungen der ÖNORM 3258 [66].

Für Betonpflastersteine bzw. -platten gelten die Kriterien für die Biegezugfestigkeit gemäß ÖNORM EN 1339.

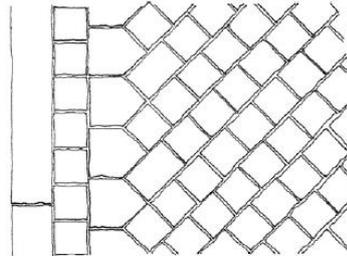
### 3.1.3 Verbandsarten

Das Verhalten der Pflasterdecken hängt sowohl vom Material als auch von der Form der jeweiligen Pflastersteine ab. Ein Faktor von großer Bedeutung ist jedoch das so genannte Verlegemuster. Je nach Anordnung ermöglicht es eine Verbesserung des Verhaltens unter bestimmten Lastzuständen. Die nachstehenden Abbildungen 3 und 4 zeigen einige Typen, die in der RVS 08.18.01 [77] enthalten sind:

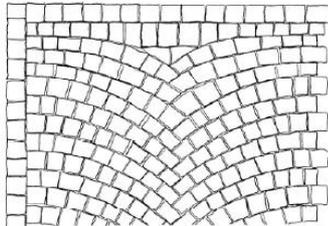
1. Reihenverband rechtwinklig zur Bezugslinie



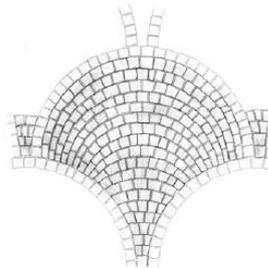
2. Reihenverband diagonal zur Bezugslinie



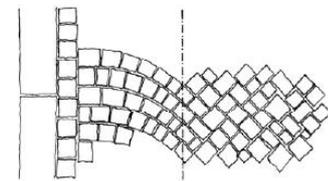
3. Segmentbogenverband



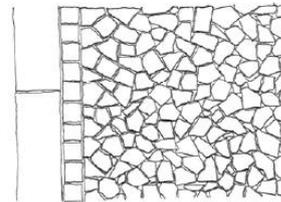
4. Schuppenverband



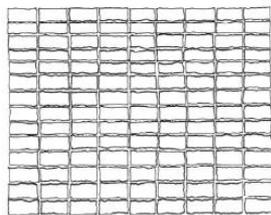
5. Passéeverband



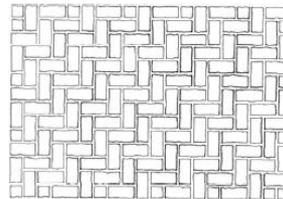
6. Wildverband



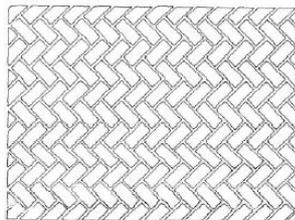
7. Kreuzfugenverband rechtwinklig oder diagonal



8. Ellbogenverband



9. Fischgrätverband



10. Block- und Parkettverband

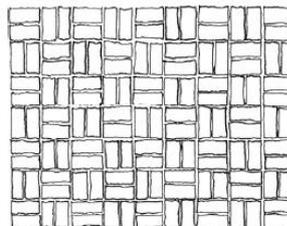


Abbildung 3. Verbandsarten von Pflastersteindecken nach RVS 08.18.01 [77]

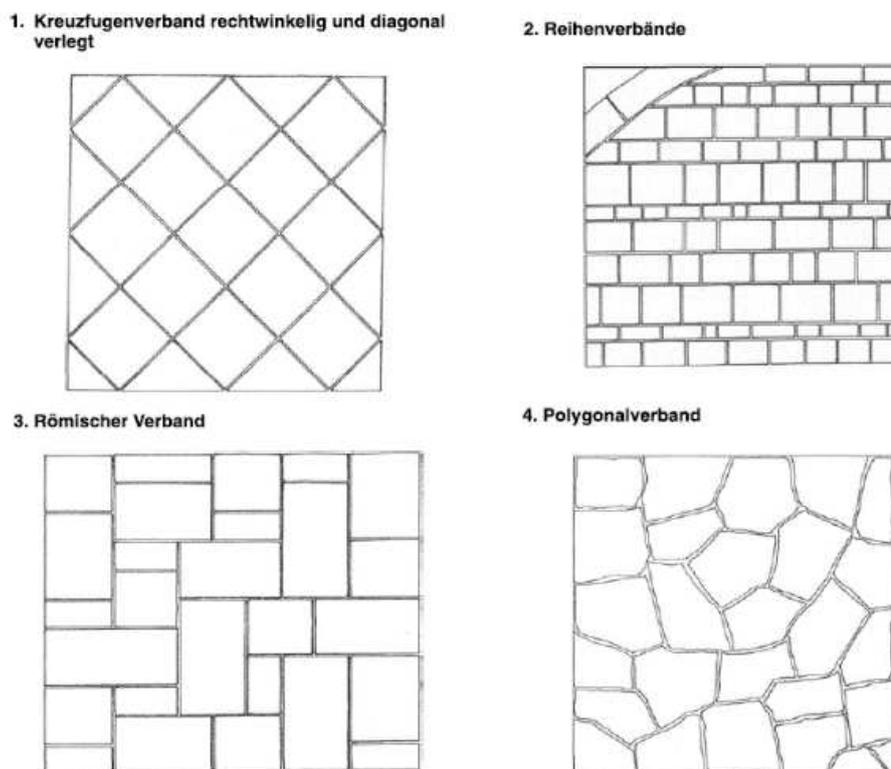


Abbildung 4. Verbandsarten von Pflasterplattendecken nach RVS 08.18.01 [77]

Je nach Verbandsart – sowohl als Pflasterstein als auch als Platte – ändert sich das mechanische Verhalten der Schicht. Aus diesem Grund werden Anforderungen festgelegt, die sowohl aus Material- als auch aus Ausführungssicht erfüllt sein müssen. Die Disposition des Pflasters sowie der Verbund einzelner Steine und Platten untereinander beeinflusst das Verhalten der Schicht. Die Wahl vom Verlegemuster hängt also nicht nur von den ästhetischen Aspekten ab, sondern auch von seinem mechanischen Verhalten. Dennoch hängt die Wahl der Anordnung in einigen Fällen, in denen die Belastungen nicht groß sind, nur von architektonischen Gründen ab bzw. wird stark von jenen beeinflusst.

Schließlich ist zu erwähnen, dass nicht alle Verbandsarten mit allen Steinformaten ausgeführt werden können. Daher wurde auf Grundlage von RVS 08.18.01 [77] eine Tabelle erstellt, in der Empfehlungen für die Ausführung von Steinform und Verbandsart festgelegt sind.

VERBANDSARTEN \ STEINFORM	Großstein ab 14 cm Kantenlänge	Kleinstein 7/7/7 bis 11/11/11	Mosaikstein	Flusssteine, Wackensteine*)	Unregelmäßige Bruchsteine bzw. Polygonalplatten	Quadratische Steine od. Platten mit Bindersteinen	Rechteckige Steine od. Platten mit Bindersteinen	Platten mit Unterschiedlichen Formate
Reihenverband rechteckig bzw. diagonal zur Bezugslinie	+	0	0	0	-	+	+	+
Segmentbogenverband	0	+	+	0	-	-	-	-
Schuppen- bzw. Tulpenverband	-	+	+	0	-	-	-	-
Passée-Verband	-	+	+	-	-	-	-	-
Fischgrätverband	0	-	-	-	-	-	+	0
Blockverband	-	-	-	-	-	-	+	-
Kreuzfugenverband rechteckig 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

Abbildung 5. Verbandsarten in Abhängigkeit von Steinform und -größe nach RVS 08.18.01 [77]

### 3.2 Einflüsse von Verkehrslasten

In den 1970er Jahren wurden Pflasterbefestigungen ähnlich wie flexible Beläge dimensioniert. Die damals verwendeten Normen, wie die deutsche Norm (DIN 18501-1964) berücksichtigten nicht die mechanischen Eigenschaften der Schicht, sondern nur die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Pflastersteine, ohne dabei deren Wechselwirkung mit anderen zu berücksichtigen [24]. Dies geschah erst in den 80er Jahren dank der Studien von Knapton, J [46], der eine Entwurfsmethode für diese Art von System entwickelte, die das mechanische Verhalten des Ganzen berücksichtigt. Als nächstes wurde der Begriff der Verzahnung eingeführt, *der sich auf die geometrische Beziehung zwischen einem Pflasterstein und einem benachbarten bezieht*. Diese Beziehung kann verzahnt oder nichtlinear verzahnt sein [20]. Der Begriff „Lock-up“ wird häufig verwendet, um den Mechanismus des Verhaltens dieser Art von Systemen zu beschreiben. Dieser Begriff wurde von Shackel, B. [80] im Jahr 1980 eingeführt. Es handelt sich um ein Phänomen, das sich in den Pflastersteinen nach einer gewissen Zeit nach ihrer Konstruktion entwickelt.

Eine der Hauptaufgaben im Straßenbau ist es sowohl den Zustand der Spannungen als auch der Verformungen unter z.B. Verkehrs- oder Temperaturbeanspruchungen in jeder der Schichten zu kennen. Dies geschah in den 70er Jahren, als das System als flexibles System betrachtet wurde, unter Verwendung der Lösungen der von Boussinesq etablierten Methoden, die von Burmister für mehrschichtige elastische Systeme erweitert wurden [16]. Für starre Systeme wird jedoch häufig die Westergaard-Methode verwendet [34].

Der Verzahnungseffekt ist definiert *als die Unfähigkeit eines Steins sich aufgrund einer Einschränkung durch einen der benachbarten Steine zu bewegen* [46]. Aus diesem Grund können drei Bewegungen unterschieden werden: Erstens, in vertikaler Richtung, wo sich der Stein nach unten bewegt; zweitens, in horizontaler Richtung durch Beschleunigungs- und Bremskräfte, wo durch Spannungskonzentration die Pflastersteine in der Regel in den Ecken brechen; und drittens, durch Drehung. Die Drehung tritt auf, wenn eine vertikale Kraft asymmetrisch auf die Oberfläche des Pflastersteins ausgeübt wird, die ein Drehmoment im Stein erzeugt. Diese Drehbewegung verursacht eine Verschiebung von benachbarten Teilen, welche eine freie Drehung des Steins verhindert [46].

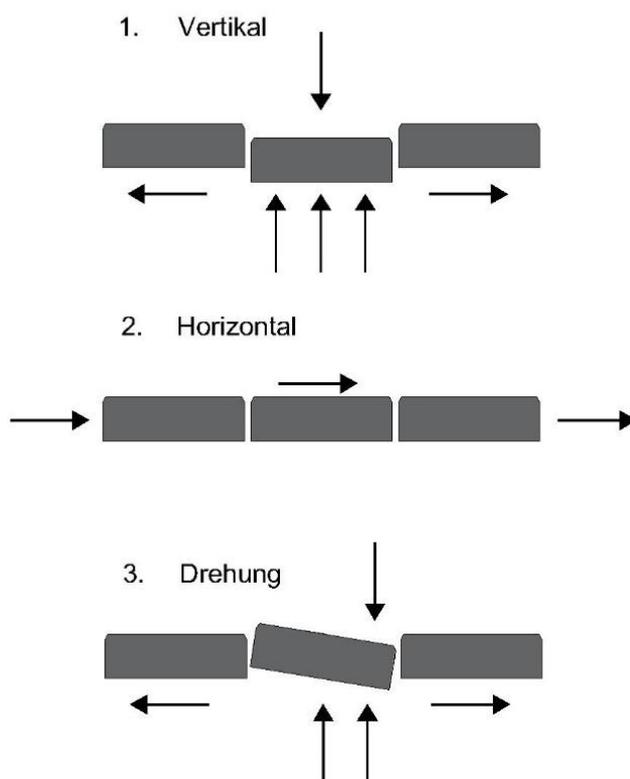


Abbildung 6. Verzahnung Vertikal, Horizontal und Drehung [46]

Der Mechanismus des Verhaltens dieser Art von Strukturen kann durch die Theorie von Shackel, B. und Lim, D.O.O. [79] beschrieben werden. Die Pflastersteine werden nicht als isolierte Stücke betrachtet, sondern als eine Reihe von ihnen. Deshalb wird versucht den Einfluss des Verkehrs und, wie sich jener auf die verschiedenen Elemente, aus denen sich die Struktur zusammensetzt, verteilt, zu untersuchen bzw. zu interpretieren. Dieser Mechanismus wird als Drehmechanismus bezeichnet, durch den die Lasten auf die benachbarten Teile verteilt werden. Diese Drehung verursacht eine externe Blockierung durch benachbarte Teile. Ein sehr wichtiger Aspekt ist allerdings, dass die Blockierung aufgrund der Form der Teile in Drehrichtung der Blöcke, aber auch in Querrichtung auftreten kann. Das heißt, die Form, die die Pflasterdecken und ihre Wechselwirkungen zwischen ihnen beeinflusst, beeinflusst das allgemeine Verhalten [79].

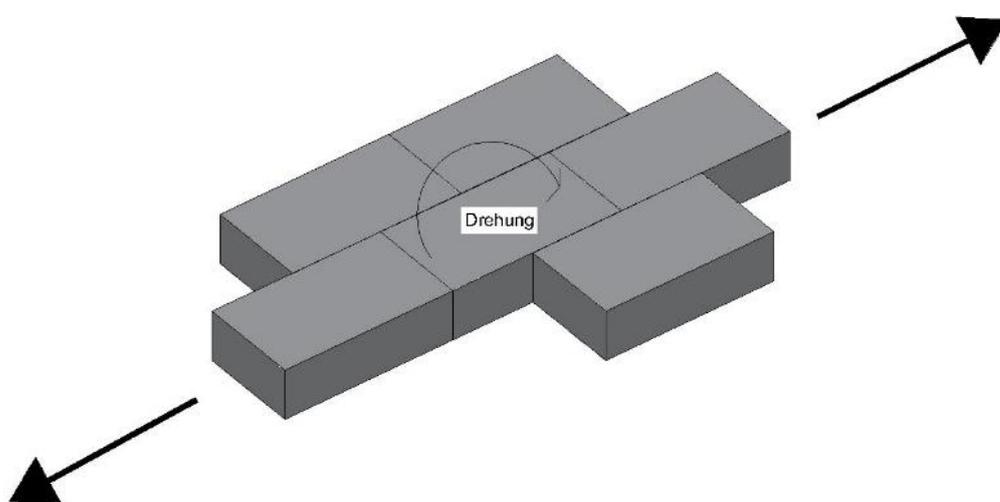


Abbildung 7. Glatte Pflastersteine [79]

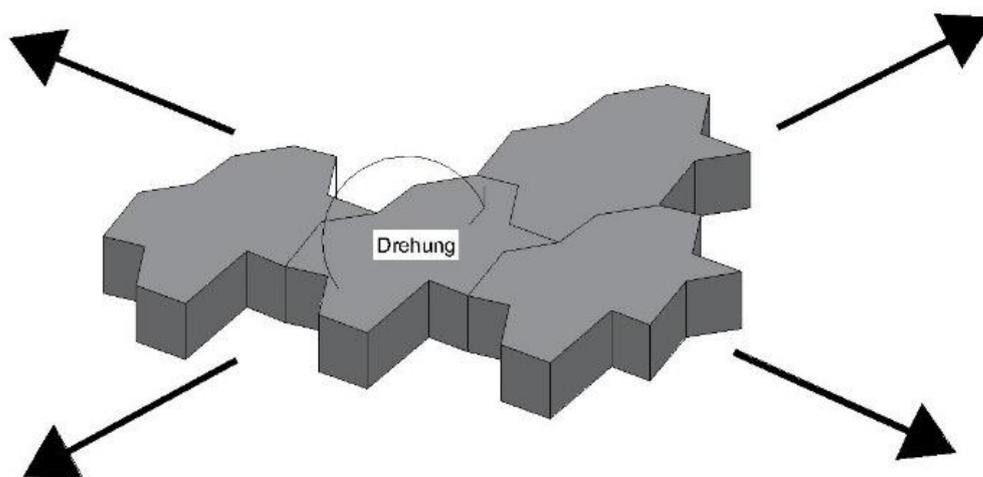


Abbildung 8. Unregelmäßige Pflastersteine [79]

Wie bereits erwähnt, ist die Position der Pflasterplatte in Bezug auf die Fahrtrichtung von grundlegender Bedeutung, da die dynamischen Lasten der Fahrzeuge die Lasten horizontal und vertikal auf die Pflaster übertragen. Wenn die Steifigkeit in den Fugen bekannt ist, können aus den Verformungen und Spannungen im Material (Pflasterstein) geschätzt werden [79].

Das Format der Platte, mit dem diese Art von Systemen üblicherweise ausgeführt wird, sind Pflasterplatten in quadratischer oder rechteckiger Form; die Dicke der Platten variiert. Das Verhalten für diese Art von Platten und die Wirkung der beiden am häufigsten verwendeten Verbandmuster wird im Folgenden erläutert. Asymmetrische Vertikallasten und horizontale Lasten (Beschleunigung und Bremsen) aus dem Verkehr erzeugen Drehbewegungen, welche wiederum Spannungen im Fugen zwischen den Platten erzeugen [51].

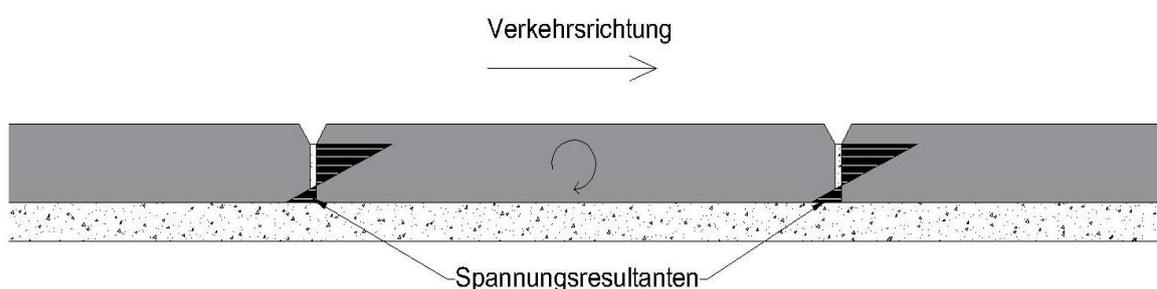


Abbildung 9. Drehung in einem Pflasterstein oder einer Platte durch die Wirkung des Straßenverkehrs [51]

Für den Fall, dass Verkehr in Betracht gezogen wird, wird empfohlen, die Pflasterplatten diagonal zu verlegen, da die Drehung an ihren Seiten abnimmt. Dies liegt daran, dass diese Drehungen entlang ihrer vier Seiten verteilt sind. Dies soll in der nachstehenden Abbildung veranschaulicht werden:

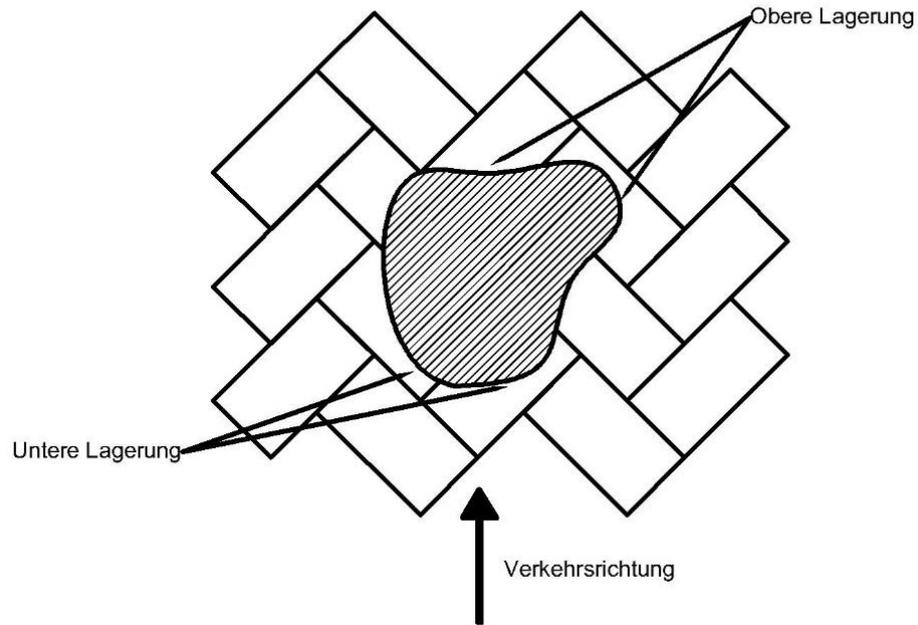


Abbildung 10. Rotationseffekt auf verlegten Pflastersteinen diagonal zur Fahrtrichtung [51]

Werden die Pflasterplatten dagegen parallel zur Fahrtrichtung eingebaut, erhöhen sich die Drehmomente deutlich, da sie nur auf zwei Seiten verteilt sind.

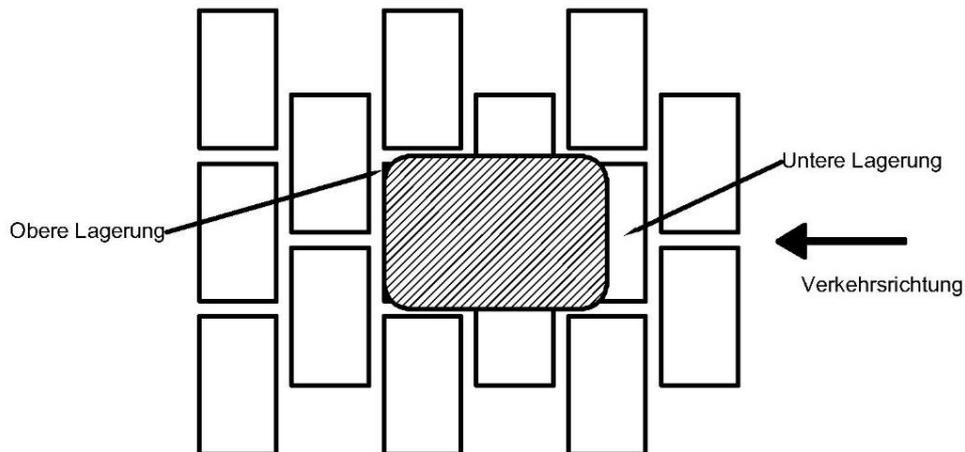


Abbildung 11. Rotationseffekt auf Pflastersteinen oder -Platten mit Achsen parallel zur Fahrtrichtung [51]

Wie bereits erwähnt, ist die Position der Pflasterplatte in Bezug auf die Fahrtrichtung von grundlegender Bedeutung, da die dynamischen Lasten der Fahrzeuge horizontal und vertikal auf die Pflaster übertragen werden. Wenn die Dicke der Platte geringer ist, ist der Widerstand auf dem Teil der zu drehenden Platte geringer, was zu Rissen durch Kontakt zwischen den Platten und erhöhten Spannungen führt. Daher kann man davon ausgehen, dass Platten, die dicker sind in den Bereichen Beschleunigung und Bremsen von Vorteil sind [51].

### 3.3 Anforderungen an die Baustoffe

#### 3.3.1 Pflaster

Pflaster sind Steine oder Platten, die die Oberfläche dieser Art von Aufbauten bilden. Deshalb sind die Anforderungen, die erfüllt sein müssen, Kriterien der Materialfestigkeiten sowie jene Kriterien, die eine geeignete Oberfläche (z.B. hinsichtlich Verkehrssicherheit) für den Verkehr garantieren. Neben den Materialanforderungen, die bereits angeführt worden sind, sind sowohl die Dicke des Pflastersteins als auch das Format zu beachten. Aus diesem Grund sind die Analyse und der Einfluss der Variation dieser Eigenschaften von Pflaster auf das Verhalten der Struktur ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit. Diese Studie wird mittels einer numerischen Analyse durchgeführt und in den folgenden Abschnitten gezeigt. In Bezug auf die Dicke und Länge von Pflaster kann man zwischen Pflastersteinen und Pflasterplatten unterscheiden. Eine Pflasterplatte kann als solche definiert werden, wenn *die Länge der Platte größer als das Vierfache ihrer Dicke ist*. Wenn diese Beziehung kleiner ist, handelt es sich hingegen um Pflastersteine [53]. Pflastersteine sind wiederum Steine, dessen größte Gesamtlänge 30 cm nicht überschreitet und dessen Dicke größer als ein Drittel der größten Gesamtlänge ist [61] [71]. Die Materialien, aus denen die Pflaster bestehen, sind in der Regel Materialien, die Druckspannungen gut widerstehen können. Daher sind Pflaster in der Regel aus Naturstein, Beton oder Klinker. An dieser Stelle gilt anzumerken, dass in der Vergangenheit verschiedene Materialien getestet wurden. Nichtsdestotrotz scheint Beton heutzutage in den meisten Fällen die beste Wahl zu sein. Dies ist auf das gute Preis-Leistungs-Verhältnis sowie auf die vielfältigen Formen, Qualitäten und Farben, mit denen sie ausgeführt werden können, zurückzuführen.

## Natursteinpflaster

Naturpflastersteine müssen die Anforderungen der RVS 08.18.01 [77] erfüllen und gleichzeitig eine CE-Kennzeichnung haben.

Eigenschaft	Vorschrift
Leistungsanforderungen zur Produktkennzeichnung und Konformitätsbewertung	ÖNORM EN 1341, 1342, 1343
Abmessungen und mechanische Anforderungen	ÖNORM B 3108
Widerstand gegen Frost-Tauwechsel bei Einwirkung von Salzen	ÖNORM EN 1367-6 <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> Die Pflastersteinmaterialien sind in die Fraktion 8/16 aufzubereiten und gemäß der Norm zu prüfen. Die gemessene Absplitterung darf für das Gesteinsmaterial nicht mehr als 10 M-% betragen. Die Prüfung der Tausalzbeständigkeit erfolgt mit einer definierten NaCl-Lösung. Beim Einsatz von anderen Taumitteln und/oder anderen Konzentrationen kann keine Aussage über die Tausalzbeständigkeit getroffen werden.

Abbildung 12. Anforderungen an Natursteinpflaster laut RVS 08.18.01 Tabelle 1 [77]

Die Anforderungen an Pflaster aus Natursteinen sind in der ÖNORM EN 1341 [28][62] für Pflastersteine, der ÖNORM EN 1342 [29] für Pflasterplatten und der ÖNORM EN 1343 [30] für Randeinfassungen festgelegt. Sie alle sind in der ÖNORM B 3108 [62] zusammengefasst. Neben den Materialanforderungen, die erfüllt sein müssen, sind die Abmessungen definiert, mit denen diese Art von Pflaster ausgeführt wird. Diese können in drei Hauptmerkmale zusammengefasst werden, nämlich Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel, Materialfestigkeit und Griffigkeit. Diese Hauptmerkmale werden nun genauer beschrieben:

- Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel: Die Frostwiderstandprüfung folgt der ÖNORM EN 12371:2010. Hierbei darf die Festigkeitsreduktion nach 56 Frost-Tau-Wechseln und der Festigkeitsabfall nicht mehr als 20% betragen.
- Festigkeiten: Die wichtigsten Festigkeitsanforderungen, die erfüllt werden müssen, hängen von der Beanspruchung ab. In diesem Fall müssen sie die Anforderungen der Biege- und Druckfestigkeit erfüllen. Diese Anforderungen sind abhängig von der Art der Nutzung.
- Griffigkeit: Als Kontaktfläche müssen je nach Verwendungsklasse Anforderungen erfüllt werden, um die Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Diese Anforderungen sind in der ÖNORM EN 14231 festgelegt.

## Betonpflaster

Betonpflastersteine müssen die Anforderungen der RVS 08.18.01 [77] erfüllen und gleichzeitig eine CE-Kennzeichnung haben.

Eigenschaft	Vorschrift
Leistungsanforderungen zur Produktkennzeichnung und Konformitätsbewertung	ÖNORM EN 1338, 1339, 1340
Tausalzbeständigkeit und Widerstand gegen Abrieb	ÖNORM B 3258*)

\*) Die Prüfung der Tausalzbeständigkeit erfolgt mit einer definierten NaCl-Lösung. Beim Einsatz von anderen Tausalzmitteln und/oder anderen Konzentrationen kann keine Aussage über die Tausalzbeständigkeit getroffen werden.

Abbildung 13. Anforderungen an Betonpflaster laut RVS 08.18.01 Tabelle 2 [77]

Die Anforderungen an Pflaster aus Beton sind in der ÖNORM EN 1338 [25] für Pflastersteine, der ÖNORM EN 1339 [26] für Pflasterplatten und der ÖNORM EN 1340 [27] für Randeinfassungen festgelegt.

Die wichtigsten Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften sind:

- Witterungswiderstand: Die Qualität und Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse wird in mehreren verschiedenen Klassen dargestellt, wobei die Wasseraufnahme und der Frost-Tausalz-Widerstand charakterisiert werden.
- Spaltzugfestigkeit: Die charakteristische Spaltzugfestigkeit darf nicht kleiner als 3,6 MPa sein. Zudem darf gemäß der ÖNORM EN 1338 [25] kein Prüfergebnis für Pflastersteine kleiner als 2,9 MPa sein.
- Abriebwiderstand: Geprägt durch zwei Versuche, Prüfverfahren in Anhang G und Anhang H, aus ÖNORM EN 1338 [25], für Pflastersteine und aus ÖNORM EN 1339 [26], für Pflasterplatten.
- Biegezugfestigkeit: Die charakteristische Biegezugfestigkeit darf gemäß ÖNORM EN 1339 [26] für Pflasterplatten nicht kleiner als 3,5 MPa sein.
- Gleit-/Rutschwiderstand: Dieser Aspekt stellt die Qualität der Kontaktfläche für den Verkehr dar.

## Klinker

Die Klinkerpflastersteine müssen die Anforderungen der ÖNORM EN 1344 [31] laut RVS 08.18.01 [77] erfüllen und gleichzeitig eine CE-Kennzeichnung haben.

### 3.3.2 Bettungs- und Fugenfüllung

#### 3.3.2.1 Bettung

Die Bettung ist neben der Qualität der Pflaster ein wesentliches Element, das das Verhalten und die Haltbarkeit des Aufbaus bestimmt. Sie ist definiert als die Schicht, auf der die Pflasterplatten oder -steine liegen. Die ungebundene Bauweise bezieht

sich auf eine Bettung, die aus Sand besteht. Im Gegensatz dazu steht die gebundene Bauweise, wobei die Bettung hierbei aus Mörtel besteht.

Eine der Hauptfunktionen der Bettung besteht darin die kleinen Dickenunterschiede der Pflastersteine innerhalb der von der ÖNORM EN 1338 [25] und ÖNORM EN 1339 [26] für Betonpflaster und ÖNORM B 3108 [62] für Natursteinpflaster, zulässigen Maßtoleranzen auszugleichen, so dass sie nach der Verdichtung eine ebene Oberfläche bilden, die in der Lage ist, die durch den Verkehr verursachten Belastungen ohne Beschädigung einzelner Elemente zu übertragen.



Abbildung 14. Kompensation von Pflastertoleranzen [51]

Das Tragverhalten der Bettung ist grundlegend und hat eine große Bedeutung, da es die Lasten effektiv auf die unteren Schichten verteilen und die Verformungen der Pflaster aufnehmen muss. Die Schicht muss aus Zuschlagstoffen mit hohem geomechanischen Widerstand gebildet werden. In der Regel wird jedoch empfohlen vorzugsweise gebrochene Gesteinskörnungen zu verwenden [51], da diese eine bessere Verzahnung aufweisen, was den Zusammenhalt der Schicht verbessert. Bei der Untersuchung des Tragverhaltens müssen sowohl vertikale als auch horizontale Lasten, wie zum Beispiel Bremslasten berücksichtigt werden.

Die Dicke dieser Schicht ist von großer Bedeutung für das Verhalten von Pflasteraufbauten [51]. Die Zuschlagstoffe müssen *sauber, feinkörnig und frei von Verunreinigungen* sein [51]. Ein grundlegender Aspekt zur Gewährleistung der Stabilität der Zuschlagsschicht ist die Neigung der oberen Ebene der Bettung, um die schnelle Ableitung kleiner Wassermengen, die diese Schicht erreichen, durch die Fugen zwischen den Pflastersteinen zu erleichtern [51].

Wenn die *Fugen nicht gepflegt und keine ausreichenden Entwässerungseinrichtungen vorhanden sind, bilden sich unter dem Pflaster Wasseransammlungen, die zu Setzungen der Steine führen können* [51]. Dies zeigt sich auch nach einiger Zeit, wenn Regen auf die befestigte Fläche fällt. Besondere Aufmerksamkeit sollte den Gebieten in der Nähe der geplanten Stellen für die Ableitung von Oberflächenwasser geschenkt werden [51].

Die Bettungsdicke sollte mindestens 3 cm betragen und bei dickeren Platten Dicken von bis zu 6 cm erreichen [51]. Unabhängig vom Grundwerkstoff muss die Dicke der Bettungen gleichmäßig sein, da es sonst bei Verkehr zu unterschiedlichen Verformungen kommt, was in weiterer Folge zu Brüchen in den Steinen oder Platten führen kann. Die Dicke der gesamten Schicht muss konstant sein, auch bei Verformungen in den unteren Schichten. Zusätzlich sollten vorhandene Verformungen nicht mit Material gefüllt werden, um Ausgleichseffekte zu korrigieren. Andernfalls würden Verformungen bei Belastung durch Verkehr oder Brüche einzelner Steine durch konzentrierte Spannungen auftreten. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung die unteren Schichten eben zu halten und die Schichtdicken einzuhalten [51].

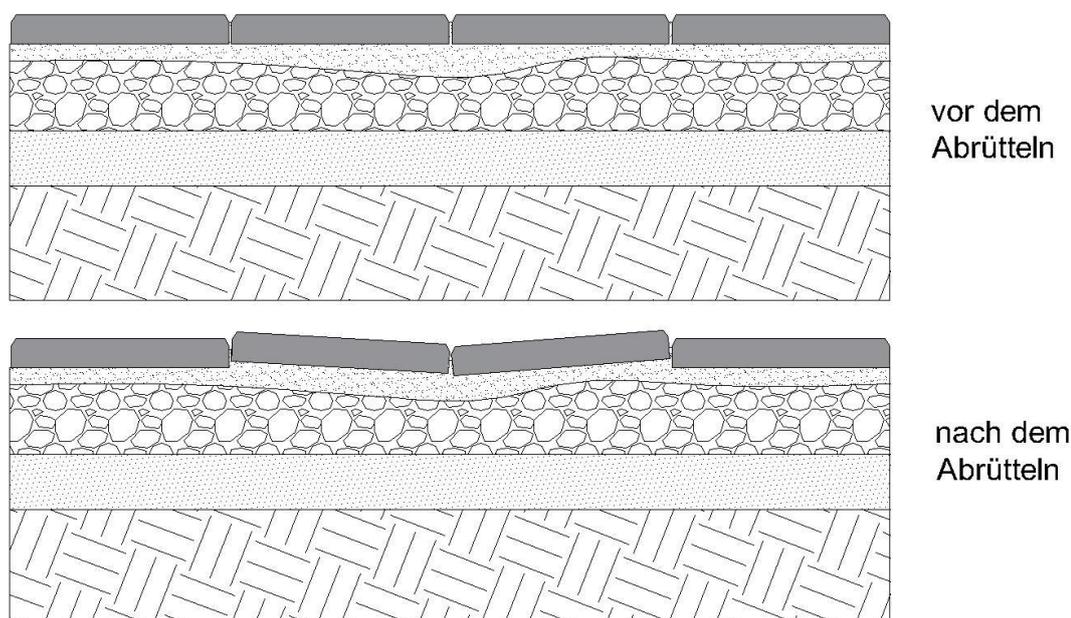


Abbildung 15. Verformungen nach dem Abrütteln [51]

Wenn der Belag dem Verkehr ausgesetzt ist, treten bei übermäßigen Dicken der Bettung bleibende Verformungen auf.

Ist diese Dicke hingegen nicht ausreichend, brechen die Steine bei Verkehrsbelastung. Neben vielen anderen Faktoren, die das optimale Verhalten des Systems bestimmen, gibt es einige, die für die Bettung von großer Bedeutung sind [39]:

- die Bettungsdicke
- die Korngrößenverteilung des Bettungssands
- die Kornform des Bettungssands

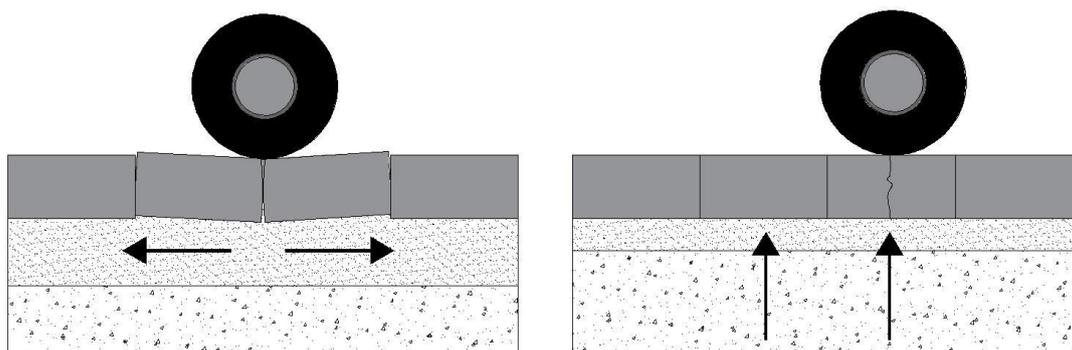


Abbildung 16. Einfluss der Bettungsdicke auf die Verkehrslastverteilung [51]

Daher werden für jeden Pflasertyp und seine Anordnung optimale Bettungsdicken festgelegt [81] [39]:

- *Beton- und Klinkerpflaster: 3 – 5 cm*
- *Großpflaster: 4 – 6 cm*
- *Kleinpflaster: 3 – 4 cm*
- *Mosaikpflaster: 2 – 4 cm*

Wie bereits erwähnt, muss die Bettung frei von Feinstaub und verunreinigenden Partikeln sein. Daher wird eine Korngröße zwischen 2 mm und 6 mm empfohlen.

Die Qualität des Zuschlagstoffs ist von grundlegender Bedeutung, um Ausfälle in der Fahrbahn zu vermeiden, wenn sie den Belastungen des Verkehrs ausgesetzt ist. Sie kann unter Umständen sogar einen Totalausfall der Fahrbahn verursachen.

Zuschlagstoffe, die diese granulometrischen Anforderungen erfüllen, funktionieren im Verkehr zufriedenstellend, egal ob nass oder trocken [51]. Es wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen, dass sich Pflastersteine besser verhalten, wenn sie auf einem Bett aus gebrochenen Gesteinskörnungen platziert werden, als wenn diese Gesteinskörnungen unebrochenen sind. Bei gebrochenen Gesteinskörnungen wird die Verformbarkeit durch eine größere Kohäsion reduziert [24].

Grobe Zuschlagstoffe müssen ebenfalls ausgeschlossen werden, um Schäden an den Pflastersteinen zu vermeiden, da es zu Spannungskonzentration und Brüchen kommen kann. Aus diesem Grund *darf die maximale Größe des Aggregats 6 mm nicht überschreiten* [51].

### **Ungebundenes Bettungsmaterial**

Die in der ÖNORM EN 13242 festgelegten Gesteinskörnungen sind einzuhalten. Die Qualitätsanforderungen sind in der ÖNORM B 3132 festgelegt. Die verwendeten

Gesteinskörnungen sind gebrochenen C90/30 zwischen 2/4, 4/8 und 8/11, aber auch gemischte Korngruppen können verwendet werden.

Um die Filterstabilität zu garantieren, werden zwei Sicherheitskriterien festgelegt:

- *Sicherheitsbedingungen gegenüber Erosion:*

$$d_{15}(\text{Tragschicht}): d_{85}(\text{Bettung}) \leq 5$$

- *Sicherheitsbedingung gegenüber Kontakterosion:*

$$d_{50}(\text{Tragschicht}): d_{50}(\text{Bettung}) \leq 25$$

wobei  $d_{15}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{85}$  die Korndurchmesser der jeweiligen Schicht bei 15, 50 bzw. 85 M-% Siebdurchgang sind.

In der folgenden Tabelle sind die festgelegten Mindestkriterien für Bettungsmaterial gemäß RVS 08. 18. 01 [77] ersichtlich:

Tabelle 5. Mindestanforderungen an das Bettungsmaterial  
(RVS 08.18.01 Tabelle 3 [77])

<b>Kriterien</b>	<b>Mindestanforderungen</b>
Über- und Unterkorn	G <sub>c</sub> 85-15, G <sub>f</sub> -85
Kornform	SI <sub>20</sub>
Anteil gebrochener Körner	C <sub>90/3</sub>
Feinanteil grober Gesteinskörnungen	f <sub>2</sub>
Feinanteil feiner Gesteinskörnungen	f <sub>3</sub> oder f <sub>7</sub>
Festigkeit	
Für LK III gem. RVS 03.08.63	LA <sub>20</sub>
Für LK IV gem. RVS 03.08.63	LA <sub>25</sub>
Wasseraufnahme	WA <sub>241</sub>
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit *	F1

\*nur, wenn WA 24 1 nicht erfüllt ist

## Gebundenes Bettungsmaterial

Für bauseitig gemischten Bettungsmörtel sind im vorherigen Punkt die Anforderungen an die Gesteinskörnungen definiert. Der Zementgehalt kann zwischen 200 und 250 kg/m<sup>3</sup> und der W/B-Wert zwischen 0,40 und 0,45 variieren.

Für den Bettungswerksmörtel müssen der Nachweis der Frostbeständigkeit sowie folgende Parameter erfüllt sein:

- Druckfestigkeit  $\geq 20 \text{ N/mm}^2$
- Biegezugfestigkeit  $\geq 3 \text{ N/mm}^2$
- Wasserdurchlässigkeit  $\geq 5 \times 10^{-5}$

### 3.3.2.2 Fugenfüllung

Die Pflastersteine bzw. -platten sollten nicht miteinander in Berührung kommen, sondern voneinander getrennt sein. Deshalb zielt die Fugenfüllung darauf ab, die durch die Lasten erzeugten Spannungen auf die umliegenden Pflastersteine zu verteilen.

Gemäß RVS 08.18.01 [77] ist die Fugenfüllung von großer Relevanz. Ihre Ausführung muss ordnungsgemäß durchgeführt werden, indem die Verfüllung vollständig und in voller Höhe ausgefüllt wird. Die Norm unterscheidet zwei Arten von Fugenfüllung: die ungebundene und die ungebundene Fugenfüllung. Im Folgenden werden jene beiden Arten näher erläutert:

#### Ungebundene Fugenfüllung

In dieser Variante besteht die Fugenfüllung aus ungebundener Gesteinskörnung. Es wird die Verwendung von gebrochenen Gesteinskörnungen empfohlen und auf einen Größtkorn von 40% bis 50% der maximalen zulässigen Fugenbreite mit ausreichendem Anteil an Stützkorn begrenzt. C90/3 der Korngemische 0/2, 0/4 und 0/8 sind zu verwenden.

Ebenso wie bei der Bettung müssen bei ungebundenen Fugenfüllungen die notwendigen Anforderungen, die in der ÖNORM EN 13242 für Gesteinskörnungen beschrieben sind, sowie die Qualitätsanforderungen in der ÖNORM B 3132, erfüllt sein.

Für die Filterstabilität werden zwei Faktoren berücksichtigt:

- Sicherheitsbedingungen gegenüber Erosion:

$$d_{15}(\text{Tragschicht}): d_{85}(\text{Bettung}) \leq 2$$

- Sicherheitsbedingung gegenüber Kontakterosion:

$$d_{50}(\text{Tragschicht}): d_{50}(\text{Bettung}) \leq 10$$

wobei  $d_{15}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{85}$  die Korndurchmesser der jeweiligen Schicht bei 15, 50 bzw. 85 M-% Siebdurchgang sind.

## **Gebundene Fugenfüllung**

Bei dieser Variante hingegen verhält sich das System starr. Die zur Verwendung empfohlenen Materialien sind in der ÖNORM B 2214 [61] geregelt. Ein sehr wichtiger Aspekt ist es, den Wassergehalt des Fugenmörtels nicht zu variieren und die Steine oder Platten bei Bedarf zu trocknen.

Gemäß RVS 08.18.01 [77] sind die Mindestanforderungen für Fugenwerksmörtel und kunststoffgebundenes Fugenmaterial wie folgt:

- *Druckfestigkeit  $\geq 30 \text{ N/mm}^2$*
- *Biegezugfestigkeit  $\geq 6 \text{ N/mm}^2$*
- *Haftzugfestigkeit  $\geq 1 \text{ N/mm}^2$*
- *Nachweis der Frostbeständigkeit*
- *Nachweis der Tausalz widerstandsfähigkeit*

### **3.3.3 Obere Tragschicht**

Die obere Tragschicht hat die Aufgabe, Verkehrslasten auf die untere Tragschicht zu übertragen, ohne das Bauwerk zu beschädigen. Diese Schicht ist das tragende Hauptelement der Konstruktion, da sie die meisten vertikalen Kräfte aufnimmt [14]. Aus diesem Grund hängt die Steifigkeit des Systems stark von der Fähigkeit ab, diesen Beanspruchungen zu widerstehen.

Der Ausfall eines Straßenbaus ist in der Regel auf sein Ermüdungsverhalten zurückzuführen. Ermüdung ist die Abnahme der Steifigkeit einer Schicht durch wiederholte Belastung [14]. Aus diesem Grund wurde eine detaillierte Studie über das Verhalten der Ermüdung in dieser Schicht, insbesondere aus Drainbeton, durchgeführt (siehe Punkt 5).

Diese Schicht kann sowohl als ungebundene obere Tragschicht als auch mit Drainbeton-Tragschicht gebildet werden. Die wesentlichen Parameter zur Messung der Qualität dieser Schicht sind die Dicke und die Qualität des Materials, die je nach Granulometrie, Plastizität und Festigkeit variieren.

#### **3.3.3.1 Bauweise mit gebundener oberer Tragschicht**

Die obere Tragschicht in dieser Bauweise wird mit Drainbeton ausgeführt, weil sie Tragfähigkeit bietet und gleichzeitig die Ableitung des Wassers ermöglicht, da dieses Material wasserdurchlässig ist. Eines der Hauptziele dieser Arbeit ist es, die

wesentlichen mechanischen Eigenschaften und das Verhalten des Drainbetons bei wiederholten Belastungen zu ermitteln. Wichtige Parameter sind hierbei die Dauerfestigkeit sowie der E-Modul. Diese Parameter werden in einem eigenen Abschnitt ausführlich behandelt.

Aufgrund der höheren Tragfähigkeit kann die Dicke der oberen Tragschicht aus Drainbeton gegenüber der ungebundenen Tragschicht auf in der Regel 15-20 cm reduziert werden. RVS 08.18.01 [77] enthält mehrere Empfehlungen für Rezepturen:

*Sieblinie AC 16 bzw. AC 22:*

- Fraktion 0-4 mm: 13 bis 16 M-%.
- Fraktion 4-8 mm 8 bis 11 M-%
- Fraktion 8-16 oder 8-22 mm 74 bis 78 M-%.

*Der Zementgehalt sollte zwischen 200 und 250 kg/m<sup>3</sup> von CEM II liegen. Der W/B-Wert sollte zwischen 0,40 und 0,45 liegen. Die Festigkeitsklasse muss mindestens C16/20 betragen.*

Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der TU Wien wird derzeit eine Empfehlung für die Drainbetonrezeptur ausgearbeitet.

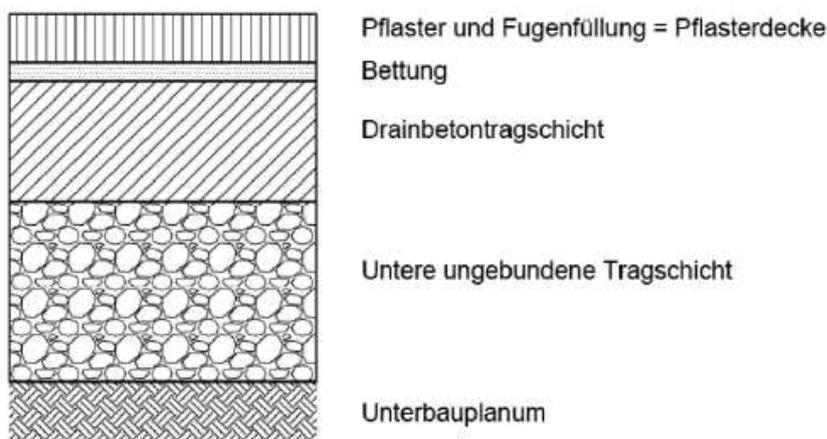


Abbildung 17. Bauweise mit Drainbeton-Tragschicht [14]

Die Verkehrsbelastung erzeugt auf der Oberfläche der Pflasterbefestigungen eine Einsenkmulde. Bei vertikaler Druckbelastung erzeugt ein Körper aus verschiedenen, miteinander verbundenen Schichten Biegespannungen an der Unterseite. Dadurch entstehen maßgebliche Zugspannungen an der Unterseite der Drainbetontragschicht [14].

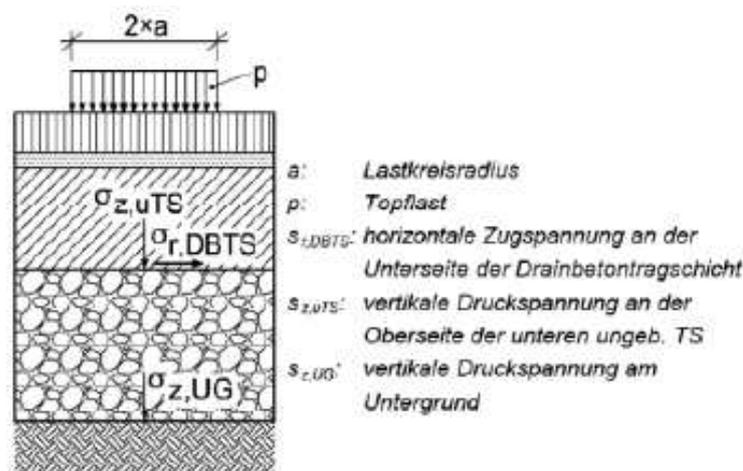


Abbildung 5. Maßgebende Spannungen von Bauweise mit Drainbeton-Tragschicht [14]

### 3.3.3.2 Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht

Die ungebundene obere Tragschicht besteht aus Rundkörnungen oder Gemischen aus Rund- und Kantkorn. Es ist jedoch möglich, das Tragvermögen der Schicht mit Kantkörnungen oder Zentralgemischten Kantkörnungen (ZGKK) zu verbessern [14]. In den meisten Fällen werden die Pflasterbefestigungen auf diese Weise ausgeführt, weil sie große Vorteile hinsichtlich der schnellen Ausführung sowie der geringeren Kosten aufweisen.

Da diese Schicht aus ungebundenem Material besteht, ist das System weniger steif und weist eine erhöhte Plastizität Gegensatz zu Aufbauten mit Drainbetontragschichten auf. Neben der Tragfähigkeit muss die Wasserdurchlässigkeit dieser Schicht gewährleistet sein. Die Anforderungen und Empfehlungen für die Ausführung dieser Schicht sind in den entsprechenden Richtlinie enthalten. Gemäß RVS 08.15.01 [76] kann zwischen zwei verschiedenen Varianten unterschieden werden:

- Gemische mit einem überwiegenden Anteil an gerundeten Körnern ( $C_{NR}$ ) mit  $E_{v1} \geq 75 \text{ MN/m}^2$ .
- aus gebrochenen Körnungen ( $C_{50/30}$  oder  $C_{90/3}$ ) mit  $E_{v1} \geq 90 \text{ MN/m}^2$ .

Die Verwendung von recyceltem Material ist ebenfalls in der Richtlinie RVS 08.15.01 [76] geregelt. Dabei ist in jedem Fall ein Asphaltanteil von  $< 5 \text{ M-}\%$  einzuhalten. Größere Anteile bis zu  $50 \text{ M-}\%$  sind auf die Belastungsklassen LK1,3 und LK0,4 beschränkt.

- Zentralgemischte Kantkörnungen (mind.  $C_{90/3}$ ) mit  $E_{v1} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ .

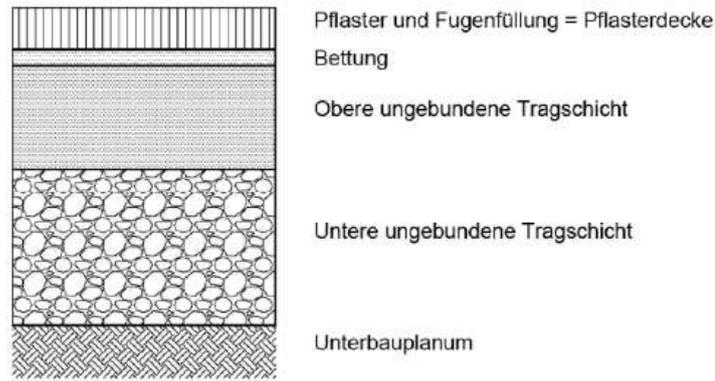


Abbildung 6. Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht [14]

Das Verhalten des Systems wird als semiflexibles System beschrieben, bei dem die ungebundenen Schichten komprimiert werden und eine vertikale Druckbeanspruchung entsteht. In dieser Bauweise sind die vertikalen Druckspannungen der Oberseite maßgebend [14].

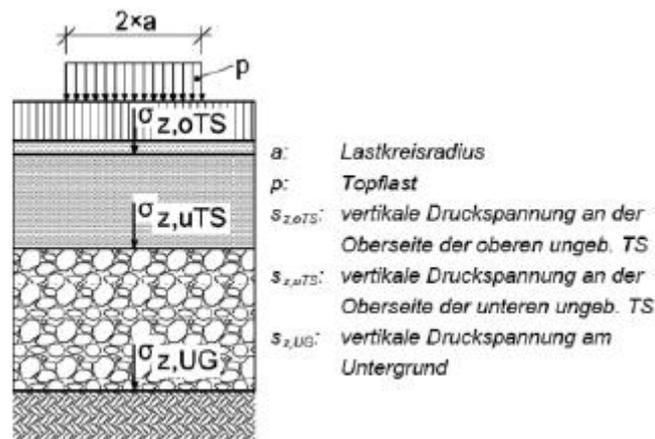


Abbildung 18. Maßgebende Spannungen von Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht [14]

### 3.3.4 Untere Tragschicht

Die untere Tragschicht ist die Schicht oberhalb des Unterbauplanums. Diese Schicht besteht aus ungebundenem Material und hat die Hauptfunktion, den oberen Schichten eine einheitliche Stützschiicht zu geben. Sie muss zudem Entwässerungseigenschaften aufweisen, die für die Ableitung von Wasser aus den oberen Schichten erforderlich sind. Die verwendeten Materialien und die erforderlichen Eigenschaften sind in RVS 08.15.01 [76] geregelt.

Gemäß den Vorschriften müssen Gesteinskörnungsgemischen aus natürlichen Gesteinskörnungen, recycelten Gesteinskörnungen oder industriell hergestellten Gesteinskörnungen verwendet werden. Bei der Verwendung von recyceltem Material darf der maximale Gehalt für alle Lastklassen 50 M. -% betragen [76].

Die notwendigen Mindestanforderungen für Korngemische ungebundener Tragschichten sind laut Tabelle 1 der RVS 08.15.01 [76] [64] festgelegt.

Bezug zur ÖNORM EN 13242		Klassen für										
		ungebundene Obere Tragschicht					ungebundene Untere Tragschicht			ungebundene Tragschichten ohne gebundene Überbauung		
		für alle LK		LK II bis VI			für alle LK					
Ab-schnitt	Merkmal	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	
4.3.1	Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 933-1	G <sub>A</sub> 85 und Abbildungen 1 bis 4					G <sub>A</sub> 85			G <sub>A</sub> 75		
4.4	Kornform von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-4	S <sub>I40</sub>					S <sub>NR</sub>					
4.5	Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-5 <sup>1)</sup>	C <sub>90/3</sub>	C <sub>50/30</sub>	C <sub>90/3</sub>	C <sub>50/30</sub>	C <sub>NR</sub>	C <sub>90/3</sub>	C <sub>50/30</sub>	C <sub>NR</sub>	C <sub>50/30</sub>	C <sub>NR</sub>	
4.6	Gehalt an Feinanteilen gemäß ÖNORM EN 933-1	f <sub>3</sub> , f <sub>5</sub> , f <sub>7</sub> , f <sub>9</sub> , f <sub>12</sub>								f <sub>NR</sub>		
4.7	Qualität der Feinanteile	bestanden <sup>2)</sup>								keine Anforderung		
5.2	Widerstand gegen Zertrümmerung gemäß ÖNORM EN 1097-2 (an Korngruppe 8/11)	L <sub>A30</sub>			L <sub>A40</sub>					L <sub>NR</sub>		
5.5	Wasseraufnahme gemäß ÖNORM EN 1097-6, Abschnitt 8	Wasseraufnahme v. Recyclingbaustoffen geprüft am Kornanteil 4/32, rezyklierte Gesteinskörnungen mit Kategorie Rc <sub>90</sub> oder Rc <sub>80</sub> ≤ 4 % <sup>3)</sup> Sonstige rezyklierte Gesteinskörnungen ≤ 2 % <sup>3)</sup> Natürliche Gesteinskörnungen: keine Anforderung									keine Anforderung	

Abbildung 19. Anforderungen an Korngemische für ungebundene Tragschichten (1) [64]

Bezug zur ÖNORM EN 13242		Klassen für										
		ungebundene Obere Tragschicht					ungebundene Untere Tragschicht			ungebundene Tragschichten ohne gebundene Überbauung		
		für alle LK		LK II bis VI			für alle LK					
Ab-schnitt	Merkmal	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	
5.6	Klassifizierung der Bestandteile von groben rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM 933-11	$Rc_{90}, Rc_{80}, Rc_{70}, Rc_{50}, Rc_{anzugeben}, Rc_{NR}$ $Rcug_{50}, Rcug_{NR}$ $Ra_{40}, Ra_{30}, Ra_{30-}, Ra_{20-}, Ra_{10-}, Ra_{5-}, Ra_{1-}, Ra_{NR}$ $Rg_{2-}$ $X_{1-}$ $FL_{5-}$									$Rb_{10-}, Rb_{30-}$ $Rb_{50-}$ $Rb_{anzugeben}, Rb_{NR}$	
6.5.2.1	Raumbeständigkeit von Stahlwerksschlacken gemäß ÖNORM EN 1744-1	$V_5$									$V_{NR}$	
6.5.2.2	Dicalciumsilikaterfall in Hochofenstüchschlacke gemäß ÖNORM EN 1744-1	anzugeben										
6.5.2.3	Eisenerfall in Hochofenstüchschlacke gemäß ÖNORM EN 1744-1	anzugeben										
7.2	Sonnenbrand von Basalt gemäß ÖNORM EN 1367-3 und ÖNORM EN 1097-2	$SB_{LA8}$									$SB_{NR}$	
7.3.2	Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel der Kornklasse 8/16 gemäß ÖNORM EN 1367-1	$F_2^{4)}$ und $F_2^{5)}$									$F_{NR}$	
—	Umweltverträglichkeit für rezyklierte und industriell hergestellte Gesteinskörnungen	Die Punkte 3.3 bzw 3.4 der ÖNORM B 3132 sind zu berücksichtigen										

1) Bei Recyclingmaterialien ist die Oberfläche des Stückkorns analog zu ÖNORM EN 933-5, zu beurteilen.  
 2) „bestanden“ bedeutet, dass der Gehalt an Feinanteilen im Gesteinskörnungsgemisch 3 M.-% nicht überschreitet oder ein positiver Nachweis gemäß ÖNORM B 4811 vorliegt. Der Nachweis des Tonmineralbestandes bzw. der Frosthebung gilt zwei Jahre.  
 3) Alternativ kann auch  $F_4$  nachgewiesen werden.  
 4) Bei  $WA_{24,2}$ , geprüft gemäß EN 1097-6, Abschnitt 8, ist  $F_2$  erfüllt.  
 5) Gilt nur für Recyclingbaustoffe, wenn die Anforderung an die Wasseraufnahme gemäß Punkt 5.5 nicht eingehalten werden kann.

Abbildung 20. Anforderungen an Korngemische für ungebundene Tragschichten (2)  
 [64]

### 3.3.5 Unterbau

Die Funktion des Unterbaues besteht darin, die von den oberen Schichten auf ihn übertragenen Lasten aufzunehmen. Die Tragfähigkeit des Gesamtsystems hängt stark von den verschiedenen Parametern dieser Schicht ab, wie etwa der Tragfähigkeit, dem Verformungsmodul, dem Reibungswinkel und dem Poisson-Koeffizienten. Nach den in der RVS 08.03.01 [75] festgelegten Mindestkriterien muss der Verformungsmodul dieser Schicht mindestens  $E_{v1}=35 \text{ MN/m}^2$  betragen. Diese Tragfähigkeit kann durch mehrere Maßnahmen verbessert werden, zum Beispiel durch Kalk oder Bitumenstabilisierung [77].

Die ungebundene untere Tragschicht kann entfallen, wenn der entstehende Boden frostsicher ist und die Mindestanforderungen nach RVS 08.15.01 erfüllt.

- $E_{vd}$  = Dynamischer Verformungsmodul des dynamischen Lastplattenversuches mittels des Leichten Fallgewichtsgerätes
- $E_{v1}$  = Statischer Verformungsmodul des statischen Lastplattenversuches aus der Erstbelastungskurve zwischen den Laststufen  $p_1 = 0,1 \text{ MN/m}^2$  und  $p_2 = 0,2 \text{ MN/m}^2$
- $D_{Pr}$  = Erzielter Verdichtungsgrad [%], bezogen auf die Proctordichte  $p_{Pr}$
- $\Delta_{FDVK}$  = Verdichtungszuwachs der dynamischen Messwerte der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) zwischen zwei aufeinander folgenden Überfahrten auf derselben Walzspur.
- $SD_{FDVK}$  = Standardabweichung des Mittelwertes der dynamischen Messwerte der FDVK auf dem jeweiligen Prüffeld

Tabelle 1: Mindestanforderungen an die Verdichtung

Tiefenbereich	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$D_{Pr}$ [%]	$\Delta_{FDVK}$ [%]	$SD_{FDVK}$ [%]
Unterbauplanum	38	35	100	≤ 5 (0)	≤ 20
ab 1 m unter Unterbauplanum	24 (26)	20	99	≤ 5 (0)	≤ 20
ab Dammaufstandsfläche (einschl. Bodenauswechslung)	18 (16)	15 (7,5)	97 (95)	≤ 5 (0)	≤ 20 *)
Hinterfüllung	38	35	100		

\*) Für Dammaufstandsflächen auf natürlich anstehenden Böden ist der Grenzwert der Standardabweichung nicht anzuwenden, der Wert ist jedoch aufzuzeichnen und zu dokumentieren.

Klammerwerte gelten für bindige Böden

Bei Unterbausanierung von bestehenden Eisenbahnstrecken mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit ( $V_{max}$ ) ≤ 160 km/h können die Werte der Mindestanforderungen auf dem Unterbauplanum auf  $E_{vd} \geq 24 \text{ MN/m}^2$  bzw.  $E_{v1} \geq 20 \text{ MN/m}^2$  verringert werden.

Alle oben angeführten Verdichtungsanforderungen gelten nicht für Unterbauherstellung mit gleisgebundenen Aushubmaschinen (AHM).

Abbildung 21. Mindestanforderungen an das Verdichten (gem. Tabelle 1 RVS. 08.15.01 [77])

### 3.4 Ungebundene Bauweise

Die Variante der ungebundenen Bauweise ist das älteste aller Systeme, da es seit der Antike verwendet wurde und stellt heute die Standardbauweise. In diesem System werden die Pflastersteine bzw. Pflasterplatten auf eine Bettung aus einem nicht gebundenen Material verlegt. Auch die Fugenfüllung besteht aus ungebundenem Material.

Eine der großen Herausforderungen bei dieser Bauweise ist es, eine gute Drainagekapazität zu erreichen und gleichzeitig sowohl in den Fugen als auch in der Bettung das Auswaschen von Material zu vermeiden. Das strukturelle Verhalten dieses Systems wird als semiflexibles System betrachtet.

Tabelle 6. Eigenschaften ungebundener Bauweise im Vergleich zu anderen [77]

<b>Ungebundene Bauweise</b>	
Regelbauweise	ja
Herstellungskosten	gering
Unterhaltskosten	gering
Wiederherstellungskosten	gering
Entsiegelung d. Fläche	ja
Elastizität	hoch
Sichtbare Spannungsrisse	keine
Auswaschung der Fugen	möglich
Fugensanierung	einfach
Belastbarkeit	hoch
Reinigung	aufwändiger
Fugengewuchs	möglich

### 3.5 Gebundene Bauweise

In den letzten Jahren wurde die Variante der gebundenen Bauweise entwickelt. In diesem System wird in der Regel Zementmörtel als Fugen- und Bettungsmaterial verwendet. Diese Bauweise wird als starr angesehen, da die Verformungen im Allgemeinen kleiner sind als bei der ungebundenen Bauweise. Der verwendete Zementmörtel muss die notwendigen Anforderungen sowohl hinsichtlich der Tragfähigkeit als auch der anderen Eigenschaften, wie die Wasserdurchlässigkeit und die Frostbeständigkeit erfüllen.

Tabelle 7. Eigenschaften gebundener Bauweise im Vergleich zu anderen [77]

#### Gebundene Bauweise

Regelbauweise	nein
Herstellungskosten	höher
Unterhaltskosten	höher
Wiederherstellungskosten	höher
Entsiegelung d. Fläche	nein
Elastizität	keine
Sichtbare Spannungsrisse	vorhanden
Auswaschung der Fugen	nein
Fugensanierung	aufwändiger
Belastbarkeit	hoch
Reinigung	einfach
Fugenbewuchs	gering

### 3.6 Gemischte Bauweise

Die gemischte Bauweise ist eine Variante der Bauweise, bei der die Fugenfüllung mit einem Bindemittel ausgeführt wird. Aus struktureller Sicht ist das Verhalten dieser Bauweise das eines einzelnen Blocks, der aus dem Pflaster und dem Fugen besteht und auf einer elastischen Schicht (ungebundene Bettung) gelagert ist. Dieses Verhalten verursacht Risse in den Fugen durch thermische Belastung, bedingt durch die geringe Steifigkeit im Vergleich zum Pflaster. Aus diesen Gründen wird empfohlen diese Variante nur bei geringer Verkehrsbelastung anzuwenden.

Tabelle 8. Eigenschaften gemischter Bauweise im Vergleich zu anderen (laut RVS 08.18.01)

<b>Gemischte Bauweise</b>	
Regelbauweise	nein
Herstellungskosten	höher
Unterhaltskosten	höher
Wiederherstellungskosten	höher
Entsiegelung d. Fläche	nein
Elastizität	geringer
Sichtbare Spannungsrisse	vorhanden
Auswaschung der Fugen	nein
Fugensanierung	aufwändiger
Belastbarkeit	geringer
Reinigung	einfach
Fugenbewuchs	gering

## 4 Oberbaubemessung

Straßenkonstruktionen sind Flächenbauwerke, deren Tragfähigkeit stark von der Qualität und Dicke der verschiedenen Schichten abhängt, aus denen sie bestehen. Die Beanspruchungen, die die Dimensionierung des Oberbaus bestimmen, sind die Verkehrslasten und die Beanspruchung durch Klimaeinflüsse. Neben diesen Belastungen ist auch die Qualität des Untergrundes sowie die Eigenschaften der Materialien, aus denen der Oberbau besteht, zu berücksichtigen.

### 4.1 Bemessung nach RVS 03.08.63

In Österreich wird die RVS 03.08.63 [73] für die Dimensionierung von Oberbaukonstruktionen verwendet. Diese Dimensionierung besteht aus mehreren Schritten:

Ermittlung der maßgebenden Verkehrsbelastung:

Es werden vier verschiedene Lastklassen (für Pflasterbefestigungen LK0,05 bis LK1,3) unterschieden. Entscheidend ist die Verkehrsbelastung auf der am stärksten belasteten Fahrspur. Diese Verkehrslast wird durch die äquivalente Anzahl von Standard-Achslastübergängen von 100 kN ausgedrückt und als Bemessungsnormallastwechsel (BNLW) bezeichnet. Die Verkehrsbelastung kann näherungsweise aus dem folgenden Zusammenhang bestimmt werden [73]:

$$\text{BNLW} = \text{NLW}_{\text{tägl}} \times R \times V \times S \times 365 \times n \times z$$

Dabei bedeuten,

**NLW<sub>tägl</sub>** Anzahl der durchschnittlich täglichen Normlastwechsel (Übergänge der Normachslast von 100 kN) für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsübergabe.

Diese errechnen sich:

- bei Kenntnis der jährlich durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke JDTV; der Fahrzeugkategorie „i“ im gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsübergabe

aus:

mit:

$$\text{NLW}_{\text{tägl}} = \sum \text{JDTV}_i \times \ddot{A}_i$$

**Ä<sub>i</sub>** Mittlerer Äquivalenzwert der jeweiligen Fahrzeugkategorie i gemäß *Tabelle 10*;

- wenn keine Ergebnisse aus Verkehrszählungen mit Unterscheidung der Fahrzeuge in Fahrzeugkategorien  $i$  vorliegen aus:

$$NLW_{\text{tägl}} = JDTV_{\text{ges}} \times \ddot{A}_{JDTLV}$$

$JDTLV_{\text{ges}}$  jährlich durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke (Lkw, Lkw-ähnliche Fahrzeuge und Busse je 24 Stunden, alle Tage) für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsübergabe; ermittelt aus Zählungen bzw. aufgrund von Abschätzungen über JDTV-Wert und Lastverkehrsanteil.

$\ddot{A}_{JDTLV}$  Mittlerer Äquivalenzwert des JDTLV-Kollektivs für die entsprechende Straßenkategorie gemäß Tabelle 9.

- R** Richtungsfaktor für die Aufteilung des Lastverkehrs auf die Fahrtrichtungen (0,5 bei gleichmäßiger Aufteilung des Lastverkehrs auf beide Fahrtrichtungen).
- V** Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahrstreifen. 1,0 bei 1 bzw. 2 Richtungsfahrstreifen 0,9 bei 3 oder mehr Richtungsfahrstreifen.
- S** Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrstreifens gemäß den Werten der Tabelle 11.
- n** Bemessungsperiode in Jahren (Regelfall 20 Jahre für bituminöse Befestigungen und Pflasterstein- und Pflasterplattendecken bzw. 30 Jahre für Betondecken).
- z** Zuwachsfaktor unter Berücksichtigung einer jährlichen Zuwachsrate  $p$  [%] (siehe Tabelle 12)

$$z = \frac{q^n}{n \times (q - 1)} \text{ mit } q = 1 + \frac{p}{100}$$

Tabelle 9. Mittlere Äquivalenzwerte für verschiedene Fahrzeugkategorien (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 1)

Fahrzeugkategorie	$\ddot{A}_i$
Lkw ohne Anhänger	0,80
Lkw mit Anhänger	1,25 <sup>*</sup> )

Sattelzug	2,00*)
Bus	0,60
Linienbus (ÖPNV)	0,80
Liniengelenkbus (ÖPNV)	1,40

\*) Ist keine Unterscheidung zwischen LKW mit Anhänger und Sattelzug möglich, ist ein Äquivalenzwert von 1,75 anzuwenden

Tabelle 10. Mittlere Äquivalenzwerte des JDTLV-Kollektivs für verschiedene Straßenkategorien (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 2)

<b>Straßenkategorie</b>	<b>Ä<sub>JDTLV</sub></b>
Bundesstraßen A und S	1,60
Sonstige Straßen	1,45

Tabelle 11. Fahrspurfaktor S in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite b<sub>f</sub> (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 3)

<b>b<sub>f</sub> [m]</b>	< 3,00	3,00	3,25	3,50	3,75	≥4,00
<b>S</b>	1,00	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Tabelle 12. Zuwachsfaktor z in Abhängigkeit der Bemessungsperiode n und jährlicher Zuwachsrate (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 4 [73])

		<b>Mittlere jährliche Zuwachsrate p [%]</b>					
		0	1	2	3	4	5
<b>Bemessungsperiode [Jahren]</b>	5	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11
	10	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,26
	15	1,00	1,07	1,15	1,24	1,33	1,44
	20	1,00	1,10	1,22	1,34	1,49	1,65
	25	1,00	1,13	1,28	1,46	1,67	1,91
	30	1,00	1,16	1,35	1,59	1,87	2,21

### *Festlegung der Lastklassen für Pflasterbefestigungen*

Die Berechnung des Bemessungsnormlastwechsels (BNLW) kann über einen Bezugsachslast bezogen werden. Dabei berücksichtigt man die beiden Fahrspuren der Straße und die Anzahl der LKWs und Busse in den letzten 24 Stunden, in beide Richtungen, über den Wert  $JDTV_{ges}$ . Mit allen Parametern kann man die Lastklasse auf die gleiche Weise ermittelt werden [48].

Aufgrund der Verwendung verschiedener Verkehrszonen werden sie in den Vorschriften in verschiedene Lastklassen eingeteilt.

Tabelle 13. Lastklasse aufgrund des maßgebenden Schwerverkehrs im Querschnitt für das gering belastete Straßennetz (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 4 [73])

<b>Lastklasse</b>	<b>Maßgeblicher Schwerverkehr</b>
LK0,4	80 Schwerfahrzeuge pro 24 h
LK0,1	20 Schwerfahrzeuge pro 24 h
LK0,05	10 Schwerfahrzeuge pro 24 h

## **4.2 Standardisierte Oberbauausführung**

Sobald die Lastklasse erhalten und kategorisiert wurde, ist es wichtig zu beachten, dass die minimale Untergrundtragfähigkeit ( $E_{V1,UP}$ ) größer als  $35 \text{ MN/m}^3$  sein muss (gem. RVS 03.08.63 [73]). Von dort kann die Bemessung mittels Standardaufbauten aus dem in der Vorschrift enthaltenen Bautypen-Katalog (Tabellen 10 und 11) durchgeführt werden. In diesem Katalog werden die Dicken und Qualitäten der Materialien in jeder Schicht festgelegt.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die vorliegende Vorschrift nur die ungebundene Bauweise, nicht jedoch die gebundene Variante berücksichtigt. Bei der oberen Tagschicht wird zwischen Bautypen zwischen PF1 und PF4 (gem. RVS 03. 08. 63 Tabelle 10) mit ungebundener oberer Tragschicht und Bautypen zwischen PF5 und PF8 (gem. RVS 03.08.63 [73] Tabelle 11) unterschieden. Ein interessanter Aspekt, der bei zukünftigen Entwicklungen der Vorschriften zu berücksichtigen ist, könnte daher die Einbeziehung der Varianten in gebundener Bauweise sein, da sich deren

Einsatz derzeit ausbreitet. Eines der Ziele dieser Arbeit ist es, das Verhalten und dieser Bauweise zu untersuchen und mit verschiedenen Varianten zu vergleichen.

Laßtklasse	LK1,3	LK0,4	LK0,1	LK0,05
BNLW in Mio	> 0,4 bis 1,3	> 0,1 bis 0,4	> 0,05 bis 0,1	≤ 0,05
Bautype PF1 Großpflastersteine oder ähnl. Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht	cm $\Sigma$ 72 18 4'' 20 30 UP	cm $\Sigma$ 67 13 4'' 20 30 UP	cm $\Sigma$ 67 13 4'' 20 30 UP	
Bautype PF2 Kleinpflastersteine mit allseitiger Verbundwirkung oder Betonverbundsteine Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht		cm $\Sigma$ 64 $\Sigma$ 65 10 4'' 20 30 UP	cm $\Sigma$ 62 $\Sigma$ 63 8 4'' 20 30 UP	cm $\Sigma$ 62 $\Sigma$ 63 9 4'' 20 30 UP
Bautype PF3 Kleinpflastersteine oder Betonsteine ohne Verbundwirkung Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht			cm $\Sigma$ 64 $\Sigma$ 65 10 4'' 20 30 UP	cm $\Sigma$ 62 $\Sigma$ 63 8 4'' 20 30 UP
Bautype PF4 Pflasterplatten Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht			cm $\Sigma$ 64-70 10-16'' 4'' 20 30 UP	cm $\Sigma$ 62-70 8-16'' 4'' 20 30 UP

$E_{v,UP} \geq 35 \text{ MN/m}^2$

- Die Bettungsdicke von 3 bis 6 cm dient zum Ausgleich der Höhentoleranzen der Pflastersteine und beträgt im verdichteten Zustand ca. 4 cm.
- Nennmaß Pflasterplatten gemäß Tabelle 7

- |   |   |
|---|---|
|  Großpflastersteine Type GPS1, GPS2 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinerzeugnisse im Reihenverband rechtwinklig bzw. diagonal zur Bezugslinie |  Pflasterplatten aus Beton gemäß ÖNORM EN 1339 oder Naturstein gemäß ÖNORM EN 1341 bzw. ÖNORM B 3108 |
|  Großpflastersteine Type GPS3, GPS4 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinerzeugnisse im Reihenverband rechtwinklig bzw. diagonal zur Bezugslinie |  Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01   |
|  Kleinpflastersteine Type KPS2 bis KPS3 gemäß ÖNORM B 3108 im Segmentbogenverband  |  U3,U4 ungebundene Obere Tragschicht Klasse U3 oder U4 gemäß RVS 08.15.01                            |
|  Betonverbundsteinsysteme  |  U5 ungebundene Obere Tragschicht Klasse U5 gemäß RVS 08.15.01                                       |
|  Kleinpflastersteine im Reihenverband Type KPS2 bis KPS3 gemäß ÖNORM B 3108  |  U6,U7 ungebundene Untere Tragschicht Klassen U6 oder U7 gemäß RVS 08.15.01                          |
|  Betonsteine ohne Verbundwirkung im Reihenverband rechtwinklig bzw. diagonal zur Bezugslinie, Fischgrätverband   |  U8 ungebundene Untere Tragschicht Klasse U8 gemäß RVS 08.15.01                                      |

Abbildung 22. Bemessungstabelle für ungebundene Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 10 [73])

Lastklasse	LK1,3	LK0,4	LK0,1	LK0,05
BNLW in Mio	> 0,4 bis 1,3	> 0,1 bis 0,4	> 0,05 bis 0,1	≤ 0,05
Bauart PF5 Großpflastersteine oder ähnl. Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	cm Σ 57 18 4 <sup>1)</sup> 20 15 KPS	cm Σ 52 13 4 <sup>1)</sup> 20 15 KPS	cm Σ 47 13 4 <sup>1)</sup> 15 15 UP	
Bauart PF6 Kleinpflastersteine mit allseitiger Verbundwirkung oder Betonverbundsteine Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	cm Σ49 Σ50 cm 10 11 4 <sup>1)</sup> 4 <sup>1)</sup> 20 20 15 15 KPS	cm Σ47 Σ48 cm 8 9 4 <sup>1)</sup> 4 <sup>1)</sup> 20 20 15 15 KPS	cm Σ42 Σ43 cm 8 9 4 <sup>1)</sup> 4 <sup>1)</sup> 15 15 15 15 UP	
Bauart PF7 Kleinpflastersteine oder Betonsteine ohne Verbundwirkung Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht			cm Σ44 Σ45 cm 10 11 4 <sup>1)</sup> 4 <sup>1)</sup> 15 15 15 15 UP	
Bauart PF8 Pflasterplatten Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht		cm Σ53-57 14-18 <sup>2)</sup> 4 <sup>1)</sup> 20 15 UP	cm Σ 44-52 10-18 <sup>2)</sup> 4 <sup>1)</sup> 15 15 UP	cm Σ 42-52 8-18 <sup>2)</sup> 4 <sup>1)</sup> 15 15 UP
$E_{v1,UP} \geq 35 \text{ MN/m}^2$				

- Die Bettungsdicke von 3 bis 6 cm dient zum Ausgleich der Höhentoleranzen der Pflastersteine und beträgt im verdichteten Zustand ca. 4 cm
- Nennmaß Pflasterplatten gemäß Tabelle 7.

-  Großpflastersteine Type GPS1, GPS2 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinzeugnisse im Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie
-  Großpflastersteine Type GPS3, GPS4 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinzeugnisse im Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie
-  Kleinpflastersteine Type KPS2 bis KPS3 gemäß ÖNORM B 3108 im Segmentbogenverband
-  Betonverbundsteinsysteme

-  Kleinpflastersteine im Reihenverband Type KPS2 bis KPS3 gemäß ÖNORM B 3108
-  Betonsteine ohne Verbundwirkung im Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie, Fischgrätverband
-  Pflasterplatten aus Beton gemäß ÖNORM EN 1339 oder Naturstein gemäß ÖNORM EN 1341 bzw. ÖNORM B 3108
-  Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01
-  Pflasterdrainbeton gemäß RVS 08.18.01
-  U8 ungebundene Untere Tragschicht Klasse U8 gemäß RVS 08.15.01

Abbildung 23. Bemessungstabelle für Pflastersteindecken in ungebundener Bauweise mit Pflaster-Drainbetontragschicht (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 11 [73])

## 5 Materialuntersuchungen

### 5.1 Drainbeton als Tragschicht

Drainbeton ist eine Betonart, bei der der Porengehalt größer ist als bei einem herkömmlichen Beton, mit dem Ziel, ein durchlässiges Material zu erhalten. Dieser Porengehalt wird durch Verringerung der Feinteile des Zuschlagstoffs erzielt.

Selbstverständlich sind die mechanischen Eigenschaften des Materials vom Porengehalt abhängig. Aus diesem konzentriert sich dieser Abschnitt auf das mechanische Verhalten dieses Materials.

Drainbeton wurde als Deckenschicht für den Einbau auf Parkplätzen, in Industriegebieten, Sportbahnen, Standstreifen und anderen Bereichen eingesetzt, in denen die Wasserableitung eine große Bedeutung hat. Allerdings sind dies nicht die einzigen Anwendungen dieses Materials: es kann überdies als obere Tragschicht für Pflasterdecken verwendet werden, da dies eine Schicht ist, die eine große Bedeutung bei der Verteilung der Kräfte und Spannungen in dem Untergrund hat. Dieses Material bietet bei diesem Einsatz große Vorteile gegenüber anderen Varianten, da es höheren Belastungen standhält und gleichzeitig die Wasserableitung ermöglicht.

Diese Studie hat sich auf die Untersuchung des mechanischen Verhaltens des Drainbetons gegen langanhaltende dynamische Belastungen und damit seiner Ermüdungsbeständigkeit gegen jene zyklischen Belastungen konzentriert. Es ist erwähnenswert, dass die Anzahl der Studien, in denen dieses Verhalten des Materials untersucht wird, nicht sehr groß ist.

Ein optimales Verhältnis zwischen Permeabilität und Widerstand muss erreicht werden [43]. Während eine höhere Permeabilität und bessere Drainageeigenschaften erreicht werden, nehmen gleichzeitig die Steifigkeit und Festigkeit ab. Daher wurden in den letzten Jahren große Anstrengungen bei der Erforschung dieses Materials unternommen.

Es gibt eine große Anzahl von Publikationen, die darauf abzielen, die optimale Drainbetonrezeptur festzulegen, abhängig von der Anwendung. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Versuchsanordnung zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde eine einzige Betonmischung verwendet. Drainbeton ist ein durchlässiges und poröses Material, das hauptsächlich aus Zement, groben Gesteinskörnungen und Wasser besteht [58]. Im konventionellen Beton füllen die feinen Gesteinskörnungen die Lücken zwischen den groben Gesteinskörnungen. Dies führt zu einem Hohlraumgehalt, der in der Regel zwischen 15 und 35 % liegt [58].

Vor der Durchführung der Ermüdungsversuche wurden die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Drainbetons ermittelt (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14. Eigenschaften der Mischgüter

<b>Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>		2065
<b>E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]</b>		18500
<b>Druckfestigkeit 28 Tage [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>oben</b>	22,1
	<b>unten</b>	17,2
<b>Durchlässigkeit [s]</b>	gegeben	
<b>Spaltzugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>oben</b>	2,03
	<b>unten</b>	1,63
<b>Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>oben</b>	3,51
	<b>unten</b>	2,96

Tabelle 15. Rezeptur der Mischgüter

<b>Rezeptur der Mischgüter</b>
GK 16
CEM II 42,5 N
13 % Kies 0/4
W/B: 0,36

Das Hauptziel dieser Studie ist es, das Ermüdungsverhalten von Pflasterdrainbeton zu beurteilen. Aufgrund des großen Porenanteils, kommt es zu stark inhomogenen Materialverhalten. Diese Eigenschaft erschwert die Beurteilung der mechanischen Eigenschaften.

Um möglichst hohe Homogenität bei der Probekörperherstellung zu erreichen, wurden die Proben in einem gleichen Block gefertigt und in Probekörper mit den Abmessungen 1,0 x 1,0 x 0,2 m geschnitten. Dies soll eine möglichst realitätsnahe Prüfung ermöglichen.



Abbildung 24. Herstellung der Probekörper

## 5.2 Ermüdung: Allgemein

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse wird in diesem Abschnitt auf die Grundlagen des Ermüdungsversuchs eingegangen.

Ermüdung wird als ein Prozess der Schädigung des Materials durch eine dynamische Belastung (mechanisch, Temperatur etc.) beschrieben. Nach [17] wird Materialermüdung als das Phänomen verstanden, bei dem Materialien unter zyklischer Belastung versagen. Dieser Bruchprozess beginnt mit dem Auftreten von Rissen auf der mikroskopischen Ebene, die sich zu Rissen auf der makroskopischen Ebene verbinden. Ein Verlust der Steifigkeit des Materials ist mit diesem Auftreten von Rissen verbunden.

Bei der Nachbildung von Ermüdungsprozessen im Labor wird das Material einer zyklischen Belastung ausgesetzt, die aus Zug und Druckbeanspruchung, mit konstanter Amplitude und bestimmten Frequenz besteht. Es gibt mehrere Studien, die sich mit dem Einfluss der Frequenz auf die Materialermüdung befassen [13][40][59][92]. Die Dauerfestigkeit von Drainbeton ist abhängig von den folgenden Parametern [13]:

- Spannungszustand
- Belastungsfrequenz
- Betonzusammensetzung
- Feuchtigkeitsgehalt des Betons
- Alter des Betons
- Anzahl der Poren

Es lässt sich feststellen, dass die Ermüdungsbeständigkeit von Beton mit zunehmender Belastungsfrequenz zunimmt und mit zunehmender Spannung abnimmt [19].

Um die Ermüdungsfestigkeit des Materials zu charakterisieren und zu bewerten, erhält man die S-N-Kurven (auch bekannt als „Wöhler-Kurve“), die die Spannung (S) gegen den Logarithmus der Anzahl der Zyklen bis zum Bruch der Proben (N) darstellen.

Die Betonermüdung ist durch einen internen Mikrorissprozess gekennzeichnet, der zu einer makroskopischen Veränderung der mechanischen Eigenschaften führt, insbesondere zur Verringerung der Steifigkeit und zum Wachstum der Gesamtverformung in Abhängigkeit vom Spannungsniveau. Der Einfluss dieses Prozesses auf das Verhalten von Strukturelementen ist komplex, da sie eine progressive interne Umverteilung von Spannungen bewirken [70]. Daher führt die direkte Verwendung von Wöhlerkurven in der Regel zu übermäßig konservativen Ergebnissen.

Beton ist ein heterogenes Material, das sich aus verschiedenen Bestandteilen (Zuschlagstoffen, Zement und Poren) zusammensetzt. Tatsächlich hat Drainbeton aufgrund des hohen Anteils an Poren eine größere Heterogenität als herkömmlicher Beton. Daher ist sein dynamisches Verhalten bei moderaten (Druck-)Spannungen nichtlinear.

### Schädigungsphasen

Der Grad der Beschädigung zeigt sich in einer verminderten Steifigkeit und somit erhöhten verschiebenden Dehnung im Probekörper. Aus diesem Grund kann der Schädigungsgrad nach dem Verhältnis des Steifigkeitsmoduls für jeden Zyklus zum Anfangssteifigkeitsmodul des Materials nachfolgender Formel bewertet werden (vgl. Chen 2016):

$$D = 1 - \left(\frac{E}{E_0}\right) \quad [\text{nach Chen, X. [19]]][3]$$

wo,

D: Schädigungsgrad [-]

E: Steifigkeitsmodul für jeden Zyklus [in N/mm<sup>2</sup>]

E<sub>0</sub>: Anfangssteifigkeitsmodul [in N/mm<sup>2</sup>]

In Kurven, die den Schädigungsgrad des Betons darstellen, lassen sich drei signifikante Phasen während der Dauer eines Ermüdungsversuchs unterscheiden [35][40][59].

- Phase I: Zunächst ist ein deutlicher Anstieg der nichtlinearen Dehnungen festzustellen. Sie liegt in der Regel zwischen 0% und 10-20% der Dauer bis zum Versagen.

- Phase II: In dieser Zeit nimmt die Dehnung annähernd linear zu. Diese Phase liegt in der Regel zwischen 10-20 % und 80-90% der Dauer bis zum Versagen.
- Phase III: Endphase, in der eine nichtlineare Zunahme stattfindet, bis der Bruch des Probekörpers erfolgt. Diese Phase beginnt zwischen 80-90% der Dauer bis zum Versagen.

In Abbildung 25 ist eine identische Kurve dargestellt, die die Entwicklung des Schadens in Bezug auf die relative Anzahl der Zyklen zeigt. In dieser Kurve sind die drei charakteristischen Phasen zu beobachten, die je nach geprüftem Material und den Bedingungen des Ermüdungsversuchs variieren können.

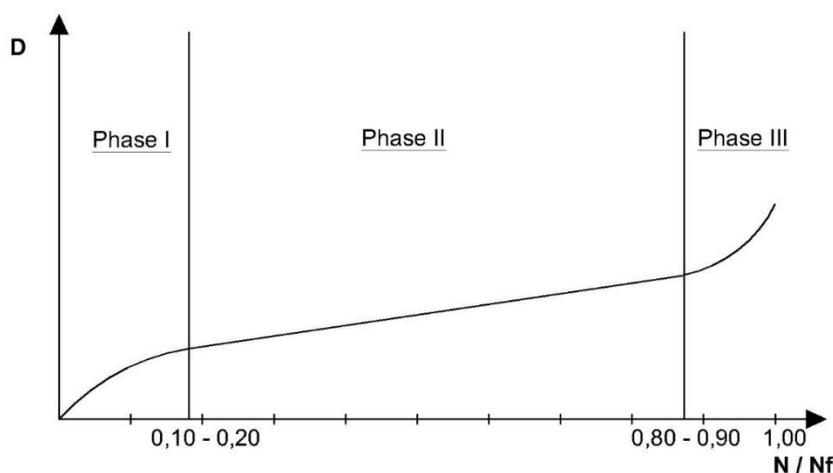


Abbildung 25. Schadensentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung

## Dehnungsverlauf

Die Dehnungsentwicklung während des Ermüdungsversuchs ist ebenfalls durch diese drei Phasen gekennzeichnet.

Laut [49][83] wird die Veränderung der Verformungen durch die Ausbreitung von Mikrorissen verursacht. In der ersten Phase kommt es zu einem schnellen und instabilen Anstieg der Verformung durch das erstmalige Auftreten dieser Mikrorisse. In der zweiten Phase (durch das stabile Wachstum der Risse) gibt es einen linearen und konstanten Anstieg der Verformung. In der letzten Phase gibt es schließlich ein lokales und instabiles Wachstum von Mikrorissen, die am Ende das Material zum Versagen bringen. [45][59][19] (siehe Abbildung 26).

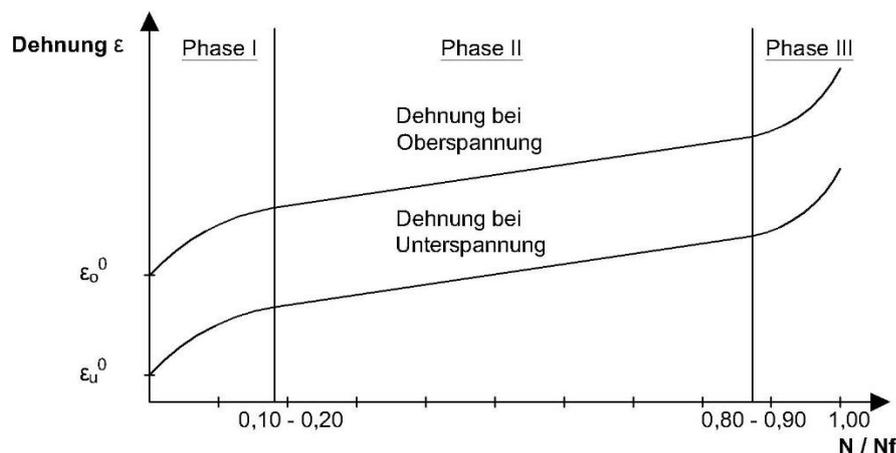


Abbildung 26. Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung

Die Gesamtdehnung  $\varepsilon_c(t)$  besteht aus drei Komponenten, der elastischen Komponente  $\varepsilon_{el}(t_0)$ , der zeitabhängigen Komponente  $\varepsilon_{cr}(t)$  (auch Kriechverformung genannt) und den spannungsunabhängigen Verformungen (infolge Temperatur und Schwinden) [78]. Werden spannungsunabhängige Verformungen (im Versuch im Labor) eliminiert, ergibt sich die folgende Gleichung zur Beschreibung der Verformung im Zeitverlauf:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{el}(t_0) + \varepsilon_{cr}(t) \quad [\text{nach [78]] [4]}$$

Betrachtet man das Verhältnis zwischen der Spannung und dem Steifigkeitsmodul zu einem bestimmten Zeitpunkt, d. h. ohne Berücksichtigung der zeitlichen Variable, erhält man die elastische Dehnung:

$$\varepsilon_{el} = \varepsilon_{el}(t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \quad [\text{nach [78]] [5]}$$

Die Kriechen-Komponente  $\varepsilon_{cr}(t)$  besteht wiederum aus zwei Variablen: die Variable, die die verzögert elastische Verformung  $\varepsilon_{v-el}$  (reversibel) und die verzögert bleibende Verformung  $\varepsilon_{v-pl}$  bzw. das Fließen (irreversibel) umfasst [78].

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_{v-el}(t) + \varepsilon_{v-pl}(t) = \varepsilon_{\varphi} \quad [\text{nach [78]] [6]}$$

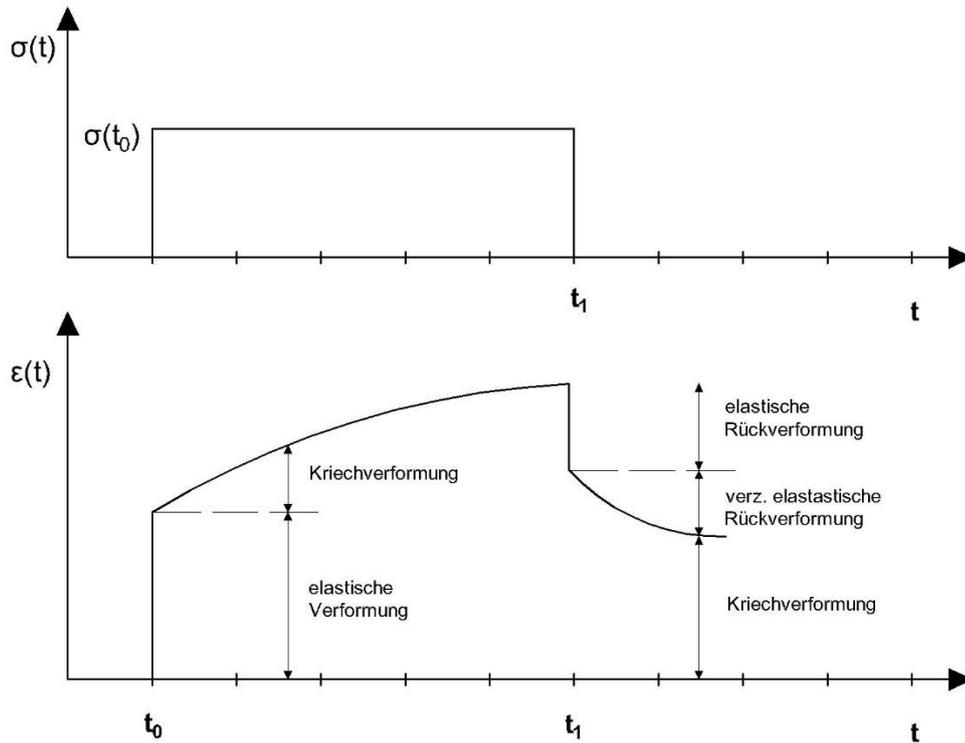


Abbildung 27. Verformungskomponenten des Betons [78]

Während des gesamten Ermüdungs-Prozesses kommt es zu einer Akkumulation der Dehnung im Laufe der Zeit, auch bekannt als Kriechverformung. Es gibt zahlreiche Studien, die einen engen Zusammenhang zwischen Dauerfestigkeit und Kriechverformung bei Beton thematisieren [19]. Die Dehnungsrate  $\dot{\epsilon}$  ist definiert als die zeitliche Ableitung der Dehnung.

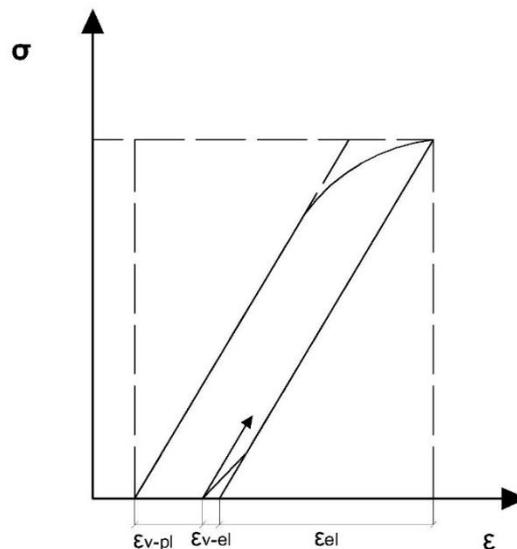


Abbildung 28. Spannungs-Dehnungs-Verlauf

Nach [19] wird die maximale Dehnung  $\varepsilon$  durch mehrere Variablen beeinflusst: die Kriechdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_{cr}$ , die Belastungsfrequenz  $f$  und die maximale Anzahl der Zyklen  $N_f$  im Ermüdungsversuch [Gleichung 6].

$$\log \varepsilon = \log \dot{\varepsilon}_{cr} + \log N_f - \log f \quad [\text{nach Chen [19]]}[6]$$

In der linearen Phase, kann die Kriechdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_{cr}$  aus der irreversiblen Komponente der kumulativen Dehnung berechnet werden [19].

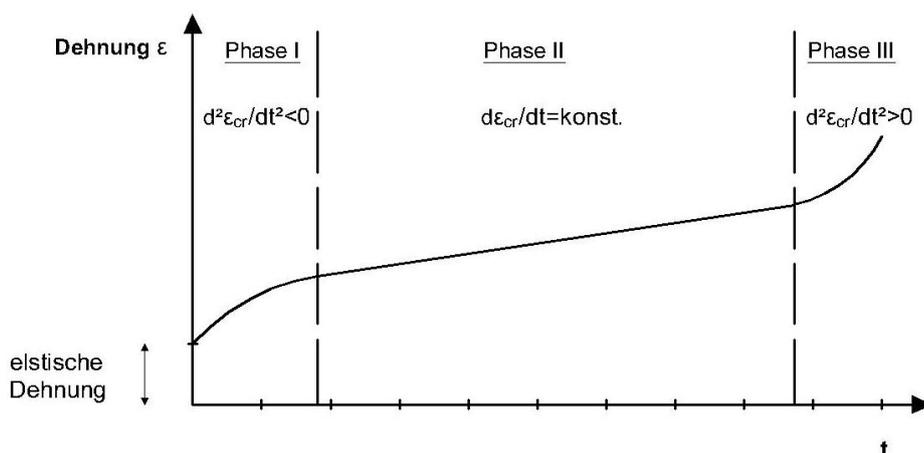


Abbildung 29. Dehnungs-Zeit-Verlauf [78]

In [19] wird ein Modell aus Ermüdungsversuchen abgeleitet, das auf der Akkumulation irreversibler Dehnungen  $\varepsilon_{v-pl}$  zur Quantifizierung der Dauerfestigkeit des Betons aus dem Frequenz- und Spannungsniveau des Materials basiert.

### Rissentstehung und Bruchenergie

Da das Auftreten von Mikrorissen im Beton zu Betonermüdung führt, ist es wichtig zu wissen, wie Risse im Beton entstehen. Eine der maßgeblichen Einflussgrößen für das Auftreten von Rissen ist die Art der Belastung (statisch oder dynamisch).

Drainbeton hat einen höheren Porengehalt als Straßenbaubeton. Allerdings weist auch herkömmlicher Beton eine große Anzahl von Poren zwischen der Matrix des Zements und Zuschlagkörnern auf [44]. Das Auftreten von Mikrorissen in diesen Bereichen wird durch „mechanische Inkompatibilität“ [35] zwischen den beiden Materialien verursacht (Wärmeausdehnungskoeffizient oder Steifigkeitsmodul).

Poren und andere Diskontinuitäten bewirken eine Umlenkung der inneren Kräfte, wodurch konzentrierte Spannungen in der Zementmatrix auftreten [35]. Der Hauptgrund für die Bildung von Mikrorissen ist die Unfähigkeit des Betons, hohen lokalen Zugspannungen zu widerstehen.

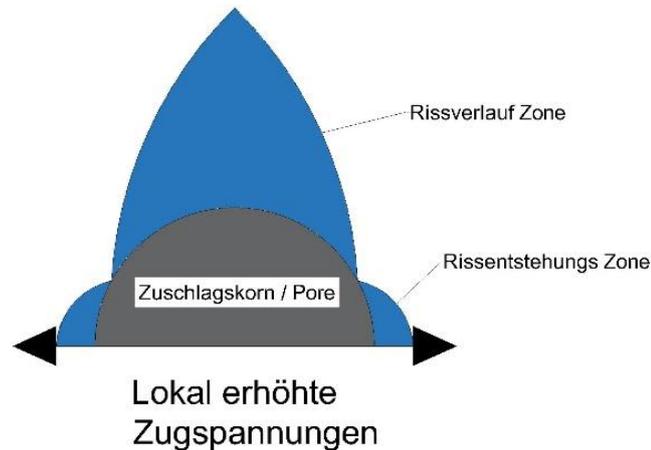


Abbildung 30. Modell der Rissbildung [35]

Nach Rossi, S. [72] verteilen sich die Risse bei statisch beanspruchtem Beton meist im Interaktionsbereich zwischen Zuschlagkorn und Zementmatrix, während bei dynamischen Beanspruchungen, die Risse in der Regel das Gesteinskorn durchdringen. Dieser Mechanismus wird durch die Dehnungsraten beeinflusst [13], wobei Risse dadurch im Zuschlagkorn entstehen (siehe Abbildung 31).

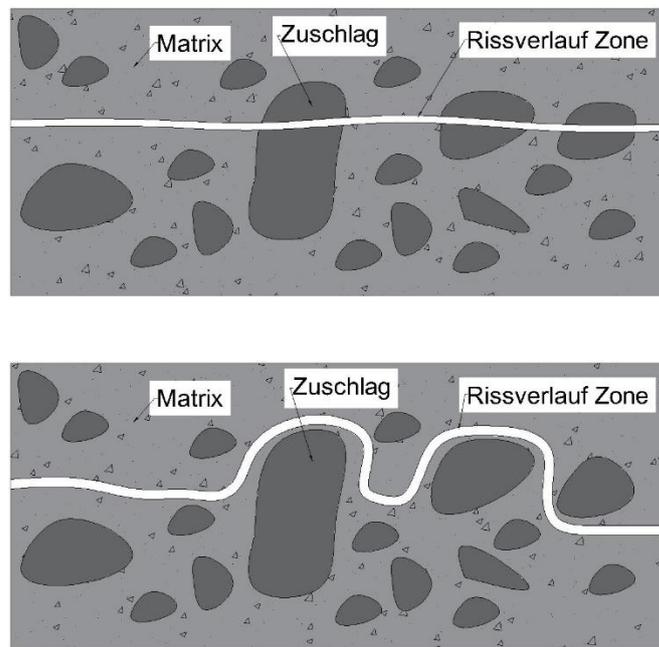


Abbildung 31. Rissverlauf bei hoher (Bild oben) und geringer (Bild unten) Dehnungsrate [57]

## Steifigkeitsabbau

Um die Steifigkeit des Betons in der Ermüdungsversuche zu bestimmen, wird der Sekantenmodul „ $E_s$ “ der Entlastungskurve verwendet. Untersuchungen von [22] haben ergeben, dass die Steifigkeit in einem dreistufigen Abbauprozess charakterisiert werden kann (siehe Abbildung 32).

Bei Ermüdungsuntersuchungen ist es üblich, das Elastizitätsmodul den Sekantenmodul darzustellen. Dieses wird in der Entlastung zwischen dem Maximum und dem Minimum von Spannung und Dehnung mit Hilfe der folgenden Gleichung bestimmt:

$$E_s = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad [\text{nach 18}] \quad [7]$$

mit,

$\sigma_o$ : Spannung bei maximaler Belastung [in N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_u$ : Spannung bei minimaler Belastung [in N/mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon_o$ : Dehnung bei maximaler Belastung [-]

$\varepsilon_u$ : Dehnung bei minimaler Belastung [-]

Daher hat die Evolution von Steifigkeit eine umgekehrt proportionale Beziehung, so wie ihre Entwicklung im Laufe der Zeit, die es ermöglicht, die gleichen Phasen wie bei der Dehnungsentwicklung zu unterscheiden:

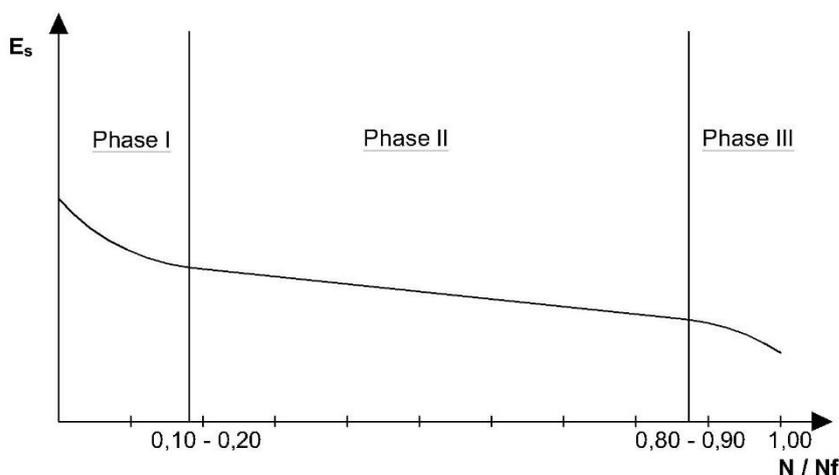


Abbildung 32. Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung

## 5.3 Ermüdungsuntersuchungen im Labor

### 5.3.1 Zielsetzung

Das Hauptziel dieses Versuchs ist die Bestimmung der mechanischen Beständigkeit des Materials gegen wiederholte dynamische Belastungen, auch bekannt als Dauerfestigkeit. Um die erhaltenen Ergebnisse zu charakterisieren und auszuwerten, wird eine S-N-Kurve erstellt, die die Spannungen im Vergleich zur Anzahl der Zyklen darstellt. Diese Kurve wird mittels einer Iterationskurve aus den Ergebnissen des Ermüdungstests erhalten. Diese Kurve wird später verwendet, um Pflasterbefestigungen mit Drainbeton als Tragschicht zu dimensionieren.

### Verwendete Materialien

Alle Ermüdungsversuche wurden mit der gleichen Drainbetonrezeptur durchgeführt (siehe auch Punkt 5.1). Mit dem Ziel, die Ergebnisse so homogen wie möglich zu gestalten, wurden alle Versuchskörper in einem Arbeitsgang hergestellt.

### Statische Vorversuche

Um das Spannungsniveau der Ermüdungsversuche festzulegen, wurde in statischen Vorversuchen die Biegefestigkeit  $f_c$  bestimmt.

### 5.3.2 Versuchsaufbau

Um die Dauerfestigkeit des Drainbetons zu bestimmen, sollten Randbedingungen gewählt werden, die möglichst der Realität entsprechen. Um diese Situation zu simulieren, war die erste Idee, die Betonplatte auf einer Schicht aus verdichtetem Tragschichtmaterial zu betten (Dicke 1m) und einer Platte aus XPS (siehe Abbildung 33). Über eine kreisrunde Lastplatte (Durchmesser 50 cm) wird eine vertikale, dynamische Belastung in der Mitte der Oberseite des Probekörpers aufgebracht. Das Ergebnis dieses Versuchs war jedoch nicht aussagekräftig, da der Probekörper zusammen mit der Tragschicht nach unten gedrückt und lediglich die XPS-Platte verdichtet wurde. Dies führte zu vernachlässigbaren Spannungen im Beton. Daher wurde beschlossen den Aufbau zur Durchführung des Ermüdungsverfahrens neu zu konzipieren. Diese bestand darin, die Betonplatte auf einem Metallrahmen zu lagern und so einen vierseitig gelagerten Biege-Ermüdungsversuch zu erhalten.



Abbildung 33. Erster Aufbau des Ermüdungsversuchs

Die zweite Variante bestand aus einem Metallrahmen, auf dem die Drainbetonplatten auf einer Britte von 8 cm an jeder ihrer Seiten gelagert wurde. Dieser Rahmen ermöglichte die Prüfung der Probe auf Biegebeanspruch. Ein sehr wichtiger Faktor bei dieser Art von Prüfung ist, dass sowohl die Last vollständig zentriert aufgebracht, als auch in die Probekörper eben gelagert werden. Daher wurden die Probekörper auf Elastomermatten sowie einer Ausgleichsschicht aus Fliesenkleber gelagert.



Abbildung 34. Zweiter Aufbau des Ermüdungsversuchs auf Stahlprofilen, Elastomermatten und einer Ausgleichsschicht aus Fliesenkleber



Abbildung 35. Lasteinleitung

### 5.3.3 Versuchsdurchführung

Der Ermüdungsversuch wurde durch das Aufbringen einer zyklischen Last mit einer konstanten Frequenz von 8 Hz für verschiedene Spannungsniveaus realisiert. Die Tests gelten dann als abgeschlossen, wenn eine maximale Anzahl von Zyklen von zwei Millionen erreicht ist oder der Probekörper versagt.

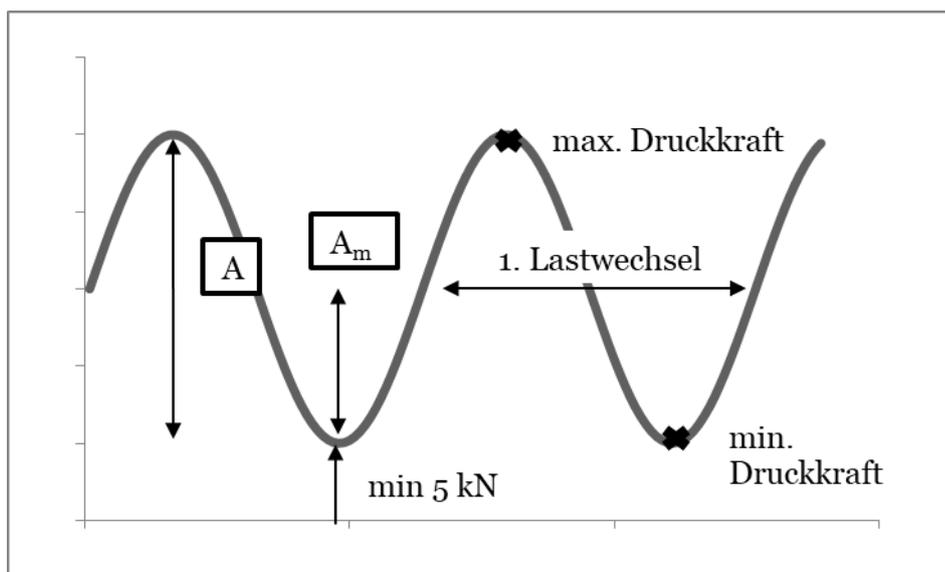


Abbildung 36. Zyklische Druckbeanspruchung

Vier verschiedene Spannungsebenen wurden verwendet, um die Wöhlerkurve zu erstellen, die das Verhalten gegenüber Materialermüdung charakterisiert.

Die Amplitude der aufgetragenen Lasten betragen 50 kN, 85 kN, 102,5 kN und 120 kN, wobei die minimale Kraft immer 5 kN betrug.

### Datenerfassung

Die Datenerhebung und die Ergebnisse wurden durch verschiedene Messelemente erzielt. Von Anfang hat man sich entschieden, Daten aus den Dehnungen an der Unterseite der Drainbetonplatte aufzuzeichnen. Diese Messung erfolgte mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS). Die DMS wurden in rechteckiger Form angeordnet (siehe Abbildung 37), um die maximalen Dehnungen an der Unterseite des Probekörpers zu messen

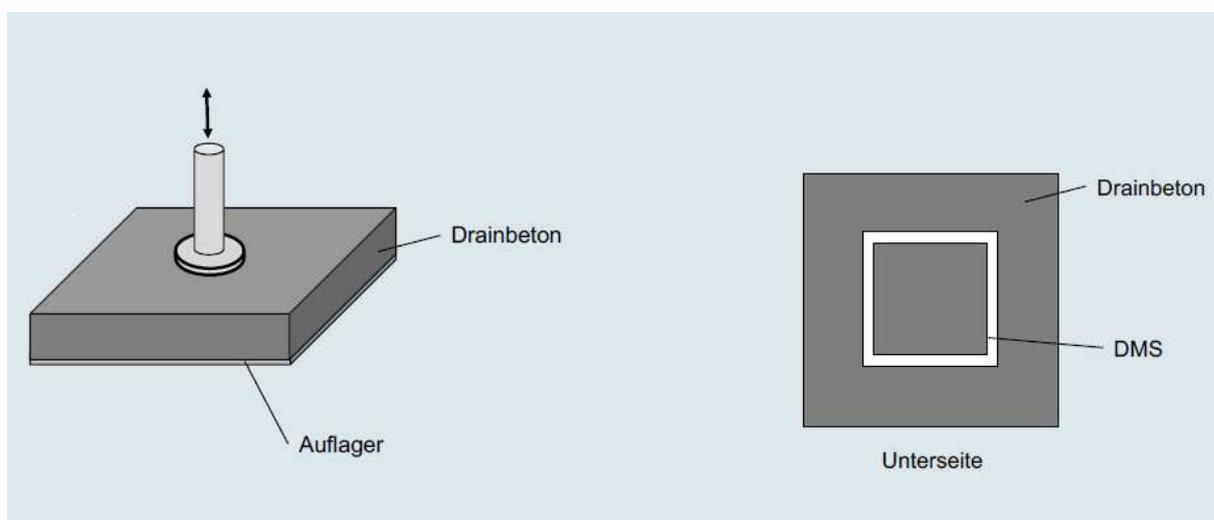


Abbildung 37. DMS Anordnung (Variante)



Abbildung 38. DMS Anordnung (Variante) und Rissbildung

Auf die gleiche Weise wurden die Durchbiegungen der Platte mit drei induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Zwei von ihnen wurden in den Außenbereichen platziert (Wegaufnehmer 1 und 3 in Abbildung 39), um die Setzung der Bettung (Fliesenkleber) zu messen. Diese Verschiebungen wurden von der maximalen Durchbiegung in Plattenmitte (Wegaufnehmer 2) abgezogen.

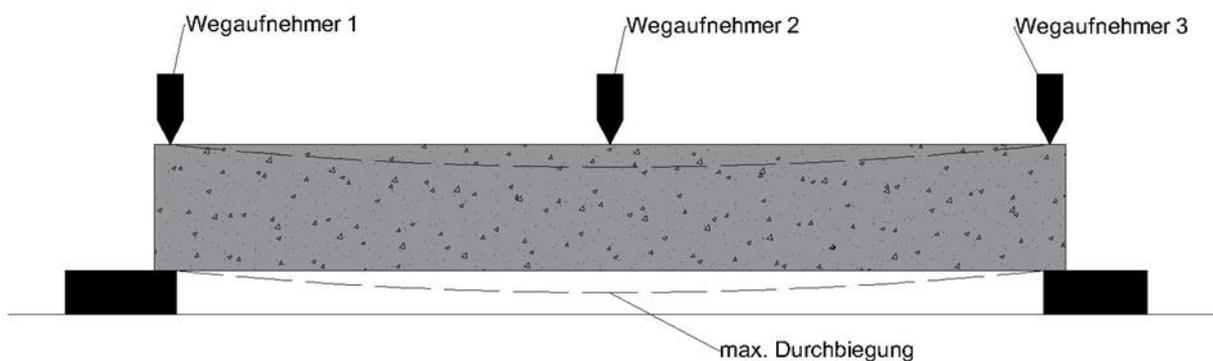


Abbildung 39. Ermittlung der Durchbiegung durch Extensometer

### 5.3.4 Versuchsergebnisse

Die erzielten Ergebnisse sind in den Tabellen 16 bis 19 zusammengefasst. Die Bestimmung der S-N-Kurve ist aufgrund der schlechten Homogenität des Materials keine leichte Aufgabe. Der Labortest wird aus verschiedenen Spannungsebenen durchgeführt, um die Ermüdungsbeständigkeit mit dem Spannungsniveau im Material in Beziehung setzt. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, muss eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt werden. Aufgrund der aufwändigen Probekörperherstellung sowie der langen Dauer der Laborversuche (bis zu 2.000.000 Lastwechsel pro Versuch, das entspricht ca. vier Tagen inkl. Ein- und Ausbau des Probekörpers), ist die Anzahl der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche allerdings begrenzt.



Abbildung 40. Ermüdungsversuch

Aus den Ergebnissen der Einzelversuche wurde die Wöhlerkurve mittels einer Iterationskurve bestimmt. Diese Kurve kann für die Dimensionierung verwendet werden.

Insgesamt wurden elf gültige Ermüdungstests sowie drei statische Versuche zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit durchgeführt.

#### **Erstes Spannungsniveau – Amplitude 50 kN**

In der ersten Testreihe wurde der Ermüdungsversuch mit einer Amplitude von 50 kN und einer Belastungsfrequenz von 8 Hz gestartet. In dieser Serie wurden in den ersten beiden Tests Vibrationen in einer der Ecken der Betonplatte beobachtet. Dies

liegt an der Tatsache, dass der Probekörper aufgrund von Unregelmäßigkeiten nicht gleichmäßig abgestützt wurde. Diese Vibrationen können zu Spannungskonzentration führen, die die Ergebnisse der Ermüdungsversuche verfälschen. Daher wurde Fliesenkleber als Ausgleichsschicht zu verwendet, damit die Platte völlig gleichmäßig aufliegt.

Tabelle 16. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, erste Serie

Prüf- körper	Ampli- tude [kN]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max} / f_c$	Zyklen- anzahl [N]	LN (N)
1	50	1.022	0.029	0.3225	0.29	433072	12.97
2	50	1.022	0.029	0.3225	0.29	2000000	14.50
3	50	1.022	0.029	0.3225	0.29	2000000	14.50

### Zweites Spannungsniveau – Amplitude 85 kN

In der zweiten Serie konnten zwei gültige Tests abgeschlossen werden. Bei diesem Versuch wird die Prüfung mit einer Amplitude von 85 kN durchgeführt. Auch hier können große Unterschiede in der Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen beobachtet werden.

Tabelle 17. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, zweite Serie

Prüf- körper	Ampli- tude [kN]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max} / f_c$	Zyklen- anzahl [N]	LN (N)
4	85	1.022	0.029	0.5277	0.48	182434	12.11
5	85	1.022	0.029	0.5277	0.48	2000000	14.50

### Drittes Spannungsniveau – Amplitude 120 kN

In der dritten Phase wurde die Amplitude auf 120 kN zu erhöht. Mit dieser neuen Amplitude wurden Ergebnisse erzielt, bei denen das Versagen deutlich früher eintrat (siehe Tabelle 18). Folglich wurde beschlossen, die Amplitude für die letzte Serie auf 102,5 kN zu reduzieren.

Tabelle 18. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, dritte Serie

Prüf- körper	Ampli- tude [kN]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max} / f_c$	Zyken- anzahl [N]	LN (N)
9	120	1.022	0.029	0.7329	0.67	193	5.26
10	120	1.022	0.029	0.7329	0.67	1936	7.56
11	120	1.022	0.029	0.7329	0.67	4850	8.48

### Viertes Spannungsniveau – Amplitude 102,5 kN

In der letzten Serie wurde die Amplitude schließlich mit 102,5 kN festgesetzt. Trotz der Verringerung der Amplitude um nur 17,5 kN ist in Tabelle 19 zu sehen, dass die Dauerfestigkeit viel größer ist und zweimal über zwei Millionen Zyklen erreicht werden konnten. Selbst bei der Prüfung, bei der diese Schwelle nicht erreicht wurde, ergab sich eine wesentlich höhere Anzahl ertragbarer Lastwechsel (148920) im Vergleich zu den Ergebnissen der vorherigen Serie.

Tabelle 19. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, vierte Serie

Prüf- körper	Ampli- tude [kN]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max} / f_c$	Zyken- anzahl [N]	LN (N)
6	102.5	1.022	0.029	0.6303	0.57	148920	11.91
7	102.5	1.022	0.029	0.6303	0.57	2000000	14.50
8	102.5	1.022	0.029	0.6303	0.57	2000000	14.50

## Wöhlerkurve (S-N-Kurve)

Die Wöhlerkurve, die in Abbildung 41 zu sehen ist, erhält man mittels einer exponentiellen Interpolationskurve. Die Kurve passt sich korrekt an und wird durch den Wert  $R^2 = 0,85$  dargestellt.

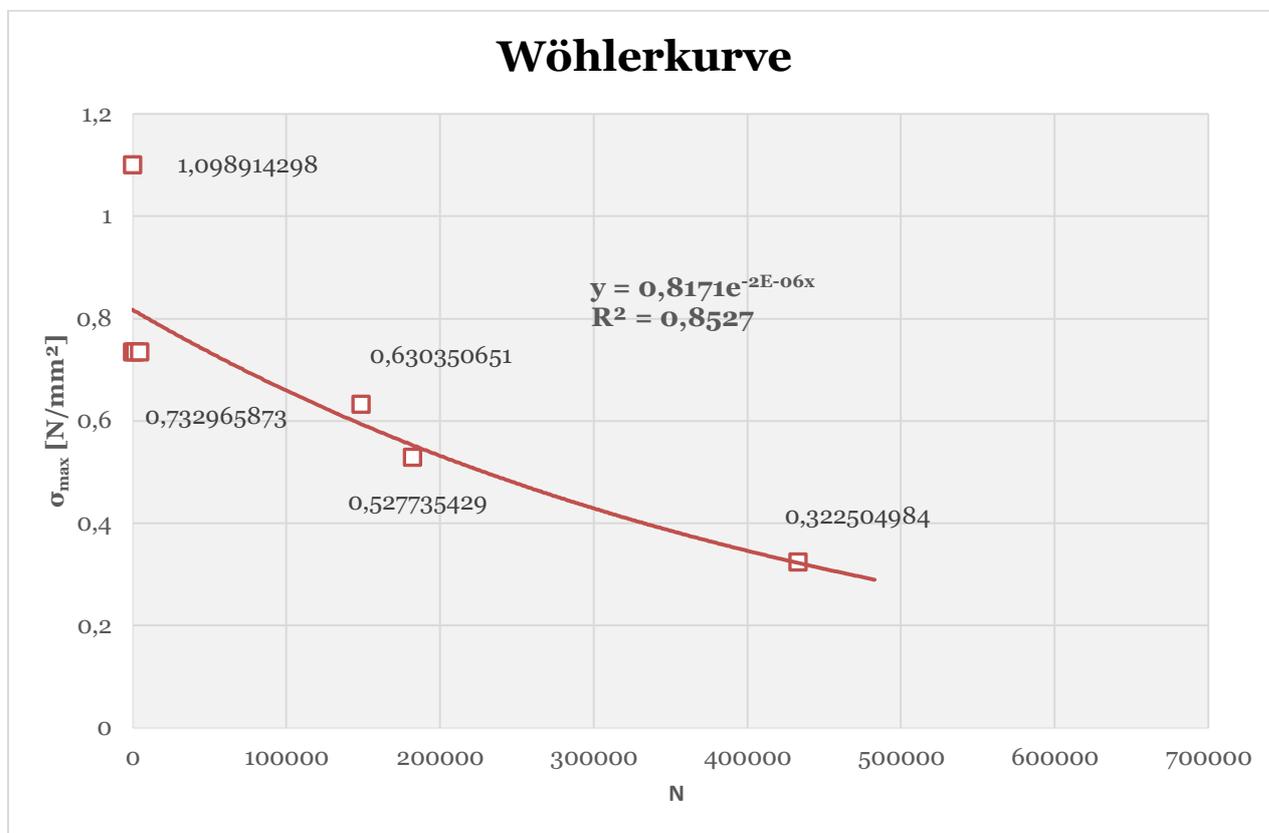


Abbildung 41. Wöhlerkurve

In der Literatur kann eine Vielzahl verschiedener Modelle zur Beschreibung der Ermüdungskurve von Beton gefunden werden [95][18][92][11]. Dabei werden in der Regel Probekörper in Form eines Biegeträgers mit wesentlich kleineren Abmessungen verwendet, wodurch eine größere Anzahl von Prüfungen durchgeführt werden kann. Dadurch ist es möglich, eine genauere probabilistische Analyse durchzuführen. In dieser Arbeit werden quadratische Platten mit den Abmessungen 1,0 x 1,0 x 0,2 verwendet. Die Herstellung dieser Probekörper ist zwar wesentlich aufwändiger, die Beanspruchung kann allerdings deutlich näher an der Realität abgebildet werden. Trotz dieser Unterschiede zeigt die in dieser Arbeit enthaltene Wöhlerkurve qualitativ und quantitativ große Ähnlichkeit zu in der Literatur beschriebenen Kurven.

## Entwicklung der Dehnungen an der Unterseite der Probekörper

Der Zweck der Verwendung von DMS war es, die Dehnungen an der Unterseite des Drainbetonkörpers zu messen. Diese Dehnungen liefern die notwendigen Informationen, um die Steifigkeit des Materials und seine Entwicklung im Laufe des Versuchs beurteilen zu können. Da die gewonnenen Dehnungen kleiner als die Messgenauigkeit der verwendeten DMS waren, wurden die gewonnenen Messwerte verworfen. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung der Steifigkeit aus der Durchbiegung ermittelt.

## Steifigkeitsabbau

Die Methode zur Bestimmung der Steifigkeit erfolgte durch Rückrechnung der Durchbiegung in der Mitte der Platte mithilfe der Kirchhoff-Plattentheorie, bei der die Durchbiegung vom E-Modul des Materials abhängig ist. Wie nachstehend zu sehen ist, wurde mit dem Erhalt der Durchbiegung die Gleichung gelöst:

$$y_{max} = \frac{-\alpha W b^2}{E t^3} \quad [\text{in mm}] [\text{nach [93]}] [7]$$

wo,

$y_{max}$ : Maximale Durchbiegung [in mm]

W: Maximal Kraft [in N]

$\alpha$ : Abmessungsfaktor, der gemäß der folgenden Tabelle erhalten wird:

$a/b$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	$\infty$
$\beta$	0.435	0.650	0.789	0.875	0.927	0.958	1.000
$\alpha$	0.1267	0.1478	0.1621	0.1715	0.1770	0.1805	0.1851

b: Breite [in mm]

E: Elastizitätsmodul [in N/mm<sup>2</sup>]

t: Dicke der Platte [in mm]

Daraus ergibt sich E zu:

$$E = \frac{-\alpha W b^2}{y_{max} t^3} \quad [\text{in N/mm}^2] [93][7]$$

Der anfängliche E-Modul ( $E_o$ ) wurde aus den 5% des Perzentil der ersten hundert Zyklen eines Versuchs berechnet. Dieser erste E-Modul wurde auch als Eingangsgröße für die Modellierung mittels der Finite-Elemente-Methode in Kapitel 6 verwendet, beträgt 11725 MPa. Die Tatsache, dass der für den Elastizitätsmodul erhaltene Wert niedriger als der in Tabelle 14 angegebene E-Modul ist, ist auf den „size-effekt“ zurückzuführen.

### 5.3.5 Inhomogenität des Drainbetons

Die erzielten Ergebnisse weisen große Abweichungen auf, die auf den großen Porenanteil und die dadurch verursachte Inhomogenität des Materials zurückzuführen ist. Dieser Porengehalt beeinflusst das mechanische Verhalten des Materials stark.

Der Porengehalt spiegelt sich in der Biegesteifigkeit wider. Daher besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Porenzahl und Elastizitätsmodul. Der Porengehalt ist jedoch nicht über den gesamten Querschnitt des Materials gleichmäßig verteilt. Die Verteilung der Poren kann von mehreren Faktoren abhängen, wie z. B. Ausführung, Materialzusammensetzung, Verdichtung etc.

Auch auf die Ermüdungsbeständigkeit kann der Porengehalt Einfluss nehmen. Teilweise treten Risse an der Unterseite der Probekörper in Bereichen mit großem Porenanteil lediglich im unteren Drittel der Probekörperhöhe auf, ohne dass diese bis an die Oberseite durchschlagen. Somit tritt im Ermüdungsversuch auch nach zwei Millionen Lastwechseln kein Versagen auf. Bei diesen Probekörpern kann ein bedingt durch die realitätsnahe Verdichtung mit der Rüttelplatte ein dichteres Gefüge in den oberen Bereichen festgestellt werden (siehe Abbildungen 42 und 43).

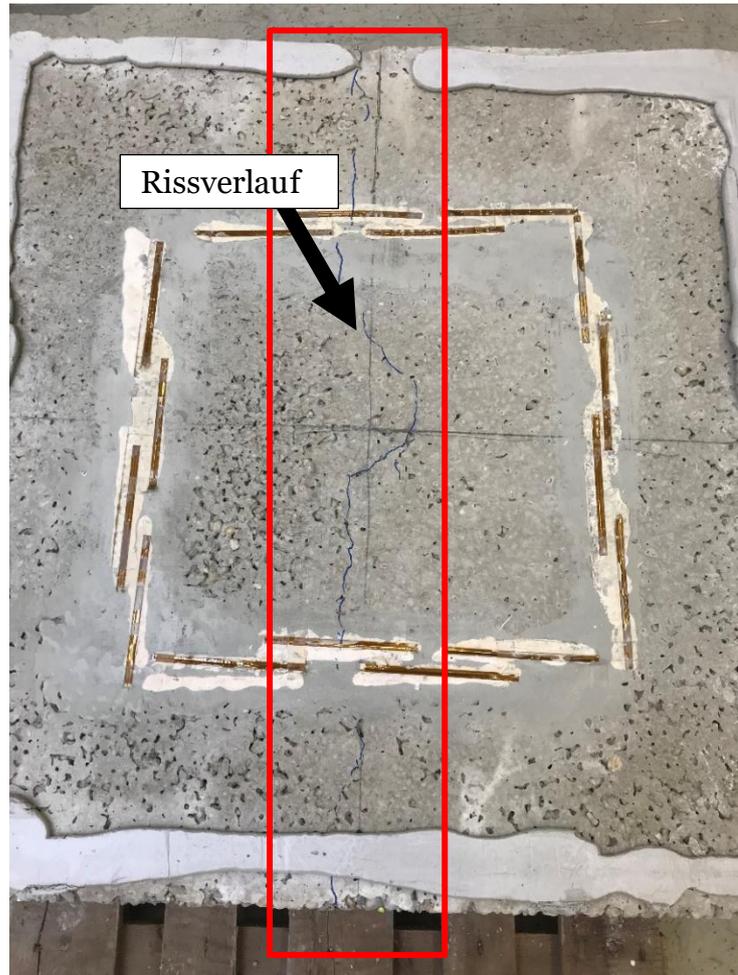


Abbildung 42. Riss in Versuchskörpernummer 8

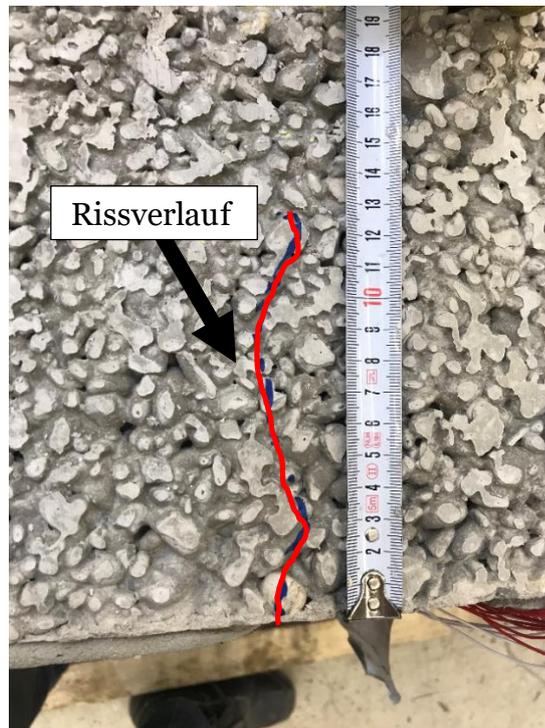


Abbildung 43. Tiefe der Risse in Versuchsnummer 8

Daher wurden die Probekörper entlang ihrer Höhe in zwei Querschnitte unterteilt, um die Verteilung in den verschiedenen Zonen zu analysieren. Dazu wurden Schwarz/Weiß-Bilder aufgenommen (siehe Abbildungen 44, 45 und 46), wobei die schwarzen Teile den Anteil der Poren darstellen, der mit einem MATLAB-Tool untersucht und der Prozentsatz der Poren auf dem Querschnitt bezogen berechnet wurde. Dabei ist zu beachten, dass lediglich Makroporen berücksichtigt werden können.

VK6_1_oben	2,64%
VK6_1_unten	3,30%
VK6_2_oben	1,45%
VK6_2_unten	1,81%
VK7_oben	1,25%
VK7_unten	2,02%

Tabelle 20. Prozentsatz der Porosität in verschiedenen Querschnitten

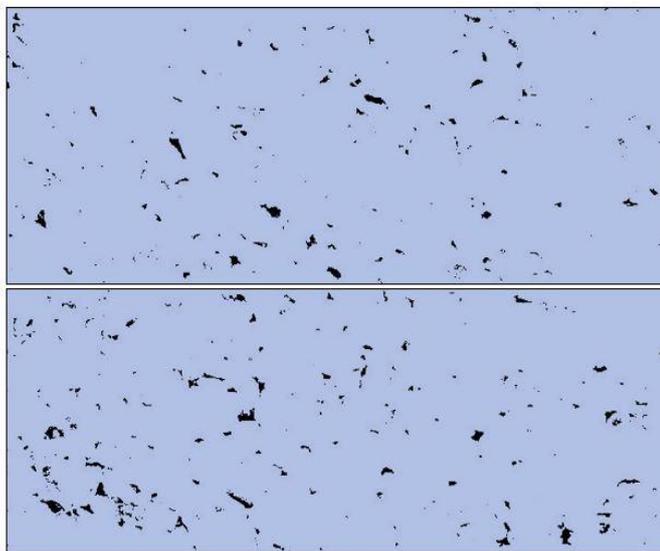


Abbildung 44. Makroporen im Querschnitt 7

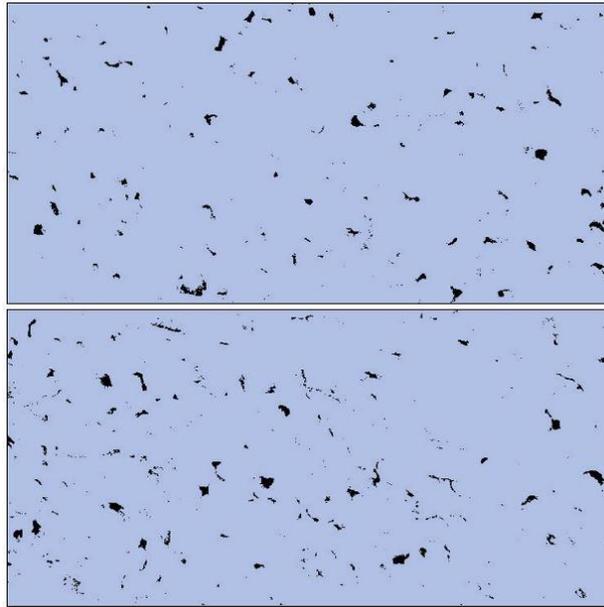


Abbildung 45. Makroporen im Querschnitt 6\_2

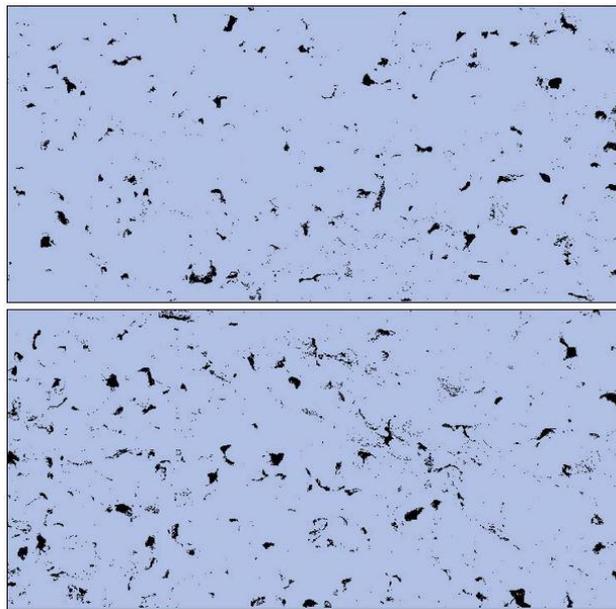


Abbildung 46. Makroporen im Querschnitt 6\_1

Aus der durchgeführten Analyse kann geschlossen werden, dass die Porosität im unteren Teil größer ist als im oberen Teil. Dadurch ist der Elastizitätsmodul in der unteren Hälfte geringer als in der oberen Hälfte. Als Reaktion auf das mechanische Verhalten von Drainbeton wird angenommen, dass Risse manchmal in der unteren Hälfte auftreten, ohne sich über die gesamte Höhe des Probekörpers zu erstrecken, da hierfür die Bruchenergie nicht ausreicht.

## 6 Struktursimulation

### 6.1 Simulationstool

Das Ziel der Erarbeitung eines Strukturmodells für die numerische Simulation ist es, das komplexe mechanische Verhalten der Pflasterbefestigungen zu untersuchen und zu bewerten. Dabei sollen drei Plattenformate in zwei Bauweisen (ungebundene, gebundene) miteinander verglichen werden.

Das für die Finite-Elemente-Analyse verwendete Modell ist in Abbildung 47 dargestellt. Hier werden die Randbedingungen und die Geometrie des Modells beschrieben. Die untersuchten Plattenformate sind 60 x 60 cm, 60 x 45 cm und 60 x 30 cm, wobei die Dicke der einzelnen Formate zwischen 8, 14 und 18 cm variiert wird (siehe Tabelle 21). Die mechanischen Eigenschaften der Betonpflasterdecke sowie die Interaktionen zwischen den Platten, d. h. das Verhalten der Fugen, wurden aus der Studie von [34] entnommen. Die Interaktion in den Fugen bei der ungebundenen Bauweise wird von [34] durch ein Kriterium der anisotropen Reibung in tangentialer Richtung und mit nichtlinearem Verhalten in der normalen Richtung beschrieben, während für die gebundene Bauweise ein kohäsives Verhalten angenommen wird. Nachdem alle Materialien, ihre Eigenschaften und Wechselwirkungen bestimmt wurden, wurde ein Netz aus finiten Elementen erstellt, dessen Größe durch Iteration erhalten wird.

Das Studienmodell ist ein komplexes Modell, da es eine große Anzahl an Elementen bzw. Interaktionen zwischen den verschiedenen Platten und zwischen den verschiedenen Schichten des Aufbaus.

Für jede der Konfigurationen wurde ein FE-Modell erstellt, wobei in jedem Modell die Abmessungen der Platten variiert wurden. Dies ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 21. Maße der Pflasterplatten

<b>Maße der Pflasterplatten (in cm)</b>		
60x60x8	60x60x14	60x60x18
60x40x8	60x40x14	60x40x18
60x30x8	60x30x14	60x30x14

Jedes Modell wurde als gebundene Bauweise oder als ungebundene Bauweise berechnet. Zusätzlich wurde für jede Bauweise die Tragfähigkeit der ungebundenen Tragschichten entsprechend des Jahreslaufs variiert und insgesamt vier verschiedene Perioden für jede Bauweise durchgeführt (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22. Perioden

Ungebundene Bauweise	Gebundene Bauweise
<b>Untergrund:</b> E-Modul=70MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=140MPa  <b>Untergrund:</b> E-Modul=100MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=200MPa	<b>Untergrund:</b> E-Modul=70MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=140MPa  <b>Untergrund:</b> E-Modul=100MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=200MPa
<b>Untergrund:</b> E-Modul=140MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=280MPa  <b>Untergrund:</b> E-Modul=280MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=560MPa	<b>Untergrund:</b> E-Modul=140MPa  <b>Ungebundene Untere Tragschicht:</b> E-Modul=280MPa  <b>Untergrund:</b> E-Modul=280MPa  <b>Untere Ungebundene Tragschicht:</b> E-Modul=560MPa

Insgesamt wurden 72 Simulationen durchgeführt (siehe Tabelle 23):

Tabelle 23. Modellvarianten

Plattengröße Dicke	60x60 cm	60x40 cm	60x30 cm
<b>8 cm</b>	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4
<b>14 cm</b>	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4
<b>18 cm</b>	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4	Ungebundene Bauweise x4 Gebundene Bauweise x4

## Geometrie des Modells

Das Finite-Elemente-Modell wurde so ausgearbeitet, dass es ein möglichst realitätsnahes Verhalten darstellt. Zu diesem Zweck wurde ein Modell von 6,00 x 6,00 m erstellt, wobei das Format und die Dicke der Platte für jede Bauweise variiert wurden.

Als maßgebliche Laststellung wurde die Plattenmitte untersucht (siehe Abbildung 47).

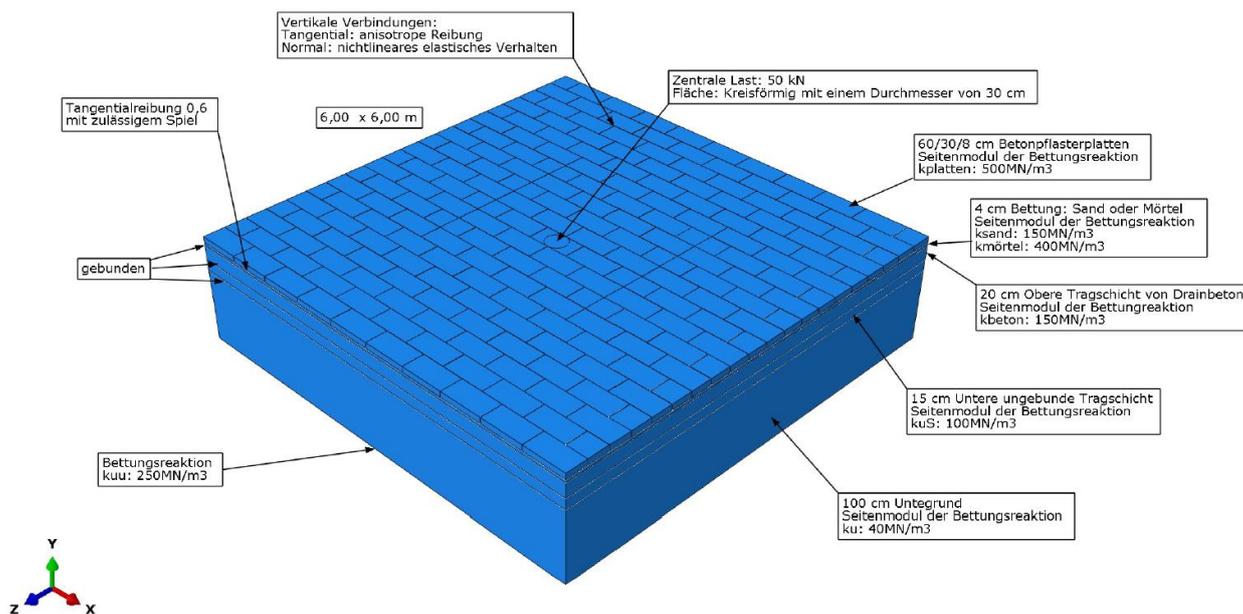


Abbildung 47. FE-Geometrie

## 6.2 Materialparameter

Es wurde linear elastisches Materialverhalten für alle Schichten angenommen.

### 6.2.1 Betonplatten

Die elastischen Eigenschaften der Betonpflasterplatten wurde wie folgt angenommen: Elastizitätsmodul,  $E=32000 \text{ N/mm}^2$ , Poissonzahl  $\nu=0,15$ . Das spezifische Gewicht des Betons beträgt  $\rho=24,0 \text{ kN/m}^3$ .

## 6.2.2 Bettung

### *Sandbettung*

Die elastischen Eigenschaften der Sandbettung wurden wie folgt angenommen: Elastizitätsmodul,  $E=350 \text{ N/mm}^2$ , Poissonzahl  $\nu = 0,30$ . Das spezifische Gewicht des Materials beträgt  $\rho = 18,0 \text{ kN/m}^3$ .

### *Mörtelbettung*

Die elastischen Eigenschaften der Mörtelbettung wurden wie folgt angenommen: Elastizitätsmodul,  $E=14000 \text{ N/mm}^2$ , Poissonzahl  $\nu = 0,15$ . Das spezifische Gewicht des Materials beträgt  $\rho = 18,0 \text{ kN/m}^3$ .

## 6.2.3 Obere Tragschicht-Drainbeton

Die elastischen Eigenschaften des Drainbetons wurden wie folgt angenommen: Ein Elastizitätsmodul,  $E=11725 \text{ N/mm}^2$ , erhalten aus der Ermüdungsversuche und eine Poissonzahl von  $\nu = 0,15$ . Das spezifische Gewicht des Materials beträgt  $\rho = 18,5 \text{ kN/m}^3$ .

## 6.2.4 Untere Tragschicht

Das spezifische Gewicht des Materials beträgt  $\rho = 18,0 \text{ kN/m}^3$ ; die Poissonzahl ist  $\nu = 0,35$ . Das Elastizitätsmodul variiert hingegen für jede der vier vorliegenden Perioden.

Tabelle 24. Periode der Unteren Tragschicht

Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4
$E= 140 \text{ N/mm}^2$	$E= 200 \text{ N/mm}^2$	$E= 280 \text{ N/mm}^2$	$E= 560 \text{ N/mm}^2$

## 6.2.5 Untergrund

Das spezifische Gewicht des Materials beträgt  $\rho = 16,0 \text{ kN/m}^3$ . Die Poissonzahl ist  $\nu = 0,40$ , während das Elastizitätsmodul für jede der vier vorliegenden Perioden abermals variiert.

Tabelle 25. Periode des Untergrundes

Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4
$E= 70 \text{ N/mm}^2$	$E= 100 \text{ N/mm}^2$	$E= 140 \text{ N/mm}^2$	$E= 280 \text{ N/mm}^2$

### 6.3 Interaktionen und Randbedingungen

Abhängig von der Größe und Form der Platten wird die Verteilung der Kräfte in der Struktur beeinflusst. Deshalb ist die genaue Definition der Fugen-Merkmale, sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung, unerlässlich. Diese Parameter wurden von [34] experimentell bestimmt und für die numerische Analyse verwendet.

#### *Ungebundene Bauweise*

Zwischen den Platten und der Sandbettung liegt ein Reibungskoeffizient von 0,6 vor. In normaler Richtung ist das Abheben der Pflastersteine erlaubt. Alle anderen Schichten wurden starr miteinander verbunden. Das Verhalten der Fuge wird von [34], gemäß den Parametern in Tabelle 26 beschrieben.

Tabelle 26. Normales Fugeverhalten laut Hengl, H.L. 2016. [34]

Verschiebung [mm]	$u_n$	Druck [MPa]	$\sigma_n$
-0.5		0	
0		0.0001	
0.05		0.15143	
0.1		0.35921	
0.15		0.62114	
0.2		1.30745	
0.25		1.73183	
0.3		1.73183	
0.35		2.21036	
0.4		2.74304	
0.45		3.32987	
0.5		3.97085	
0.55		4.66598	

#### *Gebundene Bauweise*

Im Fall der gebundenen Bauweise wurde die Interaktion zwischen den Platten und der Mörtelbettung mit Hilfe des Kohäsivzonenmodells beschrieben, in normaler Richtung ist das Anheben der Pflastersteine erlaubt. Die Interaktion in den Fugen zwischen den Platten wird mit dem gleichen Modell beschrieben. Alle anderen Schichten sind starr miteinander verbunden.

### *Randbedingungen*

Jede Schicht des Modells wird mit elastischer Bettung im Seitenbereich modelliert. Außerdem wird eine elastische Bettung am unteren Ende des Modells plus einer elastischen Bettung am unteren Ende des Modells angeordnet.

## **6.4 Belastung**

Bei der Belastung handelt es sich um eine Flächenlast mit einer Amplitude von 50 kN, die gleichmäßig auf einer kreisrunden Fläche mit einem Radius von 30 cm verteilt ist. Dies führt zu einem Druck von 0,707 N/mm<sup>2</sup>. Diese Last stellt die Bemessungslast dar und wirkt gleichzeitig mit dem Eigengewicht der Struktur.

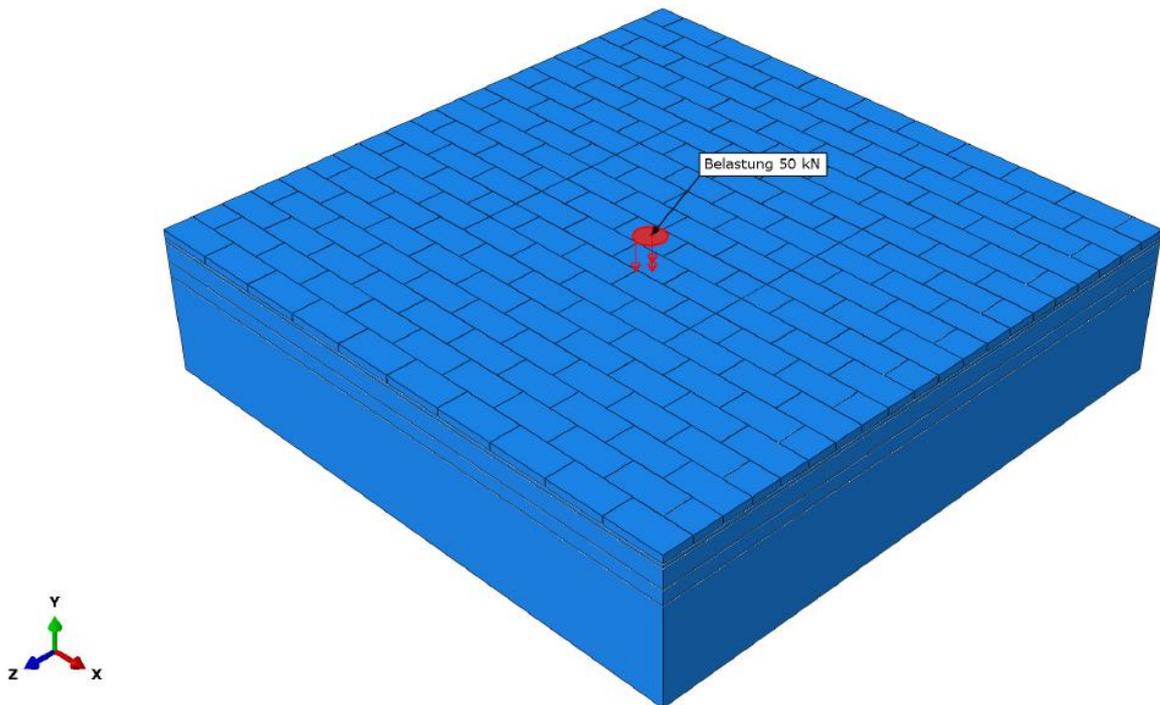


Abbildung 48. Belastung

## 6.5 Finite Elemente-Netz

Für die Berechnung wurde ein hexagonales Netz erstellt, das in mehrere Teilbereiche unterteilt wurde.

Die Partitionen wurden mit dem Ziel erstellt, die Genauigkeit der Berechnung im Bereich der Last mit einer größeren Anzahl von Elementen zu erhöhen. Im Außenbereich ist das Netz dagegen größer, um die Anzahl der Elemente und somit die Rechenzeit zu reduzieren.

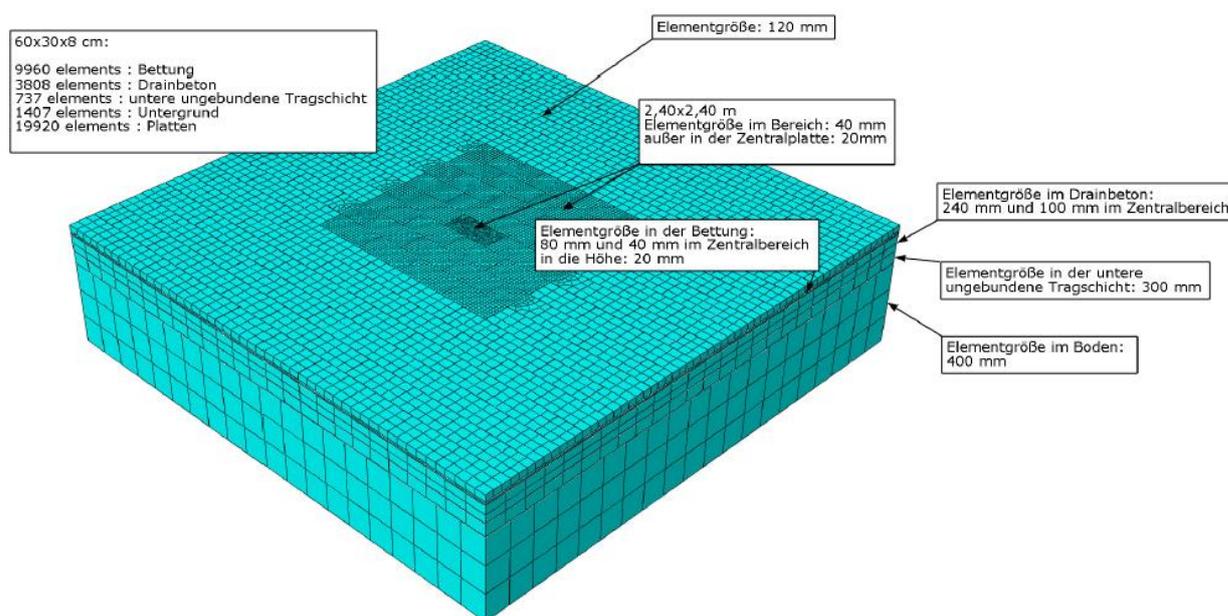


Abbildung 49. FE-Mesh

## 6.6 Ergebnisse

Nach Abschluss der Berechnungen der 72 Modelle wurden die erzielten Ergebnisse verglichen. Im Vergleich dazu wurden die verschiedenen maßgeblichen Spannungen in jeder Schicht analysiert, die nun im Folgenden näher erläutert werden.

### 6.6.1 Pflasterdecke

In dieser Schicht besteht die Pflasterdecke in der Regel aus Platten oder Steinen bzw. aus Beton oder Naturstein. Diese Materialien halten hohen Druckbelastungen stand, sind jedoch auf Zugbelastung anfällig. Daher sind die horizontalen Zugspannungen maßgebend. Diese Spannungen sind abhängig von der Art des Materials, aber auch von der Geometrie der Platten und den Wechselwirkungen zwischen den Fugen sowie mit den unteren Schichten.

Der Vergleich dieser Spannungen erfolgt getrennt zwischen der gebundenen und der ungebundenen Bauweise.

### Ungebundene Bauweise

In allen Fällen der ungebundenen Bauweise wird beobachtet, dass sich die maximalen horizontalen Zugspannungen an der Unterseite der Platte befinden, auf der die Last wirkt. Das Verhältnis der Zugspannung zur Plattendicke ist indirekt proportional, d. h. mit zunehmender Dicke nimmt die Zugspannung an der Unterseite der Platte ab:

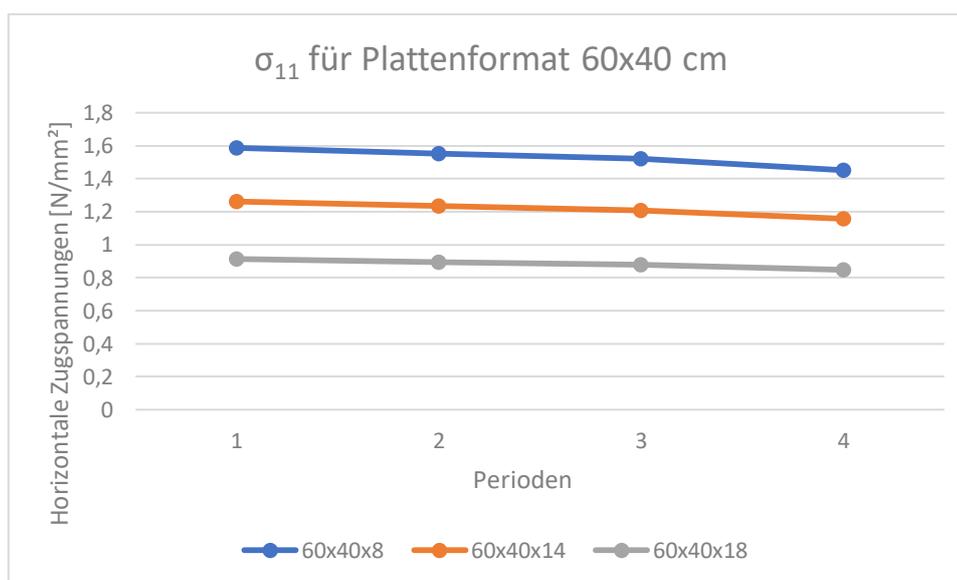


Abbildung 50. Vergleich horizontale Zugspannungen  $\sigma_{11}$  und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und ungebundene Bauweise

### Gebundene Bauweise

Bei der gebundenen Bauweise wurde eine Anomalie beobachtet – für die Plattendicke von 8 cm wurden die Zugspannungen nicht an der Unterseite der Platte beobachtet, auf die die Last aufgebracht wird.

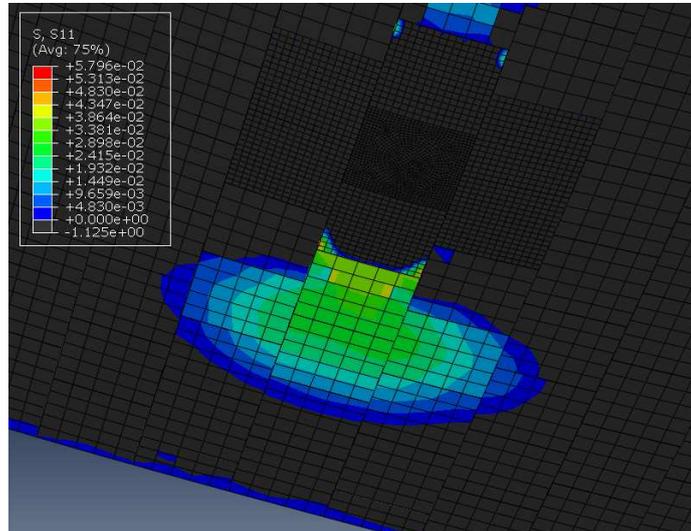


Abbildung 51. Horizontale Zugspannungsverteilung bei 8 cm Plattendicke für die gebundene Bauweise

Bei größeren Plattendicken steigen aufgrund der höheren Steifigkeit der Pflasterdecken die maßgebenden Zugspannungen an (siehe Abbildungen 51 und 52):

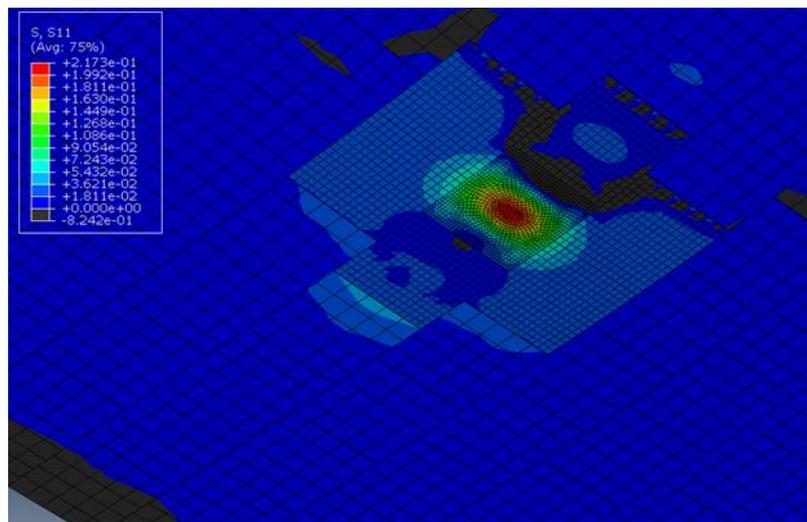


Abbildung 52. Horizontale Zugspannungsverteilung bei 18 cm Plattendicke für die gebundene Bauweise

Aufgrund der kohäsiven Wirkung von Fugen- und Bettungsmörtel wirkt der Aufbau bestehend aus Pflasterplatten, Bettung und Drainbetontragschicht als eine Verbundschicht. Daher wurden diese Pflasterplatten lediglich gering auf Zug beansprucht (siehe auch die Spannungsverteilung in Abbildung 54).

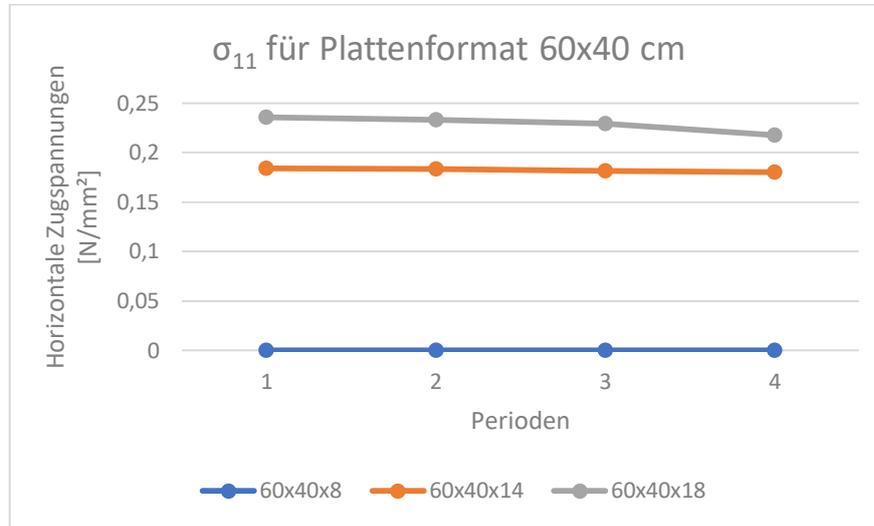


Abbildung 53. Vergleich horizontale Zugspannungen  $\sigma_{11}$  und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm für und gebundene Bauweise

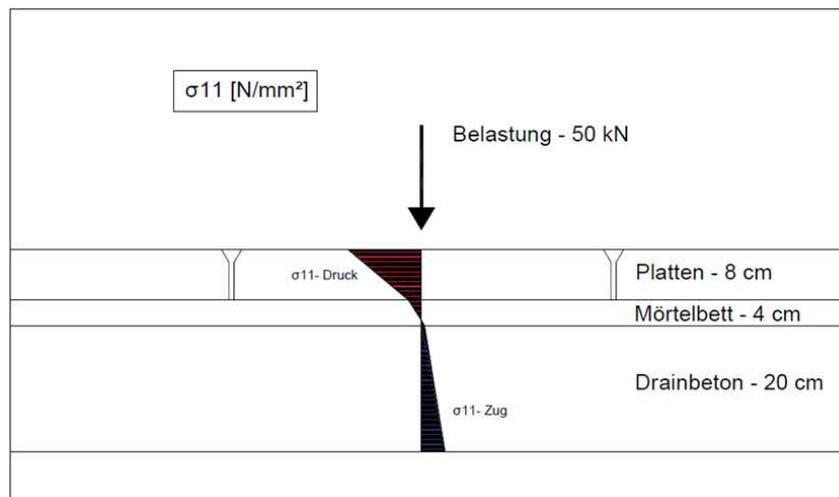


Abbildung 54. Spannungsverlauf bei 8 cm Plattendicke für die gebundene Bauweise

## Vergleich zwischen gebundener und ungebundener Bauweise

Beim Vergleich der Ergebnisse wurde festgestellt, dass die horizontalen Zugspannungen an der Unterseite der Pflasterplatten in der ungebundenen Bauweise viel höher als die in der gebundenen Bauweise sind.

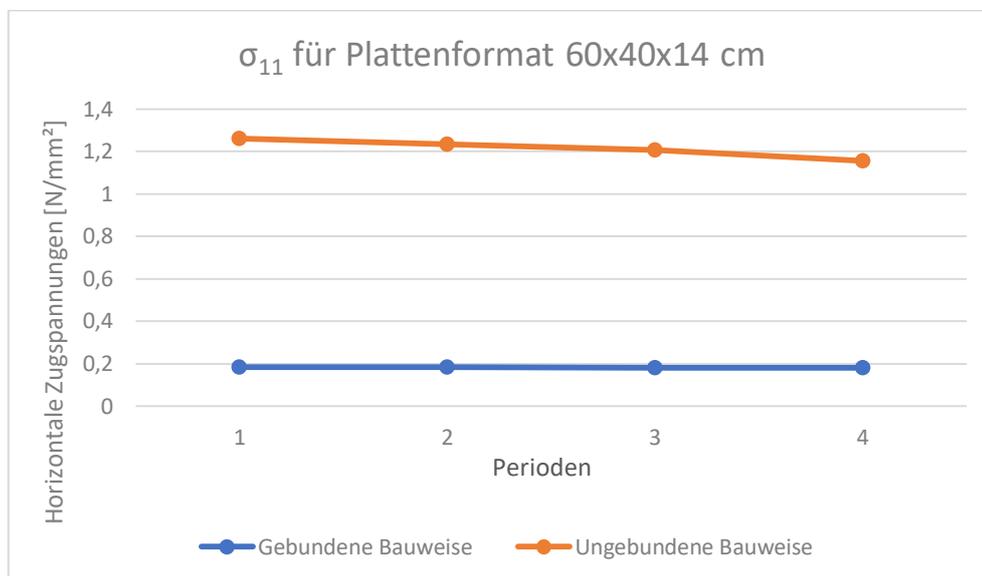


Abbildung 55. Vergleich der horizontalen Zugspannungen  $\sigma_{11}$  in den Platten zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm

### 6.6.2 Bettung

Die maßgebenden Spannungen in dieser Schicht für den analysierten Belastungszustand sind vertikale Druckspannungen, da diese Schicht für die Übertragung der Spannungen auf die unteren Schichten verantwortlich ist und wiederum die vertikalen Verformungen des Pflasters aufnehmen sollen. Die Beständigkeit gegen diese Belastungen hängt daher von der Art des verwendeten Materials ab.

#### *Ungebundene Bauweise*

Die Verformung der Pflasterplatten hängt stark von der Dicke der Platten ab. Daher sind die vertikalen Spannungen in der Bettung größer.

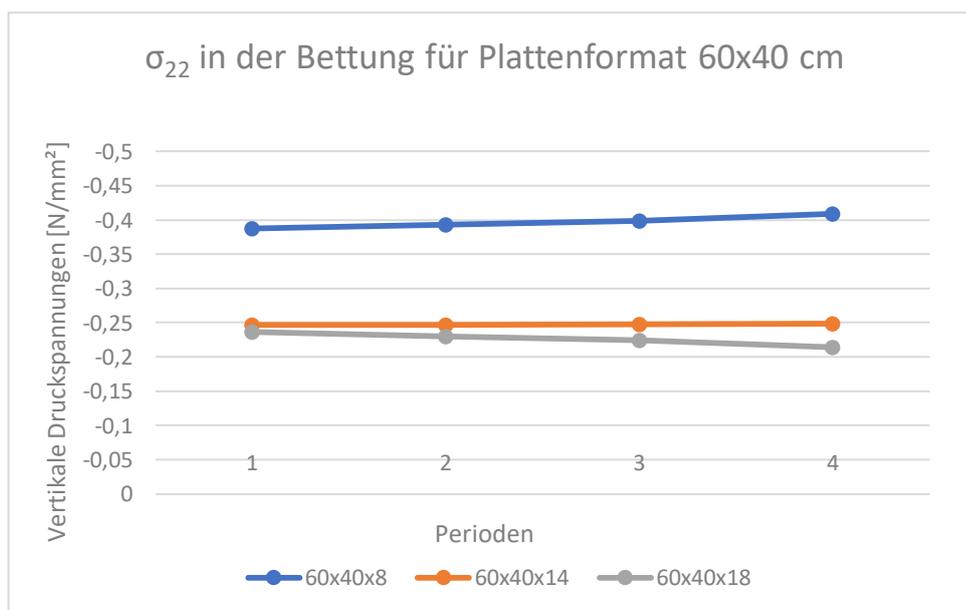


Abbildung 56. Vergleich der vertikale Druckspannungen  $\sigma_{22}$  und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und ungebundener Bauweise

### Gebundene Bauweise

Im Fall der gebundenen Bauweise ist das Verhältnis zwischen der Dicke der Platte und den Druckspannungen in der Bettung indirekt proportional. Je geringer die Dicke, desto größer die Spannungen.

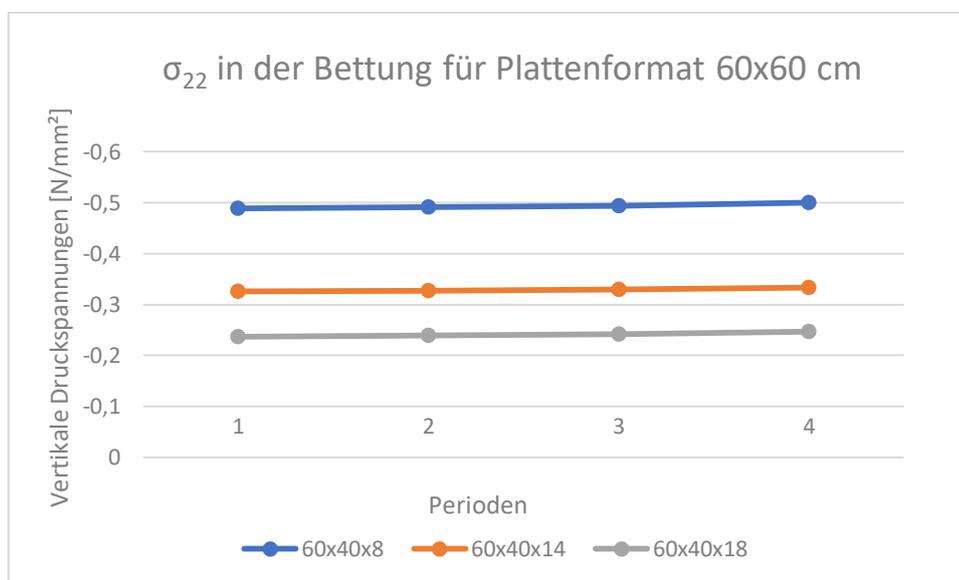


Abbildung 57. Vergleich der vertikalen Druckspannungen  $\sigma_{22}$  und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und gebundener Bauweise

## Vergleich zwischen gebundener und ungebundener Bauweise

Die Druckspannungen in der gebundenen Bauweise in der Bettungsschicht sind höher als in der ungebundenen Bauweise.

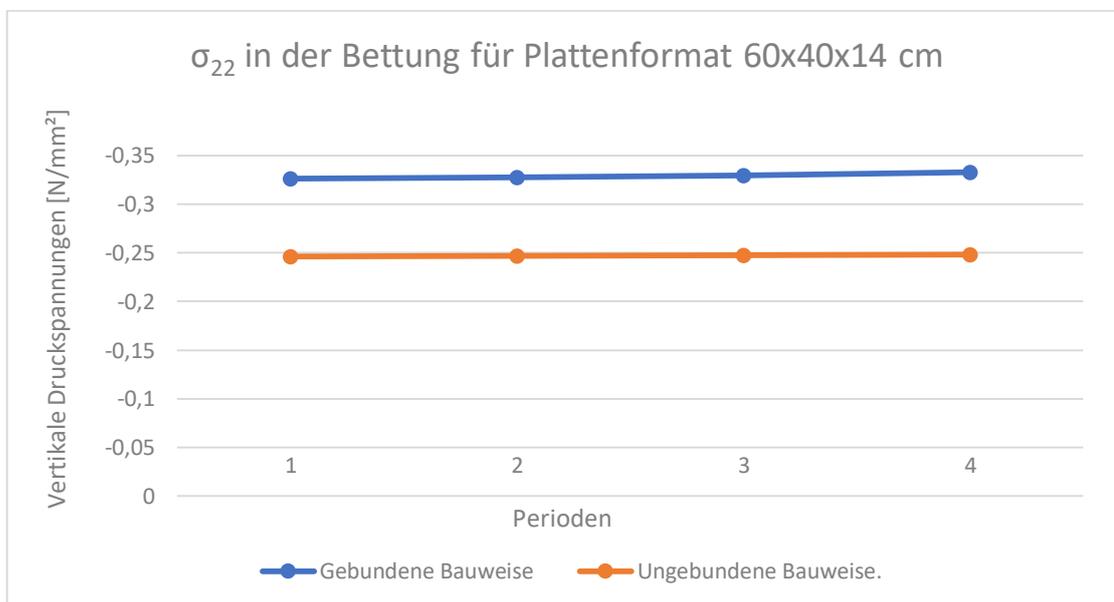


Abbildung 58. Vergleich der vertikalen Druckspannungen  $\sigma_{22}$  in der Bettungsschicht zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm

### 6.6.3 Obere Tragschicht – Drainbeton

In der Drainbetontragschicht treten maßgebliche Biegezugspannungen von der Unterseite der Schicht auf. Diese Zugspannungen sind ausnahmslos größer, wenn die Dicke der Platte kleiner ist.

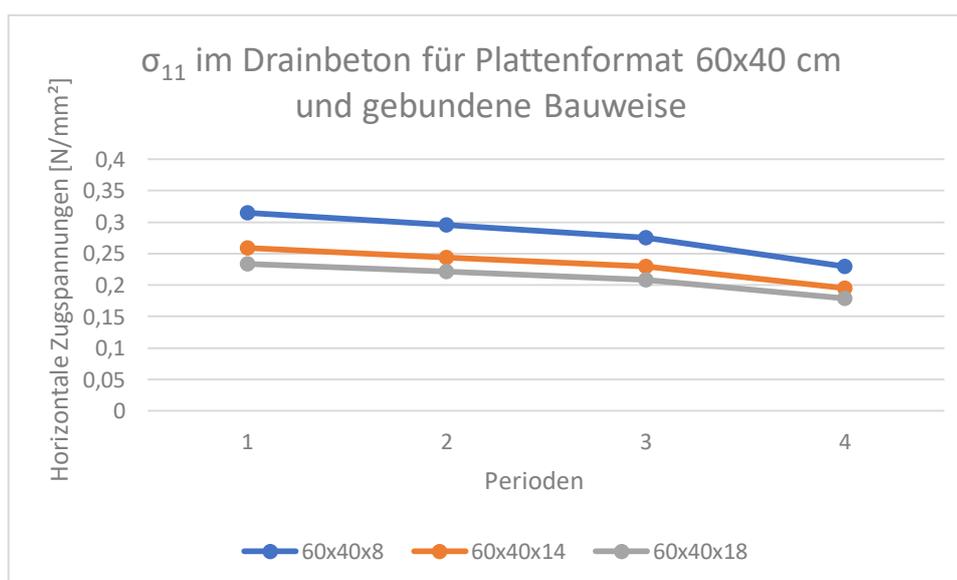


Abbildung 59. Vergleich der horizontalen Zugspannungen  $\sigma_{11}$  und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und gebundener Bauweise

Aufgrund des kohäsiven Verhaltens zwischen den Schichten sind die Biegezugspannungen in der gebundenen Bauweise kleiner (siehe Abbildung 60).

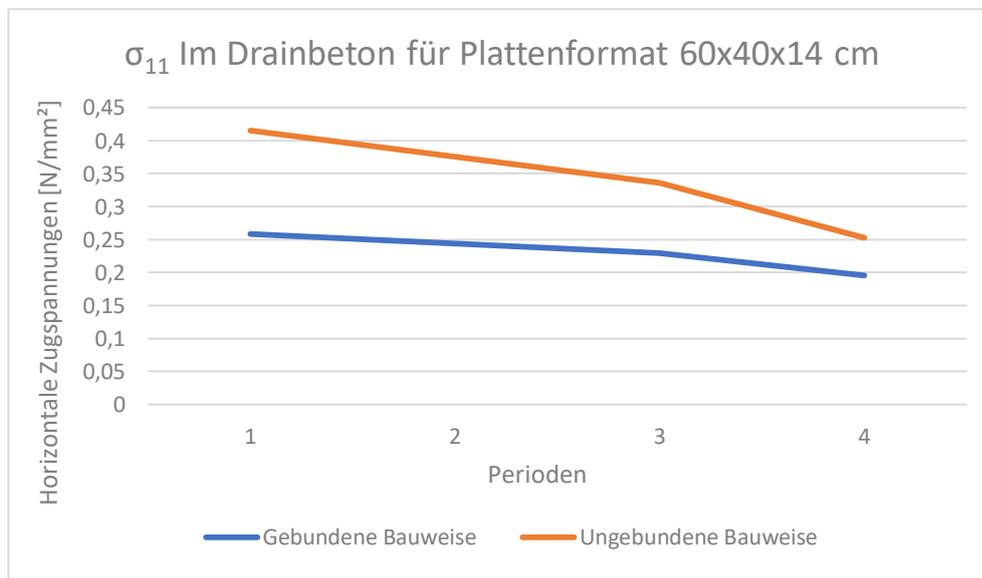


Abbildung 60. Vergleich der horizontalen Zugspannungen  $\sigma_{11}$  im Drainbeton zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm

#### 6.6.4 Verformungen in der unteren ungebundenen Tragschicht

Die vertikalen Verformungen an der Oberseite der unteren ungebundenen Tragschicht sind im Wesentlichen von der Dicke der Pflasterplatten unabhängig. Sie variieren allerdings sowohl mit der Bauweise als auch mit der Untergrundtragfähigkeit.

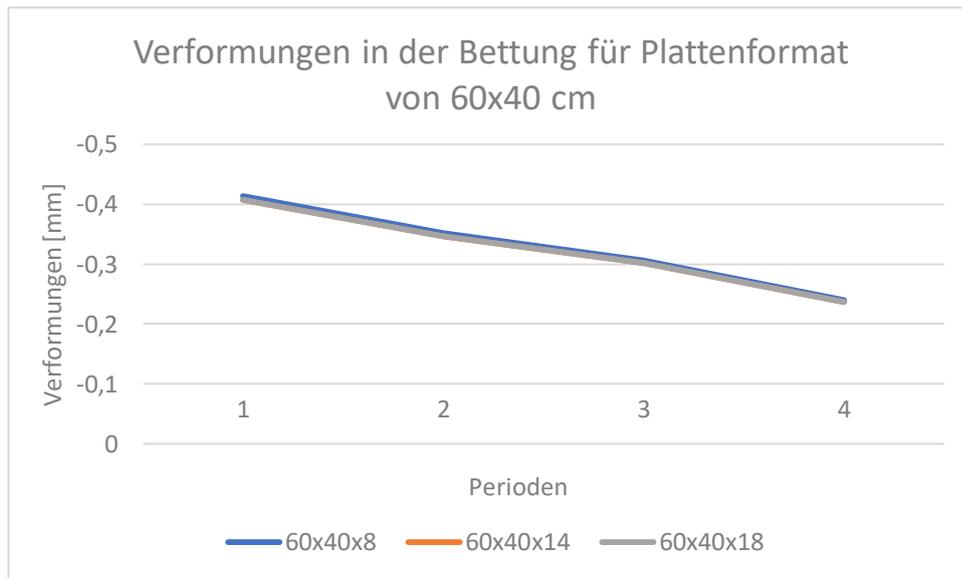


Abbildung 61. Vergleich der Verformungen und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und gebundener Bauweise

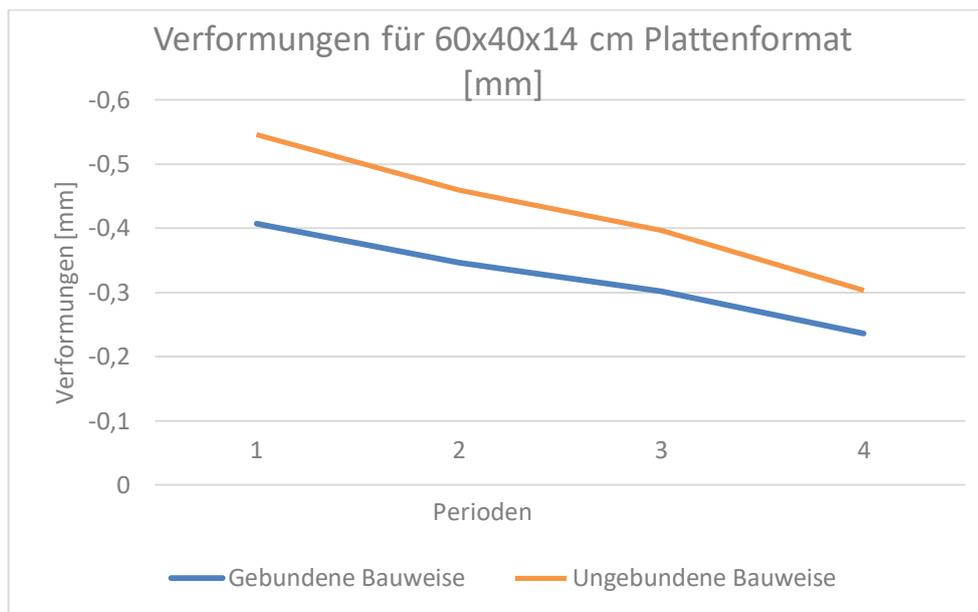


Abbildung 62. Vergleich der Verformungen in der Bettungsschicht zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Pflasterbefestigungen sind eine Variante, die große Vorteile bietet und deren Einsatz in den letzten Jahren erheblich gestiegen ist. Um ihre Gebrauchsdauer zu verbessern und ihre Nutzung zu optimieren, ist es unerlässlich, das mechanische Verhalten und die Funktion jeder Schicht des Systems zu kennen. Das Ziel ist es, eine stabile Oberfläche zu erhalten, die mit der Zeit Bestand hat. Daher ist es von entscheidender Bedeutung das Verhalten gegenüber den Verkehrsbelastungen über ihre Lebensdauer zu kennen. Es gibt ein großes Spektrum an Plattenformaten, -dicken und -materialien. Aber auch die Oberbauschichten können Veränderungen erfahren, die nicht nur die Variation der Pflaster, sondern auch die Verwendung anderer Materialien beinhalten. Drainbeton bietet als obere Tragschicht eine Reihe von Vorteilen aufgrund seiner hohen Tragfähigkeit und der Fähigkeit, Wasser abzuführen. In der vorliegenden Masterarbeit wurde der Fokus auf Aufbauten mit Drainbetontragschicht gelegt. Pflasterdrainbeton wurde auf die zyklische Langzeitbeanspruchung geprüft. Zum anderen wurde das Strukturverhalten eines solchen Aufbaus mit Hilfe einer numerischen Simulation analysiert. Diese numerische Simulation mit der Finite-Elemente-Methode ermöglicht die Untersuchung des Strukturverhaltens einer großen Anzahl von Varianten.

### Materialuntersuchungen

Die vorliegende Studie schlägt eine alternative Methode zur Analyse des Ermüdungsverhaltens von durchlässigen Betonplatten vor. Dazu werden Ermüdungsbiegeversuche durchgeführt. Die Ermüdungsbeständigkeit wird bei verschiedenen Spannungsniveaus bestimmt, um Wöhlerkurven (S-N-Kurven) zu erhalten. Ebenso hängt der Verlust der Steifigkeit des Materials mit dem Grad der Schädigung im Verlauf der Prüfung zusammen. Abschließend können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Drainbeton ist ein sehr inhomogener Werkstoff, was sich in der Streuung der Ergebnisse widerspiegelt. Wie empirisch nachgewiesen wurde, ist der Anteil der Porenanteile nicht an allen Stellen gleich, auch wenn die Proben in einem Block hergestellt wurden.
- Zur Beurteilung der Ermüdungslebensdauer des Werkstoffs wird eine S-N-Kurve erstellt, die die Höhe der Spannung (S) mit der Anzahl der Zyklen (N) in Beziehung setzt. Die S-N-Kurve wird mittels einer Iterationskurve aus den gültigen Ergebnissen gewonnen.
- Die Anfangssteifigkeit des Materials ist deutlich kleiner als Ergebnisse, die in den Prüfkörpern aus dem Feld erzielt wurden, da dies auf den size-effekt zusammen mit anderen Faktoren zurückzuführen ist.
- In dieser Studie wird beobachtet, wie die Steifigkeit während des Ermüdungstests abnimmt. Diese Abnahme der Steifigkeit wird genutzt, um den Grad der Schädigung des Materials zu bestimmen.

## Struktursimulation

Ein numerisches Modell stellt eine analytische Methode zur Verfügung, mit der die Verformung der Fahrbahn und die Spannungen unter Verkehrslasten ermittelt werden können. Pflasterbefestigungen sind komplexe Konstruktionen, bei denen es nicht einfach ist, ihr Verhalten zu beschreiben. Diese Komplexität ist auf die Schwierigkeit zurückzuführen, die Interaktion zwischen den Pflasterplatten zu definieren, so dass ihr Verhalten der Realität nahe kommt. Zum einen wurden die Interaktionen und Randbedingungen aus früheren Studien übernommen. Zum anderen werden die Materialien auf der Grundlage von Materialparametern definiert, die aus der Literatur und aus Labortests gewonnen werden. Wie zum Beispiel der Drainbeton-Ermüdungstest, bei dem der Elastizitätsmodul ermittelt und dann zur Simulation verwendet wird. Bei der Auswertung der erzielten Ergebnisse lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Das Simulationswerkzeug ermöglicht die Analyse von gebundener und ungebundener Bauweise. Sie erlaubt es auch, den Einfluss des Formats und der Dicke der Platte auf das Strukturverhalten zu differenzieren.
- Die maßgeblichen Zugspannungen in den Platten sind von der Art der Konstruktion abhängig. Bei ungebundener Bauweise sind die Spannungen bei kleinen Plattendicken höher. In gebundener Bauweise hingegen wirkt der Aufbau als Verbundquerschnitt und die Spannungen in den Pflasterplatten sind niedriger.
- Die obere Tragschicht besteht aus Drainbeton, wo die maßgebende Spannungen Zugspannungen sind. Diese Zugspannungen sind ausnahmslos größer, wenn die Dicke der Platte kleiner ist. In gebundener Bauweise sind die Zugspannungen kleiner als in ungebundener Bauweise.
- Die vertikalen Verformungen zeigen keine großen Unterschiede, wenn die Plattendicke variiert wird, während die Variation der Untergrundtragfähigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Verformbarkeit des Bauwerks hat.
- Das Plattenformat beeinflusst hauptsächlich die Art und Weise, wie sich die Platte verformt. Am optimalsten sind quadratische Plattenformate, bei denen die Biegespannungen geringer sind.

Schließlich ist es dank der aus den Simulationen gewonnenen Ergebnisse möglich, das Strukturverhalten unter Verkehrslast besser zu verstehen. Zudem werden die Ergebnisse der Materialversuche über die Materialparameter in die Simulation integriert. Auf diese Weise werden experimentelle Tests mit analytischen Modellen zusammengeführt, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten.

## Literaturverzeichnis

- [1] „Civilgeeks,“ [Online]. Available: <https://civilgeeks.com/2014/07/11/historia-de-los-adoquines/>. Los adoquines en la historia.
- [2] „EHL,“ [Online]. Available: [https://www.ehl.de/download/technische-hinweise/EHL-Katalog\\_2016-2017\\_TechHinweise.pdf](https://www.ehl.de/download/technische-hinweise/EHL-Katalog_2016-2017_TechHinweise.pdf).
- [3] „Matworks“ [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/images/>
- [4] „Mroczek Betonwerk“ [Online]. Available: <http://www.mroczek-betonwerk.de/html/arbeitsanweisung.html>.
- [5] „Pflasterbau-Müller,“ [Online]. Available: <https://www.pflasterbau-mueller.de/ver.htm>.
- [6] „Plechinger Bau,“ [Online]. Available: <http://www.plechingerbau.de/bauwesen/pflasterkunde.html>.
- [7] „Steine Giesing,“ [Online]. Available: <https://www.steine-giesing.de/beton.html>.
- [8] „Wohbeton,“ [Online]. Available: [http://www.wohnbeton.at/Seiten/wohnbauelemente/o8\\_aussenanlagen/o8\\_1\\_flaechenbefestigung.asp](http://www.wohnbeton.at/Seiten/wohnbauelemente/o8_aussenanlagen/o8_1_flaechenbefestigung.asp).
- [9] Abolfazl, H., Mohammad, S., (2008) Seepage Analysis of Interlocking Concrete Block Pavements, *Road Materials and Pavement Design*, 9:2, 311-321, DOI: 10.1080/14680629.2008.9690119
- [10] Alam, A et al., (2013). Three-dimensional finite element modeling of pervious concrete pavement: Vertical porosity distribution. *International Journal of Research in Engineering and Technology* eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308.
- [11] AlShareedah, O., Nassiri, S., Dolan, J.D., (2019). Pervious concrete under flexural fatigue loading: Performance evaluation and model development, *Construction and Building Materials* 207 17–27, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.111> 0950-0618.
- [12] Ascher, D., Lerch, T., Oeser, M., & Wellner, F. (2006, November). 3D-FEM simulation of concrete block pavements. In *Proc. 8th Int. Conf. on Concrete Block Paving* (pp. 457-465).
- [13] Bayraktarova, K., (2014). Berücksichtigung der Ermüdung von Straßenoberbaubetonen bei der Dimensionierung von Betonfahrbahnen (Master thesis). TU Wien.
- [14] Blab, R., (2008). Konzeption hoch belasteter Verkehrsflächen mit Pflasterstein- oder Pflasterplattendecken – Planung und Dimensionierung. Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien.
- [15] Blab, R., (2019) Strassenwesen. Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien.
- [16] Burmister, D. M., Palmer, L. A., Barber, E. S., & Middlebrooks, T. A. (1944). The theory of stress and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. In *Highway Research Board Proceedings* (Vol. 23).

- [17] Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons.
- [18] Chandrappa, A.K., Biligiri, K.P., (2017). Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development, *Construction and Building Materials* 153 1–15., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.081>.
- [19] Chen, X., L. Ge, L., Zhou, J., Wu, L.S., (2017). Dynamic Brazilian test of concrete using split Hopkinson pressure bar, *Mater. Struct.* 50 (1) 1–15, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0885-6>.
- [20] Clifford, J.M. (1984). *Some aspects of the structural design of segmental block pavements in southern Africa*. University of Pretoria.
- [21] *Concrete Segmental Pavements – Design Guide for Residential Accessways and Roads*, (2014). Concrete Masonry Association of Australia.
- [22] Do, M. T., Chaallal, O., & Aïtcin, P. C. (1993). Fatigue behavior of high-performance concrete. *Journal of Materials in civil Engineering*, 5(1), 96–111.
- [23] Do, M.T., Chaallal, O., Aïtcin, P.C., (1993). Fatigue behavior of high-performance concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 5 (1) 96–111, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:1\(96\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:1(96)), 96–111.
- [24] Echavegeren, T., (2019). *Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigon*.
- [25] EN 1338 Pflastersteine aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren, 01.09.2003.
- [26] EN 1339 Platten aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren, 01.09.2003.
- [27] EN 1340 Bordsteine aus Beton, 01.09.2003.
- [28] EN 1341 Pflasterplatten aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren, 01.05.2005.
- [29] EN 1342 Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren, 01.05.2005.
- [30] EN 1343 Bordsteine aus Naturstein für Außenbereiche, 01.05.2005.
- [31] EN 1344 Pflasterziegel - Anforderungen und Prüfverfahren, 01.03.2007.
- [32] Fangping, L., Zhou, J., (2017). *Research on Fatigue Strain and Fatigue Modulus of Concrete*. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University.
- [33] Fehlmann, P. und Vogel, T. (2009). *Versuche zur Ermüdungsfestigkeit alter Betonstähle, Beton- und Stahlbetonbau*, Vol. 104, No. 7, pp. 416-423.
- [34] Hengl, H.L., (2017). *Development and application of numerical simulation tools for the prediction of the structural behaviour of paving block pavements*. (Dissertation) Technische Universität Wien.
- [35] Hohberg, R., (2010). *Zum Ermüdungsverhalten von Beton* (doctoral thesis), TU Berlin, 65 pp.
- [36] Holmen J.O. (1982). *Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading* ACI Spec. Publ. 75.

- [37] Holmen, J.O. (1984), Fatigue Design Evaluation of Offshore Concrete Structures, *Materials and Structures*, Vol. 17, No. 97, pp. 39-42.
- [38] Hordijk, D. A. (1993). Local approach to fatigue of concrete.
- [39] Hristova, P. (2009). Durchlässige Pflasterdecken Einsatzbedingungen und Anwendungsmöglichkeiten in Österreich. (Diplomarbeit) Technische Universität Wien.
- [40] Hümme, J., von der, Haar, C., Lohaus, L. and Marx, S. (2016), Fatigue behaviour of a normal-strength concrete – number of cycles to failure and strain development. *Structural Concrete*, 17: 637-645. doi:10.1002/suco.201500139.
- [41] Huurman, M., (1997). Permanent deformation in concrete block pavements.
- [42] IMCYC, (2015). Las posibilidades del concreto.
- [43] Josa, A. et al., (1995). Estudio experimental y analisis structural de hormigones porosos para capas de rodadura de pavimentos de hormigón, NUM 77 Revista técnica de la asociacion española de la carretera.
- [44] Keller, T.; Menn, C., (1991). Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- [45] Klausen, D. (1978). Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung.
- [46] Knapton, J, Barber, S.D., UK research into concrete block pavement design.
- [47] Knapton. J, (1998). Research into the structural performance of interlocking block pavement.
- [48] Litzka, J, 2001. Anleitung Verkehrsflächen mit Betonpflastersteinen. Ebenseer Beton, Wien 2001.
- [49] Maheshwari, A; Ichimaru, S; Bolander J.E. (2015). Characterization of fatigue properties of porous concrete.
- [50] Manual de Diseno de pavimentos de adoquines de hormigon 2013, Instituto de Cemento y del hormigon de Chile.
- [51] Manual Técnico para la correcta colocación de los Euroadoquines. Euroadoquín (2004). Asociacion para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón.
- [52] Medeiros, X. Zhang, G. Ruiz, et al., (2015). Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete, *Int. J. Fatigue* 70 342–350, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.005>.
- [53] Mladenov, A. (2015). Bewertung der Filterstabilität von Bettungs- und Fugenmaterial bei Pflasterungen. (Diplomarbeit) Technische Universität Wien.
- [54] Moharana, S., Behera, J.P., Studies on water permeable concrete by utilizing low density aggregates.

- [55] Neithalath, N. (2004). Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials. (Dissertation) Purdue University.
- [56] Nishizawa, T. (2003). A tool for structural analysis of block pavements based on 3DFEM. Ishikawa National College of Technology.
- [57] Nuxoll, F., (1998). Simulation dynamischer Verformungs- und Ribßbildungsprozesse im Betongefüge. Dissertation Ruhr-Universität Bochum,
- [58] Obla, K. H. Pervious concrete—An overview. Indian Concrete Journal, 84(8), 9.S Moharana, J P Behera.
- [59] Oneschkow, N., (2016). Fatigue behaviour of high-strength concrete with respect to strain and stiffness, Int. J. Fatigue 87 38–49, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.01.008>.
- [60] ÖNORM B 2213 Steinmetz- und Kunststeinarbeiten – Werkvertragsnorm, 01.05.2003.
- [61] ÖNORM B 2214: Pflasterarbeiten – Werkvertragsnorm (Verfahrens- und Vertragsbestimmungen für die Ausführung von Pflasterdecke), 1.12.2005
- [62] ÖNORM B 3108 Natürliche Gesteine – Einfassungs- und Pflastersteine – Abmessungen, 01.05.2001.
- [63] ÖNORM B 3118 Natürliche Gesteine – Einfassungssteine, Pflastersteine und Pflasterplatten – Anforderungen an die Gesteinseigenschaften (nationale Übernahme der EN 1341–43), 01.09.2005.
- [64] ÖNORM B 3132 Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau.
- [65] ÖNORM B 3256 Randsteine aus Beton, 01.02.2005.
- [66] ÖNORM B 3258 Vorgefertigte Betonerzeugnisse zur Befestigung von Verkehrsflächen, 01.02.2005.
- [67] ÖNORM B 3306 Prüfung der Frost-, Tausalzbeständigkeit von vorgefertigten Betonerzeugnissen, 01.12.2005.
- [68] ÖNORM B 4710 – Teil 1 (ÖNORM EN 206-1)- Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1)- Qualitätssicherung, Pflasterarbeiten, 1.04.2004
- [69] Petkovic, G. (1993). Properties of concrete related to fatigue damage with emphasis on high-strength concrete.
- [70] Rebollo, J., Bulté, H. C. (2014). Estudio Númerico del Comportamiento en fatiga del hormigón.
- [71] Richtlinie» Pflege und Wartung von Pflasterflächen« Ausgabe 01.12.2016 FQP.
- [72] Rossi, P., (1991). A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high,. Materials and Structures, Paris, Springer, 1991, pp. 422- 424.
- [73] RVS 03.08.63 – Oberbaubemessung, Ausgabe 04.2008.
- [74] RVS 04.04.11- Gewässerschutz an Straßen, Ausgabe 11.2002.
- [75] RVS 08.03.01 – Technische Vorschriften und Anleitung für Erdarbeiten, Ausgabe 11.1979.
- [76] RVS 08.15.01 – ungebundene Tragschichten, Ausgabe 2004/08.

- [77] RVS 08.18.01 - Technische Vertragsbedingungen für Straßenbauten; Deckenarbeiten; Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen, Entwurf 10.2008.
- [78] Schwabach, E., (2005), Verformungs- und Degradationsverhalten von niederzyklisch uniaxial druckbeanspruchtem Beton (doctoral thesis), University of Weimar.
- [79] Shackel, B. Lim, D.O.O., (2003). Mechanisms of paver interlock.
- [80] Shackel, B.: An Experimental Investigation of the Roles of the Bedding and Jointing Sands in the Performance Interlocking Concrete Block Pavements, Concrete/ Beton, No. 19, 1980.
- [81] Shackel, B.: Handbuch Betonsteinpflaster, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [82] Shafabakhsh, G.A., Family, A.,
- [83] Shah, S. P. (1984). Predictions of cumulative damage for concrete and reinforced concrete. *Matériaux et Construction*, 17(1), 65-68.
- [84] Smith, D. (2006). Permeable interlocking concrete pavements. ICPI.
- [85] Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Roads and Parking Lots (2006). ICPI Tech Spec No. 4 Interlocking Concrete Pavement Institute.
- [86] Taylor, D. W. (1948). Fundamentals of soil mechanics (Vol. 66, No. 2, p. 161). LWW.
- [87] Thiele, M., (2016). Experimentelle Untersuchung und Analyse der Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen. (Dissertation) Technische Universität Berlin.
- [88] Trunk, B. & Wittmann, Folker. (2001). Influence of size on fracture energy of concrete. *Materials and Structures*. 34. 260-265. 10.1007/BF02482204.
- [89] Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke (VÖB). Forum Qualitätspflaster - Broschüre Vor(ur)teile- Pflastersysteme aus Betonsteinen 06/2008, <http://www.fqp.at>
- [90] Villanueva, J., (2015). Estudio comparado de los métodos analíticos de dimensionamiento de los firmes y su evolución.
- [91] Weigler, H., (1980). Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung,“ in Technisch-wissenschaftliche Zement-Tagung, Hannover.
- [92] X. Chen, J. Bu, X. Fan, J. Lu, L. Xu, (2017). Effect of loading frequency and stress level on low cycle fatigue behavior of plain concrete in direct tension. *Construction and Building Materials* 133 (2017) 367–375, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.085>.
- [93] Young, W., Budynas, R., (2002). Roark's Formulas for Stress and Strain. McGraw-Hill.
- [94] Zanuy, C., Albajar, L., de la Fuente, P., (2010). The fatigue process of concrete and its structural influence. Universidad Politécnica de Madrid.
- [95] Zhou, J., Zheng, M., Wang, Q., Yang, J., Lin, T., (2016). Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates,

Construction and Building Materials 124 897–905,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.136> 0950-0618.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Befestigung mit Pflaster .....	11
Abbildung 2. Klassifikation der Verbundpflastersteinformen laut Shackel, B. [81][24] .....	16
Abbildung 3. Verbandsarten von Pflastersteindecken nach RVS 08.18.01 [77] .....	18
Abbildung 4. Verbandsarten von Pflasterplattendecken nach RVS 08.18.01 [77] .....	19
Abbildung 5. Verbandsarten in Abhängigkeit von Steinform und -größe nach RVS 08.18.01 [77] .....	20
Abbildung 6. Verzahnung Vertikal, Horizontal und Drehung [46] .....	21
Abbildung 7. Glatte Pflastersteine [79] .....	22
Abbildung 8. Unregelmäßige Pflastersteine [79] .....	22
Abbildung 9. Drehung in einem Pflasterstein oder einer Platte durch die Wirkung des Straßenverkehrs [51] .....	23
Abbildung 10. Rotationseffekt auf verlegten Pflastersteinen diagonal zur Fahrtrichtung [51] .....	24
Abbildung 11. Rotationseffekt auf Pflastersteinen oder -Platten mit Achsen parallel zur Fahrtrichtung [51] .....	24
Abbildung 12. Anforderungen an Natursteinpflaster laut RVS 08.18.01 Tabelle 1 [77] .....	26
Abbildung 13. Anforderungen an Betonpflaster laut RVS 08.18.01 Tabelle 2 [77] .....	27
Abbildung 14. Kompensation von Pflastertoleranzen [51] .....	28
Abbildung 15. Verformungen nach dem Abrütteln [51] .....	29
Abbildung 16. Einfluss der Bettungsdicke auf die Verkehrslastverteilung [51] .....	30
Abbildung 17. Bauweise mit Drainbeton-Tragschicht [14] .....	34
Abbildung 18. Maßgebende Spannungen von Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht [14] .....	36
Abbildung 19. Anforderungen an Korngemische für ungebundene Tragschichten (1) [64] ...	37
Abbildung 20. Anforderungen an Korngemische für ungebundene Tragschichten (2) [64] ..	38
Abbildung 21. Mindestanforderungen an das Verdichten (gem. Tabelle 1 RVS. 08.15.01 [77]) .....	39
Abbildung 22. Bemessungstabelle für ungebundene Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 10 [73]) .....	47
Abbildung 23. Bemessungstabelle für Pflastersteindecken in ungebundener Bauweise mit Pflaster-Drainbetontragschicht (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 11 [73]) .....	48
Abbildung 24. Herstellung der Probekörper .....	51
Abbildung 25. Schadensentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung .....	53
Abbildung 26. Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung .....	54
Abbildung 27. Verformungskomponenten des Betons [78] .....	55
Abbildung 28. Spannungs-Dehnungs-Verlauf .....	55
Abbildung 29. Dehnungs-Zeit-Verlauf [78] .....	56
Abbildung 30. Modell der Rissbildung [35] .....	57
Abbildung 31. Rissverlauf bei hoher (Bild oben) und geringer (Bild unten) Dehnungsrate [57] .....	57
Abbildung 32. Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung .....	58
Abbildung 33. Erster Aufbau des Ermüdungsversuchs .....	60
Abbildung 34. Zweiter Aufbau des Ermüdungsversuchs auf Stahlprofilen, Elastomermatten und einer Ausgleichsschicht aus Fliesenkleber .....	60
Abbildung 35. Lasteinleitung .....	61
Abbildung 36. Zyklische Druckbeanspruchung .....	61
Abbildung 37. DMS Anordnung (Variante) .....	62

Abbildung 38. DMS Anordnung (Variante) und Rissbildung.....	63
Abbildung 39. Ermittlung der Durchbiegung durch Extensometer .....	63
Abbildung 40. Ermüdungsversuch .....	64
Abbildung 41. Wöhlerkurve.....	67
Abbildung 42. Riss in Versuchskörpernummer 8 .....	70
Abbildung 43. Tiefe der Risse in Versuchsnummer 8 .....	70
Abbildung 44. Makroporen im Querschnitt 7 .....	71
Abbildung 45. Makroporen im Querschnitt 6_2 .....	72
Abbildung 46. Makroporen im Querschnitt 6_1.....	72
Abbildung 47. FE-Geometrie.....	75
Abbildung 48. Belastung .....	78
Abbildung 49. FE-Mesh.....	79
Abbildung 50. Vergleich horizontale Zugspannungen $\sigma_{11}$ und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und ungebundene Bauweise .....	80
Abbildung 51. Horizontale Zugspannungsverteilung bei 8 cm Plattendicke für die gebundene Bauweise .....	81
Abbildung 52. Horizontale Zugspannungsverteilung bei 18 cm Plattendicke für die gebundene Bauweise.....	81
Abbildung 53. Vergleich horizontale Zugspannungen $\sigma_{11}$ und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm für und gebundene Bauweise .....	82
Abbildung 54. Spannungsverlauf bei 8 cm Plattendicke für die gebundene Bauweise .....	82
Abbildung 55. Vergleich der horizontalen Zugspannungen $\sigma_{11}$ in den Platten zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm .....	83
Abbildung 56. Vergleich der vertikale Druckspannungen $\sigma_{22}$ und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und ungebundener Bauweise.....	84
Abbildung 57. Vergleich der vertikalen Druckspannungen $\sigma_{22}$ und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und gebundener Bauweise .....	84
Abbildung 58. Vergleich der vertikalen Druckspannungen $\sigma_{22}$ in der Bettungsschicht zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm .....	85
Abbildung 59. Vergleich der horizontalen Zugspannungen $\sigma_{11}$ und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und gebundener Bauweise .....	86
Abbildung 60. Vergleich der horizontalen Zugspannungen $\sigma_{11}$ im Drainbeton zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm .....	86
Abbildung 61. Vergleich der Verformungen und Perioden für das Plattenformat 60x40 cm und gebundener Bauweise.....	87
Abbildung 62. Vergleich der Verformungen in der Bettungsschicht zwischen gebundener und ungebundener Bauweise für das Plattenformat 60x40x14 cm .....	87

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Vergleich von Betonpflaster mit anderen Deckenarten [81].....	9
Tabelle 2. Einflussfaktoren auf den Widerstand von Betonsteinpflaster [81].....	11
Tabelle 3. Mögliche Kombinationen für die ungebundene Bauweise [21].....	12
Tabelle 4. Mögliche Kombinationen für die gebundene Bauweise [21].....	13
Tabelle 5. Mindestanforderungen an das Bettungsmaterial (RVS 08.18.01 Tabelle 3 [77]) ...	31
Tabelle 6. Eigenschaften ungebundener Bauweise im Vergleich zu anderen [77] .....	40
Tabelle 7. Eigenschaften gebundener Bauweise im Vergleich zu anderen [77].....	41
Tabelle 8. Eigenschaften gemischter Bauweise im Vergleich zu anderen (laut RVS 08.18.01) .....	42
Tabelle 9. Mittlere Äquivalenzwerte für verschiedene Fahrzeugkategorien (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 1) .....	44
Tabelle 10. Mittlere Äquivalenzwerte des JDTLV-Kollektivs für verschiedene Straßenkategorien (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 2) .....	45
Tabelle 11. Fahrspurfaktor S in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite $b_f$ (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 3) .....	45
Tabelle 12. Zuwachsfaktor z in Abhängigkeit der Bemessungsperiode n und jährlicher Zuwachsrate (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 4 [73]).....	45
Tabelle 13. Lastklasse aufgrund des maßgebenden Schwerverkehrs im Querschnitt für das gering belastete Straßennetz (gem. RVS 03.08.63 Tabelle 4 [73]).....	46
Tabelle 14. Eigenschaften der Mischgüter.....	50
Tabelle 15. Rezeptur der Mischgüter .....	50
Tabelle 16. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, erste Serie.....	65
Tabelle 17. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, zweite Serie.....	65
Tabelle 18. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, dritte Serie.....	66
Tabelle 19. Ergebnisse des Ermüdungsversuchs, vierte Serie .....	66
Tabelle 20. Prozentsatz der Porosität in verschiedenen Querschnitten .....	71
Tabelle 21. Maße der Pflasterplatten .....	73
Tabelle 22. Perioden .....	74
Tabelle 23. Modellvarianten.....	74
Tabelle 24. Periode der Unteren Tragschicht .....	76
Tabelle 25. Periode des Untergrundes.....	76
Tabelle 26. Normales Fugeverhalten laut Hengl, H.L. 2016. [34].....	77

## Anhang

### Ergebnisse der FEM-Simulationen

#### Pflasterformat 60x30x8 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.370962	0.349223	0.327414	0.277121	0.413155	0.368958	0.326124	0.236886
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.54554	-0.54658	-0.547612	-0.549986	-0.465393	-0.465937	-0.466403	-0.467249
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	2.44539	2.40148	2.3607	2.2804
u [mm]	-0.414806	-0.352764	-0.307023	-0.239869	-0.457145	-0.39469	-0.348132	-0.278716

#### Pflasterformat 60x30x14 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.294134	0.278695	0.262828	0.22553	0.387361	0.346158	0.305903	0.220988
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.372746	-0.373904	-0.375059	-0.377762	-0.332626	-0.336271	-0.339625	-0.346118
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0.177617	0.178794	0.178661	0.174093	1.63799	1.60383	1.57195	1.50913
u [mm]	-0.407293	-0.346307	-0.301624	-0.236628	-0.452993	-0.388954	-0.341471	-0.271185

#### Pflasterformat 60x30x18 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.257981	0.245646	0.232558	0.200966	0.341436	0.302809	0.265484	0.187976
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.305951	-0.306576	-0.307251	-0.309073	-0.299695	-0.290862	-0.282739	-0.282621
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0.242776	0.240488	0.237058	0.225677	1.57903	1.54993	1.52291	1.46839
u [mm]	-0.406564	-0.345514	-0.300995	-0.236609	-0.451278	-0.386603	-0.33882	-0.268418

### Pflasterformat 60x40x8 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.31526	0.295219	0.275314	0.230158	0.523892	0.477706	0.431988	0.331867
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.488732	-0.491572	-0.494265	-0.500089	-0.387546	-0.393077	-0.398337	-0.409394
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	1.58909	1.5537	1.52025	1.45341
u [mm]	-0.413761	-0.351925	-0.306362	-0.239541	-0.566876	-0.480485	-0.416181	-0.320704

### Pflasterformat 60x40x14 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.258678	0.244287	0.229563	0.195266	0.415435	0.375226	0.336145	0.252503
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.326186	-0.327607	-0.329128	-0.333051	-0.246459	-0.246995	-0.247468	-0.248284
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0.18401	0.1833	0.18124	0.180143	1.26203	1.23418	1.2083	1.15617
u [mm]	-0.406993	-0.346147	-0.301563	-0.236714	-0.545901	-0.459976	-0.396543	-0.3034

### Pflasterformat 60x40x18 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.234029	0.221701	0.208766	0.178957	0.410223	0.370541	0.331969	0.249393
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.237239	-0.239288	-0.241413	-0.246577	-0.236784	-0.229613	-0.224435	-0.214114
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0.236106	0.23344	0.229666	0.217647	0.912704	0.895689	0.879827	0.847925
u [mm]	-0.406822	-0.345867	-0.301395	-0.23704	-0.554123	-0.465956	-0.400983	-0.305819

### Pflasterformat 60x60x8 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.358464	0.337896	0.317255	0.269503	0.444243	0.400993	0.359006	0.269134
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.492888	-0.494999	-0.497123	-0.502138	-0.385624	-0.389776	-0.393724	-0.402092
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	1.45509	1.42543	1.39777	1.34282
u [mm]	-0.414614	-0.352551	-0.306804	-0.239682	-0.551045	-0.467239	-0.405051	-0.313145

### Pflasterformat 60x60x14 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.285717	0.270858	0.255592	0.219657	0.38282	0.346204	0.310489	0.233158
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.320193	-0.323748	-0.321319	-0.325446	-0.159188	-0.151415	-0.159583	-0.176067
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0.17153	0.17053	0.17121	0.168108	1.32872	1.29826	1.27016	1.21397
u [mm]	-0.407351	-0.34633	-0.301619	-0.236583	-0.533136	-0.448389	-0.385969	-0.294692

### Pflasterformat 60x60x18 cm

	Gebundene Bauweise				Ungebundene Bauweise			
	1g	2g	3g	4g	1u	2u	3u	4u
$\sigma_{11}$ - Ob.Tragschicht [N/mm <sup>2</sup> ]	0.250849	0.238857	0.226145	0.195461	0.366008	0.331277	0.29732	0.223491
$\sigma_{22}$ - Bettung [N/mm <sup>2</sup> ]	-0.223524	-0.224332	-0.226431	-0.234341	-0.210078	-0.197309	-0.185447	-0.161794
$\sigma_{11}$ -Platten [N/mm <sup>2</sup> ]	0.222221	0.220227	0.217061	0.206193	0.868011	0.847139	0.827805	0.791003
u [mm]	-0.406908	-0.345801	-0.301225	-0.236735	-0.534744	-0.448732	-0.385565	-0.293563

## Matlabcode

```
a = imread('IMAGE.JPG');
J = rgb2gray(a);
J = J>5
imshowpair( a,J,'montage' ) ;
stats = regionprops('table',J,'Centroid',...
    'MajorAxisLength','MinorAxisLength')
total=bwarea(J)
s = regionprops(J == 0,'Area','PixelIdxList')
percentageBlack=(1-nnz(J)/numel(J))*100
```