

**Schriftenreihe Umweltingenieurwesen**

Band 97

Dissertation

*Andreas Heiko Metzing*

**Verdichtung von ungebundenen Pflaster-  
decken und Plattenbelägen –  
Untersuchungen zur Lagerungsdichte  
des Fugenmaterials**

Professur

**Geotechnik und  
Küstenwasserbau**

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

**Universität  
Rostock**



Traditio et Innovatio

Dissertation

## HERAUSGEBER

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
18051 Rostock

## CIP-KURZTITELAUFNahme

Dissertation Andreas Heiko Metzting  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Rostock, 2020

© Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät,  
18051 Rostock

## BEZUGSMÖGLICHKEITEN

Universität Rostock  
Universitätsbibliothek, Schriftentausch  
18051 Rostock  
Tel.: 0381/498-8639, Fax: 0381/498-8632  
E-Mail: [tausch.ub@uni-rostock.de](mailto:tausch.ub@uni-rostock.de)

Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock  
Tel.: 0381/498-3701, Fax: 0381/498-3702

ISBN 978-3-86009-510-2  
DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002742](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002742)

Universität Rostock  
Professur Geotechnik und Küstenwasserbau

Gedruckt in Deutschland auf Recyclingpapier.

## Vorwort

Die vorliegende Publikation ist die gedruckte Fassung der Dissertation von Herrn

**Dr.-Ing. Andreas Heiko Metzing,**

die er am 27. November 2019 an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock mit **cum laude** verteidigt hat.

Die Arbeit wurde von **Herrn Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff**, dem Inhaber der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock, betreut und begutachtet. Weitere Gutachter waren **Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmuth Wellner** vom Institut für Straßenbauwesen und Straßenbau der Technischen Universität Dresden und **Herr Prof. Dr.-Ing. Holger Lorenzl**, FB Bauwesen FG Verkehrswesen, von der Technischen Hochschule Lübeck.

Die von Herrn Dr. Metzing vorgelegte Dissertation hat Untersuchungen zur Lagerungsdichte des Fugenmaterials von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen zum Thema. Ziel der Arbeit war es, Unzulänglichkeiten beim Pflasterbau aufzudecken/zu sammeln, eine wissenschaftliche Analyse darüber durchzuführen und dann gezielt -aufbauend auf einer Vielzahl von Laborversuchen- die Lösung des Problems zu suchen.

Pflasterdecken und Plattenbeläge bestehen aus Bettung, Fuge und Stein. Bei der so genannten ungebundenen Regelbauweise werden Bettung und Fugenmaterial aus einem ungebundenen Baustoffgemisch natürlicher Gesteinskörnungen hergestellt. In der Praxis entleeren sich häufig die Fugen, sodass es zum Lösen von Pflastersteinen bzw. Platten kommt. Die Gefährdung der Verkehrssicherungspflicht und die Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit in Verbindung mit einer reduzierten Nutzungsdauer ist die Folge. Herr Dr. Metzing hat untersucht, ob die Herstellung eines ungebundenen Belages bzw. die Verdichtung der ungebundenen Pflasterdecke bzw. des ungebundenen Plattenbelages einen Einfluss auf die Anfangsstabilität der ungebundenen Fugen in Abhängigkeit vom Fugenmaterial besitzt. Ziel war es auch herauszufinden, ob die Anfangsstabilität einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages durch einfach in der Praxis umzusetzende Bauverfahren verbessert werden kann.

Die in Verkehrsflächen auftretenden Lasten aus Verkehr können nur sachgerecht abgetragen werden, wenn die Fugen sachgerecht gefüllt sind und das Fugenmaterial im eingebauten Zustand eine hinreichende Lagerungsdichte aufweist. Die Ergebnisse zeigen, dass der Wassergehalt des Fugenmaterials beim Verdichtungsvorgang in Abhängigkeit vom Fugenmaterial einen signifikanten Einfluss auf die Lagerungsdichte des Fugenmaterials besitzt. Sowohl Einfegen als auch Einschlämmen von Fugenmaterial hat im Ergebnis keine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials zur Folge. Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge sollten mit feuchtem Fugenmaterial durch Einsatz einer Rüttelplatte verdichtet werden, um den Reibungswiderstand im Material und zwischen Stein und Fugenmaterial zu reduzieren und demnach eine optimale Lagerungsdichte des ungebundenen Fugenmaterials zu erreichen. Die Verdichtungswilligkeit des Fugenmaterials hängt von der Kornform, der Korngrößenverteilung in Verbindung mit der Höhe der Feinanteile ab.

Anhand der durchgeführten Labor-Untersuchungen ist es über die Verwendung einer von Herr Dr. Metzing entwickelten innovativen Prüfmethode mit der Fugensonde gelungen, die Stabilität bzw. Lagerungsdichte von ungebundenen Fugen zu ermitteln. Die Verdichtung von ungebundenem Fugenmaterial nach dem Einfegen oder Einschlämmen ist eine notwendige Grundvoraussetzung, um das ungebundene Fugenmaterial über Eigengewicht und dynamische Krafteinwirkung durch Kornumlagerung zu verdichten. Dies hat zur Folge, durch Verdichtung erzeugte Absackungen des ungebundenen Fugenmaterials -und somit entstehende offene Fugen- in einem weiteren Arbeitsschritt zu verfüllen. Durch Einschlämmen werden die

Fugen bestmöglich gefüllt. Einfügen hat den Nachteil, dass je nach Wassergehalt das lose Fugenmaterial nicht im gesamten Fugenquerschnitt eingebracht werden kann (Hohlräume im Fugenquerschnitt). Jede vorgenommene Verfüllung ist zu verdichten. In Abhängigkeit von der Fugenbreite, vom Fugenmaterial und der Steinhöhe können mehrere Verdichtungsvorgänge notwendig werden. Die durchgeführten Fugensondierungen haben, etwas überraschend, selbst bei hohen Wassergehalten des Fugenmaterials bei Ausübung der Sondierung zu geringeren Eindringtiefen der Sondiernadel geführt als bei Fugenmaterial mit geringen Wassergehalten.



Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

### Danksagung des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit und in Zusammenarbeit mit der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff danke ich für die Betreuung, Förderung und Unterstützung meiner Arbeit sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Die mir gewährte Eigenständigkeit und Eigenverantwortung bildet die Grundlage für die Entwicklung und Ausarbeitung des in meiner Dissertation behandelten Themas.

Die Zusammenarbeit mit allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau war stets von großer Offenheit und Sympathie geprägt. Ich möchte an dieser Stelle besonders jenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau danken, die durch ihr Engagement die Voraussetzungen zum Gelingen dieser Arbeit geschaffen haben. Für die tatkräftige Unterstützung bei der Herstellung der Prüfflächen danke ich Herrn Matthias Bauer und Herrn Felix Schäfer. Weiterhin möchte ich den Unternehmen danken, die durch das zur Verfügungstellen von Baustoffen und Geräten die Herstellung der Prüfflächen erst ermöglicht haben. Mein Dank geht an die Firmen GP Papenburg Betonwerke Nord GmbH, Naue GmbH & Co. KG, Gutjahr Systemtechnik GmbH, quick-mix Gruppe GmbH & Co KG und die Wacker Neuson SE.

Herzlich danken möchte ich insbesondere meinem langjährigen Mentor Herrn Erich Lanicca für die tatkräftige Beratung und Herrn Manfred Utnehmer für die technische Ausführung der Fugensonde. Weiterhin danke ich meiner Mitarbeiterin Frau Adam für die zuverlässige Unterstützung während der Entstehung der Promotion im Arbeitsalltag.

Mein besonderer Dank geht an meine Frau Meike, da diese Arbeit ohne ihre Überzeugungskraft und Rückhalt nicht möglich gewesen wäre. Ein großer Dank geht auch an Lara und Annika; sie haben mit ihrem Einsatz mein Vorankommen und das Entstehen der Dissertation sehr gefördert. Für entgegen genommene Entbehren während der Zeit der Promotion möchte ich hiermit meinen Kindern Leon, Lenn und Limahl danken.



Dr.-Ing. Andreas Heiko Metzger



# Universität Rostock



Traditio et Innovatio

Aus der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

## Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen - Untersuchungen zur Lagerungsdichte des Fugenmaterials

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Heiko Metzning

Kreuzstraße 15, 38300 Wolfenbüttel

Rostock, den 27.6.2018

## GUTACHTER

**Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff**

Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
Universität Rostock

**Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner**

Institut für Straßenbauwesen und Straßenbau  
Technische Universität Dresden

**Prof. Dr.-Ing. Holger Lorenz**

FB Bauwesen, FG Verkehrswesen  
Technische Hochschule Lübeck

**Datum der Einreichung:** 17. Juni 2018

**Datum der Verteidigung:** 27. November 2019

## **Abstract**

Compacting unbound pavements, studies on the density of jointing material.

In earlier times, unbound paving block pavements were used around the world for public traffic areas. Today, they are used around the world for visually sophisticated street spaces and plaza designs. The pavements with sand-filled vertical joints, comprised of bedding, joint, and stone or tiles, are constructed according to the standard construction method with bedding and joint material from an unbound building material mixture of natural stone aggregates.

In practice, the joints frequently become hollow, causing the loosening of the paving block pavements. This results in a safety hazard that impairs the integrity and shortens the life of the construction.

This work studies whether the manufacturing process of an unbound surface and the compacting of said surface have an impact on the initial stability of the unbound pavements, depending on the jointing material. Furthermore, this work also studies whether the initial stability of a surface made of unbound paving blocks can be improved easily in practice by the implementation of a certain method of construction.

The results of the studies show that the jointing material and the water content of the jointing material during the compacting process have a significant impact on the density of the jointing material. Neither brushing-in nor pouring-in jointing material results in an adequate density for the jointing material. Unbound pavements surfaces should be compacted with moist jointing material using a tile compactor in order to reduce the frictional resistance between the stone and jointing material, giving an optimal density for the unbound jointing material. The willingness of the jointing material to compact depends on its granular form and the concentration of fine particles.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung.....	1
1.1	Einleitung .....	1
1.2	Stand der Forschung.....	1
1.3	Stand der Technik .....	2
1.4	Problemstellung .....	5
1.4.1	Fugenentleerung – Typ 1: Fugenentleerung durch fehlende Filterstabilität zwischen Fuge und Bettung .....	6
1.4.2	Fugenentleerung – Typ 2: Fugenentleerung durch Nachverdichtung in Form von Kornumlagerungen .....	8
1.4.3	Fugenentleerung – Typ 3: Fugenentleerung durch einen „Durchbruch“ eines vorhandenen „Gewölbes“ in der Fuge mit der Folge plötzlichen Absackens der Fugenfüllung .....	9
1.4.4	Fugenentleerung - Typ 4: Fugenentleerung durch oberflächennahe Entleerung .....	10
1.5	Abgrenzung der Arbeit .....	12
2	Grundlagen .....	12
2.1	Voruntersuchungen.....	19
2.1.1	Anwendungsfall 1 .....	19
2.1.2	Anwendungsfall 2 .....	20
2.1.3	Anwendungsfall 3 .....	22
2.2	Ergebnisse der Voruntersuchungen.....	23
3	Untersuchungen.....	25
3.1	Prüfflächen .....	25
3.2	Unterschiede der einzelnen Prüfflächen.....	26
3.3	Verwendete Geräte und Materialien.....	26
3.3.1	Estrich als Gefälleschicht .....	26
3.3.2	Dränmatte mit Gleitfolie.....	27
3.3.3	Grobkornmörtel .....	27
3.3.4	Filtervliesstoff .....	27
3.3.5	Pflastersteine .....	27
3.3.6	Bettungsmaterial .....	28
3.3.7	Fugenmaterialien .....	28
3.3.7.1	Brechsand 0/2 mm, wenig Feinanteile .....	29
3.3.7.2	Brechsand 0/2 mm, viele Feinanteile .....	29
3.3.7.3	Rundkorn 0/1 mm, wenig Feinanteile.....	30
3.3.7.4	Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm, viele Feinanteile .....	30

3.3.7.5	Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm, wenig Feinanteile.....	30
3.3.7.6	Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm, wenig Feinanteile.....	31
3.3.7.7	Splitt 2/5 mm .....	31
3.3.8	Filterstabilität.....	32
3.4	Herstellung der Prüfflächen.....	34
3.4.1	Verlegung der Pflastersteine .....	37
3.4.2	Durchführung der Verfüguung.....	38
3.4.3	Verdichtung der Prüfflächen.....	38
3.5	Untersuchungen an den Prüfflächen.....	38
3.5.1	Bestimmung Wassergehalt des Fugenmaterials beim Einbau .....	38
3.5.2	Bestimmung der Lagerungsdichte des Fugenmaterials .....	40
3.5.2.1	Prüfgerät Fugensonde.....	40
3.5.2.2	Ergebnisse der Fugensondierungen .....	47
3.5.2.2.1	Allgemeine Erläuterungen.....	47
3.5.2.2.2	Auswertung der Fugensondierungen .....	48
3.5.2.2.3	Ergebnisse am Beispiel der Prüffläche Nr. 1.....	55
3.5.2.2.3.1	Prüffläche Nr. 1.1 (Anhang D1.1).....	56
3.5.2.2.3.2	Prüffläche Nr. 1.2 (Anhang D1.2).....	60
3.5.2.2.3.3	Prüffläche Nr. 1.3 (Anhang D1.3).....	60
3.5.2.2.3.4	Prüffläche Nr. 1.3.1 (als Festlegung der Vorgehensweise bei „nassen“ Verdichtungsvorgängen)	63
3.5.2.2.3.5	Prüffläche Nr. 1.4 (Anhang D1.4).....	63
3.5.2.2.3.6	Prüffläche Nr. 1.4.1 (Anhang D1.4.1).....	64
3.5.2.2.3.7	Prüffläche Nr. 1.4.2 (Anhang D1.4.2).....	69
3.5.2.2.3.8	Prüffläche Nr. 1.4.3 (Anhang D1.4.3).....	73
3.5.2.2.3.9	Prüffläche Nr. 1.4.4 (Anhang D1.4.4).....	76
3.5.2.2.3.10	Prüffläche Nr. 1.5 (Anhang D1.5).....	79
3.5.2.2.3.11	Prüffläche Nr. 1.5.1 (Anhang D1.5.1).....	83
3.5.2.2.3.12	Prüffläche Nr. 1.6 (Anhang D1.6).....	87
3.5.2.2.4	Auswertung der Messwerte der durchgeführten Fugensondierungen .....	89
	bei Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4	
3.5.2.2.4.1	Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte .....	90
	(Anhang E1.1)	
3.5.2.2.4.2	Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe (Anhang E1.2) .....	91
3.5.2.2.4.3	Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung (Anhang E1.3).....	92

3.5.2.2.4.4	Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen (Anhang E1.4 und Anhang E1.7)	93
3.5.2.2.4.5	Vergleich der Messdaten der Standardabweichung (Anhang E1.5)	97
3.5.2.3	Beurteilung der Fugensondierungen unter Betrachtung der Proctordichte	97
3.5.2.4	Weitere Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen	104
3.5.2.4.1	Bettungsmaterial	104
3.5.2.4.2	Fugenmaterial	108
3.5.3	Zusammenfassende Wertung der Ergebnisse der Prüfflächen	110
4	Fazit	112
5	Praxisrelevante Aspekte der Untersuchung	113
6	Zusammenfassung	113
7	Quellen- und Literaturverzeichnis	115
8	Anhang	120
9	Formelverzeichnis	128
10	Abbildungsverzeichnis	132
11	Tabellenverzeichnis	138
12	Thesen	139
13	Lebenslauf	139





# 1 Einleitung und Problemstellung

## 1.1 Einleitung

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge wurden früher und werden heute im Bereich öffentlicher Verkehrsflächen sowie optisch anspruchsvollem Straßenraum und der Platzgestaltung weltweit ausgeführt. Die ungebundene Pflasterdecke bzw. der ungebundene Plattenbelag, bestehend aus Bettung, Fuge und Stein bzw. Platte, wird bei der so genannten Regelbauweise (ZTV Pflaster-StB) mit einer Bettung und einem Fugenmaterial aus einem ungebundenen Baustoffgemisch, bestehend aus Gesteinskörnungen und Gesteinskörnungsgemischen, hergestellt.

In der Bundesrepublik Deutschland werden nach umfangreichen Erhebungen jährlich etwa 95 Millionen m<sup>2</sup> Betonpflaster- und 19 Millionen m<sup>2</sup> Betonplattenflächen errichtet (Betonverband, 2013). Derartig genaue Erhebungen liegen für Natursteine und Klinkersteine<sup>1</sup> nicht vor.

In der Praxis entleeren sich häufig die Fugen, sodass es zum Lösen von Pflastersteinen bzw. Platten kommt. Die Gefährdung der Verkehrssicherungspflicht und die Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit in Verbindung mit einer reduzierten Nutzungsdauer ist die Folge.

In dieser Arbeit wird untersucht, ob die Herstellung eines ungebundenen Belages, respektive die Verdichtung der ungebundenen Pflasterdecke bzw. des ungebundenen Plattenbelages einen Einfluss auf die Anfangsstabilität der ungebundenen Fugen in Abhängigkeit vom Fugenmaterial besitzt. Weiterhin wird geprüft, ob die Anfangsstabilität einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages durch einfach in der Praxis umzusetzende Bauverfahren verbessert werden kann.

## 1.2 Stand der Forschung

Der Stand der Praxis wird in dem so genannten Stand der anerkannten Regeln der Technik widerspiegelt. Die anerkannten Regeln der Technik bedeuten, dass sich Bauweisen und Verfahren im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten als theoretisch richtig erwiesen und sich in der Praxis ebenfalls aufgrund langjähriger Erfahrung als positiv niedergeschlagen haben (Bayerlein, Bleutge & Roeßner, 2015).

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge zeigen oftmals das Phänomen, dass einerseits Fugentleerungen stattfinden und andererseits Steinverschiebungen auftreten. Weitere Folge aus diesen beiden Phänomenen ist die Verformung des Belages. Das Thema des horizontalen Verschiebewiderstandes wurde bereits in Shackel (1996) behandelt. Es wurde festgestellt, dass verschiedene Steinformate, und hier insbesondere Betonsteinpflasterverbundsysteme einen positiven Widerstand in Bezug auf die horizontale Verschiebesicherung aufweisen. Hinsichtlich des Tragverhaltens von Pflasterbefestigungen wurde festgestellt, dass dem Bettungs- und Fugenmaterial ein erhöhter Einfluss auf die Dauerhaftigkeit einer ungebundenen Pflasterdecke und eines ungebundenen Plattenbelages zukommt. Dieser Sachverhalt wurde bereits in Koch (1999) behandelt. In Ascher, Lerch & Wellner (2007) wurde das Verformungsverhalten von Betonpflasterbefestigungen unter vertikaler und horizontaler dynamischer Lasteintragung geprüft. Hierbei wurde Fugenmaterial vor und nach dem Verdichtungs Vorgang bis zur vollständigen Füllung trocken in die Fugen eingekehrt. Die Vergleiche verschiedener Fugenmaterialien deuten auf einen eindeutigen Vorteil des Natursandes gegenüber einem Brechsand und Brechsand-Splitt hin. Es wurde angenommen, dass der Natursand durch die geringere innere Reibung einfach eine dichtere Lagerung in den Fugen erreicht. Bei den gebrochenen Materialien behinderte die Verzahnung der Körner die Verdichtung durch Eigengewicht

---

<sup>1</sup> E-Mails Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. und vom Deutschen Naturstein-Verband e.V.

und Vibration. Durch Brückenbildung der Körner konnten die Fugen nicht optimal gefüllt werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Fugenfüllung ein entscheidender Einfluss zukommt. *Die Einflussgröße im Fugenmaterial, Fugenbreite, Fugenfüllungsgrad und Verdichtung des Fugenmaterials stehen in einem komplexen Zusammenhang. Die Verdichtung des Fugenmaterials unterscheidet sich von der Verdichtung anderer ungebundener Materialien durch die fehlende Auflast. Damit muss die Verdichtungswirkung über die Vibration der Pflastersteine und das Eigengewicht der Fugenfüllung erreicht werden. Für die Fugenfüllung haben sich die Materialien Natursand 0/2 und Brechsand-Splitt 0/5 als günstiger erwiesen als Brechsand 0/2. Der Natursand 0/2 erreicht zwar bei den untersuchten Materialien die höchste Lagerungsdichte durch die geringere innere Reibung, kann aber auch durch Kehren und Saugen am leichtesten nach oben ausgetragen werden, was sich in der praktischen Anwendung als ungünstig erweist* (Ascher, Lerch & Wellner, 2007).

Bei der Herstellung der Testflächen in ungebundener Bauweise für die Simulation von Verkehr wurde ein Mobile Load Simulator MLS 10 aus der Schweiz verwendet. Während des Testens war das Hauptproblem der sich rasch leerenden Fugen, dass die ungebundenen Fugen keine Zeit hatten sich zu verfestigen (Hengl, 2017).

Aus Beobachtungen in der Praxis hängt die Lastabtragung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen von zwei wesentlichen Faktoren ab. Diese sind die Fugenbreite und das verwendete Größtkorn des Fugenmaterials. Nur eine entsprechende Korngrößenverteilung des Fugenmaterials ermöglicht eine dauerhafte Lastabtragung. Weiterhin ist die Lagerungsdichte des Fugenmaterials für die Funktion einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages entscheidend. Ist die Lagerungsdichte des Fugenmaterials ungenügend, so kann selbst ein ideales Fugenmaterial keine hinreichenden Lasten aufnehmen, da ein Ausweichpotential (Metzging & Saathoff, 2018) vorhanden ist.

Diese Arbeit soll dazu dienen festzustellen, ob unterschiedliche Fugenmaterialien, Wassergehalte des Fugenmaterials und Verdichtungsverfahren einen Einfluss auf die Anfangsstabilität ungebundener Fugen haben und demnach unterschiedliche Lagerungsdichten der Fugenmaterialien zu verzeichnen sind.

## 1.3 Stand der Technik

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge werden in der Praxis durch Überfahren mit Rüttelplatten verdichtet. Das ungebundene Fugenmaterial wird nicht durch Auflast des Verdichtungsgerätes komprimiert. Die Lagerungsdichte des Fugenmaterials wird durch Eigengewicht und erzeugter Kornumlagerung durch Schwingung aus dynamischer Verdichtung hergestellt. Die in Literatur und Regelwerk enthaltenen Angaben zur Verfüllung der Fugen und der Verdichtung eines ungebundenen Belages werden nachfolgend aufgeführt.

Gemäß MFP R2 (Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie Einfassungen, 2015), Ziffer 7.5 Verfugen, Verdichten, gilt: *... Die Fugen sind zunächst kontinuierlich mit dem Fortschreiten des Verlegens bzw. des Versetzens zu verfüllen. Hierzu ist das Fugenmaterial auf die Pflasterdecke bzw. den Plattenbelag aufzubringen und in die Fugen einzufügen, so dass diese weitgehend gefüllt sind. Überschüssiges Fugenmaterial ist zu beseitigen. Im Anschluss sollte mit einer leichten Vibrationsplatte verdichtet werden. Pflasterdecken aus Naturstein mit gespaltenen Großpflastersteinen sind stattdessen durch Rammen zu verdichten. Anschließend sollte erneut Fugenmaterial aufgebracht und unter begrenzter Wasserzugabe eingeschlämmt werden. Die Oberfläche der Decke bzw. des Belages ist besenrein zu säubern. Nach hinreichender Trocknung erfolgt die Verdichtung der Pflasterdecke/des Plattenbelages mit einer sowohl auf die Dicke der Pflastersteine bzw. Platten als auch auf die*

*Beschaffenheit der Unterlage abgestimmten Vibrationsplatte bis zum Erreichen der Standfestigkeit. Nach dem zweiten Verdichten sollten die Fugen abschließend mit einem Fugenschlussmaterial durch Einschlämmen vollständig gefüllt werden. Das Fugenschlussmaterial sollte dabei maximal die oberen etwa 10 mm der Fuge ausfüllen.*

Gemäß Blab, Füssl, Gagliano, Hessmann & Kluger-Eigl (2013), Ziffer 3.6 Fugenausbildung und Einbringen des Fugenmaterials, Ziffer 3.6.1 Einbringen von ungebundenem Fugenmaterial, gilt: *Nach dem Pflastern oder Verlegen wird ungebundenes Fugenmaterial in die Fugen eingekehrt. Die Pflasterfläche wird zunächst mit dem Fugenmaterial überzogen und anschließend möglichst diagonal zur Fugenrichtung solange mit einem Besen eingekehrt, bis kein Material mehr in die Fugen passt. Danach werden die Fugen mit ausreichend Wasser eingeschlämmt und nachgekehrt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die Fugen vollständig verfüllt sind. Danach wird die Oberfläche sauber abgekehrt. Anschließend wird die Fläche mit einer Rüttelplatte vom Rand beginnend in Richtung Mitte abgerüttelt. Es ist zu beachten, dass die Art der Rüttelplatte an das Pflastermaterial angepasst sein muss und bei sensiblen Oberflächen, wie z.B. faserlosen Steinen oder Platten, mit einer Schutzauflage versehen werden sollte. Danach wird die Fläche kontrolliert. Etwaige gebrochene Steine oder Platten werden ausgetauscht, die Ebenfächigkeit und das zulässige Versatzmaß werden überprüft und ggf. werden Umpflasterungen vorgenommen. Durch das Rütteln wird die Fugenfüllung verdichtet und es muss ein weiteres Mal Fugenmaterial eingekehrt und eingeschlämmt werden. Danach folgt ein zweiter Durchgang des Abrüttelns, quer zur Richtung des Durchgangs, eine Kontrolle und Korrektur der Flächen und Einkehren und Einschlämmen von Fugenmaterial. Zum Abschluss wird bindiges Fugenverschlussmaterial (Körnung 0/2) aufgebracht und eingeschlämmt. Ein Teil dieses Materials verbleibt auf der Fläche und soll durch die Benutzung in die Fugen eingebracht werden.*

Gemäß Mentlein (2014), Ziffer 4.6.2 Manuelles Verlegen von ebenen Pflastersteinen aus Beton, von Klinkern sowie von Natursteinplatten, Einfegen des Fugensandes, gilt: *Nach dem Verlegen besteht der nächste Schritt im Einfegen des Fugensandes, entweder manuell oder durch eine mechanische Streuschaukel und einen Einkehrbesen. Insbesondere bei dicken Steinen und Platten kann dieses Einfegen auch mit Hilfe von Wasser, also als Einschlämmen, erfolgen. Damit die Steine bei nachfolgendem Rütteln keine Beschädigungen erfahren, darf kein Fugensand auf der Steinoberfläche verbleiben. Einzelne Überkörner sind zu beseitigen.*

Gemäß Mentlein (2014), Ziffer 4.6.2 Manuelles Verlegen von ebenen Pflastersteinen aus Beton, von Klinkern sowie von Natursteinplatten, Einschlämmen, Fugenschluss, gilt: *Nach dem Abrütteln, dass auch eine erhebliche Verdichtung des eingefegten Fugensandes bewirkt, sind die Fugen zu schließen. Dazu wird Fugenmaterial unter reichlicher Wasserzugabe eingeschlämmt. Dies ergibt eine hohe Lagerungsdichte des Fugenmaterials.*

*Wenn ein Pflaster abgerüttelt und beim Abrütteln genügend Wasser zugegeben wird, dann werden auch in einem Splittgerüst die Scherkräfte reduziert, sodass eine optimale Kornumlagerung stattfindet. Wenn diese erreicht ist und sich das Pflaster kaum mehr bewegt, dann können in einer Splittbettung keine Setzungen mehr entstehen, da sich die Körner gegenseitig berühren und abstützen, egal ob die Schichtdicke 30, 50 oder 80 mm dick ist. Kornumlagerungen können nur noch entstehen, wenn sich die auf dem Splitt liegenden Steine beim Überrollen bewegen. Wenn die Fugen jedoch gefüllt und die Steine genügend dick sind, dann können sich die Steine kaum bewegen, somit bleibt die Splittschicht unter einer Pflasterung lagestabil (Caprez, Lanicca & Partl, 2014). Hier ist beschrieben, dass die Durchführung einer Verdichtung unter Einsatz von Wasser das beste Ergebnis erzielt, wobei es sich hier um das Bettungsmaterial handelt. Verformungen können nur dann entstehen, wenn sich Pflastersteine bewegen. Pflastersteine und Platten können sich nur bewegen, wenn die Bettung Verformungen ermöglicht, das Fugenmaterial ein Ausweichen zulässt und keine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials vorliegt.*

In Caprez, Lanicca & Partl (2014) werden verschiedene Berechnungen der Druckspannungen in der ungebundenen Fuge durchgeführt, wobei hier auch verschiedene Fugentiefen aufgeführt sind.

Das Entstehen von Fugenvertiefungen hat eine Erhöhung der Druckspannungen in der Fuge zur Folge. Fugenvertiefungen haben einen großen Einfluss auf Steinbewegungen und daraus resultierende Kornumlagerungen einer Pflasterdecke bzw. eines Plattenbelages. Auf die Wichtigkeit bzw. den entscheidenden Faktor der Festigkeit der Fugenfüllung und der Fugenvertiefungen wird hingewiesen. Die dargestellten Druckspannungen in dem Fugenmaterial (in Tabelle 2 dieser Arbeit) werden dem Grunde nach in verschiedenen Berechnungsbeispielen bestätigt. Das Nachsanden einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages darf nicht vernachlässigt werden, um einen Belag lange funktionsfähig zu halten (Caprez, Lanicca & Partl, 2014).

Pflasterflächen dürfen nur verdichtet werden, wenn sie verfügt sind. Nach dem Verfugungsvorgang vorhandenes überschüssiges Fugenmaterial ist zu beseitigen und die ungebundene Pflasterdecke bzw. der ungebundene Plattenbelag ist abzukehren. Ansonsten besteht die Gefahr von Verunreinigungen und Beschädigungen von Pflastersteinen durch das Abrütteln (Köhler, Ulonska & Wellner, 2014). *In der Regel ist die Pflasterdecke nur bei trockener Oberfläche und nur unter Verwendung einer Vibrationsplatte mit Kunststoffmatte abzurütteln. Dies gilt insbesondere für farbiges Pflaster und solches mit besonderer Oberflächengestaltung (Köhler, Ulonska & Wellner, 2014).*

*Aufgrund von Ergebnissen wissenschaftlicher Untersuchungen (Rohleder, 2002) kann in Verbindung mit praktischen Erfahrungen davon ausgegangen werden, dass bei Pflasterdecken mit einer erst kurzen Liegedauer (etwa 1 bis 2 Jahre unter Verkehr) ein vergleichsweise geringerer Verschiebewiderstand vorliegt als dies bei älteren Pflasterdecken mit deutlich längerer Liegedauer der Fall ist. Dies steht vermutlich in direktem Zusammenhang mit der unter Verkehrsbelastung stattfindenden Nachverdichtung des Fugenmaterials sowie dem Eintrag von Feinanteilen in die Fugen, die im Laufe der Liegedauer zunimmt und die Pflasterdecke zunehmend stabilisiert. Durch den Fugenschluss wird das mit zunehmender Liegedauer zu erwartende Eintragen von Feinanteilen in die Fugen und die damit verbundene Zunahme der Stabilisierung der Pflasterdecken quasi vorgezogen. Gleichzeitig wird durch den Fugenschluss der Widerstand gegen Austrag des Fugenmaterials erhöht (Köhler, Ulonska & Wellner, 2014).*

*Wie die Ergebnisse einer Forschungsarbeit (Rohleder, 2002; Lerch, 2006) zeigen, ist ab einer Fugenentleerung von ca. 20 % der Steindicke/Fugenhöhe bereits die Stabilität der Pflasterdecke gemindert (Köhler, Ulonska & Wellner, 2014).*

Weiterhin wurden Versuche zum horizontalen Verschiebewiderstand von ungebundenen Pflasterdecken durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene ungebundene Bettungsmaterialien verwendet. Diese wurden mit verschiedenen Wassergehalten sowie Vorverdichtungen und ohne Vorverdichtung eingebaut. Enge Fugen wurden mit einem Rundkorn 0/2 und mit einem Brechsand 0/2 verfüllt. Die Verfüllung wurde grundsätzlich mehrfach vorgenommen (Koch, 1999). Eine Dokumentation der Fugenbreite sowie der Einbauart des Fugenmaterials bzw. der genauen Anzahl der Verfüllungsvorgänge wurden nicht vorgenommen. Kenndaten im eingebauten Zustand wurden nicht erzeugt.

Verformungen und Verfärbungen bei neu hergestellten Pflasterdecken und Plattenbelägen können verschiedene Ursachen haben. Es tritt jedoch auch eine häufige Anzahl von Verfärbungen auf, die auf das Eindringen von Fugenmaterial zurückgeführt werden können. So können sich beispielsweise Feinanteile der Gesteinskörnungen des Fugenmaterials im Oberflächenrelief der Pflastersteine (hier Betonpflastersteine) festsetzen (Voss, 2018). Etwaige auftretende Oberflächenverfärbungen aufgrund verwendeter Fugenmaterialien werden hier nicht weiter untersucht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass

insbesondere Fugenmaterialien mit erhöhten Feinanteilen das Risiko von Verfärbungen begünstigen (Voss, 2018).

Zur Verfüllung und Verdichtung der Fugen werden die zuvor zitierten Ausführungshinweise ohne konkrete Handlungsanweisung gegeben (Blab, Füssl, Gagliano, Hessmann & Kluger-Eigl, 2013; Mentlein, 2014). Welche Konsequenzen diese Herstellungsart besitzt und welche Qualität der Fugenfüllung erreicht wird, wird hiermit nicht ausgesagt.

Stand der Technik hinsichtlich der Überprüfung der eingebauten ungebundenen Fugen ist, dass in Deutschland bei Beachtung der gültigen Regelwerke und der anerkannten Regeln der Technik eine entsprechende Verdichtung von Pflasterdecken und Plattenbelägen durchgeführt werden muss. Nach dem zweiten Verdichten sollten dann die Fugen durch Einschlämmen vollständig gefüllt werden (Merkblatt 2015; Blab, Füssl, Gagliano, Hessmann & Kluger-Eigl, 2013). Eine Verdichtung des Belages respektive der nach dem zweiten Verdichtungsverfahren verfüllten Fugen wird nicht gefordert.

In Deutschland ist in der Praxis als Fugenmaterial in Verkehrsflächen ein Baustoffgemisch aus Gesteinskörnungen zu verwenden, deren Fließkoeffizient  $E_{CS35}$  betragen muss, was einer gebrochenen Gesteinskörnung entspricht (ZTV Pflaster-StB, 2006).

## 1.4 Problemstellung

Die Fugen von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen werden mit einem ungebundenen Baustoffgemisch verfüllt. In der Praxis treten im Betrieb häufig Fugenentleerungen auf. Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes werden die einzelnen Fugenentleerungen aus Metzging & Saathoff (10/2017) hier dargestellt.

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge können nur dauerhaft sein, wenn die Fugen vollständig gefüllt sind. In der Praxis treten bei unterschiedlichsten Anwendungsfällen geleerte Fugen auf, wobei gelöste Steine oder Platten die Folge sein können. Bei Regenwetter steht Wasser in den Fugen und spritzt beim Überfahren heraus. Die auftretenden Verkehrslasten können nicht mehr sicher abgetragen werden. Verformungen können die Folge sein.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft stehendes Wasser in Fuge und Bettung bei geleerten Fugen. Abbildung 2 zeigt eine enge, nicht verfüllbare Fuge, die einen Wasserzutritt mit der Folge ermöglicht, dass bei Starkregenereignissen Wasser in Fuge und Bettung steht, wenn das Wasser nicht nach unten abgeführt werden kann.



Abbildung 1:  
Stehendes Wasser in Fuge und Bettung



Abbildung 2:  
Enge Fuge, die nicht verfüllbar ist

*Unvollständig gefüllte oder vollständig entleerte Fugen entstehen durch das Heraus-saugen/Ausschwemmen von Fugenmaterial oder das Abwandern von Fugenmaterial in die Bettung hinein (M BEP, 2015). Geleerte Fugen können auch andere, gegebenenfalls mehrere Ursachen haben. Die unterschiedlichen Arten der Fugententleerung werden im Folgenden beschrieben.*

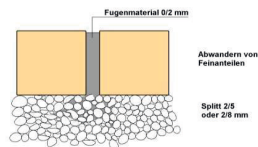
#### **1.4.1 Fugententleerung – Typ 1: Fugententleerung durch fehlende Filterstabilität zwischen Fuge und Bettung**

Abbildung 3 und 4 zeigen die Fugententleerungen durch fehlende Filterstabilität.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Pflasterdecke unmittelbar nach der Herstellung. Die Fugen sind augenscheinlich gefüllt, Fugenmaterial ist schon leicht in die Hohlräume der darunter befindlichen Bettung, bestehend aus einer groben Gesteinskörnung, abgewandert. Im Betrieb kommt es nun bei auftretendem Regenwetter zu eindringendem Wasser und durch die dynamischen Lasten zu Vibrationen in der Konstruktion. Dies führt zu einem Abwandern des feinen Fugenmaterials in die Hohlräume der Bettung. Damit kommt es zu erhöhten Materialbeanspruchungen, da die Fugen nicht mehr vollständig gefüllt sind. Die Lasten müssen über einen geringeren Querschnitt abgetragen werden. Folge ist eine erhöhte Zertrümmerung im Fugen- und Bettungsmaterial mit dem Ergebnis einer geringeren Wasserdurchlässigkeit. Der Sachverhalt der Verfestigung des Kontaktzonenbereiches Fuge/Bettung/Stein ist in Metzging & Saathoff (2010) beschrieben.

Abbildung 5 und 6 zeigen einen Anwendungsfall mit nicht filterstabilem Fugen- und Bettungsmaterial. Abbildung 5 zeigt den bereits entstandenen Schaden aufgrund abgewandelter Feinanteile. Abbildung 6 ist im nahezu unbelasteten Bereich entstanden. Hier wurde die Probenahme durchgeführt, um die Korngrößenverteilung vom Fugen- und Bettungsmaterial und darauf basierend den Nachweis der Filterstabilität durchzuführen.

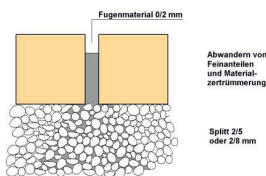
**Fugententleerung durch fehlende Filterstabilität**



**Abbildung 3:**

Schematische Darstellung zur Filterstabilität nach Herstellung bei gefüllten Fugen

**Fugententleerung durch fehlende Filterstabilität**



**Abbildung 4:**

Schematische Darstellung zur Filterstabilität nach Inbetriebnahme bei bereits geleerten Fugen

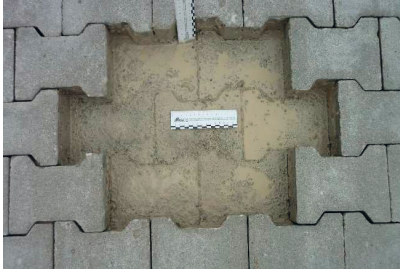


Abbildung 5:  
Stehendes Wasser auf der Bettung,  
geleerte Fugen



Abbildung 6:  
Splitt als Bettungsmaterial sichtbar

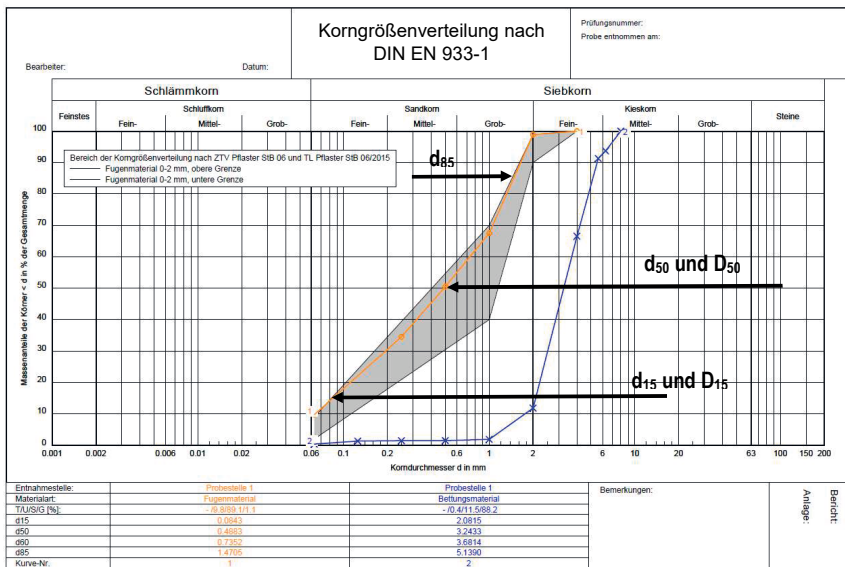


Abbildung 7:  
Fugenmaterial 0/2 mm (orange), Bettungsmaterial 2/5 mm (blau)

Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Korngrößenverteilung von nicht filterstabilem Fugen- und Bettungsmaterial. Folgende Filterkriterien sind einzuhalten (ZTV Pflaster-StB, 2006):

- $D_{15}/d_{15} \geq 1$
- $D_{15}/d_{85} \leq 4$
- $D_{50}/d_{50} \leq 5$

$D_{15}$  und  $D_{50}$  sind Korndurchmesser in mm des Bettungsmaterials, die bei 15 bzw. 50 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegen.  $d_{15}$ ,  $d_{50}$  und  $d_{85}$  sind Korndurchmesser in mm des Fugenmaterials, die bei 15,



Tabelle 1: Nachweis der Filterstabilität für das Beispiel in Abbildung 7

Bedingungen	D <sub>15</sub>	D <sub>50</sub>	d <sub>15</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>85</sub>	Ergebnis	Erfüllt?
$D_{15}/d_{15} \geq 1$	2,0815		0,0843			24,69	Ja
$D_{15}/d_{85} \leq 4$	2,0815				1,4705	1,42	Ja
$D_{50}/d_{50} \leq 5$		3,2433		0,4883		6,64	Nein

50 bzw. 85 M.-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorhanden sind. In Tabelle 1 ist bei vorliegendem Anwendungsfall die Berechnung der Filterkriterien enthalten.

Die auch im Betrieb beschriebene fehlende Filterstabilität bei diesem Beispiel liegt nach Tabelle 1 einerseits darin begründet, dass an sich nicht filterstabile Materialien in Form von Fugenmaterial 0/2 mm und Bettungsmaterial 2/5 mm gemäß Abbildung 7 eingesetzt wurden. Andererseits verursachen Entmischungen Verschiebungen der Korngrößenverteilung und führen damit zu einer fehlenden Filterstabilität.

#### 1.4.2 Fugentleerung – Typ 2:

##### Fugentleerung durch Nachverdichtung in Form von Kornumlagerungen

Eine weitere Ursache für eine Fugentleerung ist die in Abbildung 8 und 9 dargestellte Fugentleerung durch Nachverdichtung in Form von Kornumlagerungen.

**Fugentleerung durch Kornumlagerung**

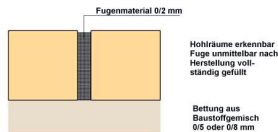


Abbildung 8:

Schematische Darstellung zur Fugentleerung, hier gefüllte Fugen unmittelbar nach der Herstellung

**Fugentleerung durch Kornumlagerung**

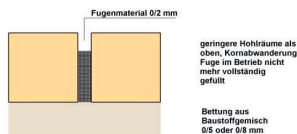


Abbildung 9:

Schematische Darstellung zur Fugentleerung durch Nachverdichtung in Form von Kornumlagerungen im Betrieb





Abbildung 10:  
Unbelastete Probestelle, Fugenmaterial  
befindet sich nicht unter dem Stein



Abbildung 11:  
Belastete Probestelle, Fugenmaterial  
befindet sich unter dem Stein

In Abhängigkeit der Fugenbreite, des eingesetzten Materials, der Einbauart an sich und der verwendeten Verdichtungsgeräte kann es zu unterschiedlichen Lagerungsdichten in der Fuge kommen. Im Betrieb bei Regenwetter und unter dynamischen Lasten kann es zur Nachverdichtung der Fläche, insbesondere auch der Fugen, kommen. Grund hierfür ist die Reduzierung des Reibungswiderstandes des ungebundenen Fugenmaterials an sich sowie die Herabsetzung des Reibungswiderstandes des Fugenmaterials an der Steinseitenfläche. Die Nachverdichtung kann zur Folge haben, dass sich Fugenmaterial umlagert, absackt und sich eine Fugenvertiefung einstellt. Auch hier tritt wieder der nachteilige Effekt der erhöhten Materialbeanspruchung mit dem Ergebnis erhöhter Materialzertrümmerung aufgrund Verkehrs auf, da sich der Lastabtragungsquerschnitt der Steine deutlich reduziert. Bei sehr lockerer Lagerungsdichte des Fugenmaterials kann die Fugentleerung mit Abwandern des Materials unter den Stein -wie in Abbildung 11 dargestellt- stattfinden, wobei diese Kornumlagerung fast ausschließlich in befahrenen Flächen stattfinden kann. Abbildung 10 zeigt eine visuell vollständig gefüllte Fuge im unbelasteten Bereich.

#### 1.4.3 Fugentleerung – Typ 3: Fugentleerung durch einen „Durchbruch“ eines vorhandenen „Gewölbes“ in der Fuge mit der Folge plötzlichen Absackens der Fugenfüllung

Einen weiteren Vorgang der Fugentleerung stellt die mangelhafte Fugenfüllung bei der Herstellung dar (Abbildung 12 und 13). Die Fuge war nicht vollständig gefüllt. Dies kann beispielsweise bei der Verwendung eines Baustoffgemisches mit zu groben Gesteinskörnungen für die Fuge der Fall sein. Es kommt zur Gewölbebildung im Fugenquerschnitt. Ggf. kann das Gewölbe durchbrechen und beim Verdichtungsfall gelöst werden (Metzing & Saathoff, 2010).



Abbildung 12:  
Schematische Darstellung zur Fugentleerung, hier oberflächlich gefüllte Fugen,  
wobei im Querschnitt Hohlräume vorhanden sind

**Fugenentleerung durch  
mangelhafte Fugenfüllung  
bei der Herstellung**

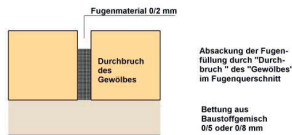


Abbildung 13:

Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch mangelhafte Fugenfüllung im Betrieb

Es kann dazu kommen, dass es zu einer Absackung des Fugenmaterials kommt, so dass die Fugen im Rahmen der Unterhaltung erneut gefüllt werden müssen. Dieser Arbeitsschritt ist bei einem derartigen Anwendungsfall als Vertragserfüllungsleistung anzusehen. Es tritt jedoch nicht selten der Fall auf, dass derartige Gewölbewirkungen durch die Verdichtung nicht durchbrochen werden können. Somit scheinen die Fugen bei Herstellung nahezu gefüllt. Im Betrieb, wieder in Verbindung mit eindringendem Wasser und auftretenden dynamischen Lasten, kommt es zur Kornzertrümmerung (Korndurchbruch oder Kornermahlung) und zum Durchstanzen des Gewölbes. Eine Fugenentleerung ist auch hier die Folge.

#### 1.4.4 Fugenentleerung - Typ 4: Fugenentleerung durch oberflächennahe Entleerung

Die Fugenentleerung durch oberflächennahe Entleerung zeigen Abbildung 14 und Abbildung 15.

Die oberflächennahe Entleerung sind Effekte durch Einsatz von Reinigungsgeräten, Pump- und Sogwirkung der Reifen sowie Ausspülen bei Starkregenereignissen. Ein erhöhtes Potential von Fugenentleerungen ist bei Regenwetter zu verzeichnen; Fugenmaterial wird vor dem Reifen beim Überfahren in die Fuge gedrückt bzw. gepumpt und nach dem Überfahren wird das Fugenmaterial aus der Fuge durch Unterdruck herausgesaugt.

Die hier dargestellten vier Typen der Fugenentleerung erfordern in der Praxis ein erhöhtes Augenmerk. Insbesondere sollte im Rahmen der Abnahme überprüft werden, ob die Fugen vollständig gefüllt sind und eine hinreichende Anfangsstabilität besitzen. Eine regelmäßige Kontrolle und Wartung der Flächen ist erforderlich, wobei eine bloße visuelle Beurteilung der ungebundenen Fugenfüllung im Betrieb hinreichend Erfahrung erfordert und die Durchführung der Nachverfugung mit für den Anwendungsfall entsprechendem Fugenmaterial ausgeführt werden sollte.

**Fugenentleerung durch  
oberflächennahe Entleerung**

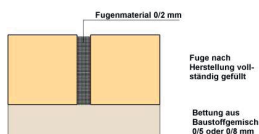


Abbildung 14:

Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch oberflächennahe Entleerung,  
vollständig gefüllter Fugen nach Herstellung

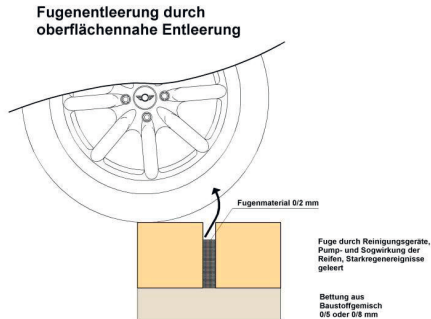


Abbildung 15:

Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch das Aussaugen von Fugenmaterial durch die Pump- und Sogwirkung von Reifen

Nach der Herstellung eines ungebundenen Belages sind die Flächen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren und zu warten. *Sofern bei der Pflasterdecke oder dem Plattenbelag nach der Verkehrsfreigabe fehlendes Fugenmaterial ersetzt werden soll, sind die erforderlichen Angaben in der Leistungsbeschreibung aufzunehmen* (ZTV Pflaster-StB, 2006). In der Praxis gibt es immer wieder Streit darüber, wer für die Fugenentleerung im Betrieb verantwortlich ist. In der Zeit der Verjährungsfrist für Mängelansprüche treten dort häufig Diskussionen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer auf. Aus technischer Sicht sind folgende wesentliche Fugenentleerungen zu unterscheiden:

- Oberflächennahe Entleerung durch die Nutzung (Fugenentleerung - Typ 4).
- Systembedingte Fugenentleerung entweder durch nicht sachgerecht hergestellte Fugen oder aber ein etwaiges Abwandern von Fugenmaterial in eine nicht filterstabile Bettung (Fugenentleerung Typ 1 bis 3).

Zu den Fugenentleerungen Typ 1 bis Typ 4 kann es in der Praxis, insbesondere bei hochbelasteten Flächen, zu einer weiteren Fugenentleerung durch Materialabrieb/Materialzertrümmerung kommen. Zerklebert/zermahlene Feianteile können in kleinste vorhandene Hohlräume abwandern. Diese Fugenentleerungsart steht im Zusammenhang mit der vorhandenen Lagerungsdichte des Fugenmaterials (einerseits) und den Materialeigenschaften (andererseits). Eine nicht hinreichende Stabilität der Fugen reduziert den Lastabtragungsquerschnitt und damit die Beanspruchung und Verformungsanfälligkeit des Fugenmaterials und damit verbunden der ungebundenen Belagsoberfläche. Fugenentleerungen, die einen weiteren Zusammenhang mit mangelhaft hergestelltem Oberbau/Unterbau oder vorhandenen Untergrund haben können, werden hier nicht dargestellt.

Voraussetzung gefüllter Fugen ist, dass das Fugenmaterial fachgerecht in die Fugen eingebracht werden kann. D.h. es ist ein entsprechendes Fugenmaterial auszuwählen, welches hohlraumarm in die Fugen eingetragen werden kann, also keine Fugenentleerung Typ 3 (Abbildung 12 und 13). Zudem darf eine Fugenentleerung Typ 1 aufgrund fehlender Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial im Betrieb nicht auftreten. Diese beiden Grundlagen berücksichtigend, stellt sich die Frage, inwiefern die Herstellung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen einen Einfluss auf mögliche Fugenentleerungen Typ 2 (Abbildung 8 und 9) im Betrieb hat und somit durch eine sachgerechte Herstellung auf ein Minimum reduziert werden kann.

## 1.5 Abgrenzung der Arbeit

Das Fehlen von Interpretationsansätzen bei sich leerenden Fugen in der Praxis in Bezug auf die Stabilität des Fugenmaterials und damit verbunden der Lagerungsdichte hat dazu geführt, Überlegungen anzustellen, inwiefern die Qualität des Fugenmaterials im eingebauten Zustand festgestellt werden kann. Im Rahmen der Voruntersuchungen sind (vgl. Abschnitt 2.1) bei den Anwendungsfällen 1 bis 3 Fugentleerungen aufgetreten, die in direktem Zusammenhang mit der hergestellten Fugenfüllung stehen.

Über eine innovative Prüfmethode wird festgestellt, ob in Abhängigkeit vom Fugenmaterial, der Einbauart und der Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen unterschiedliche Qualitäten der Fuge hergestellt und diese auch einer Bewertung unterzogen werden können. Über diese Arbeit wird zudem festgestellt, ob bei Schadensfällen -der Autor der vorliegenden Arbeit ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Pflasterdecken und Plattenbeläge- eine Abhängigkeit von der Qualität der errichteten ungebundenen Fugenfüllung vorhanden ist.

## 2 Grundlagen

Voranzustellen ist, dass der ingenieurtechnische Standard im Bereich ungebundener Pflasterdecken und Plattenbeläge im deutschsprachigen Raum einen besonderen Stellenwert besitzt. Die vorliegende Arbeit behandelt vor diesem Hintergrund hauptsächlich deutschsprachige Regelwerke und Literatur. Internationale relevante Veröffentlichungen über dieses Themengebiet sind nicht zu finden.

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge werden unter Verwendung ungebundener Baustoffgemische für Fuge und Bettung hergestellt.

Abbildung 16 stellt den schematischen Aufbau einer ungebundenen Pflasterdecke dar.

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge sind unter Berücksichtigung der anerkannten Regeln der Technik (ZTV Pflaster-StB, 2006; Mentlein, 2014; Blab, Füssl, Gagliano, Hessmann & Kluger-Eigl, 2013 usw.) in der Konstruktion wasserdurchlässig auszubilden. Dabei werden Schottertragschicht, wasserdurchlässige Asphalt- oder Dränbetontragschicht und eine ungebundene Bettung und Fuge eingesetzt.

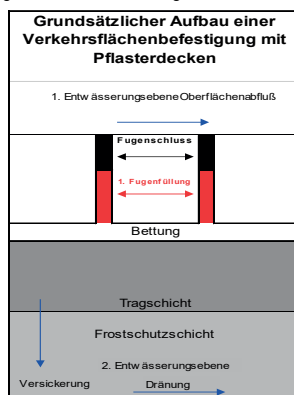


Abbildung 16:  
Aufbau einer ungebundenen Pflasterdecke (in Anlehnung an ZTV Pflaster-StB, 2006)

Bei ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen können sich die Fugen im Betrieb zahlreicher Flächen leeren. Die Ursachen für die Fugenentleerung können vielfältig sein und sind im Wesentlichen in vier Typen nach Metzging & Saathoff (10/2017) zu untergliedern. Diese werden hier nochmals dargestellt:

- Typ 1: Fugenentleerung durch fehlende Filterstabilität zwischen Fuge und Bettung
- Typ 2: Fugenentleerung durch Nachverdichtung in Form von Kornumlagerungen
- Typ 3: Fugenentleerung durch einen „Durchbruch“ eines vorhandenen „Gewölbes“ in der Fuge mit der Folge plötzlichen Absackens der Fugenfüllung
- Typ 4: Fugenentleerung durch oberflächennahe Entleerung

Zur vereinfachten Erklärung der Verdichtung sei erwähnt, dass ungebundene Tragschichten unter Pflasterdecken und Plattenbelägen ausreichend verdichtet sein müssen. Den Prüfwert bildet gemäß Mentlein (2014) der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  mit:

$$D_{Pr} = \rho_d / \rho_{Pr} \times 100$$

$\rho_d$  Trockendichte des eingebauten Materials

$\rho_{Pr}$  Proctordichte

Ungebundene Tragschichten benötigen einen bestimmten Wassergehalt, damit eine optimale Verdichtung ausgeführt werden kann. Tragschichten werden mit den entsprechenden Verdichtungsgeräten befahren und durch Vibration verdichtet; durch die Krafteinwirkung der Verdichtung soll eine Reduzierung der Porenräume mit gleichzeitiger Erhöhung der Dichte im Material vorgenommen werden, um die geforderte Tragfähigkeit zu erreichen.

Bei der Herstellung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen sind folgende Sachverhalte abweichend gegenüber einer ungebundenen Tragschicht:

- Das Fugenmaterial muss in die Fuge hohlraumarm eingebracht werden.
- Beim Verdichtungsvorgang wird das Material nicht unmittelbar befahren; es wird ausschließlich durch Eigengewicht und Vibration komprimiert.

Fugenmaterial ist nach ZTV Pflaster-StB (2006) und TL Pflaster-StB (2006/2015) in Abhängigkeit von der Fugenbreite zu wählen, so dass dieses fachgerecht in die Fugen eingebracht werden kann und andererseits muss das Fugenmaterial in der Lage sein, die auftretenden Verkehrslasten verformungsarm (d.h. mit geringer „Ausweichneigung“) an die Steine bzw. Platten zu übertragen. Weiterhin steht bei der Herstellung einer optimalen Lagerungsdichte des Fugenmaterials im Rahmen der Verdichtung die Reibung zwischen Fugenmaterial und Stein sowie im Material selbst entgegen.

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge sind nur dann aus technischer Perspektive gebrauchstauglich und können nur dann eine lange Nutzungsdauer aufweisen, wenn

- die Fuge hohlraumarm gefüllt sind und
- über nahezu den gesamten Querschnitt eine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials vorliegt sowie
- eine optimale Lagerungsdichte an der Oberfläche vorhanden ist, so dass der Oberflächenaustrag des ungebundenen Fugenmaterials möglichst auf ein Minimum reduziert wird.

Das zu verwendende Fugenmaterial ist von großer Bedeutung, da eine vollfugige Herstellung der ungebundenen Fuge mit der notwendigen Lagerungsdichte Grundlage für die Funktion einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages ist. Die Auswahl des ungebundenen Fugenmaterials hängt von verschiedenen Faktoren ab, u.a. von der Fugenbreite, Gewährleistung Filterstabilität zum Bettungsmaterial. Die Wahl des Fugenmaterials ist in erster Linie von der Fugenbreite abhängig.

Erfahrungsgemäß sind vollständig gefüllte Fugen mit einem feineren Gesteinskörnungsgemisch und entsprechender Lagerungsdichte des Fugenmaterials aus technischer Sicht deutlich vorteilhafter gegenüber einer Fugenfüllung aus einem gröberen Gesteinskörnungsgemisch, welche sich im Fugenquerschnitt aufhängen kann, anzusehen. In Metzger & Saathoff (2010) und Metzger & Saathoff (10/2017) ist der Sachverhalt „Durchbruch“ eines vorhandenen „Gewölbes“ bereits beschrieben. Die Fugenbreiten werden in DIN 18318 (2016) und in der Richtlinie (2014) beschrieben. In der Planungsphase ist es notwendig, die Fugenbreite vorzugeben. Maßgeblich, aus welchem Baustoffgemisch das Fugenmaterial bestehen soll, sind die zu verwendenden Steine. Hier ist grundsätzlich zu unterscheiden:

Handelt es sich um rechteckige Kunststeine (z.B. Betonstein oder Klinkerpflaster) oder aber um allseits gesägte und bearbeitete Natursteine?

- Bei zahlreichen Anwendungsfällen werden Betonsteine oder auch Klinkerpflastersteine mit einer Verschiebesicherung bzw. Abstandshaltern eingesetzt. Hierbei ist je nach Stein zu beachten, dass diese eine unterschiedliche Anzahl von Verschiebesicherungen bzw. Abstandshaltern aufweisen können. Diese Verschiebesicherung bzw. Abstandshalter führen dazu, dass keine einheitliche Fugenbreite über den Fugenquerschnitt vorhanden ist, sondern so genannte „Fugentaschen“ zwischen den einzelnen Abstandshaltern entstehen, die mit entsprechendem Fugenmaterial gefüllt werden müssen.

Abbildung 17 zeigt beispielhaft die oberflächliche Fugenbreite und die so genannten „Fugentaschen“ im Bereich der Abstandshalter bzw. Verschiebesicherung.

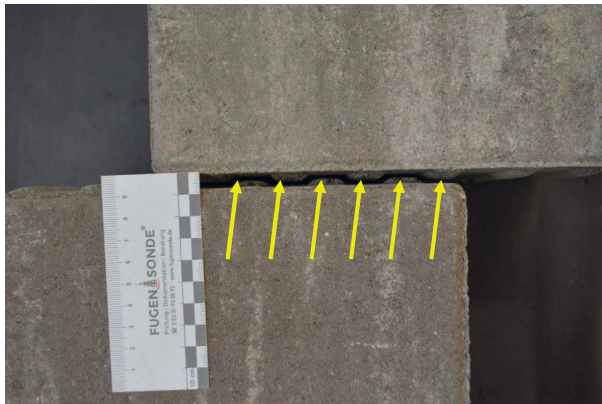


Abbildung 17:  
Oberflächliche Fugenbreite und Fugenbreite im Bereich so genannter „Fugentaschen“ (gelbe Pfeile)

- Bei Natursteinen können auch Steine mit bruchrauen Seitenflächen und Unterseiten zum Einsatz kommen. Sofern die Steine eine bruchraue Seitenfläche besitzen, sollten sie auch eine gebrochene Unterseite besitzen, da ansonsten das Risiko erhöhter Reflektionen („Springen der Steine“) besteht.

Damit das Fugenmaterial sicher, ohne das Entstehen eines Gewölbes, eingebracht werden kann, sollte als praktische Faustformel aus Sicht des Autors das Größtkorn des Fugenmaterials wie folgt definiert werden:

Fugenbreite

$$\frac{\quad}{2} = \text{Größtkorn Fugenmaterial}$$

[Formel 1]

Bei der vorliegenden Abbildung 17 sollte die Fugenbreite im Bereich der so genannten „Fugentaschen“ als Grundlage für die Auswahl des Fugenmaterials verwendet werden, da ansonsten das Fugenmaterial nicht hohlraumarm eingebracht werden kann. Bei einer Fugenfüllung aus einem zu groben Gesteinskörnungs- bzw. Baustoffgemisch würde es im Betrieb zu einer Fugenentleerung gemäß Typ 3 kommen.

Bei einer Vollbremsung eines 40 t Sattelzuges auf einer Pflasterdecke bzw. eines Plattenbelages entsteht ein hoher Horizontaldruck in den Fugen, der in seiner Höhe je nach Fugenfüllungsgrad der Fuge unterschiedlich ist. In Abbildung 18 ist beispielhaft der Verlauf der Druckspannungen bei vollständig gefüllter Fuge und in Abbildung 19 bei einer im Betrieb vorhandenen Fugenvertiefung (reduzierter Fugenfüllungsgrad) dargestellt. Eine nicht vollständig gefüllte Fuge führt zu erhöhten Druckspannungen im Fugen- und Bettungsmaterial mit der Folge der Entstehung von Verformungen.

Tabelle 2: Idealisierte Berechnung der Druckkraft in der ungebundenen Fuge in Abhängigkeit von der Fugenfüllung bei einem 10 cm dicken Stein

	Fugenfüllung	Radlast	Reibungs- koeffizient $\mu$	Fugenhöhe Kraftaufnahme	Fugenbreite Kraftaufnahme	Querschnittsfläche Kraftaufnahme [5] x [6]	Vorhandene statische Druckkraft [3] x [4] / [7]	Vorhandene Druckkraft, Dynamischer Zuschlag x 2
Lfd.-Nr.	[mm]	[N]	[/]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
1	100	50.000	0,80	50	300	15.000,00	2,67	5,33
2	90	50.000	0,80	45	300	13.500,00	2,96	5,93
3	80	50.000	0,80	40	300	12.000,00	3,33	6,67
4	70	50.000	0,80	35	300	10.500,00	3,81	7,62
5	60	50.000	0,80	30	300	9.000,00	4,44	8,89
6	50	50.000	0,80	25	300	7.500,00	5,33	10,67

Beispielhaft ist die horizontale Belastung in der Fuge in Tabelle 2 dargestellt. Grundlage für die idealisierte Ermittlung der mittleren Druckspannung in der Fuge bei einem Stein der Abmessungen 30/15/10 cm, ohne Berücksichtigung Kraftaufnahme durch Reibungswiderstand Bettung/Stein, ist die eintragende Last von 50 KN über einen Stein. Gemäß Mentlein (2014) gilt  $F_H = F_N \times \mu \approx F_V \times \mu$  mit einem von dem Autor angesetzten Reibungskoeffizienten  $\mu = 0,8$ .

Zur Verdeutlichung wird die Druckspannung bei einer vollständig gefüllten Fuge unter Berücksichtigung der Annahmen der Tabelle 2 (Spalte 1, Zeile 1) ermittelt.

$$\sigma_{\text{Fuge Vollfüllung}} = \frac{F_N \times \text{Reibungskoeffizient}}{(L_{\text{Stein}} \times (H_{\text{Stein}} \times 0,5) \times (\text{Reifenauftandsfläche in } \%))} \quad [\text{Formel 2}]$$

$F_N$ : Radlast in Newton [N]:  $F = 50.000$

$\mu$ : Reibungskoeffizienten [/]:  $\mu = 0,8$

$L_{\text{Stein}}$ : Steinlänge in Millimeter [mm]:  $L = 300$

$H_{\text{Stein}}$ : Steinhöhe in Millimeter [mm]:  $H = 100 \times 0,50$

Reifenauftandsfläche in Prozent [%]: Reifenauftandsfläche = 1

$\sigma_{\text{Fuge Vollfüllung}}$ : Druckspannung in der Fuge bei Vollfüllung in Newton pro Quadratmillimeter [N/mm<sup>2</sup>]

$$\sigma_{\text{Fuge Vollfüllung}} = \frac{50.000 \times 0,8}{(300 \times (100 \times 0,5) \times (1))} = 2,67 \text{ N/mm}^2$$

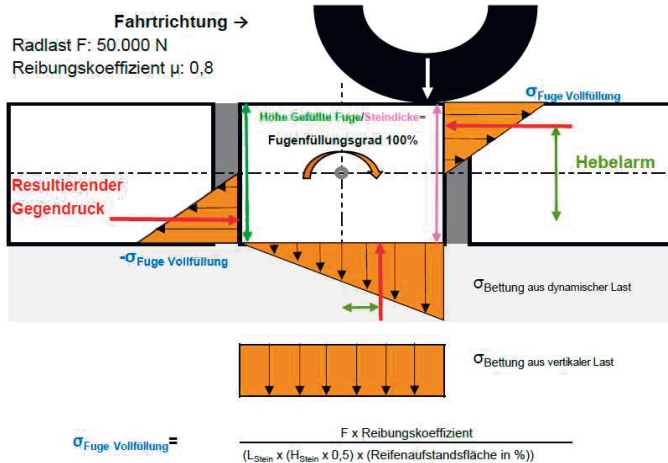


Abbildung 18:

Darstellung des Verlaufes der Druckspannungen bei einem Fugenfüllungsgrad von 100%  
[Abbildung in Anlehnung an Mentlein (2014)]

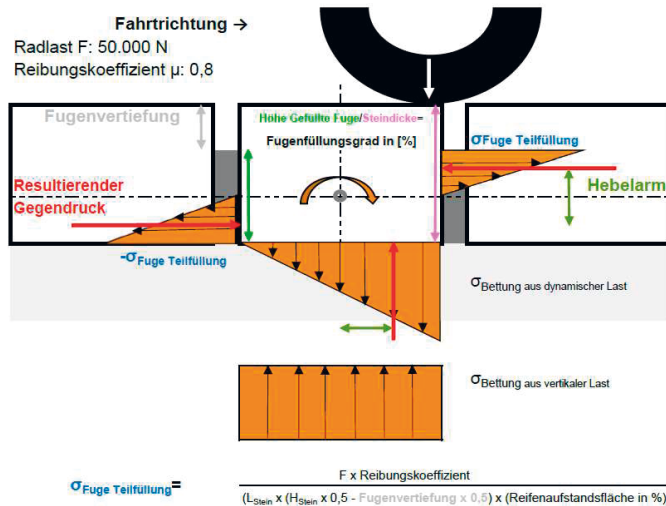


Abbildung 19:

Darstellung des Verlaufes der Druckspannungen bei einer vorhandenen Fugenvertiefung  
und einem Fugenfüllungsgrad von < 100 %  
[Abbildung in Anlehnung an Mentlein (2014)]



Spalte 8 und 9 der Tabelle 2 zeigen die auftretenden Druckspannungen ohne Berücksichtigung einer Kraftaufnahme durch den Reibungswiderstand Bettung und Stein. Die Lfd.-Nr. 2 in Tabelle 2 stellt eine im Betrieb übliche Fugenfüllung von 90 mm mit einer optimalen Lagerungsdichte des eingebauten Fugenmaterials bei einem 10 cm dicken Stein dar. Die auftretenden Druckkräfte führen nicht selten zu Steinbewegungen, wenn das Fugenmaterial keine hinreichende Lagerungsdichte aufweist oder aber Hohlräume im Querschnitt vorhanden sind. Nur ein Fugenmaterial mit entsprechender Lagerungsdichte kann die auftretenden Lasten in sich (vom Stein über die Fuge an den nächsten angrenzenden Stein) und an die angrenzenden Pflastersteine übertragen.

Die sichere Lastabtragung benötigt auf der einen Seite eine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials und andererseits hinreichende Korngrößen, um die Lasten übertragen zu können. Aufgrund der hohen Druckkräfte, die in der Fuge entstehen, kommt es im Betrieb, insbesondere in Abhängigkeit der Schwerverkehrsbelastung zur Beanspruchung des ungebundenen Fugenmaterials mit der Folge von Zermahlungs- bzw. Zertrümmerungsvorgängen, welche als Folge einerseits ein Absinken von Feianteilen in Hohlräume der vorhandenen Konstruktion und andererseits das Absacken des Fugenmaterials in sich zur Folge haben können. Spannung ist definiert als Kraft geteilt durch Fläche. Wird bei gleichbleibender Kraft die Fläche verkleinert, erhöht sich die Spannung am Korn bzw. Pflasterstein. Örtlich erhöht sich die resultierende Druckkraft. Fugenmaterialien mit so genannter hoher Ausweichneigung bzw. hohem Ausweichpotential (Abbildung 21) sind als kritisch anzusehen. Fugenmaterialien mit hohen Feianteilen (Korngröße  $< 0,063$  mm) und/oder Sandanteilen (Korngröße 0,063 mm bis 1 mm), je nach Fugenbreite, können Lasten nicht verformungsfrei übertragen, sodass es zu Steinbewegungen selbst bei visuell vollständig gefüllter Fuge kommen kann. Erhöhte Zermahlungs- bzw. Zermürbungseffekte ausschließlich aufgrund punktueller Lastübertragung sind die Folge. Dem so genannten Stützkorn in der Fuge, welches idealerweise über dem gesamten Querschnitt anliegt, sodass die Lasten über die grobe Gesteinskörnung (Gesteinskörnung  $> 1$  mm) übertragen werden können, ist aus technischer Sicht eine wesentliche Bedeutung beizumessen (Abbildung 20).

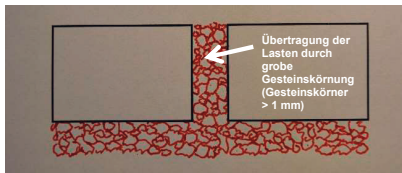


Abbildung 20:  
Schematische Darstellung Fugen- und Bettungs-  
material aus grober Gesteinskörnung ohne  
Ausweichneigung bzw. Ausweichpotential

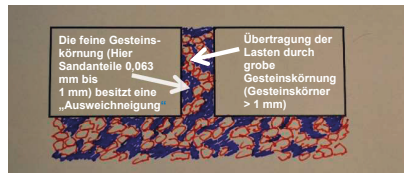


Abbildung 21:  
Schematische Darstellung Fugen- und Bettungs-  
material aus Baustoffgemisch (Sand-Splitt-  
Gemisch) mit Ausweichneigung bzw. Ausweich-  
potential

Ungebundene Fugenmaterialien werden in Deutschland nach der TL Pflaster-StB (2006/2015) ausgewählt. Hiernach können als Fugenmaterialien Baustoffgemische 0/4, 0/5, 0/8, 0/11 mm eingesetzt werden. Beispielhaft sind in Abbildung 22 und 23 die Bereiche der Korngrößenverteilung für die Fugenmaterialien 0/4 und 0/8 mm dargestellt. So ist es gemäß TL Pflaster-StB (2006/2015) zulässig, bei einem Fugenmaterial 0/8 mm ein Material mit einem Siebdurchgang von 75 M.-% auf dem 2 mm Sieb zu verwenden. Wird ein derartiges Material bei quaderförmigen Steinen ohne Abstandshalter, d.h. beispielsweise bei allseits gesägten und bearbeiteten Natursteinen verwendet, so wird es selbst bei optimaler Verdichtung aufgrund der Ausweichneigung gemäß Abbildung 21 zu Steinbewegungen kommen.

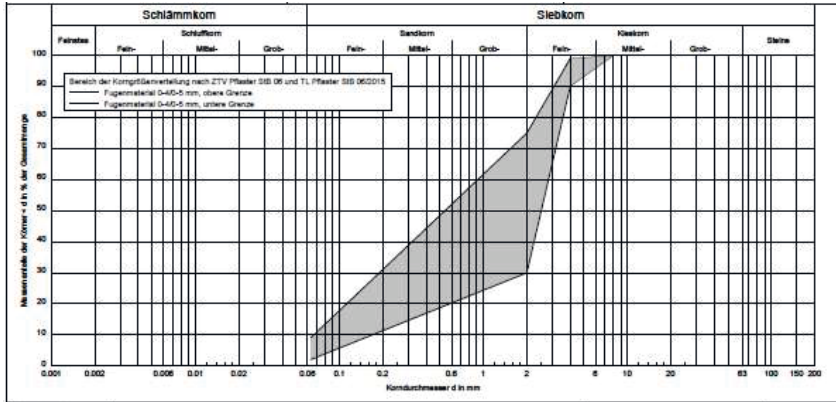


Abbildung 22:  
Bereich der Korngrößenverteilung für ein Fugenmaterial Baustoffgemisch 0/4 bzw. 0/5 mm  
(TL Pflaster-StB, 2006/2015)

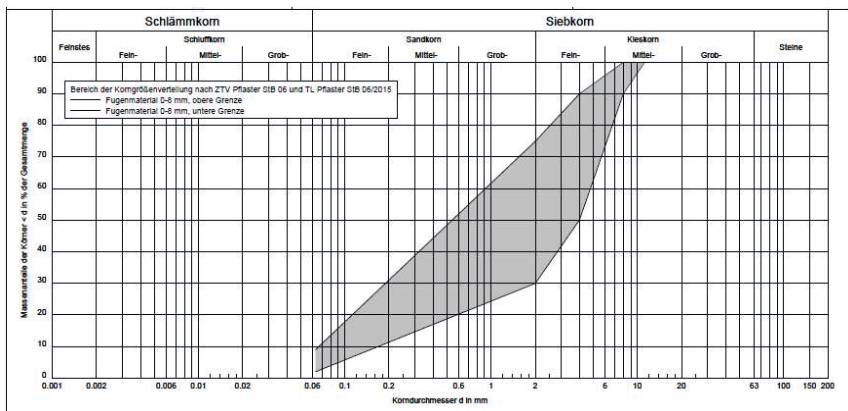


Abbildung 23:  
Bereich der Korngrößenverteilung für ein Fugenmaterial Baustoffgemisch 0/8 mm  
(TL Pflaster-StB, 2006/2015)

Gemäß ZTV Pflaster-StB (2006) kann als Fugenmaterial, insbesondere bei engfügig hergestellten ungebundenen Betonsteinpflasterdecken, ein Baustoffgemisch 0/2 mm verwendet werden. Hier sollte der Siebdurchgang auf dem 1 mm Sieb zwischen 40 und 70 M.-% liegen. Nach der Richtlinie (2014) ist die Verwendung der Fugenmaterialien gemäß TL Pflaster-StB (2006/2015) und ergänzend auch der Gesteinskörnungen 1/4, 1/3, 2/5, 2/8 mm möglich. Weiterhin sind als Fugenmaterialien gemäß ZTV Pflaster-StB (2006) gebrochene Gesteinskörnungen einzusetzen. Das bedeutet, dass beispielsweise Baustoffgemische 0/2 mm einen Fließkoeffizienten von  $E_{CS35}$  aufweisen müssen. Demnach ist Rundkorn als Fugenmaterial unter Berücksichtigung der gültigen Regelwerke nicht einzubauen.

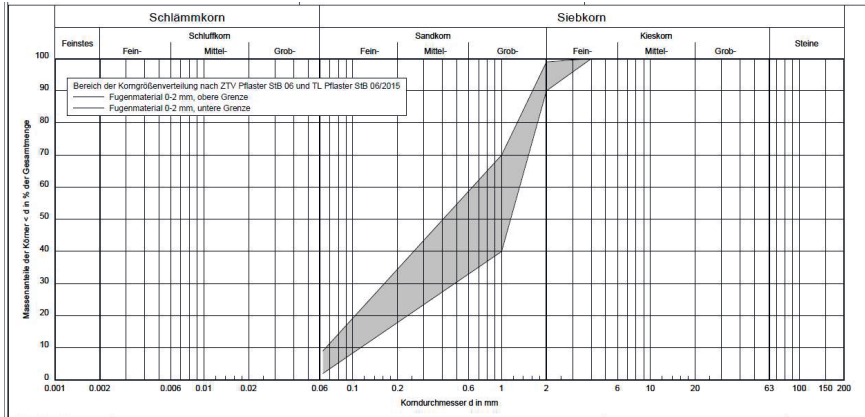


Abbildung 24:  
Bereich der Korngrößenverteilung für ein Baustoffgemisch 0/2 mm  
(ZTV Pflaster-StB, 2006; TL Pflaster-StB, 2006/2015)

Gemäß TL Pflaster-StB (2006/2015) dürfen die Fugenmaterialien einen Feinanteil ( $< 0,063$  mm) von 9 M.-% besitzen. In Ergänzung zu den aufgeführten Korngrößenverteilungen der Baustoffgemische 0/4, 0/5 und 0/8 mm (Abbildung 22 und 23) ist der Bereich der Korngrößenverteilung bei Verwendung einer Gesteinskörnung 0/2 mm aus Abbildung 24 zu entnehmen.

Erfahrungsgemäß spielen bei dem Fugenmaterial, welches in die Fugen eingebracht wird, folgende Kenngrößen bzw. Kenndaten eine Rolle:

- Korngrößenverteilung
- Kornform
- Fugenbreite
- Wassergehalt des Fugenmaterials beim Einbringen bzw. Wassergehalt des Fugenmaterials bei Verdichtung
- Verdichtung des Belages

## 2.1 Voruntersuchungen

Im Rahmen der Voruntersuchungen werden praktische Anwendungsfälle in Augenschein genommen. Praktische Beispiele zeigen das Problem der auftretenden Fugenentleerung mit dem Ergebnis sich lösender Pflastersteine und Platten. Im Folgenden werden drei Anwendungsfälle aufgeführt.

### 2.1.1 Anwendungsfall 1

In Abbildung 25 (Probestelle 1) scheinen die Fugen an der Oberfläche gefüllt zu sein. Im Fugenquerschnitt hingegen ist ein deutlich erkennbarer Hohlraum sichtbar.

Im unteren Fugenbereich steht Fugenmaterial an. Es handelt sich um einen dauerhaft -primär durch Kraftfahrzeugverkehr (vereinzelt Schwerverkehr)- befahrenen Bereich. Die Pflastersteine besitzen eine geringe Anzahl an Abstandshaltern. Die erstellten Korngrößenverteilungen vom Fugen- und Bettungsmaterial an Probestelle 1 und 2 befinden sich im Anhang C8.1.1 und C8.1.2. Dass hier nicht vollständig gefüllte Fugen



Abbildung 25:  
Probestelle 1 – Oberflächlich ist die Fuge visuell geschlossen, im  
Fugenquerschnitt ist ein Hohlraum (oranges Rechteck) deutlich sichtbar

vorliegen, kann an der Oberfläche nicht erkannt werden. Nach dem Entnehmen einiger Pflastersteine ist das Problem der nicht vollständig gefüllten Fugen im Querschnitt sichtbar. In Abbildung 25 ist zudem die Oberkante der Bettung erkennbar, wobei nach visueller Einschätzung eine Feinanteilanreicherung vorliegt. Eine derartige Feinanteilanreicherung auf der Bettungsschicht führt grundsätzlich und insbesondere in befahrenen Bereichen zu einer Verfestigung der Bettung mit der Folge, dass eindringendes Wasser nicht sachgerecht abgeführt werden kann. Bei diesem Anwendungsfall ist die Filterstabilität<sup>2</sup> zwischen Fugen- und Bettungsmaterial sowohl im belasteten als auch im unbelasteten Bereich (Anhang C3.1.8) nicht vorhanden. Abweichend zu Abbildung 6 und 7 ist bei diesem Anwendungsfall kein reiner Splitt vorhanden. Es kann keine Aussage gemacht werden, welchen Beitrag der rechnerisch nicht erbrachte Nachweis der Filterstabilität geleistet hat. Die Feinanteile des locker gelagerten Fugenmaterials können bei befahrenen Flächen vollständig unter den Stein wandern, wenn Bewegungsmöglichkeiten der Steine vorhanden sind oder aufgrund zu geringer Lagerungsdichte Material in Hohlräume abwandern kann. In der Praxis stellt sich ein eindeutiger Schadensfall aus fehlender Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial visuell abweichend von dem hier vorliegenden Anwendungsfall dar (vgl. Metzging & Saathoff, 11/2010, Foto S. 28). Abbildung 26 zeigt einen intakten Bereich nach dem Aufnehmen von Pflastersteinen.

Der aufgenommene Bereich befindet sich in einem nahezu unbelasteten Bereich. Hier ist unter dem Pflasterstein visuell keine Feinanteilanreicherung zu erkennen. Der Zustand der Bettung entspricht dem Ursprungszustand. Kornzertrümmerungen können augenscheinlich nicht festgestellt werden.

### 2.1.2 Anwendungsfall 2

In Abbildung 27 ist ein weiterer Anwendungsfall mit entleerten Fugen im belasteten Bereich (ausschließlich Kraftfahrzeugverkehr) enthalten. Dass hier zum Teil nicht vollständig gefüllte Fugen vorliegen, kann an der Oberfläche vereinzelt (Abbildung 27, gelber Pfeil) erkannt werden.

<sup>2</sup> Vgl. Abschnitt 3.3.8. Die Filterstabilität wird hier im Detail erläutert.



Abbildung 26:  
Probestelle 2 – Bettungsschicht ohne oberflächliche Feinanteilanreicherung in einem Randbereich

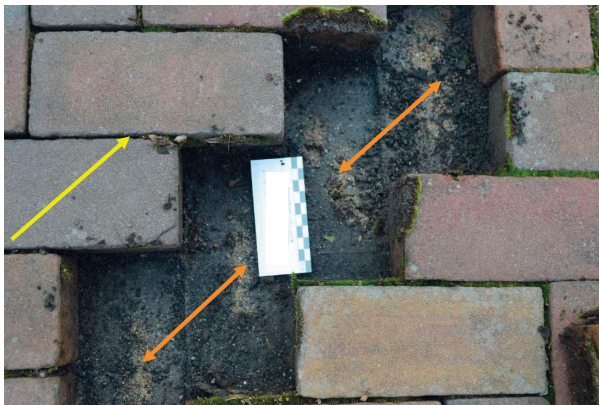


Abbildung 27:  
Probestelle 1 – Verschlammte Oberfläche der Bettung (anthrazitfarben),  
Bettung als Ursprungsmaterial sichtbar (orange Pfeile)

Nach dem Entnehmen einiger Pflastersteine ist eine verschlammte Oberfläche der Bettung (anthrazitfarben) sichtbar. Ungefähr in Steinmitte ist das Ursprungsmaterial der Bettung zu erkennen (orange Pfeile). Die Korngrößenverteilungen vom Fugen- und Bettungsmaterial an Probestelle 1 und 2 sind Anhang C8.1.1 und C8.1.2 zu entnehmen.

Abbildung 28 zeigt einen noch nicht schadhaften Bereich nach dem Aufnehmen von Pflastersteinen im nicht befahrenen Randbereich.

Der aufgenommene Bereich befindet sich in einem nahezu unbelasteten Bereich. Hier ist visuell keine Feinanteilanreicherung an der Oberfläche der Bettung zu erkennen. Der anthrazitfarbene Farbton des Fugenmaterials (türkis Pfeil) und des beigefarbenen Bettungsmaterials (oranger Pfeil) ist hier eindeutig sichtbar.





Abbildung 28:  
Probestelle 2 – Bettungsschicht ohne oberflächliche Feinanteilanreicherung in einem Randbereich  
(analog Abbildung 26)

Die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial (Anhang C3.1.9) ist vorhanden, wobei die Filterbedingung  $D_{15}/d_{15} \geq 1$  mit 0,81 nicht eingehalten ist. Dieser Sachverhalt ist aus technischer Sicht als nachrangig einzustufen, da eine gröbere Gesteinskörnung (beim Siebdurchgang 15 M.-%) im Fugenmaterial als im Bettungsmaterial keine negativen Auswirkungen auf eine vertikale Fugenentleerung besitzt.<sup>2</sup>

Die Verschlammung der Bettungsoberschicht in Abbildung 27 wird durch das Fugenmaterial verursacht. Im Randbereich sind die Fugen visuell gefüllt (Abbildung 28). Die Verschlammung der Bettungsschicht durch das Fugenmaterial führt einerseits zu Absackungen der Fugenfüllung mit dem Ergebnis eines erhöhten Wassereintrages. Der Wassereintrag führt in befahrenen Bereichen zu einer Verfestigung der Bettung mit der Folge einer reduzierten Wasserdurchlässigkeit der Bettung (analog Anwendungsfall 1).

### 2.1.3 Anwendungsfall 3

Mit Abbildung 29 ist ein weiterer Anwendungsfall mit entleerten Fugen im belasteten Bereich (Kraftfahrzeug- und hoher Schwerverkehr) dargestellt.

Nach dem Entnehmen einiger Pflastersteine ist eine verschlammte Oberfläche der Bettung (anthrazitfarben) sichtbar. Das ursprünglich eingebaute Bettungsmaterial besitzt einen rötlichen Farbton. Die Korngrößenverteilungen vom Fugen- und Bettungsmaterial der Probstellen 2, 3 und 5 sind Anhang C8.3.1 und C8.3.2 dargestellt. Abbildung 30 zeigt einen noch nicht schadhaften Bereich nach dem Aufnehmen von Pflastersteinen im gering belasteten Randbereich.

Der aufgenommene Bereich befindet sich in einem nahezu unbelasteten Bereich. Hier ist visuell keine Feinanteilanreicherung an der Oberfläche der Bettung zu erkennen. Die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial (Anhang C3.1.10) ist, mit Ausnahme der Probestelle 3 bei einer geringfügigen Überschreitung der Filterbedingung der Kontaktersion  $D_{50}/d_{50} \leq 5$ , vorhanden. Es kann analog Anwendungsfall 1 keine Aussage getroffen werden, inwiefern die rechnerisch fehlende Filterstabilität<sup>2</sup> zur Fugenentleerung beigetragen hat. Die Verschlammung der Bettungsoberschicht in Abbildung 29 wird u.a. durch Abrieb aus dem Vorsatz der Betonpflastersteine verursacht.



Abbildung 29:  
Probestelle 2 – Verschlammte bzw. verfestigte Oberfläche der Bettung (anthrazitfarben) im belasteten Bereich (oranger Pfeil), ursprüngliche Bettung besitzt einen rötlichen Farbton (gelbe Pfeile)



Abbildung 30:  
Probestelle 5 – Bettungsschicht ohne oberflächliche Feinanteilerreicherung in einem gering belasteten Randbereich (analog Abbildung 26)

Der Nachweis der durchgeführten Untersuchungen der mineralischen Zusammensetzung<sup>3</sup> der grauen Schlämmschicht ist Anhang C9 zu entnehmen. Im Randbereich bei geringer Verkehrsbelastung ist eine verfestigte Schlämmschicht nicht erkennbar (Abbildung 30).

<sup>3</sup> Die Bestandteile der tiefgrauen Verfärbung werden durch Röntgenbeugung oder auch Röntgendiffraktometrie durch das Braggsche Reflexionsgesetz beschrieben. Durch diese Untersuchungsmethode lassen sich die in der Probe enthaltenen Feststoffe eindeutig identifizieren (<https://www.terrachem.de/roentgenbeugungsanalyse/>).

Weiterhin wird eine REM-EDX Messung durchgeführt. Es handelt sich um eine Kombination mit einem Rasterelektronenmikroskop zur Elementanalyse im mikroskopischen Maßstab. Die Atome in einer Probe werden durch einen Elektronenstrahl bestimmter Energie angeregt. Aufgrund der weiten Verbreitung dieses Verfahrens wird EDX häufig als Kurzform für REM-EDX verwendet. Durch die Kombination des bildgebenden Rasterverfahrens im REM mit der Elementanalyse (EDX) ist es auch möglich Elementverteilungsbilder aufzunehmen ([https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedispersive\\_R%C3%B6ntgenspektroskopie](https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedispersive_R%C3%B6ntgenspektroskopie)).

## 2.2 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die Anwendungsfälle 1, 2 und 3 aus der Praxis zeigen beispielhafte Fugenentleerungen. Bei Nichteinhaltung der Filterstabilität wandert Fugenmaterial in die Poren der Bettung ab (Fugenentleerung Typ 1). Hier handelt es sich primär um einen vertikalen Transport von feinen Gesteinskörnern (vgl.

Abbildung 3 und 4). Dass eine Verfestigung bzw. Verschlämmung der Bettung unmittelbar unter dem Pflasterstein (Abbildung 25 und 27) primär durch eine fehlende Filterstabilität eintritt, kann vorerst ausgeschlossen werden. Dies ist nur dann der Fall, wenn eine vollständige Fugenentleerung durch Abwandern von Fugenmaterial in die Bettung stattfindet und es hierdurch zu einer erhöhten Materialbeanspruchung und somit zu Verfestigungserscheinungen aufgrund auftretender Lasten kommt.

Bei Anwendungsfall 1 (Probestelle 1 und 2) und Anwendungsfall 3 (Probestelle 3) sind die Filterkriterien der Kontaktersion  $D_{50}/d_{50} \leq 5$  nicht erfüllt. Es kann keine Aussage getroffen werden, inwiefern die rechnerisch fehlende Filterstabilität<sup>2</sup> (geringfügige Überschreitung der Filterbedingung der Kontaktersion  $D_{50}/d_{50} \leq 5$ ) zur Fugenentleerung beigetragen hat.

Bei Anwendungsfall 3 sind die vorhandenen Schlämmschichten auf Bettungsoberkante unter Berücksichtigung der durchgeführten Untersuchungen (Anhang C9) auf einen Abrieb bzw. auf lösliche Bestandteile aus dem Vorsatz des Betonpflastersteins zurückzuführen. Bei diesem Anwendungsfall ist der Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial erbracht. Ein derartiger Abtransport von Feinanteilen kann nur auftreten, wenn entweder die Porenstruktur des Fugenmaterials an sich dies ermöglicht oder aber Hohlräume im Fugenquerschnitt vorhanden sind, die eine Bewegung der Feinanteile zulassen. Sofern die Porenstruktur des Fugenmaterials dies zulässt, so kann der Vorgang als Suffosion<sup>4</sup> angesehen werden.

Bei allen drei Anwendungsfällen liegt die Vermutung nahe, dass die Fugenentleerung und/oder die Kolmation<sup>5</sup> (Verschlämmung) und die Verfestigung der Oberfläche der Bettung einen unmittelbaren Zusammenhang zur vorhandenen Lagerungsdichte des eingebauten Fugenmaterials besitzen. Bei Lageveränderung der Steine durch beispielsweise auftretende Verformungen kann auch eine Fugenentleerung auftreten. Bei allen drei Anwendungsfällen war ein derartiger Zustand nicht festzustellen. Bei nicht hinreichender Lagerungsdichte des Fugenmaterials wird ein Materialtransport bzw. eine Umlagerung auch unter den Pflasterstein bzw. die Platten begünstigt. Eine Verfestigung der Bettungsschicht kann auch durch Materialzertrümmerung bei vorhandenen Verkehrslasten eintreten.

Als Ergebnis dieser Anwendungsfälle soll im Weiteren in dieser Arbeit untersucht werden, ob unterschiedliche Anfangsstabilitäten bzw. Lagerungsdichten der ungebundenen Fuge in Abhängigkeit vom Fugenmaterial, dem Wassergehalt beim Einbau und etwaigen Verdichtungsverfahren erzielt werden können.

---

<sup>4</sup> Die Suffosion bezeichnet dabei den Transport von feinen Gesteinskörnern eines Gesteinskörnungsgemisches, wobei das Gerüstgerüst erhalten bleibt. Es wird unterschieden zwischen der inneren Suffosion, bei welcher der Transport der feinen Gesteinskörner innerhalb des Gesteinskörnungsgemisches stattfindet, und der Kontaktsuffosion, welche die innere Suffosion weiter verstärkt, in dem die feineren Gesteinskörner in ein angrenzendes gröberes Gesteinskörnungsgemisch eindringen (Blab, Gagliano, Hessmann & Kluger-Eigl, 2013). Die Suffosion kann hier nur stattfinden, wenn die Lagerungsdichte des Fugenmaterials sehr locker ist und die Kontaktsuffosion an sich in Verbindung mit der inneren Suffosion aktiviert wird. Bei hinreichender Lagerungsdichte ist das Eintreten der Suffosion nicht möglich, weil die ungebundenen Fugen üblicherweise nicht ständig mit Wasser durchströmt werden.

<sup>5</sup> Kolmation wird synonym mit dem Begriff Selbstdichtung verwendet und bezeichnet heute in der Regel alle Vorgänge, die über eine Reduktion des Porenvolumens und einer Verfestigung des Sohlenmaterials (Filterschicht) zu einer temporären oder dauerhaften Abnahme der Durchlässigkeit des Gewässerbetts führen und damit den freien Austausch zwischen Grundwasser und Fließgewässer behindern. Im englischen wird dieser Vorgang clogging oder auch soil-clogging genannt (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kolmation>). Kolmation bei ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen ist der Eintrag von Feinanteilen (z.B. durch Abrieb, Blütenstaub, usw.) in die Fugen. Bei fehlender Stabilität der Fugen können diese Bestandteile weiter vertikal nach unten in die Bettung oder auf die Bettung abwandern.



### 3 Untersuchungen

#### 3.1 Prüfflächen

Zur Feststellung, inwiefern die Anfangsstabilität und damit verbunden die Lagerungsdichte des ungebundenen Fugenmaterials unmittelbar nach der Herstellung abhängig von Fugenbreite, Fugenmaterial, Verdichtungsgerät und Wassergehalt ist, wurden insgesamt 72 Prüfflächen (jeweils aus Betonpflastersteinen 20/10/10 cm mit einer Größe von ca. 1,50 x 1,50 m) mit schematischem Aufbau gemäß Abbildung 31 in Halle 2 der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock hergestellt.

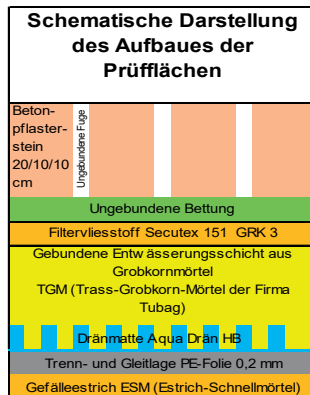


Abbildung 31:  
Schematische Darstellung des Aufbaues der Prüfflächen

Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge sind unter Berücksichtigung des Kapitels 2 wasserdurchlässig auszubilden. Die zu errichtenden Prüfflächen wurden unter Beachtung dieses Grundsatzes sowie mit einem hinreichenden Gefälle erstellt. Ein Gefälleestrich auf dem vorhandenen Hallenboden diente als Grundlage dafür, die ungebundene Pflasterdecke in einem notwendigen Gefälle herzustellen. Der für die Prüfflächen hergestellte Aufbau gewährleistet aufgrund einer gebundenen Grobkornmörtelausgleichsschicht (Anhang A3) und einer Flächendrängung die rückstaufreie Wasserabführung (Empfehlung, 2005) in der zweiten Entwässerungsebene. Ziel ist es, das Wasser direkt unter dem Pflasterstein durch die Bettung abzuführen. Um die Filterstabilität zwischen der Bettung, bestehend aus einem Baustoffgemisch 0/8 mm (Anhang A9), und Grobkornmörtel zu gewährleisten, wird ein Filtervliesstoff (Anhang A4) auf der Grobkornmörtelschicht verlegt.

In der Abbildung 32 sind drei hintereinander befindliche Prüfflächen vor dem Einbringen der Bettung dargestellt. Die Aluminium-Rahmen sind Einzelanfertigungen für die Errichtung der Prüfflächen, manuell verstellbar und dienen als Einfassung der Prüfflächen.

Die 72 Prüfflächen unterscheiden sich durch die Verwendung verschiedener ungebundener Baustoffgemische für die Fuge (Brechsand 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen, Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen, Rundkorn 0/1 mm mit wenigen Feinanteilen, Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm mit vielen Feinanteilen, Brechsand Splitt-Gemisch 0/5 mm mit wenigen Feinanteilen, Brechsand-Splitt Gemisch 0/8 mm mit wenigen Feinanteilen sowie Splitt 2/5 mm). Die Prüfzeugnisse der verwendeten Fugenmaterialien finden sich im Anhang A10 bis A15. Die erstellten Korngrößenverteilungen sind im Anhang C1 aufgeführt.



Abbildung 32:  
Drei hintereinander befindliche Prüfflächen vor dem Einbringen der Bettung

Die verschiedenen Fugenmaterialien wurden bei unterschiedlichen Fugenbreiten sowie variierenden Wassergehalten in Verbindung mit der Durchführung der Verdichtung mit zwei Rüttelplatten eingebaut. Es wurden die Rüttelplatten Wacker Neuson DPS1850Hb mit einem Betriebsgewicht von 114 kg (Anhang A7) sowie Wacker Neuson DPU4545He mit einem Betriebsgewicht von 423 kg (Anhang A8), beide mit Platten-gleitvorrichtung, für die Verdichtung verwendet. Die Verlegung der Betonpflastersteine wurde mit Fugenkreuzen (Anhang A5) durchgeführt, um die geforderte Fugenbreite zu erhalten. Die unterschiedlichen Fugenverfüllungsarten (Einkehren, Einschlämmen) wurden dokumentiert. Anschließend wurden die Flächen verdichtet. Als Bettungsmaterial wurde bei sämtlichen Prüfflächen das Baustoffgemisch 0/8 mm (Anhang A8) eingebaut.

### 3.2 Unterschiede der einzelnen Prüfflächen

Die Prüfflächen werden -wie in Abschnitt 3.1 beschrieben- ausgeführt und unterscheiden sich im

- Fugenmaterial und
- damit verbunden der Fugenbreite,
- dem Einsatz zweier verschiedener Rüttelplatten sowie
- Einbau und Verdichtung bei unterschiedlichen Wassergehalten.

Die Prüfflächen Nr. 1 bis 7 wurden unter Betrachtung des Prüfflächenplans (Anhang B) hergestellt.

### 3.3 Verwendete Geräte und Materialien

#### 3.3.1 Estrich als Gefälleschicht

Zur Herstellung des Gefälleestrichs wird eine ESM Estrich - Schnellmörtel (Anhang A1) eingebaut.

### 3.3.2 Dränmatte mit Gleitfolie

Um ein mehrfaches Befahren der ungebundenen Pflasterdecke respektive der hergestellten Prüfflächen mit den Verdichtungsgeräten zu ermöglichen, wurde die Flächendränung AquaDrain HB,  $d = 8 \text{ mm}$ , (Anhang A2) verlegt. Diese Flächendränung hat den Vorteil, dass eine rückstaufreie Wasserabführung (Empfehlung, 2005) und eine Kraftübertragung der Flächenlast (Eigengewicht sowie notwendige herstellungs- und nutzungsbedingte Lasten) durch die mit Grobkornmörtel gefüllten Stege stattfinden kann (Abbildung 33).

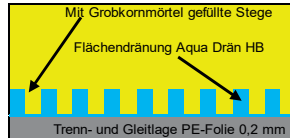


Abbildung 33:

Darstellung der Flächendränung mit Grobkornmörtel-Füllung der Stege (vgl. Abbildung 31)

### 3.3.3 Grobkornmörtel

Die Grobkornmörtel-Schicht ohne den Einsatz eines Gesteinskörnungsgemisches  $0/2 \text{ mm}$  (Anhang A3) befindet sich auf der Flächendränung AquaDrain HB (Anhang A2), welche auf dem Gefälleestrich aufliegt. Vor dem Abziehen wird der Grobkornmörtel ausschließlich durch Eigengewicht mit einem Handstamper verdichtet. Die Struktur des Grobkornmörtels ist in der Abbildung 34 ersichtlich.



Abbildung 34:

Beispielhafte Probe des hergestellten Grobkornmörtels

### 3.3.4 Filtervliesstoff

Der Filtervliesstoff wird gemäß Anhang A4 verwendet und wurde mit entsprechender Überlappung auf die Grobkornmörtelschicht verlegt. Anschließend wurden die Aluminium-Rahmen verschraubt und auf dem Filtervliesstoff positioniert (vgl. Abbildung 32).

### 3.3.5 Pflastersteine

Die hergestellten Prüfflächen wurden mit Betonpflastersteinen der Abmessungen  $196/96/96 \text{ mm}$  errichtet. Die Pflastersteine besitzen an der Längsseite zwei und an der kurzen Seite einen Abstandshalter.

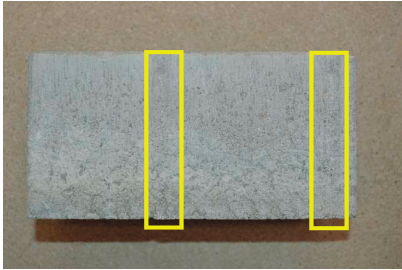


Abbildung 35:  
Verwendeter Betonpflasterstein mit 2 Abstandshaltern (gelbe Rechtecke) an der Längsseite nach dem Rückbau der Prüfflächen

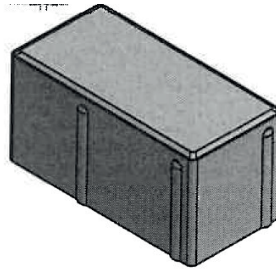


Abbildung 36:  
Zeichnung des verwendeten Pflastersteines

Abbildung 35 und 36 zeigen beispielhaft einen verwendeten Pflasterstein mit zwei Abstandshaltern an der Längsseite. Weitere technische Details zu den Betonpflastersteinen können Anhang A6 entnommen werden.

### 3.3.6 Bettungsmaterial

Als Bettungsmaterial wurde bei allen Prüfflächen ein Baustoffgemisch 0/8 mm gemäß Anhang A8 eingebaut. Das Bettungsmaterial besteht aus der Gesteinsart Granit und besitzt eine Schlagzertrümmerung von SZ<sub>22</sub>. Die Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 37 dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden zwei Korngrößenverteilungen erstellt (orange und grau) (Anhang C2.1). Der Feinanteil < 0,063 mm des Bettungsmaterials betrug bei Lieferung 1,3 bzw. 1,8 M.-%.

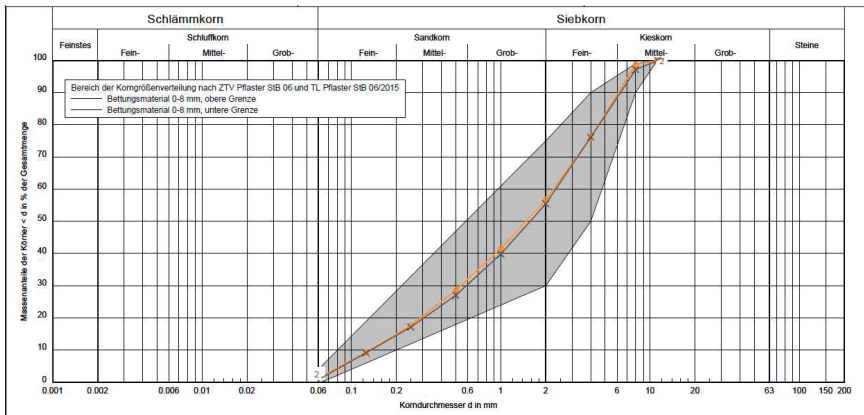


Abbildung 37:  
Korngrößenverteilung des verwendeten Bettungsmaterials 0/8 mm

### 3.3.7 Fugenmaterialien

Die 72 Prüfflächen unterscheiden sich durch die Verwendung verschiedener ungebundener Baustoffgemische für die Fuge, und zwar

- Brechsand 0/2 mm mit vergleichsweise wenigen Feinanteilen (Prüfzeugnis Anhang A10),
- Brechsand 0/2 mm mit vergleichsweise vielen Feinanteilen (Prüfzeugnis Anhang A11),
- Rundkorn 0/1 mm (Prüfzeugnis Anhang A12),
- Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm mit vielen Feinanteilen (Prüfzeugnis Anhang A13),
- Brechsand Splitt-Gemisch 0/5 mm (Prüfzeugnis Anhang A13),
- Brechsand-Splitt Gemisch 0/8 mm (Prüfzeugnis Anhang A14) sowie
- Splitt 2/5 (Prüfzeugnis Anhang A15).

Zusätzlich werden zwei verschiedene Rüttelplatten bei unterschiedlichen Wassergehalten des Fugenmaterials eingesetzt, um die Verdichtung der Flächen vorzunehmen. Die im Rahmen der Untersuchungen erstellten Korngrößenverteilungen wurden nach DIN EN 933-1 erarbeitet. Als Fugenmaterialien wurden übliche im Handel verfügbare Gesteinskörnungsgemische verwendet, wobei hinsichtlich der Korngrößenverteilung Abweichungen zur ZTV Pflaster-StB (2006) und TL Pflaster-StB (2006/2015) vorliegen. Die Abweichungen sind den einzelnen Diagrammen der Korngrößenverteilungen zu entnehmen.

### 3.3.7.1 Brechsand 0/2 mm, wenig Feinanteile

Das Fugenmaterial (Anhang A10) besteht aus gebrochenem Flusskies. Die Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 38 (grün) dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden 2 Korngrößenverteilungen erstellt (Anhang C1.1). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials vor dem Einbau beträgt 0,7 M.-%. Der Fließkoeffizient des Fugenmaterials beträgt  $E_{CS}$  43 (Anhang C4).

Der grau hinterlegte Bereich ist der gemäß ZTV Pflaster-StB 06 vorgegebene Sieblinienbereich. Die Angabe der minimalen Feinanteile  $LF_2$  und der maximalen Feinanteile  $UF_3$  sind in der TL Pflaster-StB (2006/2015) enthalten.

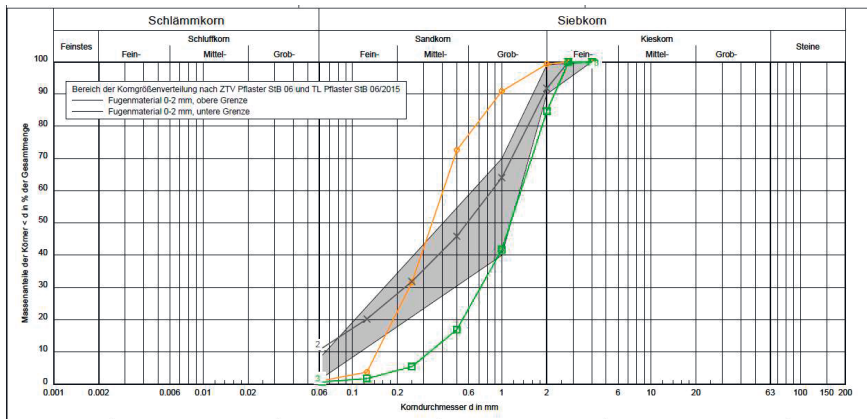


Abbildung 38:

Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Brechsand 0/2 mm, wenig Feinanteile (grün), Brechsand 0/2 mm viele Feinanteile (grau), Rundkorn 0/1 mm, wenig Feinanteile (orange)

### 3.3.7.2 Brechsand 0/2 mm, viele Feinanteile

Das Fugenmaterial besteht aus der Gesteinsart Gabbro. Die Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 38 (grau) dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden zwei

Korngrößenverteilungen erarbeitet (Anhang C1.3). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials vor dem Einbau beträgt 11,3 M.-%. Der Fließkoeffizient des Fugenmaterials beträgt  $E_{CS}$  40 (Anhang C4).

### 3.3.7.3 Rundkorn 0/1 mm, wenig Feinanteile

Das Fugenmaterial besteht aus Quarz. Die Korngrößenverteilung des Fugenmaterials ist in Abbildung 38 (orange) dargestellt, wobei aus der Lieferkörnung 2 Korngrößenverteilungen erstellt worden sind (Anhang C1.5). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials beträgt 1,0 M.-% bzw. 1,1 M.-%. Der Fließkoeffizient des Fugenmaterials beträgt  $E_{CS}$  26 (Anhang C4).

### 3.3.7.4 Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm, viele Feinanteile

Das Fugenmaterial besteht aus der Gesteinsart Granit. Die Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 39 (orange) dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden zwei Korngrößenverteilungen erarbeitet (Anhang C1.7). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials vor dem Einbau beträgt 12,4 M.-% bzw. 12,9 M.-%. Der Fließkoeffizient des Brechsandanteils 0/2 mm beträgt  $E_{CS}$  38 (Anhang C4).

Der grau hinterlegte Bereich ist die Vorgabe TL Pflaster-StB (2006/2015) mit einem minimalen Feinanteil  $LF_2$  und einem maximalen Feinanteil der Kategorie  $UF_9$  für Baustoffgemische 0/4 mm und 0/5 mm.

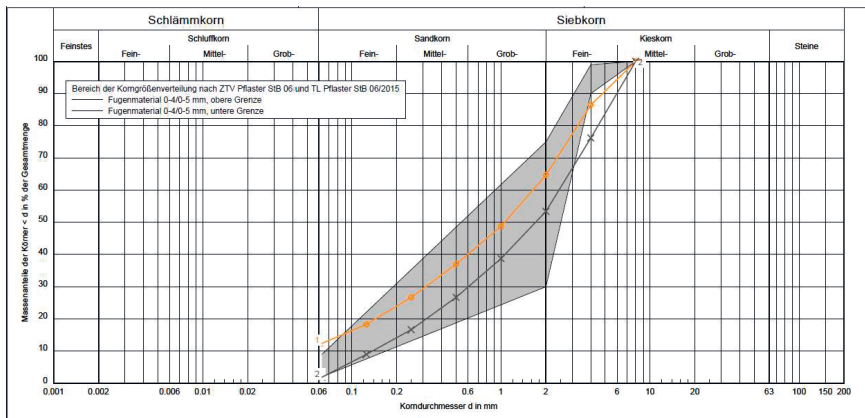


Abbildung 39:

Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm, viele Feinanteile (orange), Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm, wenig Feinanteile (grau)

### 3.3.7.5 Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm, wenig Feinanteile

Das Fugenmaterial besteht aus der Gesteinsart Granit. Die Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 39 (grau) dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden zwei Korngrößenverteilungen erarbeitet (Anhang C1.9). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials vor dem Einbau beträgt 1,9 M.-% bzw. 2,0 M.-%. Der Fließkoeffizient des Brechsandanteils 0/2 mm beträgt  $E_{CS}$  39 (Anhang C4).

### 3.3.7.6 Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm, wenig Feinanteile

Das Fugenmaterial besteht aus gebrochenem Flussskies. Die Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 40 (orange und grau) dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden zwei Korngrößenverteilungen erarbeitet (Anhang C1.11). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials vor dem Einbau beträgt 0,4 M.-%. Der Fließkoeffizient des Brechsandanteils 0/2 mm beträgt  $E_{CS}$  45 (Anhang C4).

Der grau hinterlegte Bereich ist die Vorgabe TL Pflaster-StB (2006/2015) mit einem minimalen Feinanteil  $LF_2$  und einem maximalen Feinanteil der Kategorie  $UF_9$  für ein Baustoffgemisch 0/8 mm.

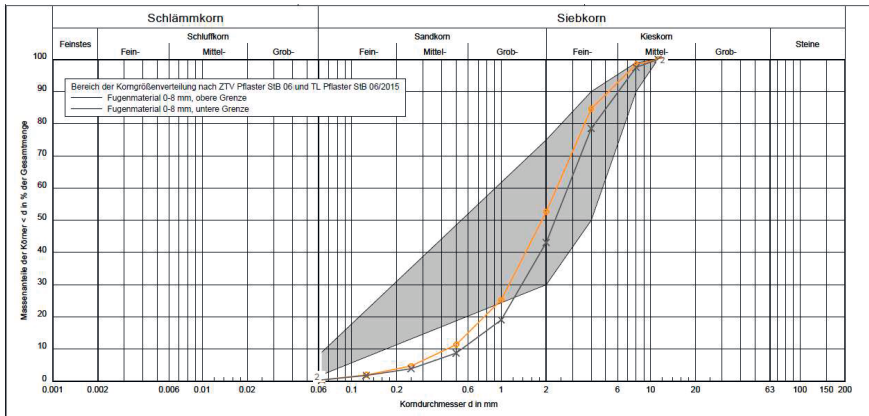


Abbildung 40:  
Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm,  
wenig Feinanteile

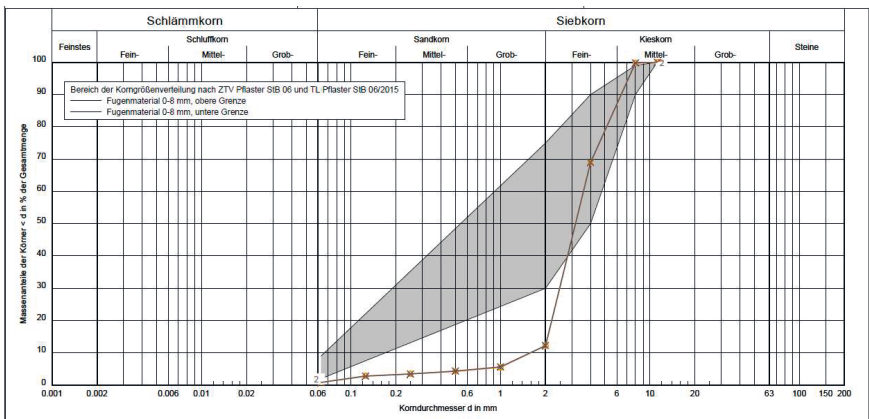


Abbildung 41:  
Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Splitt 2/5 mm



### 3.3.7.7 Splitt 2/5 mm

Das Fugenmaterial besteht aus der Gesteinsart Granit. Die Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials vor dem Einbau ist in Abbildung 41 (orange und grau) dargestellt. Aus der Lieferkörnung wurden zwei Korngrößenverteilungen erstellt (Anhang C1.13). Der Feinanteil < 0,063 mm des Fugenmaterials vor dem Einbau beträgt 0,9 M.-% bzw. 0,8 M.-%. Der Fließkoeffizient wurde am Splitt nicht bestimmt.

### 3.3.8 Filterstabilität

Die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial muss vorhanden sein, damit Bestandteile des Fugenmaterials nicht in die Hohlräume der Bettung abwandern. Durch Abwandern kommt es zum Volumenverlust in der Fuge mit der Folge von systembedingten Fugenentleerungen. Der Nachweis der Filterstabilität der einzelnen Prüfflächen Nr. 1 bis 7 an den jeweiligen Lieferkörnungen ist im Anhang C 3.1.1 (Prüffläche Nr. 1) bis Anhang C 3.1.7 (Prüffläche Nr. 7) enthalten. Der Nachweis der Filterstabilität wird unter Berücksichtigung nachstehender Filterbedingungen nach ZTV Pflaster StB (2006)<sup>6</sup> durchgeführt:

- $D_{15}/d_{15} \geq 1$  Durchlässigkeitsregel<sup>7</sup>
- $D_{15}/d_{85} \leq 4$  Regel zur Sicherheit gegenüber Erosion<sup>8</sup>
- $D_{50}/d_{50} \leq 5$  Abstand der Körnungslinien (Regel zur Sicherheit gegenüber Kontakterosion)

Die Filterbedingungen haben sich in den letzten Jahrzehnten zum Teil verändert. Im Merkblatt (1998) und in Borgwardt, Gerlach & Köhler (2001) sind die Bedingungen  $D_{15}/d_{15} \geq 5$ ,  $D_{15}/d_{85} \leq 4$  und  $D_{50}/d_{50} \leq 25$  aufgeführt. In der ZTV Pflaster StB (2000) sind die Filterbedingungen  $D_{15}/d_{85} \leq 4$  und  $D_{50}/d_{50} \leq 10$  enthalten. In Blab, Füssli, Gagliano, Hessmann & Kluger-Eigl (2013) wird Bezug genommen auf die RVS 08.18.01, wo die Bedingung  $D_{15}/d_{85} \leq 2$  und die Sicherheitsbedingung gegenüber Kontakterosion mit  $D_{50}/d_{50} \leq 10$  erfüllt sein muss.

Die hier aufgeführten Kontaktbedingungen zeigen, dass unterschiedliche Anforderungen an die Gewährleistung der Filterstabilität bestehen. Die Nichteinhaltung der Filterstabilität wirkt sich bei Wassereintrag und Vorhandensein dynamischer Lasten negativ aus. Inwiefern die Nichteinhaltung der Filterkriterien in der Praxis schadensursächlich ist, kann beim Einhalten bzw. bei leichten Abweichungen der Filterkriterien nicht eindeutig gesagt werden. Unter Berücksichtigung der Voruntersuchung in Abschnitt 2.1 ist bei den beschriebenen Anwendungsfällen 1, 2 und 3 ersichtlich, dass Feinanteile unter den Stein gewandert sind. Die Nichteinhaltung der Filterstabilität führt in der Regel zum Abtransport von Material in darunterliegende Schichten mit der Folge des Volumenverlustes. Dass sich wie bei den Anwendungsfällen 1, 2 und 3 unter dem Pflasterstein Feinanteile (vgl. Abbildung 25 und 27) befinden, deutet vielmehr darauf hin, dass die Steine nicht hinreichend eingespannt sind bzw. die Steine nach der Herstellung Bewegungsspielraum haben. Ggf. ist das Fugenmaterial so locker gelagert, dass Poren vorhanden sind, die einen Materialtransport ermöglichen. Zudem können sich durch Bewegungsspielräume zusätzlich Hohlräume öffnen und es können Feinanteile aus dem Fugenmaterial unmittelbar unter den Stein wandern. Die Bildung einer Schlammsschicht („Sperrschicht“) unmittelbar unter dem Stein (vgl. Abbildung 25 und 27) ist aus technischer Perspektive nicht auf eine Nichteinhaltung der Filterstabilität zurückzuführen.

<sup>6</sup> Die Filterkriterien nach Cistin/Ziems (Richtlinie, 2005) werden beispielhaft untersucht. Die beispielhaften Nachweise werden für die Prüfflächen Nr. 1 bis 3 zwischen Fugen- und Bettungsmaterial durchgeführt. Es werden ausschließlich die Berechnung für Fugenmaterialien der Prüfflächen Nr. 1 bis 3 erstellt, da die Fugenmaterialien Brechsand 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen, Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen und Rundkorn 0/1 mm mit wenigen Feinanteilen aufgrund der geringen Korngrößen die größte Gefahr der Nichteinhaltung der Filterstabilität besitzen. Die Berechnungen zeigen, dass der Nachweis der Filterstabilität nach Cistin/Ziems (Richtlinie, 2005) rechnerisch eindeutig erbracht wird (Anhang C3.1.11 bis C3.1.13). Es wird somit analog zu Koch (1999) festgestellt, dass die hier verwendeten Filterkriterien strengere Anforderungen als Cistin/Ziems (Richtlinie, 2005) darstellen.

<sup>7</sup> In Anlehnung an Möller (2007) als Sicherung drucklosen Wasserabflusses.

<sup>8</sup> In Anlehnung an Möller (2007) als Zurückhaltung transportierten Bodens im Filter.



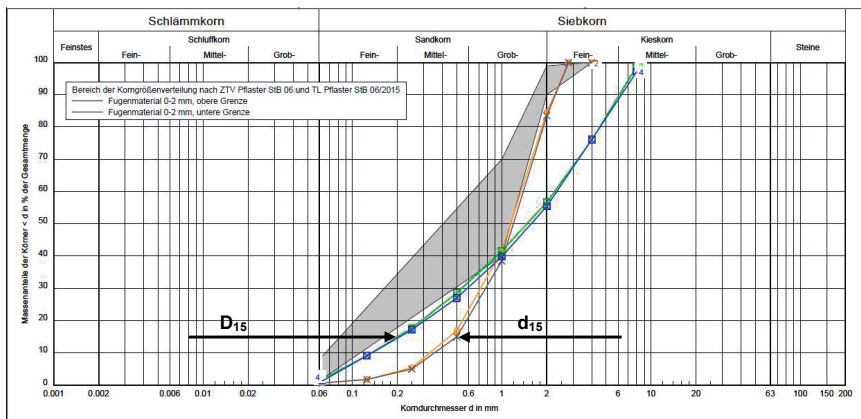


Abbildung 42:  
Korngrößenverteilung Fugenmaterial 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen (orange und grau)  
und Bettungsmaterial 0/8 mm (blau und grün)

Werden die Nachweise der Filterstabilität betrachtet, so ist für Prüffläche Nr. 1 festzuhalten, dass die Bedingung  $D_{15}/d_{15} \geq 1$  bei allen Proben nicht eingehalten ist. Dies kann sich aus technischer Perspektive im Betrieb nicht negativ auswirken, da das Fugenmaterial beim Siebdurchgang  $d_{15}$  einen größeren Korndurchmesser besitzt als das Bettungsmaterial. Abbildung 42 zeigt hier beispielhaft die beiden Korngrößenverteilungen vom Fugen- und Bettungsmaterial. Demzufolge kann es nicht zum vertikalen Abtransport vom Fugenmaterial in die Bettung kommen. Diese Bedingung bedeutet, dass die Gesteinskörner der Bettung beim Siebdurchgang 15 M.-% im Verhältnis zum Siebdurchgang 15 M.-% beim Fugenmaterial größer oder gleich sein sollen. Dieser Sachverhalt ist als nachrangig einzustufen, da in Verkehrsflächen ein Fugenschluss mit hohen Feinanteilen ( $<0,063$  mm) sinnvoll ist und damit der Wasserzutritt reduziert wird.

Der hier beschriebene Sachverhalt gilt analog für die Prüfflächen Nr. 5, 6 und 7. Die Fugen dieser Prüfflächen sind mit einem Baustoffgemisch 0/5, 0/8 und einer groben Gesteinskörnung 2/5 mm verfüllt. Die Nichteinhaltung dieses Filterkriteriums  $D_{15}/d_{15} \geq 1$  kann sich in der Praxis nicht negativ auswirken. Aus dieser Perspektive ist die Nichteinhaltung dieses Filterkriteriums technisch als unbedeutend einzustufen und sollte bei weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen hinterfragt werden.

Für die Prüffläche Nr. 3 hingegen ist zum Teil die Filterbedingung  $D_{50}/d_{50} \leq 5$  nicht eingehalten. Hier kommt es rein rechnerisch nach ZTV Pflaster-StB (2006) zu einer Überschreitung der Filterbedingung. Inwiefern die Überschreitung tatsächlich zu einem Abwandern von Fugenmaterial in die darunterliegende Schicht führt, kann nicht beurteilt werden. Hierzu müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um festzustellen, ob ein Abwandern von Fugenmaterial bei einem derartigen Anwendungsfall in die Hohlräume der Bettung überhaupt stattfindet.

Die Filterkriterien sind im Wesentlichen bei allen Prüfflächen eingehalten. Dies bezieht sich insbesondere auf die Bedingung der Kontakterosion<sup>9</sup>. Die Nichteinhaltung der Filterkriterien ist zur Beurteilung der Lagerungsdichte des Fugenmaterials der hergestellten Prüfflächen unerheblich. Grund hierfür ist die

<sup>9</sup> Der wesentliche Unterschied zwischen einer s.g. Kontakterosion und Kontaktsuffosion besteht darin, dass bei der Kontaktsuffosion nur die in den korngabestufen Baustoffen enthaltenen Feinanteile ausgewaschen werden und das Korngerüst stabil bleibt, wohingegen bei der Kontakterosion das an die durchlässige Schicht angrenzende Material vollständig erodiert und verfrachtet wird und es somit zu einem Volumenverlust kommt.

Verdichtung des Fugenmaterials. Nach dem Verdichtungsverfahren ist die „Aktivierung“ einer fehlenden Filterstabilität bei den hergestellten Prüfflächen durch Materialabtransport aufgrund fehlenden Wassers und dynamischer Lasten abgeschlossen. Es wird zudem vermutet, dass eine „Aktivierung“ der Filterstabilität auch abhängig von der Lagerungsdichte des Fugenmaterials ist. In Abhängigkeit von der Kornform kann sich möglicherweise bei entsprechender Verzahnung auch bei nicht vollständiger Füllung der Hohlräume im gröberen Gesteinskörnungsgemisch (Bettungsmaterial) ein „Sättigungsvorgang“ einstellen, so dass ein weiteres Abwandern der feineren Gesteinskörnung (Fugenmaterial) in die Hohlräume des groben Gesteinskörnungsgemisches nicht mehr stattfindet.

### 3.4 Herstellung der Prüfflächen

Es wurden bei den Untersuchungen 72 Prüfflächen mit sieben verschiedenen Fugenmaterialien, die in den Abschnitten 3.3.7.1 bis 3.3.7.7 hinsichtlich der Gesteinsart, Korngrößenverteilung und des Fließkoeffizienten beschrieben sind, eingesetzt. Die Prüfflächen unterscheiden sich durch das Einbringen des Fugenmaterials und der Verwendung des Verdichtungsgerätes. Der Prüfplan der einzelnen Prüfflächen ist im Anhang B sowie in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Zur Vereinfachung der Herstellung der Prüfflächen wird in dieser Arbeit die Art der Herstellung beispielhaft für die Prüffläche Nr. 1 dargestellt. Die Prüfflächen Nr. 2 bis 7 wurden unter Betrachtung des Prüfflächenplans (Anhang B) identisch hergestellt. Abweichende Ausführungen sind im Prüfflächenplan aufgeführt.

Die Herstellung der Prüfflächen wurde praxisgerecht durchgeführt. Ungebundenes Fugenmaterial kann nicht mit einem definierten Wassergehalt eingebaut werden. Dies hat folgende Gründe:

- Je nach Jahreszeit und Witterung besitzt das auf der Baustelle vorhandene Fugenmaterial in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung und der Feinanteile einen „natürlichen“ Wassergehalt. Eine Wassergehaltsbestimmung des Fugenmaterials beim Einbringen in die Fugen und beim darauffolgenden Verdichtungsverfahren wird auf der Baustelle erfahrungsgemäß nicht durchgeführt.
- Der Einbau von getrocknetem Fugenmaterial ist praxisgerecht dauerhaft nicht möglich. Trockener Einbau von Fugenmaterial kann in der Regel nur im Hochsommer durchgeführt werden, wenn das Fugenmaterial lang genug auf der Fläche gelegen hat und durch die Sonneneinstrahlung trocken konnte.
- In Abhängigkeit von Fugenbreite, Größtkorn und Kornform ist das Fugenmaterial in die Fugen einzubringen. Es kann nicht grundsätzlich gesagt werden, welche Wassermenge hierfür maßgebend ist. Die verwendete Wassermenge ist abhängig vom Gestein, der Korngrößenverteilung und vom Fließkoeffizient. Zudem ist es maßgebend, wie schnell die Versickerung durch das Bettungsmaterial und in die darunter eingebaute zweite Entwässerungsebene stattfinden kann. Weiterhin spielen die Verdunstung und die Wasseraufnahme des Pflastersteins bzw. der Platte eine Rolle. Bevor das Wasser für das Einschlännen des Fugenmaterials genutzt werden kann, werden die Pflastersteine bzw. Platten gesättigt. Bei dem Verfugungsverfahren findet somit vorerst ein Sättigungsvorgang der Pflastersteine bzw. Platten statt. Dies ist nahezu unabhängig davon, ob es sich um Beton-, Klinker- oder Natursteine handelt. Vielmehr ist die Wasseraufnahme der Pflastersteine bzw. Platten davon abhängig, welches Porengefüge diese besitzen. Aus diesem Grund wird bei der Herstellung der Prüfflächen dafür Sorge getragen, dass beim Einschlännen hinreichend Wasser verwendet wird, um das Fugenmaterial sachgerecht einbringen zu können.

Das Fugenmaterial bei einem definierten Wassergehalt unter Betrachtung der beschriebenen Sachverhalte einzubauen ist nicht möglich.



Abbildung 43:  
„Halbrundungen“ im Betonpflasterstein für die Probenahme des Fugenmaterials nach dem Verdichtungsvorgang zur Bestimmung des Wassergehaltes

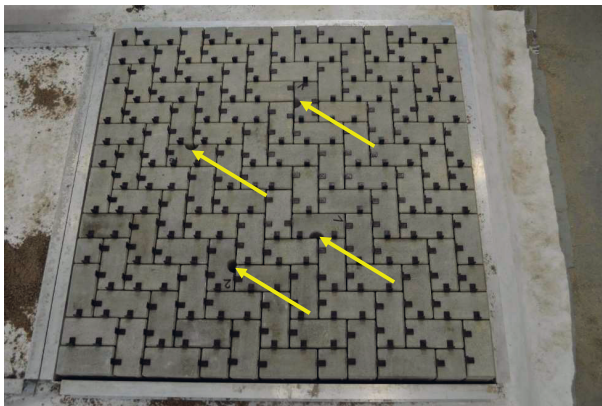


Abbildung 44:  
Prüffläche Nr. 1 nach dem Verlegen der Pflastersteine, gelbe Pfeile zeigen die „Halbrundungen“, aus den Proben zur Bestimmung des Wassergehaltes entnommen wurden

Verschiedene Vorversuche im Rahmen der Errichtung der Prüfflächen haben gezeigt, dass es bei stehendem Wasser in den Fugen und der Verwendung der reversiblen Rüttelplatte DPU4545He beim Rückwärtsfahren zum Heraustransportieren bzw. Heraussaugen des Fugenmaterials kommt. Aus diesem Grund ist bei einer so genannten „nassen Verdichtung“ dafür Sorge getragen, dass der Verdichtungsprozess erst begonnen wird, wenn Wasser nicht mehr in den Fugen steht, sondern unmittelbar in das Fugenmaterial eingezogen und visuell nicht mehr sichtbar ist. Bei dieser Verdichtung wird das Fugenmaterial nicht mehr durch den Verdichtungsprozess ausgetragen. Zudem führt stehendes Wasser im Material bei der Verdichtung aufgrund des Porenwasserdrucks zur Lockerung bzw. Entfestigung des Materials.

Tabelle 3: Darstellung der einzelnen Prüfflächen (Auszug aus Anhang B)

Lfd. Nr.	Einbauart des Fugenmaterials	Verdichtungsgerät	Prüfung	Prüfflächen Nr.												Summe
				1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
A	Fugenbreite [mm]:			4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
B	Korngrößenverteilung Fugenmaterial [mm]:			0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	0,8	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3	10	
C	Fugenmaterial:			Bruchteil wenig FA	Bruchteil viele FA	Rundum viele FA	Bruchteil wenig FA	Bruchteil viele FA	Bruchteil wenig FA	Bruchteil viele FA	Bruchteil wenig FA	Bruchteil viele FA	Bruchteil wenig FA	Bruchteil viele FA	Bruchteil wenig FA	
D	Prüfdesigns Fugenmaterial:			Anhang A10	Anhang A11	Anhang A12	Anhang A13	Anhang A13	Anhang A13	Anhang A14	Anhang A15	Anhang A15	Anhang A15	Anhang A15	Anhang A15	
[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	
1	Baustoffgemisch mit natürlichem Wasserzement (ohne Wasserzugabe) erfolgt <sup>1</sup>	keine Verdichtung	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6
2	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 1 durchgeführt	DPS 1850	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
3	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 2 durchgeführt	DFU 4545	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
3.1	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 3 durchgeführt, mit Wasserzugabe in offene Fugen	DFU 4545	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
4	Baustoffgemisch mit Wasser einschlüssen <sup>2</sup>	keine Verdichtung	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6
4.1	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 4 durchgeführt, ohne Wasserzugabe	DPS 1850	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
4.2	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 4.1 durchgeführt, ohne Wasserzugabe	DFU 4545	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
4.3	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 4.2 durchgeführt, ohne Wasserzugabe in offene Fugen	DPS 1850	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6
4.4	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 4.3 durchgeführt, mit Wasserzugabe in offene Fugen	DFU 4545	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6
5	Baustoffgemisch mit Wasser einschlüssen und verdichten <sup>2</sup>	DPS 1850	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
5.1	Verdichtung wird nach Prüfung Lfd.-Nr. 5 durchgeführt, mit Wasserzugabe in offene Fugen	DFU 4545	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
6	Baustoffgemisch mit Wasser einschlüssen und verdichten <sup>2</sup>	DFU 4545	Fugenzone	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6
Anzahl der Versuche, ohne Zeile 7, Summe:																72

<sup>1</sup>Neues Betongemisch für Lfd. Nr. 1, 4, 5, 6  
<sup>2</sup>FA = Feinsand < 0,075 mm

Zur Beurteilung des Einflusses des Wassergehaltes des Fugenmaterials wurden unmittelbar nach dem Verdichtungsvorgang Proben des ungebundenen Fugenmaterials entnommen. Um eine nach dem Verdichtungsvorgang zeitnahe und zerstörungsfreie Probenahme (kein Auflockern angrenzender Bereiche) zu ermöglichen, wurden Kernbohrungen im Pflasterstein durchgeführt. Abbildung 43 zeigt beispielhaft eine halbe Kernbohrung („Halbrundungen“) in einem Pflasterstein, aus der nach dem Verdichtungsvorgang das entsprechende Fugenmaterial zur Bestimmung des Wassergehaltes entnommen wurde.

Abbildung 44 zeigt beispielhaft die Prüffläche Nr. 1 unmittelbar nach dem Verlegen der Pflastersteine unter Einsatz der Abstandshalter,  $d = 4 \text{ mm}$  (vgl. Abbildung 45).

Die Prüfflächen sind zur Übersichtlichkeit in Tabelle 3 aufgeführt. Die unterschiedlichen Prüfflächen werden grundsätzlich mit einem Fugenmaterial gemäß Abschnitt 3.3.7.1 hergestellt. Die Korngrößenverteilung des eingesetzten Fugenmaterials befindet sich im Anhang C1.1.

Die verschiedenen Herstellungsarten der Prüfflächen sind beispielhaft an der Prüffläche Nr. 1 nachstehend dargestellt:

- 1.1 Baustoffgemisch mit natürlichem Wassergehalt (ohne Wasserzugabe) einfeigen
- 1.2 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.1 mit DPS1850Hb
- 1.3 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.2 mit DPU4545He
- 1.3.1 Verdichtung der Prüffläche Nr. 1.3 mit Wasserzugabe in offene Fugen mit DPU 45H45H
- 1.4 Baustoffgemisch mit Wasser einschlänmen
- 1.4.1 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.4 mit DPS1850Hb (ohne Wasserzugabe)
- 1.4.2 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.4.1 mit DPU4545He (ohne Wasserzugabe)
- 1.4.3 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.4.2 mit DPS1850Hb (mit Wasserzugabe in offene Fugen)
- 1.4.4 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.4.3 mit DPU4545He (mit Wasserzugabe in offene Fugen)
- 1.5 Baustoffgemisch mit Wasser einschlänmen und verdichten mit DPS1850Hb
- 1.5.1 Verdichtung Prüffläche Nr. 1.5 mit DPU4545He (mit Wasserzugabe in offene Fugen)
- 1.6 Baustoffgemisch mit Wasser einschlänmen und verdichten mit DPU4545He

### 3.4.1 Verlegung der Pflastersteine

Die Verlegung der Pflastersteine wurde im Ellenbogenverband auf einer abgezogenen Bettung durchgeführt. Je nach herzustellender Prüffläche wurden bei der Verlegung zur Erzielung der notwendigen Fugenbreite gemäß Prüfplan (Anhang B) Fugenkreuze (Anhang A5) mit den Breiten von 4, 6, 8 und 10 mm eingesetzt. Ein Fugenkreuz ist beispielhaft in Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45: Beispielhaft eingesetztes Fugenkreuz

Die ungebunden verlegten Pflastersteine wurden nicht für jede Prüffläche aufgenommen und neu verlegt. Die Pflastersteine wurden je nach Art der Prüfflächen aufgenommen und wiederverlegt bzw. durch neue ersetzt, wenn vom Ablauf her die Herstellung der Prüfflächen abgeschlossen war. Aufnehmen und Wiederverlegen der Steine und damit verbunden die Erneuerung des Bettungsmaterials wurde bei nachstehenden Prüfflächen durchgeführt:

- Vor Errichtung der Prüfflächen Nr. 1.1 bis 6.1, 7.2.
- Vor Errichtung der Prüfflächen Nr. 1.4 bis 6.4 sowie 7.4.1.
- Vor Errichtung der Prüfflächen Nr. 1.5 bis 7.5.
- Vor Errichtung der Prüfflächen Nr. 1.6 bis 7.6.

### 3.4.2 Durchführung der Verfugung

Das Fugenmaterial wurde auf die Prüfflächen aufgebracht und je nach Prüfflächen Nr. und Prüfplan (Anhang B) eingebaut.

### 3.4.3 Verdichtung der Prüfflächen

Als Verdichtungsgerät wurde eine Rüttelplatte DPS1850Hb der Firma Wacker Neuson (Anhang A7) als so genannter Schleppschwinger, ausschließlich vorwärts laufend, verwendet. Weiterhin wurde eine Rüttelplatte DPU4545He als reversible Rüttelplatte der Firma Wacker Neuson (Anhang A8) eingesetzt. Je Verdichtungsverfahren wurden die Flächen in drei Übergängen befahren. Einige Kenndaten der Rüttelplatten sind in der Tabelle 4 aufgeführt. Beide Rüttelplatten werden durch Verwendung einer Plattengleitvorrichtung eingesetzt.

Tabelle 4: Darstellung einiger Kenndaten der verwendeten Rüttelplatten

Beschreibung	DPS1850Hb	DPU4545He
[1]	[2]	[3]
Fahrtrichtung	Vorwärts	Vorwärts und rückwärts
Betriebsgewicht [kg]	114	423
Zentrifugalkraft [kN]	18	45
Grundplattengröße [B x L in mm]	500 x 600	440 x 900
Arbeitsbreite [mm]	500	600

## 3.5 Untersuchungen an den Prüfflächen

### 3.5.1 Bestimmung Wassergehalt des Fugenmaterials beim Einbau

Zur Beurteilung des Einflusses des Wassergehaltes beim Einbau bzw. Verdichtungsverfahren der ungebundenen Pflasterdecke wurde je Prüffläche an den in der Abbildung 46 farblich markierten Steinen mit Halbrundungen (grün, blau, gelb, rot, braun, violett, grau, orange) jeweils Fugenmaterial aus den Halbrundungen entnommen und der Wassergehalt bestimmt. In Abbildung 43 sind die Halbrundungen ebenfalls dargestellt.

Um den Wassergehalt des Fugenmaterials beim Verdichtungsverfahren bzw. Einschlämmverfahren zu bestimmen, wird das Fugenmaterial aus Halbrundungen entnommen. Für die Probenahme wäre andernfalls die Entnahme von Pflastersteinen erforderlich, um Fugenmaterial aus der Fläche entnehmen zu können. Von dieser Variante wurde Abstand genommen, weil hierdurch große Zeit- und Qualitätsverluste bei der Probenahme (insbesondere wegen der zeitnahen Probenahme nach der Verdichtung) zu verzeichnen wären. Zudem kann nicht sichergestellt werden, dass die entsprechende Fugenqualität beim Ausbau der

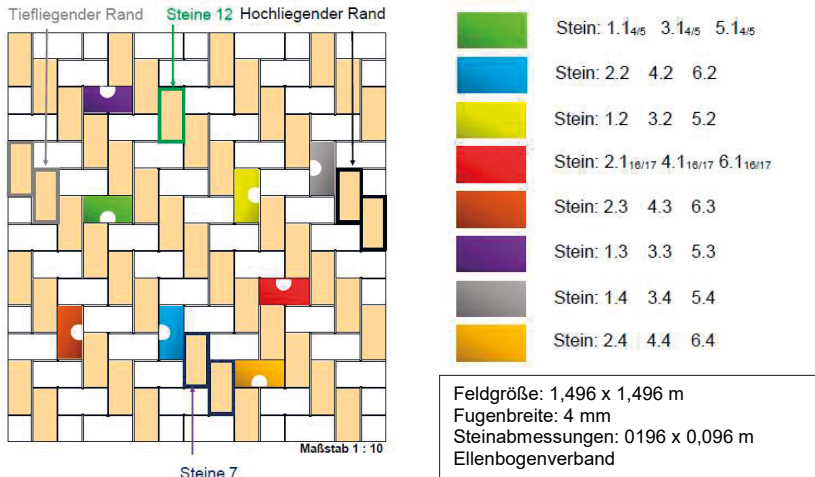


Abbildung 46:  
Schematische Darstellung der entnommenen Proben des Fugenmaterials  
zur Bestimmung des Wassergehaltes

Pflastersteine noch vorhanden ist. Etwaige Auflockerungen bei der Entnahme von Pflastersteinen können sich ggf. auch auf angrenzende Fugen, welche noch zu prüfen sind, negativ auswirken.

Die Ermittlung des Wassergehaltes wird nach DIN EN 1097-5 durchgeführt. Die in Abbildung 46 bezeichneten Steine beziehen sich auf die nummerierten Steine zur Nachvollziehbarkeit der Probenahme des Fugenmaterials. Maßgebend ist die nachstehende Formel (DIN EN 1097-5) für die Berechnung des Wassergehaltes:

$$W = \frac{[(M_1 + M_2) - (M_3 + M_2)]}{M_3} \times 100 \quad [\text{Formel 3}]$$

$M_1$  Masse der Messprobe [g]

$M_2$  Gewicht Behälter [g]

$M_1 + M_2$ : Masse der feuchten Messprobe + Masse Behälter [g]

$M_3 + M_2$ : Masse der trockenen Messprobe + Masse Behälter [g]

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Wassergehalte werden im Kontext der Lagerungsdichte des Fugenmaterials diskutiert. Eine Kontrolle auf Massekonstanz wurde nicht durchgeführt, da zur Beurteilung der hergestellten ungebundenen Verfübung nur wesentliche Unterschiede der Wassergehalte eine Rolle spielen und keine geringfügigen Abweichungen.

Inwiefern abweichende Wassergehalte bei Probenahme aus den Halbrundungen (Abbildung 46) und aus den vertikalen quaderförmigen Fugenquerschnitten vorhanden sind, wird nicht untersucht. Es wird angenommen, dass beim Wassergehalt aufgrund der Korngrößenverteilung des Materials im Fugenquerschnitt unerhebliche Abweichungen vorliegen. Die ermittelten Wassergehalte bei Probenahme aus den Halbrundungen sollen aufzeigen, welche wesentlichen Unterschiede der Lagerungsdichte des Fugenmaterials bei den einzelnen Prüfflächen erzielt werden können.





Abbildung 47:  
Proben vom Fugenmaterial der Prüfflächen Nr. 1.5.1, 2.5.1 und 3.5.1 sowie Bettungsmaterial aus  
Prüffläche Nr. 1.5.1 und 2.5.1 zur Bestimmung des Wassergehaltes

Abbildung 47 zeigt beispielhaft entnommene Proben vom Fugen- und Bettungsmaterial zur Bestimmung des Wassergehaltes.

### 3.5.2 Bestimmung der Lagerungsdichte des Fugenmaterials

Bei verschiedenen Forschungsprojekten (Shackel, 1996; Koch, 1999 und Ascher, Lerch & Wellner, 2007) wurden Untersuchungen an ungebundenen Pflasterdecken durchgeführt. Hierbei wurde auf die Qualität und Relevanz der ungebundenen Fuge hingewiesen. Die Lagerungsdichte des ungebundenen Fugenmaterials wurde nicht bestimmt. Es wurde nur (bei ungebundenen Pflasterdecken unter Verwendung verschiedener Pflastersteine und Fugenmaterialien) bei visuell scheinbar gefüllter Fuge untersucht, welcher horizontale und vertikale Verschiebewiderstand vorliegt. Die Beurteilung von eingebautem ungebundenem Fugenmaterial konnte nur visuell durchgeführt werden. Es kann nur durch Entnahme eines Pflastersteins festgestellt werden, ob Fugenmaterial über den gesamten Fugenquerschnitt vorhanden ist oder ob ggf. Hohlräume und somit nicht vollständig gefüllte Fugen vorliegen (vgl. Abbildung 27 und 28). Visuell vollständig gefüllte Fugen geben noch keinen Hinweis auf die Anfangsstabilität bzw. Lagerungsdichte des Fugenmaterials im eingebauten Zustand. Aus diesem Grund soll unter Berücksichtigung der verschiedenen Prüfflächen in der vorliegenden Arbeit festgestellt werden, ob unterschiedliche Einbauqualitäten zu unterschiedlichen Anfangsstabilitäten bzw. Lagerungsdichten des ungebundenen Fugenmaterials führen. Es wird dafür erstmalig eine Prüfmethode zur Beurteilung der Lagerungsdichte von ungebundenem Fugenmaterial eingesetzt. Die dafür angewendete Prüfmethode wird in Abschnitt 3.5.2.1 näher erläutert.

#### 3.5.2.1 Prüfgerät Fugensonde

Um zu überprüfen, ob eine unterschiedliche Fugenqualität (Anfangsstabilität einer ungebundenen Fuge bzw. Lagerungsdichte des Fugenmaterials) in Abhängigkeit vom Wassergehalt und Verdichtungsvorgang unmittelbar nach dem Verdichtungsvorgang zu verzeichnen ist, wird eine innovative Prüfmethode eingesetzt. Es wird eine eigens neu entwickelte Fugensonde gemäß Abbildung 48 verwendet.





Abbildung 48:  
Fugensonde auf einer Prüffläche

Nach Möller (2007) gilt: *Bei Sondierungen werden Sonden in der Regel lotrecht in den Boden eingerammt bzw. eingedrückt oder, nach Eintrieb in den Boden, um ihre Längsachse gedreht. Ermittelt werden ausschließlich Kenngrößen der dabei auftretenden Widerstände, die der Boden gegen das Eindringen bzw. die Drehung der Sonden entwickelt; eine Entnahme von Bodenproben oder eine Besichtigung des Bodens findet nicht statt. Die gemessenen Widerstände (auch „Sondierwiderstände“ genannt) dienen, z.B. in Verbindung mit Bohrerergebnissen, zur besseren Bestimmung der Bodeneigenschaften. Dies gilt insbesondere für nicht bindige Böden, da diese in aller Regel nur Probeentnahmen geringerer Qualität erlauben. Darüber hinaus ist es vor allem mit Rammsondierungen möglich, die Lage der Grenzen von Schichten mit stark unterschiedlichen Eindringwiderständen schnell und preisgünstig zu erfassen. Das gilt auch für die Überprüfung des Erfolgs von Verdichtungsmaßnahmen, wenn vor und nach der Maßnahme gemessene Eindringwiderstände verglichen werden.*

*Als indirekte Aufschlussverfahren des Baugrunds sind Sondierungen grundsätzlich nur in Verbindung mit direkten Aufschlüssen (z.B. Bohrungen) durchzuführen, da die alleinige Kenntnis der Sondierwiderstände keine eindeutigen Angaben zur Bodenart und zu Kenngrößen, wie z.B. der Lagerungsdichte erlaubt.*

*Bei einer Rammsondierung wird eine Sonde mittels eines Rammhämmer bei gleichbleibender Fallhöhe in den zu untersuchenden Boden gerammt. Gemessen wird die Anzahl der Schläge N10 (bei DPL, DPM und DPH) bzw. N20 (bei DPSH-A und DPSH-B), die für eine Eindringtiefe von jeweils 10 bzw. 20 cm erforderlich sind.*

*Die Sondenspitzendurchmesser  $D$  der Rammsonden DPL, DPM, DPH, DPSH-A und DPSH-B sind durchweg größer als die Durchmesser der anschließenden Gestänge.*

Aufgrund der geringen Fugenbreiten ungebundener Pflasterdecken und Plattenbeläge wird eine Sondiernadel mit einem Durchmesser von 2 mm eingesetzt. Um die Stabilität der Sondiernadel in Verbindung mit der Knickgefahr zu minimieren, wird diese Sondiernadel verwendet, da das in die Fuge eindringende Element (Sondiernadel) keinen kleineren Durchmesser als die Sondierspitze besitzt.

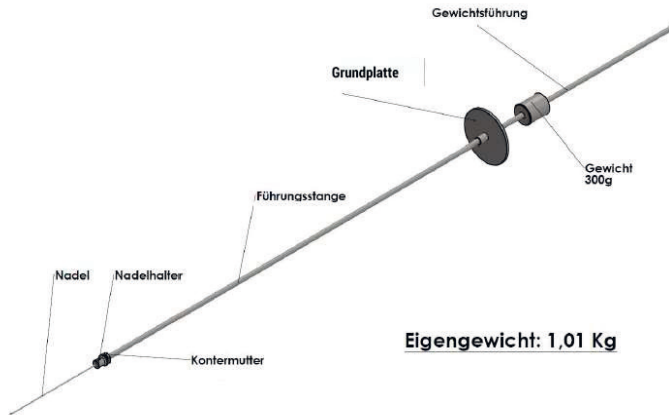


Abbildung 49:  
Schematische Darstellung der maßgeblichen Prüfvorrichtung

Abweichend zur Auswertung von Rammsondierungen wird aufgrund der geringen Dicke von Pflastersteinen und Platten die Eindringtiefe der Sondiernadel pro ausgeführtem Schlag bzw. Stoß (auf die Grundplatte) gemessen und aus der Anzahl der Schläge bzw. Stöße und der Gesamteindringtiefe ein Mittelwert berechnet.

Die Fugensonde wird auf den Boden aufgebracht und durch drei Füße, die horizontal und vertikal verstellbar sind, fixiert. Zur Stabilisierung sind diese Füße auf einer Grundplatte angebracht. Die Grundplatte besitzt zur Mitte hin größere Öffnungen, damit beim Aufbauen des Gerätes die in die Fuge einzuführende Sondiernadel sichtbar ist und entsprechend über der Fuge positioniert werden kann. Zur Stabilisierung der Fugensonde und des Leerrohres werden drei Flügelpplatten befestigt, die runde Ausbohrungen haben.

Die Fugensonde wird zu Beginn der Messung ausgerichtet. Sie wird im Gefälle der Fläche auf die Prüffläche aufgestellt, damit die Fugensondennadel vollständig -parallel zur Steinseitenfläche- in die Fuge eingebracht werden kann. Bei nicht sachgerechter Ausrichtung der Fugensonde kann keine fehlerfreie Messung durchgeführt werden, da ansonsten die Sondiernadel auf die Seitenfläche des Steines trifft.

An jeder Prüffläche werden an definierten Messstellen jeweils 20 Fugensondierungen durchgeführt. Bei der Fugensonde ist über eine Führungsslange eine Fugensondennadel mit einem Durchmesser von 2 mm mit einer angeschliffenen Spitze gemäß Abbildung 49 befestigt.

Die Fugensondennadel wird über die an der Führungsslange befindliche Grundplatte durch Auftreffen eines Gewichtes von 300 g aus einer definierten Fallhöhe von 30 cm belastet. Das Gewicht wird so oft angehoben und fallen gelassen, bis über eine elektronische Datenaufnahme nachgewiesen werden kann, dass die Nadel die Fuge vollständig durchdrungen hat. Die Eindringtiefe je Schlag (d.h. Gewicht fällt auf die Grundplatte) wird aufgezeichnet.

Zur Bestimmung der Aufprallgeschwindigkeit des Gewichtes auf der Grundplatte ist die potentielle Energie zu ermitteln. Diese berechnet sich wie folgt<sup>10</sup>:

$$W_{\text{POT}} = m \times g \times h \quad [\text{Formel 4}]$$

$W_{\text{POT}}$ : Potentielle Energie in Newton-Meter [Nm]

$m$ : Masse des Körpers, der gehoben wird, in Kilogramm [kg]:  $m = 0,30$

$g$ : Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]:  $g = 9,81$

$h$ : Höhe, um die das Objekt angehoben wird, in Meter [m]:  $h = 0,30$

$$W_{\text{POT}} = 0,30 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,30 \text{ m} = 0,883 \text{ kgm}^2/\text{s}^2 = 0,883 \text{ Nm}$$

Unter Berücksichtigung der berechneten potentiellen Energie kann unter Betrachtung der Formel für die kinetische Energie die Aufprallgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Formel<sup>10</sup> für die kinetische Energie lautet:

$$W_{\text{KIN}} = 0,5 \times m \times v^2 \quad [\text{Formel 5}]$$

$W_{\text{KIN}}$ : Kinetische Energie in Newton-Meter [Nm]

$v$ : Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde [m/s]

$$W_{\text{KIN}} = 0,883 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$$

$$m = 0,30 \text{ kg}$$

$$v = \sqrt{(2 \times W_{\text{Kin}}) / m} \quad [\text{Formel 6}]$$

$$v = \sqrt{\left(2 \times \frac{0,883 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}}{0,30} \text{ kg}\right)}$$

$$\rightarrow v = 2,43 \text{ m/s}$$

Die Aufprallgeschwindigkeit des Gewichtes auf der Grundplatte beträgt  $v = 2,43 \text{ m/s}$ .

Zu Beginn der Durchführung der Fugensondierungen wird die Fugensondennadel auf eine Metallplatte aufgelegt. Anschließend wird der Abstand zwischen Laser und Grundplatte bestimmt. Als nächstes wird die Fugensondennadel durch das Eigengewicht der Prüfvorrichtung, bestehend aus

- Nadel
- Nadelhalter und Kontermutter,
- Führungsstange,
- Grundplatte,
- Gewichtsführung und
- Gewicht

auf die sichtbar gefüllte Fuge bzw. auf das Fugenmaterial in einer offenen Fuge aufgesetzt und losgelassen. Die Fugensondennadel dringt über den Spitzendruck in das ungebundene Fugenmaterial ein. Es wird eine erneute Messung zwischen Laser und Grundplatte vorgenommen. Der ermittelte Wert ist das Eindringen durch Eigengewicht in das ungebundene Fugenmaterial. Der nächste Arbeitsschritt ist der Beginn der eigentlichen Messung, in dem das Gewicht bis zur Oberkante der Prüfvorrichtung (definierte Fallhöhe von 30 cm) angehoben und auf die Grundplatte fallen gelassen wird. Die Reibungsverluste zwischen Gewicht

<sup>10</sup> <https://www.fersch.de/pdfdoc/Physik.pdf>

und Gewichtsführung sowie zwischen Führungsstange und Linearlager werden vernachlässigt. Nach jedem Aufprall des Gewichtes auf die Grundplatte wird der Abstand zwischen Laser und Grundplatte ermittelt. Dieser Vorgang wird so lange durchgeführt, bis die Fuge vollständig mit der Fugensondennadel durchdrungen ist.

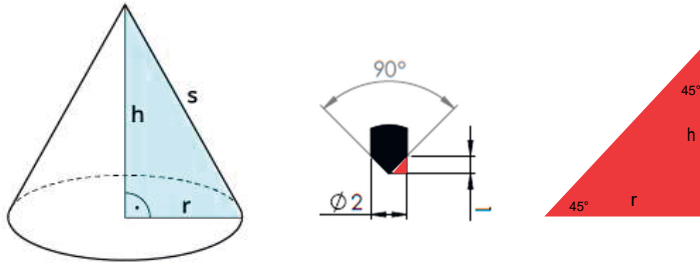


Abbildung 50:

Schematische Darstellung eines Kegels zur Bestimmung der Mantelfläche der Fugensondenspitze (links), das rechtwinklige gleichschenklige Dreieck der Fugensondenspitze ist mit einer roten Markierung sichtbar (Mitte), das rechtwinklige gleichschenklige Dreieck vergrößert dargestellt (rechts)

Um die Kraft bestimmen zu können, die unmittelbar durch das Eigengewicht auf das Fugenmaterial wirkt, ist die Mantelfläche (Abbildung 50) der Fugensondenspitze als Mantelfläche eines Kegels zu bestimmen. Zur Bestimmung der Mantelfläche ist unter Berücksichtigung der Abbildung 50 der Satz des Pythagoras<sup>11</sup> anzusetzen mit:

$$s^2 = r^2 + h^2 \quad \text{[Formel 7]}$$

s: Mantellinie des Kegels in Millimeter [mm]

r: Radius des Kegels in Millimeter [mm]:  $r = 1 \text{ mm}$

h: Höhe des Kegels in Millimeter [mm]:  $h = 1 \text{ mm}$

also gilt  $s = \sqrt{r^2 + h^2}$  somit ergibt sich für die Mantelfläche<sup>11</sup>

$$A_M = \pi \times r \times \sqrt{r^2 + h^2} \quad \text{[Formel 8]}$$

$A_M$ : Mantelfläche der Fugensondenspitze in Quadratmillimeter [mm<sup>2</sup>]

$\pi$ : Pi als Zahlenwert

$$A_M = \pi \times 1 \times \sqrt{1^2 + 1^2} = 4,44 \text{ mm}^2$$

Somit ermittelt sich der Spitzendruck<sup>12</sup> durch Eigengewicht der Fugensondennadel auf:

$$F = m \times g \quad \text{[Formel 9]}$$

m: Eigengewicht der Prüfvorrichtung in Kilogramm [kg]:  $m = 1,01$

g: Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]  $g = 9,81$

F: Kraft durch Eigengewicht der Prüfvorrichtung in Newton [N]

<sup>11</sup> <https://www.kapiert.de/kegel/>

<sup>12</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Kraft>

$$F = 1,01 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,90 \text{ N}$$

Daraus ergibt sich folgender Spitzendruck<sup>12</sup> aus Eigengewicht der Prüfvorrichtung:

$$\sigma = F / A_M$$

[Formel 10]

F: Kraft durch Eigengewicht der Prüfvorrichtung in Newton [N]:  $F = 9,90$

$A_M$ : Mantelfläche der Fugensondenspitze in Quadratmillimeter [mm²]:  $A_M = 4,44$

$\sigma$ : Druckspannung der Fugensondenspitze in Newton pro Quadratmillimeter [N/mm²]

$$\sigma = 9,90 \text{ N} / 4,44 \text{ mm}^2 = 2,23 \text{ N/mm}^2$$

Der Spitzendruck aufgrund des Eigengewichtes der Prüfvorrichtung beträgt 2,23 N/mm².

Nach der Ermittlung der Eindringtiefe durch das Eigengewicht der Prüfvorrichtung wird mit dem Anheben und Fallenlassen des Gewichts begonnen. Zu dem berechneten Spitzendruck aus dem Eigengewicht der ruhenden Prüfvorrichtung kommt anschließend die Aufprallkraft des Gewichts auf die Grundplatte hinzu.

Das Thema hinsichtlich der Aufprallzeit für den senkrechten Anprall nahezu starrer Körper ist beim Einsatz von Dämpferbeton zur Minderung von Stoßbeanspruchungen beschrieben (Falkner, H.; Teutsch M., 1998). Es wird hier an zwei verschiedenen Arten von durchgeführten vertikalen Fallversuchen unter Betrachtung der Aufprallgeschwindigkeit die Aufprallzeit in Verbindung mit dem Eindringweg beschrieben. Bei Betrachtung der umfangreichen Versuche und dem dargestellten Rechenmodell ergibt sich eine Aufprallzeit in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit. Bei der ermittelten Aufprallgeschwindigkeit von  $v = 2,43 \text{ m/s}$  des Fallgewichts auf die Grundplatte kann unter Betrachtung des großen Fallversuches eine Aufprallzeit ab 0,015 Sekunden angesetzt werden. Die hier angenommene Aufprallzeit  $t = 0,1 \text{ Sekunden}$  dient der groben Einschätzung der durch das Fallenlassen des Gewichtes auf die Sondierspitze wirkenden Kräfte. In Abbildung 51 ist der unterschiedliche Spitzendruck in Abhängigkeit von der Aufprallzeit dargestellt. Die hier angenommene Aufprallzeit von  $t = 0,015 \text{ Sekunden}$  bis zu dargestellten Aufprallzeit von 0,1 Sekunden zeigt die auftretenden Spitzendrücke in Abhängigkeit der unterschiedlichen Aufprallzeiten. Bei einer Aufprallzeit von 0,015 Sekunden wirkt auf das ungebundene Fugenmaterial ein Spitzendruck von 10,95 N/mm².

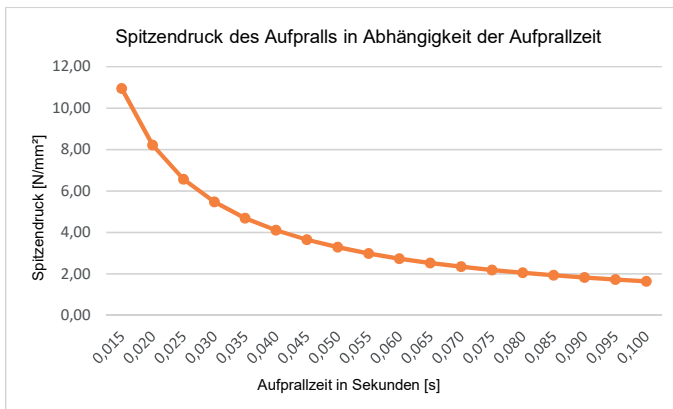


Abbildung 51:  
Darstellung des Spitzendruck der Sondiermadel beim Aufprall des Gewichtes  
in Abhängigkeit von der Aufprallzeit

Wird nun die längere Aufprallzeit von 0,1 Sekunden angesetzt, so beläuft sich der Spitzendruck auf 1,64 N/mm<sup>2</sup>. Die Berechnung wird im Folgenden am Beispiel der Aufprallzeit  $t = 0,1$  Sekunden erstellt. Bei Inaugenscheinnahme der Tabelle 2 (mit den Druckspannungen) können allein schon durch das Eigengewicht der Prüfvorrichtung und durch die eigentliche Prüfung durch Fallenlassen des Gewichtes auf die Grundplatte aus technischer Perspektive Rückschlüsse auf die Standfestigkeit einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages gezogen werden. Je höher die Eindringtiefen der Fugensondierungsnadel, desto größer ist auch das Ausweichpotential der Fugenfüllung und damit die Bewegungsmöglichkeit der Steine. Geringe Eindringtiefen deuten auf einen hohen Verschiebewiderstand hin, wohingegen hohe Eindringtiefen unter Berücksichtigung der eingetragenen Lasten auf mögliche Verformungen hindeuten.

Zur Ermittlung der Aufprallkraft wird vorerst der Impuls<sup>10</sup> berechnet.

$$p = m \times \sqrt{(2 \times W)/m} \quad [\text{Formel 11}]$$

p: Impuls [kgm/s]

W<sub>KIN</sub>: Kinetische Energie in Newton-Meter [Nm]: W<sub>KIN</sub> = 0,883

m: Masse des Körpers, der gehoben wird, in Kilogramm [kg]: m = 0,30

$$p = 0,30 \times \sqrt{(2 \times \frac{0,883 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}}{0,30} \text{ kg})}$$

$$\rightarrow p = 0,729 \text{ kgm/s}$$

Unter Berücksichtigung des berechneten Impulses ist zur Ermittlung der Aufprallkraft auf die Grundplatte nachstehende Formel<sup>13</sup> anzuwenden:

$$F = p/t \quad [\text{Formel 12}]$$

F: Aufprallkraft in Newton [N]

p: Impuls [kgm/s]: p = 0,729

t: Aufprallzeit in Sekunden [s]: t = 0,1

$$F = 0,729 \text{ kg/ms} / 0,1 \text{ s} = 7,29 \text{ N}$$

Aus der bestimmten Aufprallkraft ergibt sich folgender Spitzendruck aus einem Aufprall des Gewichtes auf der Grundplatte:

$$\sigma = F / A_M \quad [\text{Formel 10}]$$

F: Aufprallkraft in Newton [N]: F = 7,29

A<sub>M</sub>: Mantelfläche der Fugensondenspitze in Quadratmillimeter [mm<sup>2</sup>]: A<sub>M</sub> = 4,44

σ: Druckspannung Fugensondenspitze in Newton pro Quadratmillimeter [N/mm<sup>2</sup>]

$$\sigma = 7,29 \text{ N} / 4,44 \text{ mm}^2 = 1,64 \text{ N/mm}^2$$

Der Spitzendruck aufgrund des Aufpralls des Gewichtes auf die Grundplatte beträgt 1,64 N/mm<sup>2</sup>. Dieser berechnete Spitzendruck variiert maßgeblich bei einer Veränderung der Aufprallzeit.

<sup>13</sup> <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/kraftstoss-und-impuls>

Die hier erstellten Berechnungen zeigen die rechnerische Krafteinwirkung der Fugensondennadel auf ungebundenes Fugenmaterial. In welchem Verhältnis der Eindringwiderstand vom Spitzendruck und/oder der Mantelreibung der Sondiernadel steht, wird nicht näher untersucht. Die Fugensondennadel besitzt einen geringen Durchmesser von 2 mm. Die sich aufgrund der Mantelfläche ergebende Reibung hängt davon ab, wie groß die Oberfläche des Gesteinskornes/der Gesteinskörner ist, welches/welche einen Kontakt zur Mantelfläche besitzt/besitzen.

Die Bewertung der Lagerungsdichte des Fugenmaterials wird über die durch die Fugensondierung erzeugten Messwerte erarbeitet.

### 3.5.2.2 Ergebnisse der Fugensondierungen

#### 3.5.2.2.1 Allgemeine Erläuterungen

Die Fugensondierungen werden nach Erstellung der Prüfflächen jeweils an identischen Sondierstellen durchgeführt. Je Prüffläche werden 20 Sondierungen vorgenommen. Die Lage der Sondierstellen sind in Abbildung 52 dargestellt.

Die einzelnen Sondierstellen haben von jeder Seite bis zum Rand der Prüffläche einen Mindestabstand von mehr als  $\geq 30$  cm, um den Einfluss der Verdichtungsfähigkeit des Randbereiches nahezu ausschließen zu können. Zudem werden aufgrund des gewählten Ellenbogenverbandes unterschiedliche Arten von Fugen geprüft.

Die Stabilität einer ungebundenen Pflasterdecke und eines ungebundenen Plattenbelages hängen zudem von der Art der Steinseitenflächen ab. Mentlein (2014) führt verschiedene Reibungskoeffizienten zwischen Bettung und Stein auf. Hierbei ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass bei Betonsteinen Art, Anzahl und Abmessungen der Abstandshalter eine wichtige Rolle spielen, da Fugentaschen gemäß Metzging & Saathoff (2018) vollständig zu füllen sind. Die Füllung dieser Fugentaschen hängt im Wesentlichen von dem verwendeten Fugenmaterial und von der Art der Einbringung des Fugenmaterials ab. Weitere Faktoren sind die Steinhöhe. Ebenfalls hat die Körnung des Kernbetons und des Vorsatzbetons bei zweischichtigen Steinen einen Einfluss.

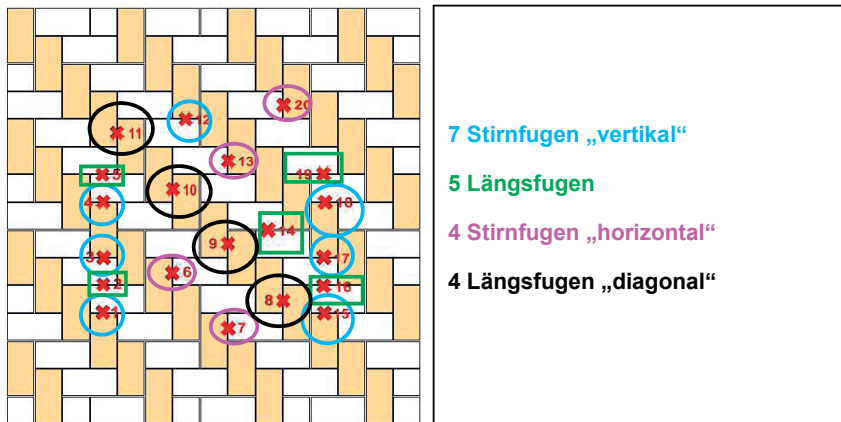


Abbildung 52:  
Darstellung der Sondierstellen jeder Prüffläche

Der Wasserzementwert spielt bei der Herstellung von Betonsteinen eine Rolle, da dadurch mehr oder weniger offene Poren an den Steinseitenflächen entstehen, die eine Verzahnung möglicherweise begünstigen oder benachteiligen. Bei Natursteinen spielen im Vergleich zu Betonsteinen weitere Faktoren eine Rolle. So hängt es davon ab, ob es sich um magmatische Gesteine, Sedimentgesteine oder um metamorphe Gesteine (Allgemeine Geologie, 2003) handelt. Je nach Mineraliengröße kann es auch hier zu unterschiedlichen Verzahnungen von Fugenmaterial und Steinseitenflächen kommen. Ein weiterer Faktor ist hier auch die Rauigkeit der Seitenflächen. Sind beispielsweise gebrochene Seitenflächen oder gesägte (bearbeitete/unbearbeitete) Seitenflächen vorhanden? Hier erzeugen unterschiedliche Bearbeitungsarten unterschiedliche Verzahnungen vom ungebundenen Fugenmaterial.

Da derartig viele Einflussfaktoren bei Betonsteinen eine Rolle spielen können, diese erfahrungsgemäß in der Praxis nicht beherrschbar sind, wird sich im Rahmen der Auswertung auf Untersuchungen des Fugenmaterials an sich und auf den Wassergehalt beim Einbau des Fugenmaterials in Verbindung mit der Fugenbreite konzentriert. Der Wassergehalt spielt bei der Verdichtung eine zentrale Rolle, um die innere Reibung des Fugenmaterials und die Reibung zwischen Fugenmaterial und Steinseitenflächen zu reduzieren und somit eine größtmögliche Lagerungsdichte bei der Herstellung zu erzielen. Die Festlegung dieser Komponenten soll dazu dienen, die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis umsetzen zu können. Die ausgewählten Parameter können bei der Bauausführung in der Praxis variiert werden.

Im Rahmen der Erstellung der Prüfflächen werden nach dem Einbau Proben vom Fugen- und Bettungsmaterial genommen, um die Korngrößenverteilungen nach DIN EN 933-1 zu bestimmen. Es ist möglich, bei der Probenahme eine gemischte Probe -wie dies bei einer Lieferkörnung aus dem Haufwerk entnommen wird- zu wählen. Wird bei der Probenahme einer eingebauten Bettungsschicht eine gemischte Probe (aus der gesamten Schichtdicke) entnommen, können wesentliche Faktoren für die Bewertung des eingebauten Fugen- und Bettungsmaterial negativ beeinflusst werden. Befindet sich beispielsweise eine verhärtete/verschlämmte/ zermahlene Schicht im oberen Bereich (in den oberen Millimetern) der Bettung, so spielt die Zusammensetzung im unteren Bereich eine eher untergeordnete Rolle, da vorhandene Feianteile in dem oberen Bereich der Bettungsschicht die Wasserdurchlässigkeit derart reduzieren können, dass allein dies hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit negative Auswirkungen haben kann. Ähnlich verhält es sich beim Fugenmaterial: Sind Feianteile im unteren Fugenbereich vorhanden, so kann gegebenenfalls Wasser in die Fugen eindringen, aber aufgrund einer vorhandenen sogenannten "Sperrschicht" nicht sicher in die und durch die darunter befindlichen Schichten und Materialien abgeführt werden.

#### 3.5.2.2.2 Auswertung der Fugensondierungen

Im Anhang D sind sämtliche ausgeführte Fugensondierungen mit den Auswertungen je Prüffläche dargestellt. Die wesentlichen Faktoren für die Beurteilung der Prüfflächen lauten:

- Fugenbreite
- Fugenmaterial
- Wassergehalt beim Einbau
- Ohne vorgenommene Verdichtung, mit vorgenommener Verdichtung, kleine bzw. große Rüttelplatte

Zur allgemeinen Erläuterung der erstellten Auswertung der durchgeführten Fugensondierungen werden hier Tabellen und Diagramme verschiedener Prüfflächen herangezogen. Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der Messwerte für jede Prüffläche; hier beispielhaft für Prüffläche Nr. 1.1.



Tabelle 5: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.1

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw	StdAbw
S 01	4	1	39,60	60,30	39,60	36,20	39,60	39,60	39,60	
S 02	4	1	43,00	56,90	43,00	38,00	43,00	43,00	43,00	
S 03	4	1	39,90	60,00	39,90	38,30	39,90	39,90	39,90	
S 04	4	1	43,30	56,60	43,30	38,00	43,30	43,30	43,30	
S 05	4	1	33,10	66,80	33,10	38,70	33,10	33,10	33,10	
S 06	4	1	34,90	65,00	34,90	39,00	34,90	34,90	34,90	
S 07	4	1	33,40	66,50	33,40	41,00	33,40	33,40	33,40	
S 08	4	1	18,50	81,40	18,50	40,60	18,50	18,50	18,50	
S 09	4	2	54,40	45,50	31,90	22,50	31,90	27,20	22,50	6,65
S 10	4	1	66,20	33,70	66,20	37,10	66,20	66,20	66,20	
S 11	4	1	68,20	31,70	68,20	37,70	68,20	68,20	68,20	
S 12	4	2	55,60	44,30	45,40	10,20	45,40	27,80	10,20	24,89
S 13	4	1	59,70	40,30	59,70	36,90	59,70	59,70	59,70	
S 14	4	1	54,00	45,90	54,00	31,40	54,00	54,00	54,00	
S 15	4	1	30,10	69,80	30,10	36,60	30,10	30,10	30,10	
S 16	4	1	59,50	40,40	59,50	16,60	59,50	59,50	59,50	
S 17	4	1	61,80	38,10	61,80	38,30	61,80	61,80	61,80	
S 18	4	1	24,80	75,10	24,80	30,40	24,80	24,80	24,80	
S 19	4	1	40,80	59,10	40,80	30,90	40,80	40,80	40,80	
S 20	4	2	53,80	46,10	36,00	17,80	36,00	26,90	17,80	12,87

Die einzelnen Spalten der Tabelle 5 werden wie folgt erläutert:

- [Messstelle]: Lfd.-Nr. der durchgeführten Fugensondierung.
- [Fugenbreite]: Gemessene Fugenbreite bei der jeweiligen Fugensondierung.
- [Anzahl]: Anzahl des definierten Aufpralls des Gewichts auf die Grundplatte, bis die Sondiernadel die Fuge von der Oberkante Belag bis zur Unterkante Stein durchdrungen hat.
- [Sondiertiefe]: Verbleibende Fugenhöhe (= i.d.R. Steindicke abzgl. der Fugenvertiefung), die sondiert werden kann.
- [FugV]: Fugenvertiefung: Der gemessene Wert, den die Sondiernadel nur durch Eigengewicht in die Fuge eingedrungen ist; wobei hier auch etwaige Fugenvertiefungen (fehlendes Fugenmaterial) enthalten sind.
- [Wert 1]: Der gemessene Wert nach dem Beginn der Sondierung (Erste Sondierung nach dem ersten Aufprall des Gewichts).
- [Wert 2.]: Der gemessene Wert nach der zweiten Sondierung (Messung nach dem zweiten Aufprall des Gewichts).
- [Höchstw.]: Größter gemessener Wert der Eindringtiefe aller Sondierungen an einer Messstelle/ Sondierung.
- [Mittelw.]: Mittelwert aller Sondierungen (Sondiertiefe/Anzahl Fugensondierungen je Messstelle).
- [Niedrigstw.]: Kleinster gemessener Wert der Eindringtiefe aller Sondierungen an einer Messstelle/ Sondierung. Bei negativen Werten handelt es sich um eine Reflexion ("Rückprall der Nadel") bis z.B. eine grobe Gesteinskörnung durchschlagen wurde.
- [StdAbw.]: Standardabweichung aller Sondierungen bei einer Messstelle/Sondierung.

Die Standardabweichung<sup>14</sup> ist ein Maß dafür, wie weit die jeweiligen Werte um den Mittelwert streuen. Die Standardabweichung ermittelt sich wie nachfolgend aufgeführt. Vorerst ist das arithmetische Mittel der Messungen zu bestimmen. Dieses berechnet sich wie folgt<sup>15</sup>:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \quad \text{[Formel 13]}$$

$\bar{x}$ : Arithmetisches Mittel  
 $\Sigma$ : Summe aller Messungen  
 $n$ : Anzahl der Messungen  
 $i$ : Werte der Einzelmessung

Mit dem arithmetischen Mittel kann die Standardabweichung bestimmt werden.

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{[Formel 14]}$$

$\bar{s}$ : Standardabweichung  
 $\bar{x}$ : Arithmetisches Mittel  
 $n$ : Anzahl der Messungen  
 $i$ : Werte der Einzelmessung

Die ermittelte Standardabweichung ergibt die durchschnittliche Abweichung bei jeder durchgeführten Messung. Beispielhaft wird hier die Standardabweichung bei der Sondierstelle S09 mit  $n = 2$  dargestellt:

$X_1 = 31,90$

$X_2 = 22,50$

Daraus berechnet sich das arithmetische Mittel.

$$\bar{x} = \frac{1}{2} (31,90 + 22,50) = 27,20$$

Unter Berücksichtigung der Berechnung des arithmetischen Mittels lässt sich nun die Standardabweichung bestimmen:

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{2-1} [(31,90 - 27,20)^2 + (22,50 - 27,20)^2]} = 6,65$$

Die Standardabweichung bei Sondierstelle S09 beträgt 6,65.

Die folgenden Auswertungen werden über alle Messstellen hinweg durchgeführt.

### **Diagramm 1: Das Balkendiagramm zeigt die mittlere Eindringtiefe der Fugensondierung aller Messstellen bzw. Sondierstellen je Prüffläche.**

Es wird je hergestellte Prüffläche die mittlere Eindringtiefe aller Messstellen/Sondierstellen dargestellt. Hierzu ist das Balkendiagramm für Prüffläche 1.1 in Abbildung 53 zu betrachten.

<sup>14</sup> <https://support.office.com/de-de/article/stabw-funktion-51fecaaa-231e-4bbb-9230-33650a72c9b0>,  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Stichprobenvarianz\\_\(Sch%C3%A4tzfunktion\)#Standardabweichung](https://de.wikipedia.org/wiki/Stichprobenvarianz_(Sch%C3%A4tzfunktion)#Standardabweichung)

<sup>15</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Mittelwert>

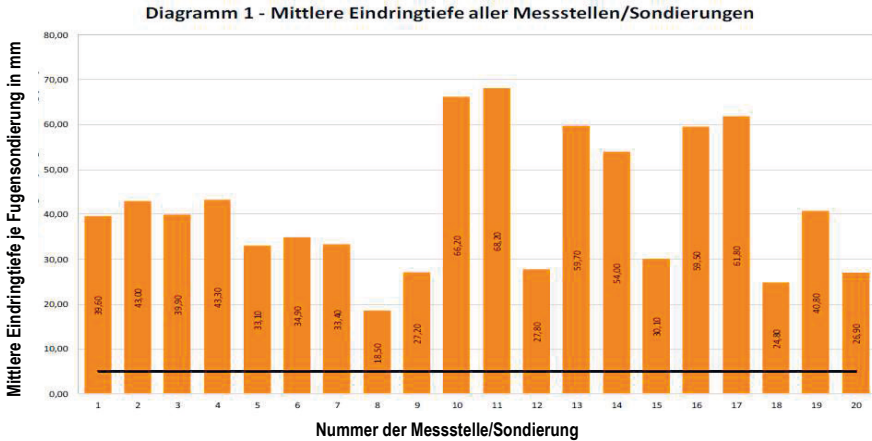


Abbildung 53:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.1

Auf der Ordinate Achse ist die mittlere Eindringtiefe je Fugensondierung in mm dargestellt. Auf der Abszisse sind die Nummern der einzelnen Messstellen aufgeführt. Die im Diagramm 1 befindliche horizontale schwarze Linie zeigt eine mittlere Eindringtiefe von 5 mm. Im Anhang E1.7 sind die Mittelwerte an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen aufgeführt. Zudem ist der Gesamt-Mittelwert je Prüffläche über alle 20 Sondierstellen dargestellt (Tabelle 6).

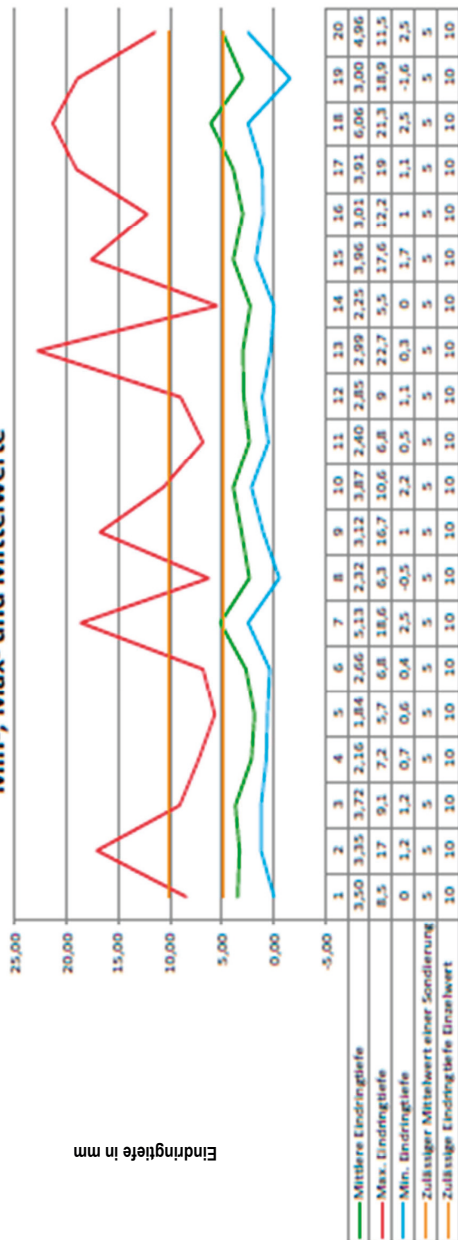
Tabelle 6: Mittelwert über alle 20 Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen

	Prüffläche Nr. 1.4.4	Prüffläche Nr. 2.4.4	Prüffläche Nr. 3.4.4	Prüffläche Nr. 4.4.4	Prüffläche Nr. 5.4.4	Prüffläche Nr. 6.4.4	Prüffläche Nr. 7.5.1
Gesamt- Mittelwert [mm]	2,64	2,21	3,18	3,05	1,53	3,83	4,04
	Prüffläche Nr. 1.5	Prüffläche Nr. 2.5	Prüffläche Nr. 3.5	Prüffläche Nr. 4.5	Prüffläche Nr.5.5	Prüffläche Nr. 6.5	Prüffläche Nr. 7.5
Gesamt- Mittelwert [mm]	5,28	5,23	3,49	6,34	3,50	5,96	3,50

Der Wert der mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird unter Berücksichtigung der hergestellten Prüfflächen Nr. 1.4.4 bis 6.4.4 sowie 7.5.1 und 1.5 bis 7.5 festgelegt. Bei den Prüfflächen Nr. 1.5 bis 7.5 wird die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPS1850Hb mit einem Betriebsgewicht von 114 kg unmittelbar nach dem Einschlämmen durchgeführt. In der Praxis hingegen sind für ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge Rüttelplatten mit einem größeren Betriebsgewicht einzusetzen. Demnach werden für die Festlegung der mittleren Eindringtiefe von 5 mm die Prüfflächen Nr. 1.4.4 bis 6.4.4 sowie 7.5.1 angesetzt, wobei der geringste Mittelwert der Prüffläche Nr. 7.5.1 mit 4,04 mm maßgebend ist und dieser auf den nächsten glatten Zahlenwert von 5 mm aufgerundet wird.

**Diagramm 2: Das Liniendiagramm stellt je Messstelle bzw. Sondierstelle die minimale, maximale und mittlere Eindringtiefe jeder Messstelle/Sondierung dar.**

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nur der Messstelle/Sondierung

Abbildung 54:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 7.4.2 je Sondierstelle dar

In Abbildung 54 sind die Eindringtiefen je Messstelle der Prüffläche Nr. 7.4.2 im Vergleich dargelegt. Auf der Ordinate sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen je Fugensondierung in mm dargestellt. Auf der Abszisse sind die Nummern der einzelnen Messstellen mit den dazugehörigen Messdaten aufgeführt. Das Diagramm zeigt, dass die mittlere Eindringtiefe im Wesentlichen unterhalb von 5 mm liegt (grüne Kurve). Weiterhin zeigt das Diagramm einen Höchstwert der Eindringtiefe von über 20 mm bei Sondierstelle S13 (rote Linie). Bei Sondierung S08 und S19 sind negative Eindringtiefen zu verzeichnen (blaue Linie). Diese negativen Werte schließen auf eine Reflexion einer groben Gesteinskörnung. Das grobe Gesteinskorn wird erst nach ggf. mehrmaligem Fallenlassen des Gewichts durchschlagen, so dass weitere positive Werte beim Eindringen zu verzeichnen sind.

**Diagramm 3: Das Balkendiagramm stellt je Messstelle bzw. Sondierstelle die Fugenvertiefung dar, wobei es sich um den gemessenen Wert handelt, den die Sondiernadel nur durch Eigengewicht erreicht hat. Etwaige Fugenvertiefungen (leere Fugen) sind in diesem Wert enthalten.**

Abbildung 55 zeigt für die Prüffläche Nr. 3.1 die Fugenvertiefung in mm für die Anzahl der Messstellen

Die Fugenvertiefung ist der Wert, der sich ergibt, wenn die Prüfvorrichtung durch Eigengewicht in die Fuge herabgelassen wird. Das Gewicht wird nicht fallen gelassen. Das bloße Einfegen hat zum Vorschein gebracht, dass bei allen Sondierungen bei der Prüffläche Nr. 3.1 die Sondiernadel zum Teil weit über 50 mm in die Fuge eingedrungen ist. Als Referenzfugenvertiefung wird bei allen Messstellen 20 % der Steindicke, also 20 mm angesetzt. Diese Fugenvertiefung wird angesetzt, da leere Fugen (Fugenentleerung Typ 4) durch die Nutzung aus Beobachtungen in der Praxis bis zu 20 mm als üblich angesehen werden können und die Verdichtung von ungebundenem Fugenmaterial im oberflächennahen Bereich am geringsten ist. Die vorhandene Fugenvertiefung ist zudem abhängig von der Fugenbreite. Breite Fugen können auch im Betrieb deutlich größere Fugenvertiefungen zur Folge haben.

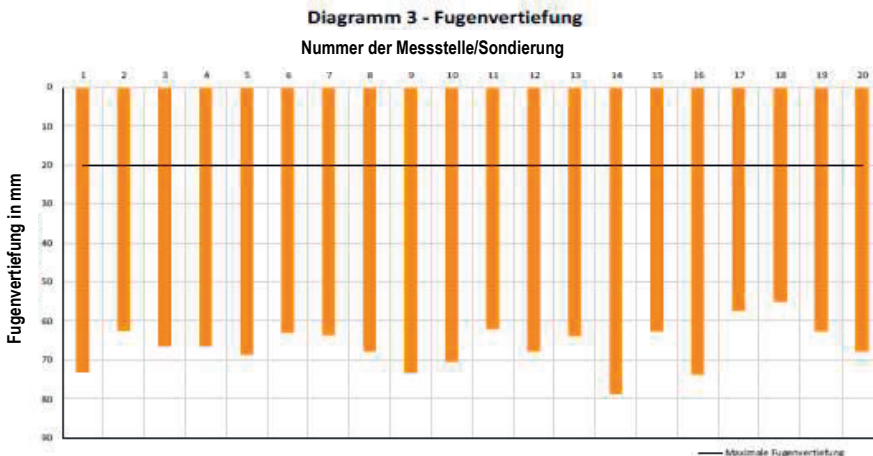


Abbildung 55:

Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 3.1, der schwarze Strich stellt die Referenzfugenvertiefung von 20 mm (20% der Steindicke) dar

**Diagramm 4: Das Liniendiagramm zeigt für jede Messstelle bzw. Sondierstelle die Eindringtiefe pro Sondierung (Messung nach jedem Aufprall des Gewichts).**

Abbildung 56 zeigt die Prüffläche Nr. 3.4.3 und darin die Sondierstelle S02.

Auf der Ordinate sind die jeweiligen Eindringtiefen pro Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte und auf der Abszisse sind die Anzahl der Schläge dargestellt. Der parallel zur x-Achse rot dargestellte Strich bei  $y = 10 \text{ mm}$  ist ein festgelegter maximaler Wert der Eindringtiefe pro Schlag ( $2 \times$  Mittelwert) und der parallel zur x-Achse im Farbton schwarz gezeichnete Strich bei  $y = 5 \text{ mm}$  symbolisiert den erzielbaren Mittelwert aller durchgeführten Schläge auf die Grundplatte. Der erste Aufprall des Gewichts hat die Nadel etwa  $16 \text{ mm}$  eindringen lassen, wobei der 15. Aufprall die Nadel weniger als etwa  $2 \text{ mm}$  hat eindringen lassen.

Aus Abbildung 57 ist für Prüffläche Nr. 7.4.2 ersichtlich, dass ein negativer Wert aufgrund der Reflexion bei einer groben Gesteinskörnung vorliegt.

Wie in Abbildung 50 ersichtlich, ist die Fugensondiernadel an der Spitze in einem Winkel von  $90^\circ$  angeschliffen. Sie besitzt eine Dicke von  $2 \text{ mm}$ . Die Eindringtiefe der Fugensondiernadel ist je nach Fugenmaterial abhängig vom Größtkorn des Fugenmaterials. Bei feinkörnigen Fugenmaterialien dringt die Fugensondiernadel entweder über den Spitzenwiderstand ein oder aber sie verdrängt die Gesteinskörnung. Bei grober Gesteinskörnung kann die Fugensondiernadel unmittelbar auf ein großes Korn, z.B.  $5 \text{ mm}$ , stoßen. Ist das grobe Korn in der Fuge hinreichend eingespannt und hat sich eine Kornumlagerung eingestellt, so wird die Fugensondiernadel das Korn nicht verdrängen können. Somit schlägt die Fugensondiernadel auf das Korn auf und es kann zur so genannten Reflexion der Fugensondiernadel kommen. Reflexion bedeutet, dass so genannte negative Werte in der Sondierung (d.h. kein Eindringen der Fugensondiernadel durch positive, sondern durch negative Werte) erscheinen (Abbildung, Aufprall neun, türkis Kreis). Die negativen Werte deuten darauf hin, dass die Fugensondiernadel nicht eindringen kann.

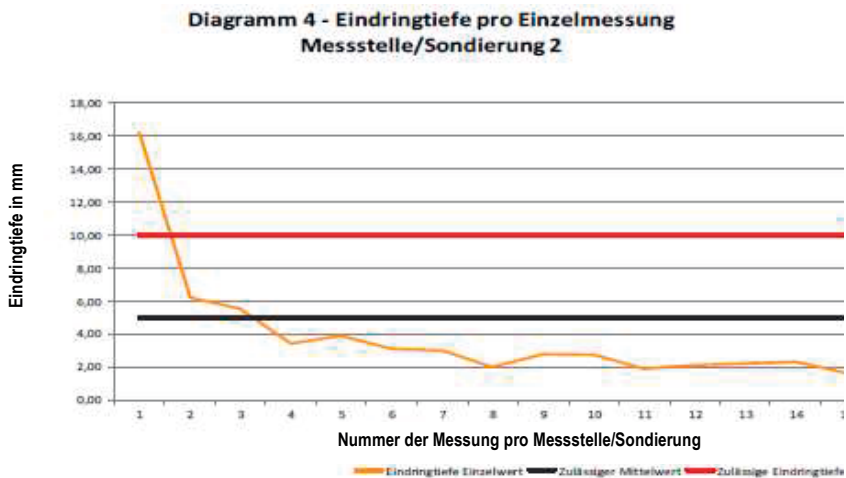


Abbildung 56:

Das Liniendiagramm zeigt die Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 3.4.3, Sondierstelle S02, 15 Schläge sind notwendig, um die Fuge zu durchdringen

**Diagramm 4 - Eindringtiefe pro Einzelmessung  
Messstelle/Sondierung 19**

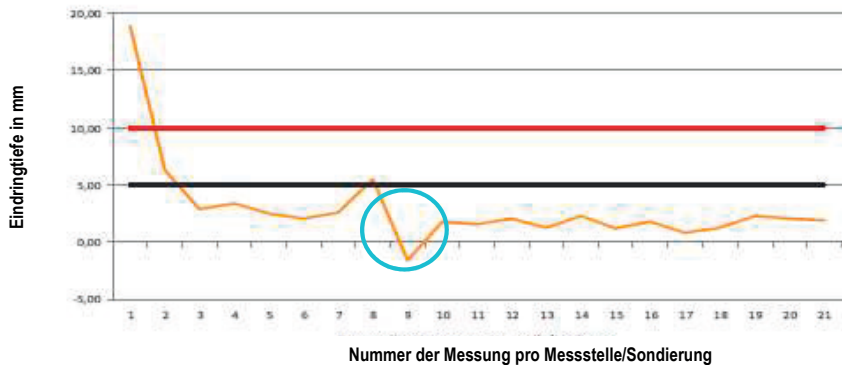


Abbildung 57:

Das Liniendiagramm zeigt die Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 7.4.2, Sondierstelle 19, der Aufprall neun zeigt einen negativen Wert und demnach eine Reflexion (türkis Kreis)

Enden die Reflexionen und positive Werte folgen auf negative Werte, so hat die Fugensondiermadel die grobe Gesteinskörnung durchgeschlagen und sie schreitet weiter nach unten voran. Dieser wesentliche Aspekt der Beurteilung der Fugensondierung ist insbesondere je nach Korngrößenverteilung des Fugenmaterials zu berücksichtigen.

**Diagramm 5: Das Liniendiagramm zeigt für jede Messstelle bzw. Sondierstelle die addierte Eindringtiefe pro Sondierung (Messung nach jedem Aufprall des Gewichts).**

Abbildung 58 zeigt die Sondierstelle S13 bei Prüffläche Nr. 6.1.

Auf der Abszisse ist die Anzahl des Aufpralls des Gewichts auf die Grundplatte bei vollständiger Durchdringung der Fuge dargestellt. Auf der Ordinate sind die addierten Eindringtiefen aufgeführt. Der parallel zur x-Achse befindliche schwarze Strich stellt die Fugenvertiefung dar, die bei Sondierstelle S13  $y = 14,00$  mm beträgt. Auf der Höhe der Fugenvertiefung liegt eine lockere Lagerung des Fugenmaterials vor und/oder die Fugenfüllung ist in diesem Bereich nicht vorhanden.

Abweichend zu Abbildung 58 zeigt die Abbildung 59 die Prüffläche Nr. 7.4.2. Hier sind 21 Schläge des Gewichts auf die Grundplatte notwendig, um die Fuge vollständig zu durchdringen. Bei der addierten Eindringtiefe ist aus dem Liniendiagramm die bereits in Abbildung (türkis Kreis, Aufprall neun) beschriebene Reflexion ersichtlich.

### 3.5.2.2.3 Ergebnisse am Beispiel der Prüffläche Nr. 1

Der vollständige Prüfplan ist im Anhang B enthalten. Die einzelnen Prüfflächen werden hier beschrieben. Die verschiedenen Prüfflächen Nr. 1.1 bis 1.6 unterscheiden sich ausschließlich im Einbau des Fugenmaterials. Die Prüfflächen sind mit dem Fugenmaterial nach Anhang A10 errichtet und besitzen eine Fugenbreite von 4 mm.

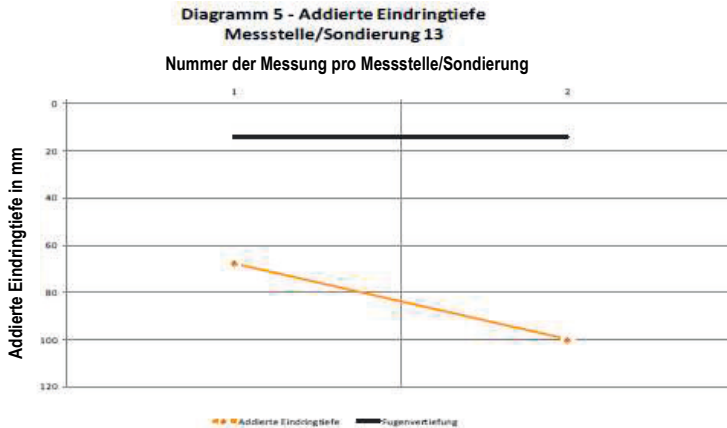


Abbildung 58:  
Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 6.1 dar, Sondierstelle S13

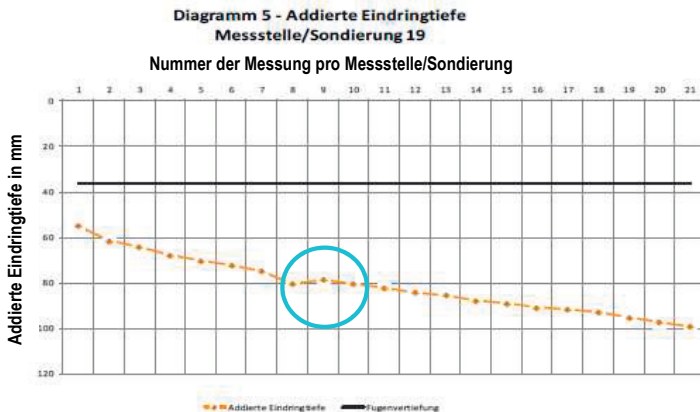


Abbildung 59:  
Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 7.4.2 dar, Sondierstelle 19, die Reflexion ist bei dem 9. Aufprall ersichtlich

#### 3.5.2.2.3.1 Prüffläche Nr. 1.1 (Anhang D1.1)

Das Baustoffgemisch wird mit natürlichem Wassergehalt (ohne Wasserzugabe) eingefügt und es wird keine Verdichtung durchgeführt. Der Wassergehalt beim Einbau des Fugenmaterials beträgt 1,63 und 1,10 M.-% (Anhang C.3.2.1). Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 7 dargestellt.



Tabelle 7: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.1

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw	StdAbw
S 01	4	1	39,60	60,30	39,60	36,20	39,60	39,60	39,60	
S 02	4	1	43,00	56,90	43,00	38,00	43,00	43,00	43,00	
S 03	4	1	39,90	60,00	39,90	38,30	39,90	39,90	39,90	
S 04	4	1	43,30	56,60	43,30	38,00	43,30	43,30	43,30	
S 05	4	1	33,10	66,80	33,10	38,70	33,10	33,10	33,10	
S 06	4	1	34,90	65,00	34,90	39,00	34,90	34,90	34,90	
S 07	4	1	33,40	66,50	33,40	41,00	33,40	33,40	33,40	
S 08	4	1	18,50	81,40	18,50	40,60	18,50	18,50	18,50	
S 09	4	2	54,40	45,50	31,90	22,50	31,90	27,20	22,50	6,65
S 10	4	1	66,20	33,70	66,20	37,10	66,20	66,20	66,20	
S 11	4	1	68,20	31,70	68,20	37,70	68,20	68,20	68,20	
S 12	4	2	55,60	44,30	45,40	10,20	45,40	27,80	10,20	24,89
S 13	4	1	59,70	40,30	59,70	36,90	59,70	59,70	59,70	
S 14	4	1	54,00	45,90	54,00	31,40	54,00	54,00	54,00	
S 15	4	1	30,10	69,80	30,10	36,60	30,10	30,10	30,10	
S 16	4	1	59,50	40,40	59,50	16,60	59,50	59,50	59,50	
S 17	4	1	61,80	38,10	61,80	38,30	61,80	61,80	61,80	
S 18	4	1	24,80	75,10	24,80	30,40	24,80	24,80	24,80	
S 19	4	1	40,80	59,10	40,80	30,90	40,80	40,80	40,80	
S 20	4	2	53,80	46,10	36,00	17,80	36,00	26,90	17,80	12,87

Bei allen Sondierstellen mit Ausnahme der Sondierstellen S09, S12 und S20 hat bereits ein Aufprall auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen geführt. Bei S09, S12 und S20 sind zwei Schläge erforderlich. Die Fugenvertiefung variiert mit dem geringsten Wert bei S11 in Höhe von 31,70 mm bis zum höchsten Wert 81,40 mm bei S08. Der zweite Wert der Sondierung zeigt mit Ausnahme von S09, S12 und S20 ein Eindringen der Sondiernadel in die Bettung. Die Eindringtiefe in die Bettung hat keine Messrelevanz in Bezug auf die Eindringtiefe in die Fuge. Die hier vorhandenen Eindringtiefen in die Bettung werden als zweiter Wert bestimmt, weil nach dem ersten Schlag die Fuge fast vollständig durchdrungen ist. Die Standardabweichung befindet sich in Tabelle 7 ausschließlich bei S09, S12 und S20, da diese erst ab zwei Messwerten bestimmt werden kann.

In Abbildung 60 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der y-Achse befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 7 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich (parallel zur x-Achse) mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird deutlich überschritten.

Das Diagramm 2 minimaler, maximaler und mittlerer Eindringtiefen wird bei dieser Prüffläche in Anhang D1.1 aufgeführt. Es wird hier nicht dargestellt, da bei 18 von 20 Sondierungen ausschließlich einer Messung durch Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte möglich ist.

Das Einfügen von Fugenmaterial hat die Erkenntnis gebracht, dass bei Ausführung des ersten Schlages der Sondierung die Sondiernadel die Fuge nahezu vollständig durchdrungen wird. Demzufolge ist hier ein Vergleich zwischen minimaler, maximaler und mittlerer Eindringtiefen nicht möglich.

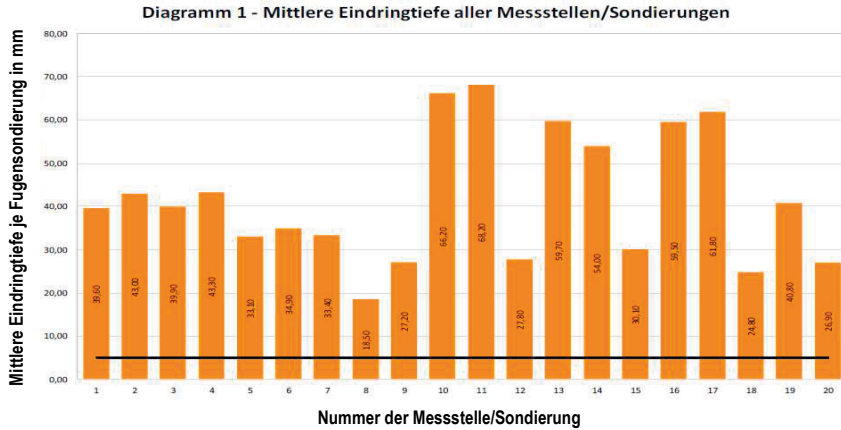


Abbildung 60:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.1

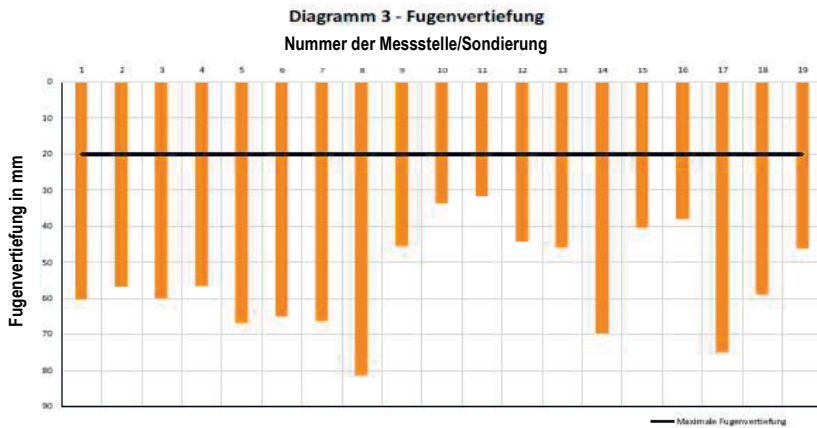


Abbildung 61:

Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.1, der schwarze Strich stellt die Referenzfugenvertiefung von 20 mm (20 % der Steindicke) dar

Abbildung 61 zeigt auf der Ordinate die Fugenvertiefung in mm und auf der Abszisse die Anzahl der Messstellen.

Das Gewicht wird nicht fallen gelassen. Das Einfügen vom Fugenmaterial hat zum Vorschein gebracht, dass alle Sondierungen ergeben haben, dass bei der Prüffläche Nr. 1.1 die Sondiernadel bei Sondierstelle S10, S11 und S16 über 30 mm und bei den übrigen Sondierstellen zum Teil weit über 40 mm in die Fuge eingedrungen ist.

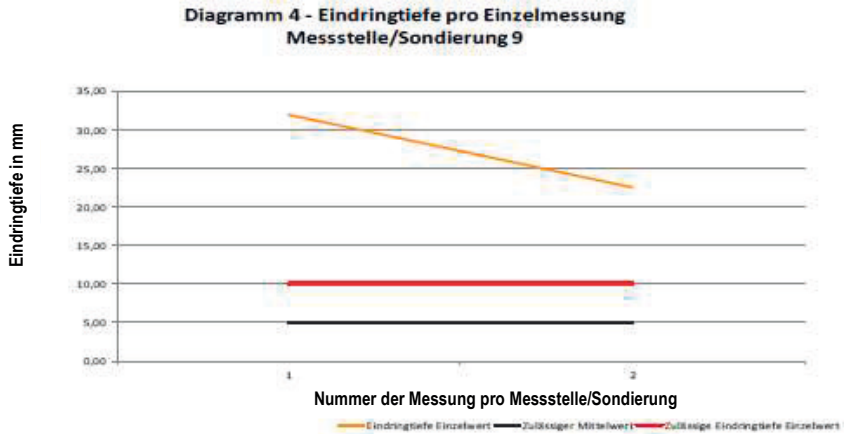


Abbildung 62:

Das Liniendiagramm zeigt die Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.1, Sondierstelle S09 erster Aufprall 31,90 mm und zweiter Aufprall 22,50 mm

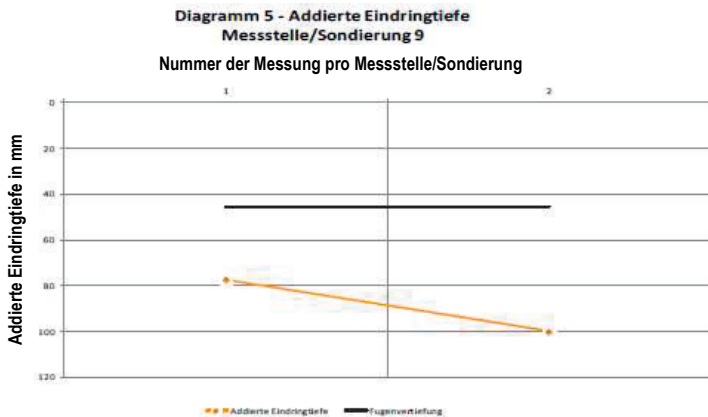


Abbildung 63:

Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.1 dar, Sondierstelle S09

Die Diagramme 4 und 5 sind dem Anhang D1.1 zu entnehmen. Bei 18 Sondierstellen durchdringt die Sondiernadel beim ersten Aufprall auf die Grundplatte nahezu vollständig die Fuge. Zur grafischen Darstellung der Diagramme 4 und 5 sind mindestens zwei Schläge auf die Grundplatte notwendig, damit ein Liniendiagramm erzeugt werden kann. Bei Prüffläche Nr. 1.1 kann ein Diagramm 4 und 5 ausschließlich bei Sondierstelle S09, S12 und S20 dargestellt werden (Abbildung 62 und 63).

Tabelle 8: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.2

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw
S 01	4	11	60,80	38,10	8,60	5,00	9,50	5,53	3,10	1,99
S 02	4	7	44,80	49,50	12,30	7,10	12,30	6,40	4,40	2,73
S 03	4	8	45,20	50,50	10,50	8,70	10,50	5,65	2,40	2,70
S 04	4	5	53,30	32,70	11,70	8,40	14,70	10,66	8,40	2,59
S 05	4	4	43,40	50,50	13,10	7,20	13,10	10,85	7,20	2,60
S 06	4	4	42,20	47,70	10,10	10,20	11,50	10,55	10,10	0,65
S 07	4	1	48,20	51,70	48,20	10,00	48,20	48,20	48,20	
S 08	4	2	42,30	57,60	14,90	27,40	27,40	21,15	14,90	8,84
S 09	4	4	50,30	49,60	14,50	13,30	14,50	12,58	8,50	2,76
S 10	4	9	50,30	47,90	10,70	5,50	10,70	5,59	4,10	2,01
S 11	4	8	48,30	50,80	12,20	5,40	12,20	6,04	4,30	2,62
S 12	4	4	50,40	49,50	13,90	12,80	17,40	12,60	6,30	4,64
S 13	4	3	33,20	66,70	15,30	10,60	15,30	11,07	7,30	4,02
S 14	4	5	46,40	47,50	15,50	11,20	15,50	9,28	5,40	4,11
S 15	4	2	37,60	62,30	20,60	17,00	20,60	18,80	17,00	2,55
S 16	4	3	37,00	62,90	14,60	12,80	14,60	12,33	9,60	2,53
S 17	4	3	31,50	62,10	15,40	7,60	15,40	10,50	7,60	4,27
S 18	4	4	31,80	61,90	7,40	6,80	9,80	7,95	6,80	1,30
S 19	4	4	32,00	67,00	11,20	7,10	11,20	8,00	6,00	2,25
S 20	4	2	47,00	52,90	23,60	23,40	23,60	23,50	23,40	0,14

### 3.5.2.2.3.2 Prüffläche Nr. 1.2 (Anhang D1.2)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPS1850Hb wird nach Beendigung der Fugensondierungen an Prüffläche Nr. 1.1 durchgeführt. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 8 dargestellt. Der Wassergehalt wird nicht bestimmt, da kein Wasser zugegeben wird und somit der Wassergehalt der Prüffläche Nr.1.1 mit 1,63 und 1,10 M.-% (Anhang C3.2.1) angesetzt wird.

Bei allen Sondierstellen (mit Ausnahme der Sondierstelle S07) ist mehr als ein Aufprall auf die Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die unterschiedliche Anzahl der Schläge deutet auf eine unterschiedliche Fugenfüllung hin. Die weiteren Diagramme 1 bis 3 über alle Messstellen (vgl. Abbildung 53, 54 und 55) und die Diagramme 4 und 5 (vgl. Abbildung 56 und 58) für jede Messstelle sind im Anhang D1.2 aufgeführt.

### 3.5.2.2.3.3 Prüffläche Nr. 1.3 (Anhang D1.3)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird nach Beendigung der Fugensondierungen an Prüffläche Nr. 1.2 durchgeführt. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 9 aufgeführt. Der Wassergehalt wird anlog der Prüffläche Nr. 1.2 mit 1,63 und 1,10 M.-% (Anhang C3.2.1) angesetzt.

Bei allen Sondierstellen (mit Ausnahme der Sondierstelle S07) sind mehr als sechs Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die Fugenvertiefung variiert mit dem geringsten Wert bei S08 in Höhe von 18,00 mm bis zum höchsten Wert 37,00 mm bei S07.

Tabelle 9: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.3

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw	StdAbw
S 01	4	15	63,50	33,80	13,20	6,30	13,20	4,23	2,50	2,67
S 02	4	16	63,60	35,50	11,80	4,50	11,80	3,98	2,30	2,24
S 03	4	19	67,80	28,30	10,70	5,50	10,70	3,57	1,80	1,97
S 04	4	20	72,90	26,30	13,70	5,80	13,70	3,65	1,80	2,62
S 05	4	18	65,80	30,50	16,10	6,80	16,10	3,66	1,50	3,39
S 06	4	16	70,40	25,90	12,80	4,80	12,80	4,40	3,30	2,31
S 07	4	6	59,70	37,00	24,80	11,10	24,80	9,95	3,80	7,66
S 08	4	8	77,70	18,00	31,00	7,90	31,00	9,71	4,80	8,67
S 09	4	8	63,60	33,30	22,40	10,60	22,40	7,95	4,00	6,18
S 10	4	16	70,30	26,90	16,30	4,80	16,30	4,39	2,70	3,27
S 11	4	12	65,40	29,50	15,70	6,00	15,70	5,45	3,20	3,37
S 12	4	19	76,00	21,10	15,30	6,30	15,30	4,00	2,20	2,93
S 13	4	11	74,20	25,30	18,00	8,70	18,00	6,75	3,50	4,13
S 14	4	12	77,50	18,90	14,20	8,50	14,20	6,46	4,10	2,73
S 15	4	8	62,00	32,00	17,00	7,80	17,00	7,75	5,60	3,81
S 16	4	13	70,80	22,90	9,80	5,90	9,80	5,45	3,00	1,86
S 17	4	14	75,70	21,20	14,90	6,50	14,90	5,41	3,60	2,88
S 18	4	14	66,40	30,80	14,10	6,90	14,10	4,74	2,50	2,95
S 19	4	11	62,50	33,40	8,80	9,50	9,50	5,68	3,00	2,01
S 20	4	12	70,00	26,30	13,40	8,10	13,40	5,83	3,10	2,77

In der Spalte *Niedrigstw.* werden der kleinste Wert bei S05 mit 1,50 mm und der höchste Wert mit 5,60 mm bei S15 bestimmt. Die Standardabweichung findet sich in Tabelle 9 in der Spalte *StdAbw.*

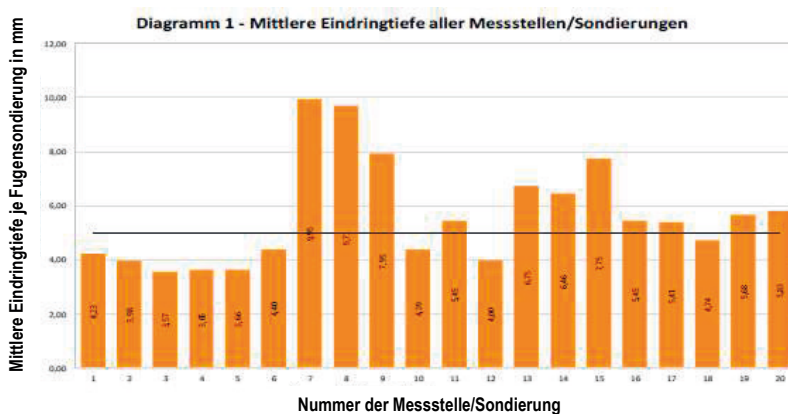
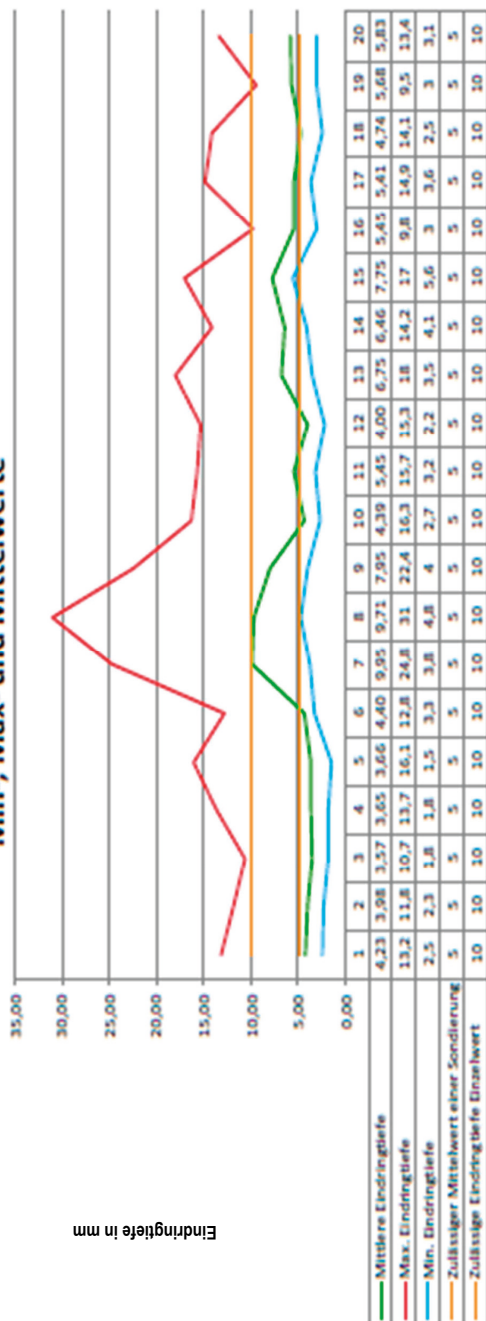


Abbildung 64:  
Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.3

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Numer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 65:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 1.3 je Sondierstelle dar

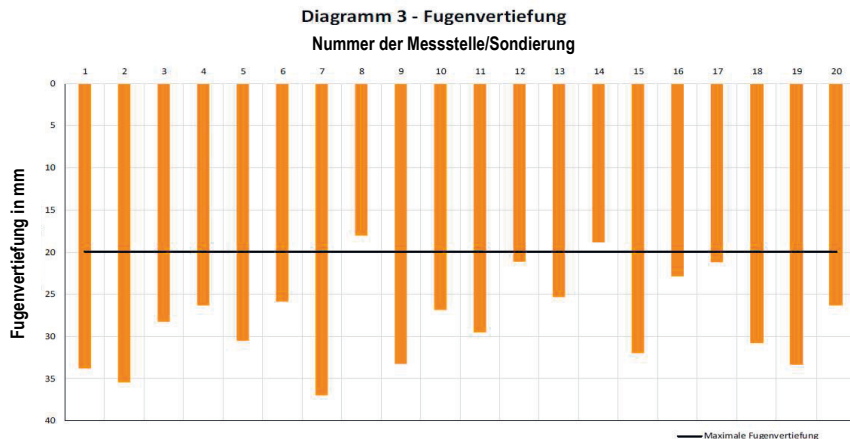


Abbildung 66:

Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.3

In Abbildung 64 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 9 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich parallel zur x-Achse mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an 11 von 20 Messstellen überschritten.

In Abbildung 65 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt. Abbildung 66 zeigt auf der Ordinate die Fugenvertiefung und auf der Abszisse ist die Anzahl der Messstellen dargestellt.

#### 3.5.2.2.3.4 Prüffläche Nr. 1.3.1 (als Festlegung der Vorgehensweise bei „nassen“ Verdichtungsvorgängen)

Der Prüfplan (Anhang B) weist die Prüfflächen Nr. 1.3.1, 2.3.1 und 3.3.1 aus. Diese Prüfflächen werden für die Fugensondierungen nicht zur Beurteilung herangezogen. Sie dienen im Rahmen der Untersuchungen einem zusätzlichen Versuch, der betrachtet, wie aus praktischen Aspekten eine fachgerechte Verdichtung durchgeführt werden kann.

Eine weitere Bewertung wird hier nicht durchgeführt. Bei den Verdichtungsversuchen haben sich die Erkenntnisse aus den Vorversuchen bestätigt, dass bei stehendem Wasser in den Fugen durch den Verdichtungsprozess Fugenmaterial vor der Platte in die Fugen gepresst wird und durch den Porenwasserdruck Fugenmaterial aus den Fugen getragen wird. Beim Rückwärtsfahren der reversiblen Rüttelplatte kam es aufgrund des entstehenden Unterdrucks zum Heraussaugen des Fugenmaterials.

#### 3.5.2.2.3.5 Prüffläche Nr. 1.4 (Anhang D1.4)

Es wird das Baustoffgemisch 0/2 mm mit Wasser eingeschlämmt, wobei keine Verdichtung ausgeführt wird. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Einschlammvorgang bestimmt. Er wird mit 13,53, 12,79, 14,65 und 13,76 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1). Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 10 dargestellt.



Tabelle 10: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw
S 01	4	1	68,50	31,40	68,50	40,00	68,50	68,50	68,50	
S 02	4	1	66,50	33,40	66,50	37,60	66,50	66,50	66,50	
S 03	4	1	85,90	14,00	85,90	39,10	85,90	85,90	85,90	
S 04	4	1	51,30	48,20	51,30	34,20	51,30	51,30	51,30	
S 05	4	1	58,40	41,50	58,40	32,40	58,40	58,40	58,40	
S 06	4	1	31,60	68,30	31,60	41,00	31,60	31,60	31,60	
S 07	4	7	95,10	4,80	12,30	6,40	32,50	13,59	6,40	9,17
S 08	4	1	45,10	54,80	45,10	39,90	45,10	45,10	45,10	
S 09	4	1	32,40	67,50	32,40	21,80	32,40	32,40	32,40	
S 10	4	1	37,40	62,50	37,40	33,30	37,40	37,40	37,40	
S 11	4	1	36,60	63,30	36,60	39,90	36,60	36,60	36,60	
S 12	4	1	48,00	51,90	48,00	35,90	48,00	48,00	48,00	
S 13	4	1	27,70	72,20	27,70	38,90	27,70	27,70	27,70	
S 14	4	1	39,50	60,40	39,50	37,90	39,50	39,50	39,50	
S 15	4	1	81,40	18,50	81,40	37,10	81,40	81,40	81,40	
S 16	4	1	83,40	16,50	83,40	34,30	83,40	83,40	83,40	
S 17	4	1	88,60	11,30	88,60	38,80	88,60	88,60	88,60	
S 18	4	1	34,70	65,20	34,70	32,80	34,70	34,70	34,70	
S 19	4	1	45,30	54,60	45,30	30,80	45,30	45,30	45,30	
S 20	4	1	50,10	49,80	50,10	36,80	50,10	50,10	50,10	

Bei allen Sondierstellen (mit Ausnahme der Sondierstelle S07) hat bereits ein Aufprall auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen geführt. Bei S07 sind sieben Schläge erforderlich. Die Fugenvertiefung variiert mit dem geringsten Wert bei S07 in Höhe von 4,80 mm bis zum höchsten Wert 72,20 mm bei S13. Der zweite Wert der Sondierung zeigt mit Ausnahme von S07 ein Eindringen der Sondiernadel in die Bettung.

Die Eindringtiefe in die Bettung hat keine Messrelevanz in Bezug auf die Eindringtiefe in die Fuge. Die hier vorhandenen Eindringtiefen in die Bettung werden als zweiter Wert bestimmt, weil nach dem ersten Schlag die Fuge fast vollständig durchdrungen ist.

Die Standardabweichung bestimmt sich in Tabelle 10 (Spalte *StdAbw*) ausschließlich bei S07, da diese erst ab zwei Messwerten bestimmt werden kann.

Die weiteren Diagramme 1 bis 3 über alle Messstellen und die Diagramme 4 und 5 für jede Messstelle sind im Anhang D1.4 aufgenommen.

### 3.5.2.2.3.6 Prüffläche Nr. 1.4.1 (Anhang D1.4.1)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPS1850Hb wird nach Beendigung der Fugensondierungen an Prüffläche Nr. 1.4 (ohne Wasserzugabe) durchgeführt. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 11 dargestellt. Der Wassergehalt nach dem Verdichtungsverfahren des Fugenmaterials beträgt 10,72, 10,36, 11,18 und 11,07 M.-% (Anhang C3.2.1). Der Wassergehalt hat sich gegenüber der Prüffläche Nr. 1.4 in einem Zeitfenster von etwa drei Stunden reduziert. Die Reduktion des Wassergehaltes bei unverdichteter Fläche bei der vertikalen Wasserableitung zur verdichteten Fläche wird im Folgenden bestimmt.



Tabelle 11: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.1

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw
S 01	4	6	45,80	52,20	18,80	9,30	18,80	7,63	3,80	5,83
S 02	4	7	60,40	39,10	22,00	11,20	22,00	8,63	4,30	6,33
S 03	4	5	50,50	49,20	15,10	16,80	16,80	10,10	5,40	5,40
S 04	4	5	27,60	68,30	8,00	5,30	8,00	5,52	4,50	1,43
S 05	4	5	28,00	67,70	8,80	5,30	8,80	5,60	4,00	1,87
S 06	4	4	62,10	31,90	16,90	18,30	18,30	15,53	11,80	2,81
S 07	4	4	17,80	72,10	8,10	5,50	8,10	4,45	-2,40	4,69
S 08	4	2	20,70	72,80	12,40	8,30	12,40	10,35	8,30	2,90
S 09	4	5	20,70	77,20	4,50	4,00	4,80	4,14	3,70	0,49
S 10	4	5	45,70	54,20	18,20	8,40	18,20	9,14	5,50	5,17
S 11	4	11	50,40	47,20	14,10	6,10	14,10	4,58	2,40	3,31
S 12	4	2	36,50	63,40	12,50	24,00	24,00	18,25	12,50	8,13
S 13	4	5	31,10	66,60	11,30	6,70	11,30	6,22	3,50	3,06
S 14	4	7	33,10	63,40	6,30	4,20	6,30	4,73	3,30	1,04
S 15	4	2	41,10	54,30	31,40	9,70	31,40	20,55	9,70	15,34
S 16	4	4	45,40	54,50	16,50	13,40	16,50	11,35	6,30	4,50
S 17	4	5	50,50	47,90	19,40	11,70	19,40	10,10	5,60	5,75
S 18	4	4	28,50	71,40	9,70	7,30	9,70	7,12	5,70	1,87
S 19	4	4	39,10	60,80	13,60	7,80	13,60	9,78	7,70	2,76
S 20	4	2	41,90	58,00	29,80	12,10	29,80	20,95	12,10	12,52

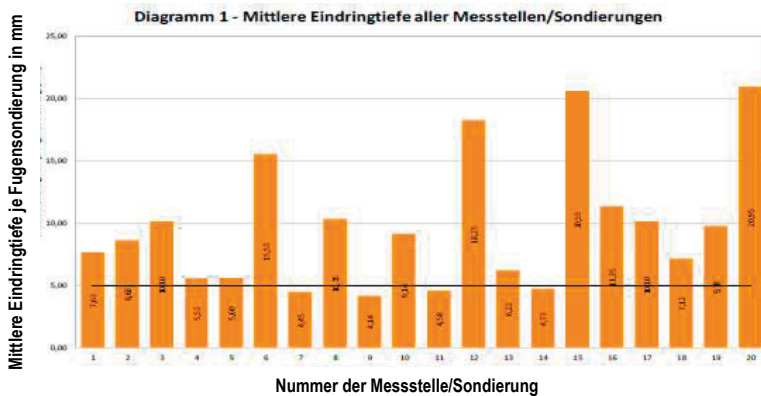
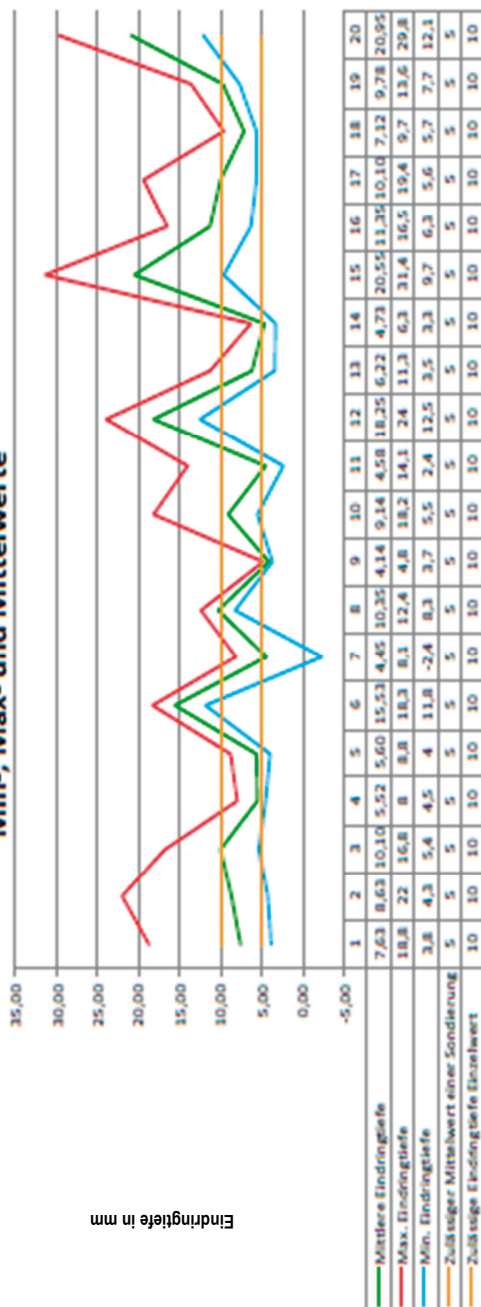


Abbildung 67:  
Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen  
für Prüffläche Nr. 1.4.1

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 68:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 1.4.1 je Sondierstelle dar

Es ist das arithmetische Mittel der ermittelten Wassergehalte der jeweiligen Prüfflächen zu berechnen:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \quad [\text{Formel 13}]$$

Prüffläche Nr. 1.4:  $X_1 = 13,53$ ;  $X_2 = 12,79$ ;  $X_3 = 14,65$ ;  $X_4 = 13,76$

Prüffläche Nr. 1.4.1:  $X_1 = 10,72$ ;  $X_2 = 10,36$ ;  $X_3 = 11,18$ ;  $X_4 = 11,07$

$$\Delta \text{Wassergehalt} = \left[ \sum_{i=1}^n (X_1 + X_2 + X_3 + X_4) / n \right] - \left[ \sum_{i=1}^n (X_1 + X_2 + X_3 + X_4) / n \right] \quad [\text{Formel 15}]$$

$$\Delta \text{Wassergehalt} = \left[ \sum (13,53 + 12,79 + 14,65 + 13,76) / 4 \right] - \left[ \sum (10,72 + 10,36 + 11,8 + 11,07) / 4 \right]$$

$$\Delta \text{Wassergehalt} = 2,85 \text{ M.-%}$$

Bei allen Sondierstellen (mit Ausnahme der Sondierstellen S08, S12 und S20) sind mehr als zwei Aufpralle auf die Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S06 in Höhe von 31,90 mm bis zum höchsten Wert 77,20 mm bei S09. In der Spalte *Niedrigstw.* wird der kleinste Wert bei S07 mit -2,40 mm und der höchste Wert mit 12,50 mm bei S12 bestimmt.

In Abbildung 67 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 11 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich parallel zur x-Achse mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an den meisten Messstellen überschritten.

In Abbildung 68 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt.

Abbildung 69 zeigt auf der Ordinate die Fugenvertiefung und auf der Abszisse ist die Anzahl der Messstellen dargestellt.

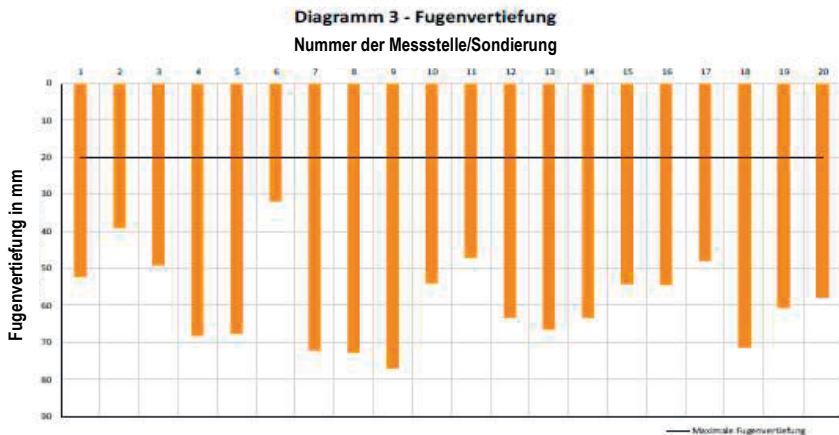


Abbildung 69:  
 Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle  
 für Prüffläche Nr. 1.4.1

Das Gewicht wird nicht fallen gelassen. Die Fugen sind bei den Prüfflächen Nr. 1.1 und 1.4 zu Beginn der Fugensondierung visuell gefüllt. Die Messung der Fugenvertiefung zeigt bei diesen Prüfflächen entweder Hohlräume im Querschnitt unter Betrachtung der Gewölbewirkung (Metzger & Saathoff, 2010) der Fugenteilung Typ 3 (vgl. Abbildung 14) oder sehr lockeres Fugenmaterial.

Technisch ist die Fugenvertiefung bei Prüffläche Nr. 1.4.1 anders zu bewerten. Durch die Verdichtung mit der Rüttelplatte wird eine Kornumlagerung und damit ein Absacken des Fugenmaterials erzeugt. Ein Großteil der Fugenvertiefung ist auf eine im oberen Fugenbereich entleerte Fuge aufgrund Kornumlagerung zurückzuführen. Es existieren vier unterschiedliche Arten der gemessenen Fugenvertiefung:

- Fugenvertiefung aufgrund lockerer Lagerung des Fugenmaterials.
- Fugenvertiefung aufgrund vorhandener Hohlräume im Fugenquerschnitt.
- Fugenvertiefung durch Kornumlagerung mit der Folge des Absackens beim Verdichtungs Vorgang aufgrund der Erhöhung der Lagerungsdichte (visuell unverfüllter Fugenbereich, Reduktion des Wertes der Fugenvertiefung).
- Fugenvertiefung durch Kornumlagerung aufgrund des lockeren Fugenmaterials im oberen Fugenbereich aufgrund LöSENS etwaiger Verspannungen zwischen Gestein und Steinseitenfläche (Erhöhung der Fugenvertiefung, Erhöhung des Wertes der Fugenvertiefung).

Für die Prüffläche Nr. 1.4.1 sind beispielhaft in den Abbildungen 70, 71 und 72 die ausgewerteten Diagramme 5 dargestellt. Die Abbildungen zeigen unterschiedliche Erscheinungsbilder des Liniendiagramms.

Aus Abbildung 70 ist bei Sondierstelle S09 eine Fugenvertiefung von etwa 80 mm ersichtlich. Die Durchführung der Fugensondierung ist auf den unteren 20 mm der Steindicke möglich. Zur vollständigen Durchdringung sind fünf Schläge notwendig.

Abbildung 71 zeigt eine Fugenvertiefung von etwa 40 mm und somit eine Fugensondierungstiefe von etwa 60 mm. Für die Durchdringung der Fugensondennadel sind elf Schläge erforderlich.

Abbildung 72 zeigt eine Fugenvertiefung von etwa 55 mm mit einer verbleibenden Sondiertiefe von etwa 45 mm mit zwei Schlägen des Gewichts auf die Grundplatte bis zur vollständigen Durchdringung der Fuge.

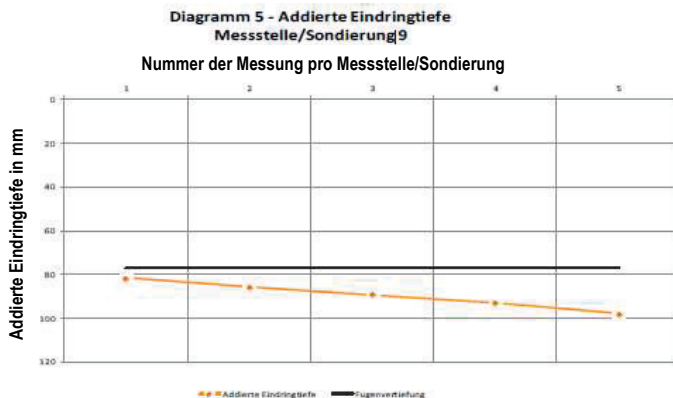


Abbildung 70:

Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.4.1 dar, Sondierstelle S09

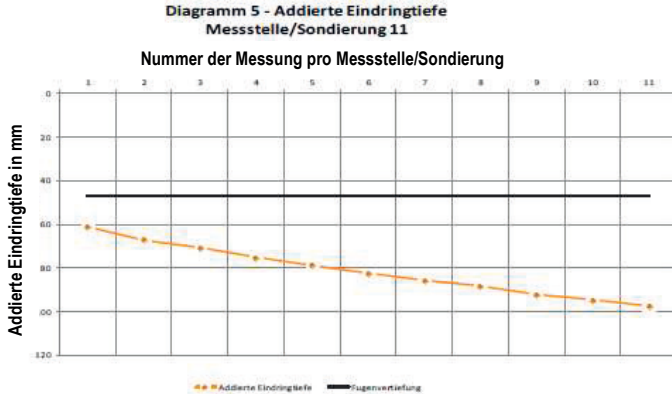


Abbildung 71:

Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.4.1 dar, Sondierstelle S11

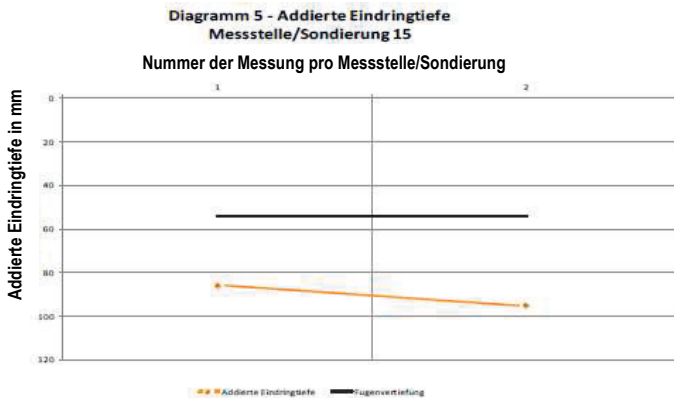


Abbildung 72:

Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.4.1 dar, Sondierstelle S15

### 3.5.2.3.7 Prüffläche Nr. 1.4.2 (Anhang D1.4.2)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird nach Beendigung der Fugensondierungen an Prüffläche Nr. 1.4.1 (ohne Wasserzugabe) durchgeführt. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 12 dargestellt. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Verdichtungsverfahren ohne Wasserzugabe bestimmt. Er wird mit 7,62, 7,45, 7,23 und 8,55 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1). Der Wassergehalt hat sich gegenüber der Prüffläche Nr. 1.4.1 in einem Zeitfenster von etwa 20 Stunden reduziert. Die Reduktion des Wassergehaltes bei der vertikalen Wasserableitung in der verdichteten Fläche wird nachstehend berechnet.

Tabelle 12: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.2

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw	StdAbw
S 01	4	3	23,00	75,90	10,40	7,50	10,40	7,67	5,10	2,65
S 02	4	15	72,30	26,50	11,40	12,60	12,60	4,82	2,00	3,46
S 03	4	8	41,70	58,30	10,80	6,90	10,80	5,21	3,10	2,58
S 04	4	9	30,60	68,50	7,70	3,80	7,70	3,40	1,60	1,86
S 05	4	15	59,80	30,50	16,10	6,80	16,10	3,99	1,50	3,63
S 06	4	2	14,80	82,80	8,80	6,00	8,80	7,40	6,00	1,98
S 07	4	3	17,00	78,50	6,00	5,90	6,00	5,67	5,10	0,49
S 08	4	5	20,50	76,60	6,40	3,90	6,40	4,10	3,10	1,34
S 09	4	5	23,00	74,50	6,40	3,90	6,40	4,60	3,60	1,09
S 10	4	3	20,10	79,80	6,50	7,00	7,00	6,70	6,50	0,26
S 11	4	6	31,30	66,70	10,00	5,50	10,00	5,22	3,00	2,54
S 12	4	8	40,40	58,00	12,00	4,90	12,00	5,05	2,90	2,88
S 13	4	5	21,10	76,90	5,10	4,30	5,10	4,22	3,30	0,67
S 14	4	6	33,00	64,20	10,30	6,20	10,30	5,50	3,00	2,61
S 15	4	8	40,80	58,90	10,40	6,70	10,40	5,10	2,80	2,55
S 16	4	7	35,90	63,90	11,70	6,50	11,70	5,13	2,80	3,13
S 17	4	10	36,10	63,20	6,60	3,80	6,60	3,61	2,40	1,35
S 18	4	8	38,60	60,50	11,10	6,20	11,10	4,83	2,60	2,85
S 19	4	7	27,80	71,70	7,70	3,10	7,70	3,97	2,30	1,75
S 20	4	7	29,30	70,40	8,30	3,90	8,30	4,19	2,70	1,93

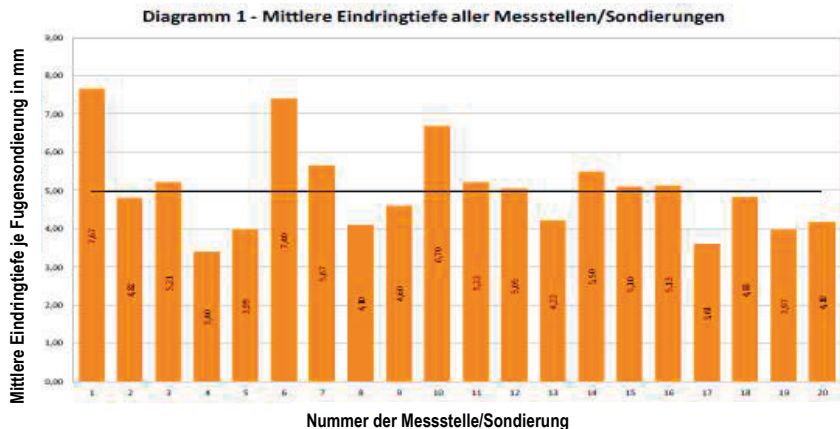
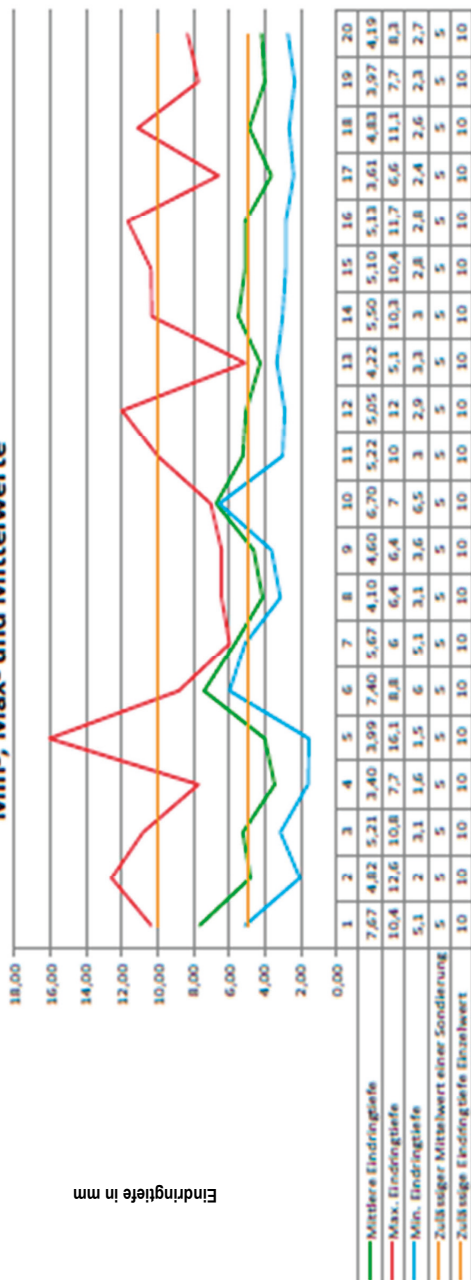


Abbildung 73:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.4.2

Das arithmetische Mittel der ermittelten Wassergehalte der jeweiligen Prüfflächen wird nach Formel 12 berechnet. Die Differenz des Wassergehaltes wird nach Formel 14 mit 3,12 M.-% ermittelt.

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 74:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüflfläche Nr. 1.4.2 je Sondierstelle dar



Bei allen Sondierstellen (mit Ausnahme der Sondierstelle S06) sind mehr als zwei Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S02 in Höhe von 26,50 mm bis zum höchsten Wert 82,80 mm bei S06. In der Spalte *Niedrigstw.* sind der kleinste Wert bei S05 mit 1,50 mm und der höchste Wert mit 6,50 mm bei S10 bestimmt.

In Abbildung 73 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen in einem Balkendiagramm dargestellt. Der horizontale schwarze Strich mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an 10 Messstellen überschritten.

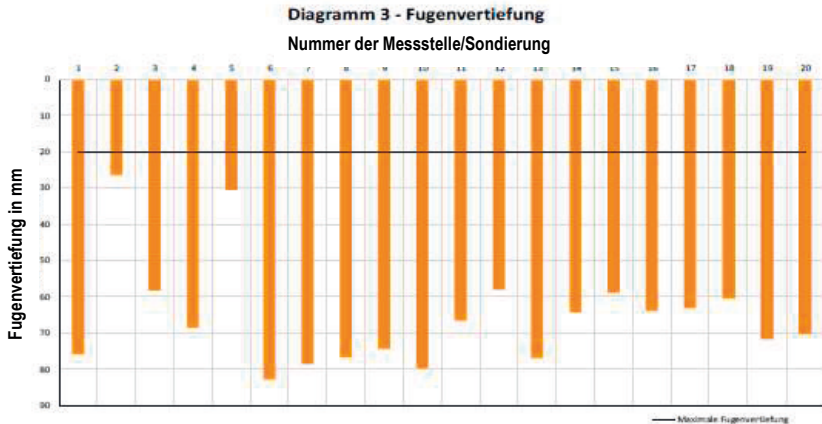


Abbildung 75:  
Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.4.2

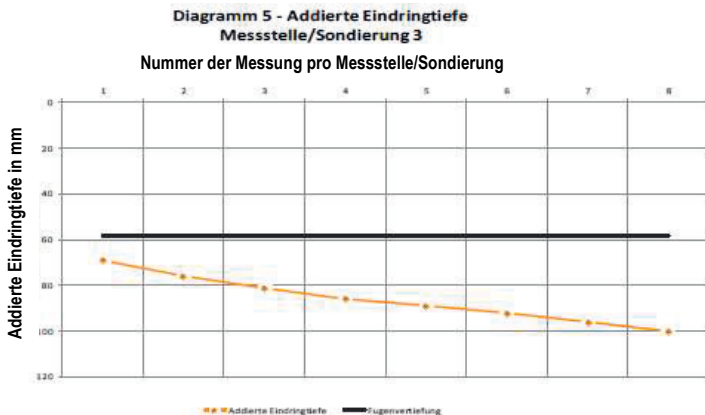


Abbildung 76:  
Das Liniendiagramm für Prüffläche Nr. 1.4.2, Sondierstelle S03



In Abbildung 74 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt. Abbildung 75 zeigt die Fugenvertiefung für die Messstellen.

Technisch ist die Fugenvertiefung bei Prüffläche Nr. 1.4.2 abweichend zu Prüffläche Nr. 1.4.1 zu bewerten. Durch die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird eine erneute Kornumlagerung und damit ein Absacken des Fugenmaterials gegenüber dem Verdichtungs Vorgang mit der Rüttelplatte DPS1850Hb erzeugt. Ein Großteil der Fugenvertiefung ist auf eine im oberen Fugenbereich entleerte Fuge aufgrund Kornumlagerung zurückzuführen.

Für die Prüffläche Nr. 1.4.2 wird beispielhaft in der Abbildung 76 das ausgewertete Diagramm 5 dargestellt.

### 3.5.2.2.3.8 Prüffläche Nr. 1.4.3 (Anhang D1.4.3)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPS1850Hb wird nach Beendigung der Fugensondierungen an Prüffläche Nr. 1.4.2 (mit Wasserzugabe in die offenen Fugen) durchgeführt. Die Prüffläche wird so lange mit Wasser beaufschlagt bis die Fugen vollständig mit Wasser gefüllt sind. Der Verdichtungs Vorgang beginnt, wenn das Wasser nicht mehr sichtbar und in die Fugen eingezogen ist. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 13 dargestellt. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Verdichtungs Vorgang mit Wasserzugabe bestimmt. Er wird mit 18,09, 20,02, 25,55 und 20,27 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 62 bis 65). Der mittlere Wassergehalt ergibt sich nach Formel 12 mit 20,98 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 65.1).

Tabelle 13: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.3

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw
S 01	4	19	60,30	38,70	6,80	4,30	6,80	3,17	2,00	1,08
S 02	4	22	60,60	37,40	4,00	4,40	5,20	2,75	0,90	1,24
S 03	4	10	41,90	56,40	5,20	4,30	5,20	4,19	3,30	0,58
S 04	4	19	68,40	26,30	13,70	5,80	13,70	3,60	1,80	2,68
S 05	4	7	42,30	54,40	8,90	6,70	8,90	6,04	4,00	1,56
S 06	4	15	51,70	48,00	6,00	4,50	6,00	3,45	1,00	1,34
S 07	4	14	47,10	50,60	6,70	4,30	6,70	3,36	1,60	1,26
S 08	4	10	46,80	52,50	9,00	8,50	9,00	4,68	2,60	2,54
S 09	4	9	35,30	63,40	5,80	7,50	7,50	3,92	2,30	1,69
S 10	4	15	42,00	57,10	5,50	3,00	5,50	2,80	1,30	1,07
S 11	4	13	48,10	50,10	7,10	5,40	7,10	3,70	2,30	1,37
S 12	4	7	40,60	56,60	12,90	5,90	12,90	5,80	3,00	3,35
S 13	4	5	31,40	67,70	7,20	7,00	7,20	6,28	5,10	0,85
S 14	4	12	77,50	18,90	14,20	8,50	14,20	6,46	4,10	2,73
S 15	4	11	49,10	47,50	8,40	4,60	8,40	4,46	3,40	1,41
S 16	4	12	44,20	54,30	5,50	4,10	5,50	3,68	2,10	1,06
S 17	4	17	38,60	59,30	4,30	2,00	4,30	2,27	1,50	0,75
S 18	4	12	44,20	53,50	7,90	6,50	7,90	3,68	2,20	1,82
S 19	4	14	43,00	55,80	5,30	4,30	5,30	3,07	1,70	0,95
S 20	4	6	37,50	61,10	10,00	9,00	10,00	6,25	4,20	2,55

Bei allen Sondierstellen sind mehr als fünf Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen erforderlich. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S14 in Höhe von 18,90 mm bis zum höchsten Wert 67,70 mm bei S13. In der Spalte *Niedrigstw.* sind der kleinste Wert bei S02 mit 0,90 mm und der höchste Wert mit 5,10 mm bei S13 bestimmt.

In Abbildung 77 sind die mittleren Eindringtiefen dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 13 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an fünf Messstellen um etwa 1 mm überschritten.

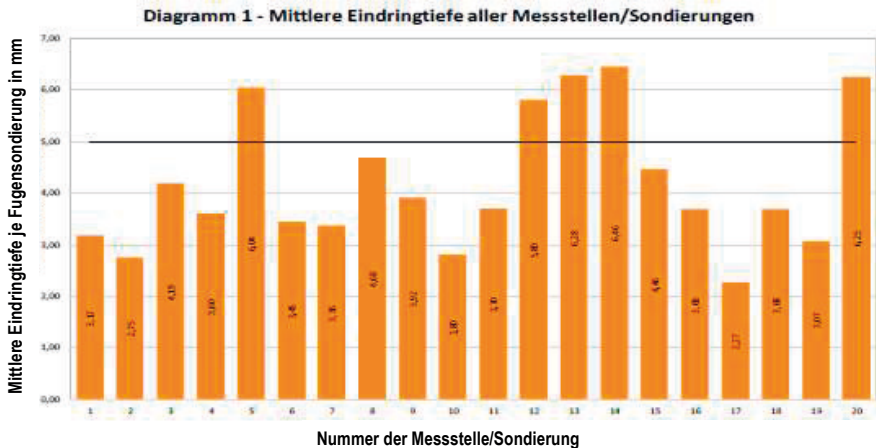


Abbildung 77:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.4.3

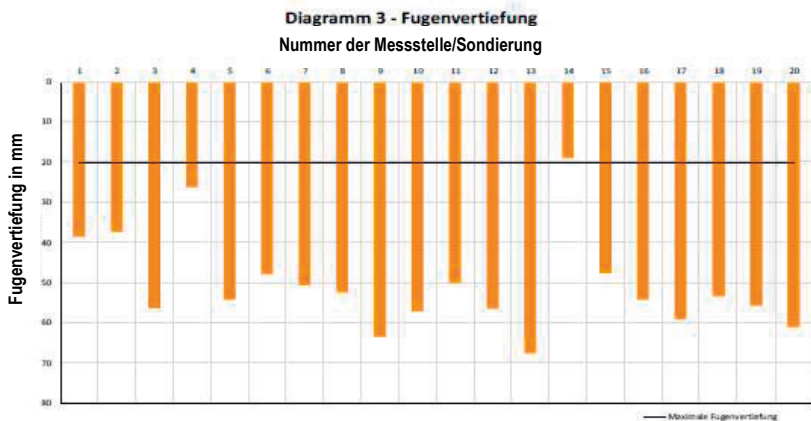
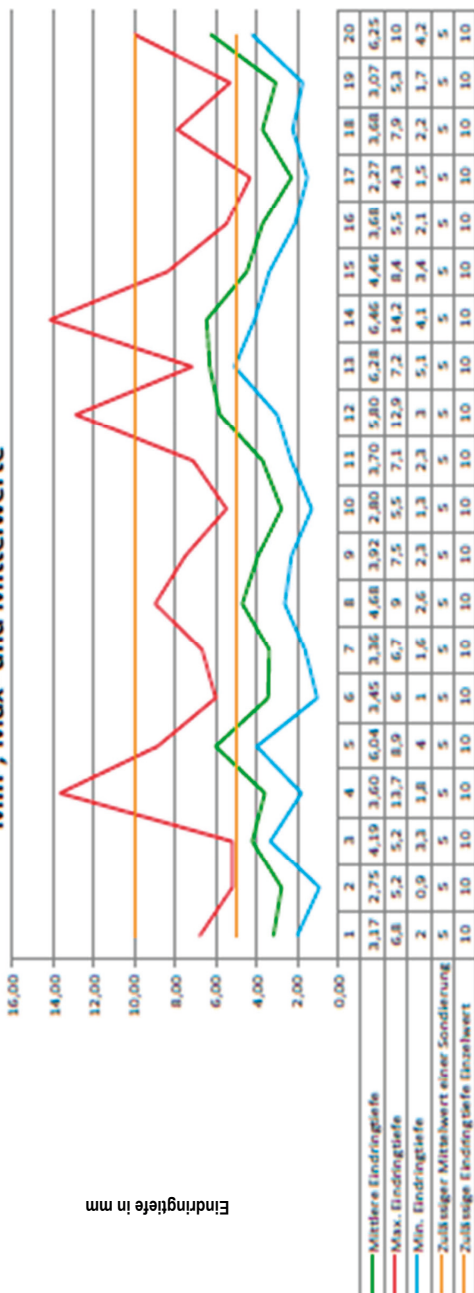


Abbildung 78:

Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.4.3

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 79:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüflinge Nr. 1.4.3 je Sondierstelle dar

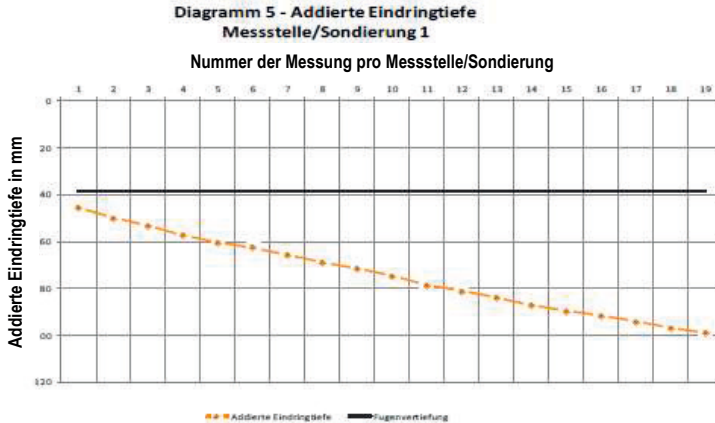


Abbildung 80:

Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.4.3 dar, Sondierstelle S01

Abbildung 78 zeigt für die Prüffläche Nr. 1.4.3 die Fugenvertiefung für die Messstellen. In Abbildung 79 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt. Das ausgewertete Diagramm 5 ist beispielhaft in der Abbildung 80 dargestellt.

#### 3.5.2.2.3.9 Prüffläche Nr. 1.4.4 (Anhang D1.4.4)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird nach Beendigung der Fugensondierungen an der Prüffläche Nr. 1.4.3 (mit Wasserzugabe in die offenen Fugen) durchgeführt. Die Prüffläche wird so lange mit Wasser beaufschlagt bis die Fugen vollständig mit Wasser gefüllt sind. Der Verdichtungsvorgang beginnt, wenn das Wasser nicht mehr sichtbar ist und in das ungebundene Fugenmaterial eingezogen ist. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 14 dargestellt. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Verdichtungsvorgang mit Wasserzugabe bestimmt. Er wird mit 20,06, 20,73, 19,95 und 19,74 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 78 bis 81). Der mittlere Wassergehalt ergibt sich nach Formel 12 mit 20,12 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 81.1).

Bei allen Sondierstellen sind mehr als elf Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S12 in Höhe von 36,80 mm bis zum höchsten Wert 66,80 mm bei S09. In der Spalte *Niedrigstw.* wird der kleinste Wert bei S15 mit -1,00 mm und der höchste Wert mit 2,20 mm bei S11/S20 bestimmt.

In Abbildung 81 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 14 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an allen Messstellen deutlich unterschritten.

In Abbildung 82 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt.

Abbildung 83 zeigt für die Prüffläche Nr. 1.4.4 die Fugenvertiefung für die Messstellen. Das ausgewertete Diagramm 5 ist beispielhaft in der Abbildung 84 dargestellt.

Tabelle 14: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.4

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw.
S 01	4	15	52,30	47,00	7,40	3,30	7,40	3,49	1,60	1,50
S 02	4	16	50,50	48,00	11,50	4,20	11,50	3,16	1,20	2,37
S 03	4	17	51,10	47,30	12,40	4,50	12,40	3,01	1,00	2,57
S 04	4	19	52,60	44,70	9,40	2,90	9,40	2,77	1,40	1,69
S 05	4	21	58,50	39,80	8,70	7,60	8,70	2,79	0,90	2,02
S 06	4	19	46,90	52,60	13,40	3,30	13,40	2,47	0,00	2,81
S 07	4	17	44,50	54,60	6,40	4,00	6,40	2,62	1,20	1,23
S 08	4	21	49,00	49,90	7,50	4,00	7,50	2,33	0,70	1,42
S 09	4	11	32,40	66,80	6,10	3,10	6,10	2,95	1,70	1,18
S 10	4	14	38,10	58,60	7,60	5,10	7,60	2,72	1,40	1,73
S 11	4	14	42,90	54,90	5,60	3,00	5,60	3,06	2,20	0,93
S 12	4	21	61,90	36,80	15,40	3,90	15,40	2,95	0,70	2,97
S 13	4	17	42,00	57,40	8,70	4,50	8,70	2,47	0,40	1,85
S 14	4	21	51,30	47,40	7,70	3,70	7,70	2,44	1,20	1,36
S 15	4	16	35,60	62,80	3,30	2,40	4,40	2,23	-1,00	1,25
S 16	4	19	36,40	60,60	5,10	2,40	5,10	1,92	0,80	1,12
S 17	4	31	47,10	52,40	3,30	2,50	3,30	1,52	0,30	0,70
S 18	4	24	49,00	50,70	5,10	3,50	5,10	2,04	0,00	1,13
S 19	4	22	52,50	46,90	7,80	4,50	7,80	2,39	1,10	1,43
S 20	4	13	46,20	53,10	6,20	4,70	6,20	3,55	2,20	1,09

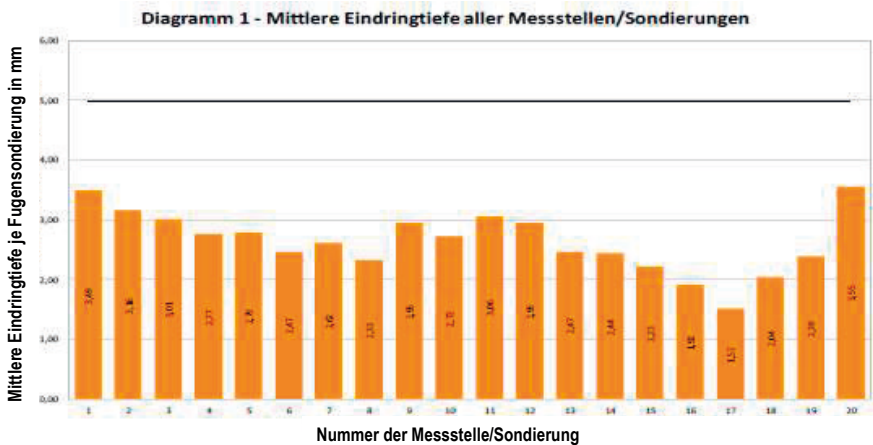
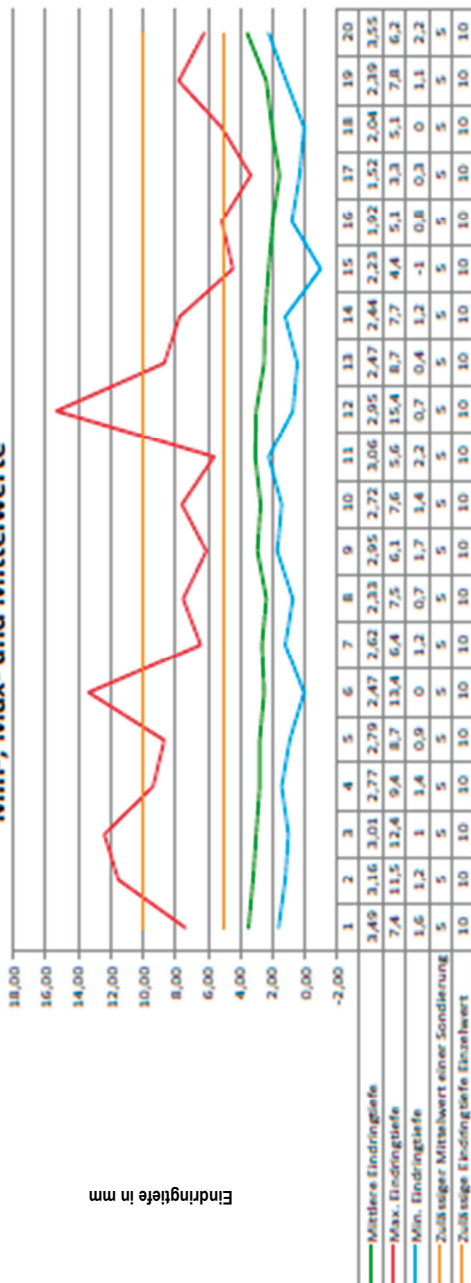


Abbildung 81:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.4.4

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nnummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 82:  
Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen  
für Prüffläche Nr. 1.4.4 je Sondierstelle dar

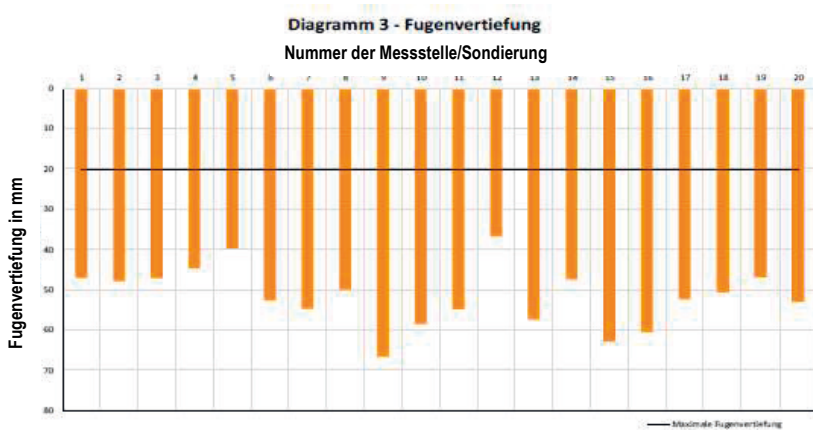


Abbildung 83:  
 Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.4.4

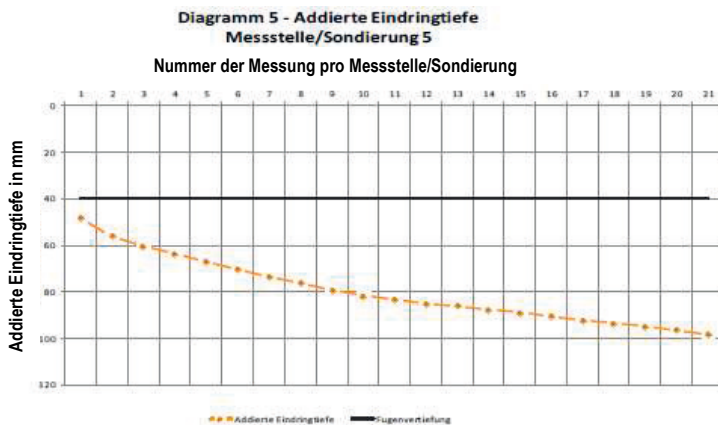


Abbildung 84:  
 Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufrall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.4.4 dar, Sondierstelle S05

### 3.5.2.2.3.10 Prüffläche Nr. 1.5 (Anhang D1.5)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPS1850Hb wird unmittelbar nach dem Einschlämmen des Fugenmaterials durchgeführt. Die einzelnen Messwerte der Fugensondierungen sind in der Tabelle 15 dargestellt. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Verdichtungsverfahren bestimmt. Er wird mit 19,67, 20,68, 20,39 und 21,41 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 90 bis 93). Der mittlere Wassergehalt berechnet sich nach Formel 12 mit 20,54 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 93.1).



Tabelle 15: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.5

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw
S 01	4	10	60,10	36,90	6,80	5,80	6,90	6,01	4,80	0,78
S 02	4	12	62,30	37,20	10,50	6,30	10,50	5,19	3,00	1,87
S 03	4	11	49,50	45,70	7,50	5,40	7,60	4,50	2,90	1,65
S 04	4	16	62,50	33,10	7,10	5,70	7,10	3,91	2,20	1,31
S 05	4	18	57,70	39,50	6,70	3,00	6,70	3,21	1,70	1,22
S 06	4	6	56,00	38,00	21,40	10,60	21,40	9,33	4,10	6,34
S 07	4	11	50,00	45,90	8,20	4,40	8,20	4,55	2,80	1,36
S 08	4	14	53,20	46,40	5,20	4,10	5,70	3,80	2,10	1,13
S 09	4	12	45,60	50,40	5,20	5,80	5,90	3,80	2,10	1,41
S 10	4	4	42,70	50,40	11,60	9,30	11,80	10,68	9,30	1,22
S 11	4	13	67,90	31,50	9,40	8,20	9,40	5,22	3,50	1,76
S 12	4	10	53,40	43,80	8,80	5,40	8,80	5,34	4,20	1,44
S 13	4	8	39,50	57,50	8,70	5,10	8,70	4,94	2,80	1,71
S 14	4	16	46,00	52,50	8,30	4,70	8,30	2,88	1,10	1,76
S 15	4	10	54,10	40,60	10,30	5,90	10,30	5,41	3,20	2,02
S 16	4	12	52,40	45,20	8,10	4,90	8,10	4,37	3,20	1,32
S 17	4	11	60,00	33,70	10,90	4,50	10,90	5,45	3,50	2,08
S 18	4	12	55,60	42,70	7,30	5,50	7,30	4,63	2,60	1,49
S 19	4	13	62,40	37,40	7,10	4,80	7,10	4,80	3,10	0,97
S 20	4	6	45,00	52,70	11,40	7,10	11,40	7,50	4,10	2,62

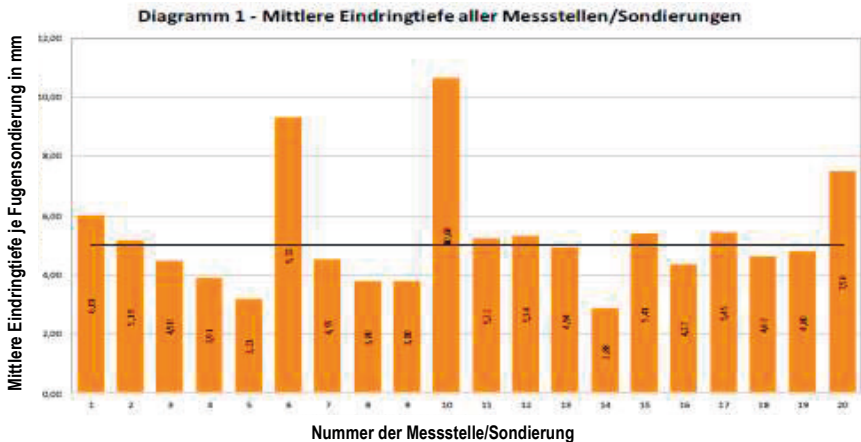
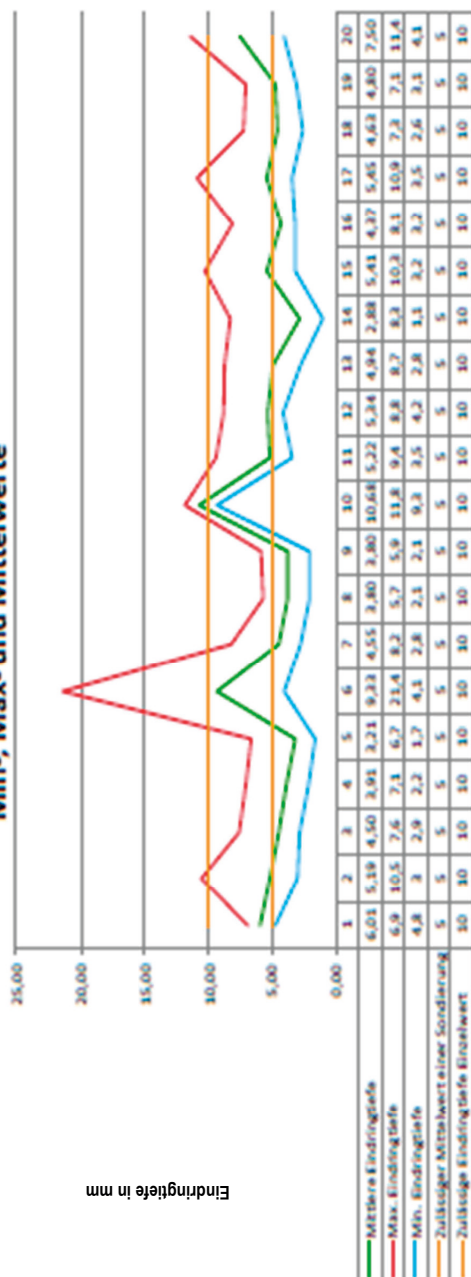


Abbildung 85:  
Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.5



**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 86:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 1.5 je Sondierstelle dar

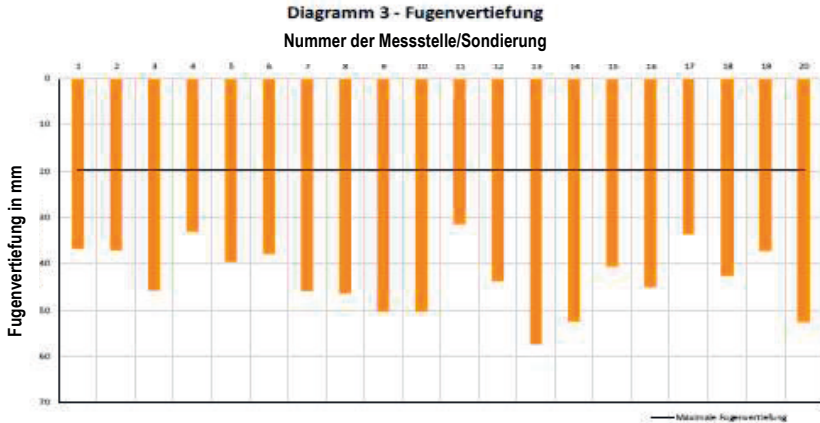


Abbildung 87:  
Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.5

Bei allen Sondierstellen sind mehr als vier Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen erforderlich. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S11 in Höhe von 31,50 mm bis zum höchsten Wert 57,50 mm bei S13. In der Spalte *Niedrigstw.* sind der kleinste Wert bei S14 mit 1,10 mm und der höchste Wert mit 9,30 mm bei S10 bestimmt.

In Abbildung 86 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 15 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an 10 Messstellen unterschritten.

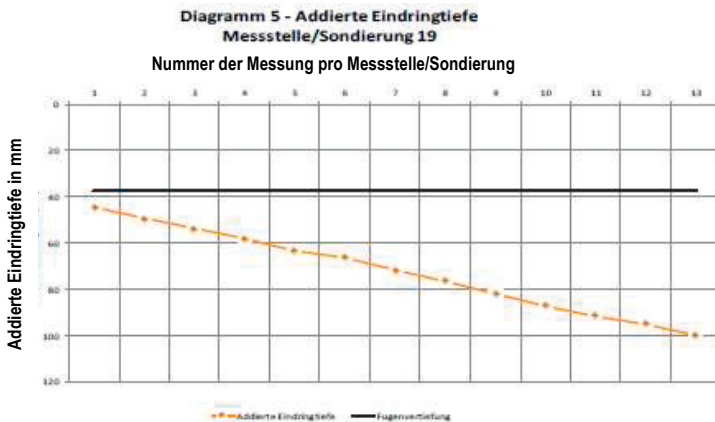


Abbildung 88:  
Das Liniendiagramm für Prüffläche Nr. 1.5 dar, Sondierstelle S19

In Abbildung 86 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt.

Abbildung 87 zeigt für die Prüffläche Nr. 1.5 die Fugenvertiefung für die Messstellen. Das ausgewertete Diagramm 5 ist beispielhaft in der Abbildung 88 dargestellt.

### 3.5.2.2.3.11 Prüffläche Nr. 1.5.1 (Anhang D1.5.1)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird nach Beendigung der Fugensondierungen an Prüffläche Nr. 1.5 (mit Wasserzugabe in die offenen Fugen) durchgeführt. Die einzelnen Messwerte sind in der Tabelle 16 dargestellt. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Verdichtungsvorgang mit Wasserzugabe bestimmt. Er wird mit 18,86, 21,86, 21,03 und 22,28 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 102 bis 105). Der mittlere Wassergehalt berechnet sich nach Formel 12 mit 21,01 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 105.1).

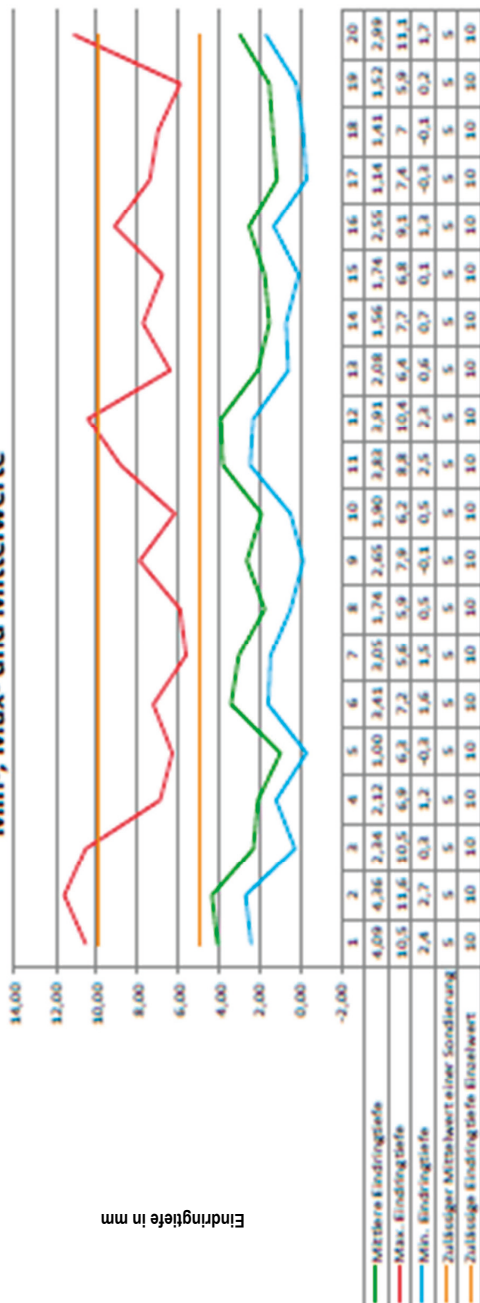
Bei allen Sondierstellen sind mindestens 13 Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S04 in Höhe von 34,10 mm bis zum höchsten Wert 58,90 mm bei S10. In der Spalte *Niedrigstw.* wird der kleinste Wert bei S05/S17 mit -0,30 mm und der höchste Wert mit 2,70 mm bei S02 bestimmt.

In Abbildung 89 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen, in Abbildung 90 die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 16 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an allen Messstellen unterschritten.

Tabelle 16: Darstellung der Messwerte Prüffläche Nr. 1.5.1

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstsw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw.
S 01	4	13	53,20	45,40	10,50	5,60	10,50	4,09	2,40	2,09
S 02	4	13	56,70	40,70	11,60	4,10	11,60	4,36	2,70	2,26
S 03	4	21	49,20	47,40	10,50	3,90	10,50	2,34	0,30	2,06
S 04	4	31	65,70	34,10	6,90	2,20	6,90	2,12	1,20	1,02
S 05	4	54	54,00	43,80	6,30	3,00	6,30	1,00	-0,30	1,15
S 06	4	15	51,20	46,40	7,20	4,20	7,20	3,41	1,60	1,67
S 07	4	15	45,80	50,60	5,60	3,60	5,60	3,05	1,50	0,96
S 08	4	29	50,60	49,40	5,90	3,20	5,90	1,74	0,50	1,08
S 09	4	17	45,10	53,60	7,90	3,80	7,90	2,65	-0,10	1,77
S 10	4	21	40,00	58,90	6,20	5,00	6,20	1,90	0,50	1,38
S 11	4	13	49,80	50,00	8,80	4,20	8,80	3,83	2,50	1,64
S 12	4	13	50,80	46,10	10,40	5,50	10,40	3,91	2,30	2,20
S 13	4	21	43,60	56,30	6,40	4,20	6,40	2,08	0,60	1,46
S 14	4	28	43,60	55,40	7,70	2,70	7,70	1,56	0,70	1,35
S 15	4	30	52,30	47,60	6,80	4,60	6,80	1,74	0,10	1,45
S 16	4	20	50,90	48,40	9,10	3,30	9,10	2,55	1,30	1,63
S 17	4	51	58,30	38,90	7,40	1,90	7,40	1,14	-0,30	1,16
S 18	4	37	52,00	47,40	7,00	4,60	7,00	1,41	-0,10	1,28
S 19	4	36	54,80	43,90	5,90	1,50	5,90	1,52	0,20	1,00
S 20	4	15	44,90	53,20	11,10	3,50	11,10	2,99	1,70	2,31

**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nnummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 89:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 1.5:1 je Sondierstelle dar

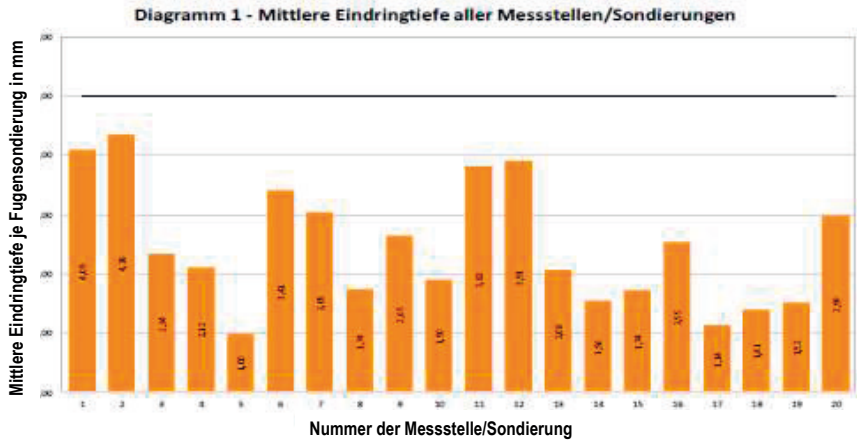


Abbildung 90:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.5.1

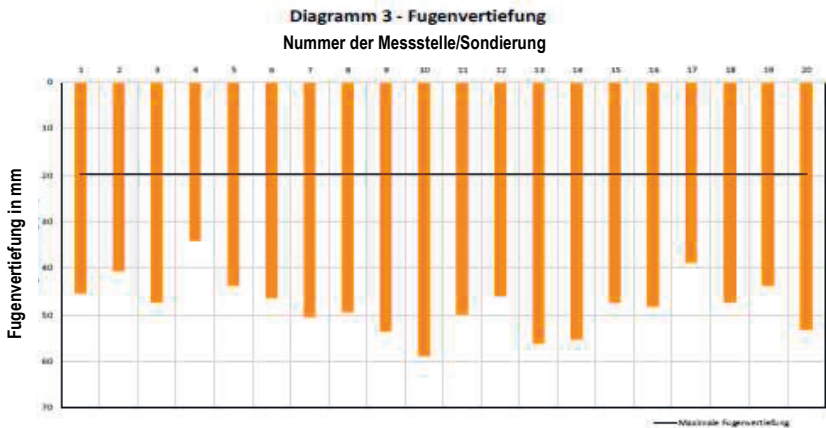


Abbildung 91:

Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.5.1

Abbildung 91 zeigt auf der Ordinate die Fugenvertiefung und auf der Abszisse die Anzahl der Messstellen.

Technisch ist die Fugenvertiefung bei Prüffläche Nr. 1.5.1 abweichend zu Prüffläche Nr. 1.5 bewertet. Durch die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird eine erneute Kornumlagerung und damit ein Absacken des Fugenmaterials gegenüber dem Verdichtungsvorgang mit der Rüttelplatte DPS1850Hb erzeugt. Ein Großteil der Fugenvertiefung ist auf eine im oberen Fugenbereich entleerte Fuge aufgrund Kornumlagerung zurückzuführen.

Für die Prüffläche Nr. 1.5.1 wird beispielhaft in der Abbildung 92 das ausgewertete Diagramm 5 dargestellt.

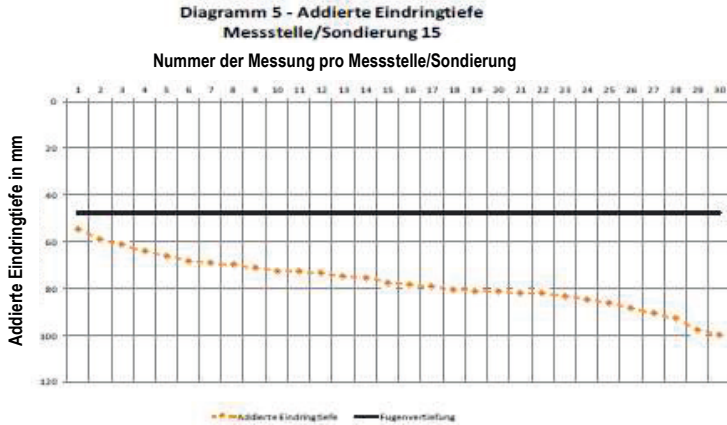


Abbildung 92:  
Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.5.1 dar, Sondierstelle S15

Tabelle 17: Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.6

Messstelle	Fugenbreite	Anzahl	Sondiertiefe	FugV	Wert1	Wert2	Höchstsw.	Mittelw.	Niedrigstw.	StdAbw
S 01	4	7	48,30	44,20	10,60	5,90	10,60	6,90	4,60	1,99
S 02	4	5	36,30	57,30	8,90	6,80	8,90	7,26	6,80	0,92
S 03	4	7	39,80	57,50	11,00	5,50	11,00	5,69	3,60	2,44
S 04	4	9	48,20	43,40	8,70	5,70	8,70	5,36	3,40	1,61
S 05	4	13	41,40	56,10	8,00	6,80	8,00	3,18	-0,20	2,30
S 06	4	5	36,70	61,50	8,10	5,60	10,70	7,34	5,60	2,12
S 07	4	6	45,70	50,60	9,90	5,00	12,70	7,62	4,30	3,38
S 08	4	8	45,90	49,50	9,20	5,40	9,20	5,74	3,90	1,68
S 09	4	14	48,70	50,70	7,00	2,20	7,00	3,48	2,20	1,21
S 10	4	6	39,20	55,00	9,20	5,80	9,20	6,53	4,80	1,64
S 11	4	12	48,70	50,40	8,60	5,10	8,60	4,06	2,90	1,60
S 12	4	12	51,70	48,30	7,50	5,80	7,50	4,31	2,70	1,62
S 13	4	7	42,60	50,90	9,70	4,40	9,90	6,09	3,50	2,69
S 14	4	15	51,60	44,70	7,50	3,50	7,50	3,44	2,30	1,32
S 15	4	14	48,70	49,30	6,50	2,10	6,50	3,48	2,00	1,25
S 16	4	11	50,70	48,20	9,40	4,10	9,40	4,61	2,10	1,91
S 17	4	16	61,90	36,70	8,30	4,00	8,30	3,87	2,70	1,31
S 18	4	13	46,30	51,60	7,40	4,50	7,40	3,56	1,20	1,89
S 19	4	10	55,20	41,10	8,50	6,30	9,00	5,52	3,30	1,92
S 20	4	10	49,60	47,50	9,20	6,40	9,20	4,96	3,00	1,96

## 3.5.2.2.3.12 Prüffläche Nr. 1.6 (Anhang D1.6)

Die Verdichtung mit der Rüttelplatte DPU4545He wird unmittelbar nach dem Einschlämmen des Fugenmaterials durchgeführt. Die einzelnen Messwerte der Fugensondierungen sind in der Tabelle 17 dargestellt. Der Wassergehalt wird direkt nach dem Verdichtungsvorgang bestimmt. Er wird mit 18,52, 20,83, 23,32 und 21,60 M.-% ermittelt (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 114 bis 117). Der mittlere Wassergehalt berechnet sich nach Formel 12 mit 21,07 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 117.1).

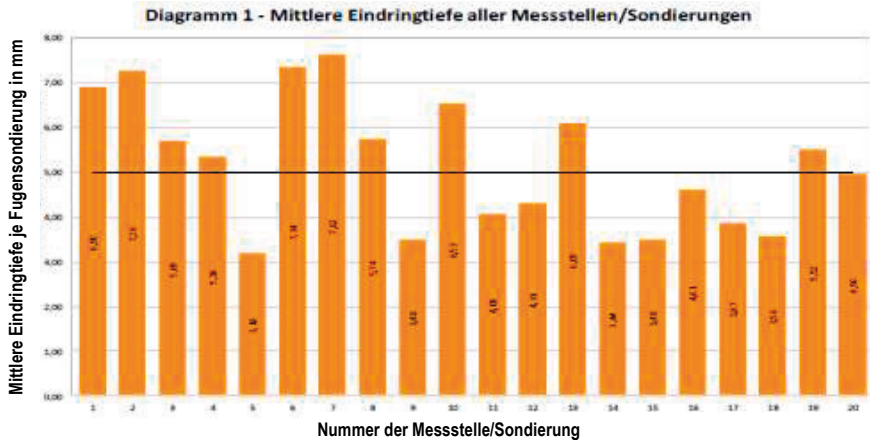


Abbildung 93:

Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.6

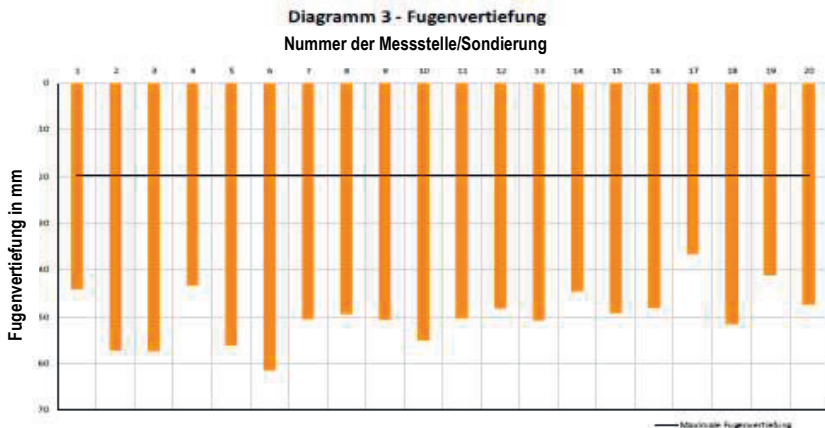
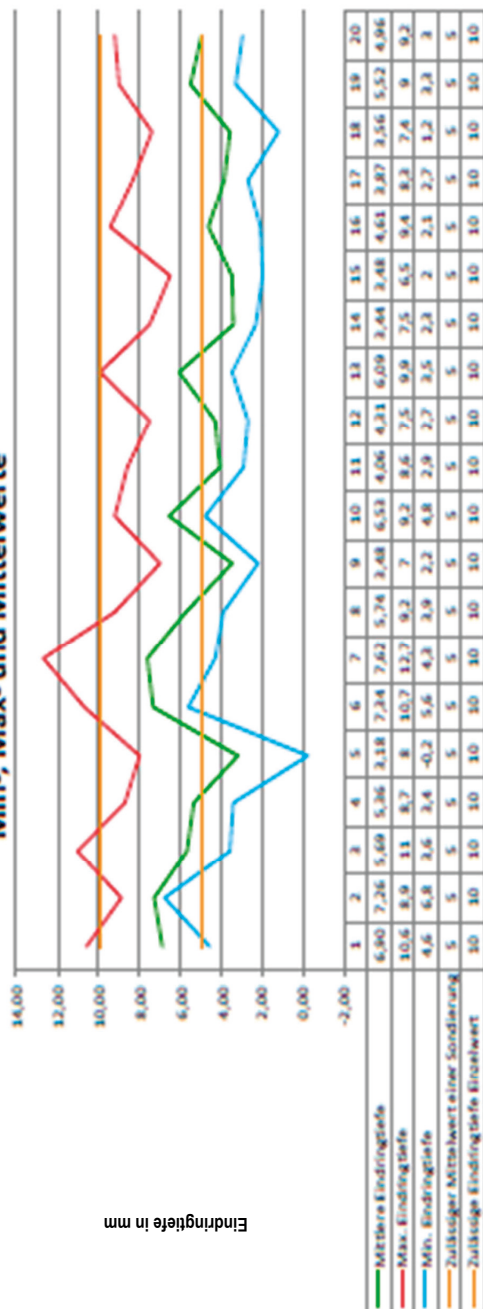


Abbildung 94:

Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.6



**Diagramm 2 - Eindringtiefe je Messstelle im Vergleich  
Min-, Max- und Mittelwerte**



Nummer der Messstelle/Sondierung

Abbildung 95:

Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 1.6 je Sondierstelle dar



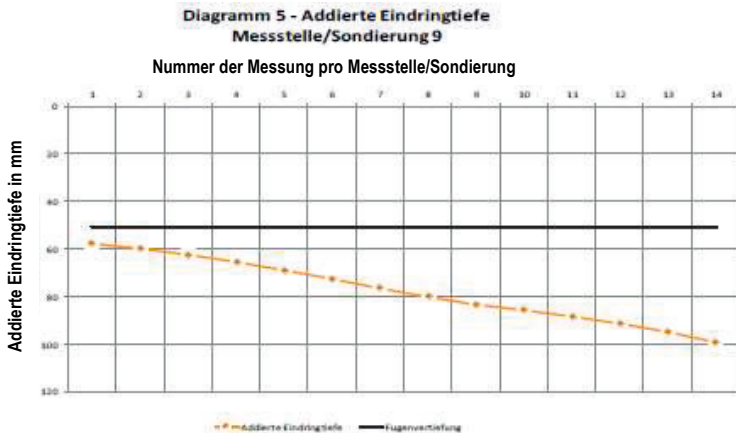


Abbildung 96:

Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.6 dar, Sondierstelle S09

Bei allen Sondierstellen sind mindestens fünf Aufpralle auf der Grundplatte zum vollständigen Durchdringen der Fugen notwendig. Die Fugenvertiefung (Spalte *FugV*) variiert mit dem geringsten Wert bei S17 in Höhe von 36,70 mm bis zum höchsten Wert 61,50 mm bei S06. In der Spalte *Niedrigstw.* ist der kleinste Wert bei S05 mit -0,20 mm und der höchste Wert mit 6,80 mm bei S02 bestimmt.

In Abbildung 93 sind die mittleren Eindringtiefen der Sondierstellen als Balkendiagramm dargestellt. Die auf der Ordinate befindlichen Werte der mittleren Eindringtiefe finden sich in Tabelle 17 in der Spalte *Mittelw.* wieder. Der horizontale schwarze Strich mit einer mittleren Eindringtiefe von 5 mm wird an 10 Messstellen deutlich unterschritten.

Abbildung 94 zeigt auf der Ordinate die Fugenvertiefung und auf der Abszisse die Messstellen. In Abbildung 95 sind die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen dargestellt. Für die Prüffläche Nr. 1.6 wird beispielhaft in der Abbildung 96 das ausgewertete Diagramm 5 dargestellt.

#### 3.5.2.2.4 Auswertung der Messwerte der durchgeführten Fugensondierungen bei Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4

Im vorherigen Abschnitt 3.5.2.2.3 sind die einzelnen Messwerte der durchgeführten Sondierungen je hergestellter Prüffläche am Beispiel der unterschiedlichen Prüfflächen Nr. 1 aufgezeigt. Die verschiedenen, durch die Auswertung der Fugensondierungen gemessenen Parameter werden in diesem Abschnitt aufgeführt und diskutiert. Folgende Aspekte der durchgeführten Fugensondierungen werden betrachtet:

- Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte (Anhang E1.1)
- Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe (Anhang E1.2)
- Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung (Anhang E1.3)
- Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen (Anhang E1.4 und Anhang E1.7)
- Vergleich der Messdaten der Standardabweichung (Anhang E1.5)

Tabelle 18: Darstellung der Prüfflächen mit der Bezeichnung der verwendeten Rüttelplatte und der Anzahl der Verdichtungsvorgänge

Verdichtung	Prüffläche Nr. 1.4.1	Prüffläche Nr. 1.4.2	Prüffläche Nr. 1.4.3	Prüffläche Nr. 1.4.4
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Bezeichnung der verwendeten Rüttelplatte	DPS1850Hb	DPU4545He	DPS1850Hb	DPU4545He
Anzahl der Verdichtungsvorgänge	3	6	9	12

Aus Tabelle 18 sind zur Verdeutlichung die Bezeichnungen der verwendeten Rüttelplatten und die Anzahl der Verdichtungsvorgänge bei der jeweiligen Prüffläche zu entnehmen.

#### 3.5.2.2.4.1 Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte (Anhang E1.1)

Zur Beurteilung der Anzahl der Schläge auf der Grundplatte werden diese bei den Prüfflächen Nr. 1.4.1 auf 1.4.4 gegenübergestellt. Aus Abbildung 97 (Auszug aus Anhang E1.1) ist die Erhöhung der Anzahl der Schläge auf die Grundplatte bis zur vollständigen Durchdringung der Sondiernadel auf gesamter Fugenhöhe zu entnehmen.

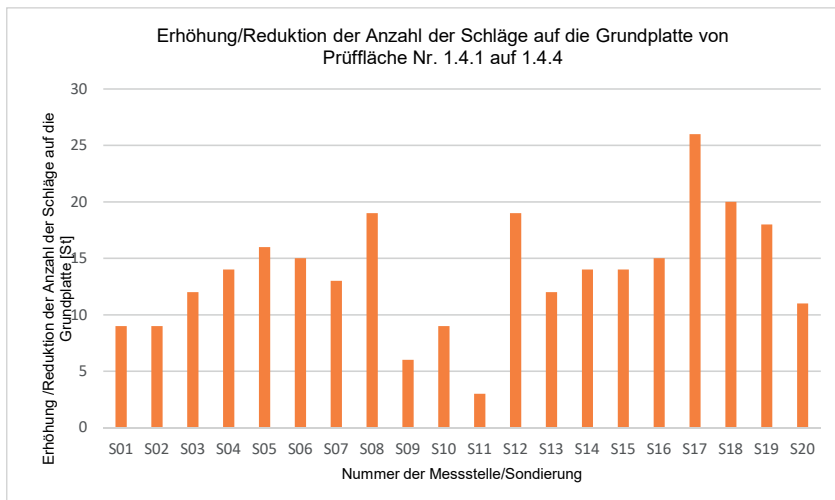


Abbildung 97:  
Das Balkendiagramm zeigt die Anzahl der Erhöhung Schläge auf die Grundplatte von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4

Die vergleichenden Werte zeigen eine deutliche Erhöhung der Schläge auf die Grundplatte. Die geringste Zunahme ist an der Sondierstelle S11 mit einer Zunahme von 3 Schlägen und die höchste Zunahme bei S17 mit einer Zunahme von 26 Schlägen festzustellen.

Die Erhöhung der Schlagzahlen bei Prüffläche Nr. 1.4.4 zu 1.4.1 weist eine Zunahme des Eindringwiderstandes und damit eine dichtere Lagerung des Fugenmaterials gegenüber der Prüffläche Nr. 1.4.1 auf. In Abbildung 115 auf Seite 109 ist sichtbar, dass die Fuge nach dem Verdichtungsvorgang nicht vollständig gefüllt ist. Nach dem Einschlämmen des Fugenmaterials wird durch die Verdichtungsvorgänge eine Kornumlagerung erzeugt, die eine dichtere Lagerung des Fugenmaterials mit dem Ergebnis von Absackungen des Fugenmaterials zur Folge hat. Die Anzahl der Schläge auf die Grundplatte sind von der Lagerungsdichte des Fugenmaterials und von der Sondiertiefe abhängig.

### 3.5.2.2.4.2 Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe (Anhang E1.2)

Abbildung 98 (Auszug aus Anhang E1.2) zeigt unterschiedliche Sondiertiefen der einzelnen Messstellen.

Es liegen unterschiedliche Sondiertiefen bei Prüffläche Nr. 1.4.1 und bei Prüffläche Nr. 1.4.4 vor. Bei Prüffläche Nr. 1.4.1 beträgt der geringste Wert der Sondiertiefe 17,80 mm an der Sondierstelle S07 und der höchste Werte 62,10 mm an der Sondierstelle S06. Bei der Prüffläche Nr. 1.4.4 belaufen sich der geringste Wert der Sondiertiefe mit 32,40 mm an Sondierstelle S09 und der höchste Wert 61,90 mm an S12. Der durchgeführte Einschlammvorgang zum ersten Füllen der Fugen und die durchgeführten Verdichtungsvorgänge sind für eine vollständige Verfüllung der Fuge nicht ausreichend. Nach dem Einschlammvorgang sind die Fugen bis zur Oberkante visuell gefüllt. Ob Hohlräume im Fugenquerschnitt vorliegen, kann durch die visuelle Betrachtung nicht beurteilt werden.

In Abbildung 99 ist die vorhandene Veränderung der Sondiertiefe von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf Prüffläche Nr. 1.4.4 sichtbar. Die Sondiertiefe beinhaltet messtechnisch die Höhe der ungebundenen Fuge, die durch Anheben und Fallenlassen des Gewichts durchdrungen wird. Die größte Reduktion der Sondiertiefe findet bei S06 mit -15,20 mm und die größte Erhöhung bei S05 mit 30,50 mm statt.

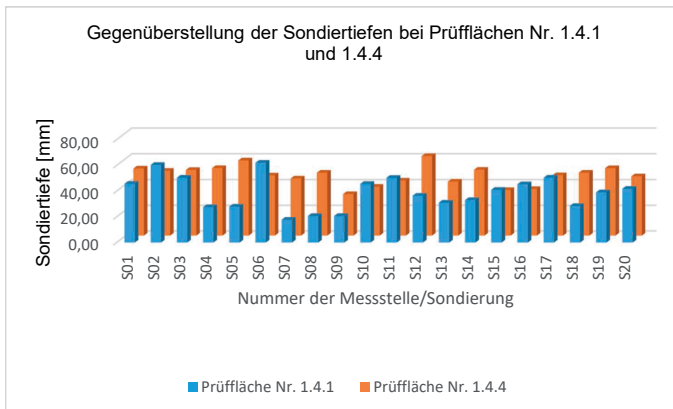


Abbildung 98:  
Das Balkendiagramm zeigt die Gegenüberstellung der Sondiertiefen  
bei Prüfflächen Nr. 1.4.1 und 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.2)

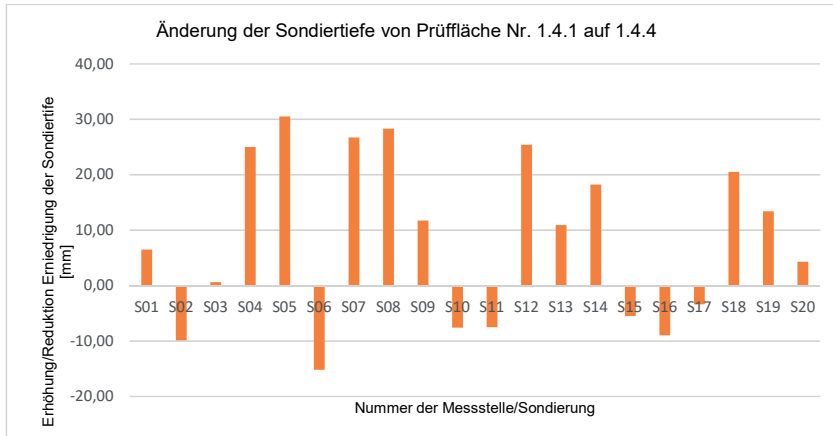


Abbildung 99:  
Das Balkendiagramm stellt die Veränderung der Sondiertiefe von  
Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.2) dar

Es wird festgestellt, dass es bei sämtlichen Prüfflächen durch die Verdichtungsvorgänge zur Veränderung der Sondiertiefe gekommen ist.

Durch die Verdichtungsvorgänge erzeugte Kornumlagerungen erzielen eine dichtere Lagerung des Fugenmaterials und demnach einen erhöhten Eindringwiderstand. Es können aber auch auflockernde Effekte erzeugt werden. Freiliegende Gesteinskörner können im oberflächennahen Bereich ausweichen, sodass hierdurch bereits ein unterschiedliches Setzen des ungebundenen Fugenmaterials stattfinden kann. Weiterhin können durch die Verdichtungsvorgänge auch Kornumlagerungen dahingehend stattfinden, dass größere Gesteinskörner feinere Gesteinskörner verdrängen oder umgekehrt. Dadurch kann es grundsätzlich und in Abhängigkeit des Korndurchmessers vom Fugenmaterial zur Erhöhung oder Reduktion der Sondiertiefe kommen. Die übrigen Veränderungen der Sondiertiefe nach Erstellung der einzelnen Probeflächen finden sich im Anhang E1.2.

#### 3.5.2.2.4.3 Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung (Anhang E1.3)

In Abbildung 100 ist die vorhandene Veränderung der Fugenvertiefung von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf Prüffläche Nr. 1.4.4 sichtbar.

Bei dem Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung verhält es sich hinsichtlich der Änderung der Messdaten analog zu dem Vergleich der Sondiertiefe. Der Unterschied ist, dass die Fugenvertiefung durch Eindringen des Eigengewichtes der Prüfvorrichtung der Fugensonde ohne das Auslösen eines Schlages auf die Grundplatte bestimmt wird. Es handelt sich somit um einen gegenüber der Sondiertiefe abweichenden Messwert. Die größte Reduktion der Fugenvertiefung findet bei S05 mit -27,90 mm und die größte Erhöhung bei S06 mit 20,90 mm statt. Es wird festgestellt, dass es bei sämtlichen Prüfflächen durch die Verdichtungsvorgänge zur Veränderung der Fugenvertiefung gekommen ist. Die Reduktion der Fugenvertiefung kann entweder durch ein Ausweichen oberflächennaher Gesteinskörner eintreten oder eine durch die Kornumlagerung erzeugte Absackung des Fugenmaterials erhöht den nicht verfüllten Fugenquerschnitt. Die übrigen Veränderungen der Sondiertiefe nach Erstellung der einzelnen Probeflächen finden sich im Anhang E1.3.

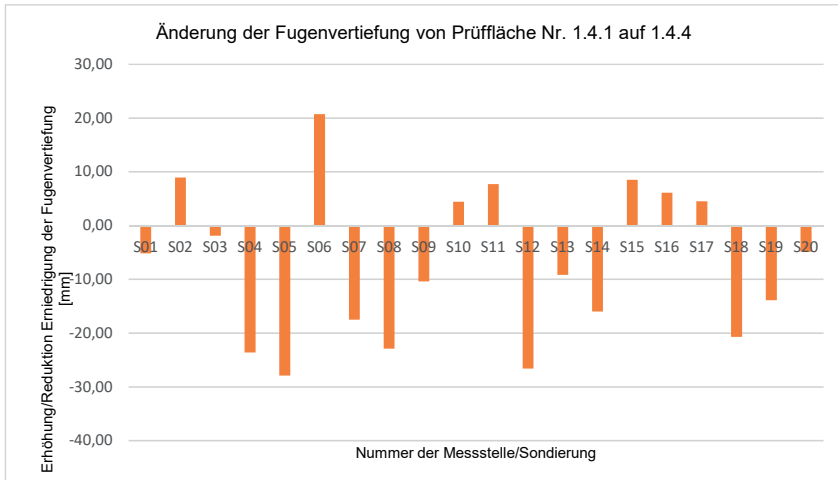


Abbildung 100:  
Das Balkendiagramm zeigt die Veränderung der Fugenvertiefung  
von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.3)

Eine Reduktion der Fugenvertiefung (z.B. S04 und S05 in Abbildung 100) hat in der Regel eine Steigerung der Sondiertiefe (z.B. S04 und S05 in Abbildung 99) mit der Folge einer besseren Lagerungsdichte in der Fuge zur Folge. Die Verdichtungsvorgänge erzeugen eine Verbesserung der Lagerungsdichte, sodass ein Eindringen der Sondiernadel aufgrund eines größeren Widerstandes schwer möglich ist.

Es ist eine Erhöhung der Schlagzahlen (vgl. Abbildung 97) von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4 zu verzeichnen. Die beschriebene Kornumlagerung durch Reduzierung des inneren Reibungswiderstandes des Fugenmaterials sowie der Reibung zwischen Steinseitenfläche und Fugenmaterial sind hierfür maßgebend. Die geringste Erhöhung der Anzahl der Schläge um 3 Stück wird bei S11 (vgl. Abbildung 97, Anhang E1.1) festgestellt. Die Sondiertiefe bei S11 der Prüffläche Nr. 1.4.1 beträgt 50,40 mm (vgl. Anhang E1.2, Anhang D1.4.1) bei einer Anzahl von 11 Schlägen auf die Grundplatte (vgl. Anhang E1.1, Anhang D1.4.1). Die relative geringe Erhöhung um 3 Schläge ist somit auf eine bereits gute Lagerungsdichte des Fugenmaterials bei Herstellung der Prüffläche Nr. 1.4.1 (vgl. Tabelle 11 und Abbildung 67) zurückzuführen.

#### 3.5.2.2.4.4 Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen (Anhang E1.4 und Anhang E1.7)

In Abbildung 101 (Auszug aus Anhang E1.4) ist die Reduktion des Mittelwertes von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4 je Sondierstelle dargestellt.

Bei allen Messstellen ist aufgrund der erhöhten Lagerungsdichte eine deutliche Reduktion des Mittelwertes festzustellen. Die geringste Reduktion ist bei Sondierstelle S09 mit -1,19 mm und die höchste Reduktion bei Sondierstelle S15 mit -18,32 mm zu verzeichnen.

Die durchgeführten Untersuchungen ergeben, dass die geringsten Eindringtiefen der Sondiernadel der Fugensonde bei Prüffläche Nr. 1.4.4 zu verzeichnen sind. Der bei der Prüffläche Nr. 1.4.4 festgestellte Wassergehalt von i.M. von 20,12 M.-% in Verbindung mit dem Einsatz der Rüttelplatte DPU4545He

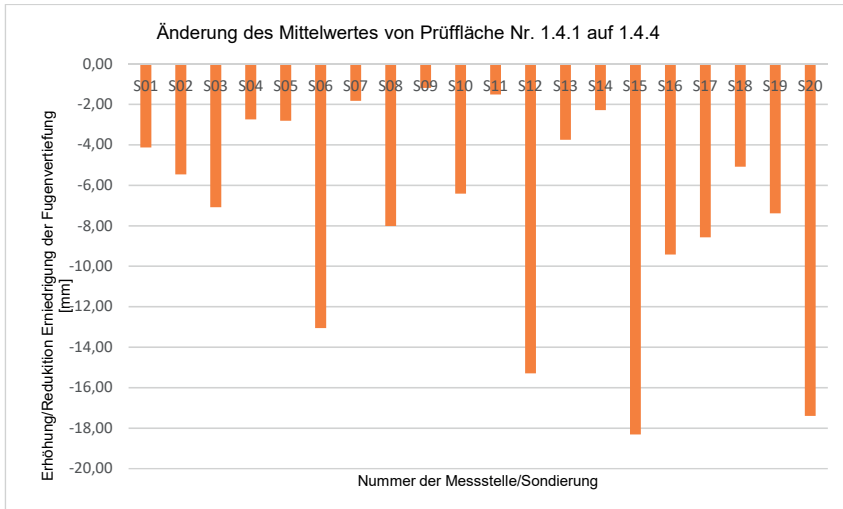


Abbildung 101:  
Das Balkendiagramm zeigt die Erhöhung des Mittelwertes von  
Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.4) je Sondierstelle

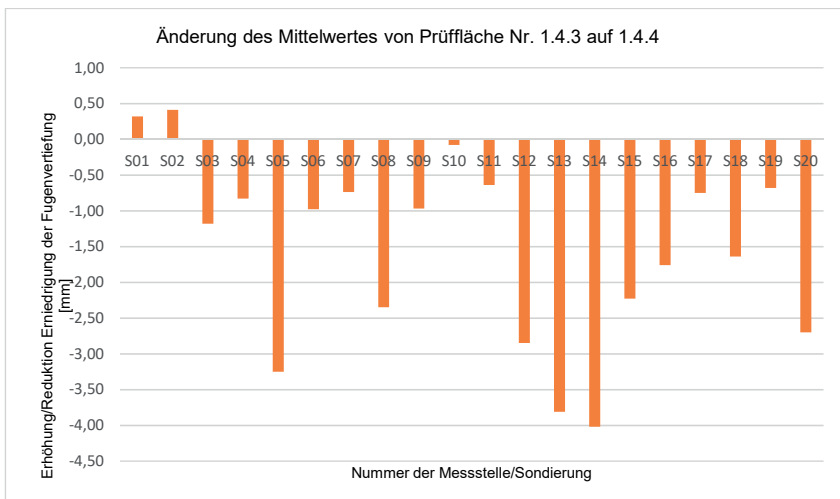


Abbildung 102:  
Das Balkendiagramm stellt die Erhöhung des Mittelwertes von  
Prüffläche Nr. 1.4.3 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.4) dar

ermöglicht die Herabsetzung der inneren Reibung des Fugenmaterials und der Reibung zwischen Steinseitenfläche und Fugenmaterial. Dadurch wird eine optimale Anfangsstabilität bzw. Lagerungsdichte der ungebundenen Fuge bei der Herstellung erzeugt. Die dokumentierte Reduktion der Eindringtiefe der Sondiernadel von Prüffläche Nr. 1.4.3 mit einem mittleren Wassergehalt von 20,98 M.-% auf Prüffläche Nr. 1.4.4 mit einem mittleren Wassergehalt von 20,12 M.-% bei Durchführung der Verdichtung ist Abbildung 102 (vgl. Abbildung 77 und 81) zu entnehmen.

Mit Ausnahmen der Sondierstellen S01 und S02 sind gegenüber der Verdichtung mit einer Rüttelplatte DPS1850Hb bei Einsatz der Rüttelplatte DPU4545He Reduktionen der Eindringtiefen festzustellen.

Die Verdichtung ungebundener Pflasterdecken und Plattenbeläge mit einem „entsprechenden“ Wassergehalt des Fugenmaterials zur Erzeugung der notwendigen Kornumlagerung ist erforderlich. Die Folge ist eine im Rahmen der Herstellung hinreichende Lagerungsdichte und damit verbunden eine hinreichende Anfangsstabilität unmittelbar nach der Herstellung. Wird Fugenmaterial eingefegt und/oder eingeschlämmt, können die Fugen nicht vollständig gefüllt werden. Zudem ist dann eine sehr lockere Lagerung des Fugenmaterials (vgl. Prüffläche 1.4, Tabelle 10, Spalte *Anzahl*) vorhanden, sodass Lasten (vgl. Tabelle 2) nicht sicher abgetragen werden können.

Tabelle 19: Mittelwerte der Fugensondierungen für Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 je Sondierstelle sowie Mittelwert aller Sondierstelle je Prüffläche

Sondier- stelle Nr.	Prüffläche Nr. 1.4.1	Prüffläche Nr. 1.4.2	Prüffläche Nr. 1.4.3	Prüffläche Nr. 1.4.4
	Anhang D1.4.1	Anhang D1.4.2	Anhang D1.4.3	Anhang D1.4.4
	Mittlere Eindringtiefe der Fugensondierungen je Sondierstelle [mm]			
S01	7,63	7,67	3,17	3,49
S02	8,63	4,82	2,75	3,16
S03	10,10	5,21	4,19	3,01
S04	5,52	3,40	3,60	2,77
S05	5,60	3,99	6,04	2,79
S06	15,53	7,40	3,45	2,47
S07	4,48	5,67	3,36	2,62
S08	10,35	4,10	4,68	2,33
S09	4,14	4,60	3,92	2,95
S10	9,14	6,70	2,80	2,72
S11	4,58	5,22	3,70	3,06
S12	18,25	5,05	5,80	2,95
S13	6,22	4,22	6,28	2,47
S14	4,73	5,50	6,46	2,44
S15	20,55	5,10	4,46	2,23
S16	11,35	5,13	3,68	1,92
S17	10,10	3,61	2,27	1,52
S18	7,12	4,83	3,68	2,04
S19	9,78	3,97	3,07	2,39
S20	20,98	4,19	6,25	3,35
Mittel- wert	9,74	5,02	4,18	2,64

Durch die lockere Lagerung nimmt das Fugenmaterial bei Regenwetter Wasser auf. Durch die Wasseraufnahme kommt es im Betrieb zur Herabsetzung der beschriebenen Reibung im Fugenmaterial und zwischen Stein und Fugenmaterial. Durch das Überfahren der Verkehrsflächen mit Kraft- und/oder Schwerverkehrsfahrzeugen lösen die dynamischen Lasten bei lockerer Lagerungsdichte des Fugenmaterials eine Kornumlagerung aus, mit dem Ergebnis des Absackens des Fugenmaterials. Die Prüfflächen Nr. 1.4.1 und 1.4.4 (vgl. Abbildung 67 und 81) zeigen exemplarisch durch die ausgeführten Verdichtungsvorgänge ein signifikantes Nachverdichtungspotential ungebundener Fugen. Ist das Fugenmaterial sehr locker gelagert und die Steine sind nicht hinreichend gehalten, kann Fugenmaterial dadurch auch vollständig unter den Stein wandern. Bei Fugenmaterial mit vielen Feinanteilen ( $< 0,063 \text{ mm}$ ) können sich diese auf der Bettungsoberschicht absetzen und zudem die Wasserdurchlässigkeit der Bettung deutlich reduzieren bis ganz verhindern (vgl. Abbildung 25 und 27).

In Tabelle 19 (Auszug aus Anhang E1.7) sind die Mittelwerte der Fugensondierungen der Prüffläche Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 aufgeführt. Die farbliche Darstellung der Sondierstellen und der Messwerte sind analog zu den einzelnen Sondierstellen zu den in Abbildung 52 farblich gekennzeichneten unterschiedlichen Arten von Fugen aufgeführt.

Der höchste Mittelwert einer Prüffläche ist im Farbton gelb markiert. Die fünf untersten Werte sind im Farbton grau hinterlegt. Bei den Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 kann keine einheitliche Reduzierung des Mittelwertes in Abhängigkeit von Stirnfuge „vertikal“ (Farbton blau), Längsfuge (Farbton grün), Stirnfuge „horizontal“ (Farbton pink) und Längsfugen „diagonal“ (Farbton schwarz) festgestellt werden. Bei Prüffläche Nr. 1.4.4 liegt der höchste Mittelwert in Höhe von 3,55 mm bei Sondierstelle S20 (Stirnfuge „horizontal“) vor; der niedrigste Mittelwert findet sich bei der Sondierstelle S17 (Stirnfuge „vertikal“) in Höhe von 1,52 mm. Auffällig ist, dass sich die ersten fünf niedrigsten Werte am hochliegenden Rand der Prüffläche Nr. 1.4.4 befinden. Bei den übrigen Prüfflächen Nr. 1 kann dieser Sachverhalt nicht festgestellt werden; es sind keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen festgestelltem Mittelwert der durchgeführten Fugensondierung und der Art der Fuge herzustellen.

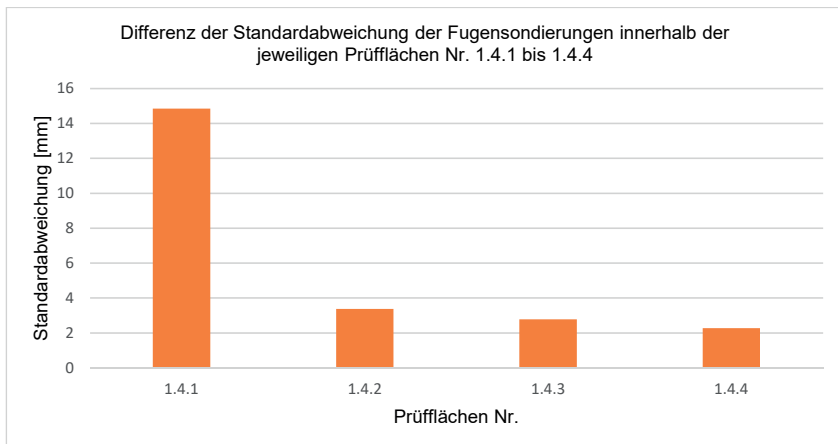


Abbildung 103:  
Das Balkendiagramm veranschaulicht die Differenz der Standardabweichung innerhalb der jeweiligen Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.5)



### 3.5.2.2.4.5 Vergleich der Messdaten der Standardabweichung (Anhang E1.5)

In Abbildung 103 (Auszug aus Anhang E1.5) ist die Differenz der Standardabweichung der Fugensondierungen innerhalb der einzelnen Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 dargestellt.

Die Differenz Standardabweichung innerhalb der Prüfflächen sinkt von Prüffläche Nr. 1.4.1 bis 1.4.4. Durch die Verdichtungsvorgänge, insbesondere mit der Rüttelplatte DPU4545He, wird eine Kornumlagerung des Fugenmaterials erzwungen, sodass die einzelnen Standardabweichungen gegenüber der Prüffläche Nr. 1.4.1 deutlich sinken und eine einheitliche Eindringtiefe bei allen 20 Sondierstellen erzielt wird.

### 3.5.2.3 Beurteilung der Fugensondierungen unter Betrachtung der Proctordichte

Die Bestimmung der Proctordichte  $D_{Pr}$  nach DIN 18127 und damit des optimalen Wassergehaltes  $W_{Pr}$  zur Verdichtung der eingesetzten Fugenmaterialien ist für die Prüfflächen Nr. 1 bis 6<sup>16</sup> im Anhang C7 enthalten. Aus den durchgeführten Versuchen zur Ermittlung des optimalen Wassergehaltes geht hervor, dass je nach Fugenmaterial eine unterschiedliche Wassermenge erforderlich ist, um eine optimale Verdichtung des Materials vorzunehmen. Dieser Wassergehalt beinhaltet eine optimale Verdichtung bei Krafteinwirkung auf das Material. Das bedeutet beim Verdichtungsverfahren ein unmittelbares Befahren mit einer Rüttelplatte. Die ermittelten optimalen Wassergehalte sind in der nachfolgenden Tabelle 20 aufgeführt.

Aufgrund der Veränderung der Korngrößenverteilung durch die Verdichtung und damit verbunden den Transport der Feinanteile innerhalb des Fugenquerschnittes (vgl. Abschnitt 3.5.2.4.2) sind, insbesondere bei den Materialien mit hohen Feinanteilen, unterschiedliche Wassergehalte zu verzeichnen bzw. festzustellen. In der Regel ändert sich durch den indirekten Verdichtungsverfahren<sup>17</sup> die Porenstruktur in Verbindung der sich umlagernden Gesteinskörnung des Fugenmaterials, sodass sich hierdurch auch die aufzunehmende Wassermenge ändern kann. Je nach Witterung können feinkörnige Bereiche größere Wasseransammlungen aufweisen als grobkörnige Bereiche oder auch umgekehrt.

Der Wassergehalt des Fugenmaterials unmittelbar nach einem Verdichtungsverfahren ist bei Fugenmaterialien mit wenigen Feinanteilen mit geringen Abweichungen versehen (vgl. Tabelle 20, Zeile 1, 3, 5 und 6, Spalte 6 bis 9). Abweichende Wassergehalte treten nach mehreren Verdichtungsverfahren insbesondere bei Fugenmaterialien mit hohen Feinanteilen (vgl. Tabelle 20, Zeile 2 und 4, Spalte 4 bis 7) auf. Die Wassergehalte verschiedener Prüfflächen werden als Mittelwert (vgl. Anhang C3.2.1) in Tabelle 20 aufgelistet.

Die durchgeführten Fugensondierungen bei den Prüfflächen Nr. 1 bis 6 ergeben, dass i.d.R. eine größere Wassermenge als der optimale Wassergehalt erforderlich ist, um eine optimale Lagerungsdichte des Fugenmaterials zu erzielen. Der Einbau ist mit dem optimalen Wassergehalt des Fugenmaterials nicht möglich, da das Fugenmaterial dann nicht fachgerecht in die Fugen eingebracht werden kann. Ausschließlich das Fugenmaterial aus einem Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm der Prüffläche Nr. 6 weist beim Einschlammvorgang einen fast identischen Wassergehalt mit dem optimalen Wassergehalt auf (vgl. Tabelle 20, Zeile 6, Spalte 5 und 7). Fugenmaterial ist unter Verwendung von Wasser in die Fugen einzuschlämmen.

<sup>16</sup> Die Proctordichte wurde am Splitt 2/5 mm nicht ermittelt. Grund hierfür ist die geringe Wasseraufnahme des Splittes aufgrund der Grobkörnigkeit und damit verbunden des geringen Nachverdichtungspotentials. Zudem besitzt Splitt aufgrund seiner Stützfähigkeit einen abweichenden Effekt hinsichtlich der Lastabtragung im Vergleich zu feinen Gesteinskörnungen und Baustoffgemischen 0/4, 0/5 oder 0/8 mm.

<sup>17</sup> Die indirekte Verdichtung wird durch Eigengewicht des Fugenmaterials und durch Kornumlagerung aufgrund Vibration durchgeführt ohne unmittelbare Krafteinwirkung auf das Fugenmaterial.

Tabelle 20: Darstellung der ermittelten Proctordichte, des optimalen Wassergehaltes sowie des Wassergehaltes unmittelbar nach dem Einschlämmen bei der Durchführung der Untersuchungen

Lfd.-Nr.	Fugenmaterial für Prüfflächen Nr.	Beschreibung des Fugenmaterials	Proctordichte $\rho_{Pr}$ [g/cm³]	Optimaler Wassergehalt $W_{Pr}$ [ M.-%]	Anhang Nr.	Wassergehalt NdE <sup>18</sup>	Anhang Nr.
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
1	1	Brechsand 0/2 mm, wenig Feinanteile	1,897	10,5	C7.1	13,76	C3.2.1, Lfd.-Nr. 22 - 25 u. 25.1
2	2	Brechsand 0/2 mm, viele Feinanteile	1,944	11,9	C7.2	20,82	C3.2.1, Lfd.-Nr. 26 – 29 u. 29.1
3	3	Rundkorn 0/1, wenig Feinanteile	1,716	10,2	C7.3	20,58	C3.2.1, Lfd.-Nr. 30 – 33 u. 33.1
4	4	Brechsand-Splitt- Gemisch 0/4 mm, viele Feinanteile	2,006	9,8	C7.4	14,58	C3.2.1, Lfd.-Nr. 150 – 153 u. 153.1
5	5	Brechsand-Splitt- Gemisch 0/5 mm, wenig Feinanteile	1,954	7,2	C7.5	14,12	C3.2.1, Lfd.-Nr. 154 – 157 u. 157.1
6	6	Brechsand-Splitt- Gemisch 0/8 mm, wenig Feinanteile	1,941	10,4	C7.6	10,57	C3.2.1, Lfd.-Nr. 158 – 161 u. 151.1

<sup>18</sup> NdE = Nach dem Einschlämmen der Prüfflächen 1.4, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4 und 6.4

Tabelle 21: Darstellung der Wassergehalte des Fugenmaterials bei verschiedenen Prüfflächen

Lfd.-Nr. = Prüf- flächen Nr.	Beschreibung des Fugenmaterials	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.4 bis 6.4	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.4.1 bis 6.4.1	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.4.2 bis 6.4.2	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.4.3 bis 6.4.3	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.4.4 bis 6.4.4	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.5 bis 6.5	Wasser- gehalt [M.-%]  Prüf- fläche Nr. 1.6 bis 6.6
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
1	Brechsand 0/2 mm, wenig Fein- anteile	13,76	10,83	7,71	20,98	20,12	20,54	21,07
2	Brechsand 0/2 mm, viele Fein- anteile	20,82	14,81	13,35	12,98	16,39	15,6	15,06
3	Rundkorn 0/1, wenig Feinanteile	20,58	15,91	15,29	16,73	15,66	16,53	16,54
4	Brechsand-Splitt- Gemisch 0/4 mm, viele Feinanteile	14,58	13,14	12,94	10,87	10,06	15,8	14,33
5	Brechsand-Splitt- Gemisch 0/5 mm, wenig Feinanteile	14,12	10,99	9,41	10,13	9,80	10,63	10,19
6	Brechsand-Splitt- Gemisch 0/8 mm, wenig Feinanteile	10,57	5,95	5,66	13,57	13,26	12,73	12,70

Die Fließfähigkeit des Fugenmaterials zur sachgerechten Verfüllung der Fugen ist entscheidend. Unverdichtetes Fugenmaterial hat ein anderes Wasseraufnahme und -ableitvermögen als verdichtetes Material (vgl. Tabelle 21, Zeile 1 bis 6, Spalte 3). Der Einfluss des Wassergehaltes bei der Verdichtung wird in Abbildung 104 deutlich.

Die Reduzierung der mittleren Eindringtiefe der Sondiermadel von Prüffläche 1.3 zu 1.4.4 zeigt beispielhaft ein etwaiges Nachverdichtungspotential in Verkehrsflächen bei einem nicht sachgerechten Einbau des Fugenmaterials.

Zur Verdeutlichung der Reduzierung der Eindringtiefe der Sondiermadel können aus Abbildung 105 die betragsmäßigen Reduktionen entnommen werden.

Die Sondierungen bei Prüffläche Nr. 1.3 wurden bei einem Wassergehalt von 1,10 bzw. 1,63 M.-% (Anhang C3.2.1, Spalte 3, Lfd.-Nr. 10 und 11) durchgeführt. Die Fugensondierungen bei Prüffläche Nr. 1.4.4 wurden unmittelbar nach der Herstellung bei einem Wassergehalt bei Verdichtung von i.M. 20,12 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 78 bis 81 und 81.1) ausgeführt.

Darstellung der mittleren Eindringtiefen der Sondiernadel bei Prüfflächen  
Nr. 1

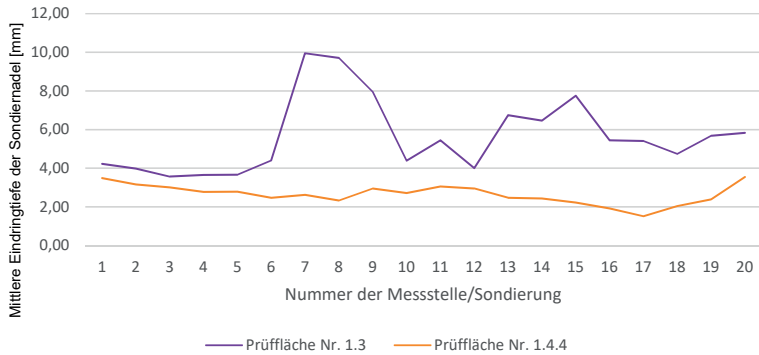


Abbildung 104:  
Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von  
Prüffläche Nr. 1.3 und 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.6)

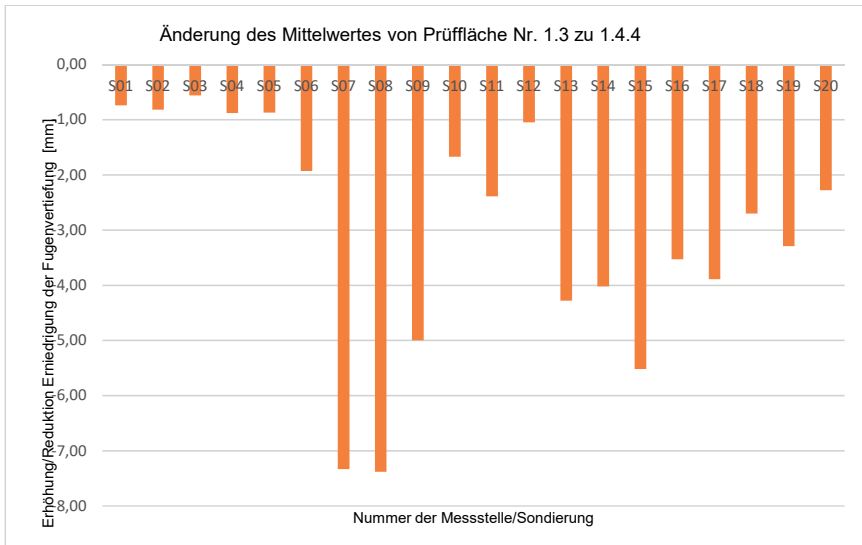


Abbildung 105:  
Das Balkendiagramm veranschaulicht die Reduktion des Mittelwertes  
von Prüffläche Nr. 1.3 zu 1.4.4

Selbst bei Vorhandensein des hohen Wassergehaltes des Fugenmaterials bei Durchführung der Fugensondierung wird dadurch keine signifikante Reduzierung des Spitzendrucks sowie der Reibung an der Mantelfläche der Sondiernadel erzeugt. Es wird bei der Prüffläche Nr. 1.4.4 eine deutliche Reduzierung der Eindringtiefen bei höheren Wassergehalten im Fugenmaterial gegenüber Prüffläche Nr. 1.3 (Abbildung 105) verzeichnet. Die Differenz der minimalen und maximalen Standardabweichungen beträgt bei Prüffläche Nr. 1.4.1 bzw. 1.4.4 14,85 mm bzw. 2,27 mm (Anhang E1.5). Demnach werden bei einer Verdichtung mit Wasser nicht nur geringere Eindringtiefen, sondern auch unter Berücksichtigung der Standardabweichung eine einheitliche Lagerungsdichte des Fugenmaterials gegenüber beispielsweise der Prüffläche Nr. 1.4.1 erreicht.

Dem Grunde nach stellt sich der Sachverhalt der geringen Eindringtiefen und der Differenz der Standardabweichung bei allen Fugenmaterialien ähnlich dar (Anhang E1.4 bis 6.4 sowie 1.5 bis 7.5 und 7.6). Bei Rundkorn 0/1 mm sind unter Betrachtung der Veränderung des Mittelwertes der Eindringtiefen und der Differenz der Standardabweichung Tendenzen von auflockernden Effekten erkennbar.

Dass Verdichtungsvorgänge gelegentlich auch auflockernde Wirkungen haben, kann beispielsweise bei einer teilweisen Erhöhung des Mittelwertes der Eindringtiefe der Sondiernadel sowie einer Steigerung der Standardabweichung von Prüfflächen Nr. 6.4.3 auf 6.4.4 festgestellt werden. Dieser Sachverhalt kann analog von Prüffläche Nr. 7.4.1 auf 7.4.2 festgestellt werden. Bei Prüffläche Nr. 6.4.4 kann es durchaus bei dem Wassergehalt von 13,26 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 197.1) bei erhöhter Verdichtungsenergie und nicht vollständig gefüllten Fugen zu einem Ausweichen des Fugenmaterials mit der Folge von Steinverschiebungen und einer Lockerung des ungebundenen Fugenmaterials kommen. Ähnlich kann es sich bei Splitt 2/5 mm verhalten, wobei hier keine erhöhte Ausweichneigung des Fugenmaterials aufgrund des Fehlens des Sandanteiles (Korngröße 0,063 mm bis 1 mm) vorliegt. Hier können die groben oberflächen-nahen Gesteinskörner durch erhöhte Verdichtungsenergie gelockert werden, was im oberen Fugenquerschnitt eine Erhöhung der Eindringtiefe zur Folge hat und demnach den Mittelwert der Eindringtiefe negativ beeinflussen kann (vgl. Anhang D7.4.2, S07 und S18, Spalte *Höchstw.* und *Mittelw.*).

Es ergeben sich bei den nachstehenden Prüfflächen noch folgende Bewertungsunterschiede:

Aufgrund der hohen Feinanteile des Fugenmaterials bei Prüfflächen Nr. 2 (Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen) und Nr. 4 (Baustoffgemisch 0/4 mm mit vielen Feinanteilen) kommt es bei einem Verdichtungsvorgang mit einem höheren Wassergehalt zum Transport der Feinanteile im Fugenquerschnitt. Bei Fugenmaterialien mit vielen Feinanteilen können diese an die Oberfläche transportiert werden. Dadurch kann bei weiteren Verdichtungsvorgängen nur eine vergleichsweise geringere Wassermenge in die Konstruktion eindringen, die eine weitere optimale Verdichtung des unteren Fugenbereiches ermöglicht. Bei nachfolgenden Arbeitsschritten einzubringendes Fugenmaterial kann nicht optimal verdichtet werden, da keine zeitnahe vertikale Wasserabführung stattfinden kann. Beispielsweise ist bei der Prüffläche Nr. 2.4.4 ein Wassergehalt von 16,39 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 82 bis 85 und 85.1) vorhanden, wohingegen bei der Prüffläche Nr. 4.4.4 ein um ca. 6 M.-% geringerer Wassergehalt (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 192, 193 und 193.1) zu verzeichnen ist. Dies begründet sich dadurch, dass bei den Prüfflächen Nr. 4 ein Baustoffgemisch 0/4 mm gegenüber 0/2 mm bei den Prüfflächen Nr. 2 verwendet wird. Aufgrund der vergleichsweise geringeren Oberfläche (aufgrund der Zusammensetzung des Baustoffgemisches) ist das Aufnehmen einer größeren Wassermenge nicht möglich.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass bei Prüffläche Nr. 4.4.4 noch eine gewisse Restwassermenge aus den Verdichtungsversuchen, die erst 1 Tag vorher durchgeführt werden, vorhanden ist. Bei Prüffläche Nr. 2.4.4 ist eine Ruhezeit von etwa 22 Tagen gegenüber der Verdichtung der Prüffläche Nr. 2.4.3 zu verzeichnen.

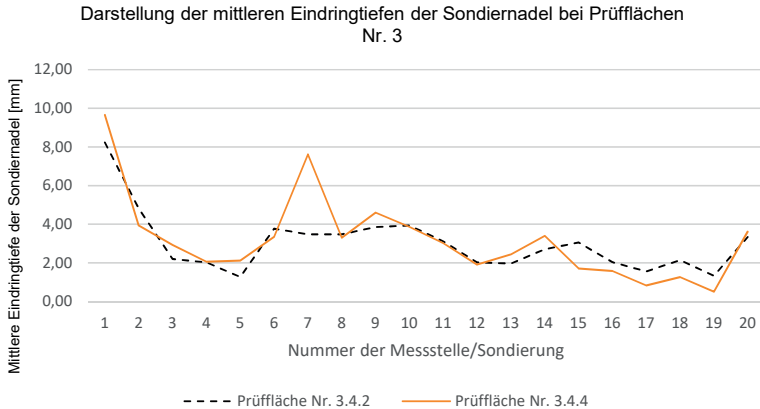


Abbildung 106:  
Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von  
Prüffläche Nr. 3.4.2 und 3.4.4 (Auszug aus Anhang E3.6)

Die Prüffläche Nr. 3 mit einem Fugenmaterial aus Rundkorn 0/1 mm besitzt andere Eigenschaften. Das Fugenmaterial hält, obwohl es nur einen geringen Feinanteil ( $< 0,063$  mm) von 1,0 M.-% bzw. 1,1 M.-% besitzt, aufgrund der Korngrößenverteilung und der Kornform relativ lang Wasser. Etwa 0,5 h bzw. 20 h nach dem Einschlammvorgang ist bei der Prüffläche Nr. 3.4.1 bzw. 3.4.2 ein ähnlich hoher Wassergehalt mit 15,91 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 42 bis 45 und 45.1) bzw. 15,29 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 58 bis 61 und 61.1) zu verzeichnen, wie bei den Prüfflächen Nr. 3.4.3 bzw. 3.4.4 mit 16,73 (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 74 bis 77 und 77.1) bzw. 15,66 M.-% (Anhang C3.2.1, Lfd.-Nr. 86 bis 89 und 89.1), die unmittelbar nach dem Wässern und Abziehen des Wassers aus den Fugen, verdichtet wurden. Demnach ist keine signifikante Verbesserung der Mittelwerte der Eindringtiefe der Sondiernadel von Prüffläche Nr. 3.4.2 zu 3.4.4 zu verzeichnen. Dieser Sachverhalt ist grafisch in Abbildung 106 dokumentiert.

Im Anhang E1.6 bis 7.6 sind von den Prüfflächen Nr. 1 bis 7 Liniendiagramme der mittleren Eindringtiefe der Sondiernadel der einzelnen Prüfflächen dargestellt. Abbildung 107 zeigt in verschiedenen Liniendiagrammen die mittlere Eindringtiefe der Sondiernadel bei verschiedenen Prüfflächen der Prüffläche Nr. 1.

In Abbildung 107 stellt die graue Linie die Prüffläche Nr. 1.1 (Einfegen von Fugenmaterial ohne Verdichtung) und die gelbe Linie die Prüffläche Nr. 1.4 (Einschlammern von Fugenmaterial) den Mittelwert der Fugensondierungen dar. Der Mittelwert zeigt gegenüber den verdichteten Flächen zum Teil sehr hohe Werte und weist demnach keine hinreichende Lagerungsdichte nach. Dieser Sachverhalt trifft für alle Prüfflächen Nr. 1 bis 6<sup>19</sup> zu. Sofern in diesen Diagrammen bei den Prüfflächen Nr. 1.1 bis 6.1 bzw. 1.4 bis 6.4 geringe Mittelwerte vorhanden sind, ist dies auf eine hohe Fugenvertiefung zurückzuführen (siehe Anhang D5.1, Seite 4, S06 bis S20, Spalte *FugV* und *Mittelw.*). Hohe Mittelwerte lassen auf eine geringe Fugenvertiefung schließen, sodass die Sondiernadel durch Eigengewicht beispielsweise aufgrund eines einzelnen gespannten Kornes nur geringfügig eingedrungen ist (vgl. Anhang D6.1, Seite 4, S01 bis S20, Spalte *FugV* und *Mittelw.*).

<sup>19</sup> Eine Ausnahme stellt Prüffläche Nr. 4.1 dar. Bei dieser Prüffläche konnten keine Werte erzeugt werden, da die Sondiernadel die Fugen durch Eigengewicht durchdrungen hat (siehe Anhang D4.1, Seite 4, Spalte *FugV* und *Mittelw.*)

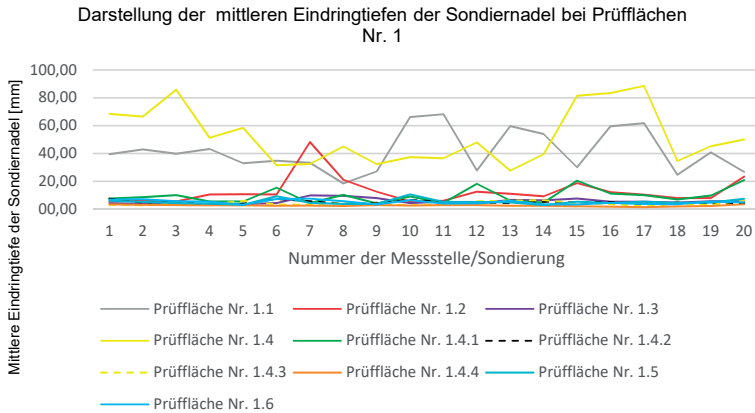


Abbildung 107:

Die Liniendiagramme zeigen die mittleren Eindringtiefen der Sondiernadel bei verschiedenen Prüfflächen der Prüffläche Nr. 1 (Auszug aus Anhang E1.6)

Aus Abbildung 107 ist zudem ersichtlich, dass die Sondiernadel bei Prüfflächen, die einer Verdichtung unterzogen wurden (Prüfflächen Nr. 1.2, 1.3, 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4, 1.5 und 1.6), vergleichsweise deutlich geringere Eindringtiefen zu erzielen sind. Die durchgeführten Fugensondierungen nach dem Einschlämmvorgang bei Prüffläche Nr. 1.4 (Fugenmaterial eingeschlämmt ohne Verdichtung) ergeben, dass ein Schlag auf die Grundplatte ausreicht, um die Fugen auf der gesamten Höhe zu durchdringen (vgl. Tabelle 10, Spalte *Anzahl*). Es wird somit keine ausreichende Anfangsstabilität bzw. Lagerungsdichte des Fugenmaterials durch Einschlämmen nachgewiesen.

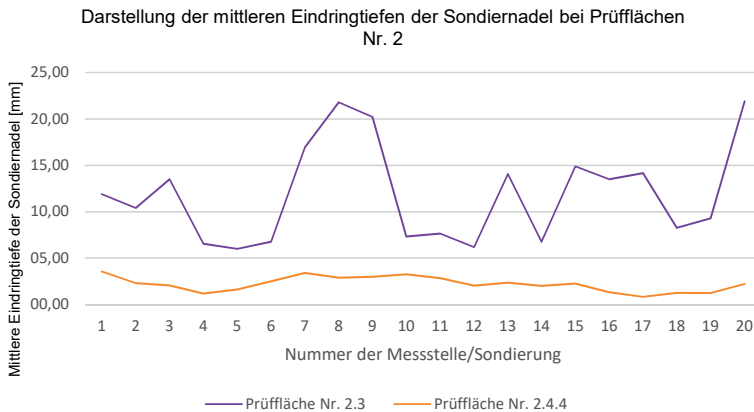


Abbildung 108:

Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von Prüffläche Nr. 2.3 und 2.4.4 (Auszug aus Anhang E2.6)

Darstellung der mittleren Eindringtiefen der Sondiernadel bei Prüfflächen  
Nr. 5

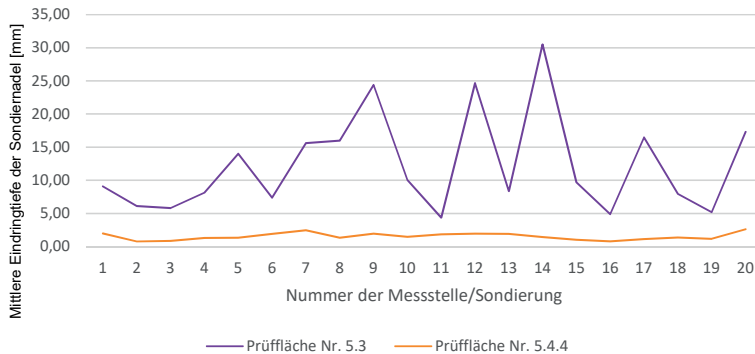


Abbildung 109:  
Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von  
Prüffläche Nr. 5.3 und 5.4.4 (Auszug aus Anhang E5.6)

Beispielhaft zeigen die Abbildung 108 und 109 die Reduzierung der Eindringtiefe der Sondiernadel von Prüffläche Nr. 2.3 zu 2.4.4 sowie 5.3 zu 5.4.4.

Die Lagerungsdichte des Fugenmaterials von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen hängt von den verwendeten Fugenmaterialien und dem Wassergehalt bei Ausübung der Verdichtung ab. So ermöglicht ein Fugenmaterial mit wenigen Feinanteilen problemlos mehrere Verdichtungsvorgänge, da dieses Material Wasser aufnehmen und abführen kann. Fugenmaterialien mit hohen Feinanteilen besitzen dahingegen den Nachteil, dass sie bei einer feuchten Verdichtung eine Schlämmschicht an der Oberfläche (d.h. nach der Verdichtung kann dies auch im unteren Bereich des Fugenquerschnittes sein) erzeugen, die einen Wassereintritt reduziert. Dadurch besteht nicht die Möglichkeit, dass eine weitere einzubringende Verfugung fachgerecht verdichtet werden kann, da keine zeitnahe vertikale Wasserabführung stattfinden kann. Die Schlämmschicht besitzt keine lastabtragende Funktion im Fugenquerschnitt.

#### 3.5.2.4 Weitere Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen

Die Untersuchungen an den ungebundenen Betonsteinpflasterdecken haben weitere technische Aspekte zum Vorschein gebracht, die nachfolgend näher betrachtet werden.

##### 3.5.2.4.1 Bettungsmaterial

Vom eingebauten Bettungsmaterial wurden in den jeweiligen Prüfflächen vor dem Rückbau verschiedene Proben entnommen, um die Korngrößenverteilung zu erstellen und den Wassergehalt zu bestimmen. Die erstellte Korngrößenverteilung der Lieferkörnung ist bereits in Abbildung 37 dargestellt.

Zur Beurteilung, ob eine Erhöhung der Feinanteile  $< 0,063$  mm durch Materialzertrümmerung durch die verschiedenen Verdichtungsvorgänge stattgefunden hat, werden Unter- und Überschreitungen der Feinanteile zur Lieferkörnung mit 1,3 M.-% und 1,8 M.-% der ausgebauten Proben dargestellt. Liegen die Feinanteile zwischen 1,3 M.-% und 1,8 M.-%, wird die Veränderung mit 0 M.-% dokumentiert.



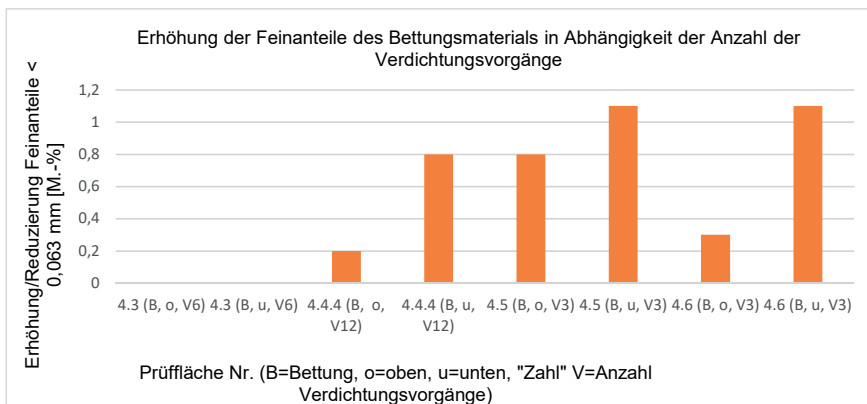


Abbildung 110:

Das Balkendiagramm zeigt die Erhöhung der Feinanteile des Bettungsmaterials bei Prüfflächen Nr. 4 (Auszug aus Anhang C5.4)

Die Dokumentation der Feinanteilerhöhung sowie der Veränderung des Siebdurchgangs 2 mm gegenüber der Lieferkörnung bei den Prüfflächen Nr. 1 bis 7 ist in Anhang C5.1 bis 5.7 enthalten.

Die maximalen Erhöhungen der Feinanteile im Bettungsmaterial werden bei Prüffläche Nr. 4 und 5 mit jeweils 1,1 M.-% festgestellt. In der Abbildung 110 (Auszug aus Anhang C5.4) sind die Feinanteilerhöhungen aus dem Balkendiagramm zu entnehmen.

Die größte Erhöhung der Feinanteile hat keineswegs in Bereichen mit 12-fachem Überfahren mit den Verdichtungsgeräten stattgefunden. Die Erhöhung um 1,1 M.-% ist in Bereichen mit dreifachen Übergängen bei gleichzeitigem Einschlämmen und Verdichten der Prüfflächen aufgetreten. Hinsichtlich der Herstellung der Prüfflächen ist der Prüfplan gemäß Anhang B sowie die Legende der Abbildung 110 zu beachten. Eine Materialzertrümmerung bei Durchführung mehrerer Verdichtungsvorgänge des Bettungsmaterials ist ausschließlich im geringfügigen Bereich zu verzeichnen.

Eine Veränderung des Wassergehaltes des eingebauten Bettungsmaterials ist aus Abbildung 111 bei Prüffläche Nr. 1.3.1, 2.3.1, 3.3.1 und 2.4.3 nach der Herstellung der Prüfflächen und nach längerer Liegedauer zu entnehmen.

Die Prüfflächen befinden sich im Labor und unterliegen keiner natürlichen Bewitterung. Aus Abbildung 111 (Auszug aus Anhang C3.4) ist ersichtlich, dass bei Prüfflächen Nr. 1.3.1, 2.3.1 und 3.3.1 nach 5 Tagen keine wesentliche Reduzierung des Wassergehaltes der Bettung zu verzeichnen ist. Bei Prüffläche Nr. 1.3.1 reduziert sich der Wassergehalt in 5 Tagen um 2,83 und 2,16 M.-% (vgl. Anhang C3.4, Zeile 1, Spalte 4 abzgl. Zeile 2 bzw. 3, Spalte 4). Der Wassergehalt der Prüffläche Nr. 2.4.3 beträgt 22 Tage nach Herstellung der Prüffläche 4,74 M.-% und 3,86 M.-% und hat sich gegenüber dem Wassergehalt unmittelbar nach der Herstellung um 2,81 M.-% (vgl. Anhang C3.4, Zeile 10, Spalte 4 abzgl. Zeile 15, Spalte 4)<sup>20</sup> und 3,68 M.-% (vgl. Anhang C3.4, Zeile 11, Spalte 4 abzgl. Zeile 14, Spalte 4)<sup>21</sup> reduziert.

<sup>20</sup> Tiefliegender Rand

<sup>21</sup> Hochliegender Rand

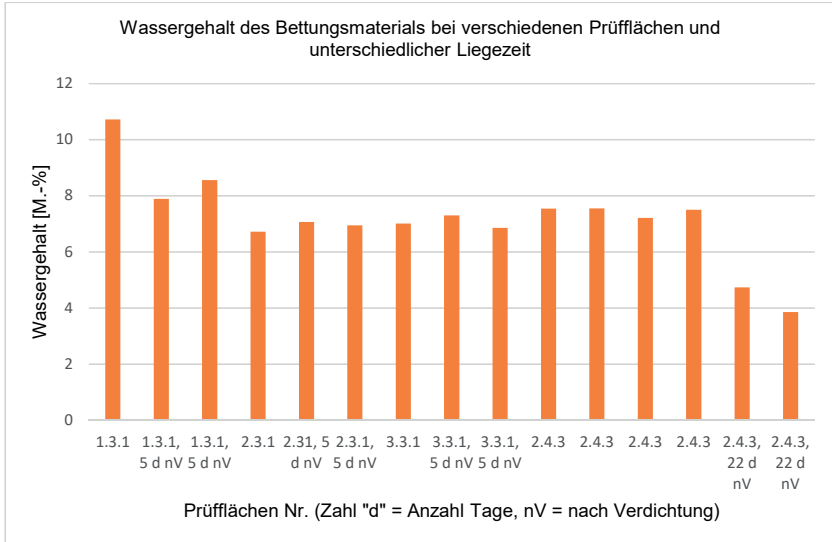


Abbildung 111:  
Das Balkendiagramm veranschaulicht die Veränderung des Wassergehaltes des Bettungsmaterials bei verschiedenen Prüfflächen und unterschiedlicher Liegezeit (Auszug aus Anhang C3.4)

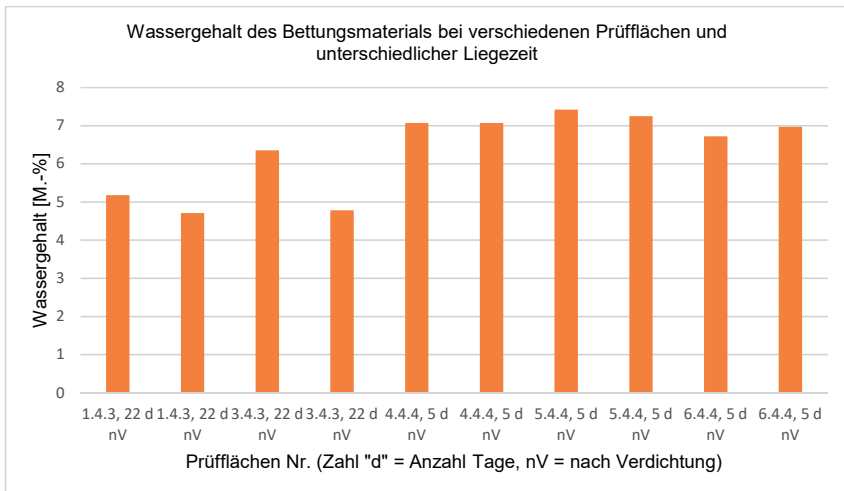


Abbildung 112  
Das Balkendiagramm zeigt den Wassergehalt des Bettungsmaterials bei verschiedenen Prüfflächen und unterschiedlicher Liegezeit in Tagen (Auszug aus Anhang C3.6)

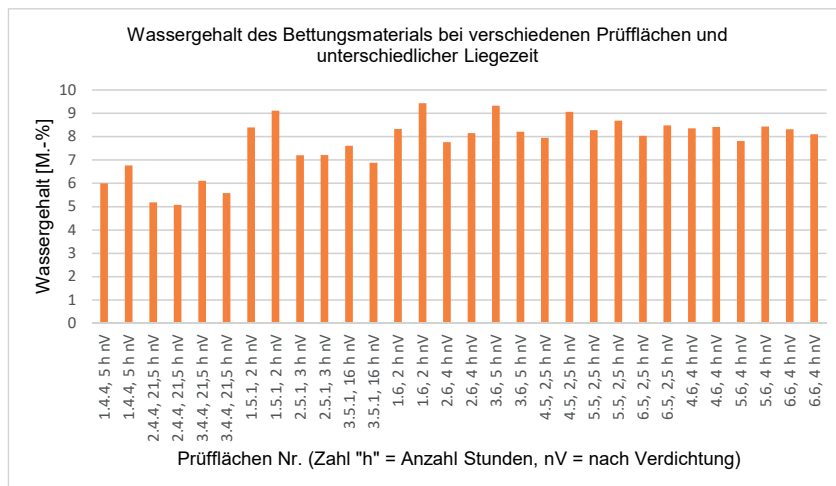


Abbildung 113:

Das Balkendiagramm zeigt den Wassergehalt des Bettungsmaterials bei verschiedenen Prüfflächen und unterschiedlicher Liegezeit in Stunden (Auszug aus Anhang C3.5)

Die Wassergehalte verschiedener Prüfflächen können aus Abbildung 112 (Auszug aus Anhang C3.6) nach längerer Liegedauer entnommen werden. Die Reduktion des Wassergehaltes wird hier nicht ermittelt. Die Abbildung 112 stellt den Wassergehalt nach 5 bzw. 22 Tagen nach der Herstellung dar.

Die aufgeführten Prüfflächen werden mit einer Wasserzugabe in die offenen Fugen hergestellt. Der geringste Wassergehalt beträgt mit 4,71 M.-% bei Prüffläche Nr. 1.4.3 nach 22 Tagen und der höchste mit 7,42 M.-% bei Prüffläche Nr. 5.4.4 nach 5 Tagen.

Abbildung 113 (Auszug aus Anhang C3.5) zeigt den Wassergehalt des Bettungsmaterials bei verschiedenen Prüfflächen und nach unterschiedlicher Liegezeit in Stunden. Die in Abbildung 113 (Auszug aus Anhang C3.5) dargestellten Prüfflächen wurden mit einer Wasserzugabe in die offenen Fugen bzw. unmittelbar beim Einschlämmen des Fugenmaterials verdichtet. Der geringste Wassergehalt ist mit 5,07 M.-% bei Prüffläche Nr. 2.4.4 nach 5 Stunden (Anhang C3.5, Zeile 4, Spalte 4) und der höchste mit 9,43 M.-% bei Prüffläche Nr. 1.6 2 Stunden (Anhang C3.5, Zeile 14, Spalte 4) nach Verdichtung vorhanden.

Es ist festzustellen, dass das Bettungsmaterial nach kurzer Zeit (etwa 2 bis 5 h nach Verdichtung) einen hohen Wassergehalt besitzt (Anhang C3.5). Das Ruhen der Prüffläche Nr. 1.3.1 bis 3.3.1 in der Halle von 5 Tagen (Anhang C3.4) hat keine signifikante Reduzierung des Wassergehaltes zur Folge. Das Ruhen der Prüffläche Nr. 2.4.3 (Anhang C3.4) von mehr als 3 Wochen zeigt, dass das Bettungsmaterial in einer Halle noch einen Wassergehalt von 3,86 bzw. 4,74 M.-% (Anhang C3.4, Zeile 15 bzw. 14, Spalte 4) besitzt. Die durchgeführten Untersuchungen lassen vermuten, dass das Bettungsmaterial das vorhandene überschüssige Wasser langsam abgibt. Eine ständige Wasserzufuhr während der Nutzung eines Belages kann zu einer erhöhten Wasseraufnahme des Bettungsmaterials mit der Folge zu einer erhöhten Verformungsneigung führen, wenn die Verdichtung des ungebundenen Belages bei einem geringen Wassergehalt durchgeführt wird. Das im Rahmen der Untersuchungen verwendete Bettungsmaterial 0/8 mm benötigt zur optimalen Verdichtung einen optimalen Wassergehalt von 7,6 M.-% (Anhang A9, Seite 2, Proctorversuch).

Werden in der Praxis die Verdichtungsvorgänge mit geringen Wassergehalten in Fugen- und Bettungsmaterial durchgeführt, so kommt es -wie bereits beschrieben- aufgrund der lockeren Lagerung des Fugenmaterials zu einem erhöhten Wassereintritt mit dem Ergebnis der Kornumlagerung und des Absackens in der Fuge. Erreicht das Bettungsmaterial erst im Betrieb durch Wassereintritt den optimalen Wassergehalt, so kann es herstellungsbedingt schon zu Nachverdichtungen der Bettung mit der Folge von Spurrillenbildungen kommen.

#### 3.5.2.4.2 Fugenmaterial

Bei den Verdichtungsvorgängen mit Fugenmaterial mit vielen Feinanteilen ( $< 0,063 \text{ mm}$ ) und unter der Verwendung von Wasser wird festgestellt, dass es insbesondere bei der Verwendung der reversiblen Rüttelplatte zum Transport von Feinanteilen an die Oberfläche kommt. Dadurch entsteht im oberen Bereich der Fuge eine Schlämmsschicht („Sperrschicht“), die einen weiteren Wassereintrag reduziert bzw. eine Wasserabführung durch die Konstruktion deutlich reduziert. Abbildung 114 zeigt hier beispielhaft die so genannte Schlämmsschicht („Sperrschicht“), bestehend aus Feinanteilen ( $< 0,063 \text{ mm}$ ) an der Oberfläche der ungebundenen Fuge bei Prüffläche Nr. 2.

Ungebundene Fugen können nicht mit einem Arbeitsgang auf vollständiger Höhe eingebaut werden. Durch die Verdichtungsvorgänge wird eine Kornumlagerung mit der Folge des Absackens des Fugenmaterials erzeugt. Wird die Verdichtung mit Wasser<sup>22</sup> durchgeführt, so bildet sich an der Oberfläche des abgesackten Fugenmaterials eine Schlämmsschicht („Sperrschicht“) gemäß Abbildung 114. Es wurde beobachtet, dass nach dem Absacken des Fugenmaterials (das kann auch um mehrere Zentimeter sein) noch ein großer verfüllbarer Fugenquerschnitt vorhanden ist, sodass sich diese Schlämmsschicht beispielsweise in der Steinmitte bildet. Dadurch kann das im weiteren Arbeitsgang notwendige Fugenmaterial zwar feucht eingebracht werden, es kann aber jedoch keine sachgerechte Verdichtung ausgeführt werden, da keine zeitnahe vertikale Wasserabführung durch die Schlämmsschicht in der Fugenmitte möglich ist.



Abbildung 114:  
Feinanteile in der Fuge (gelber Pfeil) visuell erkennbar

<sup>22</sup> Eine genaue Angabe, ab welchem Wassergehalt diese Erscheinungen begünstigt werden, kann nicht gemacht werden. Es besteht ggf. das Risiko, dass bei Vorhandensein von Wasser in der Bettung und/oder Tragschicht dieser Vorgang zusätzlich begünstigt wird.



Abbildung 115:  
Abgesacktes Fugenmaterial beim Rückbau der Prüffläche Nr. 1.6 sichtbar

Die vorhandene Schlämmschicht besteht vorwiegend aus Feinanteilen ( $<0,063$  mm) und ermöglicht keine sachgerechte Wasserabführung und keine optimale Lastabtragung, sodass die notwendige grobe Gesteinskörnung (vgl. Abbildung 20 und 21) für die Lastabtragung fehlt.

Nach Herstellung der Prüfflächen wurden Proben vom Fugenmaterial (Abbildung 115) entnommen, um je Prüffläche eine Korngrößenverteilung zu erstellen und festzustellen, welche Veränderung der Verdichtungs Vorgang im Fugenmaterial verursacht hat.

Die Probenahme wurde aus einer Mischprobe an den Steinflanken durchgeführt, wobei bei den Fugenmaterialien der Prüffläche Nr. 2 und 4 der obere Bereich nicht entnommen wurde, da in diesem Bereich gemäß Abbildung 114 eine Schlämmschicht vorhanden war. Die Veränderungen gegenüber der Lieferkörnung der Feinanteile und des Siebdurchgangs 2 mm ist für die Prüfflächen Nr. 1 bis 7 im Anhang C6.1 bis C6.7 enthalten. Beispielhaft werden aufgrund der größten auftretenden Veränderungen gegenüber der Lieferkörnung die Fugenmaterialien aus Prüffläche Nr. 2 (Auszug aus Anhang C6.2) und 4 (Auszug aus Anhang C6.4) in Abbildung 116 und 117 angeführt.

Durch die Verdichtungsvorgänge ist eine Reduzierung der Feinanteile ( $<0,063$  mm) im Fugenmaterial der Prüfflächen Nr. 2 und 4 eingetreten.

Die vergleichsweise geringste Reduzierung liegt bei Prüffläche Nr. 2.3.1 bei 9-fachem Überfahren der Rüttelplatten mit -5,8 M.-% und die höchste Reduktion bei Prüffläche Nr. 2.6 bei 3-fachem Überfahren mit -6,4 M.-% (Anhang C6.2). Bei Prüffläche Nr. 4.5 liegt die vergleichsweise geringste Reduzierung bei 3-fachem Überfahren mit der kleinen Rüttelplatte mit -8,3 M.-% und die höchste Reduktion bei Prüffläche Nr. 4.3 bei 6-fachem Überfahren mit -9,1 M.-% (Anhang C6.4).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verdichtungsvorgängen mit einem hohen Wassergehalt ein Transport von Feinanteilen im Fugenmaterial stattfindet und somit das eingebaute Fugenmaterial mit hohen Feinanteilen bei Prüfflächen Nr. 2 und 4 erhebliche Abweichungen zur Lieferkörnung besitzt. An die Oberfläche der Fuge tretende Feinanteile sind in Abbildung 114 sichtbar. Die Fugenmaterialien der Prüfflächen Nr. 1, 3, 5 und 6 mit geringen Feinanteilen ( $<0,063$  mm) als Lieferkörnung zeigen auch Veränderungen der Feinanteilmenge

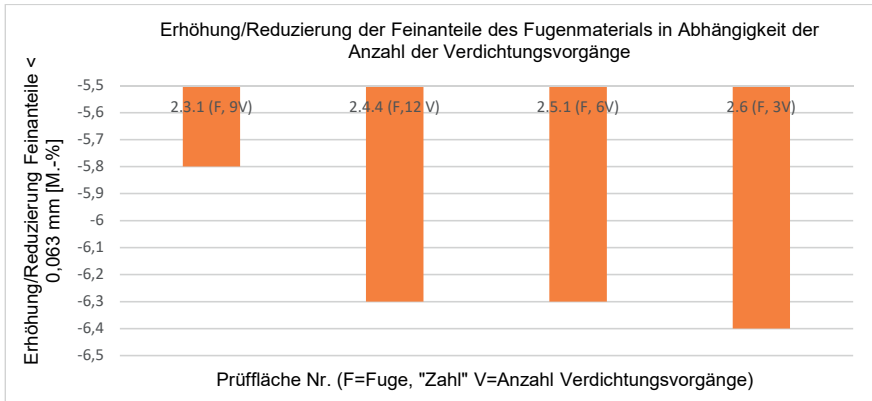


Abbildung 116:  
Das Balkendiagramm stellt die Erhöhung/Reduktion der Feinanteile des Fugenmaterials bei Prüfflächen Nr. 2 (Auszug aus Anhang C6.2) dar

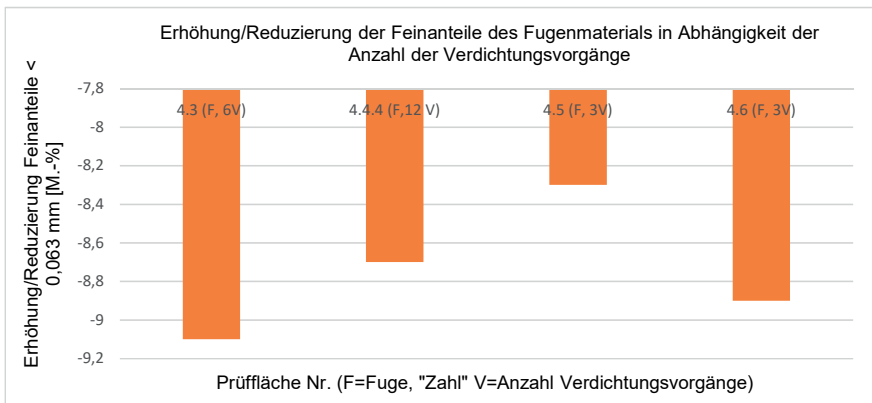


Abbildung 117:  
Das Balkendiagramm stellt die Erhöhung/Reduktion der Feinanteile des Fugenmaterials bei Prüfflächen Nr. 4 (Auszug aus Anhang C6.4) dar

(Anhang C6.1, C6.3, C6.5 und C6.6), jedoch bei Prüffläche Nr. 1.6 mit 3-fachem Überfahren der Verdichtungsgeräte mit einer maximalen Erhöhung des Feinanteils von 1,6 M.-% (Anhang C6.1, Zeile 6, Spalte 6) und Prüffläche Nr. 6.4.4 bei 12-fachem Überfahren mit einer maximalen Erhöhung von 0,8 M.-% (Anhang C6.6, Zeile 4, Spalte 6).

### 3.5.3 Zusammenfassende Wertung der Ergebnisse der Prüfflächen

Die Untersuchungen zeigen, dass ein reines Einfügen oder Einschlämmen weder vollständig gefüllte Fugen noch eine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials zur Folge hat. Durch das Eigengewicht der Prüfvorrichtung der Fugensonde und den zusätzlichen Aufprall des Gewichts auf der Grundplatte können die im Abschnitt 3.5.2.1 ermittelten Druckspannungen aus Spitzendruck nicht aufgenommen werden.

Das Fugenmaterial ist sehr locker gelagert, sodass dieses beim Eindringen der Sondiernadel ausweicht. Die Annahme der wissenschaftlichen Untersuchungen (Rohleder, 2002), dass bei Pflasterdecken mit einer erst kurzen Liegedauer (etwa 1 bis 2 Jahre unter Verkehr) ein geringerer Verschiebewiderstand vorliegt als bei älteren Pflasterdecken mit deutlich längerer Liegedauer, wird durch die Untersuchungen bestätigt. Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge, deren Fugen ausschließlich durch Einkehren oder Einschlämmen gefüllt werden, besitzen keine hinreichende Lagerungsdichte und damit einen geringeren Verschiebewiderstand und ein erhöhtes Nachverdichtungspotential in Form von Kornumlagerungen mit der Folge des Absackens des Fugenmaterials.

*Wie die Ergebnisse einer Forschungsarbeit (Rohleder, 2002; Lerch 2006) zeigen, ist ab einer Fugentiefe von ca. 20 % der Steindicke / Fugenhöhe bereits die Stabilität der Pflasterdecke gemindert (Köhler, Ulonska & Wellner, 2014). Dieser Sachverhalt ist dahingehend zu erweitern, dass die Stabilität einer ungebundenen Pflasterdecke bzw. eines ungebundenen Plattenbelages wesentlich von der Lagerungsdichte des Fugenmaterials abhängt. Wie bereits beschrieben, haben ausschließlich eingefegte oder eingeschlammte Fugen keine hinreichende Lagerungsdichte und demnach auch keine Funktion hinsichtlich der Lastabtragung über den Fugenquerschnitt. Eine Minderung der Stabilität eines ungebundenen Belages setzt bereits bei ausschließlich eingefegtem bzw. eingeschlammtem ungebundenem Fugenmaterial ein.*

Bei der groben Gesteinskörnung kann bei punktueller Verkantung der Gesteinskörner durchaus vereinzelt ein Spitzendruck aus Eigengewicht oder Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte der Fugensonde aufgenommen werden. Jede vorgenommene Verfugung sollte zur Erlangung einer hinreichenden Lagerungsdichte verdichtet werden. Idealerweise sollte die Verdichtung bei feuchtem Fugenmaterial stattfinden, ohne dass Schäden an Platten oder Steinen -auch keine Verfärbungen- entstehen.

Zur Beurteilung der Fugensondierungen sind nachstehende Parameter von Bedeutung:

- Die Fugentiefe gibt Aufschluss darüber, in welcher Höhe in Bezug zur Steindicke Fugenmaterial in der Fuge vorhanden ist. Große Fugentiefen sind ein Indiz für lockeres Fugenmaterial, Hohlräume im Querschnitt oder geleerte Fugen.
- Die Sondiertiefe sagt aus, dass in dieser Höhe überhaupt nur Fugensondierungen mit Heben und Fallenlassen des Gewichts durchgeführt werden können. Sie ermöglicht in Verbindung mit den Diagrammen 4 und 5 die Nachweisführung, ob eine Verdichtung des Fugenmaterials auf ganzer Höhe stattfindet.
- Die ersten beiden Werte der Fugensondierungen weisen nach, ob ab Beginn der Fugensondierung im oberen Fugenbereich eine hinreichende Lagerungsdichte vorhanden ist.
- Der Höchstwert weist im Vergleich zu dem ersten und zweiten Wert der Sondierung nach, ob das Fugenmaterial im oberen Bereich oder aber ggf. aufgrund von lockerer Lagerung oder Hohlräumen im unteren Fugenquerschnitt vorhanden ist.
- Der Mittelwert drückt unter Einfluss der Sondiertiefe aus, ob in der sondierten Tiefe eine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials vorhanden ist.
- Der niedrigste Wert zeigt die minimale Eindringtiefe der Sondierung und zeigt bei Reflexionen negative Werte, ggf. aufgrund grober Gesteinskörnung, an.
- Die Standardabweichung ist ein Maß dafür, wie weit die jeweiligen Werte um den Mittelwert streuen.

Hinsichtlich der Bewertung der Qualität der ungebundenen Fuge kann festgehalten werden, dass der Mittelwert der Eindringtiefe der Sondiernadel der Fugensonde ein sehr gutes Kriterium für die Beurteilung

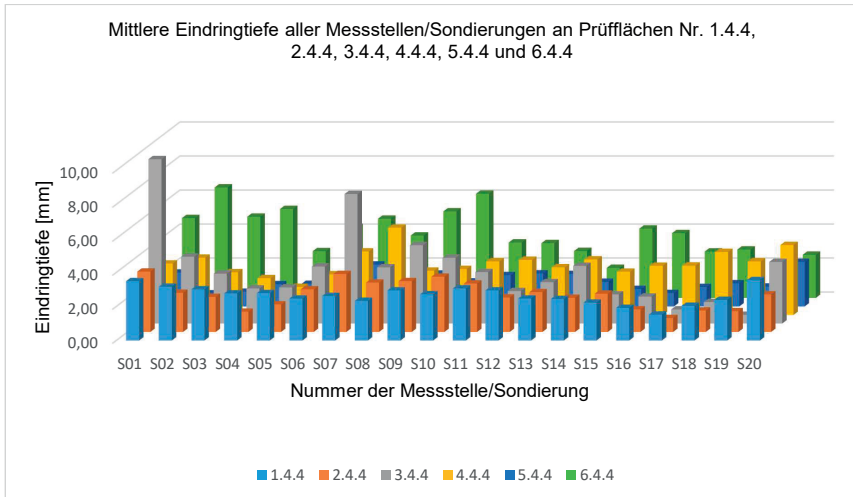


Abbildung 118:  
Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen der Fugensonierungen bei Prüffläche Nr. 1.4.4, 2.4.4, 3.4.4, 4.4.4, 5.4.4 und 6.4.4

der Lagerungsdichte und demnach der Anfangsstabilität von ungebundene Pflasterdecken und Plattenbelägen ist. Die Standardabweichung oder die Differenz vom Höchst- zum Niedrigstwert gibt einen Anhalt über eine einheitlich hergestellte Fugenfüllung.

Abbildung 118 zeigt die mittleren Eindringtiefen der Fugensonierungen bei Prüffläche Nr. 1.4.4, 2.4.4, 3.4.4, 4.4.4, 5.4.4 und 6.4.4.

Die Ergebnisse zeigen, dass der überwiegende Teil der durchgeführten Untersuchungen mittlere Eindringtiefen bei Prüfflächen Nr. 1.4.4 bis 6.4.4 unterhalb von 5 mm ergeben haben. Bei der Prüffläche Nr. 3.4.4 wird die mittlere Eindringtiefe von 5 mm bei Sondierstelle S01 und S07 überschritten. Bei Prüffläche Nr. 6.4.4 wird der Mittelwert von 5 mm bei den Sondierstellen S02, S04, S09 und S10 übertroffen. Dieser Sachverhalt kann -wie bereits beschrieben- auf das Fugenmaterial, die Fugenbreite und durch den Verdichtungs-vorgang verursachte Auflockerungseffekte zurückgeführt werden. Das Fugenmaterial aus Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen weist gegenüber dem Fugenmaterial mit wenigen Feinanteilen an vereinzelten Sondierstellen geringere Eindringtiefen auf.

## 4 Fazit

Anhand der durchgeführten Untersuchungen ist es über die Verwendung der innovativen Prüfmethode mit der Fugensonde gelungen, die Stabilität bzw. Lagerungsdichte von ungebundenen Fugen zu ermitteln. Die Verdichtung von ungebundenem Fugenmaterial nach dem Einfegen oder Einschlämmen ist eine notwendige Grundvoraussetzung, um das ungebundene Fugenmaterial über Eigengewicht und dynamische Krafteinwirkung durch Kornumlagerung zu verdichten. Dies hat zur Folge, durch Verdichtung erzeugte



Absackungen des ungebundenen Fugenmaterials -und somit entstehende offene Fugen- in einem weiteren Arbeitsschritt zu verfüllen. Durch Einschlämmen werden die Fugen bestmöglich gefüllt. Einfegen hat den Nachteil, dass je nach Wassergehalt das lose Fugenmaterial nicht im gesamten Fugenquerschnitt eingebracht werden kann (Hohlräume im Fugenquerschnitt, vgl. Abbildung 12). Jede vorgenommene Verfüllung ist zu verdichten. In Abhängigkeit von der Fugenbreite, vom Fugenmaterial und der Steinhöhe können mehrere Verdichtungsvorgänge notwendig werden.

Grundsätzlich gilt, dass Fugenmaterialien mit einem entsprechenden Wassergehalt in eine bessere Lagerungsdichte gebracht werden können als Materialien mit geringem Wassergehalt oder gar vollständig getrocknetes Material. Vollständig getrocknetes ungebundenes Fugenmaterial kann besser in die Fugen eingefegt werden als mit geringerem Wassergehalt. Es besitzt jedoch aufgrund des fehlenden Wassers ein erhöhtes Nachverdichtungspotential. Die durchgeführten Fugensondierungen haben selbst bei hohen Wassergehalten des Fugenmaterials bei Ausübung der Sondierung zu geringeren Eindringtiefen der Sondiernadel geführt als bei Fugenmaterial mit geringen Wassergehalten.

Die Verdichtungswilligkeit des Fugenmaterials hängt von der Kornform, der Korngrößenverteilung in Verbindung mit der Höhe der Feinanteile ab.

## 5 Praxisrelevante Aspekte der Untersuchung

Schäden in Form von Fugenentleerungen mit der Folge von sich bewegenden bzw. wackelnden Steinen treten in der Praxis sehr häufig auf. Die Arten der Fugenentleerungen werden in Metzger & Saathoff (10/2017) beschrieben. Die Untersuchungen haben eindeutig nachstehende Aspekte gezeigt:

- Die in Verkehrsflächen auftretenden Lasten aus Verkehr können nur sachgerecht abgetragen werden, wenn die Fugen sachgerecht gefüllt sind und das Fugenmaterial im eingebauten Zustand eine hinreichende Lagerungsdichte aufweist.
- Unter Einsatz von Wasser kann beim Verdichten die beste Lagerungsdichte des ungebundenen Fugenmaterials erreicht werden.
- Unter Berücksichtigung sämtlicher Prüfflächen kann der Mittelwert der Fugensondierungen mit einem Maximalwert von 5 mm in der Praxis erreicht werden.
- Hohe Feinanteile wirken sich einerseits beim Verdichtungsverfahren negativ aus und andererseits reduzieren die bei der Verdichtung erzeugten Schlammsschichten („Sperrschicht“) in der Fuge den Lastabtragungsquerschnitt, da die Feinanteile in der Fuge keine optimale Lastabtragung ermöglichen.

Jeder ausgeführte Verfüllungsvorgang sollte mit einer Verdichtung unter Einsatz einer Rüttelplatte abgeschlossen werden. Eine Verdichtung mit feuchtem Fugenmaterial zur Erlangung der optimalen Lagerungsdichte des Fugenmaterials sollte nach einer ersten Verdichtung mit relativ trockenem Fugenmaterial vorgenommen werden. Grund hierfür ist, dass es bei hohem Wassergehalt in Verbindung mit einer nicht hinreichenden Lagerungsdichte des Fugenmaterials erfahrungsgemäß zu erhöhten Steinverschiebungen kommen kann.

Es wird angeraten, bei Baumaßnahmen Probeflächen anzulegen, um die Art der Herstellung in Verbindung mit den zum Einsatz kommenden Materialien festzulegen und um großflächige mechanische Steinbeschädigungen und Verfärbungen durch die Verdichtung zu vermeiden.

## 6 Zusammenfassung

Der Wassergehalt des Fugenmaterials besitzt einen signifikanten Einfluss hinsichtlich der Anfangsstabilität bei neu erstellten ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen. Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge sollten mit feuchtem Fugenmaterial verdichtet werden, um den Reibungswiderstand im Material und zwischen Stein und Fugenmaterial zu reduzieren und demnach eine optimale und einheitliche Lagerungsdichte des ungebundenen Fugenmaterials zu erreichen und eine höchstmögliche Anfangsstabilität des Belages zu erhalten. Die Verdichtungswilligkeit des Fugenmaterials hängt von der Kornform, der Korngrößenverteilung in Verbindung mit der Höhe der Feinanteile ab.

Sowohl Einfegen als auch Einschlämmen von Fugenmaterial hat im Ergebnis keine hinreichende Lagerungsdichte des Fugenmaterials zur Folge. Die Fugensonde hat bei nahezu allen geprüften Fugenmaterialien bereits durch Eigengewicht der Prüfvorrichtung oder dem ersten/zweiten Wert der Sondierung das Fugenmaterial vollständig durchdrungen. Vereinzelt verbleibt die Sondiernadel auf einem groben Gesteinskorn, wenn eine grobe Gesteinskörnung nicht ausweichen kann. Dafür muss das Fugenmaterial nicht zwingend verdichtet sein.

Um Fugenentleerungen im Betrieb zu reduzieren, sollte jede vorgenommene Fugenfüllung idealerweise mit „feuchtem Fugenmaterial“ verdichtet werden. Findet eine Verdichtung nicht statt, kann das ungebundene Fugenmaterial im Betrieb durch Regen Wasser aufnehmen und es durch dynamische Verkehrsbelastung zu einer Nachverdichtung in Form von Kornumlagerungen mit der Folge von Absackungen im Fugenmaterial (Fugenentleerung Typ 2) kommen. Um Steinverschiebungen zu vermeiden, sollte die erste Verdichtung mit einem geringen Wassergehalt des Fugenmaterials -zur Vorfixierung der Platten bzw. Steine- ausgeführt werden.

Das häufige Phänomen in der Praxis der eintretenden Fugenentleerung (Typ 2) kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit nachweislich auf Kornumlagerungen des ungebundenen Fugenmaterials zurückgeführt werden.

Fugenmaterialien mit hohen Feinanteilen besitzen den Nachteil, dass bereits beim Einbau Feinanteile in den oberen Bereich der Bettungsschicht eingeschwemmt werden können und es dadurch bereits zu einer reduzierten Wasserdurchlässigkeit kommen kann.

Fugenmaterialien mit hohen Feinanteilen lassen sich mit einem notwendigen Wassergehalt unter Berücksichtigung der durchgeführten Untersuchungen nur einmal sachgerecht verdichten, da es beim Verdichtungsverfahren aufgrund der Kornumlagerung zum Setzen des Fugenmaterials kommt und zudem Feinanteile nach oben gesaugt werden, die einen erneuten Wasserzutritt bei dem nächsten Fugenfüll- und anschließendem Verdichtungsverfahren nicht ermöglichen.

Die Feinanteile ( $< 0,063$  mm) im Fugenmaterial sollten im Anlieferzustand möglichst gering sein, um eine Verschlammung der Bettungsoberschicht bereits bei der Herstellung zu vermeiden und um eine optimale Verdichtung der ungebundenen Fugen vornehmen zu können. Der Einbau eines Fugenschlusses sollte erst durchgeführt werden, wenn die Fugen nach der Herstellung eine hinreichende Anfangsstabilität aufweisen und ein Abtransport von Feinanteilen und Sandanteilen (feine Bestandteile der Korngröße 0,063 mm bis 1 mm) nahezu ausgeschlossen werden kann.

Bei den derzeit häufig praktizierten Verdichtungsverfahren in der Praxis nach hinreichender Trocknung wird das Bettungsmaterial mit einem geringen Wassergehalt verdichtet. Dadurch kann keine optimale Verdichtung der Bettungsschicht durchgeführt werden. Werden die Fugen bei der Herstellung nicht sachgerecht gefüllt und verdichtet, kann es im Betrieb durch eindringendes Wasser aufgrund der lockeren

Lagerungsdichte des Fugenmaterials zu einem erhöhten Wassereintritt in die Konstruktion kommen. Eine Erhöhung des Wassergehaltes des Bettungsmaterials im Grenzbereich zum optimalen Wassergehalt erzeugt eine Nachverdichtung der Bettung mit einer möglichen Spurrillenbildung.

Der horizontale Verschiebewiderstand und der vertikale Verformungswiderstand sollte bei weiteren Untersuchungen in Abhängigkeit von der Verdichtung und daraus erzeugten Lagerungsdichte des Fugenmaterials näher untersucht werden.

Weitere Untersuchungen zur optimalen Verdichtung der Bettungsschicht, insbesondere zur Verdichtung der Bettung mit einem optimalen Wassergehalt, sollten unter Berücksichtigung der hier gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt werden. Zudem sollten Untersuchungen zur Veränderung des Wassergehaltes des Bettungsmaterials im eingebauten Zustand ausgeführt werden. Hilfreich wären Untersuchungen hinsichtlich des Wassereintritts durch ungebundene Fugen in Abhängigkeit vom Fugenmaterial und von der Lagerungsdichte des Fugenmaterials.

## 7 Quellen- und Literaturverzeichnis

### 7.1 Literatur

- Ascher, D. (2003): Generierung von FALT-FEM Eingabedaten für Betonpflasterbefestigungen, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden
- Ascher, D.; Lerch, T. & Wellner F. (2007): Verformungsverhalten von Betonpflasterbefestigungen unter vertikaler und horizontaler dynamischer Lasteintragung, BFT
- Bayerlein, W., Bleutge, K. & Roeßner, W. (2015): Praxishandbuch Sachverständigenrecht, Verlag C.H. Beck oHG
- Becker, R. (2003): Anforderungen an Pflasterbefestigungen und Plattenbeläge, Straße + Autobahn, Kirschbaum Verlag GmbH
- Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (2013): Marktstudie „Betonsteinmarkt 2013“ der B+L Marktdaten GmbH
- Blab, R.; Füssl, J., Gagliano, B.; Hessmann, T. & Kluger-Eigl, W. (2013): Beiträge zur Weiterentwicklung von Pflasterbefestigungen, Professur für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau, Institut für Verkehrswissenschaften, Technische Universität Wien
- Boetcher, S.; Krass, K. & Radenberg M. (2006): Untersuchungen zur Ausbildung von Pflasterkonstruktionen mit Asphalttragschichten unter hohen Verkehrsbelastungen, Fakultät für Bauingenieurwesen Ruhr-Universität Bochum
- Borgwardt, S.; Gerlach, A. & Köhler, M. (2001): Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen, Kommentierung mit ausführlichen Hinweisen für die Planung und Ausführung versickerungsfähiger Bauweisen mit Betonpflastersystemen, Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau e.V.
- Caprez, M., Lanicca, E. & Partl, N. (2014): Feldversuch mit verschiedenen Pflästerungen und Plattendecken, Forschungsprojekt VSS 2008/503 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS), Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute
- Clemens, G. (1975): Technische Mechanik für Bauingenieure, VEB Verlag für Bauwesen
- Falkner, H. & Teutsch M. (1998): Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Materialprüfanstalt für das Bauwesen – MPA Braunschweig, Heft 141

- Füssl, J.; Kluger-Eigl, W. & Blab, R. (2016): Experimental identification and mechanical interpretation of the interaction behavior between concrete paving blocks. International journal of pavement engineering, Vol. 17; p. 478-488, doi: 10.1080/10298436.2014.993205, Technische Universität Wien
- Füssl, J.; Kluger-Eigl, W.; Eberhardsteiner, J. & Blab, R. (2015): Mechanical performance of pavement structures with paving slabs part ii: numerical simulation tool validated by means of full-scale accelerated tests. Engineering Structures 98, p. 221-229, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.10.055, Technische Universität Wien
- Gleitz, T. (1996): Beitrag zur rechnerischen Erfassung des nichtlinearen Spannungsverformungsverhaltens ungebundener Tragschichtmaterialien in flexiblen Straßenkonstruktionen, Dissertation am Lehrstuhl Straßenbau der Technische Universität Dresden
- Grundlagen der Bodenverdichtung (2011): 10. Auflage, Wacker Neuson
- Hankammer, G. & Mentlein, H. (2006): Abnahme von Bauleistungen, Tiefbau, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG
- Hassani, A. (2006): Modelling and structural design of a concrete block pavement system. International conference on concrete block paving, Tehran, Iran
- Hengl, H. & Füssl, J. (2016): The influence of superrelevant profiles of paving block structures on their load-bearing behavior. Engineering Structures, Vol 117, p. 195-203, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.03.003, Technische Universität Wien
- Hengl, H. (2017): Development and application of numerical simulation tools for the prediction of structural behaviour of paving block pavements, Professur für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau, Institut für Verkehrswissenschaften, Technische Universität Wien
- Illgen, M., Schmitt, G. & Welker, A. (2007): Untersuchung des Abfluss- und Versicherungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft Technische Universität Kaiserslautern on Kooperation mit IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur Gelsenkirchen
- Janda, G. (2004): Erarbeitung eines Bemessungsvorschlages für Pflaster- und Plattenbefestigungen, Masterthesis, Technische Universität Wien
- Jungfeld, I., Krass, K. & Rohleder, M. (2002): Ermittlung eines Bewertungshintergrundes für den horizontalen Verschiebungswiderstand von Pflasterdecken (Schlussbericht), AIF-Forschungsprojekt-Nr. 12126 N/1, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau
- Koch, C.; Krass, K.; Gleitz, T., Roßberg, K.; Wellner, F., Abu-Khiarah, M.; Dröge, C. & Leutner, R. (2001): Untersuchung über die Verteilung von auftretenden Schub- und Torsionskräften in Pflasterbelägen, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Heft 819)
- Koch, K. (1999): Zum Tragverhalten von Pflasterbefestigungen, Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum
- Köhler, M.; Ulonska, D. & Wellner, F. (2014): Dauerhafte Verkehrsflächen mit Betonpflastersteinen, Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG), Bonn in Zusammenarbeit mit der Beton Marketing Deutschland GmbH, Erkrath, 4. fachlich und redaktionell überarbeitete Ausgabe
- Krass, K. & Görener, E (2005): Anforderungen an das Bettungs- und Fugenmaterial für Pflasterdecken bei statischer und dynamischer Verkehrsbeanspruchung, Schlussbericht zum Forschungsprojekt 6.078 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau
- Krüger, Richard (1910): Das Kleinpflaster, Verlag von G. Ostwald
- Lerch, T. (2006): Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Betonpflasterkonstruktionen unter praxisrelevanter Belastung, Technische Universität Dresden, Schriftenreihe Professur für Straßenbau, Heft 15
- Mentlein, H. (2014): Pflaster Atlas, 4. Auflage, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG
- Metzger, A. & Saathoff, F. (10/2017): Fugenentleerung – Ursachen und Folgen, ungebundene Pflasterdecken und Plattenbelägen, Zeitschrift THIS Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Bauverlag BV GmbH

- Metzing, A. & Saathoff, F. (12/2017): Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen - Nachweis der Anfangsstabilität bei neu errichteten Flächen mit Fugensonde, Zeitschrift THIS Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Bauverlag BV GmbH
- Metzing, A. & Saathoff, F. (2010): Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbelägen, Funktion und Ausbildung der ungebundenen Fugenfüllung, Zeitschrift TIS Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Bauverlag BV GmbH
- Metzing, A. & Saathoff, F. (2018): Funktion der ungebundenen Fuge bei Pflasterdecken und Plattenbelägen - Auswahl von ungebundenem Fugenmaterial, Zeitschrift THIS Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Bauverlag BV GmbH
- Möller, G. (2007): Geotechnik und Bodenmechanik, Ernst & Sohn
- Nefeke, J. (2001): Grundlagen der Pflaster- und Verbundsteinverlegung, Wacker-Werke GmbH
- Noll, F. W. (1911): Zur Vervollkommenung des Kleinpflasters, Verlag von Emil Lange
- Press, F. & Siever, R. (2003): Allgemeine Geologie, Einführung in das System Erde, 3. Auflage, Spektrum, Akademischer Verlag
- Richter, D. & Heindel, M. (2012): Straßen- und Tiefbau, 12. Auflage, Teubner Verlag
- Rohleder, M. (2002): Horizontale Verschiebungen in Pflasterdecken und deren Visualisierung, Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 15
- Shackel, B. (1996): Handbuch Betonsteinpflaster, Beton-Verlag GmbH
- Shackel, B. (1982): An experimental investigation of factors influencing the design of interlocking concrete block pavement for roads, proceedings of the australian road research board, 11, part 2, pp. 6-15, Vermont South, Victoria, Australia
- Shackel, B. (1980): An experimental investigation of the roles of the bedding and jointing sands in the performance of interlocking of concrete block pavements, Concrete/Beton No. 19, Johannesburg, South Africa
- Shackel, B. (1990): Design and construction of interlocking concrete block pavements, Elsevier Applied Science, London
- Shackel, B. (1980): The performance of interlocking pavements under accelerated „trafficking“, Proc. First Int. Conf. on Concrete Block Paving, Conc. Publishing Co., London
- Velske, S.; Mentlein, H. & Eymann P. (2012): Straßenbautechnik, 7. Auflage, Werner Verlag
- Vespermann (2002): Das Kleinpflaster nach den Erfahrungen der Praxis, Union Deutsche Verlagsgesellschaft
- Vogel, S. (2002): Das Naturstein-Pflasterbuch, Band 1 und 2, TUSA-NATURSTEINE GmbH
- Vogel, S. (2003): Die Kunst des Pflasterns, 8. Auflage, TUSA-NATURSTEINE GmbH
- Voß, Karl-Uwe (2018): Schäden an Flächenbefestigungen aus Betonpflaster, Fraunhofer IRB Verlag
- Werkmeister, S.; Dawson, A. & Wellner, F. (2001): Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept, transportation research record 1757, Journal of the Transportation Research Board, p. 75-81, Technische Universität Dresden

## 7.2 DIN Normen

- DIN 18127 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch
- DIN 18318 (2016): VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen, Teil C, Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV), Verkehrswegebauarbeiten – Pflasterdecken und Plattenbeläge in ungebundener Ausführung, Einfassungen
- DIN EN 1097-5 Berichtigung 1 (2008): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung
- DIN EN 1338 (2003): Pflastersteine aus Beton, Anforderungen und Prüfverfahren

- DIN EN 1339 (2003), Platten aus Beton, Anforderungen und Prüfverfahren
- DIN EN 1341 (2013), Platten aus Naturstein für Außenbereiche, Anforderungen und Prüfverfahren
- DIN EN 1342 (2013), Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche, Anforderungen und Prüfverfahren
- DIN EN 1342 (2013), Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche, Anforderungen und Prüfverfahren
- DIN EN 1344 (2015), Pflasterziegel, Anforderungen und Prüfverfahren
- DIN EN 933-1 (2006), Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
- DIN EN 933-6 (2014), Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften – Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen

### **7.3      Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen, Technische Lieferbedingungen, Richtlinien, Merkblätter, Empfehlungen und sonstige Regelwerke**

- Empfehlung zu Planung und Bau von Verkehrsflächen auf Bauwerken (2005), Forschungsgesellschaft und Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.
- M Geok E, Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus (2016), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Merkblatt für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen mit Pflasterdecken oder Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie von Einfassungen (2016), M BEP R2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Merkblatt für Dränbetontragschichten (2013), M DBT R2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Großformaten (2013), M FG R2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken und Plattenbelägen in ungebundener Ausführung sowie Einfassungen (2015), MFP R2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen (2013), MVV R2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen (1998), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung (2005), RAS Ew, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (2012), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- Richtlinie Pflaster- und Plattendecken für befahrene und begangene Flächen in ungebundener und gebundener Ausführung sowie Mischbauweisen (2014), Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V.
- RVS 08.18.01 (2009), Technische Vertragsbedingungen Deckenarbeiten Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene - Verkehr
- SN 640 480a (2009), Schweizer Norm, Pflasterungen, Konzeption, Oberbaudimensionierung, Anforderungen und Ausführung, Schweizer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute
- SN 640 482a (2017), Schweizer Norm, Plattendecken, Konzeption, Oberbaudimensionierung, Anforderungen und Ausführung, Schweizer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute
- TL Geok E-StB 05, Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaues (2005), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.

- TL Gestein-StB 04, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (2004/Fassung 2007), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- TL Pflaster StB 06/2015, Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen (2006/Fassung 2015), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- TL SoB StB 04, Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (2004/Fassung 2007), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- TP Eben – Berührende Messungen, Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, teil berührende Messungen (2007), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- ZTV Ew-StB 14, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Entwässerungseinrichtungen im Straßenbau (2014), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- ZTV Pflaster-StB 06, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen (2006), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- ZTV Pflaster-StB 2000, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen (2000), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- ZTV SoB-StB 04, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (2004/Fassung 2007), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
- ZTV-Wegebau, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb von Flächen des Straßenverkehrs (2013), Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.

## 7.4 Internetseiten

- [https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedispersive\\_R%C3%B6ntgenspektroskopie](https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedispersive_R%C3%B6ntgenspektroskopie), Zugriff 22.06.2018
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Kolmation>, Zugriff 06.06.2018
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Kraft>, Zugriff 13.04.2018
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Mittelwert>, Zugriff 01.05.2018 und 24.06.2018
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Stichprobenvarianz\\_\(Sch%C3%A4tzfunktion\)#Stichprobenstandardabweichung](https://de.wikipedia.org/wiki/Stichprobenvarianz_(Sch%C3%A4tzfunktion)#Stichprobenstandardabweichung), Zugriff 01.05.2018
- <https://support.office.com/de-de/article/stabw-funktion-51fecaa-231e-4bbb-9230-33650a72c9b0>, Zugriff 01.05.2018
- <https://www.fersch.de/pdfdoc/Physik.pdf>, Zugriff 26.06.2018
- <https://www.kapiert.de/kegel/>, Zugriff 13.04.2018
- <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/kraftstoss-und-impuls>, Zugriff 26.06.2018
- <https://www.terrachem.de/roentgenbeugungsanalyse/>, Zugriff 22.06.2018

## 7.5 E-Mails

- E-Mail Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V. über Produktionsdaten in Deutschland und Importmengen aus China
- E-Mail vom Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. über Produktionsdaten von Ziegel für Boden und Straßenbeläge

## 8      Anhang

Alle hier aufgeführten Anhänge (Datenvolumen etwa 70 MB)  
können als Daten-CD o.ä. beim Autor der vorliegenden Arbeit  
oder bei der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
der Universität Rostock kostenlos angefordert werden!

### **Anhang A: Verwendete Materialien und Geräte**

- Anhang A1: Technisches Datenblatt Gefälleestrich ESM (quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG)
- Anhang A2: Technisches Merkblatt Flächendränung Aqua Drain HB (Gutjahr Systemtechnik GmbH)
- Anhang A3: Technisches Merkblatt Gebundene Ausgleichsschicht aus Grobkornmörtel TGM (Traß-Grobkorn-Mörtel (Tubag, quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG)
- Anhang A4: Geosynthetischer Straßenbauvliesstoff Secutex 151 GRK 3 C (NAUE GmbH & Co. KG)
- Anhang A5: Technisches Datenblatt Nr. 01.02-01 VOLFI-Fugenkreuze mit T-Schenkel (VOLFI Volker Fischer GmbH)
- Anhang A6: Pflastersteine gemäß Zeichnungs-Nr. E.830.51.026.SH100, S.830.52.870.SH100, S.830.52.874.SH100, einschl. Prüfbericht über die Spaltzugfestigkeitsprüfung von Pflastersteinen nach DIN EN 1338
- Anhang A7: Technisches Datenblatt vorwärtslaufende Vibrationsplatte DPS1850Hb (Wacker Neuson SE)
- Anhang A8: Technisches Datenblatt vorwärtslaufende Vibrationsplatte DPU4545He (Wacker Neuson SE)
- Anhang A9: Eignungsprüfung Nr.: 122536/13 vom 31.05.2013 über die Untersuchung von Baustoffgemischen nach TL Pflaster-StB 06 HeidenLabor für Baustoff- und Umweltprüfung GmbH, Bettungsmaterial 0/8 mm für sämtliche Prüfflächen
- Anhang A10: Prüfzeugnis Nr. 1122/20a-B/14 vom 08.12.2014 nach DIN EN 12620 (EN 12620 Beton) der Dr. Moll GmbH, Fugenmaterial 0/2 mm (Brechsand) mit wenigen Feinanteilen (Prüfflächen 1)
- Anhang A11: Prüfzeugnis Nr. 1026/49-A/14 vom 14.11.2014 nach TL Gestein-StB (EN 13043) Asphalt der Dr. Moll GmbH, Fugenmaterial 0/2 mm (Brechsand) mit vielen Feinanteilen (Prüfflächen 2)
- Anhang A12: Erstprüfung Nr. 2547/17 vom 22.12.2017 nach DIN EN 12620 (EN 12620 Beton) der Baustoffprüfstelle Wismar GmbH, Fugenmaterial 0/2 mm (Rundkorn bzw. Natursand) (Prüfflächen 3)
- Anhang A13: Prüfzeugnis Nr. 1361/7-PF/13 vom 10.01.2014 nach TL Pflaster-StB (EN 13285) der Dr. Moll GmbH, Fugenmaterial 0/4 mm und 0/5 mm (Brechsand-Splitt-Gemisch) (Prüfflächen 4 und 5)
- Anhang A14: Prüfzeugnis Nr. 1122/20a-PF/14 vom 08.12.2014 nach TL Pflaster-StB (EN 13285) der Dr. Moll GmbH, Fugenmaterial 0/8 mm (Brechsand-Splitt-Gemisch) (Prüfflächen 6)
- Anhang A15: Prüfzeugnis Nr. 1361/10-B/14 vom 19.12.2014 nach DIN EN 12620 (EN 12620 Beton) der Dr. Moll GmbH, Fugenmaterial 2/5 mm (Splitt) (Prüfflächen 7)

### **Anhang B: Prüfplan der Prüfflächen**

### **Anhang C: Durchgeführte Untersuchungen am Fugen- und Bettungsmaterial**

#### ***Anhang C1: Korngrößenverteilungen Fugenmaterialien***

- Anhang C1.1: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A10)
- Anhang C1.2: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A10) der Prüfflächen Nr. 1.3.1, 1.4.4, 1.5.1 und 1.6
- Anhang C1.3: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen (Anhang A11)



- Anhang C1.4: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen (Anhang A11) der Prüfflächen Nr. 2.3.1, 2.4.4, 2.5.1 und 2.6
- Anhang C1.5: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Rundkorn 0/1 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A12)
- Anhang C1.6: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Rundkorn 0/1 mit wenigen Feinanteilen (Anhang A12) der Prüfflächen Nr. 3.3.1, 3.4.4, 3.5.1 und 3.6
- Anhang C1.7: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm mit vielen Feinanteilen (Anhang A13)
- Anhang C1.8: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/4 mm mit vielen Feinanteilen (Anhang A13) der Prüfflächen Nr. 4.3, 4.4.4, 4.5 und 4.6
- Anhang C1.9: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A13)
- Anhang C1.10: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A13) der Prüfflächen Nr. 5.3, 5.4.4, 5.5 und 5.6
- Anhang C1.11: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A14)
- Anhang C1.12: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A14) der Prüfflächen Nr. 6.3, 6.4.4, 6.5 und 6.6
- Anhang C1.13: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Fugenmaterial Splitt 2/5 mm (Anhang A15)
- Anhang C1.14: Korngrößenverteilungen eingebautes Fugenmaterial Splitt 2/5 mm (Anhang A15) der Prüfflächen Nr. 7.3 und 7.4.2

### **Anhang C2: Korngrößenverteilungen Bettungsmaterial**

- Anhang C2.1: Korngrößenverteilungen Lieferkörnung Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9)
- Anhang C2.2: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9)
- Anhang C2.2.1: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 1: Proben an Prüfflächen Nr. 1.3.1 (Bettung unter Stein), 1.4.4 (Bettung oben), 1.4.4 (Bettung unten), 1.5.1 (Bettung oben), 1.5.1 (Bettung unten), 1.6 (Bettung oben), 1.6 (Bettung unten)
- Anhang C2.2.2: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 2: Proben an Prüfflächen Nr. 2.3.1 (Bettung oben), 2.3.1 (Bettung unten), 2.4.4 (Bettung oben), 2.4.4 (Bettung unten), 2.5.1 (Bettung oben), 2.5.1 (Bettung unten), 2.6 (Bettung oben), 2.6 (Bettung unten)
- Anhang C2.2.3: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 3: Proben an Prüfflächen Nr. 3.3.1 (Bettung oben), 3.3.1 (Bettung unten), 3.4.4 (Bettung oben), 3.4.4 (Bettung unten), 3.5.1 (Bettung oben), 3.5.1 (Bettung unten), 3.6 (Bettung oben), 3.6 (Bettung unten)
- Anhang C2.2.4: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 4: Proben an Prüfflächen Nr. 4.3 (Bettung oben), 4.3 (Bettung unten), 4.4.4 (Bettung oben), 4.4.4 (Bettung unten), 4.5 (Bettung oben), 4.5 (Bettung unten), 4.6 (Bettung oben), 4.6 (Bettung unten)
- Anhang C2.2.5: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 5: Proben an Prüfflächen Nr. 5.3 (Bettung oben), 5.3 (Bettung unten), 5.4.4 (Bettung oben), 5.4.4 (Bettung unten), 5.5 (Bettung oben), 5.5 (Bettung unten), 5.6 (Bettung oben), 5.6 (Bettung unten)

Anhang C2.2.6: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 6: Proben an Prüfflächen Nr. 6.3 (Bettung oben), 6.3 (Bettung unten), 6.4.4 (Bettung oben), 6.4.4 (Bettung unten), 6.5 (Bettung oben), 6.5 (Bettung unten), 6.6 (Bettung oben), 6.6 (Bettung unten)

Anhang C2.2.7: Korngrößenverteilungen eingebautes Bettungsmaterial Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm (Anhang A9) der Prüffläche Nr. 7: Proben an Prüfflächen Nr. 7.3 (Bettung oben), 7.3 (Bettung unten), 7.4.2 (Bettung oben), 7.4.2 (Bettung unten)

### ***Anhang C3: Verschiedene Untersuchungen am Fugen- und Bettungsmaterial***

Anhang C3.1: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial

Anhang C3.1.1: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 1

Anhang C3.1.2: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 2

Anhang C3.1.3: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 3

Anhang C3.1.4: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 4

Anhang C3.1.5: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 5

Anhang C3.1.6: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 6

Anhang C3.1.7: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 7

Anhang C3.1.8: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Anwendungsfall Nr. 1

Anhang C3.1.9: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Anwendungsfall Nr. 2

Anhang C3.1.10: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Anwendungsfall Nr. 3

Anhang C3.1.11: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 1

Anhang C3.1.12: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 2

Anhang C3.1.13: Nachweis der Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bei Prüffläche Nr. 3

Anhang C3.2: Bestimmung des Wassergehaltes des eingebauten Fugenmaterials der Prüfflächen Nr. 1 bis 7 beim Einbau

Anhang C3.2.1: Übersicht der ermittelten Wassergehalte des eingebauten Fugenmaterials der Prüfflächen Nr. 1 bis 7 beim Einbau

Anhang C3.3: Bestimmung des Wassergehaltes des eingebauten Bettungsmaterials an verschiedenen Prüfflächen

Anhang C3.4: Änderung des Wassergehaltes des eingebauten Bettungsmaterials verschiedener Prüfflächen bei unterschiedlicher Liegezeit

Anhang C3.5: Wassergehalt des eingebauten Bettungsmaterials verschiedener Prüfflächen bei kurzer Liegezeit nach der Verdichtung

Anhang C3.6: Wassergehalt des eingebauten Bettungsmaterials verschiedener Prüfflächen bei langer Liegezeit nach der Verdichtung

### ***Anhang C4: Bestimmung des Fließkoeffizienten nach DIN EN 933-6 an der Gesteinskörnung 0/2 mm sämtlicher Fugenmaterialien der Prüfflächen Nr. 1 bis 7***

### ***Anhang C5: Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile < 0,063 mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial der Prüfflächen Nr. 1 bis 7***

Anhang C5.1: Prüffläche Nr. 1 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile < 0,063 mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen

- Anhang C5.2: Prüffläche Nr. 2 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C5.3: Prüffläche Nr. 3 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C5.4: Prüffläche Nr. 4 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C5.5: Prüffläche Nr. 5 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C5.6: Prüffläche Nr. 6 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C5.7: Prüffläche Nr. 7 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Bettungsmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen

***Anhang C6: Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial der Prüfflächen Nr. 1 bis 7***

- Anhang C6.1: Prüffläche Nr. 1 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C6.2: Prüffläche Nr. 2 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C6.3: Prüffläche Nr. 3 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C6.4: Prüffläche Nr. 4 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C6.5: Prüffläche Nr. 5 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C6.6: Prüffläche Nr. 6 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen
- Anhang C6.7: Prüffläche Nr. 7 - Zusammenstellung der Veränderungen der Feinanteile  $< 0,063$  mm und dem Siebdurchgang beim Durchgang 2 mm beim Fugenmaterial bei einer unterschiedlichen Anzahl von Verdichtungsvorgängen

***Anhang C7: Bestimmung der Proctordichte des Fugenmaterials der Prüfflächen Nr. 1 bis 6***

- Anhang C7.1: Bestimmung der Proctordichte für das Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen (Anhang A10)

Anhang C7.2: Bestimmung der Proctordichte für das Fugenmaterial Brechsand 0/2 mm mit vielen Feinanteilen (Anhang A11)

Anhang C7.3: Bestimmung der Proctordichte für das Fugenmaterial Rundkorn 0/1 mm (Anhang A12)

Anhang C7.4: Bestimmung der Proctordichte für das Fugenmaterial Brechkorn 0/4 mm mit vielen Feinanteilen (Anhang A13)

Anhang C7.5: Bestimmung der Proctordichte für das Fugenmaterial Brechkorn 0/5 mm (Anhang A13)

Anhang C7.6: Bestimmung der Proctordichte für das Fugenmaterial Brechkorn 0/8 mm (Anhang A14)

### ***Anhang C8: Korngrößenverteilungen vom Fugen- und Bettungsmaterial zu den Voruntersuchungen***

Anhang C8.1: Anwendungsfall 1

Anhang C8.1.1: Korngrößenverteilungen Fugenmaterial Probestellen 1 und 2

Anhang C8.1.2: Korngrößenverteilungen Bettungsmaterial Probestellen 1 und 2

Anhang C8.2: Anwendungsfall 2

Anhang C8.2.1: Korngrößenverteilung Fugenmaterial Probestelle 1

Anhang C8.2.2: Korngrößenverteilungen Bettungsmaterial Probestelle 1 (oberflächlich verschlammte) und Probestelle 2

Anhang C8.3: Anwendungsfall 3

Anhang C8.3.1: Korngrößenverteilungen Fugenmaterial Probestellen 2, 3 und 5

Anhang C8.3.2: Korngrößenverteilungen Bettungsmaterial Probestellen 2, 3 und 5

### ***Anhang C9: Untersuchungen der tiefgrauen Verfärbung an der Oberfläche im Fugen- und Bettungsmaterial durch Röntgenbeugung und REM-EDX Messung***

## **Anhang D: Fugensondierungen auf den einzelnen Prüfflächen**

### ***Anhang D1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1***

Anhang D1.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.1

Anhang D1.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.2

Anhang D1.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.3

Anhang D1.3.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.3.1

Anhang D1.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.4

Anhang D1.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.4.1

Anhang D1.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.4.2

Anhang D1.4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.4.3

Anhang D1.4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.4.4

Anhang D1.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.5

Anhang D1.5.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.5.1

Anhang D1.6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 1.6

### ***Anhang D2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2***

Anhang D2.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.1

Anhang D2.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.2

Anhang D2.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.3  
Anhang D2.3.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.3.1  
Anhang D2.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.4  
Anhang D2.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.4.1  
Anhang D2.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.4.2  
Anhang D2.4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.4.3  
Anhang D2.4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.4.4  
Anhang D2.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.5  
Anhang D2.5.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.5.1  
Anhang D2.6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 2.6

***Anhang D3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3***

Anhang D3.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.1  
Anhang D3.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.2  
Anhang D3.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.3  
Anhang D3.3.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.3.1  
Anhang D3.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.4  
Anhang D3.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.4.1  
Anhang D3.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.4.2  
Anhang D3.4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.4.3  
Anhang D3.4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.4.4  
Anhang D3.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.5  
Anhang D3.5.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.5.1  
Anhang D3.6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 3.6

***Anhang D4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4***

Anhang D4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.1  
Anhang D4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.2  
Anhang D4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.3  
Anhang D4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.4  
Anhang D4.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.4.1  
Anhang D4.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.4.2  
Anhang D4.4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.4.3  
Anhang D4.4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.4.4  
Anhang D4.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.5  
Anhang D4.6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 4.6

***Anhang D5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5***

Anhang D5.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.1  
Anhang D5.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.2

Anhang D5.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.3  
Anhang D5.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.4  
Anhang D5.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.4.1  
Anhang D5.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.4.2  
Anhang D5.4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.4.3  
Anhang D5.4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.4.4  
Anhang D5.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.5  
Anhang D5.6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 5.6

#### ***Anhang D6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6***

Anhang D6.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.1  
Anhang D6.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.2  
Anhang D6.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.3  
Anhang D6.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.4  
Anhang D6.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.4.1  
Anhang D6.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.4.2  
Anhang D6.4.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.4.3  
Anhang D6.4.4: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.4.4  
Anhang D6.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.5  
Anhang D6.6: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 6.6

#### ***Anhang D7: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7***

Anhang D7.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7.2  
Anhang D7.3: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7.3  
Anhang D7.4.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7.4.1  
Anhang D7.4.2: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7.4.2  
Anhang D7.5: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7.5  
Anhang D7.5.1: Fugensondierungen Prüffläche Nr. 7.5.1

#### **Anhang E: Auswertung verschiedener Messdaten**

Anhang E1.1: Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4  
Anhang E1.2: Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4  
Anhang E1.3: Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4  
Anhang E1.4: Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4  
Anhang E1.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4  
Anhang E1.6: Prüffläche Nr. 1 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen  
Anhang E1.7: Prüffläche Nr. 1 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen

- Anhang E2.1: Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte Prüfflächen Nr. 2.4.1 bis 2.4.4
- Anhang E2.2: Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe Prüfflächen Nr. 2.4.1 bis 2.4.4
- Anhang E2.3: Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung Prüfflächen Nr. 2.4.1 bis 2.4.4
- Anhang E2.4: Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen Prüfflächen Nr. 2.4.1 bis 2.4.4
- Anhang E2.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 2.4.1 bis 2.4.4
- Anhang E2.6: Prüffläche Nr. 2 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E2.7: Prüffläche Nr. 2 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E3.1: Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte Prüfflächen Nr. 3.4.1 bis 3.4.4
- Anhang E3.2: Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe Prüfflächen Nr. 3.4.1 bis 3.4.4
- Anhang E3.3: Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung Prüfflächen Nr. 3.4.1 bis 3.4.4
- Anhang E3.4: Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen Prüfflächen Nr. 3.4.1 bis 3.4.4
- Anhang E3.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 3.4.1 bis 3.4.4
- Anhang E3.6: Prüffläche Nr. 3 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E3.7: Prüffläche Nr. 3 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E4.1: Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte Prüfflächen Nr. 4.4.1 bis 4.4.4
- Anhang E4.2: Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe Prüfflächen Nr. 4.4.1 bis 4.4.4
- Anhang E4.3: Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung Prüfflächen Nr. 4.4.1 bis 4.4.4
- Anhang E4.4: Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen Prüfflächen Nr. 4.4.1 bis 4.4.4
- Anhang E4.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 4.4.1 bis 4.4.4
- Anhang E4.6: Prüffläche Nr. 4 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E4.7: Prüffläche Nr. 4 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E5.1: Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte Prüfflächen Nr. 5.4.1 bis 5.4.4
- Anhang E5.2: Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe Prüfflächen Nr. 5.4.1 bis 5.4.4
- Anhang E5.3: Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung Prüfflächen Nr. 5.4.1 bis 5.4.4
- Anhang E5.4: Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen Prüfflächen Nr. 5.4.1 bis 5.4.4
- Anhang E5.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 5.4.1 bis 5.4.4
- Anhang E5.6: Prüffläche Nr. 5 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E5.7: Prüffläche Nr. 5 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E6.1: Vergleich der Messdaten Anzahl der Schläge auf der Grundplatte Prüfflächen Nr. 6.4.1 bis 6.4.4
- Anhang E6.2: Vergleich der Messdaten der Sondiertiefe Prüfflächen Nr. 6.4.1 bis 6.4.4
- Anhang E6.3: Vergleich der Messdaten der Fugenvertiefung Prüfflächen Nr. 6.4.1 bis 6.4.4

- Anhang E6.4: Vergleich der Messdaten des Mittelwertes der Fugensondierungen Prüfflächen Nr. 6.4.1 bis 6.4.4
- Anhang E6.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 6.4.1 bis 6.4.4
- Anhang E6.6: Prüffläche Nr. 6 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E6.7: Prüffläche Nr. 6 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E7.5: Höchst- und Niedrigstwert sowie Differenz der Stichprobenstandardabweichung der Fugensondierungen der Prüfflächen Nr. 7.2, 7.3, 7.4.1, 7.4.2, 7.5 und 7.5.1
- Anhang E7.6: Prüffläche Nr. 7 - Darstellung der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E7.7: Prüffläche Nr. 7 - Darstellung des Mittelwertes der mittleren Eindringtiefe der Fugensondierungen an allen Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen
- Anhang E8: Vergleich des Mittelwertes bei Prüfflächen Nr.1.4.4, 2.4.4, 3.4.4, 4.4.4, 5.4.4 und 6.4.4



## 9 Formelverzeichnis

Berechnung des Größtkorns für das Fugenmaterial

Fugenbreite

$$\frac{\text{Fugenbreite}}{2} = \text{Größtkorn Fugenmaterial} \quad [\text{Formel 1}]$$

Berechnung der Druckspannung in der Fuge

$$\sigma_{\text{Fuge Vollfüllung}} = \frac{F_N \times \text{Reibungskoeffizient}}{(L_{\text{Stein}} \times (H_{\text{Stein}} \times 0,5) \times (\text{Reifenaufstandsfläche in } \%))} \quad [\text{Formel 2}]$$

$F_N$ : Radlast in Newton [N]

$\mu$ : Reibungskoeffizienten [/]

$L_{\text{Stein}}$ : Steinlänge in Millimeter [mm]

$H_{\text{Stein}}$ : Steinhöhe in Millimeter [mm]

Reifenaufstandsfläche in Prozent [%]

$\sigma_{\text{Fuge Vollfüllung}}$ : Druckspannung in der Fuge bei Vollfüllung in Newton pro Quadratmillimeter [N/mm<sup>2</sup>]

Berechnung des Wassergehaltes

$$W = \frac{[(M_1 + M_2) - (M_3 + M_2)]}{M_3} \times 100 \quad [\text{Formel 3}]$$

$M_1$ : Masse der Messprobe [g]

$M_2$ : Gewicht Behälter [g]

$M_1 + M_2$ : Masse der feuchten Messprobe + Masse Behälter [g]

$M_3 + M_2$ : Masse der trockenen Messprobe + Masse Behälter [g]

Berechnung der potentiellen Energie

$$W_{\text{POT}} = m \times g \times h \quad [\text{Formel 4}]$$

$W_{\text{POT}}$ : Potentielle Energie in Newton-Meter [Nm]

$m$ : Masse des Körpers, der gehoben wird, in Kilogramm [kg]

$g$ : Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$h$ : Höhe, um die das Objekt angehoben wird, in Meter [m]

#### Berechnung der kinetischen Energie

$$W_{KIN} = 0,5 \times m \times v^2 \quad \text{[Formel 5]}$$

$W_{KIN}$ : Kinetische Energie in Newton-Meter [Nm]

$v$ : Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde [m/s]

#### Berechnung der Aufprallgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{(2 \times W_{Kin}) / m} \quad \text{[Formel 6]}$$

#### Berechnung der Mantellinie des Kegels

$$s^2 = r^2 + h^2 \quad \text{[Formel 7]}$$

$s$ : Mantellinie des Kegels in Millimeter [mm]

$r$ : Radius des Kegels in Millimeter [mm]

$h$ : Höhe des Kegels in Millimeter [mm]

#### Berechnung der Mantelfläche des Kegels

$$A_M = \pi \times r \times \sqrt{r^2 + h^2} \quad \text{[Formel 8]}$$

$A_M$ : Mantelfläche der Fugensondenspitze in Quadratmillimeter [mm<sup>2</sup>]

$\pi$ : Pi als Zahlenwert

#### Berechnung der Kraft durch Eigengewicht der Prüfvorrichtung

$$F = m \times g \quad \text{[Formel 9]}$$

$m$ : Eigengewicht der Prüfvorrichtung in Kilogramm [kg]

$g$ : Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$F$ : Kraft durch Eigengewicht der Prüfvorrichtung in Newton [N]

#### Berechnung des Spitzendrucks aus Eigengewicht der Prüfvorrichtung

$$\sigma = F / A_M \quad \text{[Formel 10]}$$

$F$ : Kraft durch Eigengewicht der Prüfvorrichtung in Newton [N]

$A_M$ : Mantelfläche der Fugensondenspitze in Quadratmillimeter [mm<sup>2</sup>]

$\sigma$ : Druckspannung der Fugensondenspitze in Newton pro Quadratmillimeter [N/mm<sup>2</sup>]

### Berechnung des Impulses zur Bestimmung der Aufprallkraft

$$p = m \times \sqrt{(2 \times W)/m} \quad [\text{Formel 11}]$$

p: Impuls [kgm/s]

$W_{\text{KIN}}$ : Kinetische Energie in Newton-Meter [Nm]

m: Masse des Körpers, der gehoben wird in Kilogramm [kg]

### Berechnung der Aufprallkraft auf der Grundplatte

$$F = p/t \quad [\text{Formel 12}]$$

F: Aufprallkraft in Newton [N]

p: Impuls [kgm/s]

t: Aufprallzeit in Sekunden [s]

### Berechnung des arithmetischen Mittels

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \quad [\text{Formel 13}]$$

$\bar{x}$ : Arithmetisches Mittel

$\Sigma$ : Summe aller Messungen

n: Anzahl der Messungen

i: Werte der Einzelmessung

### Berechnung der Standardabweichung

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\text{Formel 14}]$$

$\bar{s}$ : Standardabweichung

$\bar{x}$ : Arithmetisches Mittel

n: Anzahl der Messungen

i: Werte der Einzelmessung

### Berechnung der Differenz der Wassergehalte

$$\Delta \text{Wassergehalt} = [\sum_{i=1}^n (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)/n] - [\sum_{i=1}^n (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)/n] \quad [\text{Formel 15}]$$

## 10      **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: .....Stehendes Wasser in Fuge und Bettung .....	5
Abbildung 2: ....Enge Fuge, die nicht verfüllbar ist .....	5
Abbildung 3: ....Schematische Darstellung zur Filterstabilität nach Herstellung bei gefüllten Fugen.....	6
Abbildung 4: ....Schematische Darstellung zur Filterstabilität nach Inbetriebnahme bei ..... bereits geleerten Fugen	6
Abbildung 5: .....Stehendes Wasser auf der Bettung, geleerte Fugen.....	7
Abbildung 6: .....Splitt als Bettungsmaterial sichtbar.....	7
Abbildung 7: .....Fugenmaterial 0/2 mm (orange), Bettungsmaterial 2/5 mm (blau) .....	7
Abbildung 8: ....Schematische Darstellung zur Fugenentleerung, hier gefüllte Fugen unmittelbar..... nach der Herstellung	8
Abbildung 9: ....Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch Nachverdichtung in ..... Form von Kornumlagerungen im Betrieb	8
Abbildung 10: ...Unbelastete Probestelle, Fugenmaterial befindet sich nicht unter dem Stein.....	9
Abbildung 11: ...Belastete Probestelle, Fugenmaterial befindet sich unter dem Stein.....	9
Abbildung 12: ...Schematische Darstellung zur Fugenentleerung, hier oberflächlich gefüllte Fugen, ..... wobei im Querschnitt Hohlräume vorhanden sind	9
Abbildung 13: ...Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch mangelhafte Fugenfüllung..... im Betrieb	10
Abbildung 14: ...Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch oberflächennahe Entleerung, .... vollständig gefüllter Fugen nach Herstellung	10
Abbildung 15: ...Schematische Darstellung zur Fugenentleerung durch das Aussaugen von Fugen- ..... material durch die Pump- und Sogwirkung von Reifen	11
Abbildung 16: ...Aufbau einer ungebundenen Pflasterdecke (in Anlehnung an ZTV Pflaster-StB, 2006) ..	12
Abbildung 17: ...Oberflächliche Fugenbreite und Fugenbreite im Bereich so genannter..... „Fugentaschen“ (gelbe Pfeile)	14
Abbildung 18: ...Darstellung des Verlaufes der Druckspannungen bei einem Fugenfüllungsgrad ..... von 100% [Abbildung in Anlehnung an Mentlein (2014)]	16
Abbildung 19: ...Darstellung des Verlaufes der Druckspannungen bei einer vorhandenen Fugen-..... vertiefung und einem Fugenfüllungsgrad von < 100 % [Abbildung in Anlehnung an Mentlein (2014)]	16
Abbildung 20: ...Schematische Darstellung Fugen- und Bettungsmaterial aus grober Gesteinskörnung . ohne Ausweichneigung bzw. Ausweichpotential	17
Abbildung 21: ...Schematische Darstellung Fugen- und Bettungsmaterial aus Baustoffgemisch ..... (Sand-Splitt-Gemisch) mit Ausweichneigung bzw. Ausweichpotential	17
Abbildung 22: ...Bereich der Korngrößenverteilung für ein Fugenmaterial Baustoffgemisch 0/4 bzw. .... 0/5 mm (TL Pflaster-StB, 2006/2015)	18
Abbildung 23: ...Bereich der Korngrößenverteilung für ein Fugenmaterial Baustoffgemisch 0/8 mm ..... (TL Pflaster-StB, 2006/2015)	18

Abbildung 24: ...Bereich der Korngrößenverteilung für ein Baustoffgemisch 0/2 mm (ZTV ..... 19 Pflaster-StB, 2006; TL Pflaster-StB 2006/2015)	19
Abbildung 25: ...Probestelle 1 – Oberflächlich ist die Fuge visuell geschlossen, im Fugenquerschnitt .... 20 ist ein Hohlraum (oranges Rechteck) deutlich sichtbar	20
Abbildung 26: ...Probestelle 2 – Bettungsschicht ohne oberflächliche Feinanteilanreicherung in ..... 21 einem Randbereich	21
Abbildung 27: ...Probestelle 1 – Verschlämmte Oberfläche der Bettung (anthrazitfarben), Bettung ..... 21 als Ursprungsmaterial sichtbar (orange Pfeile)	21
Abbildung 28: ...Probestelle 2 – Bettungsschicht ohne oberflächliche Feinanteilanreicherung in einem... 22 Randbereich (analog Abbildung 26)	22
Abbildung 29: ...Probestelle 2 – Verschlämmte bzw. verfestigte Oberfläche der Bettung (anthrazit- ..... 23 farben) im belasteten Bereich (oranger Pfeil), ursprüngliche Bettung besitzt einen rötlichen Farbton (gelbe Pfeile)	23
Abbildung 30: ...Probestelle 5 – Bettungsschicht ohne oberflächliche Feinanteilanreicherung in ..... 23 einem gering belasteten Randbereich (analog Abbildung 26)	23
Abbildung 31: ...Schematische Darstellung des Aufbaues der Prüfflächen..... 25	25
Abbildung 32: ...Drei hintereinander befindliche Prüfflächen vor dem Einbringen der Bettung..... 26	26
Abbildung 33: ...Darstellung der Flächendrainung mit Grobkornmörtel-Füllung der Stege ..... 27 (vgl. Abbildung 31)	27
Abbildung 34: ...Beispielhafte Probe des hergestellten Grobkornmörtels..... 27	27
Abbildung 35: ...Verwendeter Betonpflasterstein mit 2 Abstandshaltern (gelbe Rechtecke) ..... 28 an der Längsseite nach dem Rückbau der Prüfflächen	28
Abbildung 36: ...Zeichnung des verwendeten Pflastersteines ..... 28	28
Abbildung 37: ...Korngrößenverteilung des verwendeten Bettungsmaterials 0/8 mm ..... 28	28
Abbildung 38: ...Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Brechsand 0/2 mm, ..... 29 wenig Feinanteile (grün), Brechsand 0/2 mm viele Feinanteile (grau), Rundkorn 0/1 mm, wenig Feinanteile (orange)	29
Abbildung 39: ...Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Brechsand-Splitt- ..... 30 Gemisch 0/4 mm, viele Feinanteile (orange), Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm, wenig Feinanteile (grau)	30
Abbildung 40: ...Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Brechsand-Splitt- ..... 31 Gemisch 0/8 mm, wenig Feinanteile	31
Abbildung 41: ...Korngrößenverteilung des verwendeten Fugenmaterials Splitt 2/5 mm ..... 31	31
Abbildung 42: ...Korngrößenverteilung Fugenmaterial 0/2 mm mit wenigen Feinanteilen ..... 33 (orange und grau) und Bettungsmaterial 0/8 mm (blau und grün)	33
Abbildung 43: ...„Halbrundungen“ im Betonpflasterstein für die Probenahme des Fugenmaterials ..... 35 nach dem Verdichtungsvorgang zur Bestimmung des Wassergehaltes	35
Abbildung 44: ...Prüffläche Nr. 1 nach dem Verlegen der Pflastersteine, gelbe Pfeile zeigen..... 35 die „Halbrundungen“, aus den Proben zur Bestimmung des Wassergehaltes entnommen werden	35
Abbildung 45: ...Beispielhaft eingesetztes Fugenkreuz..... 37	37

Abbildung 46: ...Schematische Darstellung der entnommenen Proben des Fugenmaterials zur Bestimmung des Wassergehaltes	39
Abbildung 47: ...Proben vom Fugenmaterial der Prüfflächen Nr. 1.5.1, 2.5.1 und 3.5.1 sowie Bettungsmaterial aus Prüffläche Nr. 1.5.1 und 2.5.1 zur Bestimmung des Wassergehaltes	40
Abbildung 48: ...Fugensonde auf einer Prüffläche	41
Abbildung 49: ...Schematische Darstellung der maßgeblichen Prüfvorrichtung	42
Abbildung 50: ...Schematische Darstellung eines Kegels zur Bestimmung der Mantelfläche der Fugensondenspitze (links), das rechtwinklige gleichschenklige Dreieck der Fugensondenspitze ist mit einer roten Markierung sichtbar (Mitte), das rechtwinklige gleichschenklige Dreieck vergrößert dargestellt (rechts)	44
Abbildung 51: ...Darstellung des Spitzendrucks der Sondiermadel beim Aufprall des Gewichts in Abhängigkeit von der Aufprallzeit	45
Abbildung 52: ...Darstellung der Sondierstellen jeder Prüffläche	47
Abbildung 53: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.1	51
Abbildung 54: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für Prüffläche Nr. 7.4.2 je Sondierstelle dar	52
Abbildung 55: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 3.1, der schwarze Strich stellt die Referenzfugenvertiefung von 20 mm (20% der Steindicke) dar	53
Abbildung 56: ...Das Liniendiagramm zeigt die Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 3.4.3, Sondierstelle S02, 15 Schläge sind notwendig, um die Fuge zu durchdringen	54
Abbildung 57: ...Das Liniendiagramm zeigt die Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 7.4.2, Sondierstelle 19, der Aufprall neun zeigt einen negativen Wert und demnach eine Reflexion (türkis Kreis)	55
Abbildung 58: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 6.1 dar, Sondierstelle S13	56
Abbildung 59: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 7.4.2 dar, Sondierstelle 19, die Reflexion ist bei dem 9. Aufprall ersichtlich	56
Abbildung 60: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüffläche Nr. 1.1	58
Abbildung 61: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.1, der schwarze Strich stellt die Referenzfugenvertiefung von 20 mm (20 % der Steindicke) dar	58
Abbildung 62: ...Das Liniendiagramm zeigt die Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.1, Sondierstelle S09 erster Aufprall 31,90 mm und zweiter Aufprall 22,50 mm	59
Abbildung 63: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.1 dar, Sondierstelle S09	59

Abbildung 64: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf- fläche Nr. 1.3	61
Abbildung 65: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen für .. Prüfffläche Nr. 1.3 je Sondierstelle dar	62
Abbildung 66: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüfffläche Nr. 1.3.....	63
Abbildung 67: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf- fläche Nr. 1.4.1	65
Abbildung 68: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen ..... für Prüfffläche Nr. 1.4.1 je Sondierstelle dar	66
Abbildung 69: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüfffläche Nr. 1.4.1...	67
Abbildung 70: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts ..... auf die Grundplatte für Prüfffläche Nr. 1.4.1 dar, Sondierstelle S09	68
Abbildung 71: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts..... auf die Grundplatte für Prüfffläche Nr. 1.4.1 dar, Sondierstelle S11	69
Abbildung 72: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts ..... auf die Grundplatte für Prüfffläche Nr. 1.4.1 dar, Sondierstelle S15	69
Abbildung 73: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf- fläche Nr. 1.4.2	70
Abbildung 74: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen..... für Prüfffläche Nr. 1.4.2 je Sondierstelle dar	71
Abbildung 75: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüfffläche Nr. 1.4.2...	72
Abbildung 76: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts..... auf die Grundplatte für Prüfffläche Nr. 1.4.2 dar, Sondierstelle S03	72
Abbildung 77: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf- fläche Nr. 1.4.3	74
Abbildung 78: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen ..... für Prüfffläche Nr. 1.4.3 je Sondierstelle dar	74
Abbildung 79: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüfffläche Nr. 1.4.3...	74
Abbildung 80: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts..... auf die Grundplatte für Prüfffläche Nr. 1.4.3 dar, Sondierstelle S01	76
Abbildung 81: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf- fläche Nr. 1.4.4	77
Abbildung 82: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen..... für Prüfffläche Nr. 1.4.4 je Sondierstelle dar	78
Abbildung 83: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüfffläche Nr. 1.4.4...	79
Abbildung 84: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts..... auf die Grundplatte für Prüfffläche Nr. 1.4.4 dar, Sondierstelle S05	79
Abbildung 85: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf- fläche Nr. 1.5	80
Abbildung 86: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen..... für Prüfffläche Nr. 1.5 je Sondierstelle dar	81

Abbildung 87: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.5.....	82
Abbildung 88: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts.....	82
auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.5 dar, Sondierstelle S19	
Abbildung 89: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf-.....	84
fläche Nr. 1.5.1	
Abbildung 90: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefe .....	85
für Prüffläche Nr. 1.5.1 je Sondierstelle dar	
Abbildung 91: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.5.1...	85
Abbildung 92: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts .....	86
auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.5.1 dar, Sondierstelle S15	
Abbildung 93: ...Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen für Prüf-.....	87
fläche Nr. 1.6	
Abbildung 94: ...Das Liniendiagramm stellt die minimalen, maximalen und mittleren Eindringtiefen.....	88
für Prüffläche Nr. 1.6 je Sondierstelle dar	
Abbildung 95: ...Das Balkendiagramm zeigt die Fugenvertiefung je Messstelle für Prüffläche Nr. 1.6.....	87
Abbildung 96: ...Das Liniendiagramm stellt die addierte Eindringtiefe je Aufprall des Gewichts.....	89
auf die Grundplatte für Prüffläche Nr. 1.6 dar, Sondierstelle S09	
Abbildung 97: ...Das Balkendiagramm zeigt die Anzahl der Erhöhung Schläge auf die Grundplatte .....	90
von Prüffläche Nr. 1.4.1 auf 1.4.4	
Abbildung 98: ...Das Balkendiagramm zeigt die Gegenüberstellung der Sondiertiefen bei Prüf-.....	91
flächen Nr. 1.4.1 und 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.2)	
Abbildung 99: ...Das Balkendiagramm stellt die Änderung der Sondiertiefe von Prüffläche Nr. 1.4.1 .....	92
auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.2) dar	
Abbildung 100: ...Das Balkendiagramm zeigt die Änderung der Fugenvertiefung von Prüffläche Nr. ....	93
1.4.1 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.3)	
Abbildung 101: ...Das Balkendiagramm zeigt die Erhöhung des Mittelwertes von Prüffläche Nr. ....	94
1.4.1 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.4) je Sondierstelle	
Abbildung 102: ...Das Balkendiagramm stellt die Erhöhung des Mittelwertes von Prüffläche Nr. ....	94
1.4.3 auf 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.4) dar	
Abbildung 103: ...Das Balkendiagramm veranschaulicht die Differenz der Standardabweichung .....	96
innerhalb der jeweiligen Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.5)	
Abbildung 104: ...Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von Prüffläche .....	100
Nr. 1.3 und 1.4.4 (Auszug aus Anhang E1.6)	
Abbildung 105: ...Das Balkendiagramm veranschaulicht die Reduktion des Mittelwertes von Prüf-.....	100
fläche Nr. 1.3 zu 1.4.4	
Abbildung 106: ...Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von Prüffläche .....	102
Nr. 3.4.2 und 3.4.4 (Auszug aus Anhang E3.6)	
Abbildung 107: ...Die Liniendiagramme zeigen die mittleren Eindringtiefen der Sondiernadel .....	103
bei verschiedenen Prüfflächen der Prüffläche Nr. 1 (Auszug aus Anhang E1.6)	
Abbildung 108: ...Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von Prüffläche Nr. 2.3.....	103
und 2.4.4 (Auszug aus Anhang E2.6)	



Abbildung 109: .Das Liniendiagramm zeigt die unterschiedlichen Mittelwerte von Prüffläche Nr. 5.3.....	104
und 5.4.4 (Auszug aus Anhang E5.6)	
Abbildung 110: .Das Balkendiagramm zeigt die Erhöhung der Feinanteile des Bettungsmaterials .....	105
bei Prüfflächen Nr. 4 (Auszug aus Anhang C5.4)	
Abbildung 111: .Das Balkendiagramm veranschaulicht die Veränderung des Wassergehaltes des .....	106
Bettungsmaterials bei verschiedenen Prüfflächen und unterschiedlicher Liegezeit (Auszug aus Anhang C3.4)	
Abbildung 112: .Das Balkendiagramm zeigt den Wassergehalt des Bettungsmaterials bei .....	106
verschiedenen Prüfflächen und unterschiedlicher Liegezeit in Tagen (Auszug aus Anhang C3.6)	
Abbildung 113: Das Balkendiagramm zeigt den Wassergehalt des Bettungsmaterials bei .....	107
verschiedenen Prüfflächen und unterschiedlicher Liegezeit in Stunden (Auszug aus Anhang C3.5)	
Abbildung 114: .Feinanteile in der Fuge (gelber Pfeil) visuell erkennbar.....	108
Abbildung 115: .Abgesacktes Fugenmaterial beim Rückbau der Prüffläche Nr. 1.6 sichtbar.....	109
Abbildung 116: .Das Balkendiagramm stellt die Erhöhung/Reduktion der Feinanteile des Fugen- .....	110
materials bei Prüfflächen Nr. 2 (Auszug aus Anhang C6.2) dar	
Abbildung 117: .Das Balkendiagramm stellt die Erhöhung/Reduktion der Feinanteile des Fugen- .....	110
materials bei Prüfflächen Nr. 4 (Auszug aus Anhang C6.4) dar	
Abbildung 118: .Das Balkendiagramm zeigt die mittleren Eindringtiefen aller Messstellen der .....	112
Fugensondierungen bei Prüffläche Nr. 1.4.4, 2.4.4, 3.4.4, 4.4.4, 5.4.4 und 6.4.4	

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: .....Nachweis der Filterstabilität für das Beispiel in Abbildung 7.....	8
Tabelle 2: .....Idealisierte Berechnung der Druckkraft in der ungebundenen Fuge in Abhängigkeit ..... von der Fugenfüllung bei einem 10 cm dicken Stein	15
Tabelle 3: .....Darstellung der einzelnen Prüfflächen (Auszug aus Anhang B).....	36
Tabelle 4: .....Darstellung einiger Kenndaten der verwendeten Rüttelplatten.....	38
Tabelle 5: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.1.....	49
Tabelle 6: .....Mittelwert über alle 20 Sondierstellen an ausgewählten Prüfflächen.....	51
Tabelle 7: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.1.....	57
Tabelle 8: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.2.....	60
Tabelle 9: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.3.....	61
Tabelle 10: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.....	64
Tabelle 11: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.1.....	65
Tabelle 12: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.2.....	70
Tabelle 13: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.3.....	73
Tabelle 14: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.4.4.....	77
Tabelle 15: .....Darstellung der Messwerte Prüffläche Nr. 1.5.....	80
Tabelle 16: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.5.1.....	83
Tabelle 17: .....Darstellung der Messwerte für Prüffläche Nr. 1.6.....	86
Tabelle 18: .....Darstellung der Prüfflächen mit der Bezeichnung der verwendeten Rüttelplatte ..... und der Anzahl der Verdichtungsvorgänge	90
Tabelle 19: .....Mittelwerte der Fugensondierungen für Prüfflächen Nr. 1.4.1 bis 1.4.4 je Sondier-..... stelle sowie Mittelwert aller Sondierstelle je Prüffläche	95
Tabelle 20: .....Darstellung der ermittelten Proctordichte, des optimalen Wassergehaltes sowie des..... Wassergehaltes unmittelbar nach dem Einschlämmen bei der Durchführung der Untersuchungen	98
Tabelle 21: .....Darstellung der Wassergehalte des Fugenmaterials bei verschiedenen Prüfflächen.....	98

## 12 Thesen

1. Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbelägen werden mit einer Fugenfüllung aus einem ungebundenen Baustoffgemisch ausgebildet. Über die Qualität des Fugenmaterials im eingebauten Zustand ist nur wenig bekannt.
2. In den Normen und Regelwerke existieren keine Prüfverfahren zur Beurteilung der Stabilität der ungebundenen Fugenfüllung.
3. Der Einsatz eines neuen Prüfverfahrens ermöglicht durch die Errichtung verschiedener Prüfflächen die Beurteilung der Qualität der ungebundenen Fuge.
4. Kornform und Korngrößenverteilung des Fugenmaterials und die Fugenbreite bestimmen die Qualität einer Fuge.
5. Das Fugenmaterial wird in der Praxis durch Einfegen oder Einschlämmen in die Fuge eingebracht. Diese Einbauart führt zu keiner hinreichenden Stabilität ungebundener Fugen.
6. Die Verdichtung der ungebundenen Fuge wird durch Eigengewicht des Fugenmaterials und durch eingetragene Vibration bei Verwendung von Rüttelplatten vorgenommen.
7. Die Verdichtung ungebundener Pflasterdecken und Plattenbelägen wird in der Praxis primär durchgeführt, wenn Fugen- und Bettungsmaterial abgetrocknet sind. Abgetrocknete ungebundene Baustoffe können nicht optimal verdichtet werden. Bei unmittelbarer Verdichtung durch Auflast z.B. einer Schottertrag- oder Bettungsschicht wird der optimale Wassergehalt benötigt, um eine optimale Verdichtung zu erzielen. Fugenmaterialien können nur mit einem hinreichenden Wassergehalt sachgerecht verdichtet werden. Der Reibungswiderstand im Material und zwischen Steinflanke und Fugenmaterial muss aufgehoben werden, damit eine hinreichende Lagerungsdichte erzielt werden kann.
8. In der Praxis treten sehr häufig Fugenentleerungen auf. Der Zusammenhang zwischen Herstellungsart und Absackung der Fugenverfüllung und der damit verbundenen Qualität und Lagerungsdichte des Fugenmaterials wird im Rahmen der Untersuchungen erfasst.
9. Bei lockerer Lagerungsdichte des Fugenmaterials können Bestandteile des Fugenmaterials unter den Stein abwandern.
10. Durch einfache Bauausführungen in der Praxis kann die Anfangsstabilität der ungebundenen Fugenfüllung deutlich erhöht werden.
11. Durch die Verdichtung findet eine Veränderung (z.B. Kornumlagerungen) der Korngrößenverteilung des Fugenmaterials nach dem Einbau gegenüber dem Lieferzustand statt.
12. Die Größe der durch den Verdichtungs Vorgang erzeugten Kornzertrümmerungen wird nach Rückbau der jeweiligen Prüfflächen festgestellt.
13. Über die Veränderung des Wassergehaltes des Bettungsmaterials ist in der Praxis nur wenig bekannt. Die Veränderung des Wassergehaltes unter Berücksichtigung der Einbauart des Fugenmaterials gibt Aufschluss über Nachverdichtungspotentiale der Bettung unmittelbar nach der Herstellung.

## 13      Lebenslauf

<b>Name</b>	Andreas Heiko Metzging
<b>Anschrift – beruflich</b>	Kreuzstraße 15 38300 Wolfenbüttel Fon: 05331 / 93 55 92 e-mail: a.metzing@fugensonde.de
<b>Geboren</b>	14.08.1975 in Bad Gandersheim
<b>Schulabschluss</b>	
1995	Abitur Jacobson-Gymnasium Seesen
<b>Wehrdienst</b>	
1995-1996	Grundwehrdienst in Munster
<b>Studium</b>	
WS 1996-SS 2000	Studium Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Wiesbaden
<b>Berufliche Laufbahn</b>	
Mai 2000 bis Mai 2001	Zusammenarbeit mit dem Gutachter Herrn Dipl.-Ing. Jörg Musewald, Kurtscheid. Vorwiegender Tätigkeitsbereich: Aufnahme und Beurteilung von Pflasterschäden
Mai 2001	Arbeitsaufenthalt in China im Rahmen des Projektes „Ausbau der Obernstraße“ in der Hansestadt Bremen zur Festlegung der Bearbeitungsarten der Pflastersteine
November 2001	Beginn der Referententätigkeit bei Technischen Akademien zum Thema Pflasterdecken und Plattenbeläge
Juni 2001-September 2001	Bauleitung im Ingenieurbüro Metzging, Seesen  Bauleitung für die Baumaßnahme Obernstraße in der Hansestadt Bremen, Natursteinpflaster zwischen Straßenbahnschienen in Zusammenarbeit mit Herrn Utermöhlen
Ab Oktober 2001	Vollständiger Eintritt in das Ingenieurbüro Metzging, Erstellung von Planungen, Ausschreibungsunterlagen und Durchführung der Bau- überwachung, insbesondere Maßnahmen im Pflasterstraßenbau

Januar 2004	Arbeitsaufenthalt in Vietnam zur Besichtigung von Steinbrüchen und Produktionsstätten für Pflasterbeläge
November 2005	Arbeitsaufenthalt in China mit Vertretern der Stadt Kamen im Rahmen des Projektes „Ausbau Innenstadt“ der Stadt Kamen zur Festlegung der Bearbeitungsarten der Pflastersteine
April 2008	Bestellung als ö.b.u.v. Sachverständiger für Pflasterdecken und Plattenbeläge durch die IHK Braunschweig
2009	Immatrikulation als Promotionsstudent an der Universität Rostock
Juni 2016	Ausstieg aus Ingenieurbüro Metzing, Seesen
Juli 2016	Gründung Sachverständigenbüro für Pflasterdecken und Plattenbeläge und Beratungsbüro der Fugensonde

### **Veröffentlichungen**

- Metzing, A.: Planung eines dauerhaften Pflasterbelages: Die ungebundene Pflasterbauweise, Ausgabe 05/2003, Zeitschrift Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Bauverlag GmbH, Gütersloh
- Metzing, A.: Die gebundene Pflasterbauweise – Gossenanlagen für die Oberflächenentwässerungen, Ausgabe 09/2005, Zeitschrift Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Bauverlag GmbH, Gütersloh
- Metzing, A. & Saathoff, F.: Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge, Funktion und Ausbildung der ungebundenen Fugenfüllung, Ausgabe 11/2010, Zeitschrift Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau Bauverlag GmbH, Gütersloh
- Metzing, A. & Siemenssen, M.: Druckfestigkeiten bei Bettungsmörteln, Ausgabe 02/2015, Zeitschrift Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau Bauverlag BV GmbH, Gütersloh
- Metzing, A. & Saathoff, F.: Ungebundene Pflasterdecken und Plattenbeläge, Fugententleerung – Ursachen und Folgen, Ausgabe 10/2017, Zeitschrift Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau Bauverlag BV GmbH, Gütersloh
- Metzing, A. & Saathoff, F.: Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen, Ausgabe 12/2017, Zeitschrift Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau Bauverlag BV GmbH, Gütersloh
- Metzing, A. & Saathoff, F.: Funktion der ungebundenen Fuge bei Pflasterdecken und Plattenbelägen, Ausgabe 01/2018, Zeitschrift Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau Bauverlag BV GmbH, Gütersloh

### **Ausgewählte Fachvorträge**

- VSVI, Vereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e.V. in Mecklenburg-Vorpommern, Seminarveranstaltung am 08.03.2018, Herstellung ungebundener Fugen bei Pflasterdecken und Plattenbelägen, Qualitätssicherung der Fugenfüllung und Ursachenermittlung bei Schäden mit der Fugensonde
- Zentralverband Deutsches Baugewerbe, 25. Sachverständigenseminar Straßen- und Tiefbau am 24.11.2017 und 25.11.2017, Herstellung ungebundener Fugen bei Pflaster und Plattenbelägen, Qualitätssicherung der Fugenfüllung und Ursachenermittlung bei Schäden mit der Fugensonde
- Technische Akademie Esslingen e.V.: Herstellung ungebundener Fugen bei Pflasterdecken und Plattenbelägen. Durchführung von zahlreichen Seminarveranstaltungen seit November 2001



## **In dieser Reihe bisher erschienen**

### **Band I**

10. DIALOG Abfallwirtschaft MV

– Von der Abfallwirtschaft zur Energiewirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2007, ISBN 978-3-86009-004-6*

### **Band II**

Ellen-Rose Trübger

Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung der ungesättigten Zone bei der Grundwassersimulation von Feuchtgebieten.

*Dissertation, erschienen im August 2007, ISBN 978-3-86009-006-0*

### **Band III**

René Dechow

Untersuchungen verschiedener Ansätze der Wasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in Stickstoffhaushaltsmodellen.

*Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-016-9*

### **Band IV**

Carolin Wloczyk

Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Ermittlung der realen Evapotranspiration anhand von Fernerkundungsdaten in Mecklenburg-Vorpommern.

*Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-009-1*

### **Band 5**

1. Rostocker Bioenergieforum.

Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2007, ISBN 978-3-86009-013-8*

### **Band 6**

Kulturtechniktagung 2007.

Ostseeverseuchung und Flächenentwässerung.

*Tagungsband, erschienen im Januar 2008, ISBN 978-3-86009-018-3*

### **Band 7**

Enrico Frahm

Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide (*Salix* spp.) und Schilf (*Phragmites australis*) in einem nordostdeutschen Flusstalmoor.

*Dissertation, erschienen im Mai 2008, ISBN 978-3-86009-023-7*

## **Band 8**

Jenny Haide

Methode zur Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern lohnintensiver Arbeiten am Beispiel von Pflasterarbeiten.

*Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-024-4*

## **Band 9**

11. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Chancen und Risiken für die deutsche Abfallwirtschaft im Ausland.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-029-9*

## **Band 10**

Stefan Cantré

Ein Beitrag zur Bemessung geotextiler Schläuche für die Entwässerung von Baggergut.

*Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-032-9*

## **Band 11**

Birgit Wüstenberg

Praxis der Standortwahl von Sportboothäfen im Küstenbereich Mecklenburg-Vorpommerns und Entwicklung einer Bewertungsmethode als Planungshilfe.

*Dissertation, erschienen im Juli 2008, ISBN 978-3-86009-033-6*

## **Band 12**

André Clauß

Erhöhung der Trinkwasserversorgungssicherheit in Havarie- und Krisensituationen durch neue Handlungsalgorithmen sowie Einbeziehung bisher ungenutzter Ressourcen am Beispiel von Bergbaugrubenwasser.

*Dissertation, erschienen im September 2008, ISBN 978-3-86009-037-4*

## **Band 13**

Peter Degener

Sickerwasserkreislauf zur Behandlung von Sickerwässern der aerob-biologischen Restabfallbehandlung (Restabfallrotte).

*Dissertation, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-043-5*

## **Band 14**

2. Rostocker Bioenergieforum

Innovationen für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-044-2*

## **Band 15**

7. Rostocker Abwassertagung

Fortschritte auf dem Gebiet der Abwasserentsorgung.

*Tagungsband, erschienen im November 2008, ISBN 978-3-86009-045-9*



### **Band 16**

Christian Noß

Strömungsstrukturen kleiner naturnaher Fließgewässer unter Berücksichtigung von Turbulenztheorie und Dispersionsmodellen.

*Dissertation, erschienen im Januar 2009, ISBN 978-3-86009-054-1*

### **Band 17**

Ralf Schröder

Entwicklung von Möglichkeiten zur Messung der N<sub>2</sub>-Übersättigung sowie Methoden zur Reduzierung der Schwimmschlamm Bildung.

*Dissertation, erschienen im Februar 2009, ISBN 978-3-86009-055-8*

### **Band 18**

Elmar Wisotzki

Bodenverfestigungen mit Kalk-Hüttensand-Gemischen.

*Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-059-6*

### **Band 19**

Ramez Mashkour

Untersuchungen zur Adsorption und biologischen Aktivität an Aktivkohlefilter unter den Bedingungen der Wasseraufbereitung im Wasserwerk Rostock.

*Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-060-2*

### **Band 20**

Torsten Birkholz

Handlungserfordernisse und Optimierungsansätze für kommunale Ver- und Entsorgungsunternehmen im Zusammenhang mit demografischen Veränderungen im ländlichen Raum aufgezeigt an einem Beispiel in Mecklenburg-Vorpommern.

*Dissertation, erschienen im Mai 2009, ISBN 978-3-86009-061-9*

### **Band 21**

12. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfallwirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2009, ISBN 978-3-86009-062-6*

### **Band 22**

Thomas Fritz

Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- bzw. Methanerträgen.

*Dissertation, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-7*

### **Band 23**

3. Rostocker Bioenergieforum

Bioenergie – Chance und Herausforderung für die regionale und globale Wirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-8*

### **Band 24**

Muhammad Mariam

Analyse von Gefahrenpotenzialen für die Trinkwasserversorgung der Stadt Rostock unter besonderer Berücksichtigung von Schadstoffausbreitungsvorgängen in der Warnow.

*Dissertation, erschienen im Februar 2010, ISBN 978-3-86009-078-7*

### **Band 25**

Manja Steinke

Untersuchungen zur Behandlung von Abwässern der Fischverarbeitungsindustrie.

*Dissertation, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-085-5*

### **Band 26**

13. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Die Kreislauf- und Abfallwirtschaft im Wandel. Wohin gehen die rechtlichen und technischen Entwicklungen?

*Tagungsband, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-087-9*

### **Band 27**

4. Rostocker Bioenergieforum

Zukunftstechnologien für Bioenergie

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2010, ISBN 978-3-940364-12-8*

### **Band 28**

Dirk Banemann

Einfluss der Silierung und des Verfahrensablaufs der Biomassebereitstellung auf den Methanertrag unter Berücksichtigung eines Milchsäurebakteriensilierungsmittel

*Dissertation, erschienen im Januar 2011, ISBN 978-3-86009-087-9*

### **Band 29**

14. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Abfall als Wertstoff- und Energiereserve

*Tagungsband, erschienen im Juni 2011, ISBN 978-3-940364-18-0*

### **Band 30**

5. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-940364-20-3*

**Band 31**

8. Rostocker Abwassertagung

Erhöhung der Effektivität von Abwasserentsorgungsanlagen

*Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-86009-120-3*

**Band 32**

6. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2012, ISBN 978-3-940364-27-2*

**Band 33**

Ishan Machlouf

Untersuchungen zur Nitratelimination bei der Trinkwasseraufbereitung unter Berücksichtigung syrischer Verhältnisse

*Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-204-0*

**Band 34**

Ralph Sutter

Analyse und Bewertung der Einflussgrößen auf die Optimierung der

Rohbiogasproduktion hinsichtlich der Konstanz von Biogasqualität und -menge

*Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-202-6*

**Band 35**

Wolfgang Pfaff-Simoneit

Entwicklung eines sektoralen Ansatzes zum Aufbau von nachhaltigen Abfallwirtschaftssystemen in Entwicklungsländern vor dem Hintergrund von Klimawandel und Ressourcenverknappung

*Dissertation, erschienen im Mai 2013, ISBN 978-3-86009-203-3*

**Band 36**

7. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2013, ISBN 978-3-86009-207-1*

**Band 37**

Markus Helftewes

Modellierung und Simulation der Gewerbeabfallaufbereitung vor dem Hintergrund der Outputqualität, der Kosteneffizienz und der Klimabilanz

*Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-402-0*

**Band 38**

Jan Stefan Riha

Detektion und Quantifizierung von Cyanobakterien in der Ostsee mittels Satellitenfernerkundung

*Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-403-7*

**Band 39**

Peter Helmke

Optimierung der Verarbeitungs-, Gebrauchs- und Entsorgungseigenschaften eines naturfaserverstärkten Kunststoffes unter Berücksichtigung automobiler Anforderungen

*Dissertation, erschienen im November 2013, ISBN 978-3-86009-404-4*

**Band 40**

Andrea Siebert-Raths

Modifizierung von Polylactid (PLA) für technische Anwendungen

Verfahrenstechnische Optimierung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften

*Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-405-1*

**Band 41**

Fisiha Getachew Argaw

Agricultural Machinery Traffic Influence on Clay Soil Compaction as Measured by the Dry Bulk Density

*Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-406-8*

**Band 42**

Tamene Adugna Demissie

Climate change impact on stream flow and simulated sediment yield to Gilgel Gibe 1 hydropower reservoir and the effectiveness of Best Management Practices

*Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-407-5*

**Band 43**

Paul Engelke

Untersuchungen zur Modellierung des Feststofftransports in Abwasserkanälen: Validierung in SIMBA®

*Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-408-2*

**Band 44**

16. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

*Tagungsband, erschienen im April 2014, ISBN 978-3-86009-410-5*

**Band 45**

8. Rostocker Bioenergieforum, 19.-20. Juni 2014 an der Universität Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2014, ISBN 978-3-86009-412-9*

**Band 46**

Abschlussbericht Projekt CEMUWA – Climate protection, natural resources management and soil improvement by combined Energetic and Material Utilization of lignocellulosic agricultural Wastes and residues

*Projektbericht, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-413-6*

**Band 47**

8. Rostocker Baggergutseminar, 24.-25. September 2014 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-414-3*

**Band 48**

Michael Kuhn

Mengen und Trockenrückstand von Rechengut kommunaler Kläranlagen  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2014 ISBN 978-3-86009-415-0*

**Band 49**

9. Rostocker Abwassertagung, Infrastruktur- und Energiemanagement –  
ein Geschwisterpaar der Wasserwirtschaft 12. November 2014 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-416-7*

**Band 50**

Mulugeta Azeze Belete

Modeling and Analysis of Lake Tana Sub Basin Water Resources Systems,  
Ethiopia  
*Dissertation, erschienen im Dezember 2014 ISBN 978-3-86009-422-8*

**Band 51**

Daniela Dressler

Einfluss regionaler und standortspezifischer Faktoren auf die Allgemeingültig-  
keit ökologischer und primärenergetischer Bewertungen von Biogas  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2014 ISBN 978-3-86009-424-2*

**Band 52**

9. Rostocker Bioenergieforum, 18.-19. Juni 2015 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-425-9*

**Band 53**

Nils Engler

Spurenelementkonzentrationen und biologische Aktivität in NaWaRo-Biogas-  
fermentern  
*Dissertation, erschienen im September 2015 ISBN 978-3-86009-427-3*

**Band 54**

Thomas Schmidt

Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bei der anaeroben Vergärung  
von Weizenschlempe  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2015 ISBN 978-3-86009-428-0*

**Band 55**

Thomas Dorn

Principles, Opportunities and Risks associated with the transfer of environmental technology between Germany and China using the example of thermal waste disposal

*Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-429-7*

**Band 56**

Uwe Holzhammer

Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien

*Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-430-3*

**Band 57**

17. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft,

15. Juni 2016 in Rostock,

*Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-432-7*

**Band 58**

10. Rostocker Bioenergieforum, 16.-17. Juni 2016 in Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-433-4*

**Band 59**

Michael Friedrich

Adaptation of growth kinetics and degradation potential of organic material in activated sludge

*Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-434-1*

**Band 60**

Nico Schulte

Entwicklung von Qualitätsprüfungen für die haushaltsnahe Abfallsammlung im Holsystem

*Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-435-8*

**Band 61**

Ullrich Dettmann

Improving the determination of soil hydraulic properties of peat soils at different scales

*Dissertation, erschienen im September 2016 ISBN 978-3-86009-436-5*

**Band 62**

Anja Schreiber

Membranbasiertes Verfahren zur weitergehenden Vergärung

von feststoffreichen Substraten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-446-4*

**Band 63**

André Körstel

Entwicklung eines selbstgängigen statischen Verfahrens zur biologischen Stabilisierung und Verwertung organikreicher Abfälle unter extrem ariden Bedingungen für Entwicklungs- und Schwellenländer, am Beispiel der Stadt Teheran  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-447-1*

**Band 64**

Ayman Elnaas

Actual situation and approach for municipal solid waste treatment in the Arab region  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-448-8*

**Band 65**

10. Rostocker Abwassertagung, Wege und Werkzeuge für eine zukunftsfähige Wasserwirtschaft im norddeutschen Tiefland, 8. November 2016 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2016, ISBN 978-3-86009-449-5*

**Band 66**

Gunter Weißbach

Mikrowellen-assistierte Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Reststoffe  
*Dissertation, erschienen im November 2016 ISBN 978-3-86009-450-1*

**Band 67**

Leandro Janke

Optimization of anaerobic digestion of sugarcane waste for biogas production in Brazil  
*Dissertation, erschienen im Mai 2017 ISBN 978-3-86009-454-9*

**Band 68**

11. Rostocker Bioenergieforum, 22.-23. Juni 2017 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-455-6*

**Band 69**

Claudia Demmig

Einfluss des Erntezeitpunktes auf die anaerobe Abbaukinetik der Gerüstsubstanzen im Biogasprozess  
*Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 9978-3-86009-456-3*

**Band 70**

Christian Koepke

Die Ermittlung charakteristischer Bodenkennwerte der Torfe und Mudden Mecklenburg-Vorpommerns als Eingangsparameter für erdstatische Berechnungen nach Eurocode 7 / DIN 1054  
*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-457-0*

**Band 71**

Sven-Henning Schlömp

Geotechnische Untersuchung und Bewertung bautechnischer Eignung  
von Müllverbrennungsschlacken und deren Gemischen mit Böden  
*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-458-7*

**Band 72**

Anne-Katrin Große

Baggergut im Deichbau – Ein Beitrag zur geotechnischen Charakterisierung  
und Erosionsbeschreibung feinkörniger, organischer Sedimente  
aus dem Ostseeraum zur Einschätzung der Anwendbarkeit  
*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-459-4*

**Band 73**

Thomas Knauer

Steigerung der Gesamteffizienz von Biogasanlagen durch thermische  
Optimierung  
*Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 978-3-86009-460-0*

**Band 74**

Mathhar Bdour

Electrical power generation from residual biomass by combustion  
in externally fired gas turbines (EFGT)  
*Dissertation, erschienen im August 2017, ISBN 978-3-86009-468-6*

**Band 75**

Johannes Dahlin

Vermarktungsstrategien und Konsumentenpräferenzen für Dünger und Erden  
aus organischen Reststoffen der Biogasproduktion  
*Dissertation, erschienen im September 2017, ISBN 978-3-86009-469-3*

**Band 76**

Sören Weinrich

Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen  
Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)  
*Dissertation, erschienen im März 2018, ISBN 978-3-86009-471-6*

**Band 77**

18. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-472-3*

**Band 78**

12. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-473-0*



**Band 79**

Tatyana Koegst

Screening approaches for decision support in drinking water supply

*Dissertation, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-474-7*

**Band 80**

Liane Müller

Optimierung des anaeroben Abbaus stickstoffhaltiger Verbindungen durch den Einsatz von Proteasen

*Dissertation, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-475-4*

**Band 81**

Projektbericht Wasserwirtschaft

KOGGE – **K**ommunale **G**ewässer **G**emeinschaftlich **E**ntwickeln

Ein Handlungskonzept für kleine urbane Gewässer am Beispiel der Hanse- und Universitätsstadt Rostock

*Projektbericht, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-476-1*

**Band 82**

Adam Feher

Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von Mikronährstoffen für den Biogasprozess

*Dissertation, erschienen im Oktober 2018, ISBN 978-3-86009-477-8*

**Band 83**

Constanze Uthoff

Pyrolyse von naturfaserverstärkten Kunststoffen zur Herstellung eines kohlenstoffhaltigen Füllstoffs für Thermoplasten

*Dissertation, erschienen im November 2018, ISBN 978-3-86009-478-5*

**Band 84**

Ingo Kaundinya

Prüfverfahren zur Abschätzung der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC-P für den Einsatz in Dichtungssystemen von Straßentunneln

*Dissertation, erschienen im Dezember 2018, ISBN 978-3-86009-484-6*

**Band 85**

Eric Mauky

A model-based control concept for a demand-driven biogas production

*Dissertation, erschienen im Januar 2019, ISBN 978-3-86009-485-3*

**Band 86**

Michael Kröger

Thermochemical Utilization of Algae with Focus on hydrothermal Processes

*Dissertation, erschienen im Februar 2019, ISBN 978-3-86009-486-0*

**Band 87**

13. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2019, ISBN 978-3-86009-487-7*

**Band 88**

12. Rostocker Abwassertagung

*Tagungsband, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-488-4*

**Band 89**

Philipp Stahn

Wasser- und Nährstoffhaushalt von Böden unter Mischkulturen und Trockenstress

*Dissertation, erschienen im Juli 2019, ISBN 978-3-86009-489-1*

**Band 90**

BioBind: Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern

*Projektbericht, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-490-7*

**Band 91**

Jürgen Müller

Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland: Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven

*Habilitation, erschienen im Oktober 2019, ISBN 978-3-86009-491-4*

**Band 92**

Marcus Siewert

Bewertung der Ölhavarievorsorge im deutschen Seegebiet auf Grundlage limitierender Randbedingungen – Ein Beitrag zur Verbesserung des Vorsorgestatus

*Dissertation, erschienen im November 2019, ISBN 978-3-86009-492-1*

**Band 93**

Camilo Andrés Wilches Tamayo

Technical optimization of biogas plants to deliver demand oriented power

*Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-493-8*

**Band 94**

Robert Kopf

Technisches Benchmarking mit Standortqualifikationsstudie biochemischer Energieanlagenprojekte (Beispiel Biogas)

*Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-494-5*

**Band 95**

14. Rostocker Bioenergieforum und 19. DIALOG Abfallwirtschaft MV  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2020, ISBN 978-3-86009-507-2*  
DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002650](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002650)

**Band 96**

Safwat Hemidat  
Feasibility Assessment of Waste Management and Treatment in Jordan  
*Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-509-6*



# Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Band 97

Dissertation

*Andreas Heiko Metzging*

Bd.  
97

**Verdichtung von ungebundenen Pflaster-  
decken und Plattenbelägen – Untersuchun-  
gen zur Lagerungsdichte des Fugenmaterials**

PROFESSUR

**Geotechnik und  
Küstenwasserbau**

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

ISBN 978-3-86009-510-2  
DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002742](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002742)

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio