

Diploma Thesis

Fatigue and design of unbound and bound paving slabs

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

DIPLOMARBEIT

Ermüdung und Dimensionierung ungebundener und gebundener Pflasterplattenbefestigungen

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

von

Dejan Jokanovic

Matr.Nr.: 01028090

unter der Anleitung von

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

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

Institut für Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Gusshausstraße 28/230/3, A-1040 Wien

Wien, im Juni 2020

Kurzfassung

Der Einsatz von Pflasterbefestigungen bei innerstädtischen Verkehrsflächen nimmt stetig zu und vor allem im repräsentativen Bereich werden von PlanerInnen und BauherrInnen immer öfter schlanke Plattenabmessungen gewünscht. Zudem sind am Markt verschiedene Pflasterformate und Varianten vorhanden, die es bei der Bemessung zu berücksichtigen und abzudecken gilt. Dabei ist die Ausführung mit einer Pflasterdrainbetontragschicht aus mehreren Aspekten empfehlenswert, allerdings auch stark von der Verkehrsbelastung abhängig. In den derzeit gültigen Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen zur Oberbaubemessung sind Standardaufbauten für Pflasterplatten aus Beton mit einer Drainbetontragschicht definiert, allerdings beziehen sich diese nur auf die ungebundene Bauweise. Die gebundene Bauweise ist aufgrund fehlender Erfahrungen bei der Ausführung, mangelnder Dimensionierungsnachweise und wenig bekannter Materialkennwerte nicht implementiert. Daher ist auf die Entwicklung neuer Bemessungsmethoden und die Erforschung der Materialparameter besonderes Augenmerk zu legen. Durch die dynamischen Belastungen von Verkehrsflächen ist das Ermüdungsverhalten der einzelnen Schichten ein wichtiger Aspekt, den es dabei zu berücksichtigen gilt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Dauerhaftigkeit von Pflasterplatten aus Beton und der Dimensionierung der einzelnen Schichten der gebundenen und ungebundenen Bauweise sowie in weiterer Folge mit der Empfehlung von Standardaufbauten.

In Laborversuchen wurden dazu industriell vorgefertigte Pflasterbetonplatten einem Dauerschwingversuch unterzogen und die Ergebnisse analysiert. Gemeinsam mit den Ergebnissen vorangegangener Versuche an Drainbeton konnte basierend auf FEM-Simulation ein Dimensionierungskonzept entwickelt werden. Damit ist es möglich, die derzeitigen Standardaufbauten für die ungebundene Bauweise zu vergleichen und Optimierungsmöglichkeiten zu erkennen. Zudem kann damit eine Empfehlung für einen standardisierten Aufbau zur gebundenen Bauweise gegeben werden.

Abstract

The use of paving slabs in inner-city traffic areas is steadily increasing and especially in the representative area, planners are requesting slim paving slab dimensions. In addition, there are various kinds of paving types on the market that need to be taken into account within design methods. The use of draining concrete in the upper base layer is recommended from several aspects, but the capacity of this layer depends also on the existing traffic load. In the currently valid "Guidelines for Planning, Construction and Maintenance of Roads" (RVS) for design of road pavements, standard structures for paving slabs on a draining concrete layer are specified, but this refers only to the unbound construction. The bound construction method of paving slabs is owing to lack of experience on the construction site, insufficient design methods and slightly known material properties not implemented yet. Due to these reasons, special attention must be paid to the development of new design methods and the research of material parameters. Because of the dynamic loads on traffic areas, the fatigue behaviour of the several layers is an important aspect that must be taken into account while developing new design methods.

This thesis deals with the durability of paving slabs made of concrete and the design of several layers of the bound and unbound construction method and subsequently with the recommendation of standard paving constructions.

In laboratory tests, industrially prefabricated concrete paving slabs were subjected to a fatigue test. The results were analysed and together with the output of previous tests on slabs made of draining concrete, a new design concept, using FEM simulation, has been developed. With this design concept, it is possible to compare the current standard structures for the unbound construction and identify the possibility for optimisations. In addition, a recommendation for a standardised structure for the bound construction can also be given.

Vorwort

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird auf die geschlechts-spezifische Schreibweise verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen in diesem Dokument sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.

Diese Arbeit wurde durch das Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßen- und Flugbetriebsflächenbau, an der Technischen Universität Wien ermöglicht. In Kooperation mit dem Institut für Tragkonstruktionen, Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau, konnte mir ein Einblick in die Praxis von Materialprüfungen und in weiterer Folge auch in die Entstehung neuer Bemessungsmethoden gegeben werden. Der Prozess um die Entwicklung neuer Standardaufbauten, ähnlich wie sie bereits Verwendung finden, war eine durchgehend spannende und vor allem realitätsbezogene Aufgabe. Durch die professionelle Arbeitsweise der Institute und betreuenden Personen war zudem die Aufgabenstellung und die Zielsetzung stets klar definiert.

Mein größter Dank gilt Suzana und Jovan Jokanovic, danke für alles.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Geschichtliche Entwicklung des Pflasterbaus	3
2.1.1	Vergleich von Deckenarten	4
2.2	Begriffsbestimmungen	6
2.2.1	Deckschicht	6
2.2.2	Bettung	6
2.2.3	Tragschichten	7
2.2.4	Unterbau	8
2.2.5	Begriffe bezogen auf Pflasterdeckungen	8
2.3	Aufbauten und Bauweisen	8
2.3.1	Allgemeines	8
2.3.2	Gebundene Bauweise	9
2.3.3	Ungebundene Bauweise	9
2.3.4	Gemischte Bauweise	10
2.3.5	Vergleich der Bauweisen	10
2.4	Relevante Richtlinien und Vorschriften	11
2.4.1	RVS 08.18.01: 2009	11
2.4.2	RVS 03.08.63: 2016	11
2.4.3	ÖNORM EN 1339: 2007 01 01	11
2.4.4	ÖNORM EN 1341: 2013 01 15	12
2.4.5	ÖNORM B 3108: 2014 08 01	12
3	Versuche & Prüfungen	13
3.1	Allgemeines	13
3.1.1	Periodische Belastung	13
3.1.2	Bruchmechanismus durch Ermüdung	14
3.2	Versuchsaufbau	16
3.3	Übersicht über die geprüften Prüfkörper	18
4	Versuchsauswertung	21
4.1	Ermittlung der Materialparameter	21
4.1.1	Formeln zur Ermittlung der Materialkennwerte	22
4.2	Dynamische Versuche	23
4.2.1	Allgemeines	23
4.2.2	Versuch 01: 5-20 kN	24
4.2.3	Versuch 02: 5-20 kN	26

4.2.4	Versuch 03: 5-20 kN.....	27
4.2.5	Versuch 04: 5-15 kN.....	28
4.2.6	Versuch 05: 5-15 kN.....	29
4.2.7	Versuch 06: 5-15 kN.....	31
4.2.8	Versuch 07: 5-25 kN.....	32
4.2.9	Versuch 08: 5-25 kN.....	32
4.2.10	Versuch 09: 5-25 kN.....	34
4.3	Statische Versuche	35
4.3.1	Allgemeines	35
4.3.2	Versuch 01	36
4.3.3	Versuch 02 – ohne Ausgleichsmörtel.....	37
4.3.4	Versuch 03	38
4.3.5	Versuch 04	39
4.4	Materialkennwerte und Ergebnisse – Zusammenfassung	40
4.4.1	Wöhlerkurve	40
4.4.2	E-Modul und Biegefestigkeit.....	41
5	Bemessung	43
5.1	Allgemeines.....	43
5.2	Oberbaubemessung lt. RVS 03.08.63: 2016.....	43
5.2.1	Allgemeines.....	43
5.2.2	Maßgebende Verkehrsbelastung	44
5.2.3	Konstruktive Ausbildung der Einzelschichten.....	46
5.2.4	Bestimmung der Lastklasse	49
5.2.5	Berechnungsbeispiel lt. RVS 03.08.63.....	52
5.3	Struktursimulation.....	53
5.3.1	Simulationstool	53
5.3.2	Belastung	55
5.3.3	Ergebnisse der FEM-Spannungsermittlung	55
5.4	Bemessung nach Versuchsauswertung	56
5.4.1	Dimensionierung der Pflasterplatten	56
5.4.2	Dimensionierung der Bettung.....	58
5.4.3	Dimensionierung des Drainbetons	60
5.4.4	Dimensionierung der ungebundenen unteren Tragschicht	61
5.5	Vergleich des Berechnungsbeispiels lt. RVS 03.08.63: 2016	63
5.6	Vergleich der Bemessungstabellen.....	65
5.6.1	Ungebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht.....	65
5.6.2	gebundenen Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht	66
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	68
6.1	Plattenprüfung	68

6.2	Dimensionierungskonzept.....	68
6.3	Ausblick.....	69
7	Literaturverzeichnis.....	70
7.1	Internetquellen.....	71
7.2	Normenverzeichnis.....	72
8	Abbildungsverzeichnis.....	73
9	Tabellenverzeichnis.....	75

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Immer öfter werden bei innerstädtischen Verkehrsflächen, insbesondere im repräsentativen Bereich, von PlanerInnen und BauherrInnen Pflasterbefestigungen mit großen oder auch sehr schlanken Abmessungen gewünscht. Abhängig von der Verkehrsbelastung, ist die Ausführung auf einer Pflasterdrainbetontragschicht empfehlenswert. In den aktuellen Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen zur Oberbaubemessung – RVS 03.08.63 (Stand 2016) – sind für Aufbauten mit Pflasterplatten aus Beton für die Lastklassen LK0,05 (BNLW 50.000), LK0,1 (BNLW 100.000) & LK0,4 (BNLW 400.000) Standardaufbauten festgelegt. Diese beziehen sich allerdings nur auf die ungebundene Bauweise. Für die gebundene Bauweise liegen mangels Erfahrung bei der Ausführung und nicht vorhandener Dimensionierungsnachweise keinerlei Empfehlungen für Aufbauten vor, obwohl diese Ausführungsvariante durchaus Vorteile in der Nutzung aufweisen kann. Für beide Aufbauvarianten gilt allerdings, dass für die Drainbetontragschicht kaum Materialparameter und empfohlene Rezepturen vorhanden sind. Daher wurde im Forschungsprojekt "Collective Research Pflasterplattenbauweise" des Instituts für Verkehrswissenschaften (Forschungsbereich Straßenwesen) an der Technischen Universität Wien zum Ziel gesetzt, Erkenntnisse zu Materialparametern und geeignete Rezepturen zu ermitteln. In weiterer Folge sollen durch Versuche an Beton- und Natursteinpflasterplatten Erfahrungen gewonnen werden, mit denen, in Kombination mit den Ergebnissen der Drainbetontragschicht, die Oberbaudimensionierung der ungebundenen und gebundenen Bauweise verglichen werden kann [1].

Die Erkenntnisse zur Drainbetontragschicht wurden in der Diplomarbeit "Dimensionierung von Pflasterbefestigungen mit Drainbeton: Prüftechnische Ansprache des Ermüdungsverhaltens und numerische Modellierung des Gebrauchsverhaltens" [2] ausgearbeitet. Die vorliegende Arbeit baut auf diesen Erkenntnissen auf und führt sie weiter aus, indem mit den durchgeführten Versuchen an Betonpflasterplatten und Ergebnissen aus einer FEM-Simulation Dimensionierungskonzepte für die gebundene Bauweise erstellt werden. Damit sollen in weiterer Folge Oberbauempfehlungen für verschiedene Lastklassen entstehen. Zudem wurde mittels FEM-Simulation die ungebundene Bauweise ebenfalls untersucht. Mit diesen Ergebnissen sollen die Standardaufbauten der ungebundenen Bauweise lt. RVS 03.08.63 untersucht, verglichen und mögliche Empfehlungen zur Optimierung gegeben werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, in einem ersten Schritt durch Laborversuche die Dauerhaftigkeit von industriell vorgefertigten Pflasterbetonplatten zu ermitteln. Dazu werden die Probekörper in einer Prüfmaschine einem Dauerschwingversuch unterzogen, mit dem die maximale Lastwechselzahl ermittelt wird.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen, wird eine Wöhlerkurve erstellt, mit der dann für gegebene Spannungen die zulässige Lastwechselzahl abgelesen bzw. ermittelt werden kann. Des

Weiteren werden auch statische Drei-Punkt-Biegeversuche an den Proben durchgeführt. Diese dienen der Ermittlung der Bruchlast und verschiedener Materialparameter.

Mit den vorangegangenen Versuchen zur Dauerhaftigkeit von Drainbeton ([2] [4]), soll in Kombination mit den Ergebnissen dieser Versuche ein empfohlener Standardaufbau für die gebundene Bauweise und unterschiedliche Lastklassen erstellt werden. Dazu sind mit einer FEM-Simulation maßgebliche Spannungen im Aufbau ermittelt worden, mit denen für die unterschiedlichen Schichten die maximal ertragbare Anzahl an Lastwechseln berechnet werden können.

Im Zuge dieser Arbeit wird zudem die derzeitige Oberbaubemessung für Pflasterplatten aus Beton mit einer Drainbetontragschicht laut RVS 03.08.63: 2016 erörtert und mit der Bemessung nach den Versuchsergebnissen verglichen [35].

2 Grundlagen

2.1 Geschichtliche Entwicklung des Pflasterbaus

Überreste von Pflasterflächen in Mesopotamien lassen auf eine Nutzung schon vor ca. 4000 Jahren schließen [6]. Bekannt ist ebenfalls, dass die Babylonier und Ägypter Pflasterbeläge für den Transport von Waren nutzten [7]. Allerdings wurde erst im römischen Reich die Pflastertechnik maßgeblich verbessert. Dabei erkannten die Römer die Wichtigkeit eines stabilen Unterbaus und verwendeten für sumpfigen bzw. festen Untergrund eine entsprechend andere Bauweise. Zudem wurden die Straßen zur Entwässerung mit einer Querneigung ausgeführt [8].

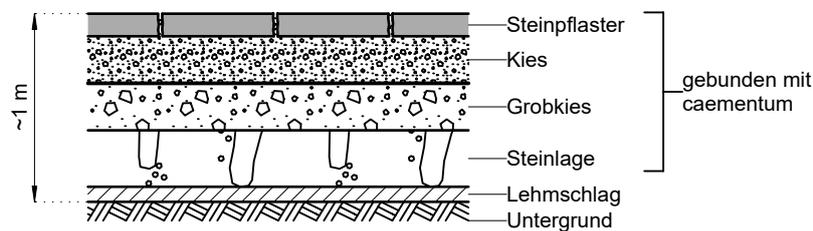


Abb. 2.1: Aufbau einer Römerstraße auf festem Untergrund [11]

Die Straßen des Mittelalters dienten neben der Fortbewegung auch der Abwasserentsorgung. Da der Belag dadurch höhere Anforderungen zu erfüllen hatte, musste er von Fachkräften verlegt werden. Das förderte die Entstehung der Gilde der Meisterpflasterer. Reste dieses Handwerks sind noch heute, zum Beispiel in den Niederlanden, vorzufinden [11].

Durch die Industrialisierung und der damit verbundenen Zunahme des Verkehrs gewann auch die Pflasterbauweise weiter an Bedeutung. Mitte des 19. Jahrhunderts entstanden erste Richtlinien zum fachgerechten Einbau von Pflasterbefestigungen. Als Beispiele zu nennen sind hier die „Instruktion der Straßenpflasterungskommission der Stadt Kiel“ von 1839 und die „Wegeverordnung für die Herzogtümer Schleswig und Holstein“ aus dem Jahr 1842 [9].

Mit der fortschreitenden Technologisierung und in weiterer Folge der Motorisierung veränderten sich die Nutzungsanforderungen an die Straßenbeläge und Tragschichten. Die höheren Geschwindigkeiten und zunehmenden Verkehrsbelastungen, gemeinsam mit der Entwicklung des Asphaltmischguts, führten zur allmählichen Verdrängung der Pflasterbauweise [9].

Dennoch weisen Betonsteinpflaster durchaus praktische Vorteile gegenüber konkurrierenden Straßendecken auf. Vor allem der Widerstand gegen hohe Punktlasten und Schubkräfte ist dabei hervorzuheben sowie die lange Lebensdauer. Außerdem können sie bei Umbauten leicht aufgenommen und wiederversetzt werden [10].

2.1.1 Vergleich von Deckenarten

Historisch betrachtet können vier Pflasterarten für Verkehrsflächen unterschieden werden:

- ◆ Natursteinpflaster
- ◆ Holzpflaster
- ◆ Klinkerpflaster
- ◆ Betonsteinpflaster

Dabei ist das Betonsteinpflaster aufgrund seiner einfachen Herstellungsweise die preisgünstigste Pflasterart.

Betonpflastersteine haben durch ihre industrielle Herstellung und damit verbundene Maßgenauigkeit sowie auch ihrer höheren Festigkeiten frühere Pflasterarten ersetzt. Sie besitzen zudem im Vergleich mit anderen Deckenarten in diversen Bereichen Vorteile, wie zum Beispiel geringere Kosten, kreative Gestaltungsmöglichkeiten oder auch gute Nutzungseigenschaften. Die Tabelle 2.1 zeigt die wichtigsten Deckenarten im Vergleich mit ihren Vor- und Nachteilen.

Es wird vor allem aufgezeigt, dass nicht jede Deckenart gleich gut für alle Zwecke geeignet ist. Insbesondere bei speziellen Einsatzgebieten sind Betonsteinpflaster den anderen Arten vorzuziehen.

Vor allem für Einsätze bei denen

- ◆ hohe Punktlasten mit häufigen Dreh- und Wendungen,
- ◆ der Untergrund von geringer Qualität ist,
- ◆ hohe Temperaturschwankungen oder
- ◆ Öle, Kraft- und Schmierstoffe vorkommen,

sind Betonpflastersteine von Vorteil [10].

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

Tabelle 2.1: Vergleich von Betonsteinpflaster mit anderen Deckenarten [10]

2.2 Begriffsbestimmungen

2.2.1 Deckschicht

Die Deckschicht ist der oberste befahrbare/begehbare Teil des Straßenoberbaus. Die Dicke und Zusammensetzung der Deckschicht ist stark von der Verkehrsbelastung abhängig [16].

Die RVS 03.08.63: 2016 unterscheidet folgende Deckschichten:

- ◆ Bituminöse Deckschicht: die am häufigsten verwendete Deckschicht. Besteht aus abgestuftem Gesteinskörnungsgemisch und Bindemittel aus Bitumen. Weitere Unterteilungen sind Deckschichten aus Gußasphalt, Splittmastixasphalt und Asphaltbeton [19].
- ◆ Halbstarre Deckschicht (HSD): Diese Deckschicht stellt eine Kombination aus Asphalt- und Betondeckschicht dar. Daher sind auch die Eigenschaften eine Kombination. Die Deckschicht zeichnet sich durch Verformungsbeständigkeit, aber auch durch Flexibilität aus. Im Allgemeinen werden die obersten fünf Zentimeter des Asphaltaufbaues als hohlraumreicher Drainasphalt ausgeführt. In einem weiteren Arbeitsschritt wird dann mit einem Hochleistungsmörtel vermörtelt [20].
- ◆ Betondecken: Besteht aus abgestuftem Gesteinskörnungsgemisch und Bindemittel aus Zement. Betondecken zeichnen sich durch ihre hohe Dauerhaftigkeit aus und werden daher bevorzugt bei Straßen mit hoher Verkehrsbelastung eingesetzt. Zu berücksichtigen ist, dass die Betondeckschichte mit Fugen zu versehen ist, um willkürliche Risse zu vermeiden und Längendehnungen aufzunehmen [21] [22].
- ◆ Pflasterstein- und Pflasterplattendecken: Werden vorwiegend bei geringer belasteten Verkehrswegen eingesetzt. Die umfangreichen gestalterischen Möglichkeiten sind ein großer Vorteil gegenüber den anderen Deckschichten. Daher sind Pflastersteindeckungen auch öfter auf repräsentativen Plätzen vorzufinden. Grundsätzlich werden drei verschiedene Bauweisen unterschieden, die gebundene, die ungebundene und die gemischte Bauweise [24].

2.2.2 Bettung

Die Bettung dient als Auflager für Pflastersteindeckungen und gleichzeitig als Ausgleichsschicht (Abb. 2.2). Zu unterscheiden sind eine ungebundene Bettung aus Sand und die gebundene Variante aus Mörtel. Gesteinskörnungen, die eine hohe Verzahnung garantieren, sind empfehlenswert, da die Bettung nicht nur vertikale Lasten, sondern auch horizontale Belastungen aus Brems- und Beschleunigungsvorgängen aufzunehmen und zu übertragen hat. Die Schichtdicke ist zudem ebenfalls eine relevante Kenngröße, um Schäden an den Pflasterplatten zu vermeiden. Die Mindestschichtdicke sollte nicht unter 3 cm liegen. Es ist vor allem wichtig, eine angemessene Bettungsschichtdicke, passend zu den verwendeten Platten, zu wählen. Übermäßige Dicken können zu bleibenden Verformungen während zu geringe Dicken zum Bruch der Pflasterplatten führen. Zudem ist eine konstante Schichtdicke erforderlich. Die Bettung darf nicht verwendet werden, um unzulässige Unebenheiten in den unteren Tragschichten auszugleichen, da eine inkonstante Schichtdicke ebenfalls zu Verformungsschäden führen kann [25].

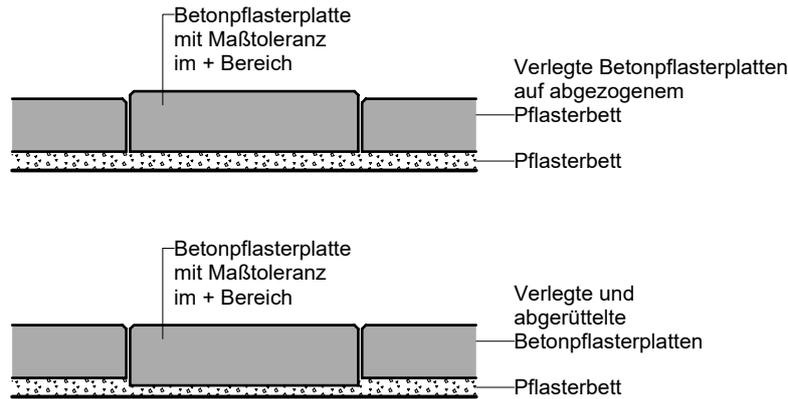


Abb. 2.2: Ausgleich zulässiger Höhentoleranzen bei Betonpflastersteinen [25]

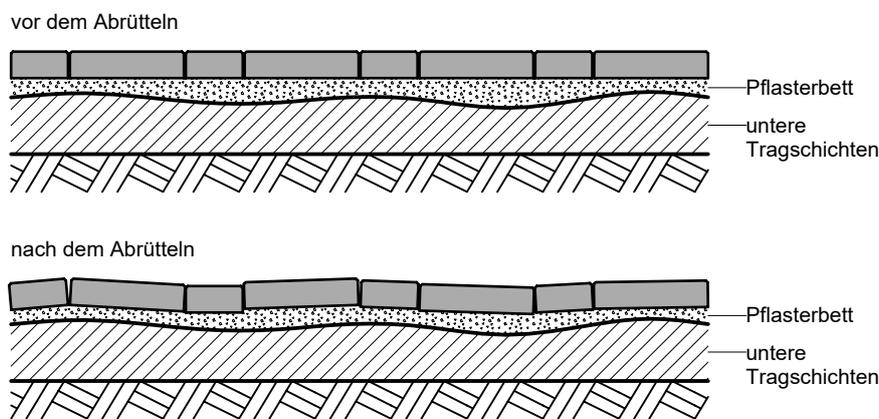


Abb. 2.3: Verformung des Pflasters infolge inkonstanter Bettungsschichtdicke [25]

2.2.3 Tragschichten

Die Tragschichten sind zu unterteilen in gebunden und ungebunden und dienen der Ableitung der Lasten aus der Deckschicht. Sie bilden das tragende Hauptelement der Konstruktion, da sie die meisten vertikalen Kräfte aufnehmen müssen. Deshalb hängt die Steifigkeit des Systems stark von den Eigenschaften dieser Schichten ab. Zudem bildet sie zum Teil eine Frostschuttschicht.

Die RVS 03.08.63: 2016 unterscheidet hinsichtlich der Tragschicht die

- ◆ ungebundenen Tragschichten:
 - ungebundene untere Tragschichten
 - ungebundene obere Tragschichten
- ◆ gebundene Tragschichten:
 - mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten
 - Tragschichten aus Pflasterdrainbeton
 - Bituminöse Tragschichten

2.2.4 Unterbau

Der Unterbau dient als Grundlage für den Straßenoberbau und hat die Aufgabe, die aufgenommenen Lasten verteilt in den Untergrund, zu übertragen. Zudem soll damit eine plane Fläche vorbereitet werden [23]. Die Tragfähigkeit der Schicht selbst kann durch verschiedene Maßnahmen wie Bitumen- oder Kalkstabilisierung verbessert werden [35].

Der Oberbau wird auf das Unterbauplanum aufgetragen. Unterbauplanum bezeichnet hierbei die technisch bearbeitete Fläche des Untergrundes, die verschiedenen Eigenschaften wie Ebenheit, Neigung oder Lage genügt. Der Untergrund ist der natürlich gewachsene Boden.

2.2.5 Begriffe bezogen auf Pflasterdeckungen [12]

- ◆ **Verband:** sich wiederholende, regelmäßige oder unregelmäßige Anordnung von Steinen/Platten in Abhängigkeit von der Stein- oder Plattengröße.
- ◆ **Pflastern:** manuelles Hineintreiben der Steine/Platten in eine Bettung aus Sand oder Mörtel.
- ◆ **Verlegen:** Auflegen der Steine/Platten mit geringer Dickentoleranz auf eine profilgerechte Bettung aus Sand oder Mörtel oder Randeinfassung in ein Mörtelbett auf eine Betonunterlage.
- ◆ **Versetzen:** Einbetten von Randeinfassungen in eine Betonbettung.

2.3 Aufbauten und Bauweisen

2.3.1 Allgemeines

Im Allgemeinen kann ein Straßenaufbau in die Bestandteile Oberbau, Unterbau und Untergrund unterteilt werden. Das Unterbauplanum trennt dabei den Oberbau und den Unterbau voneinander und bezeichnet eine technisch bearbeitete Fläche, die verschiedenen Eigenschaften entspricht. Die Schichten über dem Unterbauplanum werden als Oberbau bezeichnet. Dazu zählt unter anderem auch die Pflasterdeckschicht [26].

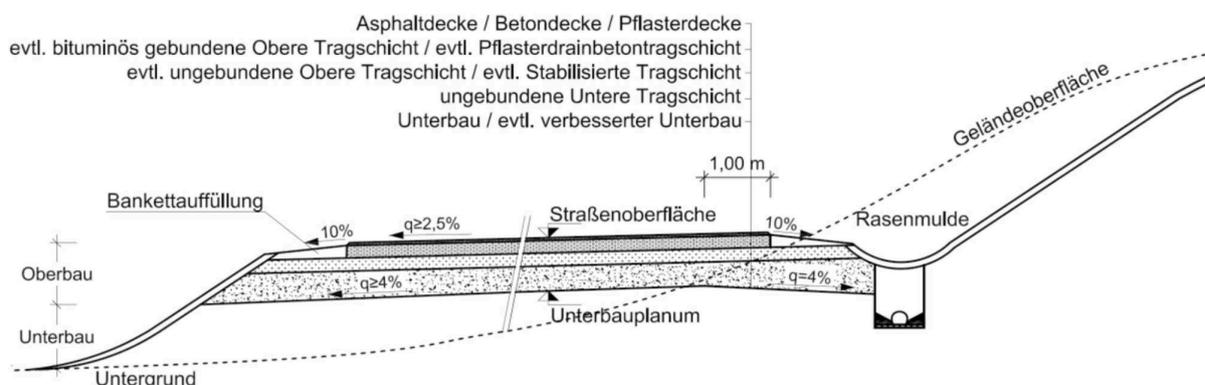


Abb. 2.4: Straßenaufbau (Systemskizze) [35]

Bei der Pflasterdeckschichte gibt es im Wesentlichen drei Bauweisen zu unterscheiden:

- ◆ ungebundene Bauweise
- ◆ gebundene Bauweise
- ◆ gemischte Bauweise

Dabei gilt die ungebundene Bauweise in Österreich als Regelbauweise, die gebundene und gemischte Bauweise hingegen gelten als Sonderbauformen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Bauweisen näher erläutert sowie die Vor- und Nachteile zusammengefasst und gegenübergestellt.

2.3.2 Gebundene Bauweise

Die gebundene Bauweise wird in Österreich als Sonderbauweise betrachtet. Bei dieser Herstellungsart werden die Pflastersteine oder Pflasterplatten in einer aus Mörtel, also unter Zusatz eines Bindemittels, bestehenden Bettung verlegt. Dabei ist vor allem bei den Pflasterplatten auf eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Platten und der Bettung zu achten. Die Verfüllung der Fugen erfolgt mit Fugenmörtel und somit ebenfalls unter Zusatz eines Bindemittels. Um keine Wasserstauung zu verursachen, sind die darunterliegenden Oberbauschichten wasserdurchlässig herzustellen. Zudem ist bei dieser Bauweise durch thermische Beanspruchungen aufgrund großer Temperaturunterschiede mit Rissen in den Fugen zu rechnen und Dehnfugen bzw. Entspannungszonen sind einzuplanen [36].

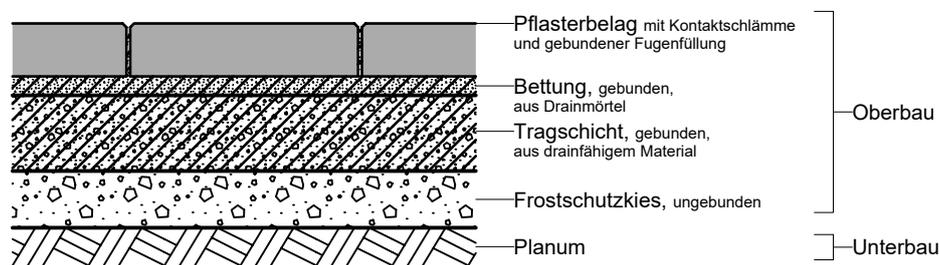


Abb. 2.5: gebundene Bauweise [26]

2.3.3 Ungebundene Bauweise

Die ungebundene Bauweise ist die am häufigsten angewendete Bauweise für Pflasterverlegungen in Österreich und somit als Regelbauweise anzusehen. Hierbei werden die Pflastersteine oder Pflasterplatten in eine Bettung aus losem, feinkörnigem Material, wie Sand und feinkörniger Splitt, ohne zusätzliches Bindemittel verlegt [27]. Zudem erfolgt auch die Fugenverfüllung ohne Bindemittelzusatz. Dadurch ergibt sich ein elastisches System, welches auch Einzellasten sehr gut flächig ableitet. Auch bei dieser Bauweise ist auf die dauerhafte Wasserdurchlässigkeit der darunterliegenden Schichten zu achten [36].

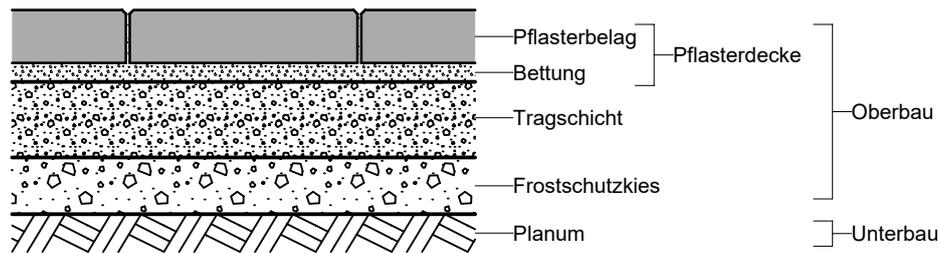


Abb. 2.6: ungebundene Bauweise [26]

Als Vorteil können die geringen Herstellungs- und Unterhaltskosten angesehen werden. Zudem ist es sehr einfach, Teilflächen zu tauschen oder auszubauen. Nachteilig hingegen wirkt sich die aufwendige Reinigung und Fugenauswaschung aus. Ohne sachgemäßer Fugenverfüllung besteht nur eine lose Ansammlung an Pflastersteinen, die sich selbst bei geringer Belastung verschieben können [28].

2.3.4 Gemischte Bauweise

Die gemischte Bauweise gilt als Sonderbauweise und sollte nur bei begehbaren bzw. gering befahrbaren Wegen angewendet werden, da die Belastbarkeit geringer ausfällt als bei den vorher genannten Bauweisen [28]. Hergestellt wird diese Bauweise mit einer ungebundenen Bettungsschichte ohne Zusatz von Bindemittel. Die Fugenverfüllung hingegen wird mittels Bindemittel gebunden hergestellt. Mit Fugenrissen aufgrund von thermischer Beanspruchung ist bei dieser Bauweise jedenfalls zu rechnen.

Als Vorteil der gemischten Bauweise ist die geschlossene Oberfläche und dadurch leichte Reinigung zu betrachten. Zudem befindet sie sich preislich unterhalb der gebundenen Bauweise [24].

2.3.5 Vergleich der Bauweisen

Die unterschiedlichen Bauweisen bringen jeweils auch unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich. Das Einsatzgebiet einer bestimmten Bauweise hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie dem Erscheinungsbild, der Belastung oder der geplanten Nutzung. Die Tabelle 2.2 listet die wesentlichsten Punkte auf und vergleicht die Bauweisen miteinander.

	Ungebundene Bauweise	Gebundene Bauweise	Gemischte Bauweise
Regelbauweise	ja	nein	nein
Herstellungskosten	gering	höher	höher
Unterhaltskosten	gering	höher	höher
Wiederherstellungskosten	gering	höher	höher
Entsiegelung der Fläche	ja	nein	nein
Elastizität	hoch	keine	geringer
Sichtbare Spannungsrisse	keine	vorhanden	vorhanden
Auswaschung der Fugen	möglich	nein	nein
Fugensanierung	einfach	aufwändiger	aufwändiger
Belastbarkeit	hoch	hoch	geringer
Reinigung	aufwändiger	einfach	einfach
Fugenbewuchs	möglich	gering	gering

Tabelle 2.2: Vergleich der Bauweisen [36]

2.4 Relevante Richtlinien und Vorschriften

In Österreich sind unter anderem für Pflasterfahrbahnen folgende Regelwerke relevant:

2.4.1 RVS 08.18.01: 2009

Pflasterstein- und Pflasterplattendecken

Behandelt die Planung, Herstellung und Instandhaltung von Pflasterstein- und Pflasterplattendecken. Zudem ist auch die Qualitätssicherung, Prüfung und Übernahme Inhalt dieser Richtlinie.

2.4.2 RVS 03.08.63: 2016

Oberbaubemessung

Diese RVS dient der Bemessung des Straßenoberbaues von Verkehrsflächen. Dazu werden abhängig von der Verkehrsbelastung Mindestdicken für die einzelnen Schichten ermittelt, um eine Mindesttragfähigkeit zu gewährleisten. Diese Standardaufbauten sind für verschiedene Oberbaumaterialien festgelegt.

2.4.3 ÖNORM EN 1339: 2007 01 01

Platten aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren

Inhalt dieser Europäischen Norm ist die Beschreibung der Materialien, Eigenschaften, Anforderungen und Prüfverfahren von Betonpflasterplatten, welche vor allem im Außenbereich Anwendung finden.

2.4.4 ÖNORM EN 1341: 2013 01 15

Platten aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren

Mit dieser Norm werden die Eigenschaften von Natursteinplatten von Straßenbelägen im Außenbereich festgelegt.

2.4.5 ÖNORM B 3108: 2014 08 01

Natürliche Gesteine – Pflastersteine und Pflasterplatten, Randeinfassungen – Abmessungen und Anforderungen an die Gesteinseigenschaften - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 1341, EN 1342 und EN 1343

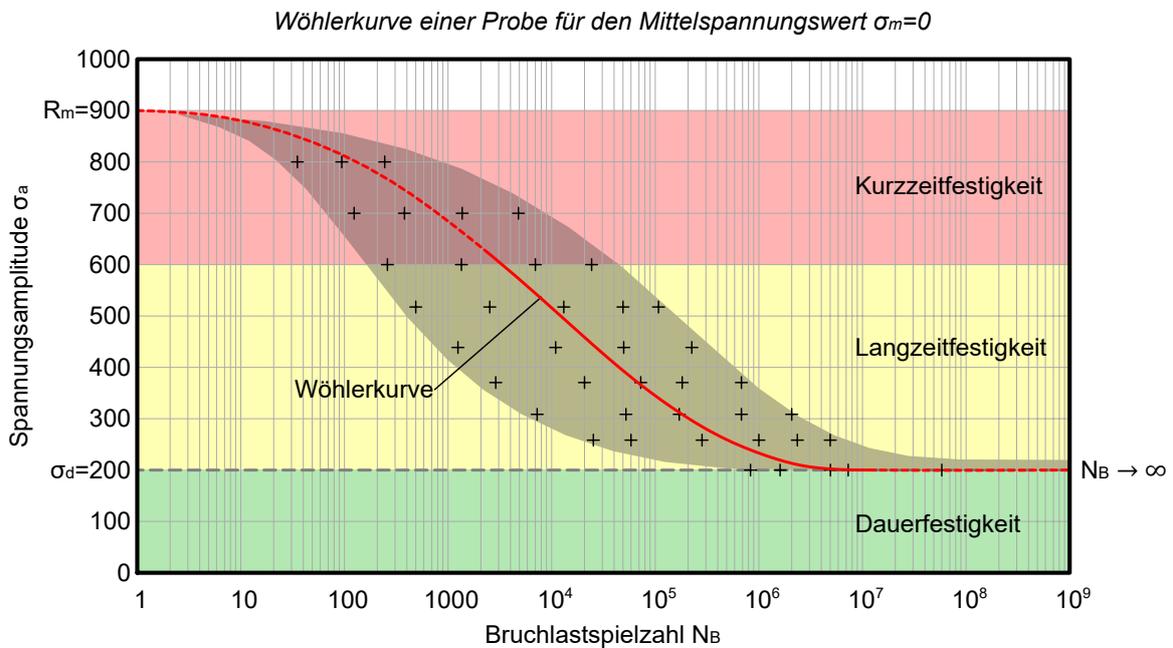
Diese Norm ist gemeinsam mit ÖNORM EN 1341, ÖNORM EN 1342 und ÖNORM EN 1343 anzuwenden und gilt für Pflastersteine und Pflasterplatten sowie Randeinfassungen aus natürlichen Gesteinen. Sie regelt die Anforderungen an die Eigenschaften der Gesteine, die in Österreich zum Einsatz kommen. Zudem werden Standardformate festgelegt.

3 Versuche & Prüfungen

3.1 Allgemeines

Da Fahrbahnen aus Pflasterbetonsteinen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind und dadurch geringere Spannungswerte als bei reiner statischer Belastung ertragen, sind Dauerschwingversuche erforderlich, um die Dauerhaftigkeit der Platten zu ermitteln. Die einzelnen Ergebnisse der Dauerschwingversuche ergeben zusammen eine Wöhlerkurve, mit der für angenommene Lastzyklen maximale Spannungen und dadurch die Ermüdungsfestigkeit abgelesen werden können.

Da für die Oberbaubemessung der RVS 03.08.63: 2016 Standardaufbauten mit maximal zulässigen Lastzyklen erstellt werden sollen, wird in diesem Fall mit der ermittelten Wöhlerkurve und einer Spannungsberechnung mittels FEM-Simulation ein Dimensionierungskonzept entwickelt.



3.1.1 Periodische Belastung

Dauerschwingversuche werden durchgeführt, indem die Probekörper periodischen Belastungen ausgesetzt werden. Bei der periodischen Belastung handelt es sich um eine sinusförmige Schwingung mit einer voreingestellten Frequenz. Die Frequenz bestimmt dabei die Anzahl an Schwingspielen, die pro Sekunde durchlaufen werden. Ein höherer Wert kann dadurch zur Verringerung der Prüfzeit führen, allerdings auch unzulässige Erwärmungen der Probe hervorrufen [29].

Bei den durchgeführten Versuchen wurde konstant mit 8 Hz geprüft. Das heißt, es wurden pro Sekunde 8 Schwingspiele durchgeführt. Die maximale Gesamtzahl der durchlaufenen Zyklen beträgt zwei Millionen und wird Grenzwahlspielzahl oder Grenzlastspielzahl genannt.

Kommt es vorher zum Bruch der Probe, wird die Zahl der erreichten Lastwechsel Bruchspielzahl genannt. Nach Erreichen der maximalen Lastspielzahl beziehungsweise der Bruchspielzahl gilt der Versuch als abgeschlossen.

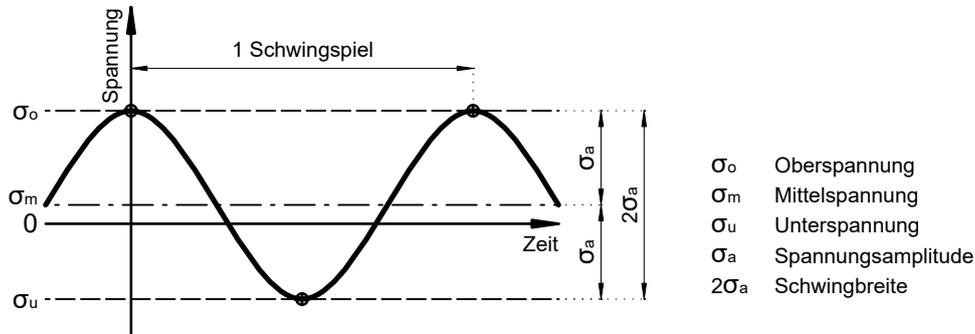


Abb. 3.2: Schwingungszyklus [29]

3.1.2 Bruchmechanismus durch Ermüdung

Um die Dauerhaftigkeit eines Bauteils zu verstehen, ist es erforderlich, den Mechanismus, der zur Ermüdung führt, zu kennen.

Ermüdung setzt zunächst aufgrund mikroskopischer Risse und Oberflächenfehlern der Probe ein. Solche Fehler und Einschlüsse sind in jeder Werkstoffoberfläche vorhanden und können nicht ausgeschlossen werden. Selbst komplett glatte Oberflächen weisen auf mikroskopischer Ebene Rauigkeiten auf. Diese Rauigkeiten wirken wie Kerben und sind durch erhöhte Spannungen und einen dreiachsigen Spannungszustand gekennzeichnet. Dadurch können sie auch deutlich über den einachsigen Nennspannungen liegen.

Genauer betrachtet treten an diesen Fehlstellen mikroplastische Verformungen durch lokale Überschreitung der Fließgrenze auf. Dadurch kommt es zu Materialverschiebungen, die dann an der Oberfläche entweder Ausbuchtungen (Extrusionen) oder Einbuchtungen (Intrusionen) zurücklassen. Ob Extrusionen oder Intrusionen auftreten, ist abhängig von der Spannungsart, also ob Zug- oder Druckspannung aufgebracht wird. Diese mikroskopischen Schädigungen wirken dann wiederum als Kerben und verstärken somit die Rissbildung (Stufe I).

Infolge der plastischen Verformungen können Verfestigungen entstehen. In weiterer Folge kommt es an diesen Stellen zur Versprödung des Werkstoffes, wodurch mit jeder weitere Lastwechsel das Material weiter aufbricht. Aus der ursprünglichen Kerbe entwickelt sich ein Riss, der weiter ins Innere fortschreitet. Durch diese Entwicklung wird das Einsetzen des Ermüdungsbruchs gekennzeichnet (Stufe II). Zum endgültigen Bruch kommt es in der Regel allerdings erst nach unzähligen weiteren Lastwechseln.

Mit immer weiter fortschreitender Rissausbreitung verringert sich der tragende Restquerschnitt der Probe. Damit steht der Lastabtragung eine immer geringere Fläche zur Verfügung. Ab einem gewissen Zeitpunkt reicht der Restquerschnitt nicht mehr aus, um der Beanspruchung standzuhalten, die Zugfestigkeit wird überschritten und es kommt zum Bruch des Bauteils (Stufe III). Die Bruchfläche in diesem Bereich weist die Merkmale eines Sprödbruchs bzw. duktilen Gewaltbruchs, ähnlich wie man es von Zugversuchen kennt, auf.

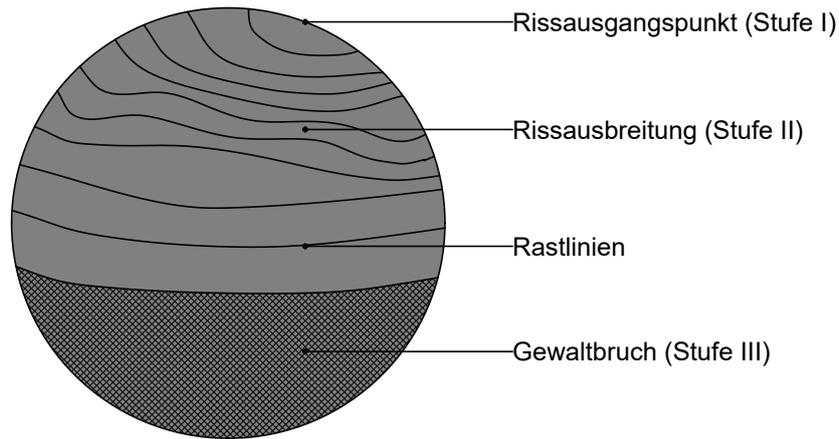


Abb. 3.3: Bruchvorgang bei Ermüdung [29]

Die Vorgänge in Abb. 3.3 können folgendermaßen beschrieben werden:

- ◆ Die Fließgrenze des Bauteils wird an mikroskopischen Fehlstellen durch Spannungserhöhungen lokal überschritten. Es kommt zur Bildung eines ersten Anrisses (Stufe I).
- ◆ Der Riss breitet sich mit jedem Lastwechsel weiter aus (Stufe II). Rastlinien markieren den Rückgang der Spannungen.
- ◆ Durch die Abnahme des tragenden Querschnitts tritt ein Gewaltbruch ein (Stufe III).

Der durch die Lastzyklen abnehmende Querschnitt zeigt sich auch in einem abnehmenden E-Modul, wie die nachstehende Abb. 3.4 zeigt.

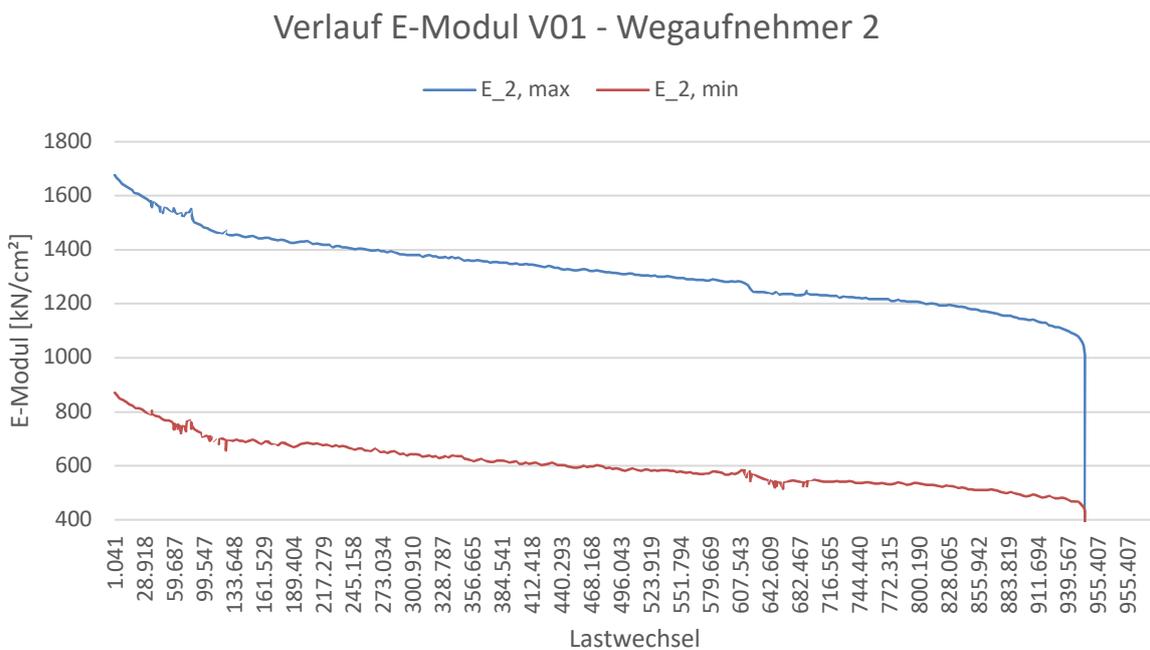


Abb. 3.4: Abnehmender E-Modul. Ergebnis der Versuchsauswertung zu Versuch 01

3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgte im Prüflabor des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien. Die Prüfvorrichtung ist ein Prüfrahmen der Firma Schenck, mit dem sowohl dynamische, als auch statische Zug- und Druckversuche durchgeführt werden können [30]. Begonnen wurde mit den Versuchen am 07. Jänner 2020.

Für die Dauerschwingversuche werden industriell vorgefertigte Pflasterbetonsteinplatten mit Abmessungen von 59,5 x 59,5 x 8,0 cm verwendet. Es werden dynamische Versuche in drei unterschiedlichen Laststufen mit je drei Probekörpern und zusätzlich drei statische Prüfungen zur Ermittlung des E-Moduls und weiterer Materialparameter durchgeführt. Die periodische Belastung erfolgt mit einer Frequenz von 8 Hz.

- ◆ Serie 01 – Laststufe 5 bis 15 kN
- ◆ Serie 02 – Laststufe 5 bis 20 kN
- ◆ Serie 03 – Laststufe 5 bis 25 kN

Durch die Kraft von 5 kN, die stets auf jede Probe wirkt, liegt die untere Randfaser der Versuchskörper konstant im Zugschwellbereich.

Zusätzlich werden bei jedem Versuch Wegaufnehmersensoren angebracht. Damit kann die Verformung der Proben ermittelt und der E-Modul berechnet werden. Allerdings erfolgt die Ermittlung des E-Moduls und der Biegezugfestigkeit hauptsächlich über die statischen Versuche, da bei diesen durch die kontinuierliche Kraftsteigerung bis zum Bruch deutlich genauere Bewegungen aufgenommen werden können. Eine Beeinflussung durch dynamische Schwingungen kann so ausgeschlossen werden. Die Ermittlung des E-Moduls während der dynamischen Versuche zeigt hingegen den auftretenden Spannungsabbau durch Ermüdung (siehe Abb. 3.4).

Die Last wird punktuell durch die Maschine über eine Ausgleichskalotte, die das Auftreten von Querkräften unterbindet, aufgebracht. Damit die Punktlast als eine gleichmäßige Linienlast auf den Probekörper wirkt, wird ein Lastverteiler in Form eines HE-A 120 Stahlprofils unter der Kalotte eingelegt.

Um eine ungehinderte Durchbiegung zu ermöglichen, werden zwei Auflagerplatten aus Stahlblech mit einer Höhe von 25 mm in der Vorrichtung installiert. Da die Pflasterplatten geringfügige Unebenheiten aufweisen können, wird auf die Lagerplatten sowie unter dem Lastverteiler vor jedem Versuch eine Schicht Ausgleichsmörtel aufgetragen. Diese Ausgleichsschicht dient auch dem Ausnivellieren der Platten und des Stahlträgers, um ein gleichmäßiges Aufbringen der Belastung zu garantieren. Damit können die Versuche als Drei-Punkt-Biegeversuche bezeichnet werden. Die nachstehenden Abbildungen Abb. 3.5 und Abb. 3.6 zeigen den Versuchsaufbau piktografisch.

Anschließend werden die Wegaufnehmer angebracht. Nach den ersten Versuchen hat sich gezeigt, dass das Anbringen an sieben Positionen am zielführendsten ist. Dadurch können die Werte einerseits gegenkontrolliert und andererseits geeignete Mittelwerte berechnet werden.

Die Lastaufbringung und somit der Versuchsstart erfolgte erst am Folgetag, um den Ausgleichsschichten die erforderliche Aushärtungszeit zu gewähren.

Der Versuchsablauf in Aufzählungsschritten:

- ◆ Aufreißen der Achsen am Probekörper (zur Positionierung)
- ◆ Auftragen der Ausgleichsschicht auf die Lagerplatten
- ◆ Einheben des Probekörpers mit anschließendem Nivellieren
- ◆ Auftragen der Ausgleichsschicht auf dem Probekörper
- ◆ Einheben des Lastverteilers mit anschließendem Nivellieren
- ◆ Anbringen der Wegaufnehmer
- ◆ Aushärten der Ausgleichsschicht
- ◆ Lastaufbringung am Folgetag

Der Versuch gilt als abgeschlossen, wenn es zum Bruch der Probe kommt oder die Prüfmaschine zwei Millionen Lastwechsel erreicht.

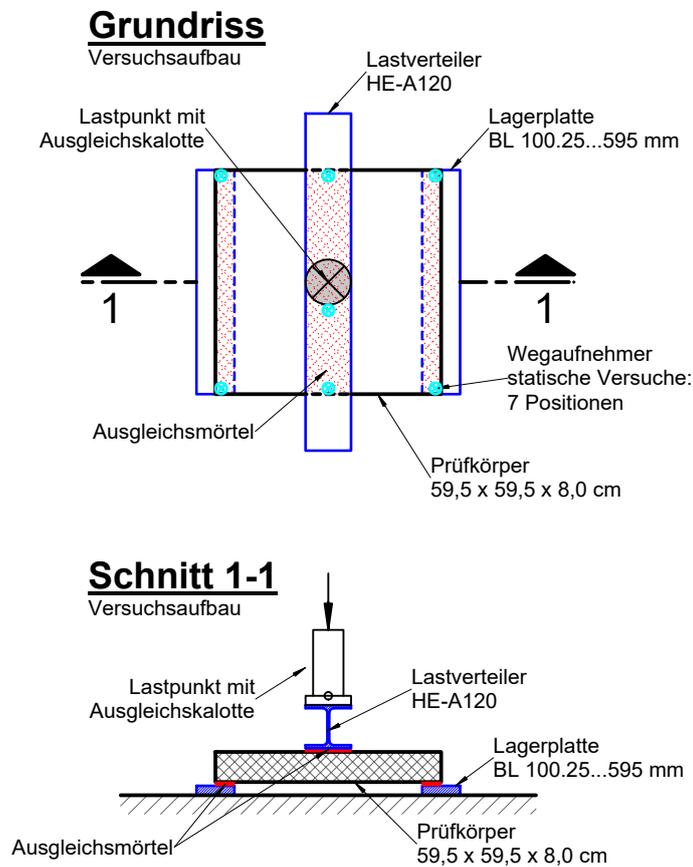


Abb. 3.5: Skizze zum Versuchsaufbau



Abb. 3.6: Versuchsaufbau im Labor

3.3 Übersicht über die geprüften Prüfkörper

Bis zum 06. Mai 2020 wurden drei vollständige Serien der Betonpflastersteine dynamisch und drei Probekörper statisch geprüft. Die nachfolgende Tabelle 3.1 zeigt die Ergebnisse zusammengefasst.

dynamisch

Probe	Laststufe	Lastspiele	Anmerkung
01 – 13.01.2020	5 bis 20 kN	955.407	
02 – 17.01.2020		Durchläufer	Bruch bei Ausbau
03 – 22.01.2020		1.193.472	
04 – 29.01.2020	5 bis 15 kN	Durchläufer	Bruch bei Ausbau, Abschaltung Maschine
05 – 03.02.2020		Durchläufer	Bruch bei Ausbau
06 – 10.02.2020		Durchläufer	Bruch bei Ausbau
07 – April 2020	5 bis 25 kN	72.837	keine Wegaufnehmer installiert
08 – April 2020		55.361	
09 – Mai 2020		1.647.552	

statisch

Probe	Bruchlast	w_{\max}	Anmerkung
01 – 05.02.2020	31,75 kN	0,23 mm	
02 – 05.02.2020	-	-	ohne Ausgleichsschicht, keine Wertung
03 – 06.02.2020	33,69 kN	0,25 mm	
04 – 07.02.2020	30,08 kN	0,23 mm	

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der bisher durchgeführten Prüfungen an Pflastersteinen – Stand 06. Mai 2020

Erkennbar ist, dass es bereits bei den dynamischen Prüfungen der Laststufe bis 20 kN zum Ermüdungsbruch kommt. Bei der Laststufe bis 25 kN ist daher eine deutlich geringere Anzahl an Lastspielwechsel nötig, um einen Ermüdungsbruch herbeizuführen. Allerdings ist auch deutlich erkennbar, dass die Probekörper eine starke Streuung bezüglich der Bruchspielzahl zeigen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Werkstoff durch seine Porosität stark unterschiedliche Schädigung durch Mikrorisse aufweist.

Bei den statischen Prüfungen ist ersichtlich, dass der Prüfkörper ohne Ausgleichsschicht eine deutlich geringere Bruchlast aufweist. Diese Abweichung ist vermutlich auf die geringen Unebenheiten der Platten zurückzuführen. Die Ergebnisse der übrigen drei Probekörper weisen nur geringe Unterschiede auf. Bei der Berechnung der Materialkennwerte werden deshalb nur die Ergebnisse der Prüfungen mit Ausgleichsschicht berücksichtigt.

Ermittelt man die Standardabweichung für die einzelnen Versuchsserien der dynamischen Prüfungen, wird die starke Streuung erkennbar. Die Standardabweichung für die ermittelte Bruchlast bei den statischen Prüfungen ist hingegen deutlich geringer.

dynamisch

Versuche	n	Mittelwert	Standardabweichung	Anmerkung
V01 – V03	3	1.382.848 Lastspiele	446.853 Lastspiele	V02 Ausreißer
V04 – V06	3	2.144.517 Lastspiele	203.622 Lastspiele	V04 Zähler zurückgesetzt
V07 – V09	3	591.917 Lastspiele	746.481 Lastspiele	V09 Ausreißer

statisch

V01, V03, V04	3	31,84 kN	1,48 kN	geringe Abweichung
---------------	---	----------	---------	--------------------

Tabelle 3.2: Standardabweichungen der dynamischen bzw. statischen Versuche

Die Ergebnisse der dynamischen Prüfungen werden im Kapitel 4.2 ausgewertet und zu einer Wöhlerkurve zusammengefasst. Mit dieser können für angenommene Lastzyklen maximale Spannungen und dadurch die Ermüdungsfestigkeit abgelesen werden.

Da für die Oberbaubemessung der RVS 03.08.63: 2016 Standardaufbauten mit maximal zulässigen Lastzyklen erstellt werden sollen, wird in diesem Fall mit der ermittelten Wöhlerkurve und einer Spannungsberechnung mittels FEM-Simulation ein Dimensionierungskonzept entwickelt.

Mit den Werten der statischen Prüfung wird im Kapitel 4.3 über die Durchbiegung der Platten der E-Modul berechnet. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Pflasterbetonsteinplatten nach erfolgtem Dauerschwingversuch. Zum Bruch der Platte ist es hierbei durch den Stoß bei der Entlastung der Maschine gekommen.



Abb. 3.7: Exemplarische Abbildung – Versuch 02 (a)



Abb. 3.8: Exemplarische Abbildung – Versuch 02 (b)

4 Versuchsauswertung

4.1 Ermittlung der Materialparameter

Da bei den Versuchen nicht nur die Lastspielwechsel ermittelt, sondern durch die Installation mehrerer Wegaufnehmer auch Durchbiegungswerte aufgenommen werden, lassen sich mit diesen Daten verschiedene Materialparameter berechnen.

Dazu eignen sich besonders die Daten der statischen Versuche. Da es sich bei den Versuchen um einen Drei-Punkt-Biegezugversuch handelt und die aufgenommenen Durchbiegungen deutlich die Verformung eines statischen Systems auf zwei seitlichen Lagerpunkten zeigen (siehe Abb. 4.1), wird für die Auswertung und Rückrechnung zum E-Modul die Balkentheorie angewendet und nicht auf die Kirchhoffsche-Plattentheorie zurückgegriffen. Die Setzung der Bettung an den Lagerpunkten wird in der nachstehenden Abbildung durch die leichte Verfärbung sichtbar. Bei der Berechnung wurde dieser Umstand berücksichtigt und von der maximalen Durchbiegung in Feldmitte abgezogen.

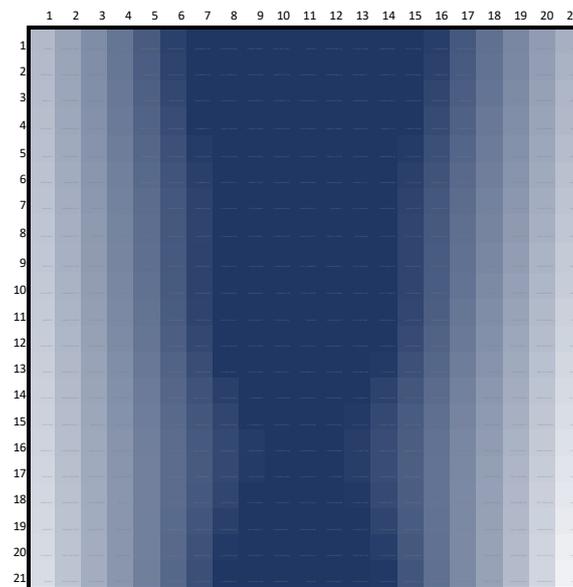


Abb. 4.1: Durchbiegung der Platte aus Versuch 01 – statisch.
Blau: Bereich starker Durchbiegung
Weiß: Bereich der Lagerung

Bei den dynamischen Versuchen kommt es allerdings vermehrt zu Vibrationen, daher lieferten einige der Wegaufnehmer keine plausiblen Werte. Dennoch kann mit einigen der plausiblen Werte gut veranschaulicht werden, wie es zur Abnahme des E-Moduls durch den Dauerschwingversuch kommt. Diese Diagramme sind in den Kapiteln zur Auswertung der dynamischen Versuche (Kapitel 4.2.2 bis Kapitel 4.2.10) enthalten.

4.1.1 Formeln zur Ermittlung der Materialkennwerte

Ermittlung des E-Moduls für das statische System eines Einfeldträgers [14]:

$$u_{max} = \frac{F_{max} * l^3}{48 * EI} [mm] \quad \text{Gl. 1}$$

Die maximale Durchbiegung tritt in Feldmitte auf und ergibt durch Umformen die Formel für den E-Modul:

$$E = \frac{F_{max} * l^3}{u_{max} * 48 * I} [N/mm^2] \quad \text{Gl. 2}$$

mit den Variablen:

F_{max}	[N]	aus den Versuchen ermittelte Bruchlast
l	[mm]	Stützlänge
u_{max}	[mm]	aus den Versuchen ermittelte maximale Durchbiegung in Feldmitte
I	[mm ⁴]	Trägheitsmoment für einen Rechteckquerschnitt

$$I = \frac{b * h^3}{12} [mm^4] \quad \text{Gl. 3}$$

mit den Variablen:

b	[mm]	Breite des Probekörpers
h	[mm]	Höhe des Probekörpers

Ermittlung der Biegezugfestigkeit laut ÖNORM EN 1339: 2007 01 01:

Dieser Materialparameter gibt die maximale Zugspannung (bzw. Druckspannung) der Randfaser eines Bauteils, die zum Bruch führt, wieder [37].

$$T = \frac{3 * P * L}{2 * b * t^2} [N/mm^2] \quad \text{Gl. 4}$$

mit den Variablen:

P	[N]	aus den Versuchen ermittelte Bruchlast, entspricht F_{max}
L	[mm]	Stützlänge, entspricht l
b	[mm]	Breite des Probekörpers
t	[mm]	Höhe des Probekörpers, entspricht h

Die Formel der ÖNORM EN 1339: 2007 01 01 entspricht der Spannungsermittlung eines Biegeträgers auf zwei Stützen und kann somit auch folgendermaßen ermittelt werden:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} [N/mm^2] \quad \text{Gl. 5}$$

mit den Variablen:

M_{max}	[Nmm]	einwirkendes Biegemoment in Feldmitte, berechnet aus der ermittelten Bruchlast.
W	[mm ³]	Widerstandsmoment für einen Rechteckquerschnitt

$$M_{max} = \frac{F_{max} * l}{4} [Nmm] \quad \text{Gl. 6}$$

mit den Variablen:

F_{max} [N] aus den Versuchen ermittelte Bruchlast

l [mm] Stützlänge

$$W = \frac{b * h^2}{6} [mm^3] \quad \text{Gl. 7}$$

mit den Variablen:

b [mm] Breite des Probekörpers

h [mm] Höhe des Probekörpers

Mit den Gleichungen Gl. 5 bis Gl. 7 werden auch die Spannungsberechnungen für die Wöhlerkurve durchgeführt.

4.2 Dynamische Versuche

4.2.1 Allgemeines

Aufgezeichnet werden bei den Dauerschwingversuchen die Lastzyklen mit den dazugehörigen Zeitstempeln, die minimalen und maximalen Werte der aufgetragenen Kraft sowie die entsprechende Durchbiegung. Zwar liegt bei den dynamischen Versuchen das Hauptaugenmerk auf der Ermittlung der Lastspielzahl, dennoch wird mit der aufgezeichneten Biegung auch der E-Modul berechnet. Dadurch kann die Abnahme des E-Moduls bei steigender Anzahl an Lastwechseln veranschaulicht werden.

Da bei jedem Versuch eine Vielzahl an Werten aufgenommen worden waren, wurden diese gemittelt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- ◆ Berechnung des E-Moduls für jeden Maximum- und Minimum-Wert der Durchbiegung
- ◆ Mittelwertberechnung der Maximum- und Minimum-Werte sämtlicher Wegaufnehmer
- ◆ Berechnung des E-Moduls mit den gemittelten Maximum- und Minimum-Werten für alle Wegaufnehmer
- ◆ Mittelwertberechnung der Maximum- und Minimum-Werte der aufgetragenen Kraft

Die gemittelten Werte sind zwar ohne Bedeutung für jegliche Materialkennwerte oder Berechnungen, da zum Beispiel der E-Modul durch Ermüdung konstant abnimmt und die Durchbiegung zunimmt, allerdings kann durch die ermittelte Kennziffer eine einfache Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden. Große Abweichungen vom Durchschnitt sind damit schnell erkennbar und es kann von Messfehlern ausgegangen werden.

Da die Werte nur zur Veranschaulichung dienen und keine Materialkennwerte ermittelt werden, wurde bei der Installation der Messgeräte für die Durchbiegung vorab in Kauf genommen, dass durch die Schwingungen mögliche Messfehler auftreten. Die Prüfung erfolgt mit 8 Hz, das bedeutet, dass pro Sekunde der Prüfkörper achtmal mit einer Amplitude bis 20 kN, was einem statischen Gewicht von ca. zwei Tonnen entspricht, be- und entlastet wird. Dadurch entstehen Vibrationen, wodurch es bei den empfindlichen Wegaufnehmern zu

zusätzlichen Bewegungen kommen kann. Um dies zu vermeiden, wäre ein anderer Versuchsaufbau erforderlich. Allerdings steht hierfür der Nutzen für die Auswertung, im Vergleich mit dem Aufwand zum Eliminieren der Fehler, in keiner Relation.

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Auswertungen nach Versuchskörpern zusammengefasst. Die nachfolgende Tabelle 4.1 erläutert die in den Auswertungstabellen vorkommenden Indizes:

Bezeichnung	Erläuterung
$U_{i,max}$	Durchbiegung bei Oberlast für Wegaufnehmer "i"
$U_{i,min}$	Durchbiegung bei Unterlast für Wegaufnehmer "i"
$\bar{E}_{i,max}$	mit Oberlast berechneter E-Modul für Wegaufnehmer "i"
$\bar{E}_{i,min}$	mit Unterlast berechneter E-Modul für Wegaufnehmer "i"
$U_{i,j,k,\dots,max}$	gemittelte Durchbiegung bei Oberlast für Wegaufnehmer "i, j, k, ..."
$U_{i,j,k,\dots,min}$	gemittelte Durchbiegung bei Unterlast für Wegaufnehmer "i, j, k, ..."
$\bar{E}^{u_{i,j,k,\dots,max}}$	mit gemittelter Durchbiegung bei Oberlast für Wegaufnehmer "i, j, k, ..." berechneter E-Modul
$\bar{E}^{u_{i,j,k,\dots,min}}$	mit gemittelter Durchbiegung bei Unterlast für Wegaufnehmer "i, j, k, ..." berechneter E-Modul
F_{max}	gemittelte aufgebrachte Oberlast
F_{min}	gemittelte aufgebrachte Unterlast

Tabelle 4.1: Erläuterung der Indizes für die Auswertung

Grundriss

Bezeichnung Wegaufnehmer - dynamisch

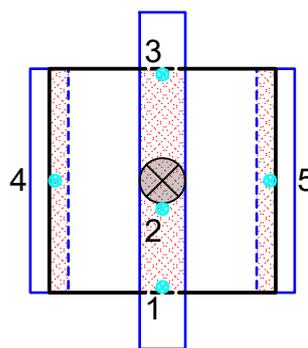


Abb. 4.2: Bezeichnung und Positionierung der Wegaufnehmer

4.2.2 Versuch 01: 5-20 kN

Bei diesem Versuch zeigen die gemittelten Werte der Durchbiegung beim Wegaufnehmer 1 keine plausiblen Werte, daher kann hier von Messfehlern ausgegangen werden. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Die Werte des Wegaufnehmers 2 sind plausibel und wurden daher für den Verlauf des E-Moduls herangezogen.

dynamisch

Lastzyklen= 955.407 – Bruch

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]						
u _{1, max} =	0,099*	u _{2, max} =	0,209						
u _{1, min} =	0,033*	u _{2, min} =	0,122						
E	[kN/cm ²]	E	[kN/cm ²]						
E _{1, max} =	2.799*	E _{2, max} =	1.323						
E _{1, min} =	2.243*	E _{2, min} =	606						

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm ²]	
u _{1,2 max} =	0,154	F _{max} =	20,72	E _{u1,2, max} =	1.787	Messfehler bei Pos. 1
u _{1,2 min} =	0,078	F _{min} =	5,50	E _{u1,2, min} =	941	Messfehler bei Pos. 1

*Messfehler, Wert nicht plausibel

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 01 – dynamisch

Die Abb. 4.3 zeigt deutlich den auftretenden Spannungsabbau durch Ermüdung. Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Sehr gut erkennbar ist der Abbruch des Verlaufs beim Bruch der Probe.

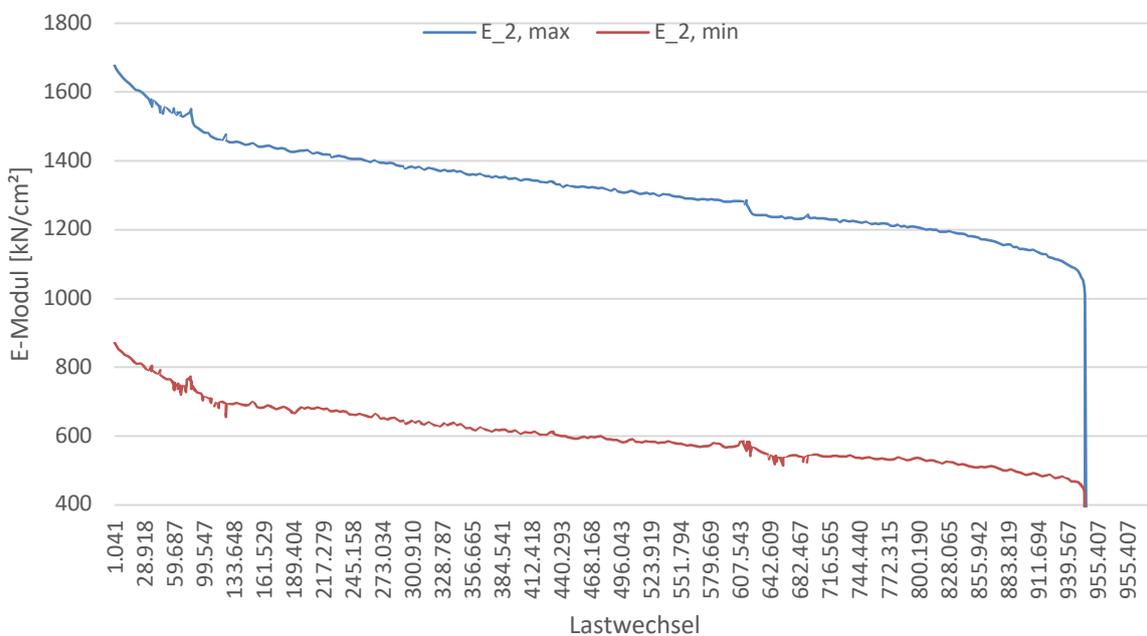


Abb. 4.3: Verlauf des E-Moduls V01 – Wegaufnehmer 2

4.2.3 Versuch 02: 5-20 kN

Bei diesem Versuch zeigen die gemittelten Werte der Durchbiegung beim Wegaufnehmer 3 keine plausiblen Werte, daher kann hier von Messfehlern ausgegangen werden. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Für den Verlauf des E-Moduls sind allerdings nur die Werte des Wegaufnehmers 2 herangezogen worden.

dynamisch

Lastzyklen= 1.999.666 – Durchläufer

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]				
u _{1, max} =	0,187	u _{2, max} =	0,206	u _{3, max} =	0,143*				
u _{1, min} =	0,11	u _{2, min} =	0,113	u _{3, min} =	0,071*				
E	[kN/cm²]	E	[kN/cm²]	E	[kN/cm²]				
E _{1, max} =	1.490	E _{2, max} =	1.354	E _{3, max} =	1.944*				
E _{1, min} =	680	E _{2, min} =	661	E _{3, min} =	1.047*				

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm²]	
u _{1,2,3 max} =	0,179	F _{max} =	20,94	E _{u1,2,3 max} =	1.557	Messfehler bei Pos. 3
u _{1,2,3 min} =	0,098	F _{min} =	5,60	E _{u1,2,3 min} =	759	Messfehler bei Pos. 3

* Messfehler, Wert nicht plausibel

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 02 – dynamisch

Die Abb. 4.4 zeigt nur einen geringen Spannungsabbau. Da es sich bei dem Versuch um einen Durchläufer bei der mittleren Spannungsamplitude handelt, ist es wahrscheinlich, dass der Probekörper weniger mikroskopische Risse und Fehlstellen aufweist und dadurch deutlich mehr Lastwechsel verträgt.

Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Der größere Spannungsabbau im Bereich von 600.000 Lastspielen könnte auf eine abrupte Querschnittsreduzierung durch größere Einschlüsse hinweisen. Ein Abbruch des Verlaufs konnte nicht aufgezeichnet werden, da die Grenzlastspielzahl erreicht wurde.

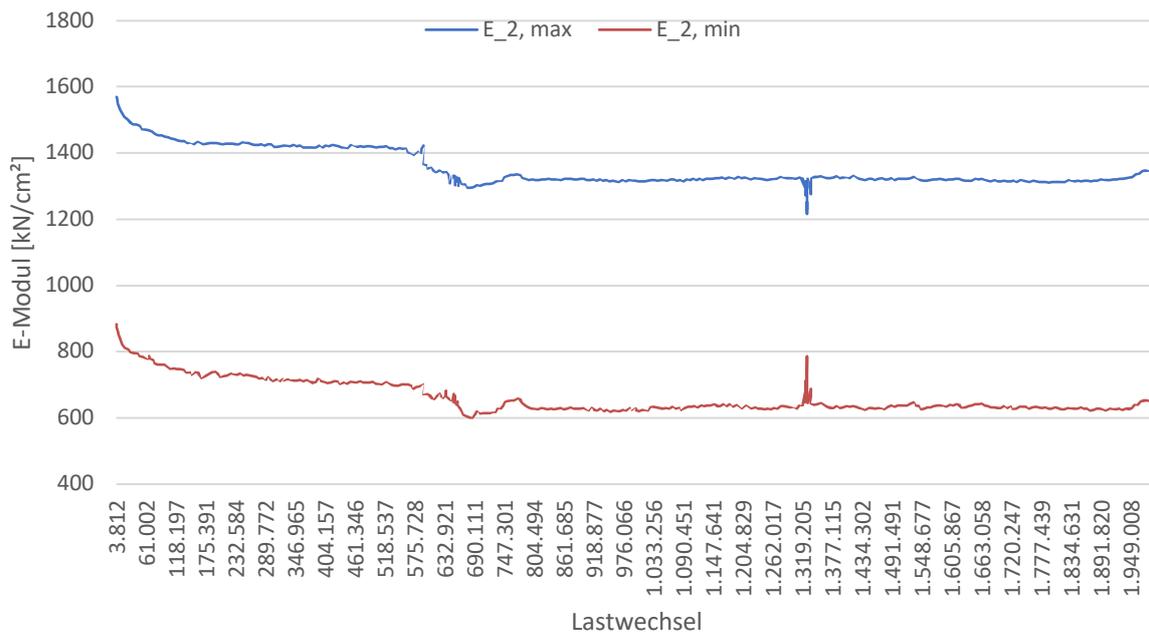


Abb. 4.4: Verlauf des E-Moduls V02 – Wegaufnehmer 2

4.2.4 Versuch 03: 5-20 kN

Bei diesem Versuch zeigen die gemittelten Werte der Durchbiegung bei den Wegaufnehmern 2 und 3 keine plausiblen Werte, daher kann hier von Messfehlern ausgegangen werden. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Für den Verlauf des E-Moduls sind daher die Werte des Wegaufnehmers 1 herangezogen worden.

dynamisch

Lastzyklen= 1.193.471 – Bruch

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]				
u _{1, max}	0,201	u _{2, max}	0,159*	u _{3, max}	0,162*				
u _{1, min}	0,115	u _{2, min}	0,082*	u _{3, min}	0,105*				
E	[kN/cm ²]	E	[kN/cm ²]	E	[kN/cm ²]				
E _{1, max}	1.386	E _{2, max}	1.756*	E _{3, max}	1.714*				
E _{1, min}	684	E _{2, min}	967*	E _{3, min}	739*				

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm ²]	
u _{1,2,3 max}	0,174	F _{max}	20,88	E _{u1,2,3 max}	1.590	geringfügige Messfehler bei Pos. 2 & 3
u _{1,2,3 min}	0,101	F _{min}	5,83	E _{u1,2,3 min}	770	geringfügige Messfehler bei Pos. 2 & 3

*Messfehler, Wert nicht plausibel

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 03 – dynamisch

Die Abb. 4.5 zeigt deutlich den auftretenden Spannungsabbau durch Ermüdung. Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Sehr gut erkennbar ist der Abbruch des Verlaufs beim Bruch der Probe.



Abb. 4.5: Verlauf des E-Moduls V03 – Wegaufnehmer 1

4.2.5 Versuch 04: 5-15 kN

Mit Ausnahme von Wegaufnehmer 1 wurden bei diesem Versuch bei sämtlichen Wegaufnehmern unrealistische bzw. keine Werte aufgrund von Ausfall verzeichnet. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Für den Verlauf des E-Moduls sind daher die Werte des Wegaufnehmers 1 herangezogen worden.

dynamisch

Lastzyklen= 2.432.480 – Durchläufer (Lastzyklen >2 Mio. aufgrund von Abschaltung und Zurücksetzung des Zählers)

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]								
u _{1, max}	0,190	u _{2, max}	-*	u _{3, max}	-*	u _{4, max}	-*	u _{5, max}	-*
u _{1, min}	0,131	u _{2, min}	-*	u _{3, min}	-*	u _{4, min}	-*	u _{5, min}	-*
E	[kN/cm ²]								
E _{1, max}	1125	E _{2, max}	-*	E _{3, max}	-*	E _{4, max}	-*	E _{5, max}	-*
E _{1, min}	616	E _{2, min}	-*	E _{3, min}	-*	E _{4, min}	-*	E _{5, min}	-*

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm ²]	
u _{1,2,3 max}	0,882	F _{max}	15,90	E _{u1,2,3 max}	-*	Messfehler bei Pos. 2 & 3
u _{1,2,3 min}	0,833	F _{min}	6,01	E _{u1,2,3 min}	-*	Messfehler bei Pos. 2 & 3

* Messfehler, Wert nicht plausibel bzw. kein Wert vorhanden

Tabelle 4.5: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 04 – dynamisch

Die Abb. 4.6 zeigt nur einen geringen Spannungsabbau. Da es sich bei dem Versuch um einen Durchläufer bei der niedrigsten Spannungsamplitude handelt, ist es wahrscheinlich, dass beim Probekörper die Schädigungen durch die Lastwechsel deutlich geringer ausfallen.

Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Der größere Spannungsabbau bei rund einer Million Lastspiele könnte auf eine abrupte Querschnittsreduzierung durch größere Einschlüsse oder ein Verrutschen des Wegaufnehmers hinweisen. Ein Abbruch des Verlaufs konnte nicht aufgezeichnet werden, da die Grenzlastspielzahl erreicht wurde.

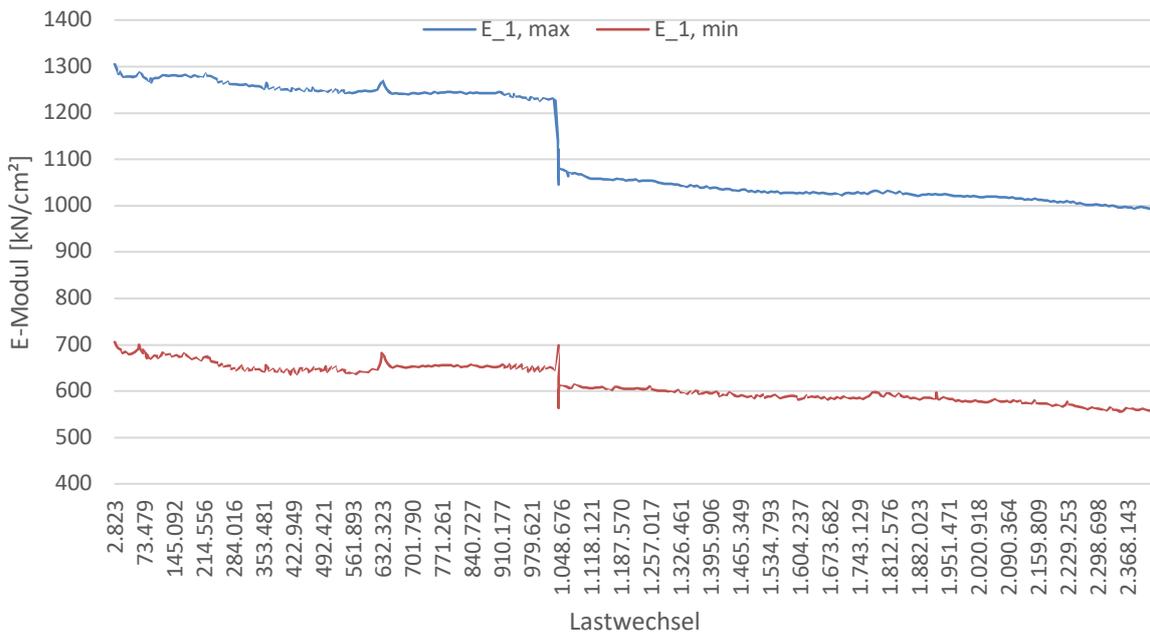


Abb. 4.6: Verlauf des E-Moduls V04 – Wegaufnehmer 1

4.2.6 Versuch 05: 5-15 kN

Bei diesem Versuch wurden bei sämtlichen Wegaufnehmern unrealistische bzw. keine Werte aufgrund von Ausfall verzeichnet. Der Wegaufnehmer 1 lieferte noch die plausibelsten Werte, vor allem in Bezug auf den Verlauf des E-Moduls. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1.

dynamisch

Lastzyklen= 1.999.489 – Durchläufer

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
U _{1, max}	0,104*	U _{2, max}	-*	U _{3, max}	-*	U _{4, max}	-*	U _{5, max}	-*
U _{1, min}	0,051*	U _{2, min}	-*	U _{3, min}	-*	U _{4, min}	-*	U _{5, min}	-*
E	[kN/cm ²]								
E _{1, max}	2021*	E _{2, max}	-*	E _{3, max}	-*	E _{4, max}	-*	E _{5, max}	-*
E _{1, min}	1486*	E _{2, min}	-*	E _{3, min}	-*	E _{4, min}	-*	E _{5, min}	-*

kombinierte gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm ²]	
U _{1,2,3 max}	-0,023	F _{max}	15,77	E _{u1,2,3 max}	-*	Messfehler bei Pos. 2 & 3
U _{1,2,3 min}	-0,064	F _{min}	5,63	E _{u1,2,3 min}	-*	Messfehler bei Pos. 2 & 3

*Messfehler, Wert nicht plausibel bzw. kein Wert vorhanden

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 05 – dynamisch

Die Abb. 4.7 zeigt nur einen geringen Spannungsabbau. Da es sich bei dem Versuch um einen Durchläufer bei der niedrigsten Spannungsamplitude handelt, ist es wahrscheinlich, dass beim Probekörper die Schädigungen durch die Lastwechsel deutlich geringer ausfallen.

Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Die annähernd gleichen E-Module zu Beginn des Versuchs zeigen hier deutlich die vorhandenen Messfehler. Der weitere Verlauf der Kurve ist allerdings qualitativ richtig, auch wenn die Werte unrealistisch hoch sind. Ein Abbruch des Verlaufs konnte nicht aufgezeichnet werden, da die Grenzlasterzahl erreicht wurde.

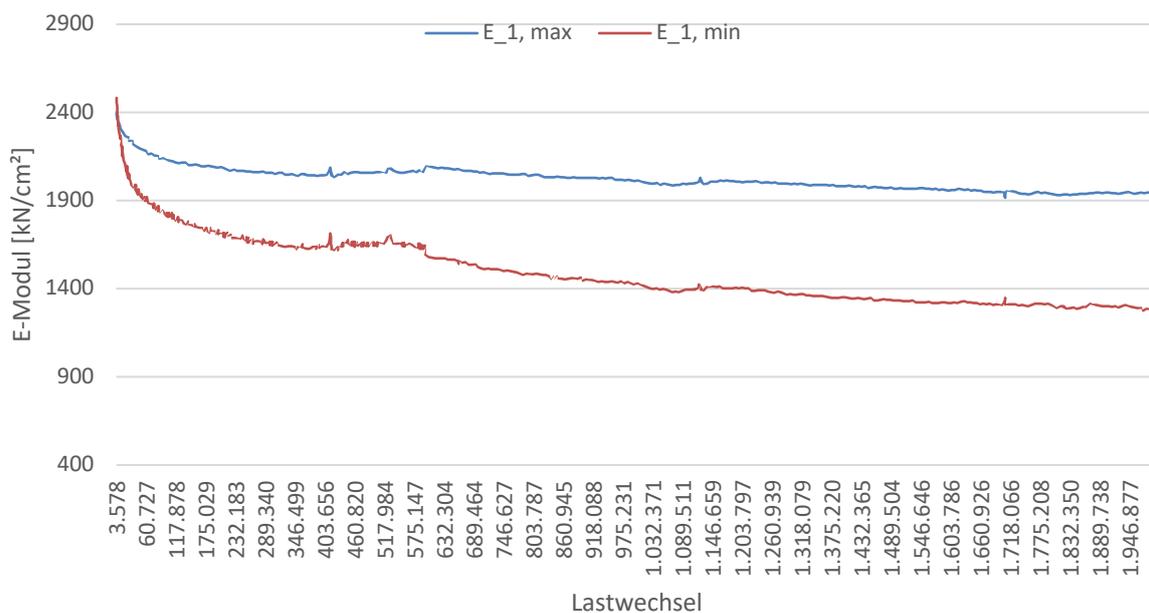


Abb. 4.7: Verlauf des E-Moduls V05 – Wegaufnehmer 1

4.2.7 Versuch 06: 5-15 kN

Bei diesem Versuch sind die Wegaufnehmer 3, 4 und 5 zum Teil ausgefallen bzw. lieferten keine plausiblen Werte. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Für den Verlauf des E-Moduls sind die Werte des Wegaufnehmers 2 herangezogen worden.

dynamisch

Lastzyklen= 2.001.583 – Durchläufer

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	0,130	u _{2, max} =	0,167	u _{3, max} =	-*	u _{4, max} =	0,111*	u _{5, max} =	-*
u _{1, min} =	0,082	u _{2, min} =	0,118	u _{3, min} =	-*	u _{4, min} =	0,090*	u _{5, min} =	-*
E	[kN/cm²]								
E _{1, max} =	1.594	E _{2, max} =	1.240	E _{3, max} =	-*	E _{4, max} =	1.862*	E _{5, max} =	-*
E _{1, min} =	875	E _{2, min} =	617	E _{3, min} =	-*	E _{4, min} =	806*	E _{5, min} =	-*

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm²]	
u _{1,2,3 max} =	0,131	F _{max} =	15,59	E _{u1,2,3 max} =	1.583	Messfehler bei Pos. 3
u _{1,2,3 min} =	0,087	F _{min} =	5,44	E _{u1,2,3 min} =	826	Messfehler bei Pos. 3

*Messfehler, Wert nicht plausibel bzw. kein Wert vorhanden

Tabelle 4.7: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 06 – dynamisch

Die Abb. 4.8 zeigt nur einen geringen Spannungsabbau. Da es sich bei dem Versuch um einen Durchläufer bei der niedrigsten Spannungsamplitude handelt, ist es wahrscheinlich, dass beim Probekörper die Schädigungen durch die Lastwechsel deutlich geringer ausfallen.

Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Der größere Sprung zu Beginn des Versuchs könnte auf ein Abrutschen des Wegaufnehmers hindeuten. Ein Abbruch des Verlaufs konnte nicht aufgezeichnet werden, da die Grenzlastspielzahl erreicht wurde.

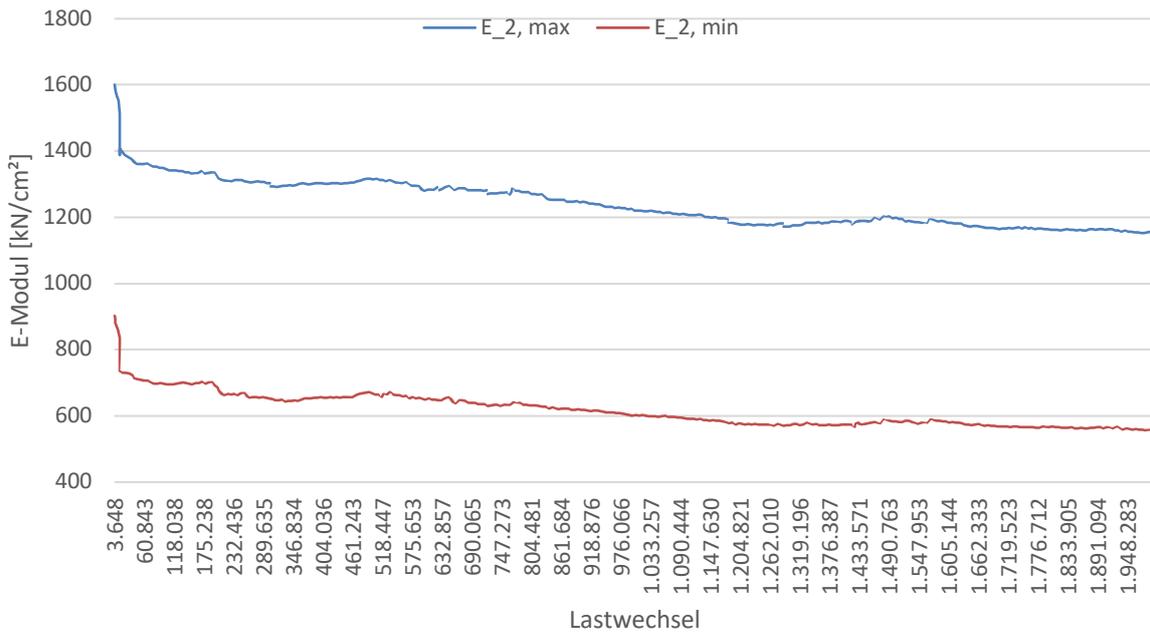


Abb. 4.8: Verlauf des E-Moduls V06 – Wegaufnehmer 2

4.2.8 Versuch 07: 5-25 kN

Bei diesem Versuch wurde auf die Installation der Wegaufnehmer verzichtet. Es wurde nur die Bruchlastspielzahl aufgezeichnet.

dynamisch

Lastzyklen= 72.837 – Bruch

Tabelle 4.8: Ermittelte Lastspiele bei Versuch 07 – dynamisch

4.2.9 Versuch 08: 5-25 kN

Bei diesem Versuch wurden bei sämtlichen Wegaufnehmern unrealistische bzw. keine Werte aufgrund von Ausfall verzeichnet. Die Wegaufnehmer 1 und 2 lieferten hier noch die plausibelsten Werte, vor allem in Bezug auf den Verlauf des E-Moduls. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Für den Verlauf des E-Moduls sind die Werte des Wegaufnehmers 1 herangezogen worden.

dynamisch

Lastzyklen= 55.361 – Bruch

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	0,157*	u _{2, max} =	-*	u _{3, max} =	0,164*	u _{4, max} =	-*	u _{5, max} =	-*
u _{1, min} =	0,060*	u _{2, min} =	-*	u _{3, min} =	0,072*	u _{4, min} =	-*	u _{5, min} =	-*
E	[kN/cm ²]								
E _{1, max} =	2.196*	E _{2, max} =	1.302	E _{3, max} =	2.117*	E _{4, max} =	-*	E _{5, max} =	-*
E _{1, min} =	1.201*	E _{2, min} =	-*	E _{3, min} =	1.018*	E _{4, min} =	-*	E _{5, min} =	-*

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm ²]	
u _{1,2,3 max} =	-0,092	F _{max} =	25,47	E _{u1,2,3 max} =	-*	generelle Messfehler
u _{1,2,3 min} =	-0,190	F _{min} =	5,45	E _{u1,2,3 min} =	-*	generelle Messfehler

*Messfehler, Wert nicht plausibel bzw. kein Wert vorhanden

Tabelle 4.9: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 05 – dynamisch

Die Abb. 4.9 zeigt deutlich den auftretenden Spannungsabbau durch Ermüdung. Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Sehr gut erkennbar ist der Abbruch des Verlaufs beim Bruch der Probe.

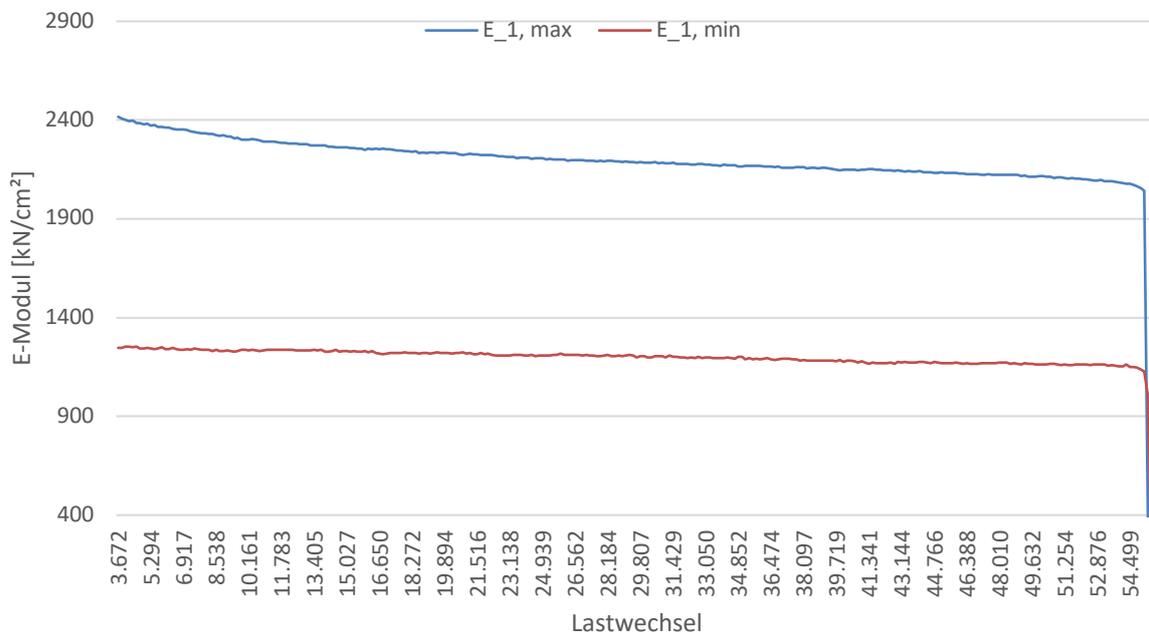


Abb. 4.9: Verlauf des E-Moduls V08 – Wegaufnehmer 1

4.2.10 Versuch 09: 5-25 kN

Bei diesem Versuch zeigen die gemittelten Werte der Durchbiegung bei den Wegaufnehmern 2, 4 und 5 keine plausiblen Werte, daher kann hier von Messfehlern ausgegangen werden. Eine Erklärung zu den Messfehlern findet sich in Kapitel 4.2.1. Für den Verlauf des E-Moduls sind die Werte des Wegaufnehmers 1 herangezogen worden.

dynamisch

Lastzyklen= 1.647.552 – Bruch

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	-*	u _{2, max} =	0,296	u _{3, max} =	0,220	u _{4, max} =	-*	u _{5, max} =	-*
u _{1, min} =	-*	u _{2, min} =	0,185	u _{3, min} =	0,161	u _{4, min} =	-*	u _{5, min} =	-*
E	[kN/cm^{2}]	E	[kN/cm^{2}]	E	[kN/cm^{2}]	E	[kN/cm^{2}]	E	[kN/cm ²]
E _{1, max} =	-*	E _{2, max} =	1.168	E _{3, max} =	1.562	E _{4, max} =	-*	E _{5, max} =	-*
E _{1, min} =	-*	E _{2, min} =	424	E _{3, min} =	424	E _{4, min} =	-*	E _{5, min} =	-*

kombinierte, gemittelte Werte

Durchbiegung		Kraft		E-Modul		Anmerkungen
u	[mm]	F	[kN]	E	[kN/cm ²]	
u _{1,2,3 max} =	0,212	F _{max} =	25,49	E _{u1,2,3 max} =	1.601	Messfehler bei Pos. 1
u _{1,2,3 min} =	0,128	F _{min} =	5,57	E _{u1,2,3 min} =	580	Messfehler bei Pos. 1

* Messfehler, Wert nicht plausibel bzw. kein Wert vorhanden

Tabelle 4.10: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 05 – dynamisch

Die Abb. 4.10 zeigt deutlich den auftretenden Spannungsabbau durch Ermüdung. Die auftretenden, geringeren Sprünge im Verlauf sind auf kleinere Messfehler durch Vibrationen während einiger Lastwechsel oder kleinerer Einschlüsse in der Struktur zurückzuführen. Der größere Sprung zu Beginn des Versuchs könnte auf ein Abrutschen des Wegaufnehmers hindeuten. Sehr gut erkennbar ist der Abbruch des Verlaufs beim Bruch der Probe.

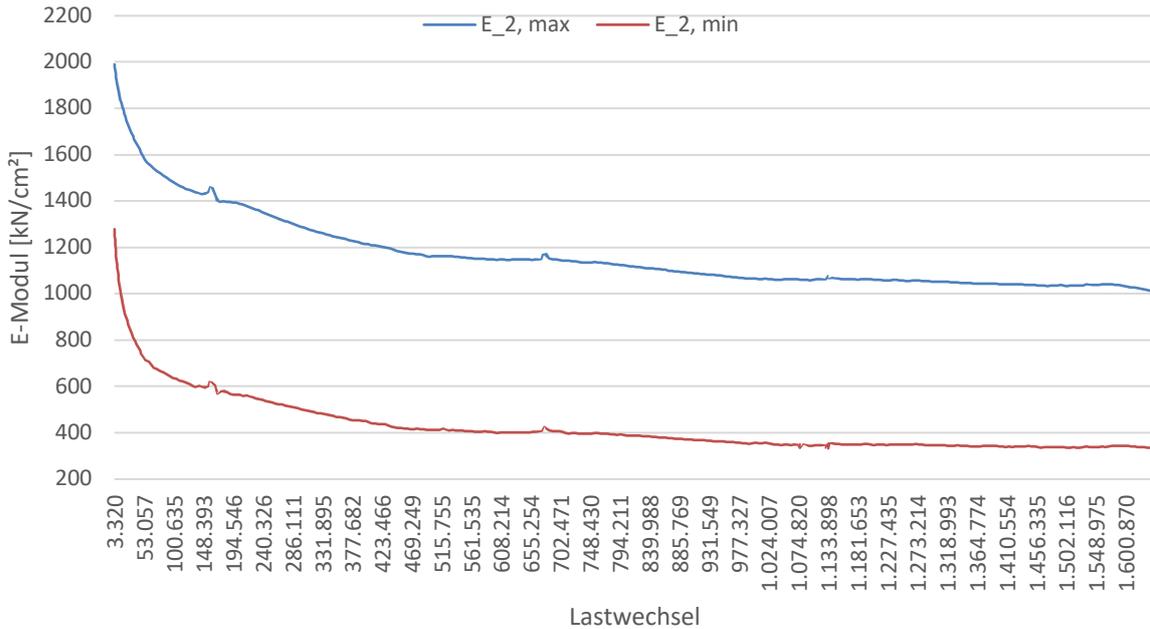


Abb. 4.10: Verlauf des E-Moduls V09 – Wegaufnehmer 2

4.3 Statische Versuche

4.3.1 Allgemeines

Da es sich bei den Versuchen um einen Drei-Punkt-Biegezugversuch handelt und die aufgenommenen Durchbiegungen deutlich die Verformung eines statischen Systems auf zwei seitlichen Lagerpunkten zeigen (siehe Abb. 4.13 bis Abb. 4.16), wird für die Auswertung und Rückrechnung zum E-Modul die Balkentheorie angewendet und nicht auf die Kirchhoffsche-Plattentheorie zurückgegriffen. Die Setzung der Bettung an den Lagerpunkten wird in den nachstehenden Abbildungen, die in den Versuchsergebnissen dargestellt sind, durch die leichte Verfärbung sichtbar. Bei der Berechnung wurde dieser Umstand berücksichtigt und von der maximalen Durchbiegung in Feldmitte abgezogen.

Aufgezeichnet werden bei den statischen Biegeversuchen die aufgebrachte Kraft bis zum Bruch mit den dazugehörigen Zeitstempeln im Abstand von 200 Millisekunden und der Weg der Wegaufnehmer. Mit den Werten der Wegaufnehmer lässt sich die tatsächliche Durchbiegung ermitteln und im weiteren Verlauf der E-Modul berechnen.

Da bei jedem Versuch eine Vielzahl an Werten aufgezeichnet worden waren, wurden diese gemittelt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- ◆ Mittelwertberechnung der Werte sämtlicher Wegaufnehmer
- ◆ Durchbiegung durch Mittelung der Wegaufnehmer 1, 2, 3 gemäß Abb. 4.11
- ◆ tatsächliche Durchbiegung der Platte durch Subtraktion der gemittelten Wegaufnehmer 1, 2, 3 & 4, 5, 6, 7 gemäß Abb. 4.11 & Abb. 4.12
- ◆ E-Modul-Berechnung mit gemittelten Werten

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Auswertungen nach Versuchskörpern zusammengefasst. Die Abb. 4.11 zeigt die Positionierung und Kennzeichnung der installierten Wegaufnehmer.

Die nachfolgende Tabelle 4.13 erläutert die in den Auswertungstabellen vorkommenden Indizes:

Bezeichnung	Erläuterung
$U_{i, \max}$	Durchbiegung bei Bruchlast für Wegaufnehmer "i"
$U_{1,2,3, \max}$	gemittelte Durchbiegung bei Bruchlast für Wegaufnehmer 1, 2, 3
$\Delta U_{1,2,3-4,5,6,7}$	Differenz der gemittelten Durchbiegungen bei Bruchlast für die Wegaufnehmer 1, 2, 3 & 4, 5, 6, 7 (siehe Abb. 4.12)
E_{vi}	mit $\Delta U_{1,2,3-4,5,6,7}$ berechneter E-Modul für Versuch "i"

Tabelle 4.11: Erläuterung der Indizes für die Auswertung

Grundriss

Bezeichnung Wegaufnehmer

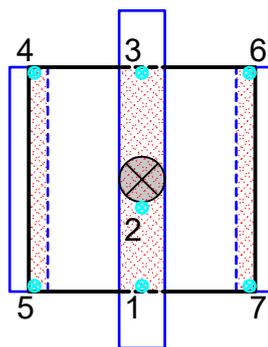


Abb. 4.11: Bezeichnung und Positionierung der Wegaufnehmer

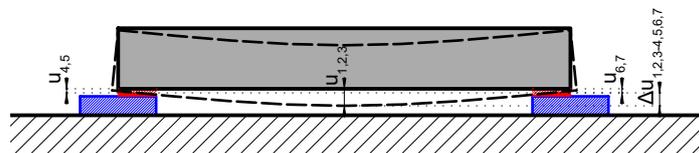


Abb. 4.12: Ermittlung von $\Delta U_{1,2,3-4,5,6,7}$

4.3.2 Versuch 01

Die ermittelten Werte sind bei allen Wegaufnehmern plausibel und zeigen nur geringe Abweichungen. Betrachtet man den Verlauf der Durchbiegung (Abb. 4.13), ist deutlich erkennbar, dass im Bereich der Auflagerplatten nur geringe Setzungswerte der Mörtelschicht aufgezeichnet wurden. Die Unterschiede an den Eckpunkten kommen durch den Ausgleich der Plattenunebenheiten durch die Mörtelschicht zustande.

statisch

Bruchkraft= 31,76 kN

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	0,201	u _{2, max} =	0,230	u _{3, max} =	0,261	u _{4, max} =	0,020
u _{5, max} =	0,040	u _{6, max} =	0,046	u _{7, max} =	0,008		

kombinierte, gemittelte Werte

u	[mm]	Δu	[mm]	E	[kN/cm ²]
u _{1,2,3, max} =	0,231	Δu _{1,2,3-4,5,6,7} =	0,202	E _{V01} =	2088

Tabelle 4.12: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 01 – statisch

Die nachstehende Abbildung zeigt deutlich die Verformung eines statischen Systems auf zwei seitlichen Linienlagern.

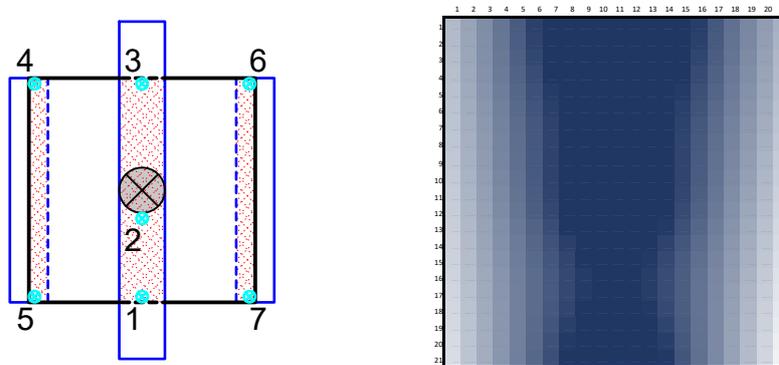


Abb. 4.13: Durchbiegung der Platte V01. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung

4.3.3 Versuch 02 – ohne Ausgleichsmörtel

Probeweise wurde ein Versuch ohne Ausgleichsmörtel durchgeführt, um die Unterschiede zu den Versuchen mit Mörtelschicht messen zu können. Dabei zeigen die Werte deutliche Abweichungen, allerdings nicht nur zu den Versuchen mit Mörtelschicht, sondern auch zueinander. Die Plattenunebenheit ist auch in Abb. 4.14 sehr gut erkennbar.

Die Unebenheit führt dabei zu einer geringfügigen Schiefstellung der Platte, was wiederum einen räumlichen Spannungszustand hervorruft. Dadurch erfolgt der Bruch der Platte unter deutlich geringerer Belastung.

Der Versuch zeigt zudem die Bedeutung einer fachgerecht ausgeführten Bettungsschicht, da diese Plattenunebenheiten ausgleicht (siehe auch Kapitel 2.2.2).

statisch

Bruchkraft= 27,59 kN

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	0,663	u _{2, max} =	0,596	u _{3, max} =	0,541	u _{4, max} =	0,201
u _{5, max} =	0,181	u _{6, max} =	0,056	u _{7, max} =	0,148		

kombinierte, gemittelte Werte

u	[mm]	Δu	[mm]	E	[kN/cm ²]
u _{1,2,3, max} =	0,600	Δu _{1,2,3-4,5,6,7} =	0,454	E _{V01} =	808

Tabelle 4.13: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 02 – statisch

Die nachstehende Abbildung zeigt deutlich die Verformung eines statischen Systems auf zwei seitlichen Linienlagern. Die Schiefstellung der Platte ist zudem ebenfalls sehr gut erkennbar. Dabei zeigen die hell eingefärbten Bereiche wenig, die dunkelblauen eine große Verschiebung. Durch den Farbgradienten wird ersichtlich, dass am linken Auflager die Platte satt aufliegt, während rechts eine Schiefstellung vorhanden ist, die durch die Belastung zwangsweise ausgeglichen wird. Dadurch kommt es zur Verkantung, die zum beschriebenen räumlichen Spannungszustand führt. Die positiven Werte der Eckpunkte werden als Folge der Nachgiebigkeit der Platte gegenüber dem Stahlaulager interpretiert.

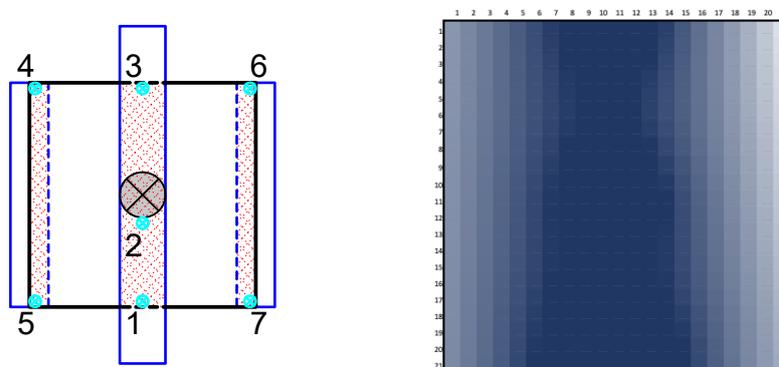


Abb. 4.14: Durchbiegung der Platte V02. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung

4.3.4 Versuch 03

Die ermittelten Werte sind bei allen Wegaufnehmern plausibel und zeigen nur geringe Abweichungen. Betrachtet man den Verlauf der Durchbiegung (Abb. 4.15), ist deutlich erkennbar, dass im Bereich der Auflagerplatten nur geringe Setzungswerte der Mörtelschicht aufgezeichnet wurden. Die Unterschiede an den Eckpunkten kommen durch den Ausgleich der Plattenunebenheiten durch die Mörtelschicht zustande.

statisch

Bruchkraft= 33,69 kN

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	0,209	u _{2, max} =	0,252	u _{3, max} =	0,232	u _{4, max} =	0,021
u _{5, max} =	0,043	u _{6, max} =	0,018	u _{7, max} =	0,003		

kombinierte, gemittelte Werte

u	[mm]	Δu	[mm]	E	[kN/cm ²]
u _{1,2,3, max} =	0,231	Δu _{1,2,3-4,5,6,7} =	0,210	E _{V01} =	2132

Tabelle 4.14: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 03 – statisch

Die nachstehende Abbildung zeigt deutlich die Verformung eines statischen Systems auf zwei seitlichen Linienlagern.

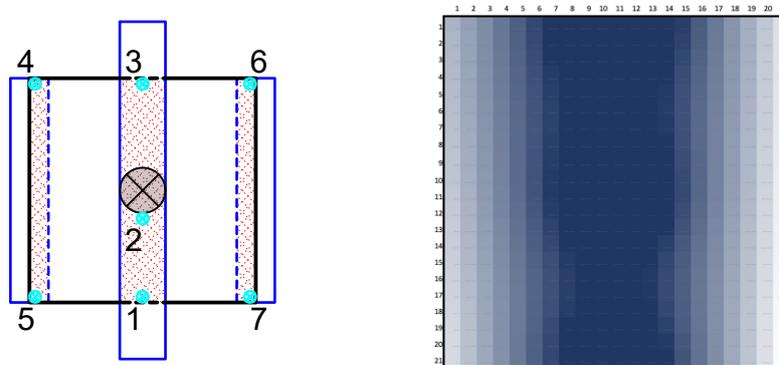


Abb. 4.15: Durchbiegung der Platte V03. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung

4.3.5 Versuch 04

Die ermittelten Werte sind bei allen Wegaufnehmern plausibel und zeigen nur geringe Abweichungen. Betrachtet man den Verlauf der Durchbiegung (Abb. 4.16), ist deutlich erkennbar, dass im Bereich der Auflagerplatten nur geringe Setzungswerte der Mörtelschicht aufgezeichnet wurden. Die Unterschiede an den Eckpunkten kommen durch den Ausgleich der Plattenunebenheiten durch die Mörtelschicht zustande.

statisch

Bruchkraft= 30,08 kN

Mittelwerte der Einzelpunkte

u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]	u	[mm]
u _{1, max} =	0,177	u _{2, max} =	0,226	u _{3, max} =	0,215	u _{4, max} =	0,029
u _{5, max} =	0,042	u _{6, max} =	0,016	u _{7, max} =	0,012		

kombinierte gemittelte Werte

u	[mm]	Δu	[mm]	E	[kN/cm ²]
u _{1,2,3, max} =	0,206	Δu _{1,2,3-4,5,6,7} =	0,181	E _{V01} =	2202

Tabelle 4.15: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 04 – statisch

Die nachstehende Abbildung zeigt deutlich die Verformung eines statischen Systems auf zwei seitlichen Linienlagern.

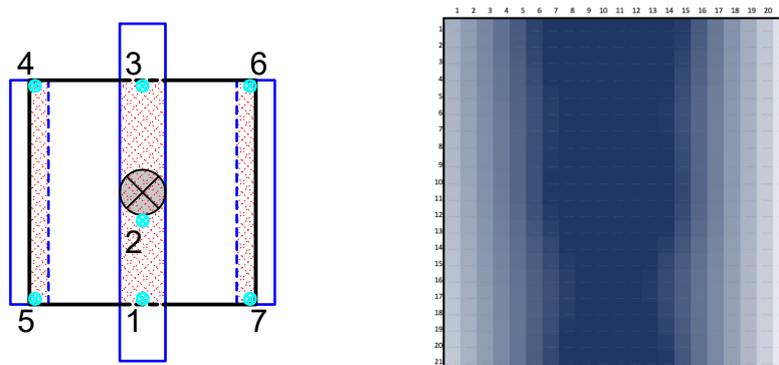


Abb. 4.16: Durchbiegung der Platte V04. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung

4.4 Materialkennwerte und Ergebnisse – Zusammenfassung

4.4.1 Wöhlerkurve

Spannungsermittlung für die Wöhlerkurve

Serie	F _{max} [N]	F _{min} [N]	σ _{max} [N/mm ²]	σ _{min} [N/mm ²]	σ _m [N/mm ²]	Δσ [N/mm ²]
1	20.850	5.640	4,475	1,211	2,843	3,264
2	15.750	5.690	3,382	1,222	2,302	2,159
3	25.510	5.380	5,477	1,155	3,316	4,322

σ_m..... Mittelspannung

Δσ Spannungsschwingbreite (= 2σ_a)

σ_a..... Spannungsamplitude

Tabelle 4.16: Spannungsermittlung im Querschnitt für Dauerschwingversuche

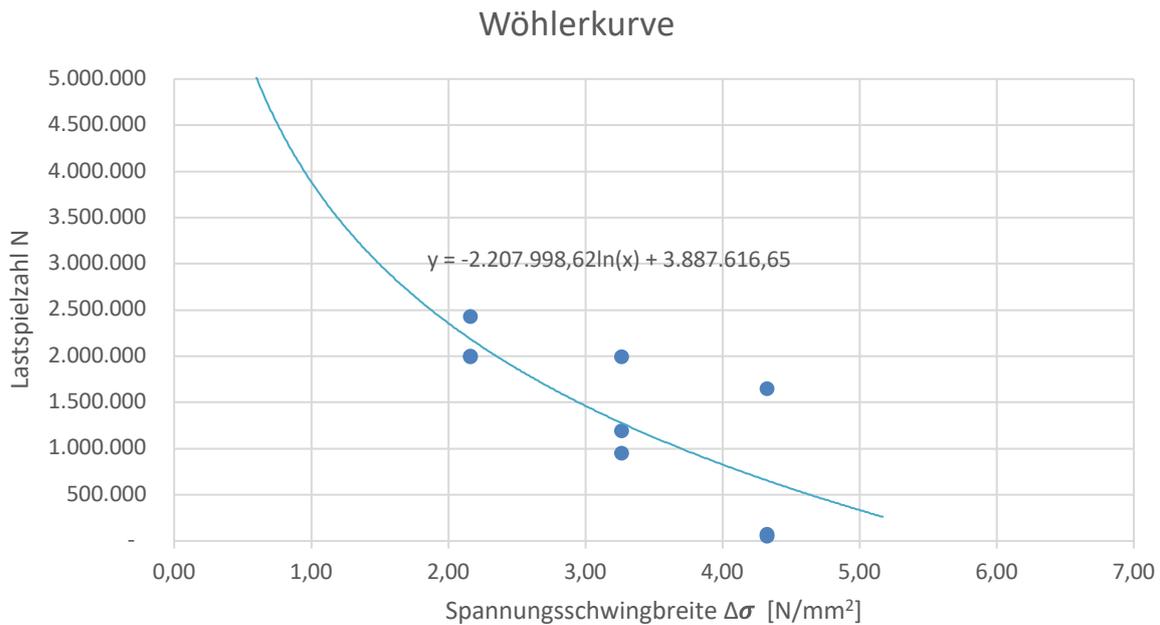


Abb. 4.17: Ermittelte Wöhlerkurve

Die dargestellte Wöhlerkurve stellt eine logarithmische Interpolationskurve dar. Für eine repräsentative Kurve wären zwar deutlich mehr Versuche erforderlich, allerdings kann dennoch festgehalten werden, dass die Abbildung qualitativ und quantitativ eine gute Übereinstimmung mit in unterschiedlichen Quellen [17] [18] [33] [32] beschriebenen Kurven aufweist. Zudem ist hier dargestellt der Mittelwert der Ergebnisse. Im Zuge der Detaillierung des Dimensionierungskonzepts könnte, durch Bestimmung der statistischen Verteilung und entsprechender Fraktilwerte zur Risikobewertung, ein höheres Sicherheitsniveau mit einbezogen werden [34].

Die Darstellung der Spannungen an der Abszisse und der Lastspielzahlen an der Ordinate, wie in Abb. 4.17, entspricht zwar nicht der allgemeinen Darstellung von Ermüdungskurven, wurde allerdings bewusst gewählt, da im weiteren Verlauf ermittelte Spannungswerte zur Bemessung herangezogen werden und dabei der Blick zuerst auf die Abszissenachse einem natürlicheren Ablauf folgt.

Die ausgegebene Steigungsgleichung wird in vereinfachter Darstellung im weiteren Verlauf zur Ermüdungsermittlung (siehe Kapitel 5.4.1, Gl. 14) der Platten herangezogen.

4.4.2 E-Modul und Biegefestigkeit

Da es sich bei dem geprüften Beton um ein sprödes Material handelt, zeigt der Biegeversuch ein anderes Verhalten als es bei einem duktilen Werkstoff der Fall ist. Bei den Proben kommt es zum Bruch, ohne dass ein Fließverhalten stattfindet. Damit ist die Ermittlung einer Dehn- oder Fließgrenze nur schwer möglich und es wird bei der Werkstofffestigkeit die Bruchkraft, die das maximale Moment auf den Körper aufbringt, ermittelt. Damit kann eine Biegefestigkeit berechnet werden. Diese Biegefestigkeit bezeichnet somit die maximal ertragbare Biegespannung, bei der die Probe zu Bruch geht [31].

Die nachfolgende Abb. 4.18 zeigt die Durchbiegung in Abhängigkeit der Kraft. Dabei ist deutlich die lineare Steigung bei allen Probekörpern erkennbar. Auch die Streuung bzw. Standardabweichung fällt nur unwesentlich aus. Nicht dargestellt wurde der Versuch 02, da dieser ohne Mörtelschicht durchgeführt wurde und aufgrund der Plattenunebenheiten deutlich geringere Kennwerte liefert als die Versuchskörper auf einer Mörtelausgleichsschicht.

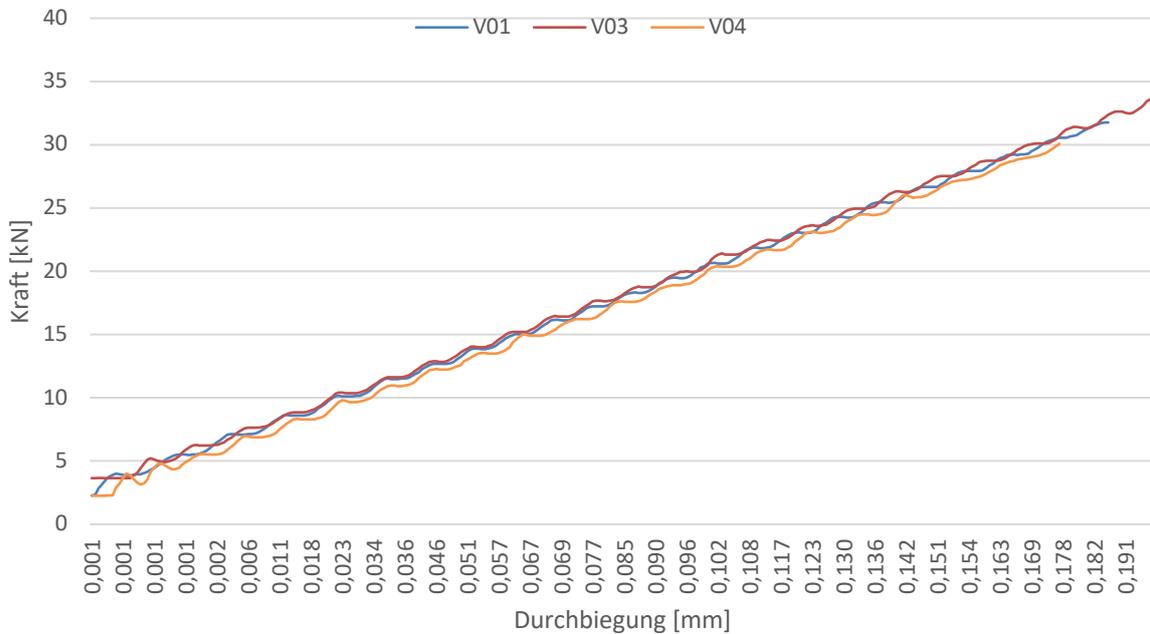


Abb. 4.18: Kraft-Weg-Diagramm für die statischen Versuche

Für die aus den statischen Versuchen ermittelten Kennwerte wurden Mittelwerte gebildet. Zudem wurde auch der Medianwert berechnet, um eventuell Ausreißer zu eliminieren. Allerdings liegen die Werte dicht beieinander, so dass der Mittelwert und der Medianwert keine großen Unterschiede aufweisen. Zudem zeigt auch die Standardabweichung eine geringe Streuung der Werte (siehe Tabelle 3.2 in Kapitel 3.3).

	Kraft F_{\max} [kN]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Durchbiegung u_{\max} [mm]	E-Modul [N/mm ²]
Mittelwert	31,84	6,84	0,198	21.410
Median	31,76	6,82	0,202	21.320

Tabelle 4.17: Zusammenfassung der ermittelten Materialkennwerte

5 Bemessung

5.1 Allgemeines

Aufgrund der dynamischen Belastung von Verkehrsflächen ist die Schädigung durch Ermüdung ein besonderer Aspekt, den es bei der Dimensionierung zu berücksichtigen gilt. Standardaufbauten werden über die maximal ertragbare Anzahl an Lastwechseln ausgewählt. Bei der Festlegung von Standardaufbauten ist es wichtig, die Dauerhaftigkeit der einzelnen Schichten zu kennen, da für den Gesamtaufbau die schwächste Schicht maßgebend ist. Bei den Bemessungsmodellen wird als einwirkende Verkehrslast die Radlast eines Lastkraftwagens herangezogen. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) wird dafür eine vertikale Radlast von 57,5 kN, das entspricht einer höchst zulässigen Achslast von 11,5 t, angesetzt. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ist eine vertikale Radlast von 50 kN anzusetzen, was der Normachslast von 10 t entspricht. Horizontale Verkehrslasten werden in der derzeitigen Oberbaubemessung von Pflasterbefestigungen nicht berücksichtigt [3] [5].

Ein weiterer Faktor, der die Dimensionierung beeinflusst, sind die vorhandenen Bodenverhältnisse. Die Tragfähigkeit schwankt dabei aufgrund der sich ändernden hydrologischen Verhältnisse stark im Jahresverlauf. Für die Bemessung werden daher vier verschiedene Jahresperioden herangezogen. Die höchste Tragfähigkeit tritt dabei aufgrund des zum Teil gefrorenen Bodens im Winter auf. Die niedrigsten Werte ergeben sich im Frühjahr infolge des Tauwetters [3]. Der prozentuelle Anteil an Tagen pro Jahr für die jeweilige Periode fließt bei der Bemessung als Gewichtung ein.

5.2 Oberbaubemessung lt. RVS 03.08.63: 2016

5.2.1 Allgemeines

Mit der RVS 03.08.63: 2016 können unter anderem Oberbaukonstruktionen mit Pflastersteinen und Pflasterplatten aus Naturstein oder Beton dimensioniert werden. Allerdings wird darin nur die ungebundene Bauweise (Regelbauweise) behandelt. Über die Verkehrsbelastung werden Mindestdicken für die einzelnen Schichten angegeben, um eine Mindesttragfähigkeit zu gewährleisten. Diese Standardaufbauten sind für verschiedene Oberbaumaterialien festgelegt.

Die Dimensionierung erfolgt dabei in mehreren Schritten. Zunächst ist die maßgebende Verkehrsbelastung zu ermitteln, um danach über Lastklassen einen entsprechenden Standardaufbau zu wählen. Die Aufbauten definieren die Mindestdicken aller Schichten im Aufbau zur Ableitung der auftretenden Beanspruchung während der Bemessungsperiode.

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Oberbaubemessung nach RVS 03.08.63 erläutert. Die enthaltenen Tabellen, Gleichungen und Beschreibungen sind vollständig der RVS 03.08.63 entnommen worden und beziehen sich in diesem Dokument nur auf die Bauweise mit Pflastersteinen bzw. Pflasterplatten. Das Kapitel 5.2.5 zeigt anhand eines Beispiels aus der RVS 03.08.63 die Vorgangsweise zur Oberbaubemessung.

5.2.2 Maßgebende Verkehrsbelastung

Nach RVS 03.08.63 werden für Pflasterstein- und Pflasterplattenbauweisen vier Lastklassen für unterschiedliche Belastungen vorgegeben. In der Ausgabe von 2016 wurden für die Lastklassen neue Bezeichnungen eingeführt, die in Tabelle 5.1 angegeben sind. Für die Wahl der Lastklasse ist die Verkehrsbelastung des höchstbelasteten Fahrstreifens, in Abhängigkeit von dessen Breite und der Anzahl der Fahrstreifen, maßgebend.

Bautype		Lastklasse								
alt ¹⁾	neu ²⁾									
7 und 8	PF1 bis PF8	alt ¹⁾	–	–	–	–	LK III	LK IV	LK V	LK VI
		neu ²⁾	–	–	–	–	LK1,3	LK0,4	LK0,1	LK0,05

¹⁾ gemäß RVS 03.08.63 (2008)

²⁾ gemäß RVS 03.08.63 (2016)

Tabelle 5.1: Äquivalenztabelle Lastklassen der Pflasterstein- und Pflasterplattenbauweisen [35]

Der maßgebliche Lastverkehr wird als Bemessungsnormlastwechsel (BNLW) bezeichnet. Ausgedrückt wird dieser durch eine äquivalente Anzahl von Übergängen einer Bezugsachslast (Normachslast) von 100 kN und kann mit Gl. 8 ermittelt werden.

$$BNLW = NLW_{\text{tägl}} * R * V * S * 365 * n * z \quad \text{Gl. 8}$$

mit den Variablen:

$NLW_{\text{tägl}}$ [-] bezeichnet für den gesamten Querschnitt die durchschnittliche Anzahl der täglichen Normlastwechsel zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe.

Bei der Berechnung wird unterschieden, ob Kenntnisse über die jährliche, durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke $JDTV_i$ aus Verkehrszählungen vorliegen oder nicht.

bei Kenntnis der $JDTV_i$ der Fahrzeugkategorie i im gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe ist Gl. 9 anzuwenden:

$$NLW_{\text{tägl}} = \sum_i JDTV_i * \ddot{A}_i \quad \text{Gl. 9}$$

mit den Variablen:

$JDTV_i$ [Kfz/24 h] aus Verkehrszählungen nach RVS 02.01.12 ermittelte jährliche, durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Fahrzeugkategorie i laut Tabelle 5.2 für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe.

\ddot{A}_i [-] Mittlerer Äquivalenzwert der jeweiligen Fahrzeugkategorie i laut Tabelle 5.2

ohne Kenntnis der $JDTV_i$ der Fahrzeugkategorie i ist Gl. 10 heranzuziehen:

$$NLW_{\text{tägl}} = \sum_i JDTLV_{ges} * \ddot{A}_{DTLV} \quad \text{Gl. 10}$$

mit den Variablen:

$JDTLV_{ges}$ [Fz/24 h] aus Verkehrszählungen oder aus Abschätzungen über $JDTV$ -Wert und Lastverkehrsanteil nach RVS 02.01.12 ermittelte jährliche durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke (LKW, LKW-ähnliche Fahrzeuge, Busse je 24 h) für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe.

- \ddot{A}_{JDTLV} [-] Mittlerer Äquivalenzwert des JDTLV-Kollektivs für die entsprechende Straßenkategorie laut Tabelle 5.3
- R [-] Richtungsfaktor für die Aufteilung des Lastverkehrs auf die Fahrtrichtungen.
Bei gleichmäßiger Aufteilung auf beide Fahrtrichtungen gleich 0,5
- V [-] Berücksichtigt die Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahrstreifen.
Bei einem bzw. zwei Richtungsfahrstreifen gleich 1,0.
Drei oder mehr Richtungsfahrstreifen gleich 0,9
- S [-] Berücksichtigt die Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrstreifens.
Werte laut Tabelle 5.4
- n [Jahre] Steht für die Bemessungsperiode in Jahren
20 Jahre im Regelfall für bituminöse Befestigungen und Pflasterstein- und Pflasterplattendecken
30 Jahre für Betondecken
- z [-] Zuwachsfaktor unter Berücksichtigung einer jährlichen Zuwachsrate p [%] bzw. siehe Tabelle 5.5

$$z = \frac{q^n - 1}{n \cdot (q - 1)} \quad \text{mit} \quad q = 1 + \frac{p}{100} \quad \text{Gl. 11}$$

Für den Zuwachsfaktor sind generell Verkehrszählungen bzw. Verkehrsprognosen heranzuziehen. Liegen keine Daten vor, ist eine mittlere jährliche Zuwachsrate von p= 2% für Bundesstraßen A und S und p= 1% für sonstigen Straßen anzunehmen.

Fahrzeugkategorie	\ddot{A}_i
LKW	0,80
LKW mit Anhänger	1,25*)
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 5.2: Mittlerer Äquivalenzwert für verschiedene Fahrzeugkategorien i

Straßenkategorie	\ddot{A}_{JDTLV}
Bundesstraßen A und S	1,60
Sonstige Straßen	1,45

Tabelle 5.3: Mittlerer Äquivalenzwert des JDTLV-Kollektivs für verschiedene Straßenkategorien

b_f [m]	< 3,00	3,00	3,25	3,50	3,75	$\geq 4,00$
S	1,00	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Tabelle 5.4: Fahrspurfaktor S in Abhängigkeit von der Fahrstreifenbreite b_f (bei Zwischenbreiten ist die kleinere Fahrstreifenbreite maßgebend)

		Mittlere jährliche Zuwachsrate p [%]					
		0	1	2	3	4	5
Bemessungsperiode [Jahre]	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

Tabelle 5.5: Zuwachsfaktor z in Abhängigkeit von Bemessungsperiode n und jährlicher Zuwachsrate p

Lastklasse	Maßgeblicher Schwerverkehr
LK0,4	80 Schwerfahrzeuge pro 24 h
LK0,1	20 Schwerfahrzeuge pro 24 h
LK0,05	10 Schwerfahrzeuge pro 24 h

*) Bemessungsperiode 20 Jahre, maximale Fahrstreifenbreite 3,50 m

Tabelle 5.6: Lastklassenzuordnung aufgrund des maßgebenden Schwerverkehrs im Querschnitt für das gering belastete Straßennetz*)

5.2.3 Konstruktive Ausbildung der Einzelschichten

Nachfolgend werden grundlegende Annahmen und Ansätze zur Konstruktion eines standardisierten Straßenaufbaues erläutert. Die aufgelisteten Punkte sind dem Kapitel 4 der RVS 03.08.63: 2016 entnommen, beinhalten allerdings nur die Schichten und Baugrundsätze, die im Zusammenhang mit dem Inhalt dieser Arbeit stehen.

Untergrund bzw. Unterbau:

Um die in den Bemessungstabellen angegebenen Schichtdicken anwenden zu dürfen, ist für das Unterbauplanum ein Verformungsmodul laut RVS 08.03.01 von $E_{v1} \geq 35 \text{ MN/m}^2$ zu gewährleisten. Das ist gegebenenfalls durch Anwendung von Maßnahmen wie Bodenverbesserung oder Bodenauswechslung zu garantieren.

Die Anordnung einer ungebundenen unteren Tragschichte darf zudem entfallen, wenn unterhalb des Oberbaus eine Schicht aus frostsicherem Material in ausreichender Dicke vorhanden ist und diese bezüglich Verformungsmodul und Verdichtungsgrad in ungebundenen unteren Tragschicht gemäß RVS 08.15.01 entspricht.

Frostsicherer Oberbau:

Dient zum einen der Lastverteilung auf das Unterbauplanum und zum anderen der Verhinderung von unzulässigen Verformungen und Schäden in der Deckschicht durch Frost und Tauwasser. Die angegebenen Mindestschichtdicken beruhen dabei auf langjährigen Erfahrungswerten. Da die Frosteindringung von verschiedenen Faktoren abhängig ist, sind Abweichungen von diesen Werten unter gewissen Voraussetzungen gestattet und in der RVS 03.08.63 geregelt.

Tragschichten:Ungebundene Tragschichten

Die in Tabelle 5.9 und Tabelle 5.10 enthaltenen U-Klassen geben Mindestanforderungen an die Tragfähigkeit und den Verdichtungsgrad der ungebundenen Schichten gemäß der RVS 08.15.01 an. Werden diese Mindestanforderungen nicht eingehalten, dürfen die Schichtdicken der Bemessungstabellen nicht angewendet werden.

Ungebundene untere Tragschichten

Für die Klassen U6 und U7 gilt gemäß der RVS 08.15.01 ein Verformungsmodul von $E_{v1} \geq 72 \text{ MN/m}^2$, für die Klasse U8 $\geq 60 \text{ MN/m}^2$. Diese Werte sind für alle Bautypen einzuhalten. Für die Bautypen PF5 bis PF8 der Pflasterstein- und Pflasterplattendecken dürfen reduzierte Werte der Mindesttragfähigkeit E_{v1} , in Abhängigkeit von der Schichtdicke, verwendet werden (siehe Tabelle 5.7).

Schichtdicke ungebundene Untere Tragschicht [cm]	Mindesttragfähigkeit E_{v1} *) [MN/m ²] (Abnahmewert) Klasse U8
15	51
20	55

*) Anforderung an den Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} gemäß RVS 08.15.01 bleibt davon unberührt.

Tabelle 5.7: Mindesttragfähigkeit E_{v1} der ungebundenen Unteren Tragschicht U8 gemäß RVS 08.15.01 in Abhängigkeit der Schichtdicke für die Bautypen PF5 bis PF8

Ungebundene obere Tragschichten

Für ungebundene oberen Tragschichten gelten gemäß der RVS 08.15.01, in Abhängigkeit von Bautype und Lastklasse, folgende Mindestanforderungen an die Tragfähigkeit:

- ◆ Bautype PF1 bis PF4 | Lastklassen LK0,05, LK0,1, LK0,4 und LK1,3
→ Mindestklasse U3 oder U4 mit $E_{v1} \geq 90 \text{ MN/m}^2$
- ◆ Bautype PF1 bis PF2 | bis Lastklasse LK0,1
→ Mindestklasse U5 mit $E_{v1} \geq 75 \text{ MN/m}^2$
- ◆ Bautype PF3 | Lastklasse LK0,05
→ Mindestklasse U5 mit $E_{v1} \geq 75 \text{ MN/m}^2$

Tragschichten aus Pflasterdrainbeton

Für eine Tragschicht aus Pflasterdrainbeton sind jedenfalls die Anforderungen der RVS 08.18.01 einzuhalten.

Deckschichten:Allgemeines

Die in der Tabelle 5.9 und Tabelle 5.10 festgelegten Standardaufbauten gelten nur in Verbindung mit der ungebundenen Bauweise. Die RVS 08.18.01 legt dabei die Anforderungen für die Bettungsmaterialien fest.

Pflastersteindecken

Die Anforderungen für Pflastersteindecken sind in der RVS 08.18.01 geregelt.

Unterschieden werden die Bautypen mit ungebundener Tragschicht – PF1 bis PF3 und die Bautypen mit einer Tragschicht aus Drainbeton – PF5 bis PF7. Die Bautypen sind zudem von der Steinart, dem Verband und der Mindeststeindicke abhängig. Für hohe horizontale Beanspruchungen beispielsweise bei Brems- und Beschleunigungsstrecken, Rangierzonen, Kreisverkehren oder Ähnlichem sind die Bautypen PF3 und PF7 ungeeignet.

Pflasterplattendecke

Die Anforderungen für Pflasterplattendecken sind in der RVS 08.18.01 geregelt.

Die Bautypen PF4 mit ungebundener Tragschicht und PF8 mit einer Tragschicht aus Drainbeton beinhalten eine Deckschicht aus Pflasterplatten. Dabei sind die erforderlichen Minstdicken von Naturstein- und Betonsteinpflasterplatten für Flächen mit Schwerverfahrzeugen in der Tabelle 5.8 angegeben.

Pflasterplatten- länge L [cm]	Max. L/B [-]	Natursteinplattendicke D_N [cm]						Betonsteinpflasterplattendicke D_B [cm]					
		Lastklasse						Lastklasse					
		LK0,4		LK0,1		LK0,05		LK0,4		LK0,1		LK0,05	
		Bautype						Bautype					
		PF4	PF8	PF4	PF8	PF4	PF8	PF4	PF8	PF4	PF8	PF4	PF8
≤ 30	1,5			10		8				10			
≤ 40	1,5			10					14	12			
≤ 50	1,5	-	14	12					16	14			
≤ 60	1,5			14					18	16			
≤ 130	2			-	14	-	14		18	-	18	-	18

Tabelle 5.8: Erforderliche Minstdicken (Nennmaß) für Pflasterplatten nach RVS 03.08.63: 2016 [35]

Voraussetzung für die Anwendung der Tabelle 5.8 ist die Einhaltung der Biegefestigkeit bei Natursteinplatten von 10 N/mm² gemäß ÖNORM EN 12372. Bei Betonsteinpflasterplatten ist die Biegezugfestigkeitsklasse U mit einer charakteristische Festigkeit von 5 N/mm² gemäß

ÖNORM EN 1339 erforderlich. Die Auswertung der statischen Versuche hat für die geprüften Probekörper eine Biegezugfestigkeit von $6,8 \text{ N/mm}^2$ ergeben.

Bei den angegebenen Dicken gelten maximale Seitenverhältnisse von $L/B \leq 1,5$ bzw. ≤ 2 .

Sollten verschiedene Plattenformate im Verband zum Einsatz kommen, ist die daraus resultierende größte Mindestdicke auf alle Platten anzuwenden. Dabei darf allerdings bei Bindesteinen eines quadratischen Verbandes davon abgewichen werden, wenn bei Natursteinplatten die Biegefestigkeit von 12 N/mm^2 und bei Betonsteinpflasterplatten von 7 N/mm^2 eingehalten wird. In diesem Fall darf die Mindestdicke der nächst kleineren quadratischen Platte herangezogen werden.

5.2.4 Bestimmung der Lastklasse

Der ermittelte BNLW-Wert lässt sich in weiterer Folge einer Lastklasse zuordnen. Eine Überschreitung um 10 % der jeweiligen Lastklassengrenzen darf vernachlässigt werden.

Die angegebenen Oberbauaufbauten stellen standardisierte Ausführungen für die entsprechenden Lastklassen dar. Die enthaltenen Schichtdicken sind als Mindestdicken zu verstehen.

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
Bautype PF1	Großpflastersteine oder ähnl. Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht	cm Σ 72 18 4 ¹⁾ 20 30 UP V	cm Σ 67 13 4 ¹⁾ 20 30 UP V	cm Σ 67 13 4 ¹⁾ 20 30 UP V	
Bautype PF2	Kleinpflastersteine mit allseitiger Verbundwirkung oder Betonverbundsteine Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht		cm Σ64 Σ65 cm 10 4 ¹⁾ 20 30 UP V	cm Σ62 Σ63 cm 8 4 ¹⁾ 20 30 UP V	11 4 ¹⁾ 20 30 UP V
Bautype PF3	Kleinpflastersteine oder Betonsteine ohne Verbundwirkung Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht			cm Σ64 Σ65 cm 10 4 ¹⁾ 20 30 UP V	cm Σ62 Σ63 cm 8 4 ¹⁾ 20 30 UP V
Bautype PF4	Pflasterplatten Bettung ungeb. Obere Tragschicht ungeb. Untere Tragschicht			cm Σ 64-70 10-16 ²⁾ 4 ¹⁾ 20 30 UP V	cm Σ 62-70 8-16 ²⁾ 4 ¹⁾ 20 30 UP V
E_{V1}, U_P ≥ 35 MN/m²					

- 1) Die Bettungsdicke von 3 bis 6 cm dient zum Ausgleich der Höhentoleranzen der Pflastersteine und beträgt im verdichteten Zustand ca. 4 cm
- 2) Nennmaß Pflasterplatten gemäß Tabelle 5.8

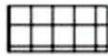
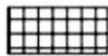
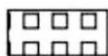
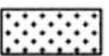
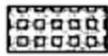
	Großpflastersteine Typ GPS1, GPS2 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinerzeugnisse im Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie		Pflasterplatten aus Beton gemäß ÖNORM EN 1339 oder Naturstein gemäß ÖNORM EN 1341 bzw. ÖNORM B 3108
	Großpflastersteine Typ GPS3, GPS4 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinerzeugnisse im Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie		Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01
	Kleinpflastersteine 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 Klasse U6 oder U7 gemäß RVS 08.15.01
	Betonsteine ohne Verbundwirkung im Reihenverband rechtwinkelig bzw. diagonal zur Bezugslinie, Fischgrätverband		U8 ungebundene Untere Tragschicht Klasse U8 gemäß RVS 08.15.01

Tabelle 5.9: Bemessungstabelle für ungebundene Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht nach [35]

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
Bautype PF5	Großpflastersteine oder ähnl. Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	cm Σ 57 18 4 ¹⁾ 20 15 UP	cm Σ 52 13 4 ¹⁾ 20 15 UP	cm Σ 47 13 4 ¹⁾ 15 15 UP	
Bautype PF6	Kleinpflastersteine mit allseitiger Verbundwirkung oder Betonverbundsteine Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	cm Σ49 Σ50 cm 10 11 4 ¹⁾ 4 ¹⁾ 20 20 15 15 UP UP	cm Σ47 Σ48 cm 8 9 4 ¹⁾ 4 ¹⁾ 20 20 15 15 UP UP	cm Σ42 Σ43 cm 8 9 4 ¹⁾ 4 ¹⁾ 15 15 15 15 UP UP	
Bautype PF7	Kleinpflastersteine oder Betonsteine ohne Verbundwirkung Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	/		cm Σ44 Σ45 cm 10 11 4 ¹⁾ 4 ¹⁾ 15 15 15 15 UP UP	
Bautype PF8	Pflasterplatten Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	/		cm Σ 44-52 10-18 ²⁾ 4 ¹⁾ 15 15 UP	cm Σ 42-52 8-18 ²⁾ 4 ¹⁾ 15 15 UP
E _{V1,UP} ≥ 35 MN/m ²					

- 1) Die Bettungsdicke von 3 bis 6 cm dient zum Ausgleich der Höhentoleranzen der Pflastersteine und beträgt im verdichteten Zustand ca. 4 cm
- 2) Nennmaß Pflasterplatten gemäß Tabelle 5.8

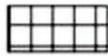
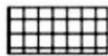
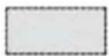
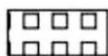
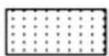
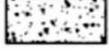
	Großpflastersteine Typ GPS1, GPS2 gemäß ÖNORM B 3108 oder adäquate Kunststeinerzeugnisse im Reihenverband rechtwinklig bzw. diagonal zur Bezugslinie		Betonsteine ohne Verbundwirkung im Reihenverband rechtwinklig bzw. diagonal zur Bezugslinie, Fischgrätverband
	Großpflastersteine Typ GPS3, GPS4 gemäß 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
	Kleinpflastersteine KPS2 bis KPS3 gemäß ÖNORM B 3108 im Segmentbogenverband		Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01
	Betonverbundsteinsysteme		Pflasterdrainbeton gemäß RVS 08.18.01
	Kleinpflastersteine im Reihenverband Type KPS2 bis KPS3 gemäß ÖNORM B 3108		U8 ungebundene Untere Tragschicht Klasse U8 gemäß RVS 08.15.01

Tabelle 5.10: Bemessungstabelle ungebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht nach [35]

5.2.5 Berechnungsbeispiel lt. RVS 03.08.63

Das nachfolgende Beispiel veranschaulicht die Anwendung der RVS 03.08.63: 2016 für eine Pflasterstein- bzw. Pflasterplattendecke und ist ebendieser entnommen. Das Beispiel wird zudem im Kapitel 5.5 verwendet, um einen Vergleich der gewählten Lastklasse mit den maximalen ermittelten Lastspielen darzustellen.

Neubaustrecke mit Pflasterstein- bzw. Pflasterplattendecke:

$$BNLW = NLW_{\text{tägl}} * R * V * S * 365 * n * z$$

Der für beide Fahrstreifen vorhandener Verkehr zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe beträgt:

LKW ohne Anhänger:	14 Kfz/24 h	$A_i=0,80$
LKW mit Anhänger:	12 Kfz/24 h	$A_i=1,25$
Busse (kein innerstädtischer Linienbus):	5 Kfz/24 h	$A_i=0,60$
<hr/>		
JDTLV _{ges}	31 Kfz/24 h	

$$NLW_{\text{tägl}} = 14 * 0,80 + 12 * 1,25 + 5 * 0,60 = 29,2$$

Der vorgesehene Querschnitt weist zwei Fahrstreifen mit je 3,25 m Breite auf. Die Bemessungsperiode beträgt 20 Jahre. Zudem ist von einer mittleren jährlichen Verkehrszuwachsrate von 1 % auszugehen.

$R = 0,5$	...gleichmäßige Aufteilung des Lastverkehrs auf beide Fahrtrichtungen
$V = 1,0$	...ein Richtungstreifen vorhanden
$S = 0,85$	...Fahrstreifenbreite 3,25 m. Wert aus Tabelle 5.4
$n = 20$	...Bemessungsperiode 20 Jahre
$z = 1,10$	...jährliche Zuwachsrate $p= 1\%$ (sonstige Straße). Wert aus Tabelle 5.5

$$BNLW = 29,2 * 0,5 * 1,0 * 0,85 * 365 * 20 * 1,10 = 99.652 = 0,09 * 10^6$$

Damit ist ein Aufbau mindestens der Lastklasse LK0,1 zu wählen.

Für ungebundene Pflasterplatten mit ungebundener oberer Tragschicht entspricht das dem Aufbau PF4 der Tabelle 5.9.

Für Pflasterplatten mit einer Drainbetontragschicht ist der Aufbau PF8 der Tabelle 5.10 zu wählen.

5.3 Struktursimulation

Dieses Kapitel ist angelehnt an die Diplomarbeit *Dimensionierung von Pflasterbefestigungen mit Drainbeton: Prüftechnische Ansprache des Ermüdungsverhaltens und numerische Modellierung des Gebrauchsverhaltens* [2] und führt darin enthaltene Elemente auf. Deren Ergebnisse werden in dieser Arbeit aufgegriffen und für die Bemessung von ungebundenen und gebundenen Aufbauten verwendet.

Die angeführte Diplomarbeit befasst sich u.a. mit der Drainbetontragschicht von Pflasterbefestigungen. Dabei wurden, ähnlich zu dieser Arbeit, in einem Laborversuch Probekörper aus Pflasterdrainbeton einem Dauerschwingversuch unterzogen, um diese im Anschluss empirisch zu analysieren. Mit den Versuchen konnte dann ebenfalls eine Wöhlerkurve erstellt werden, mit der für bekannte Spannungen die maximal ertragbare Anzahl an Lastspielwechseln abgelesen werden können.

In einem weiteren Schritt wurden die ermittelten Materialparameter in ein Finite-Elemente-Modell übertragen. Mit einer entsprechenden Belastung konnten so verschiedene Varianten analysiert und die Spannungen in den Querschnitten ermittelt werden.

Mit den Ergebnissen der Spannungsermittlung werden in dieser Arbeit, gemeinsam mit den Ergebnissen der Wöhlerkurven in Form von Ermüdungskriterien, maximale Lastspielzahlen für die einzelnen Schichten berechnet. Dadurch können schlussendlich Aufbauten für entsprechende Lastklassen dimensioniert werden.

5.3.1 Simulationstool

Ein Ziel der vorangegangenen Diplomarbeit [2] war es, ein Strukturmodell zur numerischen Simulation zu entwickeln, welches die Untersuchung des komplexen Verhaltens von Pflasterbefestigungen ermöglicht. Dabei wurden die gebundene und ungebundene Bauweise untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Nachfolgend ist in Abb. 5.1 das angewendete Modell für die Finite-Element-Analyse abgebildet.

Modelliert wurden Plattenformate mit 60 x 60 cm, 60 x 45 cm und 60 x 30 cm mit den Dicken 8 cm, 14 cm bzw. 18 cm. Die Drainbetonschicht weist in allen Modellvarianten eine Dicke von 20 cm auf. Die Größe des FE-Netzes wurde iterativ auf Basis der Materialparameter und der Wechselwirkung der einzelnen Schichten zueinander bestimmt.

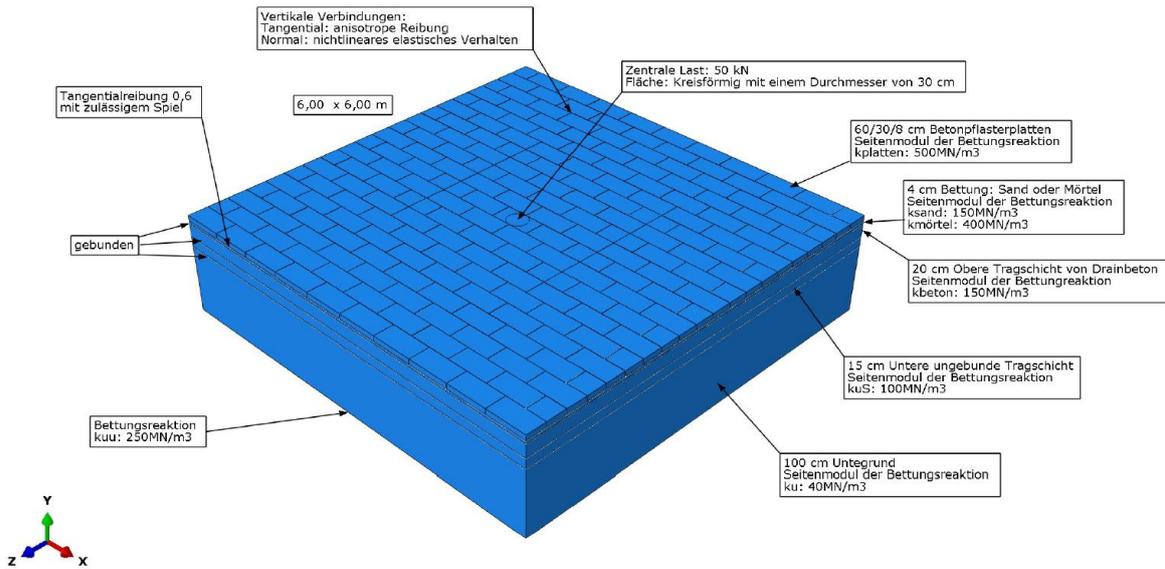


Abb. 5.1: Geometrie des verwendeten FE-Modells [2]

Da die Tragfähigkeit der einzelnen Schichten, aufgrund der sich ändernden hydrologischen Verhältnisse, stark im Jahreslauf schwankt, wurden auch vier Perioden für beide Bauweisen berücksichtigt. Die Werte für die E-Module ändern sich zwischen den Bauweisen allerdings nicht. Insgesamt ergeben sich dadurch 72 Modellvarianten.

Die höchste Tragfähigkeit tritt im Winter auf. Das ist auf den zum Teil gefrorenen Boden zurückzuführen. Die niedrigsten Werte ergeben sich im Frühjahr aufgrund des Tauwetters [3].

Der prozentuelle Anteil an Tagen pro Jahr für die jeweilige Periode wird im weiteren Verlauf als Gewichtung in der Berechnung des Schädigungsgrades übernommen.

gebundene und ungebundene Bauweise

Periode	Tage/Jahr	Anteil	Schicht	E-Modul	
1	Frühjahr 16.3 - 15.5.	61	17 %	Untergrund	70 MPa
				ungebundene untere Tragschicht	140 MPa
2	Übergang 16.5 - 15.6.	31	9 %	Untergrund	100 MPa
				ungebundene untere Tragschicht	200 MPa
3	Sommer/Herbst 16.6. - 15.12	183	50 %	Untergrund	140 MPa
				ungebundene untere Tragschicht	280 MPa
4	Winter 16.12. - 15.3	90	24 %	Untergrund	280 MPa
				ungebundene untere Tragschicht	560 MPa

Tabelle 5.11: Materialparameter der verschiedenen Jahresperioden [2] [3] [5]

5.3.2 Belastung

Belastet wurde das Modell mit 50 kN auf eine Kreisfläche mit dem Durchmesser von 30 cm. Dadurch ergibt sich eine Flächenlast von $0,707 \text{ N/mm}^2$, die als Bemessungslast gleichzeitig mit dem Eigengewicht wirkt. Die Abb. 5.2 zeigt dabei die Darstellung des verwendeten FEM-Modells mit der aufgetragenen Bemessungslast.

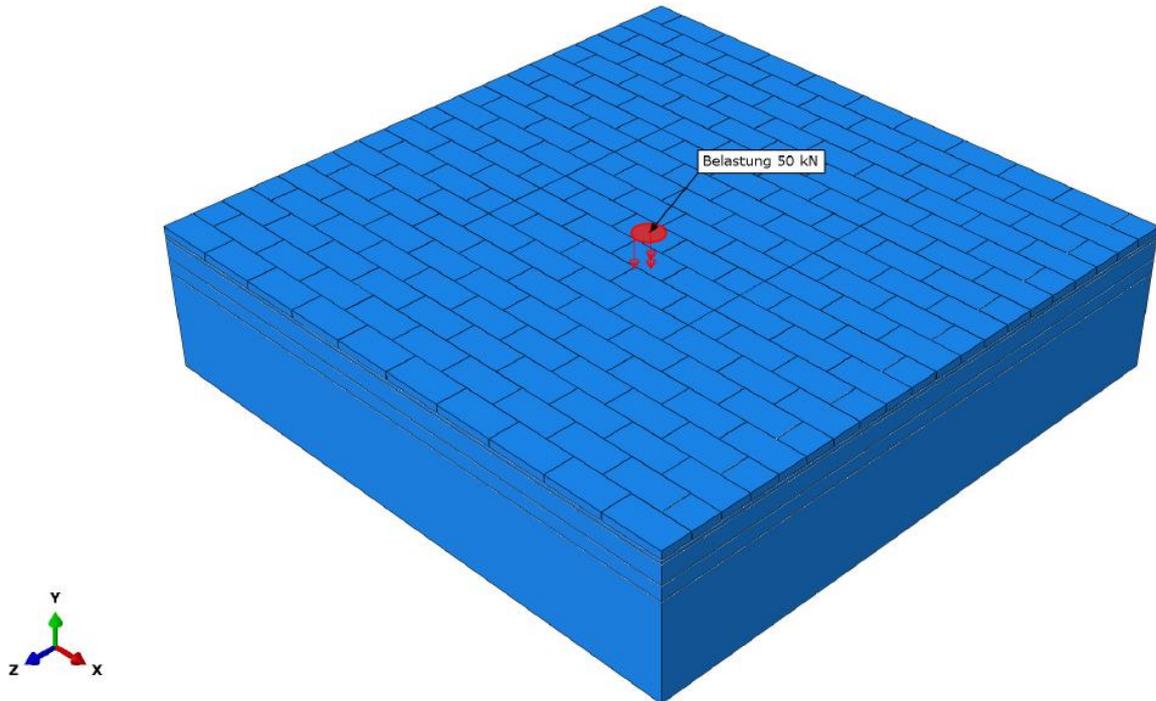


Abb. 5.2: Generierte Belastung des FE-Modells [2]

5.3.3 Ergebnisse der FEM-Spannungsermittlung

Die Ergebnisse der Spannungsermittlung mittels FEM-Simulation zeigen deutlich, dass die vorhandenen Zugspannungen in den Pflasterplatten selbst stark von der Konstruktion abhängen. Betrachtet man dazu die ungebundene Bauweise, sieht man, dass bei dünneren Plattenquerschnitten die Spannungen höher ausfallen. Das bedeutet im weiteren Sinne, dass diese Querschnitte auch weniger Lastspiele aufnehmen können. Hingegen zeigt die gebundene Bauweise eine auf den ersten Blick unlogische Spannungsverteilung. Hier sind die dünneren Platten deutlich weniger von Zugspannungen betroffen. Die dünnste Pflasterplatte mit 8 cm wird sogar zur Gänze überdrückt. Diese Anomalie lässt sich allerdings durch den Verbundquerschnitt erläutern, der durch eine kohäsive Wirkung von Bettungs- und Fugenmaterial zustande kommt. Die größeren Spannungen in den dickeren Platten kommen dann durch die höhere Steifigkeit der Pflasterung zustande.

Zudem kann beobachtet werden, dass bei der oberen Tragschicht aus Drainbeton die maßgebenden Zugspannungen größer werden, je dünner die Pflasterplatten sind. Des Weiteren ergeben sich für die gebundene Bauweise geringere Zugspannungen als für die ungebundene.

5.4 Bemessung nach Versuchsauswertung

Die Bemessung und Dimensionierung der einzelnen Schichten erfolgt unter Berücksichtigung der Wöhlerkurven und der Spannung, die in FEM-Simulationen ermittelt wurden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst für jede Schicht die Spannungen tabellarisch für verschiedene Plattenformate und die unterschiedlichen Perioden (siehe 5.3.1 und Tabelle 5.11) dargestellt. Bei der Dimensionierung der Bettung und der unteren Tragschicht wurde ein Ermüdungskriterium aus der Literatur [15] verwendet, welches statt der Spannungen Dehnungen heranzieht. Daher sind für diese Schichten auch die Dehnungen angegeben.

Mit diesen Spannungen und den ermittelten bzw. angegebenen Ermüdungskriterien wurde die maximale Lastspielzahl berechnet und ebenfalls tabellarisch dargestellt.

Der nächste Schritt betrifft die Ermittlung der nach Länge der Untergrundtragfähigkeitsperiode gewichteten Schädigung. Diese wird durch Division der Gewichtung p_k mit der Lastspielzahl N_{zul} berechnet (siehe Gl. 12). Die Werte für p_k sind in der Tabelle 5.11 enthalten.

$$\text{Schädigungsgrad} = \frac{p_j}{N_{zul}} [-] \quad \text{Gl. 12}$$

mit den Variablen:

p_j	[-]	Gewichtung der Untergrundtragfähigkeitsperiode
N_{zul}	[-]	maximal zulässige Lastspielzahl

Summiert man nun den für jede Periode berechneten Schädigungsgrad einer Platte und bildet davon den Kehrwert (Gl. 13), ergibt sich die maximale Lastspielzahl für das gesamte Jahr.

$$N_{J,zul} = \frac{1}{\sum p_j / N_{zul}} [-] \quad \text{Gl. 13}$$

Die geringste Lastspielzahl des Schichtaufbaus wird für die Grenzbelastung herangezogen und bildet somit die Lastklasse.

5.4.1 Dimensionierung der Pflasterplatten

Die nachstehende Tabelle zeigt die Spannungen für die Pflasterplatten. Die dünnsten Pflasterplatten mit 8 cm sind bei der gebundenen Bauweise vollständig überdrückt (siehe dazu Kapitel 5.3.3), daher wurden diese mit Null angegeben.

Mit dem über die Wöhlerkurve ermittelten Ermüdungskriterium (Gl. 14), siehe dazu Kapitel 4.4.1, Abb. 4.17, wird für die gegebenen Spannungen die Lastspielzahl berechnet. Das weitere Vorgehen ist in Kapitel 5.4 erläutert.

$$N_{zul} = -48 * 10^3 * (-81 + 46 * \ln(\sigma_{BZ})) [-] \quad \text{Gl. 14}$$

Spannungen σ_{BZ} [N/mm²]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,4454	2,4015	2,3607	2,2804
60x30x14	0,1776	0,1788	0,1787	0,1741	1,6380	1,6038	1,5720	1,5091
60x30x18	0,2428	0,2405	0,2371	0,2257	1,5790	1,5499	1,5229	1,4684
60x40x8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,5891	1,5537	1,5203	1,4534
60x40x14	0,1840	0,1833	0,1812	0,1801	1,2620	1,2342	1,2083	1,1562
60x40x18	0,2361	0,2334	0,2297	0,2176	0,9127	0,8957	0,8798	0,8479
60x60x8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,4551	1,4254	1,3978	1,3428
60x60x14	0,1715	0,1705	0,1712	0,1681	1,3287	1,2983	1,2702	1,2140
60x60x18	0,2222	0,2202	0,2171	0,2062	0,8680	0,8471	0,8278	0,7910
T[°C]	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200
pk	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Spannungsermittlung mittels FEM-Simulation für Betonstein-Pflasterplatten

Lastspielzahlen N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	1,91E+06	1,95E+06	1,99E+06	2,07E+06
60x30x14	7,70E+06	7,69E+06	7,69E+06	7,75E+06	2,80E+06	2,84E+06	2,89E+06	2,98E+06
60x30x18	7,01E+06	7,03E+06	7,07E+06	7,17E+06	2,88E+06	2,92E+06	2,96E+06	3,04E+06
60x40x8	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	2,86E+06	2,91E+06	2,96E+06	3,06E+06
60x40x14	7,63E+06	7,63E+06	7,66E+06	7,67E+06	3,37E+06	3,42E+06	3,47E+06	3,57E+06
60x40x18	7,07E+06	7,10E+06	7,14E+06	7,25E+06	4,09E+06	4,13E+06	4,17E+06	4,25E+06
60x60x8	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	3,06E+06	3,10E+06	3,15E+06	3,24E+06
60x60x14	7,78E+06	7,79E+06	7,78E+06	7,82E+06	3,26E+06	3,31E+06	3,36E+06	3,46E+06
60x60x18	7,21E+06	7,23E+06	7,26E+06	7,37E+06	4,20E+06	4,25E+06	4,30E+06	4,41E+06

Tabelle 5.13: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Spannungen für Betonstein-Pflasterplatten

Gewichteter Schädigungsgrad p_j/N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	1,70E-10	9,00E-11	5,00E-10	2,40E-10	8,89E-08	4,61E-08	2,51E-07	1,16E-07
60x30x14	2,21E-08	1,17E-08	6,50E-08	3,10E-08	6,08E-08	3,16E-08	1,73E-07	8,06E-08
60x30x18	2,42E-08	1,28E-08	7,08E-08	3,35E-08	5,90E-08	3,08E-08	1,69E-07	7,90E-08
60x40x8	1,70E-10	9,00E-11	5,00E-10	2,40E-10	5,93E-08	3,09E-08	1,69E-07	7,84E-08
60x40x14	2,23E-08	1,18E-08	6,53E-08	3,13E-08	5,04E-08	2,63E-08	1,44E-07	6,73E-08
60x40x18	2,40E-08	1,27E-08	7,01E-08	3,31E-08	4,16E-08	2,18E-08	1,20E-07	5,64E-08
60x60x8	1,70E-10	9,00E-11	5,00E-10	2,40E-10	5,56E-08	2,90E-08	1,59E-07	7,41E-08
60x60x14	2,19E-08	1,15E-08	6,42E-08	3,07E-08	5,21E-08	2,72E-08	1,49E-07	6,94E-08
60x60x18	2,36E-08	1,25E-08	6,89E-08	3,25E-08	4,05E-08	2,12E-08	1,16E-07	5,45E-08

Tabelle 5.14: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für Betonstein-Pflasterplatten

$$1 / (\sum p_j / N_{zul})$$

Bauweise	gebunden	ungebunden
60x30x8	1,00E+09	1,99E+06
60x30x14	7,71E+06	2,89E+06
60x30x18	7,08E+06	2,96E+06
60x40x8	1,00E+09	2,96E+06
60x40x14	7,65E+06	3,47E+06
60x40x18	7,15E+06	4,17E+06
60x60x8	1,00E+09	3,15E+06
60x60x14	7,79E+06	3,36E+06
60x60x18	7,28E+06	4,31E+06

Tabelle 5.15: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für Betonstein-Pflasterplatten

5.4.2 Dimensionierung der Bettung

Für die Bettung sind bisher keine Ermüdungsversuche durchgeführt worden, daher wird für die Ermittlung der maximalen Lastspielzahl auf eine Formel (Gl. 15) aus der Literatur [15] zurückgegriffen. Damit wird die Lastspielzahl über die Dehnungen in der Schicht berechnet. Folglich sind in der nachfolgenden Tabelle statt Spannungen, Dehnungen angegeben. Das weitere Vorgehen ist in Kapitel 5.4 erläutert.

$$N_{zul} = \left(\frac{\beta_{BZ}}{\varepsilon_{zz}} \right)^4 [-] \quad \text{Gl. 15}$$

mit den Variablen:

β_{BZ}	[-]	=0,018 konstanter Faktor aus [15]
ε_{zz}	[-]	Dehnungen an der Unterseite der Schicht

Dehnungen ε_{zz} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	3,72E-05	3,74E-05	3,76E-05	3,80E-05	9,53E-04	9,59E-04	9,65E-04	9,76E-04
60x30x14	2,74E-05	2,74E-05	2,75E-05	2,75E-05	6,67E-04	6,80E-04	6,92E-04	7,16E-04
60x30x18	2,33E-05	2,33E-05	2,33E-05	2,33E-05	6,17E-04	6,02E-04	5,87E-04	5,85E-04
60x40x8	3,44E-05	3,46E-05	3,48E-05	3,52E-05	7,92E-04	7,83E-04	8,00E-04	8,33E-04
60x40x14	2,50E-05	2,50E-05	2,51E-05	2,53E-05	4,89E-04	4,95E-04	4,99E-04	5,08E-04
60x40x18	1,89E-05	1,91E-05	1,92E-05	1,94E-05	4,78E-04	4,66E-04	4,55E-04	4,39E-04
60x60x8	3,59E-05	3,59E-05	3,59E-05	3,58E-05	7,78E-04	7,91E-04	8,03E-04	8,28E-04
60x60x14	2,42E-05	2,43E-05	2,44E-05	2,46E-05	3,39E-04	2,98E-04	3,11E-04	3,52E-04
60x60x18	2,71E-05	2,75E-05	2,74E-05	2,57E-05	4,30E-04	4,05E-04	3,82E-04	3,36E-04
T[°C]	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200
pk	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400

Tabelle 5.16: Ergebnisse der Dehnungen in der Bettung mittels FEM-Simulation für die Bettungsschicht

Lastspielzahlen N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	5,47E+10	5,35E+10	5,24E+10	5,06E+10	1,28E+05	1,24E+05	1,21E+05	1,16E+05
60x30x14	1,87E+11	1,85E+11	1,83E+11	1,83E+11	5,29E+05	4,90E+05	4,57E+05	4,00E+05
60x30x18	3,54E+11	3,53E+11	3,53E+11	3,55E+11	7,26E+05	8,02E+05	8,82E+05	8,99E+05
60x40x8	7,46E+10	7,37E+10	7,17E+10	6,81E+10	2,66E+05	2,79E+05	2,57E+05	2,18E+05
60x40x14	2,71E+11	2,68E+11	2,64E+11	2,58E+11	1,83E+06	1,75E+06	1,69E+06	1,57E+06
60x40x18	8,14E+11	7,97E+11	7,81E+11	7,47E+11	2,01E+06	2,22E+06	2,44E+06	2,84E+06
60x60x8	6,33E+10	6,33E+10	6,33E+10	6,36E+10	2,86E+05	2,68E+05	2,53E+05	2,24E+05
60x60x14	3,05E+11	3,00E+11	2,95E+11	2,85E+11	7,98E+06	1,33E+07	1,13E+07	6,87E+06
60x60x18	1,93E+11	1,83E+11	1,85E+11	2,40E+11	3,08E+06	3,90E+06	4,93E+06	8,29E+06

Tabelle 5.17: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Dehnungen für die Bettungsschicht

Gewichteter Schädigungsgrad p_j/N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	3,11E-12	1,68E-12	9,54E-12	4,74E-12	1,33E-06	7,25E-07	4,13E-06	2,07E-06
60x30x14	9,07E-13	4,86E-13	2,73E-12	1,31E-12	3,21E-07	1,84E-07	1,09E-06	6,00E-07
60x30x18	4,80E-13	2,55E-13	1,42E-12	6,77E-13	2,34E-07	1,12E-07	5,67E-07	2,67E-07
60x40x8	2,28E-12	1,22E-12	6,97E-12	3,53E-12	6,38E-07	3,23E-07	1,95E-06	1,10E-06
60x40x14	6,28E-13	3,36E-13	1,89E-12	9,31E-13	9,27E-08	5,13E-08	2,96E-07	1,53E-07
60x40x18	2,09E-13	1,13E-13	6,41E-13	3,21E-13	8,45E-08	4,06E-08	2,05E-07	8,46E-08
60x60x8	2,68E-12	1,42E-12	7,89E-12	3,77E-12	5,94E-07	3,36E-07	1,98E-06	1,07E-06
60x60x14	5,58E-13	3,00E-13	1,70E-12	8,43E-13	2,13E-08	6,75E-09	4,43E-08	3,49E-08
60x60x18	8,79E-13	4,93E-13	2,70E-12	1,00E-12	5,51E-08	2,31E-08	1,01E-07	2,90E-08

Tabelle 5.18: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für die Bettung

$$1 / (\sum p_j/N_{zul})$$

Bauweise	gebunden	ungebunden
60x30x8	5,24E+10	1,21E+05
60x30x14	1,84E+11	4,54E+05
60x30x18	3,54E+11	8,47E+05
60x40x8	7,14E+10	2,49E+05
60x40x14	2,64E+11	1,69E+06
60x40x18	7,79E+11	2,41E+06
60x60x8	6,34E+10	2,51E+05
60x60x14	2,94E+11	9,32E+06
60x60x18	1,97E+11	4,79E+06

Tabelle 5.19: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für die Bettung

5.4.3 Dimensionierung des Drainbetons

Die nachstehende Tabelle zeigt die Spannungen für die Drainbetontragschicht. Das angewendete Ermüdungskriterium (Gl. 16) zur Ermittlung der Lastspielzahl wurde über die Wöhlerkurve für die Drainbetontragschicht aus [2] ermittelt. Das weitere Vorgehen ist in Kapitel 5.4 erläutert.

$$N_{zul} = \frac{1}{-2 \cdot 10^{-6}} \ln\left(\frac{\sigma_{BZ}}{0,8171}\right) \quad \text{Gl. 16}$$

Spannungen σ_{BZ} [N/mm²]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	0,3710	0,3492	0,3274	0,2771	0,4132	0,3690	0,3261	0,2369
60x30x14	0,2941	0,2787	0,2628	0,2255	0,3874	0,3462	0,3059	0,2210
60x30x18	0,2580	0,2456	0,2326	0,2010	0,3414	0,3028	0,2655	0,1880
60x40x8	0,3153	0,2952	0,2753	0,2302	0,5239	0,4777	0,4320	0,3319
60x40x14	0,2587	0,2443	0,2296	0,1953	0,4154	0,3752	0,3361	0,2525
60x40x18	0,2508	0,2389	0,2261	0,1955	0,3660	0,3313	0,2973	0,2235
60x60x8	0,3585	0,3379	0,3173	0,2695	0,4442	0,4010	0,3590	0,2691
60x60x14	0,2857	0,2709	0,2556	0,2197	0,3828	0,3462	0,3105	0,2332
60x60x18	0,2508	0,2389	0,2261	0,1955	0,3660	0,3313	0,2973	0,2235
T[°C]	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200
pk	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400

Tabelle 5.20: Ergebnisse der Spannungsermittlung mittels FEM-Simulation für die Drainbetonschicht

Lastspielzahlen N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	3,95E+05	4,25E+05	4,57E+05	5,41E+05	3,41E+05	3,98E+05	4,59E+05	6,19E+05
60x30x14	5,11E+05	5,38E+05	5,67E+05	6,44E+05	3,73E+05	4,29E+05	4,91E+05	6,54E+05
60x30x18	5,76E+05	6,01E+05	6,28E+05	7,01E+05	4,36E+05	4,96E+05	5,62E+05	7,35E+05
60x40x8	4,76E+05	5,09E+05	5,44E+05	6,33E+05	2,22E+05	2,68E+05	3,19E+05	4,51E+05
60x40x14	5,75E+05	6,04E+05	6,35E+05	7,16E+05	3,38E+05	3,89E+05	4,44E+05	5,87E+05
60x40x18	5,90E+05	6,15E+05	6,42E+05	7,15E+05	4,02E+05	4,51E+05	5,05E+05	6,48E+05
60x60x8	4,12E+05	4,42E+05	4,73E+05	5,55E+05	3,05E+05	3,56E+05	4,11E+05	5,55E+05
60x60x14	5,25E+05	5,52E+05	5,81E+05	6,57E+05	3,79E+05	4,29E+05	4,84E+05	6,27E+05
60x60x18	5,90E+05	6,15E+05	6,42E+05	7,15E+05	4,02E+05	4,51E+05	5,05E+05	6,48E+05

Tabelle 5.21: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Spannungen für die Drainbetonschicht

Gewichteter Schädigungsgrad p_j/N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	4,31E-07	2,12E-07	1,09E-06	4,44E-07	4,99E-07	2,26E-07	1,09E-06	3,88E-07
60x30x14	3,33E-07	1,67E-07	8,82E-07	3,73E-07	4,56E-07	2,10E-07	1,02E-06	3,67E-07
60x30x18	2,95E-07	1,50E-07	7,96E-07	3,42E-07	3,90E-07	1,81E-07	8,90E-07	3,27E-07
60x40x8	3,57E-07	1,77E-07	9,19E-07	3,79E-07	7,65E-07	3,35E-07	1,57E-06	5,33E-07
60x40x14	2,96E-07	1,49E-07	7,88E-07	3,35E-07	5,03E-07	2,31E-07	1,13E-06	4,09E-07
60x40x18	2,88E-07	1,46E-07	7,78E-07	3,36E-07	4,23E-07	1,99E-07	9,89E-07	3,70E-07
60x60x8	4,13E-07	2,04E-07	1,06E-06	4,33E-07	5,58E-07	2,53E-07	1,22E-06	4,32E-07
60x60x14	3,24E-07	1,63E-07	8,60E-07	3,65E-07	4,48E-07	2,10E-07	1,03E-06	3,83E-07
60x60x18	2,88E-07	1,46E-07	7,78E-07	3,36E-07	4,23E-07	1,99E-07	9,89E-07	3,70E-07

Tabelle 5.22: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für die Drainbetonschicht

 $1 / (\sum p_j/N_{zul})$

Bauweise	gebunden	ungebunden
60x30x8	458.784	454.259
60x30x14	569.926	487.809
60x30x18	631.839	559.553
60x40x8	545.878	312.307
60x40x14	637.885	440.817
60x40x18	645.870	504.500
60x60x8	474.773	406.678
60x60x14	583.966	482.096
60x60x18	645.870	504.500

Tabelle 5.23: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für die Drainbetonschicht

5.4.4 Dimensionierung der ungebundenen unteren Tragschicht

Für die ungebundene untere Tragschicht sind bisher keine Ermüdungsversuche durchgeführt worden, daher wird für die Ermittlung der maximalen Lastspielzahl auf eine Formel (Gl. 17) aus der Literatur [15] zurückgegriffen. Damit wird die Lastspielzahl über die Dehnungen in der Schicht berechnet. Folglich sind in der nachfolgenden Tabelle statt Spannungen, Dehnungen angegeben. Das weitere Vorgehen ist in Kapitel 5.4 erläutert.

$$N_{zul} = \left(\frac{\beta_{BZ}}{\varepsilon_{zz}} \right)^4 \quad [-] \quad \text{Gl. 17}$$

mit den Variablen:

β_{BZ} [-] = 0,018 konstanter Faktor aus [15]

ε_{zz} [-] Dehnungen an der Unterseite der Schicht

Dehnungen ϵ_{zz} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	1,40E-04	1,14E-04	9,48E-05	6,58E-05	2,42E-04	1,98E-04	1,64E-04	1,09E-04
60x30x14	1,26E-04	1,01E-04	8,20E-05	8,20E-05	2,43E-04	1,98E-04	1,63E-04	1,07E-04
60x30x18	1,22E-04	9,60E-05	7,74E-05	5,07E-05	2,35E-04	1,90E-04	1,55E-04	1,01E-04
60x40x8	1,19E-04	9,63E-05	7,95E-05	5,42E-05	2,40E-04	2,00E-04	1,68E-04	1,16E-04
60x40x14	1,09E-04	8,69E-05	7,07E-05	4,70E-05	1,98E-04	1,61E-04	1,32E-04	8,70E-05
60x40x18	1,06E-04	8,39E-05	6,76E-05	4,43E-05	2,01E-04	1,63E-04	1,33E-04	8,71E-05
60x60x8	1,29E-04	1,07E-04	8,93E-05	6,29E-05	1,98E-04	1,63E-04	1,35E-04	9,02E-05
60x60x14	1,16E-04	9,36E-05	7,71E-05	5,27E-05	9,42E-05	1,53E-04	1,26E-04	8,25E-05
60x60x18	1,11E-04	8,89E-05	7,25E-05	4,86E-05	1,89E-04	1,52E-04	1,24E-04	8,08E-05
T[°C]	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200	0,0700	0,0800	0,1000	0,0200
pk	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400	0,1700	0,0900	0,5000	0,2400

Tabelle 5.24: Ergebnisse der Dehnungen in der Bettung mittels FEM-Simulation für die ungebundene untere Tragschicht

Lastspielzahlen N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	2,74E+08	6,18E+08	1,30E+09	5,60E+09	3,09E+07	6,83E+07	1,46E+08	7,44E+08
60x30x14	4,17E+08	1,02E+09	2,32E+09	2,32E+09	3,03E+07	6,86E+07	1,49E+08	7,88E+08
60x30x18	4,81E+08	1,24E+09	2,93E+09	1,59E+10	3,47E+07	8,09E+07	1,81E+08	1,00E+09
60x40x8	5,31E+08	1,22E+09	2,62E+09	1,21E+10	3,16E+07	6,56E+07	1,31E+08	5,78E+08
60x40x14	7,48E+08	1,84E+09	4,19E+09	2,14E+10	6,84E+07	1,57E+08	3,45E+08	1,84E+09
60x40x18	8,28E+08	2,12E+09	5,01E+09	2,74E+10	6,45E+07	1,51E+08	3,35E+08	1,82E+09
60x60x8	3,75E+08	8,14E+08	1,65E+09	6,72E+09	6,76E+07	1,50E+08	3,18E+08	1,58E+09
60x60x14	5,83E+08	1,37E+09	2,96E+09	1,36E+10	1,33E+09	1,90E+08	4,22E+08	2,27E+09
60x60x18	6,86E+08	1,68E+09	3,79E+09	1,88E+10	8,20E+07	1,95E+08	4,42E+08	2,47E+09

Tabelle 5.25: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Dehnungen für die ungebundene untere Tragschicht

Gewichteter Schädigungsgrad p_j/N_{zul} [-]

Bauweise	gebunden				ungebunden			
	1	2	3	4	1	2	3	4
60x30x8	6,21E-10	1,46E-10	3,85E-10	4,28E-11	5,51E-09	1,32E-09	3,43E-09	3,23E-10
60x30x14	4,08E-10	8,80E-11	2,16E-10	1,04E-10	5,61E-09	1,31E-09	3,35E-09	3,05E-10
60x30x18	3,53E-10	7,28E-11	1,71E-10	1,51E-11	4,90E-09	1,11E-09	2,77E-09	2,39E-10
60x40x8	3,20E-10	7,37E-11	1,91E-10	1,98E-11	5,38E-09	1,37E-09	3,82E-09	4,15E-10
60x40x14	2,27E-10	4,89E-11	1,19E-10	1,12E-11	2,49E-09	5,73E-10	1,45E-09	1,31E-10
60x40x18	2,05E-10	4,25E-11	9,97E-11	8,77E-12	2,63E-09	5,98E-10	1,49E-09	1,32E-10
60x60x8	4,54E-10	1,11E-10	3,03E-10	3,57E-11	2,51E-09	6,00E-10	1,57E-09	1,51E-10
60x60x14	2,92E-10	6,59E-11	1,69E-10	1,77E-11	1,28E-10	4,74E-10	1,19E-09	1,06E-10
60x60x18	2,48E-10	5,36E-11	1,32E-10	1,28E-11	2,07E-09	4,61E-10	1,13E-09	9,73E-11

Tabelle 5.26: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für die ungebundene untere Tragschicht

$$1 / (\sum p_j / N_{zul})$$

Bauweise	gebunden	ungebunden
60x30x8	8,37E+08	9,45E+07
60x30x14	1,23E+09	9,46E+07
60x30x18	1,64E+09	1,11E+08
60x40x8	1,65E+09	9,10E+07
60x40x14	2,46E+09	2,16E+08
60x40x18	2,81E+09	2,06E+08
60x60x8	1,11E+09	2,07E+08
60x60x14	1,84E+09	5,28E+08
60x60x18	2,24E+09	2,66E+08

Tabelle 5.27: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für die ungebundene untere Tragschicht

5.5 Vergleich des Berechnungsbeispiels lt. RVS 03.08.63: 2016

Unter Vorlage des Berechnungsbeispiels aus Kapitel 5.2.5 ergeben sich mit den ermittelten Lastspielzahlen des Dimensionierungskonzepts für die einzelnen Schichten Ausnutzungsgrade für die Bemessungsnormlastwechsel.

Neubaustrecke mit Pflasterstein- bzw. Pflasterplattendecke:

$$BNLW = NLW_{\text{tägl}} * R * V * S * 365 * n * z$$

Der für beide Fahrstreifen vorhandener Verkehr zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe beträgt:

LKW ohne Anhänger:	14 Kfz/24 h	$A_i=0,80$
LKW mit Anhänger:	12 Kfz/24 h	$A_i=1,25$
Busse (kein innerstädtischer Linienbus):	5 Kfz/24 h	$A_i=0,60$
JDTLV _{ges}	31 Kfz/24 h	

$$NLW_{\text{tägl}} = 14 * 0,80 + 12 * 1,25 + 5 * 0,60 = 29,2$$

$$BNLW = 29,2 * 0,5 * 1,0 * 0,85 * 365 * 20 * 1,10 = 99.652 = 0,09 * 10^6$$

Die Tabelle 5.28 und die Tabelle 5.29 fassen die zulässigen Lastspiele, für die einzelnen Schichten, in Abhängigkeit der Plattenformate, für die ungebundene und gebundene Bauweise zusammen.

ungebundene Bauweise

Schicht	Pflasterplatten	Bettung	Drainbeton	untere Tragschicht
60x30x8	1.991.462	121.119	454.259	94.544.777
60x30x14	2.889.860	454.467	487.809	94.598.596
60x30x18	2.960.188	847.272	559.553	110.866.148
60x40x8	2.964.209	249.402	312.307	91.006.534
60x40x14	3.471.500	1.686.494	440.817	215.646.728
60x40x18	4.171.875	2.411.454	504.500	205.921.650
60x60x8	3.149.407	251.091	406.678	206.783.994
60x60x14	3.361.028	9.316.895	482.096	528.043.499
60x60x18	4.305.540	4.793.344	504.500	265.835.020

Tabelle 5.28: Zusammengefasste Lastspiele für die ungebundene Bauweise

gebundene Bauweise

Schicht	Pflasterplatten	Bettung	Drainbeton	untere Tragschicht
60x30x8	$\geq 1,0E+10$	$\geq 1,0E+10$	458.784	837.407.278
60x30x14	7.706.080	$\geq 1,0E+10$	569.926	$\geq 1,0E+10$
60x30x18	7.079.744	$\geq 1,0E+10$	631.839	$\geq 1,0E+10$
60x40x8	$\geq 1,0E+10$	$\geq 1,0E+10$	545.878	$\geq 1,0E+10$
60x40x14	7.653.974	$\geq 1,0E+10$	637.885	$\geq 1,0E+10$
60x40x18	7.150.189	$\geq 1,0E+10$	645.870	$\geq 1,0E+10$
60x60x8	$\geq 1,0E+10$	$\geq 1,0E+10$	474.773	$\geq 1,0E+10$
60x60x14	7.794.175	$\geq 1,0E+10$	583.966	$\geq 1,0E+10$
60x60x18	7.275.564	$\geq 1,0E+10$	645.870	$\geq 1,0E+10$

Tabelle 5.29: Zusammengefasste Lastspiele für die gebundene Bauweise

Die Tabelle 5.30 zeigt für jedes Plattenformat die schwächste Schicht auf und ermittelt mit den zulässigen Lastspielen einen Ausnutzungsfaktor. Damit ist ersichtlich, dass die ermittelten BNLW des Berechnungsbeispiels selbst mit dem kleinsten Plattenformat, sowohl in der gebundenen als auch der ungebundenen Bauweise, aufgenommen werden können.

Zudem zeigt sich deutlich der Unterschied der Bauweisen in Bezug auf die schwächste Schicht. Versagt bei der ungebundenen Bauweise bei dünneren Platten die Bettung zuerst, ist es bei der gebundenen Bauweise stets die Drainbetontragschicht. Vergleicht man sämtliche Werte der beiden Bauweisen, kann der gebundenen Bauweise durchaus ein besseres Tragverhalten und eine höhere Dauerhaftigkeit zugesprochen werden. Allerdings muss hier angemerkt werden, dass eine Beeinflussung der Tragfähigkeit durch Temperatureinwirkung derzeit noch unberücksichtigt ist und die höhere Dauerhaftigkeit nur bei optimaler und vollständiger Bindung der gebundenen Schichten zustanden kommt.

Bauweise	ungebundene Bauweise			gebundene Bauweise		
	Schicht	Lastspiele	η	Schicht	Lastspiele	η
60x30x8	Bettung	121.119	0,82	Drainbeton	458.784	0,22
60x30x14	Bettung	454.467	0,22	Drainbeton	569.926	0,17
60x30x18	Drainbeton	559.553	0,18	Drainbeton	631.839	0,16
60x40x8	Bettung	249.402	0,40	Drainbeton	545.878	0,18
60x40x14	Drainbeton	440.817	0,23	Drainbeton	637.885	0,16
60x40x18	Drainbeton	504.500	0,20	Drainbeton	645.870	0,15
60x60x8	Bettung	251.091	0,40	Drainbeton	474.773	0,21
60x60x14	Drainbeton	482.096	0,21	Drainbeton	583.966	0,17
60x60x18	Drainbeton	504.500	0,20	Drainbeton	645.870	0,15

Tabelle 5.30: Ausnutzungsgrade für die schwächsten Schichten

5.6 Vergleich der Bemessungstabellen

In diesem Kapitel werden die Lastklassen der Bemessungstabellen aus der RVS 03.08.63: 2016 für die ungebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht mit den berechneten Werten des Dimensionierungskonzeptes verglichen und eine Empfehlung für einen möglichen Schichtaufbau für die gebundene Bauweise abgegeben.

5.6.1 Ungebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht

Nachfolgend werden die Lastklassen der RVS 03.08.63: 2016 mit den Ergebnissen des Dimensionierungskonzeptes verglichen. Dabei wurden die niedrigsten Lastspielzahlen aus den verschiedenen Plattenformaten gewählt. Es gilt allerdings anzumerken, dass die RVS für die Lastklassen LK0,1 und LK0,05 beim Schichtaufbau von einer 15 cm Drainbetontragschicht ausgeht, die Bemessung nach dem Dimensionierungskonzept aber stets für eine 20 cm Drainbetonschicht erfolgt. Zur Optimierung des Schichtaufbaus könnten in weiterer Folge FEM-Simulationen mit variierenden Schichtdicken erfolgen.

ungebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht – PF8

Plattendicke D | Lastklasse	LW lt. Dimensionierungskonzept			Aufbau lt. RVS 03.08.63: 2016		
	Platte 18 cm	Platte 14 cm	Platte 8 cm	LK0,4	LK0,1	LK0,05
Betonpflasterplatten	2.960.188	2.889.860	1.991.462	cm $\Sigma 53-57$	cm $\Sigma 44-52$	cm $\Sigma 42-52$
Bettung	847.272	454.467	121.119	14-18 ²⁾ 4 ¹⁾	10-18 ²⁾ 4 ¹⁾	8-18 ²⁾ 4 ¹⁾
Drainbetontragschicht *	504.500	440.817	312.307	20	15	15
ungebundene untere Tragschicht	110.866.148	94.598.596	91.006.534	15 UP ▽	15 UP ▽	15 UP ▽
kritisches Plattenformat	60x40x18	60x40x14	60x30x8			
LW _{zul}	504.500	440.817	121.119	400.000	100.000	50.000

* Die Dicke der Drainbetontragschicht beträgt beim Dimensionierungskonzept für alle Plattenformate 20 cm

Tabelle 5.31: Vergleich des Dimensionierungskonzeptes mit den Aufbauten der RVS 03.08.63: 2016

Bei dem Vergleich ist deutlich erkennbar, dass die maximal zulässigen Lastwechsel für die jeweiligen Lastklassen jedenfalls eingehalten werden. Teilweise werden die Werte auch deutlich übertroffen. Das lässt den Schluss zu, dass mit einer adaptierten Dicke der Drainbetontragschicht durchaus Optimierungen beim Schichtaufbau möglich wären. Zudem ist ersichtlich, dass die Rechteckplatten stets das kritische Plattenformat darstellen, wobei der Unterschied der maximalen Lastwechsel zwischen L/B 1,5 und 2,0 nur gering ausfällt.

5.6.2 gebundenen Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht

Die gebundene Bauweise ist in der derzeitigen RVS 03.08.63: 2016 nicht implementiert. Mit den durchgeführten Versuchen und den darauf aufbauenden Bemessungen können nun für einen Schichtaufbau in gebundener Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht Lastklassen bestimmt werden. In der Tabelle 5.32 sind für die unterschiedlichen Plattendimensionen die niedrigsten ertragbaren Lastspielzahlen der einzelnen Schichten bestimmt worden. Damit ergeben sich für drei Aufbauten die zulässige Anzahl an Lastwechseln, die sich einer Lastklasse zuordnen lassen.

gebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht			
Plattendicke D	LW lt. Dimensionierungskonzept		
	Platte 18 cm	Platte 14 cm	Platte 8 cm
Betonpflasterplatten	7.079.744	7.653.974	$>1,0 \cdot 10^9$ *1
Bettung	$>1,0 \cdot 10^9$ *1	$>1,0 \cdot 10^9$ *1	$>1,0 \cdot 10^9$ *1
Drainbetontragschicht *2	631.839	569.926	458.784
ungebundene untere Tragschicht	$>1,0 \cdot 10^9$ *1	$>1,0 \cdot 10^9$ *1	837.407.278
kritisches Plattenformat	60x30x18	60x30x14	60x30x8
LW _{zul}	631.839	569.926	458.784

*1 Die Werte für diese Schichten liegen über $1,0 \cdot 10^9$ und sind daher für die Bemessung nicht relevant

*2 Die Dicke der Drainbetontragschicht beträgt beim Dimensionierungskonzept für alle Plattenformate 20 cm

Tabelle 5.32: Maximal zulässige Lastwechsel für verschiedene Plattendicken

Erkennbar wird, dass selbst mit der dünnsten Pflasterplatte eine Zuordnung zur Lastklasse LK0,4 möglich wäre. Mit weiteren FEM-Simulationen könnten hier Abstufungen bezüglich der Schichtdicken und damit Optimierungen bei den Aufbauten erfolgen. Allerdings muss hier angemerkt werden, dass eine Beeinflussung der Tragfähigkeit durch Temperatureinwirkung derzeit noch unberücksichtigt ist und die ermittelte Dauerhaftigkeit nur bei optimaler und vollständiger Bindung der gebundenen Schichten zustanden kommen kann.

Zudem zeigt sich, dass die Rechteckplatten stets das kritische Plattenformat darstellen und das Seitenverhältnis somit ebenfalls einen maßgebenden Dimensionierungsparameter ergibt.

In Anlehnung an die Bemessungstabellen der RVS 03.08.63: 2016 wurde mit Tabelle 5.33 ein möglicher standardisierter Aufbau für die gebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht erstellt.

MUSTERTABELLE				
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
Bautype PF9	Pflasterplatten gebunden gebundene Bettung Pflasterdrainbetontragschicht ungeb. Untere Tragschicht	<p style="text-align: center;">cm Σ 47-57</p> <p style="text-align: center;">8-18²⁾</p> <p style="text-align: center;">4¹⁾</p> <p style="text-align: center;">20</p> <p style="text-align: center;">15</p> <p style="text-align: center;">UP</p>		
	$E_{V1,UP} \geq 35 \text{ MN/m}^2$			

- 1) Die Pflasterung in gebundener Bettung erfolgt auf fertige Höhe in Mörtelbettung. Im Gegensatz zur ungebundenen Bettung erfolgt keine weitere Verdichtung.
- 2) Nennmaß Pflasterplatten gemäß Tabelle 5.8



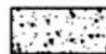
Pflasterplatten aus Beton gemäß ÖNORM EN 1339 mit gebundener Fugenfüllung gemäß RVS 08.18.01



Pflasterdrainbeton gemäß RVS 08.18.01



gebundenes Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01



U8 ungebundene Untere Tragschicht Klasse U8 gemäß RVS 08.15.01

Tabelle 5.33: Muster einer möglichen Bemessungstabelle für die gebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Pflasterbefestigungen bei innerstädtischen Verkehrsflächen nimmt stetig zu und vor allem im repräsentativen Bereich werden von PlanerInnen und BauherrInnen immer öfter schlanke Plattenabmessungen gewünscht. Die Ausführung mit einer Pflasterdrainbetontragschicht ist aus mehreren Aspekten empfehlenswert, allerdings auch stark von der Verkehrsbelastung abhängig. In den derzeit gültigen Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen zur Oberbaubemessung sind Standardaufbauten für Pflasterplatten aus Beton mit einer Drainbetontragschicht definiert, allerdings beziehen sich diese nur auf die ungebundene Bauweise. Die gebundene Bauweise ist aufgrund fehlender Erfahrungen bei der Ausführung, mangelnder Dimensionierungsnachweise und wenig bekannter Materialkennwerte nicht implementiert.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Dauerhaftigkeit von Pflasterplatten aus Beton und unter Einbeziehung der Ergebnisse der Diplomarbeit "Dimensionierung von Pflasterbefestigungen mit Drainbeton: Prüftechnische Ansprache des Ermüdungsverhaltens und numerische Modellierung des Gebrauchsverhaltens" [2], die sich mit der Drainbetonschicht befasst, wurde ein Dimensionierungskonzept für die gebundene Bauweise erstellt. Damit ist es möglich, eine Empfehlung für einen standardisierten Aufbau zu geben, aber auch Optimierungsmöglichkeiten bei der ungebundenen Bauweise zu erkennen.

6.1 Plattenprüfung

In einem ersten Schritt wurden im Labor Versuche zur Dauerhaftigkeit von industriell vorgefertigten Pflasterbetonplatten durchgeführt. Dazu werden die Probekörper in einer Prüfmaschine einem Dauerschwingversuch unterzogen, mit dem die maximale Lastwechselzahl ermittelt wurde.

Mit diesen Ergebnissen war es möglich, eine interpolierte Wöhlerkurve zu erstellen, mit der für gegebene Spannungen eine zulässige Anzahl an Lastwechseln abgelesen bzw. ermittelt werden konnten. Da bei jedem Versuch zusätzlich Wegaufnehmer installiert wurden, konnte damit der Spannungsabbau und folglich der Bruchmechanismus durch Ermüdung aufgezeigt werden.

Zusätzlich wurden auch statische Versuche durchgeführt. Mit den Wegaufnehmern, mit denen die Durchbiegung gemessen wurde, konnten, gemeinsam mit der Bruchlast, wesentliche Materialkennwerte ermittelt werden.

6.2 Dimensionierungskonzept

Mittels einer FEM-Simulation des Schichtaufbaus für die gebundene und ungebundene Bauweise konnten Spannungen in den einzelnen Schichten ermittelt werden. Diese Simulation wurde in eingangs erwähnter Diplomarbeit [2] bereits durchgeführt. Die Spannungswerte für verschiedene Plattenformate wurden in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und mit den Wöhlerkurven für Betonpflasterplatten bzw. die Drainbetontragschicht aus [2] kombiniert. Die sich dadurch ergebenden maximalen Lastwechsel für die einzelnen Schichten konnten genutzt werden, um einerseits die Schichtempfehlungen für die einzelnen Lastklassen der

ungebundenen Bauweise lt. RVS 03.08.63: 2016 zu vergleichen und andererseits um eine Empfehlung für einen Standardaufbau für die gebundene Bauweise zu erstellen.

6.3 Ausblick

Da derzeit die FEM-Simulation mit einer 20 cm dicken Drainbetonschicht durchgeführt wurde und die Ergebnisse sowohl bei der ungebundenen als auch der gebundenen Bauweise noch Spielraum in den zugewiesenen Lastklassen aufweisen, bietet sich hier noch Optimierungspotential. Zudem ist festzuhalten, dass die Bemessung ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses erfolgte. In der Verfeinerung und Erweiterung des Dimensionierungskonzeptes wäre daher der Einbau dieses Parameters durchaus sinnvoll.

Bei den ermittelten Lastspielzahlen der Dauerschwingversuche wäre es auch möglich, dass durch Bestimmung der statistischen Verteilung und entsprechender Fraktilwerte zur Risikobewertung ein höheres Sicherheitsniveau miteinbezogen wird.

Da die RVS 03.08.63: 2016 derzeit bei den Standardaufbauten mit Pflasterplatten aus Beton gleichzeitig auch Natursteinplatten einbezieht, sind Versuche an Natursteinplatten zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit ebenfalls geplant. Um damit allerdings eine Dimensionierung durchführen zu können, wäre die Anpassung des FEM-Modells aufgrund der unterschiedlichen Materialparameter erforderlich, da dadurch eine geänderte Spannungsverteilung zu erwarten ist. Die daraus resultierenden Spannungen ergeben mit den Ermüdungskriterien der einzelnen Schichten wieder maximale Lastwechsel. Werden diese kombiniert, führen sie zu einem Aufbau, der einer Lastklasse zugeordnet werden kann.

Der in dieser Arbeit ermittelte Aufbau für die gebundene Bauweise mit Pflasterbetonplatten zeigt, wie in einer künftigen RVS zur Dimensionierung des Oberbaus diese Bauweise Anwendung finden könnte.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Projektblatt zu *Forschungsprojekt "Collective Research Pflasterplattenbauweise"* – 2. *Forschungsjahr*; Wien, 2019
- [2] Jesús Oltra Sánchez-Izquierdo: Diplomarbeit – *Dimensionierung von Pflasterbefestigungen mit Drainbeton: Prüftechnische Ansprache des Ermüdungsverhaltens und numerische Modellierung des Gebrauchsverhaltens*; Wien, 14.03.2020
- [3] IVWS & IMWS der TU-Wien: *CR-Projekt Pflasterbauweisen – 1. Forschungsjahr* ; Wien, Februar 2014
- [4] IVWS & IMWS der TU-Wien: *CR-Projekt Pflasterbauweisen – 3. Forschungsjahr – Endbericht*; Wien, Jänner 2017
- [5] Litzka, J.: *Die Bemessung des Straßenoberbaus nach der neuen RVS 3.63. Baumaschine, Baugerät, Baustelle, Heft 2*, 1987
- [6] Horst Mentlein: *Pflaster Atlas*; Rudolf Müller Verlag, Köln 2007, 9
- [7] Eduard Zirklerin: *Asphalt, ein Werkstoff durch die Jahrtausende*; Giesel Verlag, Isernhagen 2001, 82
- [8] Chris Scarre: *Die Siebzig Weltwunder*; Frederking & Thaler Verlag, München 2004, 240
- [9] Jörn Buchholz: *Gebundene Pflasterbauweise. Thermische Spannungen in Verkehrsflächenbefestigungen der gebundenen Pflasterbauweise*; Kassel, 22. Dezember 2010.
- [10] Brian Shackel: *Handbuch Betonpflaster – Bemessung, Konstruktion, Ausführung*; Beton-Verlag GmbH; Düsseldorf, 1996, 11-27
- [11] Dr.-Ing. Josef Eisenmann: *Betonfahrbahnen – Entwurf, Berechnung, Ausführung*; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, München, Düsseldorf, 1979, 1-6
- [12] Institut für Verkehrswissenschaften, TU-Wien, *Skriptum zur LVA 230.009 Straßenwesen*, Wien, 2013, Kapitel 5
- [13] Blab, R.: *Konzeption hoch belasteter Verkehrsflächen mit Pflasterstein- oder Pflasterplattendecken – Planung und Dimensionierung*; Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 2008
- [14] Krapfenbauer: *Bautabellen 16. Auflage*; Verlag Jugend & Volk, Wien, 2008, 41, 94
- [15] Shell International Petroleum Company Limited: *Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*; Shell International Petroleum, London, 1978
- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Begriffsbestimmung Teil Straßenbautechnik*. Ausgabe 2003, FGSV-Verlag, Köln,

- [17] Dip.-Ing. Tim Weirich: Dissertation – *Ermüdungsverhalten des Betonstahls unter Berücksichtigung möglicher Korrosionseinflüsse*, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2013, 5, 60
- [18] Anush K. ChandrappaKrishna Prapoorna Biligiri: *Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development*, Construction and Building Materials 153, 2017, 1–15

7.1 Internetquellen

- [19] https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/technik/baustoffe_und_baustoffgemische.pdf
(Stand: 23.05.2020)
- [20] <http://www.gestrata.at/publikationen/archiv-journal-beitrage/gestrata-journal-138/rvs-halbstarre-deckschichten-eine-bauweise-entwickelt-sich>
(Stand: 23.05.2020)
- [21] <https://www.beton.org/wissen/infrastruktur/beton-fuer-strassendecken/>
(Stand: 23.05.2020)
- [22] <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkblätter/S2.pdf>
(Stand: 23.05.2020)
- [23] https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-17018/Aufbau-einer-Straßenbefestigung_Druckversion.pdf
(Stand: 23.05.2020)
- [24] <https://garten-leber.at/blog/pflaster-bauweisen-online-beratung-pflasterung/>
(Stand: 23.05.2020)
- [25] http://www.mroczek-betonwerk-kg.de/html/planung_und_ausfuhrung.html
(Stand: 23.05.2020)
- [26] <https://www.bauwion.de/wissen/aussenraum/befestigte-flaechen/612-pflasterbelaege>
(Stand: 23.05.2020)
- [27] <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/garten-landschaftsbau-tiefbau/pflasterbelaege-geeigneter-untergrund/>
(Stand: 23.05.2020)
- [28] <https://www.fqp.at/bauweisen>
(Stand: 23.05.2020)
- [29] <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/werkstoffpruefung/dauerschwingversuch-wohler-versuch/>
(Stand: 23.05.2020)

- [30] <https://tragkonstruktionen.tuwien.ac.at/labor/pruefvorrichtungen/>
(Stand: 23.05.2020)
- [31] <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/werkstoffpruefung/biegeversuch/>
(Stand: 23.05.2020)
- [32] https://lbv.brandenburg.de/dateien/staedtebaufoerd/bautechnik_Tipp_15-09.pdf
(Stand: 13.06.2020)
- [33] <http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Ermüdung>
(Stand: 13.06.2020)
- [34] <http://www.peil-ing.com/ingenieure/ermuedg/schaedigsprognose/ermuedgs-festigkurven>
(Stand: 13.06.2020)

7.2 Normenverzeichnis

- [35] RVS 03.08.63: *Oberbaubemessung*; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV); Wien, 14. September 2016
- [36] RVS 08.18.01: *Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen*; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV); Wien, Mai 2009
- [37] ÖNORM EN 1339: 2007 01 01; *Platten aus Beton - Anforderung und Prüfverfahren*
- [38] ÖNORM EN 1341: 2013 01 15; *Platten aus Naturstein für Außenbereiche - Anforderungen und Prüfverfahren*
- [39] ÖNORM B 3108: 2014 08 01; *Natürliche Gesteine - Pflastersteine und Pflasterplatten, Randeinfassungen - Abmessungen und Anforderungen an die Gesteinseigenschaften - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 1341, EN 1342 und EN 1343*

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Aufbau einer Römerstraße auf festem Untergrund [11]	3
Abb. 2.2: Ausgleich zulässiger Höhentoleranzen bei Betonpflastersteinen [25].....	7
Abb. 2.3: Verformung des Pflasters infolge inkonstanter Bettungsschichtdicke [25].....	7
Abb. 2.4: Straßenaufbau (Systemskizze) [35]	8
Abb. 2.5: gebundene Bauweise [26]	9
Abb. 2.6: ungebundene Bauweise [26]	10
Abb. 3.1: Beispiel für eine Wöhlerkurve [29].....	13
Abb. 3.2: Schwingungszyklus [29]	14
Abb. 3.3: Bruchvorgang bei Ermüdung [29].....	15
Abb. 3.4: Abnehmender E-Modul. Ergebnis der Versuchsauswertung zu Versuch 01	15
Abb. 3.5: Skizze zum Versuchsaufbau	17
Abb. 3.6: Versuchsaufbau im Labor.....	18
Abb. 3.7: Exemplarische Abbildung – Versuch 02 (a)	20
Abb. 3.8: Exemplarische Abbildung – Versuch 02 (b)	20
Abb. 4.1: Durchbiegung der Platte aus Versuch 01 – statisch. Blau: Bereich starker Durchbiegung Weiß: Bereich der Lagerung.....	21
Abb. 4.2: Bezeichnung und Positionierung der Wegaufnehmer	24
Abb. 4.3: Verlauf des E-Moduls V01 – Wegaufnehmer 2	25
Abb. 4.4: Verlauf des E-Moduls V02 – Wegaufnehmer 2	27
Abb. 4.5: Verlauf des E-Moduls V03 – Wegaufnehmer 1	28
Abb. 4.6: Verlauf des E-Moduls V04 – Wegaufnehmer 1	29
Abb. 4.7: Verlauf des E-Moduls V05 – Wegaufnehmer 1	30
Abb. 4.8: Verlauf des E-Moduls V06 – Wegaufnehmer 2	32
Abb. 4.9: Verlauf des E-Moduls V08 – Wegaufnehmer 1	33
Abb. 4.10: Verlauf des E-Moduls V09 – Wegaufnehmer 2	35
Abb. 4.11: Bezeichnung und Positionierung der Wegaufnehmer	36
Abb. 4.12: Ermittlung von $\Delta u_{1,2,3-4,5,6,7}$	36
Abb. 4.13: Durchbiegung der Platte V01. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung.....	37
Abb. 4.14: Durchbiegung der Platte V02. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung.....	38
Abb. 4.15: Durchbiegung der Platte V03. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung.....	39
Abb. 4.16: Durchbiegung der Platte V04. Blau: Bereich starker Durchbiegung. Weiß: Bereich der Lagerung.....	40
Abb. 4.17: Ermittelte Wöhlerkurve	41
Abb. 4.18: Kraft-Weg-Diagramm für die statischen Versuche	42
Abb. 5.1: Geometrie des verwendeten FE-Modells [2]	54

Abb. 5.2: Generierte Belastung des FE-Modells [2] 55

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

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich von Betonsteinpflaster mit anderen Deckenarten [10]	5
Tabelle 2.2: Vergleich der Bauweisen [36]	11
Tabelle 3.1: Zusammenfassung der bisher durchgeführten Prüfungen an Pflastersteinen – Stand 06. Mai 2020	19
Tabelle 3.2: Standardabweichungen der dynamischen bzw. statischen Versuche	19
Tabelle 4.1: Erläuterung der Indizes für die Auswertung	24
Tabelle 4.2: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 01 – dynamisch	25
Tabelle 4.3: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 02 – dynamisch	26
Tabelle 4.4: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 03 – dynamisch	27
Tabelle 4.5: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 04 – dynamisch	28
Tabelle 4.6: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 05 – dynamisch	30
Tabelle 4.7: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 06 – dynamisch	31
Tabelle 4.8: Ermittelte Lastspiele bei Versuch 07 – dynamisch	32
Tabelle 4.9: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 05 – dynamisch	33
Tabelle 4.10: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 05 – dynamisch	34
Tabelle 4.11: Erläuterung der Indizes für die Auswertung	36
Tabelle 4.12: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 01 – statisch	37
Tabelle 4.13: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 02 – statisch	38
Tabelle 4.14: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 03 – statisch	39
Tabelle 4.15: Zusammenfassung der gemittelten und ermittelten Werte zum Versuch 04 – statisch	40
Tabelle 4.16: Spannungsermittlung im Querschnitt für Dauerschwingversuche	40
Tabelle 4.17: Zusammenfassung der ermittelten Materialkennwerte	42
Tabelle 5.1: Äquivalenztabelle Lastklassen der Pflasterstein- und Pflasterplattenbauweisen [35]	44
Tabelle 5.2: Mittlerer Äquivalenzwert für verschiedene Fahrzeugkategorien i	45
Tabelle 5.3: Mittlerer Äquivalenzwert des JDTLV-Kollektivs für verschiedene Straßenkategorien	45
Tabelle 5.4: Fahrspurfaktor S in Abhängigkeit von der Fahrstreifenbreite b_f (bei Zwischenbreiten ist die kleinere Fahrstreifenbreite maßgebend)	46

Tabelle 5.5: Zuwachsfaktor z in Abhängigkeit von Bemessungsperiode n und jährlicher Zuwachsrate p	46
Tabelle 5.6: Lastklassenzuordnung aufgrund des maßgebenden Schwerverkehrs im Querschnitt für das gering belastete Straßennetz*)	46
Tabelle 5.7: Mindesttragfähigkeit E_{v1} der ungebundenen Unteren Tragschicht U8 gemäß RVS 08.15.01 in Abhängigkeit der Schichtdicke für die Bautypen PF5 bis PF8.....	47
Tabelle 5.8: Erforderliche Mindestdicken (Nennmaß) für Pflasterplatten nach RVS 03.08.63: 2016 [35].....	48
Tabelle 5.9: Bemessungstabelle für ungebundene Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht nach [35].....	50
Tabelle 5.10: Bemessungstabelle ungebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht nach [35]	51
Tabelle 5.11: Materialparameter der verschiedenen Jahresperioden [2] [3] [5]	54
Tabelle 5.12: Ergebnisse der Spannungsermittlung mittels FEM-Simulation für Betonstein-Pflasterplatten	57
Tabelle 5.13: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Spannungen für Betonstein-Pflasterplatten	57
Tabelle 5.14: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für Betonstein-Pflasterplatten	57
Tabelle 5.15: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für Betonstein-Pflasterplatten	58
Tabelle 5.16: Ergebnisse der Dehnungen in der Bettung mittels FEM-Simulation für die Bettungsschicht.....	58
Tabelle 5.17: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Dehnungen für die Bettungsschicht ..	59
Tabelle 5.18: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für die Bettung	59
Tabelle 5.19: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für die Bettung	59
Tabelle 5.20: Ergebnisse der Spannungsermittlung mittels FEM-Simulation für die Drainbetonschicht	60
Tabelle 5.21: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Spannungen für die Drainbetonschicht	60
Tabelle 5.22: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für die Drainbetonschicht	61
Tabelle 5.23: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für die Drainbetonschicht	61
Tabelle 5.24: Ergebnisse der Dehnungen in der Bettung mittels FEM-Simulation für die ungebundene untere Tragschicht	62
Tabelle 5.25: Ergebnisse der Lastspielzahlen zu den Dehnungen für die ungebundene untere Tragschicht	62
Tabelle 5.26: Ergebnisse zum Schädigungsgrad für die ungebundene untere Tragschicht .	62
Tabelle 5.27: Ertragbare Anzahl an Lastwechseln für die ungebundene untere Tragschicht	63
Tabelle 5.28: Zusammengefasste Lastspiele für die ungebundene Bauweise.....	64
Tabelle 5.29: Zusammengefasste Lastspiele für die gebundene Bauweise.....	64
Tabelle 5.30: Ausnutzungsgrade für die schwächsten Schichten	65
Tabelle 5.31: Vergleich des Dimensionierungskonzepts mit den Aufbauten der RVS 03.08.63: 2016	65
Tabelle 5.32: Maximal zulässige Lastwechsel für verschiedene Plattendicken.....	66

Tabelle 5.33: Muster einer möglichen Bemessungstabelle für die gebundene Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht 67

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