

Diplomarbeit

Untersuchungen zum Verhalten der Filterstabilität von Gesteinskörnungen bei ungebundenen Pflasterbefestigungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Experiments on the Behavior of the Filter Stability of Aggregates in Unbound Block Pavement Superstructures

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

von

Pauline Traxler, BSc

Matr.Nr.: 11713134

Betreuung: Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Lukas Eberhardsteiner**
Projektass.in Dipl.-Ing.in **Franziska Gober**, BSc
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E230-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im August 2025

Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde die Filterstabilität zwischen Gesteinskörnungen innerhalb des Schichtenaufbaus von ungebundenen Pflasterbefestigungen untersucht. Ziel war es, zu überprüfen, ob die in der österreichischen Richtlinie RVS 08.18.01 empfohlenen Sieblinienkombinationen zwischen Fugen- und Bettungsmaterial in der Praxis ausreichend filterstabil sind, um Materialverlagerungen und daraus resultierende Schäden zu vermeiden.

Der Fokus lag auf labortechnischen Untersuchungen, bei denen verschiedene Kombinationen von Fugen- und Bettungsmaterialien mechanisch-hydraulischer Belastung ausgesetzt wurden. Der dafür eingesetzte Versuchsaufbau wurde speziell entwickelt, um realitätsnahe Beanspruchungen zu simulieren, und hat sich in seiner Anwendung als zuverlässig und praxisnah erwiesen. Es wurden Veränderungen der Sieblinien analysiert und deren Auswirkungen auf die Filterstabilität bewertet. Ergänzend dazu erfolgte eine theoretische Bewertung anhand der in der RVS definierten geometrischen Filterkriterien – einerseits für mögliche Kombinationen von Fugen- und Bettungsmaterial für die Laborversuche, andererseits zusätzlich für die Untersuchung des Verhaltens zwischen Bettung und Tragschicht sowie zwischen oberer und unterer Tragschicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die in der RVS empfohlenen Sieblinienkombinationen unter realitätsnahen Bedingungen als ausreichend filterstabil einzustufen sind. In Einzelfällen kam es jedoch zu Veränderungen der Sieblinien und Anzeichen von Kornverlagerungen, was auf ein potenzielles Risiko für Materialwanderung schließen lässt. Solche Beobachtungen unterstreichen die Bedeutung einer passenden Materialauswahl und können bei abweichenden Kombinationen eine ergänzende labortechnische Überprüfung erforderlich machen.

Die Arbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Filterstabilität bei Pflasterbefestigungen und betont die Relevanz einer sorgfältig abgestimmten Materialwahl im ungebundenen Schichtenaufbau. Die in der österreichischen Richtlinie RVS 08.18.01 empfohlenen Sieblinien zeigten ein stabiles Verhalten unter dynamischer und hydraulischer Belastung, was ihre praktische Anwendbarkeit bestätigt. Um die langfristige Eignung dieser Materialkombinationen noch besser beurteilen zu können, wäre es sinnvoll, deren Einsatz im Baualltag systematisch zu erfassen und auszuwerten. Erkenntnisse aus der Praxis können dazu beitragen, bestehende Regelwerke gezielt weiterzuentwickeln und an unterschiedliche Anwendungsbedingungen anzupassen.

Abstract

This diploma thesis investigates the filter stability between unbound granular materials within the layer structure of paving constructions. The aim was to assess whether the grain size distributions recommended in the Austrian guideline RVS 08.18.01 for joint and bedding materials are sufficiently filter-stable under practical conditions to prevent material migration and resulting damage.

The primary focus was on laboratory investigations in which various combinations of joint and bedding materials were subjected to combined mechanical and hydraulic loading. A purpose-built test setup was used to realistically simulate these loads and proved to be both reliable and practice oriented. Particular attention was given to changes in the grain size distributions and their impact on filter stability. In addition, a theoretical evaluation was carried out based on the geometric filter criteria defined in the RVS - both for the joint-bedding interface and for the transitions between bedding and base layers, as well as between the upper and lower base layers.

The results indicate that the grain size combinations recommended in the RVS generally exhibit sufficient filter stability under realistic conditions. However, in some cases, changes in the grain size distribution and signs of particle migration were observed, indicating a potential risk of material displacement. These findings highlight the importance of well-matched material selection and suggest that deviations from standard combinations should be supported by additional laboratory testing.

This study provides a valuable contribution to the understanding of filter stability in block pavement superstructures and emphasizes the importance of carefully coordinated material selection in unbound layer systems. The grain size distributions recommended by the Austrian guideline RVS 08.18.01 demonstrated stable behavior under dynamic and hydraulic loading, supporting their applicability in practice. To further assess the long-term suitability of these material combinations, it would be beneficial to systematically document and evaluate their use in real-world construction projects. Practical feedback could help refine existing standards and better adapt them to varying field conditions.

Inhalt

1	Einleitung.....	6
1.1	Hintergrund und Motivation.....	6
1.2	Ziel der Arbeit und Forschungsfrage.....	6
1.3	Methodik und Struktur der Arbeit.....	7
2	Grundlagen der Pflasterbauweise.....	8
2.1	Geschichte und Bedeutung.....	8
2.2	Aufbau.....	8
2.2.1	Bauweisen.....	9
2.2.2	Pflaster.....	10
2.2.3	Fugen.....	11
2.2.4	Bettung.....	11
2.2.5	Tragschichten.....	12
2.2.6	Unterbau und Untergrund.....	13
2.3	Tragverhalten.....	13
2.3.1	Beanspruchungen.....	13
2.3.2	Lastabtragung.....	14
2.4	Schäden und mögliche Ursachen.....	17
3	Grundlagen der Filterstabilität.....	19
3.1	Begriffsbestimmungen.....	19
3.1.1	Suffosion und Kolmation.....	19
3.1.2	Erosion.....	20
3.1.3	Begriffsabgrenzung und Definition der Filterstabilität.....	20
3.1.4	Nachweise.....	21
3.2	Filterkriterien.....	21
3.2.1	Geometrische Betrachtungen unter Kugelannahme.....	21
3.2.2	Terzaghi.....	22
3.2.3	Čiřtin/Ziems.....	23
3.2.4	Krümmungsverhältnis.....	24
3.3	Nachweise der Suffosionssicherheit.....	24
3.3.1	Selbstfiltrationsindex.....	25
3.3.2	Kenney und Lau.....	25
4	Filterstabilität bei Pflasterungen.....	27
4.1	Probleme und Bedeutung.....	27

4.2	Nationale Festlegungen	28
4.3	Anwendung der Filterstabilitätsnachweise gemäß RVS 08.18.01	29
4.3.1	Fuge – Bettung.....	29
4.3.2	Bettung – Obere Tragschicht	32
4.3.3	Obere Tragschicht – Untere Tragschicht	34
4.4	Untersuchungen zur Filterstabilität bei Pflasterungen.....	35
4.5	Krümmungskriterium	36
5	Versuchskonzept	38
5.1	Zielsetzung und Versuchsaufbau	38
5.2	Versuchsbedingungen.....	39
5.3	Versuchsdurchführung.....	40
5.4	Praktische Hinweise und Schwierigkeiten bei der Durchführung.....	41
6	Ergebnisse und Auswertung.....	43
6.1	Versuchsprogramm.....	43
6.2	Veränderung der Sieblinien	44
6.3	Bewertung anhand des Krümmungskriteriums	52
6.3.1	Analyse und Einordnung des Krümmungskriteriums	55
7	Schlussfolgerung.....	58
	Literaturverzeichnis	60
	Abbildungsverzeichnis.....	62
	Tabellenverzeichnis	64
	Anhang	65
A.	Sieblinien laut RVS 08.18.01 [4]	65
B.	Berechnungen Filterkriterien	71
C.	Berechnungen Krümmungszahlen	79

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Pflasterbefestigungen sind seit Jahrhunderten ein bewährter Bestandteil des Straßen- und Wegebaues. [1] Sie vereinen Funktionalität, Langlebigkeit und gestalterische Vielfalt und kommen insbesondere im städtischen Raum, bei Nebenflächen und im kommunalen Verkehrswegebau zum Einsatz. [2] Im Zuge des Klimawandels und wachsender Umweltauflagen rücken mehr und mehr auch deren ökologische Vorteile in den Fokus. Im Gegensatz zu konventionellen Asphalt- und Betonflächen ermöglichen wasserdurchlässige Pflasterbefestigungen die Versickerung von Niederschlagswasser und leisten so durch die Reduktion versiegelter Flächen einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Siedlungsentwicklung. Darüber hinaus fördern sie die Oberflächentemperaturregulierung in städtischen Hitzeinseln und können das Mikroklima positiv beeinflussen. [3]

Damit Pflasterdecken ihre Funktion langfristig erfüllen können, ist ihre bautechnische Dauerhaftigkeit entscheidend. Wie auch Beton- oder Asphaltdecken sind sie sowohl statischen als auch dynamischen Verkehrsbelastungen ausgesetzt. Im Gegensatz zu diesen Bauweisen besteht die Pflasterdecke jedoch aus einem mehrschichtigen System, das sich aus Pflastersteinen, Fugenmaterial und Bettungsmaterial zusammensetzt. Die funktionale Einheit dieser drei Komponenten ist entscheidend für die Tragfähigkeit, Verformungsstabilität und Dauerhaftigkeit der gesamten Befestigung. [1]

Eine zentrale Rolle spielt dabei die Filterstabilität, also die Fähigkeit der Materialien, unter Einwirkung von Verkehrslasten und Wasser voneinander getrennt zu bleiben. Besonders im Übergangsbereich zwischen Fugen- und Bettungsmaterial kann es bei unzureichender Filterstabilität zu Materialverlagerungen kommen, die die Lage der Steine beeinträchtigen, Setzungen hervorrufen oder die Wasserdurchlässigkeit einschränken. Solche Veränderungen wirken sich negativ auf die Gebrauchstauglichkeit und Lebensdauer der Pflasterfläche aus. [1]

1.2 Ziel der Arbeit und Forschungsfrage

In der österreichischen Richtlinie RVS 08.18.01 [4] sind Kriterien zur Sicherstellung der Filterstabilität zwischen den ungebundenen Schichten einer Pflasterbefestigung definiert. Diese beruhen jedoch auf den klassischen Filterregeln von Terzaghi und Čištin/Ziems, welche lediglich auf hydraulische Durchströmung und nicht auf die kombinierte mechanisch-hydraulische Beanspruchung bei Verkehrswegen ausgelegt sind. [5] Daher wurde bereits in vorhergehenden Arbeiten [6, 7] ein Versuchsaufbau entwickelt, welcher die labortechnische Überprüfung der Filterstabilität zwischen verschiedenen Fugen- und Bettungsmaterialien ermöglicht. Die in der RVS empfohlenen Sieblinien haben sich seit den letzten Versuchen geändert, weshalb eine erneute Durchführung notwendig war.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden daher unterschiedliche Kombinationen von Fugen- und Bettungsmaterialien im Labor getestet. Ziel ist es, ausgewählte aktuelle Sieblinienkombinationen auf ihre Filterstabilität zu untersuchen und deren Verhalten unter realitätsnahen Belastungsbedingungen zu analysieren. Dabei soll geprüft werden, ob die in der Richtlinie empfohlenen Kornzusammensetzungen auch praktisch geeignet sind, Materialverlagerungen und damit verbundene Schäden zu vermeiden.

Ergänzend zu den labortechnischen Untersuchungen werden die Sieblinienkombinationen auch anhand der in der RVS 08.18.01 [4] definierten Filterkriterien bewertet. Dabei werden nicht nur Kombinationen von Fugen- und Bettungsmaterial berücksichtigt, sondern alle ungebundenen Schichten einer Pflasterbefestigung untersucht.

Die im Zentrum dieser Arbeit stehende Frage ist daher: Wie zuverlässig gewährleisten die in der RVS 08.18.01 [4] definierten Anforderungen an die Korngrößenverteilung die Filterstabilität zwischen ungebundenen Schichten – insbesondere zwischen Fugen- und Bettungsmaterial – unter verkehrsnahen Bedingungen?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch eine Bewertung anhand bestehender Richtlinienkriterien durchgeführt.

1.3 Methodik und Struktur der Arbeit

Nach der allgemeinen Einleitung werden in den folgenden Kapiteln dieser Diplomarbeit zunächst die theoretischen Grundlagen erläutert. Kapitel 2 vermittelt die grundlegenden Kenntnisse zur Pflasterbauweise, einschließlich ihres geschichtlichen Hintergrunds, des strukturellen Aufbaus, des Tragverhaltens sowie typischer Schäden und deren Ursachen. Kapitel 3 befasst sich mit den theoretischen Grundlagen der Filterstabilität. Hier werden zentrale Begriffe definiert und relevante Filterkriterien vorgestellt. Kapitel 4 stellt den Zusammenhang zwischen Filterstabilität und Pflasterbefestigungen her. Neben der Vorstellung und Anwendung der gemäß RVS 08.18.01 [4] gültigen Filterkriterien werden auch bisherige Untersuchungen aus der Forschung betrachtet.

Kapitel 5 und 6 befassen sich mit den labortechnischen Untersuchungen: In Kapitel 5 wird das Versuchskonzept, welches im Rahmen dieser Arbeit angewandt wurde, im Detail beschrieben. Dazu zählen neben der Zielsetzung vor allem der Aufbau und die Grenzbedingungen der Versuche sowie die Durchführung der Tests. Kapitel 6 enthält die Darstellung und Auswertung der Versuchsergebnisse. Hier werden die Veränderungen der Sieblinien infolge der Belastungen dokumentiert und hinsichtlich der Filterstabilität bewertet.

Abschließend werden in Kapitel 7 die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und Schlussfolgerungen in Bezug auf die Forschungsfrage gezogen.

2 Grundlagen der Pflasterbauweise

2.1 Geschichte und Bedeutung

Erste Pflasterbefestigungen wurden bereits in der Zeit um etwa 4000 v. Chr. gebaut und stellen somit die älteste Form der Straßenbautechnik dar. Zu einer deutlichen Verbesserung der Technik kam es im Römischen Reich, wo erstmals die Relevanz eines planmäßigen Aufbaus sowie einer guten Verdichtung und Entwässerung erkannt wurde. Nach dem Ende des Römischen Reiches nahm die Qualität und Anzahl der Pflasterflächen vorerst wieder ab, bevor im 18. Jahrhundert die Ausdehnung der Städte zu einem Anwachsen des Verkehrs führte. Es wurden vermehrt gepflasterte Straßen gebaut, welche durch die erstmalige Bearbeitung der Steinoberflächen auch technisch eine Verbesserung erfuhren. Ende des 19. Jahrhunderts begann die Entwicklung von Betonsteinen, die heute den größten Marktanteil bei Pflasterflächen ausmachen. Mit dem Beginn des Kraftfahrzeugverkehrs im 20. Jahrhundert wurden Pflasterbefestigungen zunehmend durch kostengünstigere Alternativen aus Teer bzw. Asphalt oder Beton ersetzt. [1]

In einigen Bereichen werden Pflasterflächen aufgrund ihrer Besonderheiten nach wie vor häufig eingesetzt. Durch die vielfältigen optischen Möglichkeiten sind sie besonders gut geeignet, um beispielsweise Fußgängerzonen und Marktplätze visuell ansprechend zu gestalten. Ein weiterer Vorteil ist der einfache Zugang zu unterirdischen Leitungen, da Aufgrabungen und die Wiederherstellung der Oberfläche mit relativ geringem Aufwand möglich sind. Zudem weisen Betonpflastersteine im Gegensatz zu Asphaltdecken eine höhere Nutzungsdauer auf und können bei Setzungen entfernt und erneut verlegt werden. Bei entsprechender Verlegung weisen Pflastersteine einen hohen Widerstand gegen Punktlasten und horizontale Schubkräfte auf. Dadurch eignen sie sich für Lager- und Industrieflächen, wo sie gegenüber anderen Belägen den Vorteil der kleinflächigen Behebung von Schäden bieten. Auch hinsichtlich der Herstellung weisen Pflasterflächen einige Vorteile auf: Die Verlegung ist auf engen und geneigten Flächen möglich, kann unabhängig von der Außentemperatur durchgeführt werden und benötigt keine Wartezeit vor der Verkehrsfreigabe. [2]

Immer mehr an Bedeutung gewinnt der Aspekt der Nachhaltigkeit: Die CO₂-Emissionen bei der Herstellung, Instandhaltung und Instandsetzung einer Pflasterfläche sind vergleichsweise gering, weshalb die Pflasterbauweise als eine äußerst ökologische gilt. Zudem kann bei der ungebundenen Bauweise ein Teil des Niederschlagswassers durch die Fugen in den Boden versickern und somit die Kanalisation entlasten. Weiters kann dank der strukturierten Oberfläche die Feuchtigkeit länger gespeichert werden und verzögert verdunsten, wodurch sich das Mikroklima verbessert. Die im Allgemeinen hellen Oberflächen einer Pflasterbefestigung vermindern zudem die Entstehung urbaner Hitzeinseln, da sie mehr Sonnenstrahlung reflektieren und weniger Wärme speichern. [3]

2.2 Aufbau

Der Aufbau einer Verkehrsfläche gliedert sich grundsätzlich in den Unterbau bzw. Untergrund und den Oberbau, welcher wiederum in die Tragschichten und die Deckschicht unterteilt werden kann. Letztere setzt sich bei einer Pflasterbefestigung aus den Pflastersteinen bzw. -platten, der Fugenfüllung und der Bettung zusammen. [1] Die unterschiedlichen Bauweisen einer Pflasterdecke werden in Kapitel 2.2.1 erläutert, bevor die einzelnen Schichten einer Pflasterfläche, welche in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt sind, in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

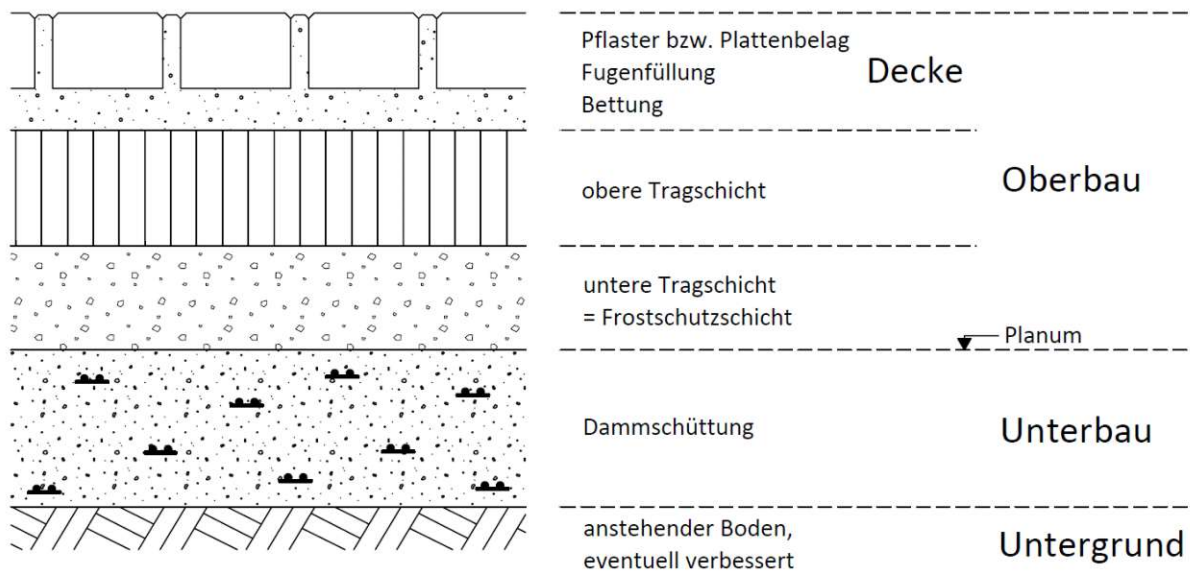


Abbildung 2.1: Aufbau einer Pflasterfläche. Eigene Darstellung nach [1]

2.2.1 Bauweisen

Je nach Ausbildung der Deckschicht wird in der RVS 08.18.01 [4] zwischen ungebundener, gebundener und gemischter Bauweise unterschieden. In manchen Quellen (z. B. in [8]) werden die Bauweisen je nach Ausbildung der oberen Tragschicht eingeteilt in ungebundene, bituminös gebundene Bauweise sowie Bauweise mit Dränbeton. In der vorliegenden Arbeit ist die Unterscheidung der Bauweisen immer hinsichtlich der Art der Deckschicht zu verstehen.

Ungebundene Bauweise

Bei der ungebundenen Bauweise wird sowohl das Bettungs- als auch das Fugenmaterial ohne Zusatz von Bindemitteln ausgeführt. Vorteile der ungebundenen Bauweise sind die höhere Elastizität und Belastbarkeit. Zudem ist diese Bauweise nachhaltiger als jene mit gebundenen Materialien, da die Treibhausgasemissionen des ungebundenen Bettungs- und Fugenmaterials geringer sind. Weiters kann das Wasser besser versickern, was wiederum einen positiven Effekt auf das Mikroklima hat. Auch hinsichtlich der Kosten ist diese Bauweise vorteilhaft: Nicht nur der Herstellungsaufwand ist gering, sondern auch die Wiederherstellung der ursprünglichen Oberfläche nach Aufgrabungen ist ohne großen Aufwand möglich. Nachteile ergeben sich bei der Dauerhaftigkeit der Fugen, da diese eher von Bewuchs oder Auswaschung betroffen sind. [4]

Gebundene Bauweise

Wird die Deckschicht in gebundener Bauweise ausgeführt, besteht sowohl die Bettung als auch die Fugenfüllung aus gebundenem Material. Durch die Zugabe eines Bindemittels verringert sich die Elastizität, wodurch temperaturbedingte Risse unvermeidbar sind. Sofern sich diese Risse auf die gebundene Fugenfüllung beschränken und die Gebrauchstauglichkeit nicht beeinträchtigt ist, stellt dies keinen technischen Mangel dar. Um zu vermeiden, dass die Risse durch die Pflastersteine verlaufen, müssen spannungsabbauende Fugen und Zonen berücksichtigt werden. Dazu können entweder Bewegungsfugen aus elastischen Fugenvergussmassen angeordnet oder bestimmte Bereiche ungebunden verfugt werden. [4]

Gemischte Bauweise

Die gemischte Bauweise stellt eine Kombination der beiden dar. Das Bettungsmaterial wird ungebunden ausgeführt, während die Fugenfüllung aus einem gebundenen Material besteht. Dadurch müssen die thermischen Spannungen allein durch die Pflastersteine und die Fugen abgebaut werden, was zu einer vermehrten Rissbildung führt. Diese Bauweise wird daher grundsätzlich nicht empfohlen und darf nur bei Flächen im privaten Bereich mit geringer Belastung angewandt werden. [4]

Da eine genaue Erläuterung der Besonderheiten jeder Bauweise den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen würde, beziehen sich die nachfolgenden Kapitel – wenn nicht anders angegeben – stets auf die ungebundene Bauweise. Diese stellt nicht nur die Regelbauweise dar, sondern ist vor allem die einzige Bauweise, bei welcher die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial von Bedeutung ist.

2.2.2 Pflaster

Den oberen Abschluss der Pflasterdecke bilden die Pflastersteine bzw. -platten mit der dazwischenliegenden Fugenfüllung. Die Unterscheidung zwischen Pflastersteinen und Pflasterplatten erfolgt gemäß ÖNORM B 2214 [9] nach deren Abmessungen: Ist die Gesamtlänge höchstens 30 cm und das Längen-/Dickenverhältnis $L/d \leq 3$, so wird dies als Pflasterstein bezeichnet. Eine Pflasterplatte ist definiert als Platte mit einer Dicke von maximal einem Drittel der größten Gesamtlänge sowie einer Gesamtlänge von mindestens 15 cm.

Hinsichtlich des Materials wird unterschieden zwischen Natursteinen und Betonpflastersteinen. Natursteine stellen die älteste Form der Pflasterbefestigungen dar und werden in Steinbrüchen aus natürlichen Gesteinen wie z. B. Granit gewonnen. Heutzutage am häufigsten verwendet werden Betonpflastersteine, da diese günstig und in verschiedenen Ausführungen mit genauen Abmessungen produziert werden können. [1]

Je nach Anordnung der Steine bzw. Platten ergeben sich unterschiedliche Verbandsarten, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Lastverteilung haben. Besonders widerstandsfähig gegenüber Verformungen sind Verlegearten, bei welchen beim Überrollen des Pflasters möglichst viele Steine und somit auch ein größerer Fugenanteil vom Fahrzeugrad erfasst werden. Dies kann durch eine besondere geometrische Anordnung, wie z. B. dem Fischgrät- oder Ellenbogenverband (Abbildung 2.2 rechts) erreicht werden. Bei durchgehenden Fugen, wie es beispielsweise beim Reihenverband (Abbildung 2.2 links) der Fall ist, ist es vorteilhaft, die Fugen diagonal zur Fahrtrichtung verlaufen zu lassen, um eine bessere Lastverteilung zu erzielen. [10]

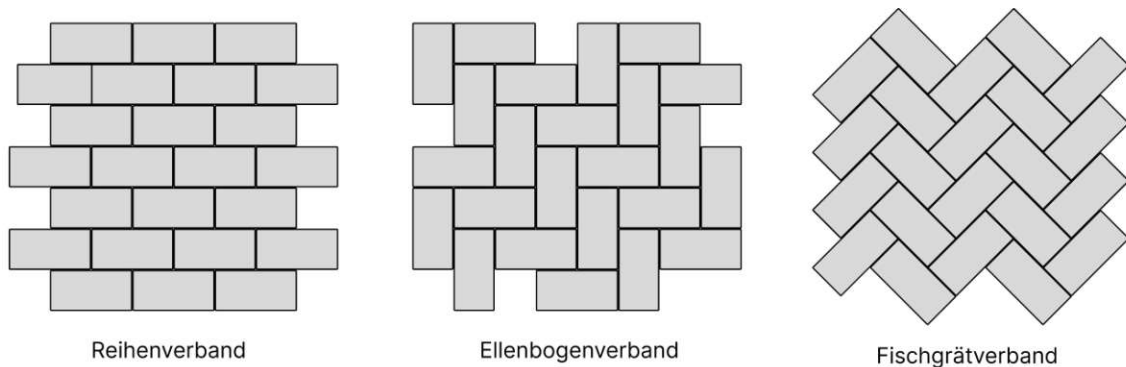


Abbildung 2.2: Verbandsarten. Eigene Darstellung nach [10]

2.2.3 Fugen

Damit die Fugen die Schub- und Scherkräfte aus der Verkehrsbelastung übertragen können, muss eine ausreichende Verbundwirkung vorhanden sein. Dafür ist neben einer geeigneten Verbandsart der Pflastersteine vor allem die ordnungsgemäße Fugenfüllung von Bedeutung. Außerdem soll die Fugenfertigungsbedingte Maßtoleranzen der Steine ausgleichen und Kantenabplatzungen verhindern sowie temperaturbedingte Spannungen in der Pflasterdecke reduzieren. [1, 10] Zur Erfüllung dieser Aufgaben spielt die Fugenbreite eine wichtige Rolle: Sie soll so schmal wie möglich, aber so breit wie notwendig sein. Schmale Fugen erhöhen die Gebrauchseigenschaften, eine gewisse Breite ist jedoch erforderlich, um die Fugenfüllung über die gesamte Steindicke einbringen zu können. [1]

Die Anforderungen an das Material sind in der RVS 08.18.01 [4] geregelt. Mögliche Korngruppen sind 0/2, 0/4 und 0/8, wobei erstere nur bei Verbundsteinen mit einer maximalen Fugenbreite von 5 mm eingesetzt werden darf. Das Größtkorn soll 40 % bis 50 % der maximalen Fugenbreite betragen und es sollen gebrochene Gesteinskörnungen $C_{90/3}$ verwendet werden. Das bedeutet, das 90 % der Körner mindestens zur Hälfte eine gebrochene Oberfläche aufweisen müssen und maximal 3 % vollständig gerundete Körner sein dürfen. Der hohe Anteil kubisch geformter Körner hat einen positiven Einfluss, da dadurch der innere Reibungswinkel größer ist. Zudem bewirkt der Feinanteil zusammen mit der Feuchtigkeit eine Kohäsion, welche die Widerstandsfähigkeit gegen Fugenaustrag erhöht. Um eine dauerhafte Fugenfüllung sicherzustellen, ist auf die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial zu achten. [1]

Der Einbau der Fugenfüllung erfolgt durch Einkehren, indem die Pflasterfläche zunächst mit dem Fugenmaterial überzogen und anschließend mit dem Besen verteilt wird. Sind die Fugen vollständig gefüllt, werden sie durch Zugabe von Wasser eingeschlämmt und nachgekehrt, bis eine saubere Oberfläche entsteht. Danach folgt das Abrütteln: Vom Rand beginnend werden die Pflastersteine mit einer leichten Vibrationsplatte bis hin zur Mitte festgerüttelt. Dadurch wird einerseits eine ebene Fläche geschaffen, andererseits auch das Fugenmaterial verdichtet. Danach folgt ein zweiter Durchgang des Einschlämmens und Abrüttelns, um eine vollständige Fugenfüllung sicherzustellen. [11]

2.2.4 Bettung

Die Bettung dient als Auflagerfläche für die Pflastersteine und soll deren Dickenabweichungen ausgleichen, wofür eine entsprechende Verdichtbarkeit erforderlich ist. Nach Fertigstellung der Pflasterung sollen weitere Verdichtungen vermieden werden, da diese zu Spurrinnen und Verdrückungen führen. Um eine mögliche Nachverdichtung durch die Verkehrsbelastung gering zu halten, ist die Maximaldicke der Bettung unbedingt einzuhalten sowie eine geeignete Gesteinskörnung zu verwenden. [1] In der ÖNORM B 2214 [9] wird eine zulässige Dicke des Bettungsmaterials von 3-6 cm vorgeschrieben. Diese bezieht sich auf den fertigen Zustand und beinhaltet bereits Unebenheiten der oberen Tragschicht sowie der Pflasterdecke. [4] Besonders geeignet als Bettungsmaterial sind gebrochene Gesteinskörnungen mit einer kornabgestuften Zusammensetzung. Nicht-kornabgestufte Bettungsmaterialien können nur bei Pflasterungen mit untergeordneter Belastung verwendet werden, da sie eine Reihe von Nachteilen aufweisen: Durch die geringere Verdichtbarkeit können Maßtoleranzen schlechter ausgeglichen werden. Zudem bleibt ein größerer Hohlraumgehalt, welcher die Wasserdurchlässigkeit erhöht und das Hineinrieseln feiner Partikel aus der Fugenfüllung ermöglicht. Es muss daher auf eine entsprechend hohe Wasserdurchlässigkeit der Tragschichten sowie die Filterstabilität zum Fugenmaterial geachtet werden. Da sich viele der Partikel

bei nicht-kornabgestuften Materialien lediglich punktuell berühren, ist zudem die Gefahr der Kornzertrümmerung erhöht. [10]

Gemäß RVS 08.18.01 [4] sind die Korngruppen 2/4 und 2/8 zu verwenden, wobei erstere nur bei Belastungen mit Fahrzeugen bis zu 3,5 t Gesamtgewicht eingesetzt werden darf. Wird die Fugenfüllung gebunden ausgeführt, ist auch die Korngruppe 4/8 zulässig. [4] Bei der Festlegung der Kornzusammensetzung ist zu beachten, dass sich grobe Sieblinien beim Einbau schwer verdichten lassen, bei Verkehrsbelastung jedoch einen großen Verformungswiderstand aufweisen. [1] Bezüglich der Wasserdurchlässigkeit ist darauf zu achten, dass diese im verdichteten Zustand mindestens $2,2 \cdot 10^{-4}$ m/s zu betragen hat. Die Anforderung hinsichtlich der Bruchflächigkeit ist $C_{90/3}$ und entspricht damit jener des Fugenmaterials. [4]

2.2.5 Tragschichten

Die Hauptaufgabe der Tragschichten ist es, die auf die Pflasterdecke aufgebrachten Lasten aufzunehmen und gleichmäßig in den Unterbau bzw. Untergrund weiterzuleiten. Um die Entstehung sowohl kurzfristiger als auch bleibender Verformungen zu verhindern, ist eine ausreichende Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit notwendig. Zur Quantifizierung der Tragfähigkeit wird der Verformungsmodul E_v herangezogen, welcher mithilfe des Lastplattenversuches ermittelt wird. [10] Die Korngrößen und deren Verteilung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit: Diese wird durch ein möglichst großes Größtkorn sowie eine weitgestufte Verteilung positiv beeinflusst. [1] Der Hohlraumgehalt ist bei derartigen Korngrößenverteilungen minimal, was zu einer verminderten Wasserdurchlässigkeit führt. Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit stellen somit gegensätzliche Eigenschaften dar, welche jedoch beide wünschenswert sind. [12] Auch der Widerstand gegen Kornzertrümmerung trägt zur Tragfähigkeit bei, da eine ausreichende Kornfestigkeit dafür sorgt, dass die Korngrößenverteilung konstant bleibt. Vorteilhaft für die Tragfähigkeit sind zudem gebrochene Materialien, da diese im Vergleich zu runden Körnern eine größere innere Reibung aufweisen. [1]

Die obere Tragschicht kann auch gebunden ausgeführt werden, entweder als Dränbetontragschicht oder bituminös gebunden. Durch die Verwendung eines Bindemittels soll eine höhere Tragfähigkeit und Verformungsbeständigkeit erreicht werden. Eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit ist auch bei gebundenen Tragschichten erforderlich. Daher sind spezielle Dränasphalte bzw. -betone zu verwenden. [1] Diese weisen einen großen Anteil an Poren auf, welche ein unerwünschtes Abwandern des Bettungsmaterials begünstigen. Um die Filterstabilität sicherzustellen, kann entweder die Oberfläche der gebundenen Tragschicht abgesplittet oder ein Filtervliesstoff angeordnet werden. [10]

Die Anforderungen an das Material für ungebundene Tragschichten sind in der RVS 08.15.01 [13] aufgelistet und abhängig von der Lastklasse. Die Lastklasse entspricht der maßgebenden Verkehrsbelastung, welche durch die Anzahl an Bemessungsnormlastwechseln (BNLW) beschrieben wird. [14] Beim Einbau ist besonders auf eine hohe und gleichmäßige Verdichtung zu achten, da andernfalls Unebenheiten in der Pflasterdecke entstehen. [1] Als Maß für die Verdichtung wird das Verhältnis E_{v2}/E_{v1} herangezogen, wobei E_{v1} der Verformungsmodul aus der Erstbelastung und E_{v2} jener aus der Zweitbelastung ist. [8] Überschreitet dieses Verformungsverhältnis den Wert von 2,2 ist ein erforderlicher Mindestverdichtungsgrad D_{Pr} nachzuweisen. Dieser liegt für ungebundene untere Tragschichten bei 101 % und für ungebundene obere Tragschichten bei 103 % und somit in beiden Fällen über der Normverdichtung im Labor. [13]

Die untere Tragschicht wird oft als Frostschutzschicht bezeichnet und ist nicht immer erforderlich. Ob sie benötigt wird, hängt von der Frostempfindlichkeit des Unterbaus bzw. Untergrundes ab. Gefriert ein frostempfindlicher Boden, bilden sich Eislinsen, welche weiteres Wasser ansaugen. Dadurch kommt es zu ungleichmäßigen Frosthebungen und Rissen. Wenn das Wasser in weiterer Folge wieder auftaut, bekommt der Boden eine weiche Konsistenz mit geringer Tragfähigkeit. Dies gilt es zu vermeiden, weshalb bei frostempfindlichen Böden eine untere Tragschicht erforderlich ist. Zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit spielt der Feinteilgehalt eine wesentliche Rolle, da vor allem bindige Böden zur Eislinsenbildung neigen. [15] In Deutschland werden Böden gemäß DIN 18196 [16] in verschiedene Bodengruppen eingeteilt. Diese Bodengruppen können gemäß ZTV E-StB [17] wiederum in die drei Frostempfindlichkeitsklassen *F1* bis *F3* eingeteilt werden. In Österreich kann die Frostsicherheit von Böden anhand der Korngrößenkriterien der ÖNORM B 4811 [18] nachgewiesen werden.

2.2.6 Unterbau und Untergrund

Die unterste Schicht der Pflasterbefestigung stellt immer der anstehende Boden dar, welcher als Untergrund bezeichnet wird. Er hat die Aufgabe, die auf ihn übertragenen Lasten aufzunehmen. Dafür ist eine entsprechende Tragfähigkeit erforderlich, welche mithilfe des Verformungsmoduls E_v quantifiziert wird. [1] Kann der geforderte Mindestwert von 35 MPa nicht eingehalten werden, ist der Untergrund zu verbessern oder die Dicke der Frostschutzschicht zu erhöhen [14]. Für die profilgerechte Lage des Planums kann eine Dammschüttung notwendig sein, diese wird als Unterbau bezeichnet. Falls der anstehende Boden generell als Untergrund ungeeignet ist, wie dies z. B. bei organischen Bodenarten der Fall ist, muss dieser ausgetauscht und dementsprechend dem Unterbau zugeordnet werden. Als Unterbauplanum wird die Grenze zum Unterbau bzw. Untergrund bezeichnet, welche die Aufstandsfläche für den Oberbau bildet. Umgangssprachlich wird der Begriff „Planum“ oft auch für andere ebene Flächen verwendet. Um Verwechslungen zu vermeiden, sollte dabei die jeweilige Fläche genauer spezifiziert werden, beispielsweise durch die Bezeichnung „Planum Frostschutzschicht“. Das Planum muss eben und profilgerecht ausgeführt werden und eine ausreichende Querneigung aufweisen, um die Entwässerung sicherzustellen. [1]

2.3 Tragverhalten

2.3.1 Beanspruchungen

Bei befahrenen Pflasterflächen stellt die Verkehrsbelastung die maßgebende Beanspruchung dar. Diese wirkt auf verschiedene Weisen: Einerseits entsteht durch die Masse des Fahrzeuges eine Vertikallast, welche auf die ellipsen- bis kreisförmige Aufstandsfläche der Reifen wirkt. Der Reifenkontaktdruck ist nicht nur von der Radlast abhängig, sondern auch vom Reifeninnendruck und Reifenaufbau. Zusätzlich zu der statischen Belastung führen Unebenheiten in der Fahrbahn zu dynamischen Radlastschwankungen. Deren Größe wird durch die Federung und Geschwindigkeit der Fahrzeuge sowie den vorhandenen Unebenheiten beeinflusst. [1] Andererseits entstehen auf befahrenen Verkehrsflächen auch Horizontallasten. Diese resultieren aus dem Beschleunigen oder Bremsen der Fahrzeuge, aus Kurvenfahrten sowie aus dem Hangabtrieb beim Befahren geneigter Straßen. [19] Übertragen werden diese Horizontalkräfte über die Reibung zwischen Reifen und Pflasterstein, gemäß dem Coulomb'schen Gesetz

$$F_H = F_N \cdot \mu . \quad (2.1)$$

Dementsprechend wächst die horizontale Last F_H mit zunehmender Normalkraft F_N und großem Reibungskoeffizienten μ , wie er bei trockenen Straßen vorzufinden ist. [1]

Neben den Verkehrsbelastungen sind vor allem klimatische Einflüsse von Bedeutung, insbesondere Wasser. Bei stehendem Wasser kann durch überrollende Fahrzeuge eine Saugwirkung entstehen, welche zu einer Austragung der Fugenfüllung führt. Ist die Pflasterfläche stark geneigt, kann strömendes Wasser das ungebundene Fugenmaterial herauspülen. Das Eindringen von Wasser ist nicht per se abzulehnen, sondern insbesondere bei speziell versickerungsfähigen Pflasterflächen wünschenswert. Durch dieses sogenannte „Öko-Pflaster“ wird die Kanalisation entlastet, da ein Teil des Niederschlagswassers direkt versickern kann. [1] Für den Einbau einer hydroaktiven Pflasterfläche ist ein Abstand zum Grundwasser von mindestens 2 m einzuhalten sowie bestimmte Voraussetzungen zu erfüllen, um potenzielle Gefährdungen durch Verunreinigungen auszuschließen. Vorgaben zur Planung, Bemessung und Ausführung von speziell versickerungsfähigen Pflasterflächen finden sich in der „Richtlinie für hydroaktive Pflaster- und Plattenflächen“. [20] Damit die Versickerung des Regenwassers dauerhaft ohne Schäden funktioniert, ist eine ausreichende Filterstabilität und Wasserdurchlässigkeit aller Schichten erforderlich. Gefriert das Wasser in den Schichten, kann es zu Frosthebungen und beim anschließenden Auftauen zu Tauschäden kommen. Die durch Temperaturschwankungen ausgelöste Volumenänderung der Pflastersteine ist bei der ungebundenen Bauweise nicht problematisch, da diese von den Fugen ausgeglichen werden kann. Bei gebundenen Fugen kann eine Erwärmung und Abkühlung zu Rissen und Druckbrüchen führen. Weitere schädliche Einwirkungen sind die unerwünschte Ansiedlung von Pflanzen sowie die Reinigung von Pflasterflächen mit Kehrsaugmaschinen. [1]

2.3.2 Lastabtragung

Die Lastabtragung bei Pflasterbefestigungen unterscheidet sich wesentlich je nach Bauweise. Im Gegensatz zur gebundenen Bauweise verhält sich eine Pflasterfläche mit ungebundenen Fugen nachgiebig. Früher wurde dies oft als „elastisches“ Verhalten bezeichnet, was jedoch irreführend ist. Allgemein bedeutet der Begriff „elastisch“, dass ein Material die Fähigkeit besitzt, entstandene Verformungen nach Entlastung wieder vollständig zurückzubilden. Dies entspricht lediglich dem Idealfall bei Pflasterbefestigungen. Tatsächlich entstehen bei hohen Belastungen geringe plastische Verformungen. Bei Pflasterungen in ungebundener Bauweise können Verformungen in geringem Maße aufgenommen werden, ohne dass es zu Rissen oder Schäden kommt. Daher bezeichnet man deren Verformungsverhalten als nachgiebig bzw. flexibel. [1]

Bei den meisten befahrbaren Flächen entsteht die maßgebende Belastung aus dem Überrollvorgang der Fahrzeuge. Dabei handelt es sich um eine sehr kurze Lasteinwirkung mit einer Dauer von wenigen Hundertstelsekunden. Das entspricht einer impulsartigen Belastung, weshalb bei der rechnerischen Oberbaudimensionierung dynamische Materialkennwerte heranzuziehen sind. Bei überwiegend statisch belasteten Verkehrsflächen wie Kreuzungsbereichen und Parkplätzen sind die statischen Bodeneigenschaften maßgebend. [19]

Wird eine Pflasterdecke von einem Reifen überrollt, verteilt sich die Belastung im Allgemeinen auf mehrere Pflastersteine. Betrachtet man vereinfachend einen einzelnen Pflasterstein, wird dieser beim Überrollen zunächst außermittig, dann mittig und schließlich wieder außermittig belastet. Die Exzentrizität des Kraftangriffspunktes ist vor allem bei Pflasterplatten problematisch. Durch die große

Fläche bei gleichzeitig geringer Dicke, welche Pflasterplatten definitionsgemäß aufweisen, kann es bei stark außermittiger Belastung zu einem Klaffen der Sohlfuge kommen. Damit dies verhindert werden kann, muss die Fugenfüllung die entstehenden Druckspannungen aufnehmen können (siehe Abbildung 2.3).

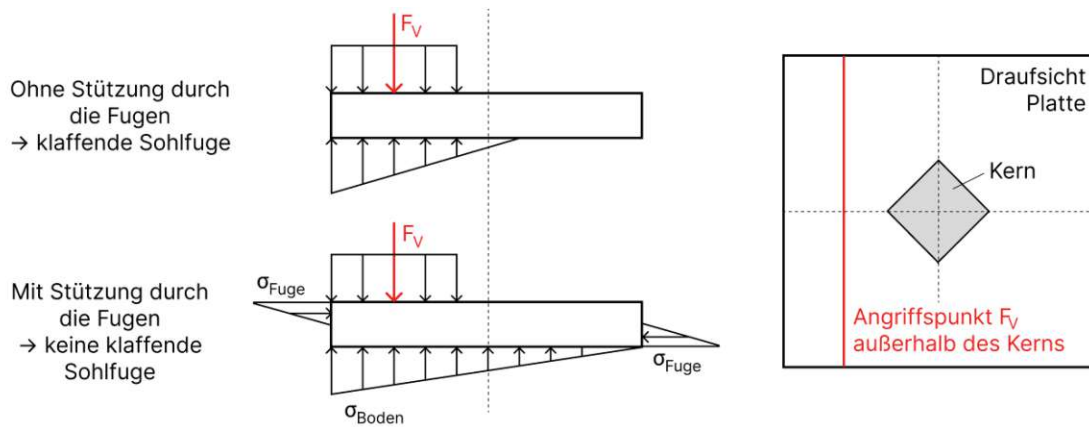


Abbildung 2.3: Außermittige Belastung einer Platte. Eigene Darstellung nach [1]

Bei sehr großen Pflasterplatten und ungleichmäßiger Bettung kann auch eine mittige Belastung zum Bruch führen. Hierbei wird die Platte auf Biegung beansprucht, wie in Abbildung 2.4 ersichtlich ist. Dadurch entstehen an der Unterseite Zugspannungen. [1]

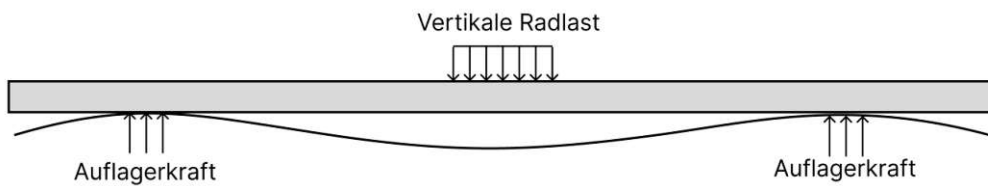


Abbildung 2.4: Statisches System bei mittiger Belastung von Pflasterplatten mit ungleichmäßiger Bettung. Eigene Darstellung nach [1]

Pflastersteine weisen im Gegensatz zu Platten eine gedrungene Form und dadurch ein anderes Tragverhalten auf. Wirkt eine vertikale Last auf einen einzelnen Pflasterstein, wird diese im Wesentlichen an die Bettung abgegeben. Das Fugenmaterial hat eine entlastende Wirkung, indem sie einen Teil der Kraft auf Nachbarsteine übertragen kann. Die Entlastungskraft F_E entsteht durch die Reibung zwischen Fugenmaterial und Pflasterstein und erfordert eine horizontale Verspannung (siehe Abbildung 2.5).

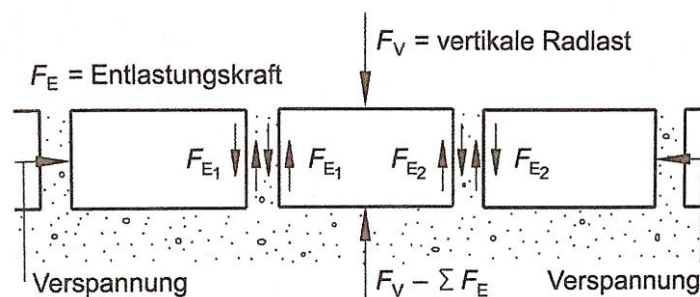


Abbildung 2.5: Modellvorstellung der Kräfte infolge vertikaler Belastung [1]

Die Lastübertragung in der Fuge findet nur im oberen Teil statt, da keine Zugkräfte übertragen werden können. Durch die vertikale Belastung entstehen Druckkräfte an der Unterseite der Pflastersteine sowie Schub- und Druckkräfte im oberen Bereich der Fuge, der untere Bereich bleibt spannungsfrei (siehe Abbildung 2.6) Daher ist die vollständige Füllung der Fugen entscheidend, um eine Verbundwirkung und somit eine Entlastung zu erreichen. [11]

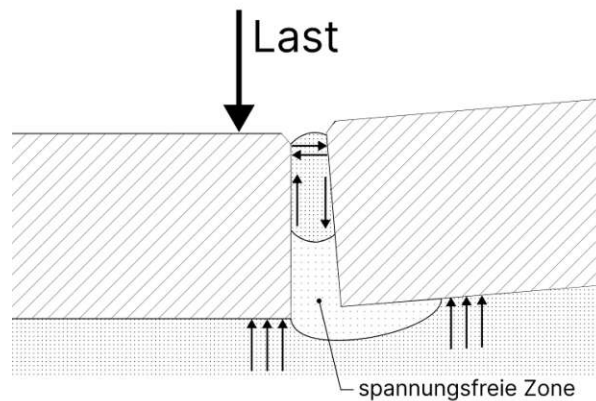


Abbildung 2.6: Lastverteilung in der Fuge. Eigene Darstellung nach [11]

Trotz der Entlastungskräfte muss die Bettung 80 – 90 % der vertikalen Last aufnehmen. Eine hohe Belastung auf kleiner Fläche kann, abhängig von den Eigenschaften des Bodens, theoretisch zu einem Grundbruch führen. Damit die Grundbruchlast tatsächlich überschritten wird, sind große statische Kräfte erforderlich. Ein Grundbruch im Sinne der klassischen Bodenmechanik tritt daher nur in Ausnahmefällen auf, wie etwa bei Container-Abstellflächen. [1] Deutlich häufiger kommt es zu einem „Grundbruch auf Raten“, der durch die immer wiederkehrende, impulsartige Belastung entsteht. Die Vielzahl an kurzen Belastungen erzeugt eine Nachverdichtung der oberen Bodenschichten, die sich bei Spurverkehr durch die Bildung von Spurrinnen zeigt. Weisen die Bodenschichten eine unzureichende Steifigkeit auf, kann sich schließlich ein Grundbruch ausbilden. Dieser äußert sich durch eine Auflockerung und seitliche Hochwölbung des Oberbaus. [19]

Die Horizontalkraft wird über die Reibung zwischen Reifen und Pflasterstein übertragen. Sie ist abhängig von dem Reibungskoeffizienten sowie der wirkenden Normalkraft. Da das Gewicht des Steines im Vergleich zum Fahrzeuggewicht vernachlässigbar ist, wirkt auch an der Steinunterseite die vertikale Last F_V . Der Reibungskoeffizient ist bei trockenen Verhältnissen an der Oberseite des Steines größer als zwischen Steinunterseite und Bettung. Daher ist die an die Bettung übertragene Reibungskraft F_R kleiner als die vom Fahrzeugreifen eingeleitete horizontale Radlast F_H . Aus Gleichgewichtsgründen entsteht eine Differenzkraft ΔF , wie in Abbildung 2.7 ersichtlich ist. Diese Differenz der horizontalen Kräfte muss über die Fugen übertragen werden und erfordert daher eine entsprechende Fugenfüllung aus geeignetem Material. Günstig für einen hohen Widerstand der Fugen sind zudem dicke Steine und schmale Fugen, sowie ein geeigneter Verlegeverband. [1]

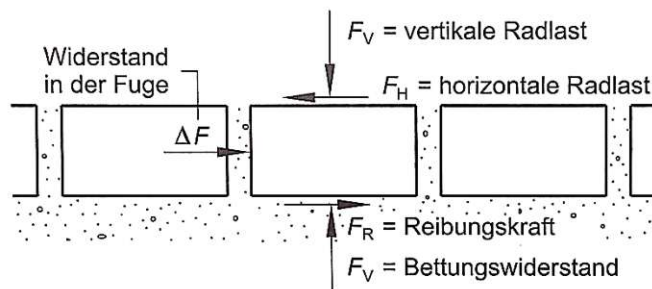


Abbildung 2.7: Modellvorstellung der Kräfte infolge horizontaler Belastung [1]

2.4 Schäden und mögliche Ursachen

Sowohl die Schadensbilder als auch deren Ursachen sind vielfältig. Neben vertikalen und horizontalen Verschiebungen der Pflastersteine bzw. -platten, können auch die Steine an sich Schäden aufweisen. Einerseits können dies rein optische Mängel, wie Farbunterschiede oder Ausblühungen sein, andererseits können auch Kantenschäden, Abplatzungen, Risse oder gar Brüche entstehen. Mögliche Ursachen sind Materialfehler, unsachgemäßes Nutzungsverhalten oder verlegebedingte Einflüsse. [21]

Vertikale Verformungen und Unebenheiten entstehen meist durch Nachverdichtung der Bodenschichten. Um dies zu vermeiden, ist eine anforderungsgerechte Tragschicht mit entsprechender Dicke und Verdichtung erforderlich. Zudem muss die Tragschicht eben sein, da eine ungleichmäßige Dicke der Bettung zu Einsenkungen des Pflasters führt (siehe Abbildung 2.8). Höhenunterschiede einzelner Pflastersteine entstehen entweder durch ungleiche Lagerungsdichte der Bettung oder unterschiedlich dicke Steine, da die Bettung unter den dickeren Steinen stärker verdichtet wird. Beides führt zu unterschiedlichen Verdichtungsgraden unter den einzelnen Steinen, weshalb sich infolge der Verkehrsbelastung Höhenunterschiede ausbilden. [1]

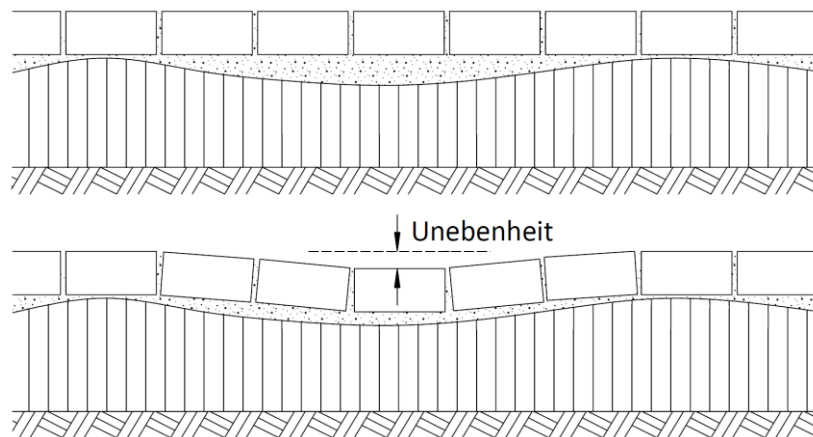


Abbildung 2.8: Unebenheit durch ungleichmäßige Dicke der Tragschicht. Eigene Darstellung nach [1]

Zur Entstehung horizontaler Verformungen muss die aufgebrachte horizontale Radlast größer sein als die Summe aus der Reibungskraft an der Unterseite des Pflastersteines und der Widerstandskraft der Fuge (siehe Abbildung 2.7). Dementsprechend entstehen Verschiebungen und Verdrehungen der Steine bzw. Platten, wenn sich eine der beiden widerstehenden Kräfte verringert. Die Reibungskraft zwischen Pflasterstein und Bettung nimmt proportional mit dem dort vorzufindenden Reibungskoeffizienten ab. Dieser sinkt erheblich, wenn die Hohlräume der Bettung mit Wasser gefüllt

sind, da in diesem Fall die Verkehrslast über Porenwasserdrücke abgetragen wird. Ein reduzierter Fugenwiderstand kann ebenso zu Horizontalverschiebungen führen. Wie in Abbildung 2.6 ersichtlich ist, entsteht die Entlastungswirkung vor allem im oberen Bereich der Fuge, weshalb eine vollständige Fugenfüllung von Bedeutung ist. Gründe für offene oder leere Fugen sind neben einer mangelhaften Verfüllung vor allem Saugkräfte, die infolge überrollender Reifen oder intensiver Reinigung entstehen. Aber auch eine unzureichende Filterstabilität zwischen Fugenmaterial und Bettung sowie fließendes Wasser kann zu einem Austrag der Fugenfüllung führen. Besonders gefährdet für horizontale Verschiebungen sind dünne Pflasterplatten, da diese eine große Belastungsfläche und einen geringen Fugenanteil aufweisen. Neben dem optischen Mangel, der durch Horizontalverformungen entsteht, können diese auch Kantenabplatzungen und wackelnde Steine verursachen. [1]

Einige Schadensfälle sind auf eine unzureichende Wasserdurchlässigkeit von Tragschicht oder Bettung zurückzuführen. Ist die Tragschicht zu wenig durchlässig, sammelt sich das eingedrungene Wasser darauf und die Pflasterdecke beginnt zu „schwimmen“. Grund dafür ist neben einer ungeeigneten Korngrößenverteilung vor allem die Zunahme des Feinteilgehaltes, entweder durch das Abwandern der Bettung oder durch Kornzertrümmerung. Bei einer unzureichenden Wasserdurchlässigkeit der Bettung bildet das stehende Wasser eine Art Gleitschicht, welche zu Horizontalverschiebungen führt. [21] Zudem kann der Stein durch die Verkehrsbelastung zu „reiten“ beginnen, d. h. er erfährt Kippbewegungen bei der Überfahrt eines Fahrzeuges. Dies ist eine Folge der Fugenentleerung, welche einerseits durch das austretende Wasser und andererseits durch das Abwandern in die Bettung geschieht (siehe Abbildung 2.9). [22]

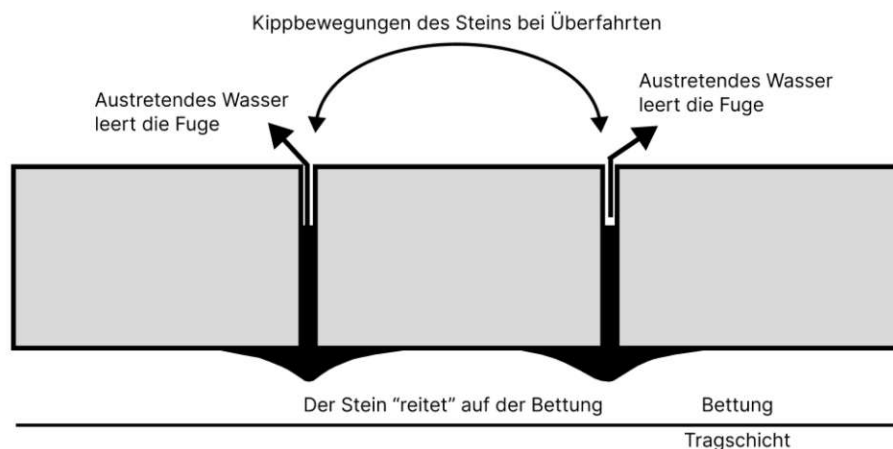


Abbildung 2.9: Kippbewegung durch Fugenentleerung. Eigene Darstellung nach [22]

3 Grundlagen der Filterstabilität

3.1 Begriffsbestimmungen

Natürliche Bodenschichten stellen ein komplexes Gefüge aus unterschiedlichen Partikeln und Poren dar. Durch die Durchströmung von Wasser kann es zu verschiedenen Vorgängen des Materialtransports kommen, welche die Struktur des Bodens verändern. Dabei unterscheidet man folgende Vorgänge der hydraulischen Instabilität: Suffosion, Kolmation und Erosion. [23]

Diese hydraulischen Transportphänomene sind oftmals eng miteinander verbunden. Fortschreitende Suffosion kann beispielsweise die Entstehung von Erosion begünstigen, da durch das Ausspülen feiner Partikel die Stabilität des Korngerüsts gefährdet wird. Durch Kontakterosion werden Partikel des feineren Bodens in die Poren des gröberen Bodens transportiert, wo sie zu Suffosion oder Kolmation führen können. [24]

3.1.1 Suffosion und Kolmation

Suffosion bezeichnet den Transport von feinen Partikeln im Porenraum der groben Kornstruktur, ohne dass das Korngerüst dabei verändert oder zerstört wird. Durch den Abtransport der feinen Kornfraktionen vergrößert sich das Porenvolumen, womit sich die Durchlässigkeit erhöht. Je nachdem wo dies stattfindet, kann der Materialtransport in innere, äußere und Kontaktsuffosion (siehe Abbildung 3.1) eingeteilt werden. Während innere Suffosion im Inneren eines Lockergesteins auftritt, findet die äußere an der Grenzfläche zwischen Boden und Gewässer statt. Bei der Kontaktsuffosion werden die feinen Partikel einer Bodenschicht in die Poren einer angrenzenden, gröberen Schicht transportiert. [25]

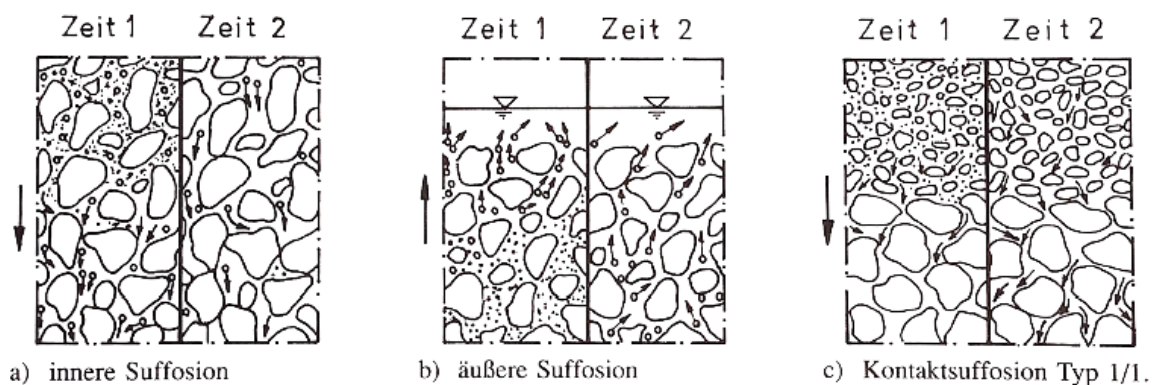


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Suffosion bei Erdstoffen mit Einzelkorngefüge [25], nach [26].

Kolmation (manchmal auch Kolmatation [23] genannt) bezeichnet die Ablagerung feiner Partikel im Porenraum der groben Kornstruktur und kann somit als Umkehrvorgang zur Suffosion aufgefasst werden. Die Folgen davon sind vermindertes Porenvolumen und geringere Durchlässigkeit. Im Unterschied zur Sedimentation, bei welcher sich die feinen Teilchen an der Oberfläche ablagern, dringen diese bei der Kolmation in die Porenkanäle des Bodens ein. [25]

3.1.2 Erosion

Unter Erosion versteht man die Umlagerung von Partikeln unterschiedlicher Kornfraktionen. Im Gegensatz zur Suffosion werden bei Erosionsvorgängen nicht nur feine Partikel, sondern nahezu alle Korngrößen transportiert. Je nachdem, wo der Materialtransport stattfindet, unterscheidet man auch hier zwischen innerer und äußerer Erosion, sowie Kontakt- und Fugenerosion (siehe Abbildung 3.2). [25] Letzteres kann an Grenzflächen zwischen Boden und Bauwerk oder zwischen kohäsionslosen und kohäsiven Böden auftreten. [24]

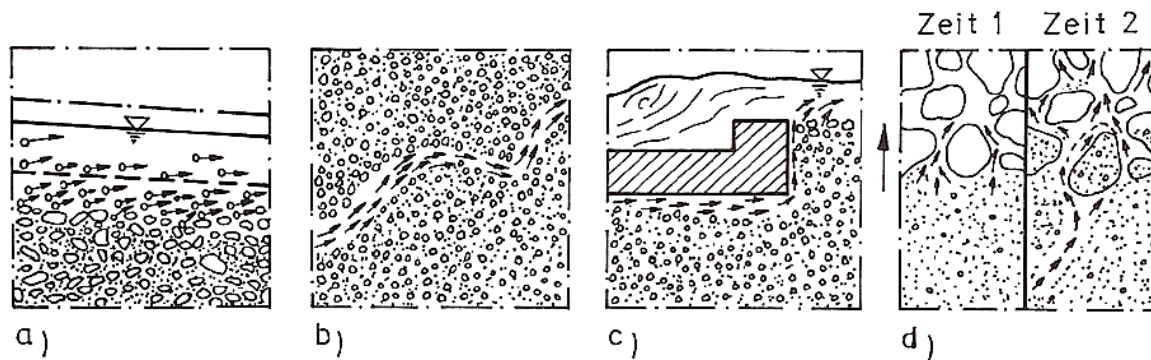


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Erosion bei nichtbindigen Erdstoffen [25], nach [26].

a) äußere Erosion, b) innere Erosion, c) Fugenerosion, d) Kontakterosion mit rückschreitender innerer Erosion.

Der Vorgang der inneren Erosion beginnt oft durch bereits bestehende Hohlräume, welche z. B. durch Wurzeln oder Tiergänge entstanden sind. Die großen, meist röhrenförmigen Hohlräume, in welchen die innere Erosion stattfindet, können sich auch durch Auswaschung durchströmter Porenkanäle ausbilden. Dies geschieht im Allgemeinen rückschreitend von einer freien Oberfläche aus, weshalb dieser Vorgang als rückschreitende, innere Erosion bezeichnet wird. [25]

Äußere Erosion tritt, analog zur äußeren Suffosion, an der Grenze zwischen Boden und Gewässer auf. Im Unterschied zu suffosiven Prozessen entsteht Erosion jedoch nur bei fließenden Gewässern mit entsprechender Schleppkraft. [25]

3.1.3 Begriffsabgrenzung und Definition der Filterstabilität

Die Begrifflichkeiten hydraulischer Transportphänomene werden in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Der Begriff der Erosion kann auch als Oberbegriff für sämtliche, durch Umwelteinflüsse ausgelöste, Materialtransporte verstanden werden. [27] Unter „innerer Erosion“ werden oft jene Transportvorgänge zusammengefasst, welche im Inneren einer Bodenstruktur stattfinden und durch Sickerströmung ausgelöst werden. Dies beinhaltet v. a. die Phänomene der Suffosion, Kolmation, Kontakterosion und der rückschreitenden Erosion. [28] Im Zuge dieser Diplomarbeit werden die in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 festgelegten Definitionen beibehalten.

Filterstabilität wird definiert als die „Beständigkeit an einer von Wasser durchströmten Schichtgrenze zweier benachbarter Gesteinskörnungsgemische gegen Kornumlagerungen“ [7]. Der Begriff umfasst somit alle Phänomene des hydraulischen Partikeltransports.

3.1.4 Nachweise

Für den Materialtransport müssen bestimmte geometrische Voraussetzungen der Bodenstruktur erfüllt sein. Ob ein Lockergestein ein entsprechendes Verhältnis der Korn- und Porendurchmesser aufweist, kann mithilfe geometrischer Kriterien beurteilt werden. Zusätzlich zu den geometrischen Bedingungen ist eine Wasserströmung notwendig, um die Bodenpartikel in Bewegung zu setzen. Durch die Geschwindigkeit der Strömung wird eine Kraft auf das Einzelkorn ausgeübt, welche den Partikeltransport auslöst. Zur Beurteilung dieser Strömungskraft können hydraulische Kriterien herangezogen werden. In der vorliegenden Arbeit werden nur geometrische Kriterien vorgestellt, die hydraulischen Randbedingungen werden nicht näher thematisiert. Da eine entsprechende Geometrie die Grundvoraussetzung für den Materialtransport darstellt, liegt dieser Ansatz auf der sicheren Seite. [24]

Die für die Filterstabilität zweier Bodenschichten maßgebenden Prozesse sind jene der Kontakterosion und der Suffosion. [24] In Kapitel 3.2 werden Kriterien zur Sicherheit gegen Kontakterosion vorgestellt, welche als Filterregeln bekannt sind. [25] Ein Überblick über Suffosionsnachweise wird in Kapitel 3.3 gegeben.

3.2 Filterkriterien

3.2.1 Geometrische Betrachtungen unter Kugelannahme

Erste Empfehlungen zur Sicherstellung der Filterstabilität basieren auf rein geometrischen Überlegungen. Dazu wird der Boden als Kugelmodell betrachtet, wobei zur Vereinfachung je Schicht jeweils gleich große Kugeln angenommen werden. Um ein Hineinrieseln der feineren Schicht (Korndurchmesser d) in die gröbere (Korndurchmesser D) zu verhindern, müssen die Partikel der feineren Schicht größer sein als die Poren der gröberen Bodenschicht. Je nachdem wie dicht die Körner des gröberen Bodens gelagert sind, ergibt sich der minimale Porendurchmesser zu $d_{p,min} = 0,4142 D$ für die lockerste Lagerung (Abbildung 3.3 a) bzw. zu $d_{p,min} = 0,1547 D$ für die dichteste Lagerung (Abbildung 3.3 b). [23]

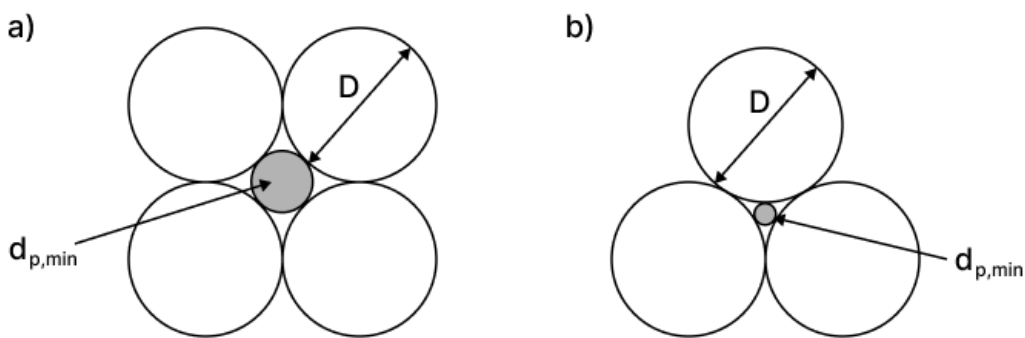


Abbildung 3.3: Kugelmodelle und minimale Porendurchmesser. Eigene Darstellung nach [23]

Damit die mechanische Filterfestigkeit erreicht werden kann, müssen die Partikel der feineren Bodenschicht (d) größer als $d_{p,min}$ sein. Somit lautet das Filterkriterium bei rein geometrischer Betrachtung nach Wittmann [23] wie folgt:

$$\frac{D}{d} \leq 2,41 = \frac{1}{d_{p,min}} \dots \text{lockerste Lagerung} \quad (3.1)$$

$$\frac{D}{d} \leq 6,46 = \frac{1}{d_{p,min}} \dots \text{dichteste Lagerung} \quad (3.2)$$

Für den in der Praxis relevanten Fall der mitteldichten Lagerung, darf nach Sichardt [29] der arithmetische Mittelwert der beiden Grenzfälle verwendet werden. Wird weiters angenommen, dass die Kornverteilung durch den Medianwert charakterisiert werden kann, ergibt sich das Filterkriterium zu:

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} \leq 4,44 \quad (3.3)$$

3.2.2 Terzaghi

Terzaghi und Peck untersuchten in [30] Materialien mit verschiedenen Korngrößen auf ihre Eignung als Umschüttung eines Brunnens. Geeignete Korngemische bezeichneten sie als „Filter“, welche zwei Bedingungen zu erfüllen haben: Sie sollen einerseits verhindern, dass feine Partikel des angrenzenden Bodens in die Poren des Filters gelangen, und andererseits das Einspülen des Filtermaterials in die Rohre des Brunnens verhindern. [30] Diese Forderungen können durch die beiden Kriterien

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \quad (\text{Mechanische Filterfestigkeit}) \quad (3.4)$$

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \quad (\text{Hydraulische Wirksamkeit}) \quad (3.5)$$

beschrieben werden, wobei die verwendeten Größen wie folgt definiert sind: [23]

D_{15} ... Korndurchmesser der gröberen Bodenschicht (Filter) bei 15 M.-% Siebdurchgang

d_{85} ... Korndurchmesser der feineren Bodenschicht (Basis) bei 85 M.-% Siebdurchgang

d_{15} ... Korndurchmesser der feineren Bodenschicht (Basis) bei 15 M.-% Siebdurchgang

Die Gleichungen basieren auf der Grundlage von Laborversuchen und sind bis heute international von Bedeutung. Auch die Begrifflichkeiten haben sich gehalten: Zur Beurteilung der Filterstabilität zweier benachbarter Bodenschichten wird nach wie vor oft der Ausdruck „Filter“ für den gröberen Boden und „Basis“ für die feinere, abzufilternde Bodenschicht verwendet. Die Korndurchmesser bei 15 bzw. 85 M.-% Siebdurchgang werden dabei auch in mehreren Quellen als $d_{15,B}$ bzw. $d_{85,B}$ für den Basiserdstoff und analog dazu mit dem Index F für das Filtermaterial bezeichnet. [28] Im Zuge dieser Diplomarbeit wird die in den obigen Formeln verwendete Schreibweise beibehalten: Der Korndurchmesser der gröberen Bodenschicht (Filter) wird mit dem Großbuchstaben D abgekürzt, jener der feineren Schicht (Basis) mit dem Kleinbuchstaben d .

Die mechanische Filterfestigkeit, d. h. die Stabilität gegenüber Erosion, wird durch Gleichung (3.4) gewährleistet. Gleichung (3.5) soll sicherstellen, dass der Filter hydraulisch wirksam bleibt und nicht durch die feinen Partikel des Basiserdstoffes verstopft. [23]

Bei der empirischen Ermittlung dieser Filterregeln wurden nur enggestufte Böden betrachtet, weshalb in mehreren Quellen empfohlen wird, die Anwendung auf Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl

$$C_U = d_{60}/d_{10} \leq 2 \quad (3.6)$$

zu beschränken. [23, 31] Spätere Untersuchungen haben die Gültigkeit auch für weitgestufte Bodenkombinationen bestätigt. [27]

3.2.3 Čiřtin/Ziems

Für weniger gleichförmige Böden wird das Filterkriterium nach Čiřtin/Ziems empfohlen, welches in [26] erstmals publiziert wurde. Damit können Böden mit einer Ungleichförmigkeit $C_U \leq 20$ untersucht werden. Abhängig von der Ungleichförmigkeitszahl der beiden Erdstoffe kann aus dem Diagramm in Abbildung 3.4 das maximal zulässige Abstandsverhältnis $A_{50,zul} = D_{50}/d_{50}$ abgelesen und mit dem vorhandenen Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$ verglichen werden. [24]

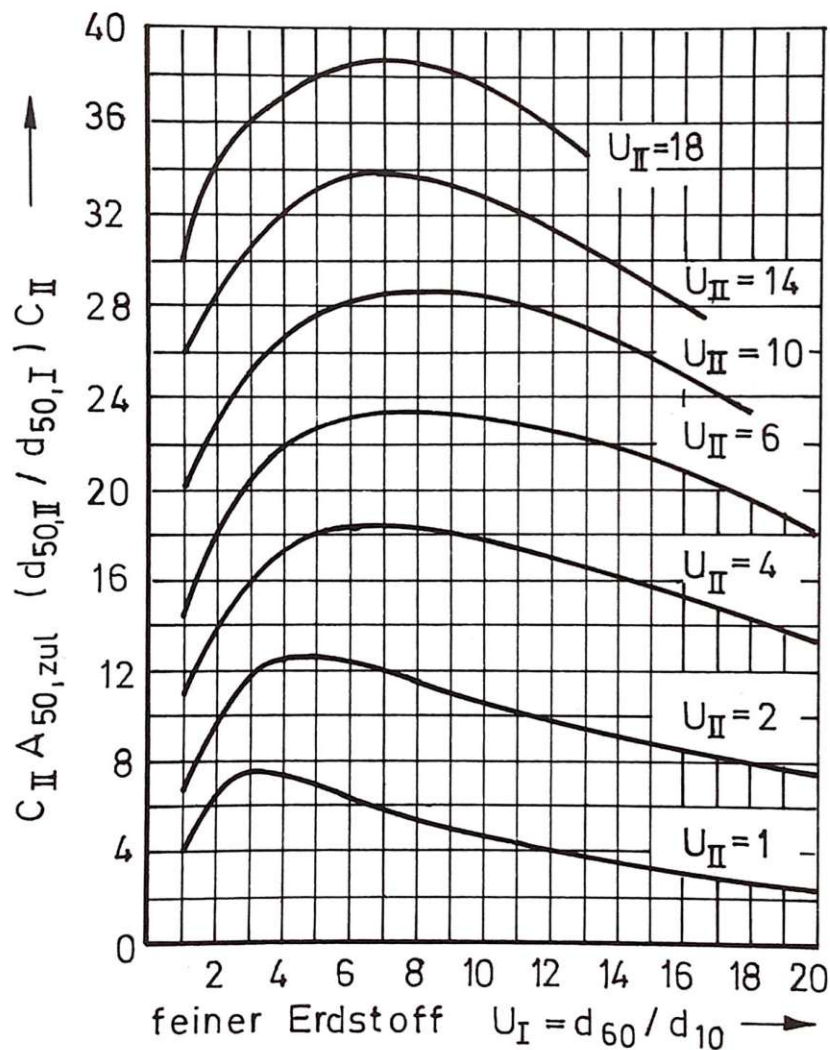


Abbildung 3.4: Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ nach Versuchen von Čiřtin und Ziems [25], nach [26].

Anders als bei den Filterregeln nach Terzaghi werden bei dem Verfahren nach Čiřtin/Ziems die Medianwerte zur Beurteilung der Filterstabilität herangezogen. Da diese physikalisch weniger aussagekräftig sind als die 15 bzw. 85 M.-% Fraktile, wird zusätzlich die Ungleichförmigkeit der beiden Böden berücksichtigt. [27]

3.2.4 Krümmungsverhältnis

Die Krümmungszahl C_c gibt den Verlauf der Sieblinie im Bereich zwischen 10 und 60 M.-% Siebdurchgang an. Sie ist definiert als

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} * d_{60}} \quad (3.7)$$

wobei d_{xx} der Korndurchmesser bei 10, 30 bzw. 60 M.-% Siebdurchgang ist. In Abbildung 3.5 wird dies veranschaulicht. Die Filterstabilität zweier Schichten ist abhängig von der Lage der beiden Kornverteilungskurven zueinander: Verlaufen die Sieblinien gleichförmig, ist eine ausreichende Filterstabilität gegeben. Daher kann der Quotient der Krümmungszahlen als Maß für die Filterstabilität herangezogen werden. [7]

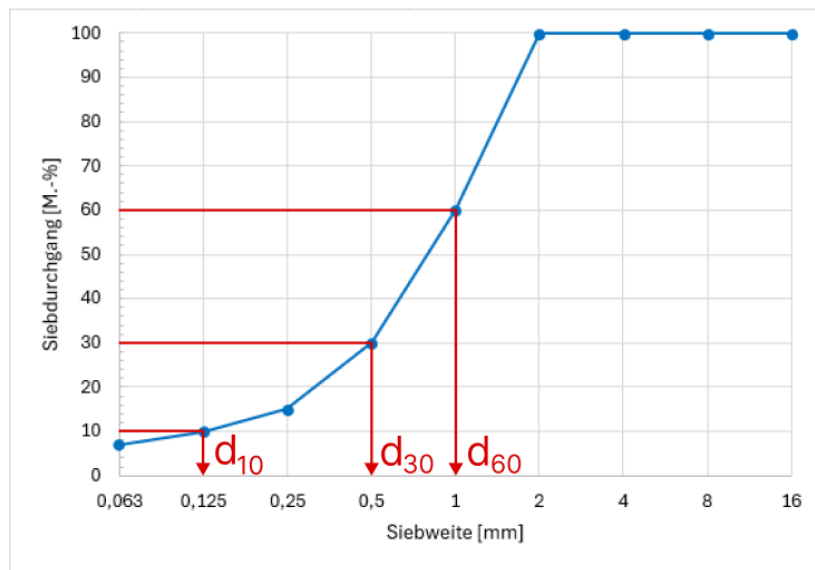


Abbildung 3.5: Ermittlung der Krümmungszahl. Eigene Darstellung nach [7]

3.3 Nachweise der Suffosionssicherheit

Die im Hinblick auf die Filterstabilität zweier Bodenschichten relevante Form der Suffosion ist die Kontaktsuffosion. [4] Dieser, durch Sickerströmung ausgelöste, Austrag feiner Partikel in die Poren des größeren Bodens kann nur stattfinden, wenn die obere Bodenschicht suffosiv ist. Das Problem der Kontaktsuffosion kann daher auf die innere Suffosionsstabilität des einzelnen Erdstoffes zurückgeführt werden. [24]

Ob ein Boden suffosiv ist, hängt von der Korngrößenverteilung ab. Als suffosionssicher gelten Böden mit einer Ungleichförmigkeit $C_u < 8$. Unter der Voraussetzung einer stetigen Körnungslinie, d. h. einer Körnungslinie ohne Ausfallkörnung und markante Krümmungsänderungen, gilt der vereinfachte Nachweis damit als erbracht. [24]

Bei weitgestuften Böden spielt der Feinteilgehalt eine entscheidende Rolle, da dadurch die Tragstruktur festgelegt wird. Böden mit einem Feinteilgehalt von mehr als 30 % bilden eine Feinteilmatrix, in welche die größeren Partikel ohne Kontakt eingelagert sind. Dadurch ist der gesamte Boden tragend und Suffosionsvorgänge werden verhindert. Bei Böden mit geringerem Anteil an feinen Partikeln bilden die groben Kornfraktionen eine Skelettstruktur. Die Feinteile sind lose in den Poren

des Grobskeletts eingelagert, wo sie potenziell weggespült werden können. Die Suffosionsgefährdung hängt dabei von der Struktur und dem Füllungsgrad der Grobporen ab. [27]

Vergleicht man den Suffosionsvorgang eines weitgestuften Bodens mit unvollständig gefüllten Grobporen mit dem Vorgang der Kontaktersion, lässt sich eine Analogie herstellen. Suffosion kann als Kontaktersion aufgefasst werden, bei der das Grobskelett dem Filter entspricht und die Basis durch die feinen Partikel repräsentiert wird. Während bei der Kontaktersion die feinere von der gröberen Bodenschicht räumlich getrennt ist, besteht diese Trennung bei der Suffosion nur durch die Ungleichförmigkeit des Bodens. [32]

3.3.1 Selbstfiltrationsindex

Zur Beurteilung der Suffosionsgefährdung kann die Kornverteilung des weitgestuften Bodens gedanklich in zwei Teile getrennt werden. Der Grenz-Fraktildurchmesser d_T teilt die Körnungslinie in einen feineren und einen gröberen Anteil, welche als Basis (grün strichlierte Linie in Abbildung 3.6) und Filter (rot strichlierte Linie in Abbildung 3.6) betrachtet werden können. Auf diese Basis-Filterkombination kann dann z. B. das Kriterium nach Terzaghi angewandt werden. Der Verhältniswert $d_{15,F}/d_{85,B}$ wird als Selbstfiltrationsindex I_{SF} bezeichnet (siehe Gleichung (3.8)). Zur einfacheren Handhabung kann der Selbstfiltrationsindex auch direkt aus der ursprünglichen Körnungslinie (schwarze Linie in Abbildung 3.6) abgelesen werden, nämlich als Verhältnis zweier Korndurchmesser mit einer Massendifferenz von 15% (z. B. d_{20}/d_5 , d_{30}/d_{15} usw.). Bis zu einem Wert von $I_{SF} \leq 6$ gilt der Boden als suffosionsstabil, wobei dabei nur der Bereich von d_0 bis d_{30} zu berücksichtigen ist. [32]

$$I_{SF} = \frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} = \frac{D_{15}}{d_{85}} = \frac{d_{M+15\%}}{d_M} \quad (3.8)$$

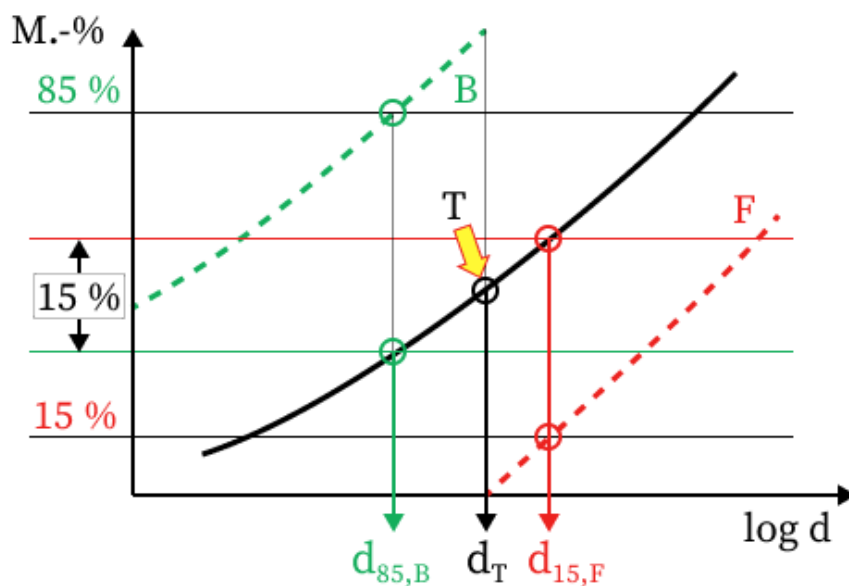


Abbildung 3.6: Definitionen zur Berechnung des Selbstfiltrationsindex. Eigene Darstellung nach [32]

3.3.2 Kenney und Lau

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Suffosionsgefährdung wurde von Kenney und Lau in [33] vorgestellt und die Grenzwerte in [34] angepasst. Dabei wird die Steigung der Kornverteilungskurve durch Vergleich der beiden Werte H und F betrachtet. Wie Abbildung 3.7 zu entnehmen, stellt F den

prozentualen Siebdurchgang bei einem Korndurchmesser von d dar, während die Variable H die Massendifferenz im Intervall von d bis $4d$ bezeichnet. Ein Boden gilt als suffosionsstabil, wenn die Steigung $H/F > 1$ ist, wobei nur der Bereich d_0 bis d_{20} zu überprüfen ist. [27]

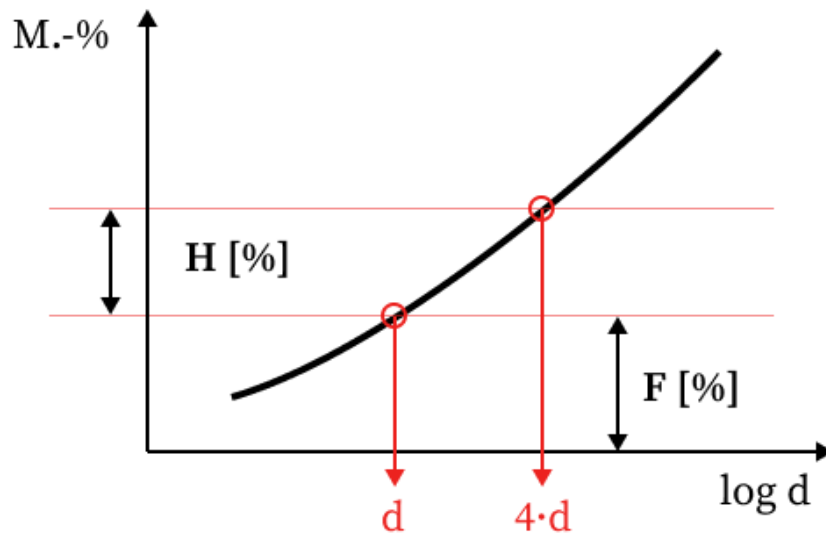


Abbildung 3.7: Suffosionskriterium nach Kenney und Lau. Eigene Darstellung nach [32]

4 Filterstabilität bei Pflasterungen

4.1 Probleme und Bedeutung

Da Pflasterbefestigungen eine gewisse Wasserdurchlässigkeit aufweisen sollen, muss das Oberflächenwasser durch die Fugen in die Bettung und weiter zu den Tragschichten abgeleitet werden können. Damit dies dauerhaft und ohne Schäden möglich ist, ist die Filterstabilität zwischen den einzelnen Schichten von großer Bedeutung. [10] Ist das Fugenmaterial nicht filterstabil zum Bettungsmaterial, hat dies mehrere Probleme zur Folge. Einerseits werden die Hohlräume der Bettung mit den feinen Partikeln des Fugenmaterials gefüllt, wodurch die Bettung verfestigt und verdichtet wird (siehe Abbildung 4.1). Dadurch kann eine Fehllagerung der Pflastersteine entstehen, da diese nicht mehr ausreichend in die Bettung eingebunden sind. [7] Zudem kann durch die reduzierte Wasserdurchlässigkeit eine Art Gleitschicht entstehen, welche horizontale Verschiebungen begünstigt. Andererseits werden durch eine unzureichende Filterstabilität die Fugen entleert, da das Füllungsmaterial in die Bettung abwandert. Eine unvollständige Fugenfüllung führt zum Verlust der Verbundwirkung und somit auch der entlastenden Kraft (vgl. Kapitel 2.3.2).



Abbildung 4.1: Verdichtete und verfestigte Bettung [7]

Ist die Filterstabilität zwischen Bettungsmaterial und oberer Tragschicht mangelhaft, äußert sich dies vor allem durch Setzungen. Durch das Eindringen der Bettung in die Poren der Tragschicht, verringert sich die Dicke der Bettung, was bei Belastung zu Setzungen führt. [22] Ebenso wird die Tragschicht wasserundurchlässig, wodurch die Pflasterbefestigung zu „schwimmen“ beginnt. [21]

Um diese Schäden zu verhindern, sind die Materialien aneinandergrenzender Schichten hinsichtlich der Filterstabilität aufeinander abzustimmen. [10] Zur Beurteilung werden die Korngrößenverteilungen der beiden betrachteten Schichten herangezogen. Grundsätzlich sind Materialien mit einander ähnelnden Kornverteilungen filterstabil zueinander, während jene mit einem großen Abstand der Kornverteilungskurven oft eine unzureichende Filterstabilität aufweisen. [1]

4.2 Nationale Festlegungen

In der RVS 08.18.01 [4] finden sich Empfehlungen zur Sicherstellung der Filterstabilität bei Pflasterungen. Diese werden eingeteilt in Kriterien für die Grenzfläche zwischen Fuge und Bettung sowie zwischen Bettung und Tragschicht.

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die in Österreich gültigen Empfehlungen und vergleicht diese mit den in Deutschland geltenden Kriterien, welche in den ZTV Pflaster-StB [35] geregelt sind.

Tabelle 4.1: Kriterien der Filterstabilität lt. RVS 08.18.01 [4] und ZTV Pflaster-StB [35]

		Österreich		Deutschland	
Sicherheit gegen ...		Fuge d – Bettung D	Bettung d – Tragschicht D	Fuge d – Bettung D	Bettung d – Tragschicht D
Erosion	$\frac{D_{15}}{d_{85}}$	≤ 2	≤ 5	≤ 4	≤ 5
Kontakterosion	$\frac{D_{50}}{d_{50}}$	≤ 5	≤ 25	≤ 5	≤ 25
Kontaktsuffosion	$\frac{D_{15}}{d_{15}}$	≥ 1 $\text{bis } \leq 10$	-	≥ 1	-

Die Variablen in Tabelle 4.1 sind definiert als Korndurchmesser bei 15, 50 bzw. 85 M.-% Siebdurchgang, wobei d jeweils die obere, feinere Schicht bezeichnet und D die untere, gröbere.

Die Gleichungen, welche die Sicherheit gegen Erosion gewährleisten sollen, entsprechen dem Kriterium der mechanischen Filterfestigkeit nach Terzaghi (siehe Gleichung (3.4)), jedoch mit angepassten Grenzwerten. Für die Kontaktfläche Bettung - Tragschicht ist das Kriterium in beiden Ländern ident: Das Verhältnis D_{15}/d_{85} darf den Grenzwert von 5 nicht überschreiten. Unterschiede gibt es bei dem Kriterium für die Grenze zwischen Fuge und Bettung: Dieses ist in Österreich mit einem Verhältnisswert ≤ 2 strenger als in Deutschland, wo der Grenzwert nach Terzaghi (≤ 4) verwendet wird.

Die Kriterien der Kontakterosion basieren auf dem Verfahren nach Čiřtin/Ziems, welches in Kapitel 3.2.3 vorgestellt wird. Tragschichten sind im Allgemeinen weitgestuft und haben somit eine hohe Ungleichförmigkeitszahl, weshalb der Grenzwert für die Kontaktfläche Bettung - Tragschicht (≤ 25) deutlich höher ist als für die Kontaktfläche Fuge - Bettung (≤ 5). [5] In Bezug auf diese Kriterien gibt es keine Abweichungen zwischen der österreichischen Richtlinie RVS 08.18.01 [4] und den in Deutschland gültigen ZTV Pflaster-StB [35].

Das Kriterium zur Sicherheit gegen Kontaktsuffosion für die Kontaktfläche Fuge - Bettung entspricht von der Form her der Filterregel der hydraulischen Wirksamkeit nach Terzaghi (siehe Gleichung (3.5)). Es kann daher auch als Durchlässigkeitsbedingung aufgefasst werden. [10] Für die Grenzfläche zwischen Fuge und Bettung gilt sowohl in Österreich als auch in Deutschland ein unterer Schwellenwert von 1. In der österreichischen Richtlinie RVS 08.18.01 ist das Verhältnis D_{15}/d_{15} zusätzlich mit einem Höchstwert von 10 begrenzt. Für den Nachweis zwischen Bettungsmaterial und oberer Tragschicht gibt es weder in der RVS 08.18.01 [4] noch in den ZTV Pflaster-StB [35] ein entsprechendes Kriterium. Um ein Eindringen der Bettung in die Tragschicht zu verhindern, wird in den

ZTV Pflaster-StB [35] für die ungebundene Tragschicht ein Material mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_U \geq 13$ angeraten.

Für die Grenzfläche zwischen oberer und unterer ungebundener Tragschicht gibt es weder in der RVS 08.15.01 [13] noch in den ZTV SoB-StB [36] eine Empfehlungen bzgl. der Filterstabilität.

4.3 Anwendung der Filterstabilitätsnachweise gemäß RVS 08.18.01

In diesem Kapitel werden verschiedene Kornverteilungen hinsichtlich ihrer Filterstabilität anhand der in Kapitel 4.2 vorgestellten Kriterien beurteilt. Die Grenzsieblinien für das Fugen- sowie das Bettungsmaterial sind der RVS 08.18.01 [4] entnommen, jene für die Tragschichten finden sich in der RVS 08.15.01 [13]. Für eine Korngruppe werden jeweils drei Sieblinien betrachtet: fein, mittel und grob. Die feine (rot) und die grobe (grün) entsprechen den Grenzsieblinien, die mittlere (blau) wird als arithmetisches Mittel der beiden Grenzsieblinien modelliert. Zur Veranschaulichung sind die untersuchten Sieblinien für das Fugenmaterial 0/2 in Abbildung 4.2 exemplarisch dargestellt, alle weiteren Sieblinien sind dem Anhang zu entnehmen.

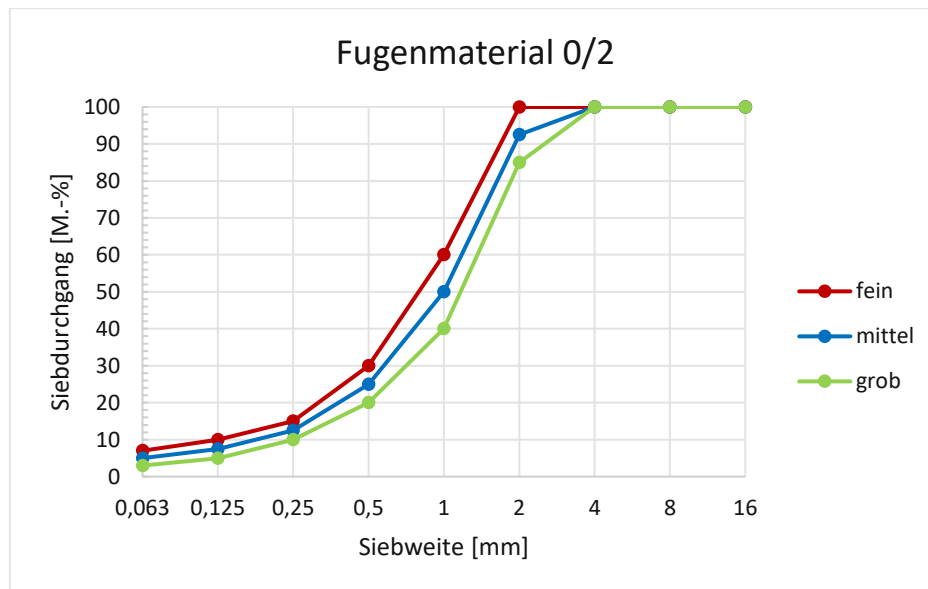


Abbildung 4.2: Sieblinie des Fugenmaterials 0/2. Eigene Darstellung nach [4]

4.3.1 Fuge – Bettung

Als Fugenmaterial werden für Pflasterungen in ungebundener Bauweise Gesteinskörnungen der Korngruppe 0/4 und 0/8 empfohlen, bzw. ist bei Verbundsteinen auch die Verwendung der Korngruppe 0/2 zulässig. Für das ungebundene Bettungsmaterial werden die Korngruppen 2/4 und 2/8 empfohlen. Die Korngruppe 4/8 darf gemäß RVS 08.18.01 [4] nur bei der gemischten Bauweise als Bettungsmaterial verwendet werden. Der Vollständigkeit halber werden in den Tabelle 4.2, 4.4 und 4.6 dennoch alle Kombinationen angeführt. Zusätzlich wird auch bei möglichen Kombinationen der Korngruppen 2/4, 2/8 und 4/8 die Einhaltung der Kriterien überprüft (siehe Tabelle 4.3, 4.5 und 4.7). Hierbei wird auf die Darstellung der Kombinationen mit 2/4 als Bettungsmaterial verzichtet, da lediglich die Kombination mit 2/4 als Fugenmaterial möglich wäre, welche als filterstabil gilt.

Werden die in Österreich gültigen Kriterien gemäß Tabelle 4.1 nicht eingehalten, ist dieser Wert in den folgenden Tabellen rot hinterlegt. Gelb markiert sind jene Kombinationen, die die Anforderungen

gerade noch erfüllen. Die in der RVS 08.18.01 [4] empfohlenen Kombinationen sind durch die grüne Einrahmung gekennzeichnet.

Beim Vergleich der Tabellen wird deutlich, dass vor allem die Kombination von sehr feinem Fugenmaterial mit grobem Bettungsmaterial problematisch ist. Bei der Kombination von 0/2 als Fugenmaterial und 4/8 als Bettungsmaterial können alle drei Kriterien kaum erfüllt werden. Dies ist darin begründet, dass das feine Fugenmaterial in die Poren des deutlich größeren Bettungsmaterials eindringen kann und es zu einer mechanischen Durchmischung der beiden Schichten kommt. Auch bei der Korngruppe 0/4 fein und 0/8 fein ist in der Kombination mit dem Bettungsmaterial 4/8 keine ausreichende Sicherheit gegen Kontaktsuffosion gegeben. Kritisch ist zudem die Kombination von 0/2 als Fugenmaterial und 2/8 als Bettungsmaterial: Die feine und mittlere Sieblinie der Korngruppe 0/2 kann in Verbindung mit der groben Sieblinie des Materials 2/8 das Kriterium der Kontaktersion und der Kontaktsuffosion nicht bzw. nur knapp erfüllen.

Die gemäß RVS 08.18.01 [4] empfohlenen Kombinationen erfüllen alle drei Filterkriterien problemlos. Lediglich beim Kriterium der Kontaktsuffosion liegen vier Kombinationen an der Grenze der zulässigen Anforderungen (siehe Tabelle 4.6). Einerseits unterschreitet die feine Sieblinie der Korngruppe 0/2 in Kombination mit dem Bettungsmaterial 2/4 den oberen Grenzwert nur knapp. Der obere Grenzwert soll sicherstellen, dass die Wasserdurchlässigkeit des Bettungsmaterials in Kombination mit dem Fugenmaterial nicht zu hoch ist. Dementsprechend ist dieses Kriterium vor allem bei der Kombination aus feinem Fugenmaterial und grobem Bettungsmaterial problematisch, wie Tabelle 4.6 deutlich macht. Andererseits wird der Mindestwert bei zwei Kombinationen nur geringfügig überschritten: Jeweils die grobe Sieblinie des Fugenmaterials 0/4 bzw. 0/8 in Kombination mit der feinen Sieblinie der Korngruppe 2/8 als Bettungsmaterial. Der untere Grenzwert soll gewährleisten, dass die Bettung ausreichend durchlässig ist und das Wasser ungehindert abfließen kann, ohne einen Rückstau im Fugenmaterial zu erzeugen. Folglich wird dieser Schwellenwert immer dann unterschritten, wenn das Fugenmaterial gröber als das Bettungsmaterial ist. Dies zeigt sich insbesondere bei den zusätzlich untersuchten Kombinationen in Tabelle 4.7, bei welchen nur drei der aufgeführten Kombinationen als unproblematisch einzustufen sind.

Tabelle 4.2: Kriterium der Erosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 0/2, 0/4 und 0/8

EROSION: $D_{15} \text{ (Bettung)} / d_{85} \text{ (Fuge)} \leq 2$										
Bettungs- material		Fugenmaterial								
		0/2			0/4			0/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
2/4	fein	1,30	1,13	1,00	0,60	0,55	0,50	0,35	0,29	0,25
	mittel	1,38	1,20	1,06	0,64	0,58	0,53	0,38	0,31	0,27
	grob	1,47	1,28	1,13	0,68	0,62	0,57	0,40	0,33	0,28
2/8	fein	1,03	0,90	0,79	0,48	0,44	0,40	0,28	0,23	0,20
	mittel	1,42	1,23	1,09	0,66	0,60	0,55	0,39	0,32	0,27
	grob	1,78	1,55	1,37	0,83	0,75	0,69	0,48	0,40	0,34
4/8	fein	2,59	2,26	2,00	1,21	1,10	1,00	0,71	0,59	0,50
	mittel	2,76	2,40	2,13	1,28	1,17	1,06	0,75	0,62	0,53
	grob	2,93	2,55	2,26	1,37	1,24	1,13	0,80	0,66	0,57

Tabelle 4.3: Kriterium der Erosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 2/4, 2/8 und 4/8

EROSION: $D_{15} \text{ (Bettung)} / d_{85} \text{ (Fuge)} \leq 2$										
Bettungs- material		Fugenmaterial								
		2/4			2/8			4/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
2/8	fein	0,45	0,42	0,40	0,27	0,22	0,20			
	mittel	0,62	0,58	0,55	0,37	0,31	0,27			
	grob	0,77	0,73	0,69	0,47	0,39	0,34			
4/8	fein	1,13	1,06	1,00	0,68	0,56	0,50	0,57	0,53	0,50
	mittel	1,20	1,13	1,06	0,72	0,60	0,53	0,60	0,57	0,53
	grob	1,28	1,20	1,13	0,77	0,64	0,57	0,64	0,60	0,57

Tabelle 4.4: Kriterium der Kontakterosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 0/2, 0/4 und 0/8

KONTAKTEROSION: $D_{50} \text{ (Bettung)} / d_{50} \text{ (Fuge)} \leq 5$										
Bettungs- material		Fugenmaterial								
		0/2			0/4			0/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
2/4	fein	3,35	2,66	2,28	1,25	1,14	1,03	1,33	0,94	0,67
	mittel	3,56	2,83	2,42	1,33	1,21	1,10	1,41	1,00	0,71
	grob	3,79	3,01	2,58	1,41	1,28	1,17	1,50	1,06	0,75
2/8	fein	3,96	3,14	2,69	1,48	1,34	1,22	1,57	1,11	0,79
	mittel	5,08	4,03	3,46	1,89	1,72	1,57	2,02	1,43	1,01
	grob	6,32	5,02	4,30	2,36	2,14	1,95	2,51	1,77	1,25
4/8	fein	6,70	5,32	4,56	2,50	2,27	2,07	2,66	1,88	1,33
	mittel	7,13	5,66	4,85	2,66	2,42	2,20	2,83	2,00	1,41
	grob	7,58	6,01	5,16	2,82	2,57	2,34	3,01	2,13	1,50

Tabelle 4.5: Kriterium der Kontakterosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 2/4, 2/8 und 4/8

KONTAKTEROSION: $D_{50} \text{ (Bettung)} / d_{50} \text{ (Fuge)} \leq 5$										
Bettungs- material		Fugenmaterial								
		2/4			2/8			4/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
2/8	fein	1,18	1,11	1,05	1,00	0,78	0,63			
	mittel	1,52	1,43	1,34	1,28	1,00	0,80			
	grob	1,89	1,77	1,67	1,60	1,24	1,00			
4/8	fein	2,00	1,88	1,77	1,69	1,32	1,06	1,00	0,94	0,88
	mittel	2,13	2,00	1,88	1,80	1,40	1,13	1,06	1,00	0,94
	grob	2,26	2,13	2,00	1,91	1,49	1,20	1,13	1,06	1,00

Tabelle 4.6: Kriterium der Kontaktsuffosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 0/2, 0/4 und 0/8

KONTAKTSUFFOSION: D_{15} (Bettung) / d_{15} (Fuge) ≥ 1 bis ≤ 10										
Bettungs- material		Fugenmaterial								
		0/2			0/4			0/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
2/4	fein	8,00	8,83	5,66	6,17	4,00	2,83	6,17	4,00	2,83
	mittel	8,50	9,39	6,01	6,56	4,25	3,01	6,56	4,25	3,01
	grob	9,04	9,98	6,39	6,97	4,52	3,20	6,97	4,52	3,20
2/8	fein	6,35	7,01	4,49	4,90	3,17	2,24	4,90	3,17	2,24
	mittel	8,73	9,64	6,18	6,73	4,37	3,09	6,73	4,37	3,09
	grob	10,96	12,10	7,75	8,45	5,48	3,88	8,45	5,48	3,88
4/8	fein	16,00	17,67	11,31	12,34	8,00	5,66	12,34	8,00	5,66
	mittel	17,01	18,78	12,03	13,12	8,50	6,01	13,12	8,50	6,01
	grob	18,08	19,96	12,79	13,94	9,04	6,39	13,94	9,04	6,39

Tabelle 4.7: Kriterium der Kontaktsuffosion – Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 2/4, 2/8 und 4/8

KONTAKTSUFFOSION: D_{15} (Bettung) / d_{15} (Fuge) ≥ 1 bis ≤ 10										
Bettungs- material		Fugenmaterial								
		2/4			2/8			4/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
2/8	fein	0,79	0,75	0,70	1,00	0,73	0,58			
	mittel	1,09	1,03	0,97	1,38	1,00	0,80			
	grob	1,37	1,29	1,21	1,73	1,26	1,00			
4/8	fein	2,00	1,88	1,77	2,52	1,83	1,46	1,00	0,94	0,88
	mittel	2,13	2,00	1,88	2,68	1,95	1,55	1,06	1,00	0,94
	grob	2,26	2,13	2,00	2,85	2,07	1,65	1,13	1,06	1,00

4.3.2 Bettung – Obere Tragschicht

Auch die unterschiedlichen Kombinationen zwischen Bettung und oberer Tragschicht wurden anhand der Kriterien in Tabelle 4.1 auf deren Filterstabilität untersucht. Beide Kriterien sind für alle Kombinationen klar erfüllt, die Ergebnisse liegen deutlich unter den Grenzwerten. Dies lässt sich auf zwei wesentliche Gründe zurückführen: Zum einen sind die Kriterien wenig restriktiv. Im Vergleich zu den Anforderungen für die Kontaktfläche Fuge – Bettung sind die Grenzwerte für die Kombinationen von Bettung und oberer Tragschicht deutlich breiter gefasst (siehe Tabelle 4.1). Zum anderen sind die Materialien der Tragschichten weitgestuft und weisen somit – trotz größerem Größtkorn – eine nennenswerte Menge an feinen Kornklassen auf [5]. Dadurch kann ein Eindringen der Bettung in die Tragschicht weitgehend verhindert werden.

Obwohl alle Grenzwerte deutlich unterschritten werden, lassen sich doch Unterschiede feststellen. Um diese erkennbar zu machen, wurden die Werte in Tabelle 4.8 und 4.9 mit einer Farbskala hinterlegt: Grün kennzeichnet sehr niedrige Werte, während gelb jene Kombinationen markiert, welche näher an den Grenzwerten liegen. Je blasser die Einfärbung ist, desto näher liegt der Wert am Mittelwert der jeweiligen Tabelle. Dadurch zeigt sich Folgendes: Insbesondere die feinen

Grenzsieblinien der Tragschicht zeigen eine gute Filterstabilität, wobei diese mit zunehmendem Größtkorn abnimmt (vgl. 0/22 fein mit 0/63 fein). Umgekehrt liegen die Kombinationen mit den groben Grenzsieblinien der Tragschicht näher an den Maximalwerten, vor allem jene mit großem Größtkorn (siehe 0/63 grob). Wobei anzumerken ist, dass auch die höchsten Werte deutlich unter den zulässigen Grenzwerten liegen.

Tabelle 4.8: Kriterium der Erosion - Bettung/Tragschicht

EROSION: $D_{15} \text{ (Tragschicht)} / d_{85} \text{ (Bettung)} \leq 5$										
Tragschicht		Bettungsmaterial								
		2/4			2/8			4/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0/22	fein	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02
	mittel	0,12	0,12	0,11	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05
	grob	0,34	0,32	0,30	0,21	0,17	0,15	0,17	0,16	0,15
0/32	fein	0,07	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
	mittel	0,16	0,15	0,14	0,10	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07
	grob	0,50	0,47	0,45	0,30	0,25	0,22	0,25	0,24	0,22
0/45	fein	0,09	0,09	0,08	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
	mittel	0,24	0,23	0,21	0,15	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11
	grob	0,69	0,65	0,61	0,41	0,34	0,30	0,34	0,32	0,30
0/63	fein	0,12	0,11	0,11	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05
	mittel	0,30	0,28	0,27	0,18	0,15	0,13	0,15	0,14	0,13
	grob	0,90	0,84	0,79	0,54	0,45	0,40	0,45	0,42	0,40

Tabelle 4.9: Kriterium der Kontakterosion - Bettung/Tragschicht

KONTAKTEROSION: $D_{50} \text{ (Tragschicht)} / d_{50} \text{ (Bettung)} \leq 25$										
Tragschicht		Bettungsmaterial								
		2/4			2/8			4/8		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0/22	fein	1,06	1,00	0,94	0,90	0,70	0,56	0,53	0,50	0,47
	mittel	1,91	1,79	1,69	1,61	1,26	1,01	0,95	0,90	0,84
	grob	3,20	3,01	2,83	2,71	2,11	1,70	1,60	1,50	1,41
0/32	fein	1,57	1,48	1,39	1,33	1,04	0,83	0,79	0,74	0,70
	mittel	2,80	2,63	2,48	2,37	1,85	1,48	1,40	1,32	1,24
	grob	4,47	4,20	3,95	3,78	2,95	2,37	2,23	2,10	1,98
0/45	fein	2,30	2,17	2,04	1,95	1,52	1,22	1,15	1,08	1,02
	mittel	4,04	3,80	3,57	3,42	2,66	2,14	2,02	1,90	1,79
	grob	6,39	6,01	5,66	5,41	4,22	3,39	3,20	3,01	2,83
0/63	fein	3,31	3,11	2,93	2,80	2,18	1,76	1,66	1,56	1,46
	mittel	5,73	5,39	5,07	4,85	3,78	3,04	2,87	2,70	2,54
	grob	8,96	8,43	7,93	7,58	5,91	4,75	4,48	4,21	3,96

4.3.3 Obere Tragschicht – Untere Tragschicht

Der Vollständigkeit halber wurde auch die Filterstabilität zwischen oberer und unterer Tragschicht überprüft. Die Ergebnisse möglicher Kombinationen der beiden Materialien sind in Tabelle 4.10 und 4.11 angeführt. Kombinationen, bei welchen die untere Tragschicht ein kleineres Größtkorn als die obere Tragschicht aufweist, werden in der Praxis nicht angewandt und daher in den Tabellen nicht aufgelistet.

Da es in der Literatur für die Kontaktfläche zwischen den beiden Tragschichten keine expliziten Kriterien gibt, wurden die Grenzwerte für die Filterstabilität zwischen Bettung und Tragschicht verwendet. Alle Kombinationen bleiben deutlich unter den Grenzwerten und können daher als filterstabil betrachtet werden. Um trotzdem Unterschiede sichtbar zu machen, wurden die Tabellen wie in Kapitel 4.3.2 eingefärbt: Grün markiert besonders niedrige Werte, wohingegen die höheren Werte gelb hinterlegt erscheinen. Die Ergebnisse ähneln jenen der Kontaktfläche Bettung – Tragschicht stark: Auch für die Grenzschicht zwischen den beiden Tragschichten erreichen jeweils die feinen Grenzsieblinien der unteren Schicht besonders niedrige Werte. Über dem Durchschnitt liegende Werte zeigen sich vor allem bei einer groben unteren Tragschicht (z. B. 0/63 grob) in Kombination mit einer feinen oberen Tragschicht (z. B. 0/22 fein). Es sei nochmals betont, dass selbst die Maximalwerte die geforderten Höchstgrenzen deutlich unterschreiten und somit alle Kombinationen als filterstabil gelten.

Tabelle 4.10: Kriterium der Erosion - Obere/Untere Tragschicht

EROSION: D_{15} (Untere Tragschicht) / d_{85} (Obere Tragschicht) ≤ 5													
Untere Tragschicht		Obere Tragschicht											
		0/22			0/32			0/45			0/63		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0/22	fein	0,02	0,01	0,01									
	mittel	0,04	0,03	0,02									
	grob	0,11	0,08	0,05									
0/32	fein	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01						
	mittel	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02						
	grob	0,16	0,11	0,08	0,10	0,08	0,06						
0/45	fein	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
	mittel	0,08	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02			
	grob	0,22	0,15	0,11	0,14	0,10	0,08	0,10	0,07	0,05			
0/63	fein	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	mittel	0,10	0,07	0,05	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
	grob	0,28	0,20	0,14	0,19	0,13	0,10	0,13	0,09	0,07	0,09	0,06	0,05

Tabelle 4.11: Kriterium der Kontakterosion – Obere/Untere Tragschicht

KONTAKTEROSION: D_{50} (Untere Tragschicht) / d_{50} (Obere Tragschicht) ≤ 25													
Untere Tragschicht		Obere Tragschicht											
		0/22			0/32			0/45			0/63		
		fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0/22	fein	1,00	0,56	0,33									
	mittel	1,79	1,00	0,60									
	grob	3,01	1,68	1,00									
0/32	fein	1,48	0,83	0,49	1,00	0,56	0,35						
	mittel	2,63	1,47	0,88	1,78	1,00	0,63						
	grob	4,20	2,34	1,40	2,84	1,60	1,00						
0/45	fein	2,17	1,21	0,72	1,46	0,82	0,52	1,00	0,57	0,36			
	mittel	3,80	2,12	1,26	2,56	1,44	0,90	1,75	1,00	0,63			
	grob	6,01	3,35	2,00	4,06	2,28	1,43	2,78	1,58	1,00			
0/63	fein	3,11	1,74	1,04	2,10	1,18	0,74	1,44	0,82	0,52	1,00	0,58	0,37
	mittel	5,39	3,01	1,79	3,64	2,05	1,28	2,49	1,42	0,90	1,73	1,00	0,64

4.4 Untersuchungen zur Filterstabilität bei Pflasterungen

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Filterkriterien stammen aus der Bodenmechanik und berücksichtigen lediglich den Einfluss einer Sickerströmung. Da auf Verkehrsflächen zusätzlich dynamische Lasten wirken, sind experimentelle Untersuchungen der Filterstabilität bei Pflasterbefestigungen erforderlich. [6]

Um die in den Normen vorgeschlagenen Kriterien zu überprüfen, wurden bereits 2006 in Deutschland Versuche durchgeführt. Krass und Görener [5] analysierten im Labor verschiedene Bettungs- und Fugenmaterialien auf ihre Filterstabilität zueinander. Dabei wurde in den Voruntersuchungen zunächst ein Aluminiumblock mit eingefrästen Fugen verwendet, welcher die Pflastersteine imitieren soll. Dieser wurde auf das in einen Edelstahlrahmen eingebaute Bettungsmaterial aufgesetzt und anschließend das Fugenmaterial eingefüllt. Die Versuchsanordnung wurde verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt: Einer reinen Strömungsbeanspruchung, einer dynamischen Beanspruchung mithilfe eines Rütteltisches sowie einer Kombination der beiden. In den Hauptuntersuchungen wurden die Auswirkungen der Beanspruchungen auf eine tatsächliche Pflasterdecke untersucht. Dafür wurde ein Plexiglasrahmen auf die Bettung aufgebracht, in welchem Betonpflastersteine verlegt wurden. Die gesamte Apparatur wurde wieder mit einem Rütteltisch dynamisch beansprucht und dabei optional bewässert. Im zweiten Teil der Hauptuntersuchungen wurde ein Straßenoberbau mit einer Pflasterdeckschicht in die Straßenprüfmaschine der Ruhr-Universität Bochum (RUB-StraP) eingebaut. Diese Prüfmaschine ermöglicht es, dass eine vollständige Straßenoberbaukonstruktion in Originalgröße geprüft werden kann. Durch das zahlreiche Überrollen eines belasteten Rades mit gleichzeitiger Beregnung des Prüffeldes wird eine praxisnahe Simulation der Straßenbeanspruchung erreicht. Die Untersuchungen zeigten, dass die Kombination aus dynamischer Belastung und Wasserströmung die maßgebende Beanspruchung für die Filterstabilität darstellt. Neben einer gravimetrischen wurde auch eine photooptische Analyse durchgeführt, welche jedoch lediglich zeigte, dass sich die Kornform des Fugenmaterials während der Versuchsdurchführung nicht veränderte. Zur Analyse der Filterstabilität ist daher die Bestimmung der Sieblinien am

aussagekräftigsten. Hinsichtlich der Filterkriterien konnten durch die Untersuchungen Vorschläge zu deren Verbesserung gemacht werden, welche in den ZTV Pflaster-StB [35] aufgenommen wurden. [5]

Ein weiterer Versuchsaufbau wurde von Mladenov [6] entwickelt: Dabei wurde das Bettungs- und Fugenmaterial in einen Plexiglaszylinder eingebaut, in welchem es dynamisch belastet und gleichzeitig bewässert wurde. Dadurch entsteht eine größere Kontaktfläche zwischen den beiden Materialien, welche zu deutlicheren Ergebnissen führt. Dieser Versuchsaufbau wurde auch im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit angewandt und wird daher in Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

4.5 Krümmungskriterium

Zusätzlich zu den Filterkriterien gemäß RVS 08.18.01 [4] gibt es ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Filterstabilität zwischen Bettungs- und Fugenmaterial. Dafür wird die Krümmungszahl C_c (siehe Kapitel 3.2.4) herangezogen, um den Verlauf der Sieblinien zu vergleichen. Mithilfe des Quotienten aus der Krümmungszahl des Bettungsmaterials vor ($C_{0,BM}$) und nach ($C_{1,BM}$) dem Versuch, kann die Veränderung der Sieblinie quantifiziert werden. Entsprechend der Definition deutet ein Verhältniswert $C_{0,BM}/C_{1,BM} \approx 1$ auf eine filterstabile Kombination hin. Um die Veränderung der Sieblinie des Bettungsmaterials in Beziehung zu dem verwendeten Fugenmaterial zu bringen, wird auch der Quotient aus der Krümmungszahl des Bettungsmaterials $C_{0,BM}$ und des Fugenmaterials $C_{0,FM}$ gebildet. Beide Verhältniswerte werden anschließend in einem Punktdiagramm dargestellt, siehe Abbildung 4.3.

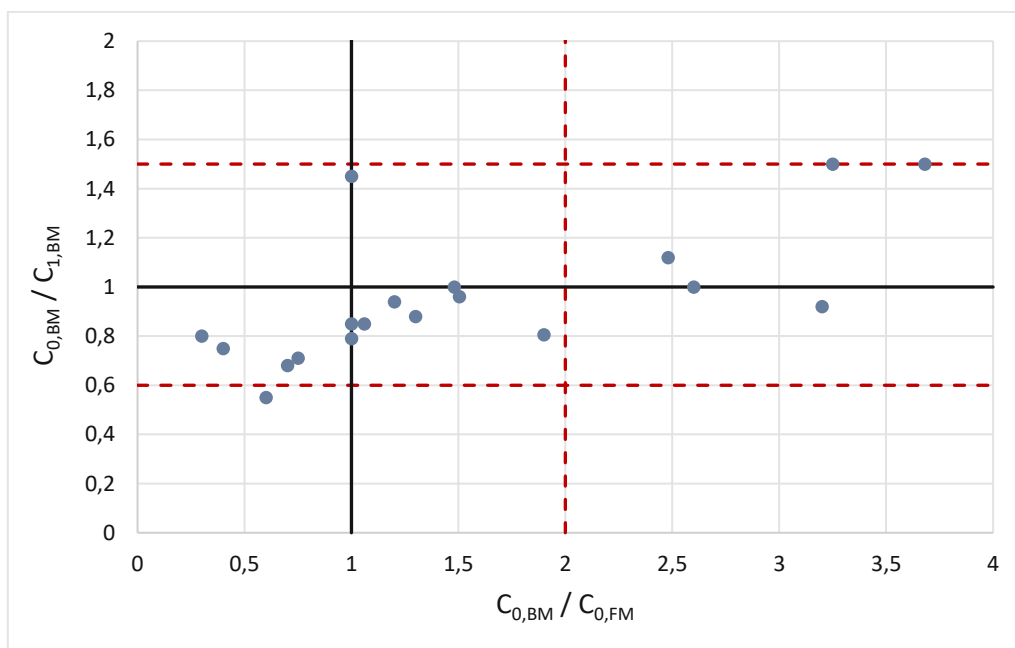


Abbildung 4.3: Krümmungsverhältnisse verschiedener Kombinationen für Bettungs- und Fugenmaterial.
Eigene Darstellung nach [7]

Ausgehend von Filterstabilitätsversuchen mit dem von Mladenov [6] entwickelten Versuchsaufbau, konnten in dem Projektbericht von Hofko und Gruber [7] neue Grenzwerte für die Krümmungsverhältnisse festgelegt werden. Demnach sind folgende Werte einzuhalten:

$$C_{0,BM}/C_{0,FM} \leq 2 \quad (4.1)$$

$$C_{0,BM}/C_{1,BM} \geq 0,6 \text{ und } \leq 1,5 \quad (4.2)$$

Hinsichtlich der Quotienten der Krümmungszahlen gelten laut Hofko und Gruber [7] außerdem folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} C_{0,BM}/C_{0,FM} &> 1 \rightarrow \text{Fugenmaterial feiner als Bettungsmaterial} \\ &< 1 \rightarrow \text{Fugenmaterial gröber als Bettungsmaterial} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} C_{0,BM}/C_{1,BM} &> 1 \rightarrow \text{Bettungsmaterial nach dem Versuch feiner} \\ &< 1 \rightarrow \text{Bettungsmaterial nach dem Versuch gröber} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Diese Zusammenhänge erwiesen sich bei genauerer Betrachtung jedoch als fehlerhaft, weshalb sie in Kapitel 6.3.1 analysiert werden.

5 Versuchskonzept

5.1 Zielsetzung und Versuchsaufbau

Im Zuge der Diplomarbeit von Mladenov [6] wurde ein labortechnisches Verfahren entwickelt, welches die Bestimmung der Filterstabilität zwischen Gesteinskörnungsgemischen ermöglicht. Dabei wurde neben der Genauigkeit der Ergebnisse auch auf die Einfachheit des Versuchsaufbaus geachtet, sodass die Versuche in jedem Labor mit geringem Kostenaufwand umgesetzt werden können. Da sich die in der RVS 08.18.01 [4] empfohlenen Sieblinien seit den letzten Versuchen verändert haben, ist es notwendig, diese Versuche erneut durchzuführen.

Um die realen Bedingungen bestmöglich simulieren zu können, wird als Versuchsgerät eine herkömmliche Nasssiebanlage eingesetzt. Diese ermöglicht die Kombination aus dynamischer Belastung und gleichzeitiger Wasserdurchströmung der Probe. Für den Versuch wird zuerst ein Sieb mit ausreichender Stabilität auf den Siebboden aufgesetzt, um eine horizontale Aufstandsfläche zu schaffen. Darauf wird eine Lochplatte ($\varnothing_{\text{Löcher}} = 5 \text{ mm}$) mit Stützbeinen sowie ein Plexiglasrohr ($\varnothing_{\text{Außen}} = 20 \text{ cm}$, $\varnothing_{\text{Innen}} = 19 \text{ cm}$) platziert. Die Lochplatte wird mit Geotextilen beschichtet, sodass ein Abfließen der Gesteinskörnung verhindert wird. In das Plexiglasrohr wird das Bettungsmaterial eingefüllt, geebnet und kurz verdichtet (1 Minute bei einer Amplitude von 1,5 mm). Um die Schichtgrenze optisch zu kennzeichnen, werden ein paar Körner des Bettungsmaterials eingefärbt und nach dem Verdichten darauf verteilt. Im Anschluss wird das Fugenmaterial eingefüllt. Dieses wird nicht verdichtet, sondern nur mit der zweiten Lochplatte geebnet und angedrückt. In Abbildung 5.1 sind die verwendeten Materialien sowie die Versuchsapparatur während der Versuchsdurchführung dargestellt.



Abbildung 5.1: links: verwendete Materialien – rechts: Versuchsapparatur während der Versuchsdurchführung

5.2 Versuchsbedingungen

Die optimalen Versuchsbedingungen wurden anhand mehrerer Vorversuche von Mladenov [6] festgelegt. Dabei ergab sich sowohl für die Bettung als auch für die Fuge eine Schichtdicke von 5 cm.

In der Praxis ist der Anteil an Fugenmaterial deutlich geringer, da das Material nur in den Fugen verteilt wird und – abhängig von der Plattendicke – auch eine kleinere Dicke aufweist. Durch die Schichtdicke von 5 cm wird sichergestellt, dass ausreichend Material vorhanden ist, welches in die Hohlräume der Bettung eindringen kann.

Um möglichst kritische Bedingungen zu erreichen, hat sich die Kombination aus dynamischer Belastung und Strömungsbeanspruchung bewiesen. Der Wasserstand soll während der gesamten Versuchsdauer konstant auf einer Höhe von 10 cm über dem Fugenmaterial gehalten werden. Um dies zu erzielen, wird vor dem Versuchstart manuell die entsprechende Wassermenge eingebracht. Sobald eine Wassersäule von 10 cm erreicht ist, wird der Versuch gestartet und die Wasserzufuhr mithilfe der Düse im Siebdeckel soweit möglich konstant gehalten. Durch die Wassersäule wirkt eine Auflast auf das Bettungs- und Fugenmaterial, welche dazu beiträgt, dass die Probe unter der verwendeten Amplitude stabil bleibt.

Welche Amplitude die besten Ergebnisse liefert, lässt sich anhand der Vorversuche nicht eindeutig beantworten. Je nachdem, welches Material untersucht wird, variiert die optimale Auslenkung der Rüttelbewegung. Einerseits soll die gewählte Amplitude eine ausreichende Bewegung der Probe verursachen, andererseits sollen die Schichten stabil bleiben, sodass diese beim Ausbau wieder voneinander getrennt werden können. In den meisten Fällen hat sich eine Amplitude von 1,5 mm (50%) als zweckmäßig erwiesen, weshalb diese empfohlen wird.

Die Versuchsdauer sollte so gewählt werden, dass die Bewegung der Partikel abgeschlossen ist. Abhängig von der Korngrößenverteilung des Materials und dem Wasserdurchfluss variiert die erforderliche Dauer. In den Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die Materialbewegung nach 30 Minuten abgeschlossen und der Versuch daher nach dieser Zeit beendet werden kann.

Die Verwendung der Geotextile wurde im Laufe der Versuche angepasst. Bei den Kombinationen, bei denen 0/4 als Fugenmaterial und 2/4 als Bettungsmaterial verwendet wurde, konnte der Wasserstand trotz maximaler Wasserzufuhr nicht gehalten werden. Daher wurden für die weiteren Versuche zwei zusätzliche Schichten des Geotextils eingelegt. In Abbildung 5.2 ist dargestellt, wo die verschiedenen Geotextile eingebaut wurden. Direkt über der Lochplatte mit den Stützbeinen wurde ein 0,9 mm dünner Filtervliesstoff (rot in Abbildung 5.2) eingebaut. Dieser wurde so zugeschnitten, dass er seitlich etwa 1 cm nach oben übersteht. Darauf wurde das 1,9 mm dicke Geotextil verlegt: Bei den Versuchen mit 0/2 als Fugenmaterial und 2/4 als Bettungsmaterial lediglich eine Schicht (hellblau in Abbildung 5.2), bei allen anderen Kombinationen wurden zwei zusätzliche Schichten (dunkelblau in Abbildung 5.2) eingebaut. Eine weitere Schicht des dünnen Vliesstoffes (grün in Abbildung 5.2) wurde nach dem Einbau der Probe oben auf das Fugenmaterial gelegt. Diese hat sich als zweckmäßig erwiesen, um eine gleichmäßige Beregnung der Probe zu ermöglichen, insbesondere bei niedrigem Wasserstand.

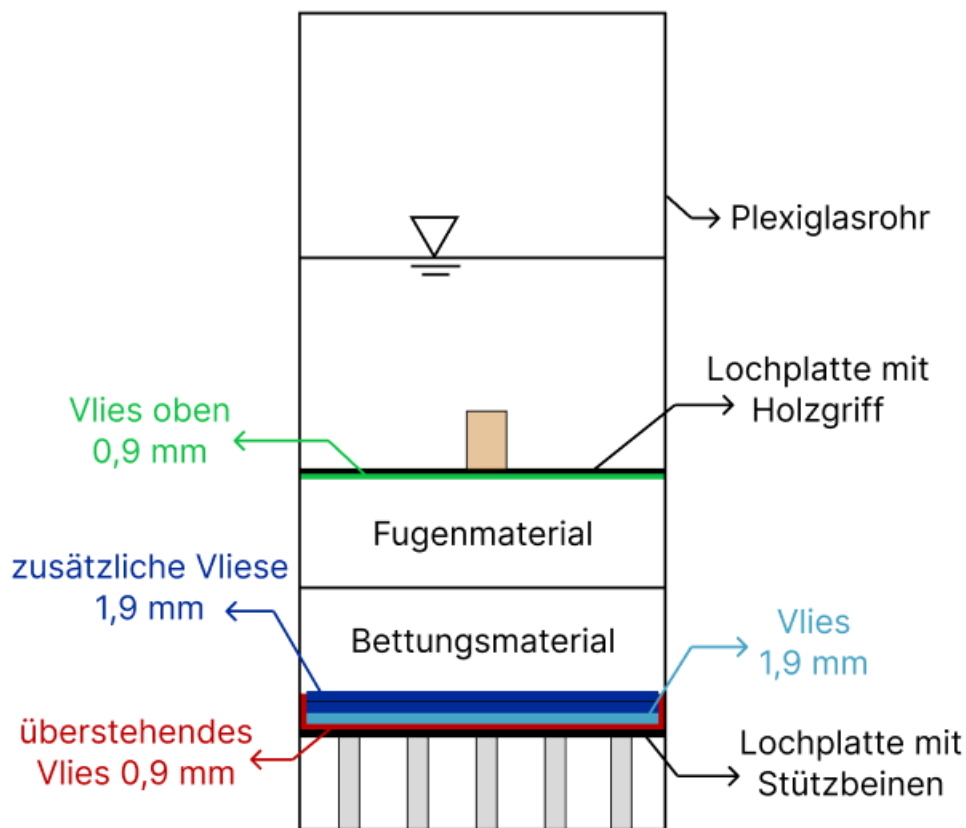


Abbildung 5.2: Skizze des Versuchsaufbaus inkl. Geotextile

5.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche gliederte sich in mehrere Abschnitte: Zuerst musste das vorhandene Material in die einzelnen Kornklassen getrennt werden, dies erfolgte mittels Trockensieben. Verwendet wurde für alle Versuche Gestein aus einem Steinbruch im Osten von Österreich, welches in verschiedenen Korngruppen geliefert wurde. Im Anschluss wurden die Kornklassen so zusammengemischt, dass die gewünschte Kornverteilung entsteht. Diese wurden gemäß Kapitel 5.1 in die Versuchsanlage eingebaut und der Versuch wie beschrieben durchgeführt. Nachdem der Versuch beendet war und das Wasser aus der Probe abgelaufen ist, wurden das Bettungs- und Fugenmaterial ausgebaut. Um eine möglichst exakte Trennung der Schichten zu ermöglichen, wurde die Probe mithilfe einer Presse nach oben gedrückt. Dafür wurde die in Abbildung 5.3 (links) dargestellte Konstruktion verwendet. Durch die Presse konnte der gesamte Inhalt des Plexiglasrohres nach oben gedrückt werden, wodurch das Fugenmaterial oben mithilfe eines Lineals exakt abgetrennt werden konnte. In Abbildung 5.3 (rechts) ist die Schichtgrenze ersichtlich, welche mit rot eingefärbten Körnern gekennzeichnet ist.

Nach dem Ausbau der Probe wurde das Bettungs- und Fugenmaterial bei 110°C im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wurde mit den homogenisierten Proben jeweils eine Nasssiebung gemäß DIN EN 933-1 [37] durchgeführt, um die Sieblinien nach dem Versuch zu ermitteln.



Abbildung 5.3: links: Konstruktion zum Ausbau der Probe – rechts: Schichtgrenze

5.4 Praktische Hinweise und Schwierigkeiten bei der Durchführung

Im Laufe der Durchführung traten bei manchen Arbeitsschritten gewisse Herausforderungen auf. Um eine möglichst unkomplizierte Nachvollziehbarkeit der Versuchsdurchführung zu gewährleisten, werden im Folgenden praxisnahe Hinweise gegeben.

Die Trennung der Korngruppen in die einzelnen Kornklassen erfolgte – wie bereits erwähnt – mittels Trockensieben. Da für den Trockensiebturm kein Sieb mit der Maschenweite 0,063 mm vorhanden war, war eine Aufteilung auf zwei Siebtürme erforderlich. Bis zur Kornklasse 0,125 mm wurde der große Trockensiebturm verwendet. Die feinen Anteile, welche dabei als Rest im Siebboden blieben, wurden anschließend mit dem Nasssiebturm in die Kornklassen 0,063 mm und < 0,063 mm getrennt. Da sich das Nasssieden der feinen Anteile als unpraktikabel herausstellte, wurde auch diese Siebung trocken ausgeführt. Aus den einzelnen Kornklassen wurden anschließend die benötigten Korngruppen hergestellt. Dabei wurde das Bettungs- und Fugenmaterial für jeden Versuch separat gemischt. Abhängig von der Dichte der Korngruppe entspricht dies einer Menge von je ca. 2,6 bis 2,8 kg Material pro Versuch. Durch die versuchsspezifische Mischung soll gewährleistet werden, dass das Bettungs- und Fugenmaterial möglichst exakt den geforderten Sieblinien entspricht. Vor dem Einbau wurde die Korngruppe sorgfältig homogenisiert, um eine gleichmäßige Verteilung innerhalb einer Schicht sicherzustellen. Beim Einbau ist besonders darauf zu achten, eine ebene Fläche zu schaffen, da die Rüttelbewegung während des Versuches sonst eine starke Schiefelage begünstigt.

Eine besondere Herausforderung stellte die Aufrechterhaltung des optimalen Wasserstandes dar. Um möglichst kritische Bedingungen zu erreichen, sollte eine entsprechende Durchströmung der Probe bei einem gleichzeitig konstanten Wasserstand gegeben sein. Dafür muss die Probe in Kombination mit den darunterliegenden Filtervliesen ein geeignetes Mittelmaß aus Durchlässigkeit und Wasserrückhaltung aufweisen. Da die Wasserzufuhr durch die Düse im Siebdeckel begrenzt ist, wurde

versucht, die Anzahl der Geotextile so zu wählen, dass eine möglichst optimale Wasserdurchströmung erreicht wird. Die Anzahl der Geotextile ergab sich dabei wie in Tabelle 6.1 aufgelistet. Bei einem Ansteigen des Wasserstandes während des Versuches, wurde die Wasserzufuhr entsprechend reduziert. Problematisch waren insbesondere sehr grobe Kombinationen (siehe Tabelle 6.1), bei welchen die Aufrechterhaltung des Wasserstandes trotz mehrfacher Vliesschichten nicht möglich war. Bei den Kombinationen für hydroaktive Pflasterflächen (Versuche 17-20) konnte zu keiner Zeit ein Wasserstand aufgebaut werden – selbst nicht durch manuelle Wasserzugabe über einen Schlauch. Daher wurde die Versuchsdauer auf 45 Minuten erhöht.

Als zweckmäßig hat sich im Verlauf der Vorversuche zudem eine zusätzliche dünne Schicht Geotextil oben auf dem Fugenmaterial erwiesen (siehe Abbildung 5.2). Bei sehr niedrigem Wasserstand trat oft das Problem auf, dass es infolge ungleichmäßiger Bewässerung zu lokalen Vertiefungen durch Auswaschungen kam. Mithilfe dieses Filtervlieses konnte eine gleichmäßigere Wasserverteilung erzielt und damit solchen Effekten entgegengewirkt werden.

Beim Ausbau der Probe ist besonderes Augenmerk auf die exakte Trennung der Schichten zu legen. Um dies möglichst effektiv zu realisieren, wurde eine spezielle Konstruktion (siehe Abbildung 5.3) eigens dafür angefertigt. Diese besteht aus einer Holzkiste mit einem seitlichen Loch, einem Wagenheber sowie einem Abstandhalter, welcher aus verklebten Holz- bzw. Hartschaumplatten gefertigt wurde. Um das Fugenmaterial auszubauen, wurde das gefüllte Plexiglasrohr auf den Abstandhalter aufgesetzt. Anschließend wurde das Plexiglasrohr vorsichtig nach unten gedrückt, sodass die Probe innen nach oben befördert wurde. Sobald das Fugenmaterial die Oberkante des Plexiglasrohres erreicht hat, wurde das Material nach und nach mit einem Lineal und einer Schaufel abgetragen. Um die Schichten weiter nach oben zu drücken, diente der Wagenheber als Presse. Dies wurde so lange fortgeführt, bis die rot markierten Körner und somit die Schichtgrenze erreicht war. Nach dem Abtragen des gesamten Fugenmaterials konnte das Bettungsmaterial in einen entsprechenden Behälter umgefüllt werden.

Die Auswertung der Proben erfolgte mittels Nasssiebung, nachdem die Proben mindestens 12 Stunden bei 110°C im Trockenschrank getrocknet wurden. Das abgekühlte Material wurde mechanisch homogenisiert und jeweils zwei Proben des Fugen- und Bettungsmaterials entnommen. Mit diesen Proben (jeweils ca. 300 g) wurde anschließend eine Nasssiebung durchgeführt. Die maximale Siebweite wurde dabei so gewählt, dass diese dem Größtkorn von Fugen- und Bettungsmaterial entspricht. Das heißt, bei der Kombination von 2/4 grob (GK 4 mm) mit 0/2 grob (GK 2 mm) wurde sowohl für das Fugen- als auch für das Bettungsmaterial eine maximale Siebweite von 4 mm verwendet.

6 Ergebnisse und Auswertung

6.1 Versuchsprogramm

Untersucht wurden verschiedene Kombinationen von Bettungs- und Fugenmaterial, welche in Tabelle 6.1 aufgelistet sind. Einerseits wurden jene Kombinationen untersucht, die in der RVS 08.18.01 [4] für die ungebundene Bauweise empfohlen werden (Versuche 1-16). Andererseits wurden in den Versuchen 17-20 auch Kombinationen überprüft, deren Einbau zu stark hydroaktiven Pflasterflächen führt. Diese finden aufgrund ökologischer Aspekte zunehmend Anwendung, weshalb auch diese Kombinationen experimentell betrachtet wurden. [3] Alle Versuche wurden doppelt ausgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen und zufällige Abweichungen auszuschließen.

Tabelle 6.1: Übersicht der durchgeführten Versuche

Versuch	Fugenmaterial	Bettungsmaterial	Anzahl Vliese	Wasserstand
1	0/2 fein	2/4 fein	1	✓
2	0/2 fein	2/4 grob	1	✓
3	0/2 grob	2/4 fein	1	✓
4	0/2 grob	2/4 grob	1	✓
5	0/4 fein	2/4 fein	3	✓
6	0/4 fein	2/4 grob	3	✓
7	0/4 grob	2/4 fein	3	✓
8	0/4 grob	2/4 grob	3	x
9	0/4 fein	2/8 fein	3	✓
10	0/4 fein	2/8 grob	3	✓
11	0/4 grob	2/8 fein	3	✓
12	0/4 grob	2/8 grob	3	x
13	0/8 fein	2/8 fein	3	✓
14	0/8 fein	2/8 grob	3	✓
15	0/8 grob	2/8 fein	3	✓
16	0/8 grob	2/8 grob	3	x
17	2/4 fein	4/8 fein	3	x
18	2/4 fein	4/8 grob	3	x
19	2/4 grob	4/8 fein	3	x
20	2/4 grob	4/8 grob	3	x

Die Anzahl der Vliese gibt an, wie viele der 1,9 mm dicken Geotextile verwendet wurden (siehe Kapitel 5.2). Da bei der Kombination von 0/4 fein als Fugenmaterial mit 2/4 grob als Bettungsmaterial der Wasserstand bei der Verwendung von 1 Vliesschicht nicht gehalten werden konnte, wurde die Anzahl der Geotextile erhöht. Bei insgesamt 3 Schichten des 1,9 mm dicken Geotextils konnte der Wasserstand gehalten werden, weshalb im weiteren Verlauf diese Anzahl an Vliese eingebaut wurde. Die genaue Anordnung der Geotextile ist in Kapitel 5.2 dargestellt.

Bei jenen Kombinationen, welche mit einem roten x in Tabelle 6.1 markiert sind, konnte der Wasserstand nicht gehalten werden bzw. war es teilweise nicht möglich, überhaupt einen Wasserstand zu erreichen. Ursache hierfür ist die hohe Wasserdurchlässigkeit der groben Sieblinien,

welche die maximale Wasserzufuhr des Siebdeckels übersteigt. Um trotzdem möglichst kritische Bedingungen zu erreichen, wurde daher bei diesen Kombinationen die Versuchsdauer auf 45 Minuten erhöht.

6.2 Veränderung der Sieblinien

In Abbildung 6.1 bis 6.6 sind die Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach den Versuchen mit den verschiedenen Fugenmaterialien dargestellt, wobei die strichlierte Linie jeweils den Ausgangszustand zeigt. Um eine gewisse Redundanz zu schaffen, wurden auch die Sieblinien des Fugenmaterials bestimmt, welche in analoger Weise in Abbildung 6.7 bis 6.14 veranschaulicht sind. Liegt die Sieblinie nach dem Versuch über der Ausgangssieblinie, bedeutet dies eine Verfeinerung des Materials. Verschiebt sich die Sieblinie hingegen nach unten, ist das Material durch den Versuch gröber geworden. Je geringer die Verschiebungen von Fugen- und Bettungsmaterial sind, desto filterstabiler sind die beiden Materialien zueinander.

Abbildung 6.1 und 6.2 zeigen, dass das Bettungsmaterial 2/4 nur sehr kleine Änderungen aufweist. Bei genauer Betrachtung von Abbildung 6.1 zeigt sich, dass Kombinationen mit der oberen, feinen Sieblinie (dunkelblaue und hellblaue Linie) im Bereich bis 2 mm Siebweite zu einer leichten Verfeinerung des Bettungsmaterials führen. Im Gegensatz dazu wurde die Sieblinie des Bettungsmaterials bei den Kombinationen mit den unteren, groben Sieblinien (grüne und gelbe Linie) im Bereich bis 2 mm Siebweite etwas nach unten verschoben, was einer Vergröberung entspricht. Der Zuwachs an Material der Kornklasse 4 bei der Kombination von 2/4 fein mit 0/4 grob (gelbe Linie in Abbildung 6.1) muss nicht unbedingt eine Vergröberung bedeuten, sondern könnte auch in einer ungenauen Trennung der Schichten begründet sein. Das Bettungsmaterial 2/4 grob (Abbildung 6.2) zeigt bei allen durchgeführten Kombinationen eine – wenn auch nur geringe – Verfeinerung des Materials. Dieses Ergebnis erscheint schlüssig, da alle kombinierten Fugenmaterialien eine feinere Sieblinie aufweisen als das Bettungsmaterial 2/4 grob.

Bei den Sieblinien des Bettungsmaterials 2/8 sind die Unterschiede deutlicher zu erkennen: In Abbildung 6.3 zeigen die Kombinationen mit der groben Sieblinie (grüne und gelbe Linie) jeweils eine leichte Vergröberung, während jene mit den feinen Sieblinien (dunkelblaue und hellblaue Linie) eher eine Verfeinerung des Bettungsmaterials aufweisen. Abbildung 6.4 macht sichtbar, dass sich die Sieblinie des Bettungsmaterials 2/8 bei allen durchgeführten Kombinationen nach oben verschiebt. Dieser Effekt der Materialverfeinerung ist nachvollziehbar und bekräftigt das Ergebnis in Abbildung 6.2. Ungewöhnlich erscheint jedoch, dass die Verfeinerung bei den Kombinationen mit 0/8 als Fugenmaterial stärker auftritt als bei jenen mit 0/4 als Fugenmaterial. Möglicherweise ist dies darauf zurückzuführen, dass die Kombinationen mit 0/8 als Fugenmaterial eine höhere Wasserdurchlässigkeit aufweisen und daher eine vermehrte Durchmischung bei den Versuchen möglich war. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen während der Versuche.

Verglichen mit den Bettungsmaterialien sind die Veränderungen bei den Fugenmaterialien (Abbildung 6.7 bis 6.12) stärker ausgeprägt. Dies lässt sich durch die Form der Sieblinien begründen: Die Bettungsmaterialien weisen eine enggestufte Korngrößenverteilung auf, während jene der Fugenmaterialien als weitgestuft einzuordnen sind. Durch den flachen Verlauf der Sieblinie und dem damit einhergehenden breiten Korngrößenspektrum werden Veränderungen bei den Fugenmaterialien deutlich sichtbar.

Die Veränderungen des Fugenmaterials 0/2 (Abbildung 6.7 und 6.8) fallen – verglichen mit jenen der anderen Fugenmaterialien – gering aus. Dies deckt sich mit den Erwartungen, da auch die dazugehörigen Bettungsmaterialien nur minimale Veränderungen aufweisen (siehe Abbildung 6.1 und 6.2). Ausgeprägtere Veränderungen der Korngrößenverteilungen sind bei den Kombinationen mit 0/4 als Fugenmaterial festzustellen. Abbildung 6.9 und 6.10 zeigen deutlich, dass sich die Sieblinie durch die Versuche nach unten verschoben hat und das Material demnach gröber geworden ist. In Abbildung 6.9 ist auch klar erkenntlich, dass dieser Effekt der Materialvergröberung bei der Kombination mit 2/8 als Bettungsmaterial stärker auftritt als bei der Kombination mit 2/4. Dies bestätigt sich durch den Vergleich der Sieblinienveränderungen der Bettungsmaterialien in Abbildung 6.1 bis 6.4: Die Veränderung der Sieblinie ist bei den Kombinationen mit 2/8 als Bettungsmaterial deutlich ausgeprägter als bei jenen mit 2/4 und äußert sich – komplementär zu den Fugenmaterialien – als Kornverfeinerung. Bei den Fugenmaterialien in Abbildung 6.11 und 6.12 ist die Vergröberung am signifikantesten, insbesondere bei den Kombinationen mit 0/8 fein als Fugenmaterial. Vergleicht man dazu die Abbildung 6.4, in welcher die Verfeinerung des Bettungsmaterials bei der Kombination mit 0/8 fein als Fugenmaterial am stärksten ausgeprägt ist, erweist sich dies als nachvollziehbar.

Bei den zusätzlichen Versuchen mit der Kombination von 2/4 als Fugenmaterial und 4/8 als Bettungsmaterial zeigen sich nur jeweils bei den feinen Sieblinien (Abbildung 6.5 und 6.13) Verschiebungen. Interessant ist, dass sowohl das Fugen- als auch das Bettungsmaterial eine Vergröberung aufweisen. Diese Veränderungen sind daher nicht direkt auf eine unzureichende Filterstabilität zurückzuführen, sondern auf eine Auswaschung der Feinteile. Zudem wird bei der Bestimmung der Sieblinien nur eine vergleichsweise kleine Menge der Probe verwendet. Insbesondere bei Kornklassen, welche nur zu geringen Massenprozenten in den Gesteinskörnungsgemischen enthalten sind, kann die Wahl der Probennahme das Ergebnis leicht verfälschen. Obwohl darauf geachtet wurde, eine möglichst repräsentative Probe auszuwerten, kann ein gewisser Fehler nie vollständig ausgeschlossen werden.

Im Vergleich aller untersuchten Kombinationen treten Sieblinienverschiebungen vor allem bei den Kombinationen mit 2/8 als Bettungsmaterial auf. Diese Veränderungen bleiben jedoch insgesamt gering, sodass alle getesteten Kombinationen als filterstabil eingestuft werden können. Interessant ist, dass hinsichtlich der Einhaltung der in der RVS definierten Filterkriterien die Kombinationen mit 0/2 - insbesondere der feinen Sieblinie - am kritischsten sind (siehe Tabelle 4.2 bis 4.7). Bei den labortechnischen Untersuchungen zeigen diese Kombinationen kaum Veränderungen.

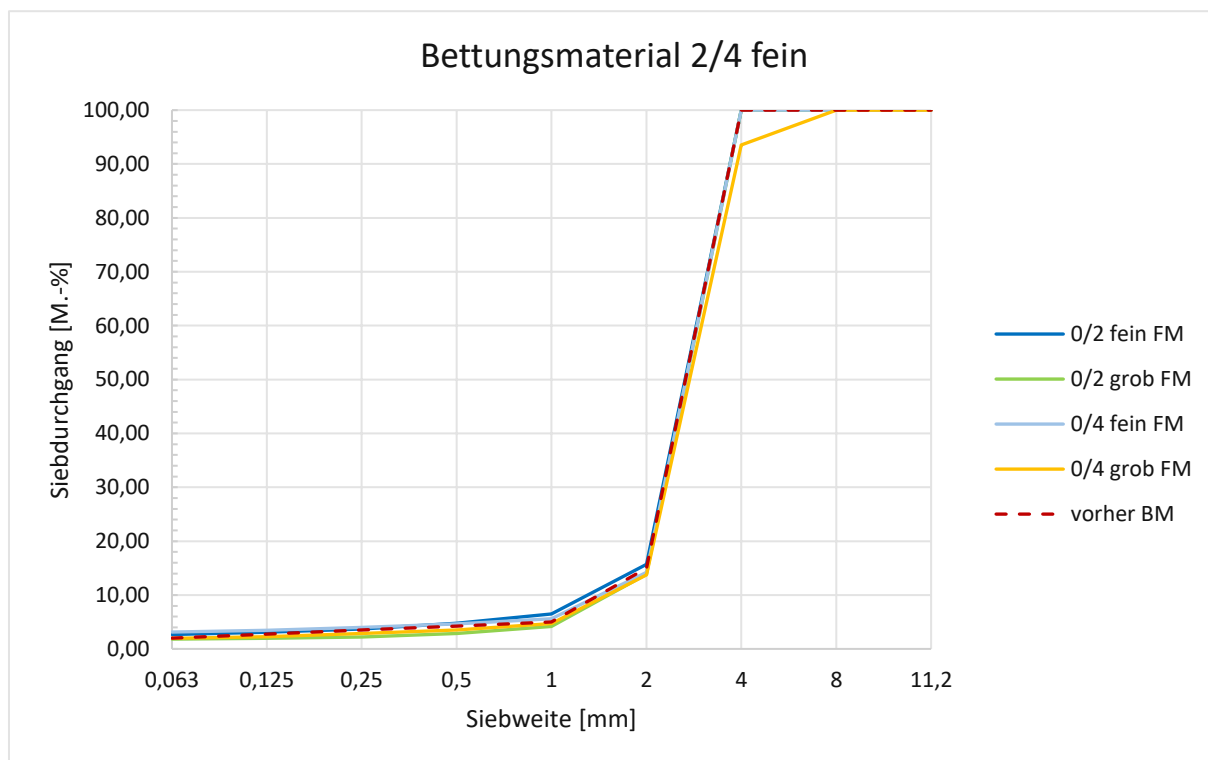


Abbildung 6.1: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/4 fein vor und nach den Versuchen

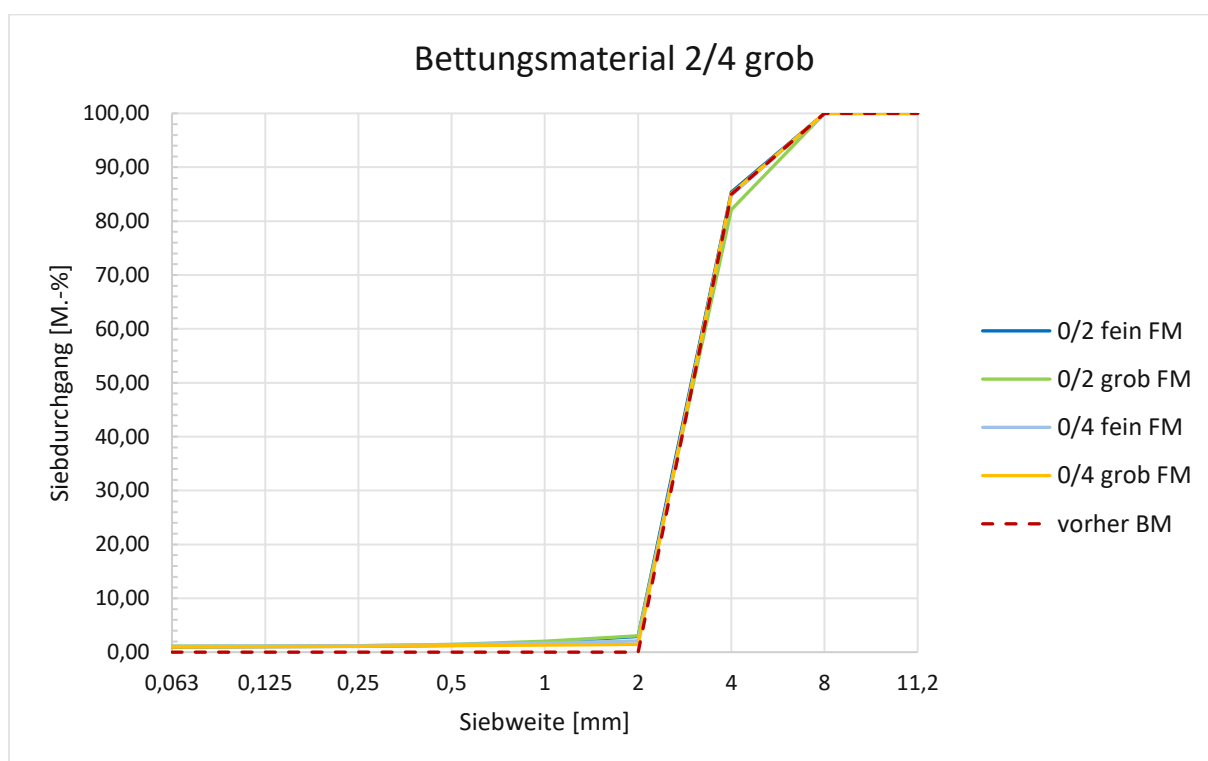


Abbildung 6.2: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/4 grob vor und nach den Versuchen

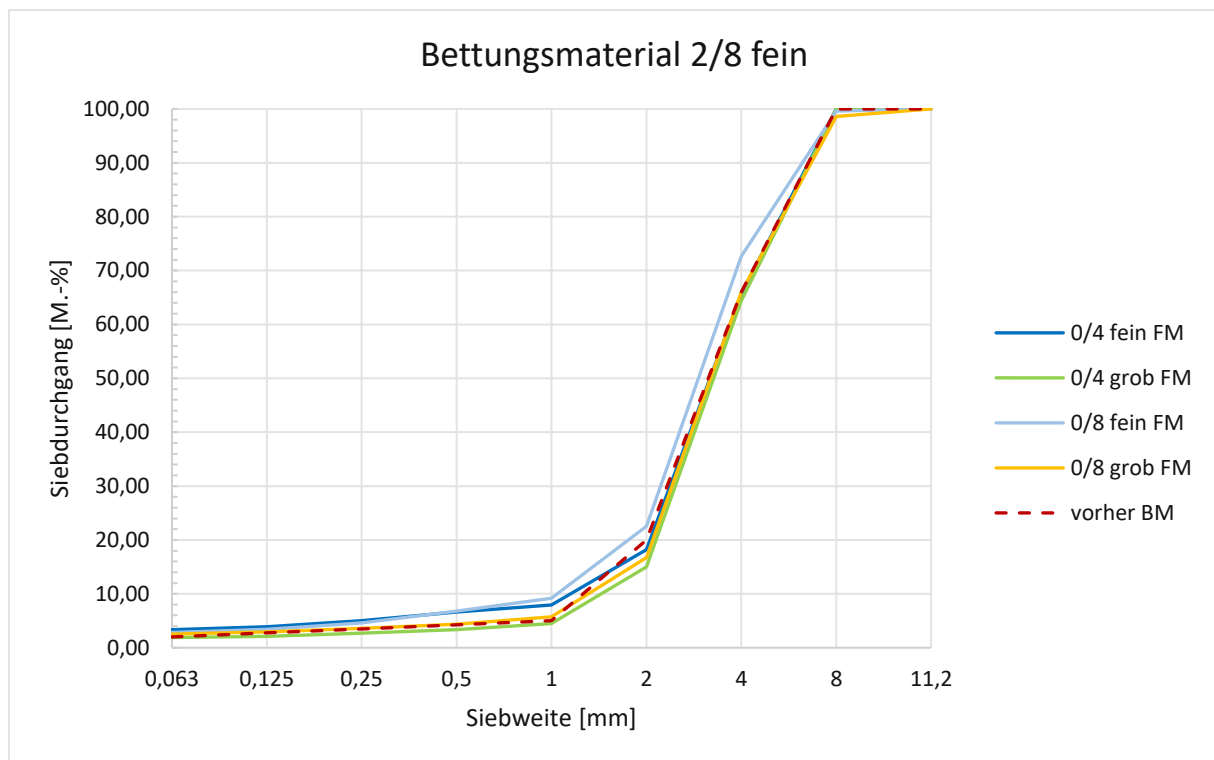


Abbildung 6.3: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/8 fein vor und nach den Versuchen

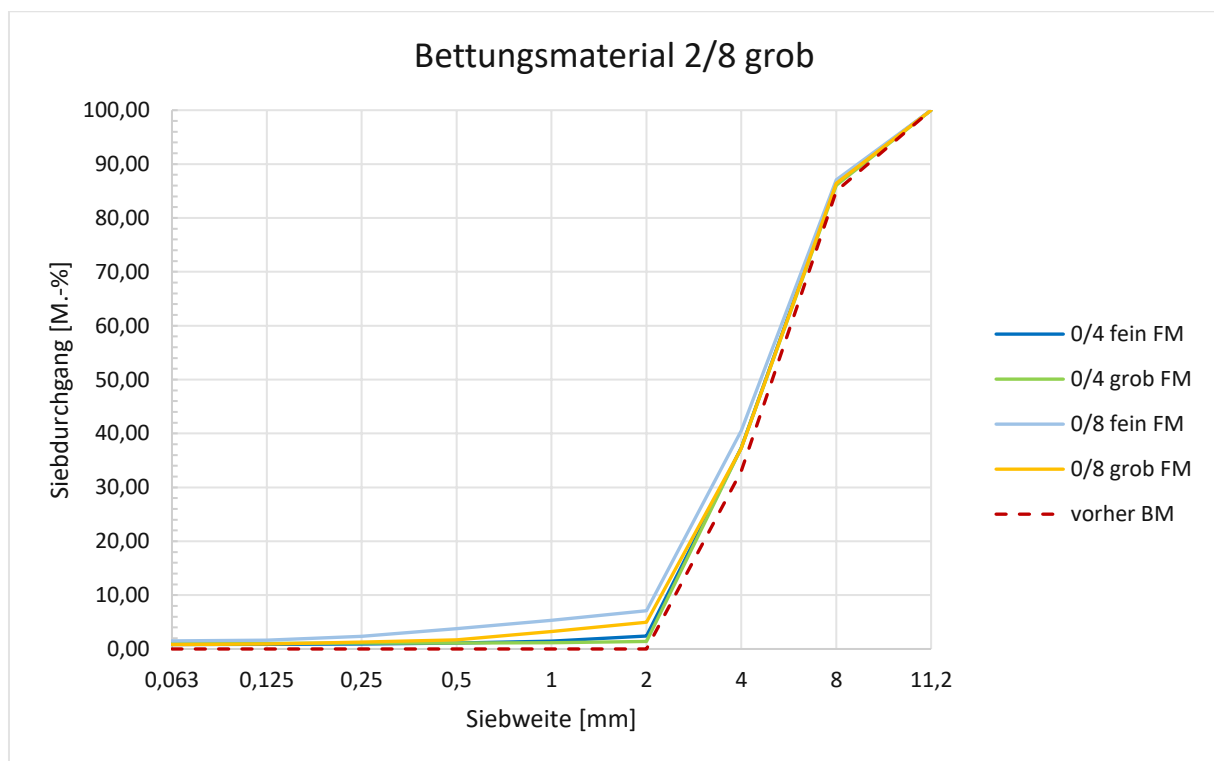


Abbildung 6.4: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/8 grob vor und nach den Versuchen

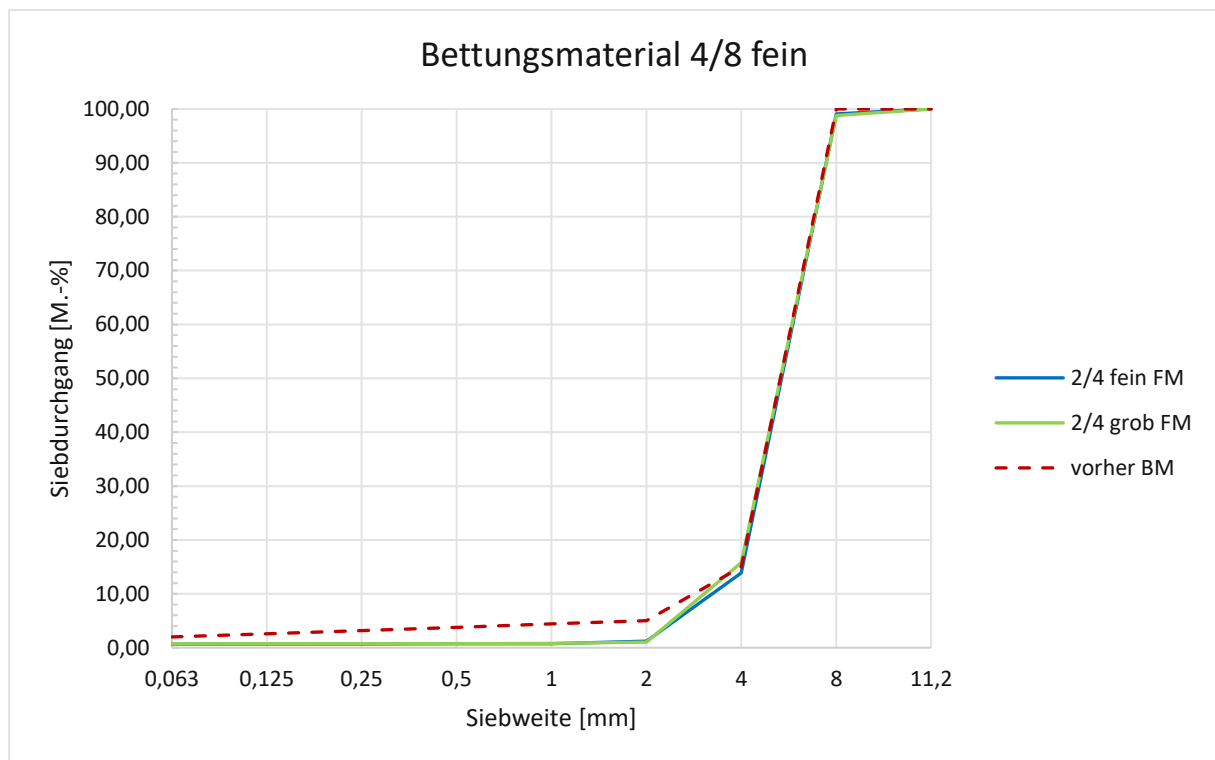


Abbildung 6.5: Sieblinie des Bettungsmaterials 4/8 fein vor und nach den Versuchen

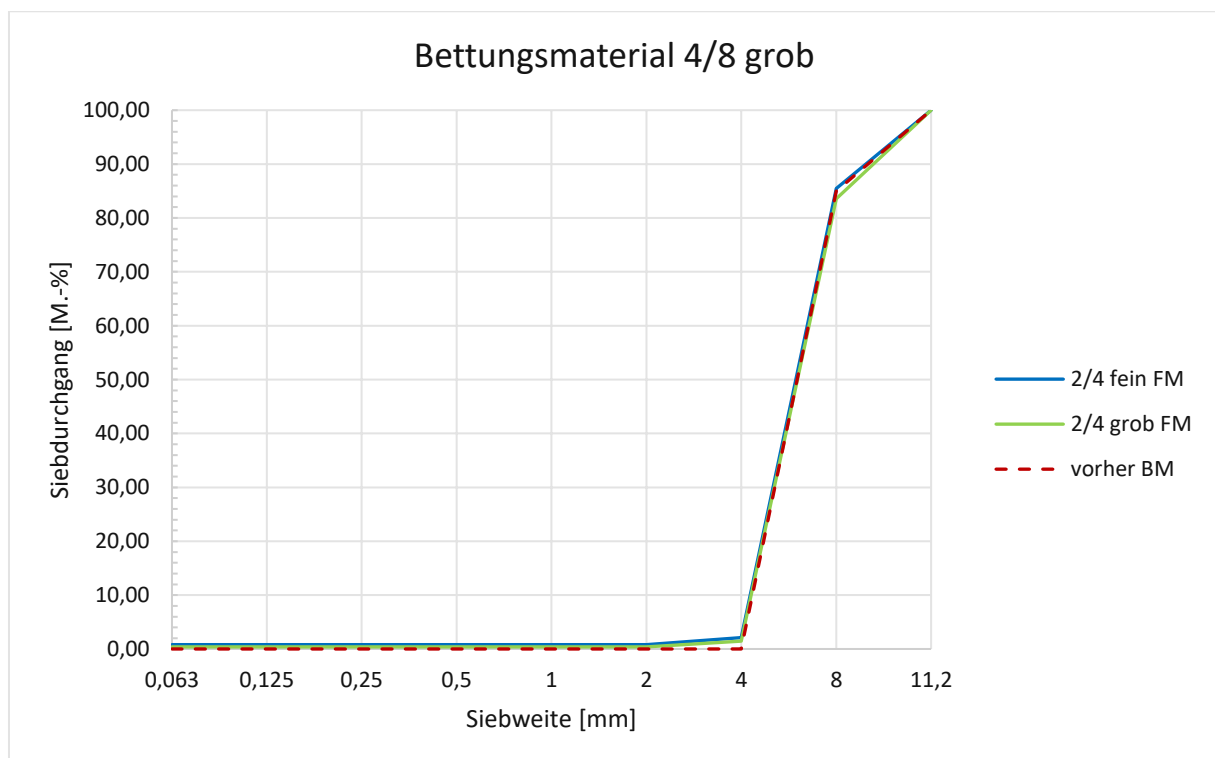


Abbildung 6.6: Sieblinie des Bettungsmaterials 4/8 grob vor und nach den Versuchen

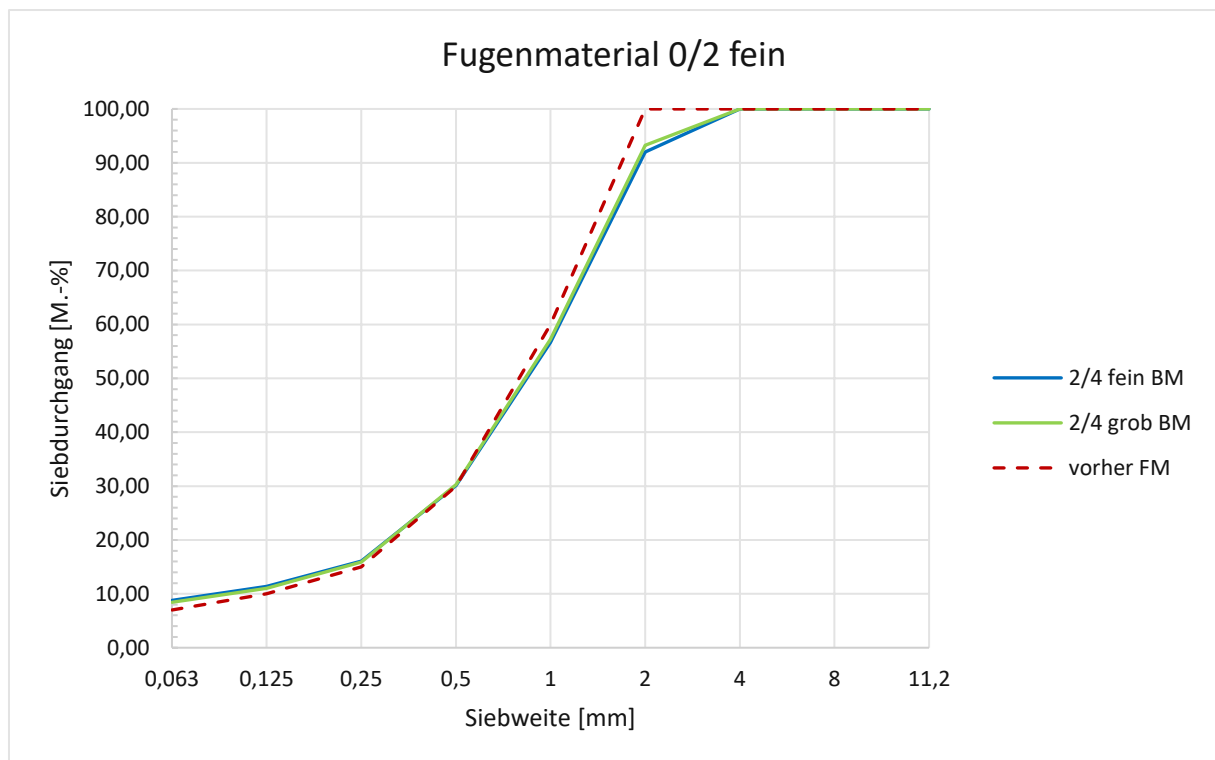


Abbildung 6.7: Sieblinie des Fugenmaterials 0/2 fein vor und nach den Versuchen

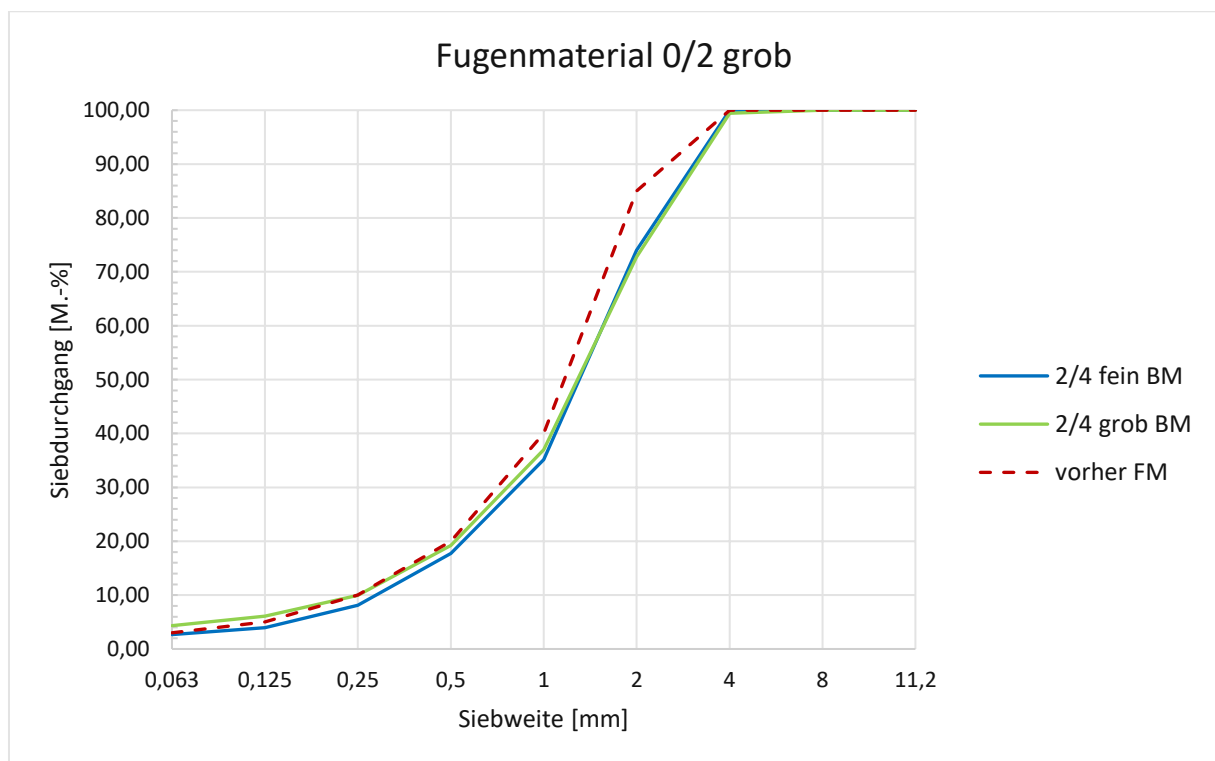


Abbildung 6.8: Sieblinie des Fugenmaterials 0/2 grob vor und nach den Versuchen

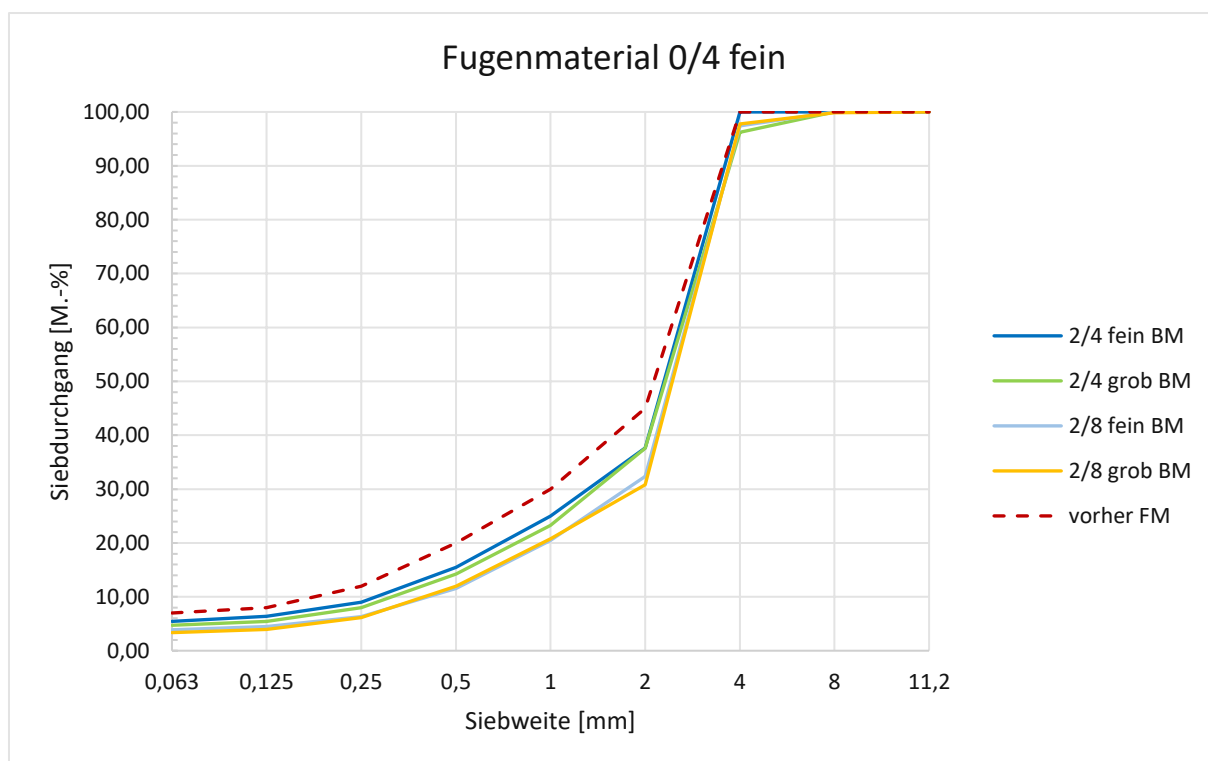


Abbildung 6.9: Sieblinie des Fugenmaterials 0/4 fein vor und nach den Versuchen

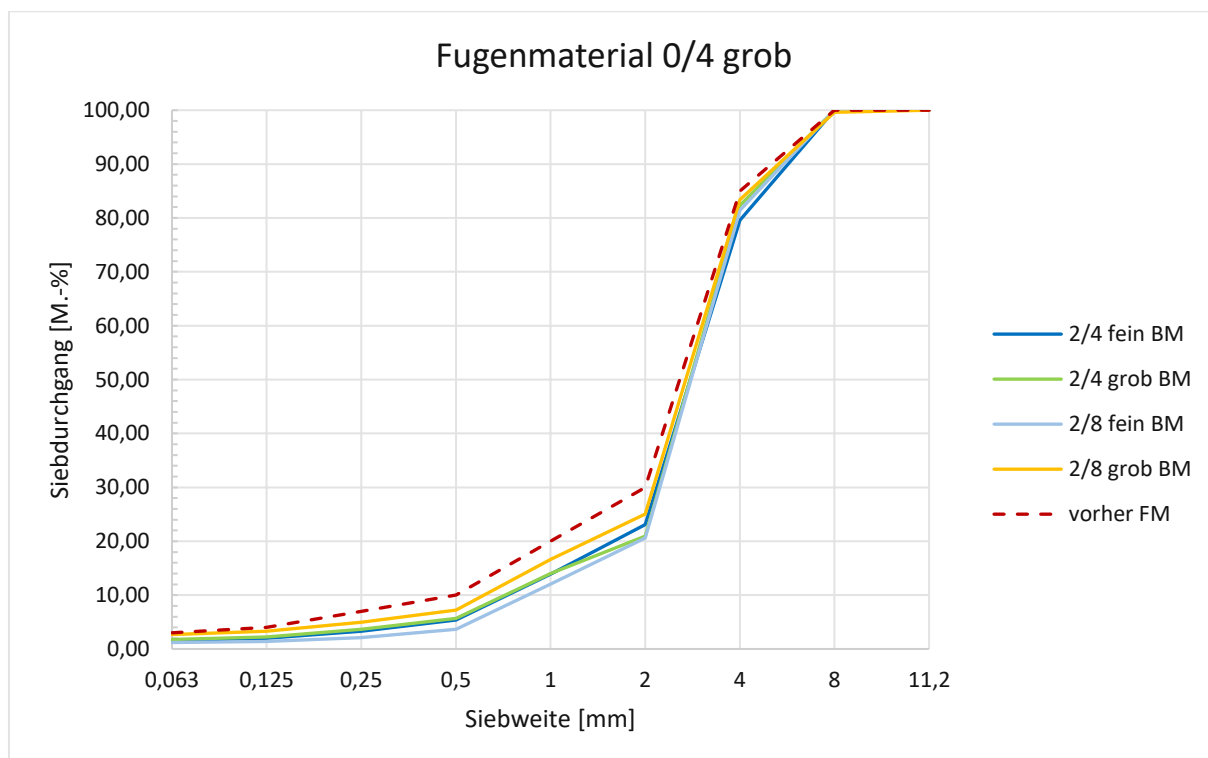


Abbildung 6.10: Sieblinie des Fugenmaterials 0/4 grob vor und nach den Versuchen

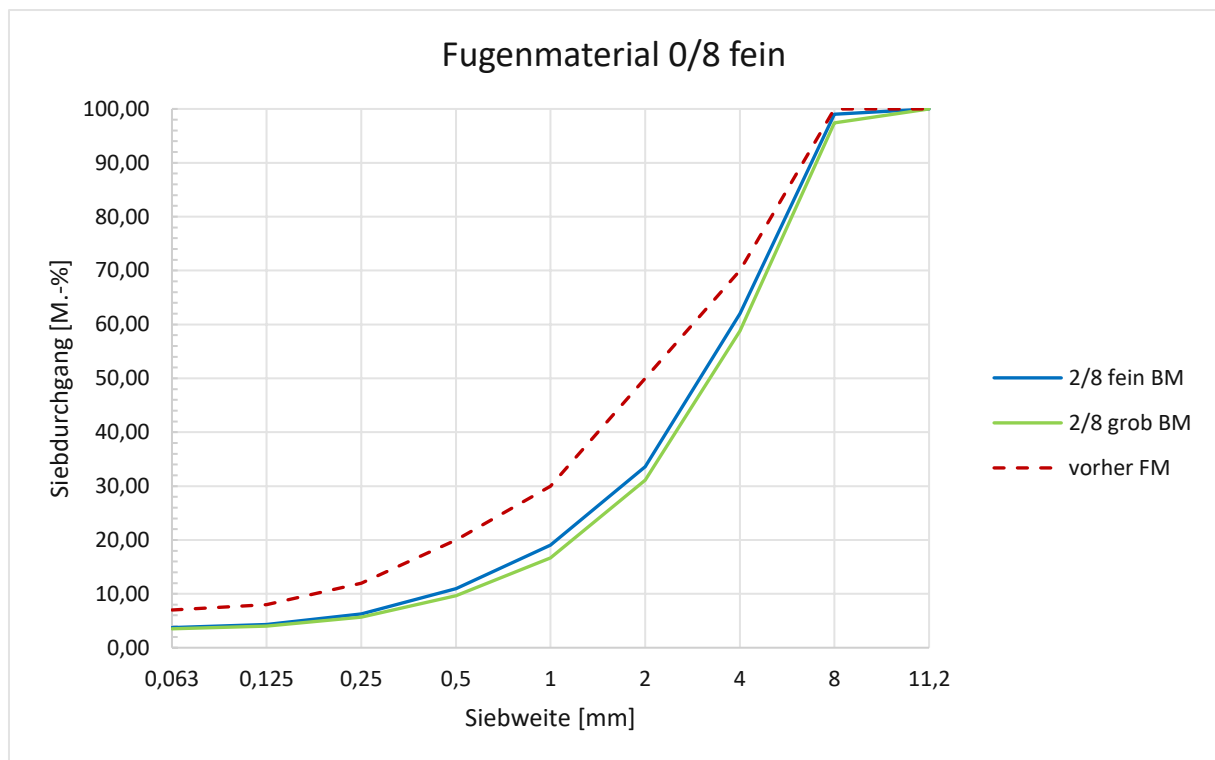


Abbildung 6.11: Sieblinie des Fugenmaterials 0/8 fein vor und nach den Versuchen

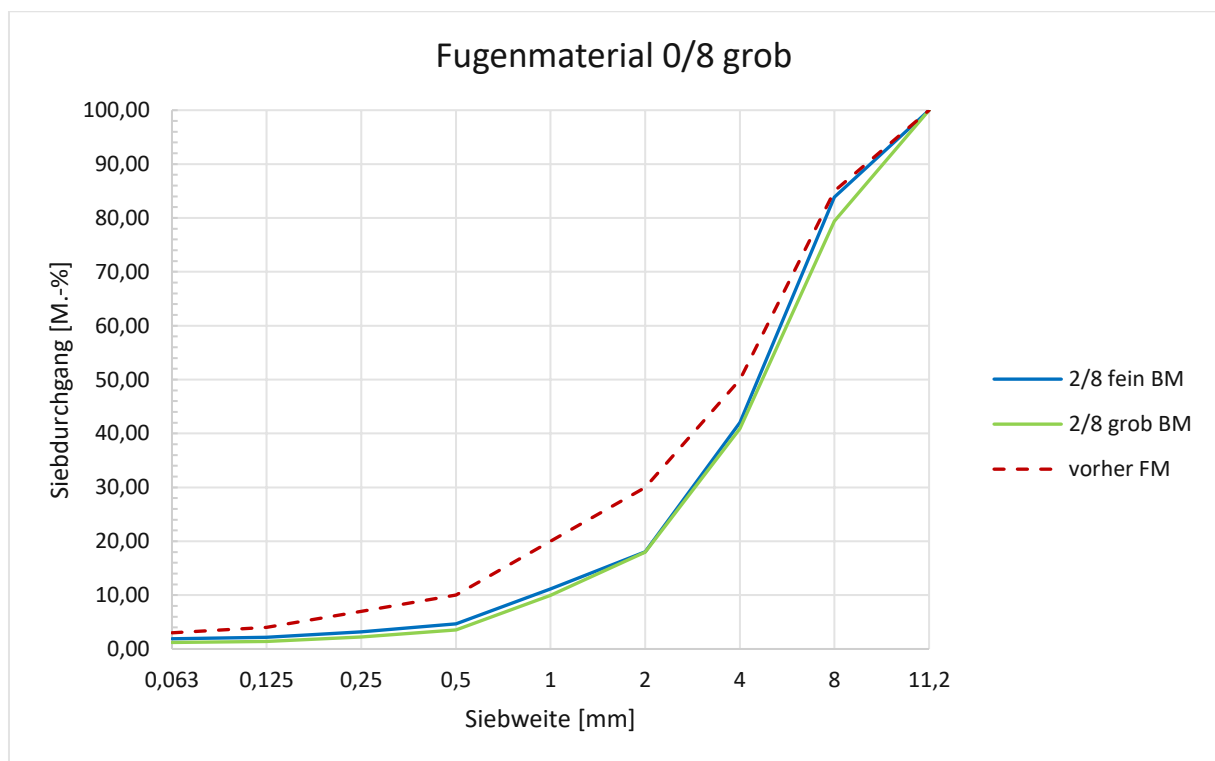


Abbildung 6.12: Sieblinie des Fugenmaterials 0/8 grob vor und nach den Versuchen

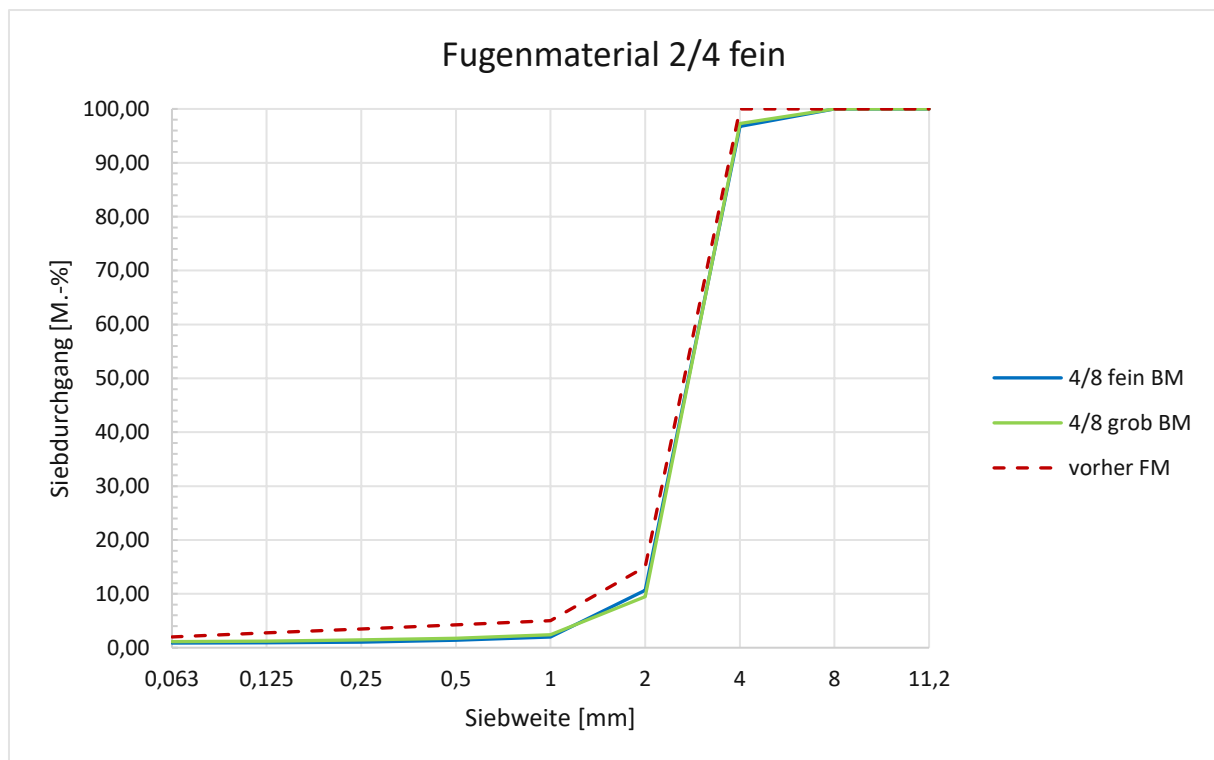


Abbildung 6.13: Sieblinie des Fugenmaterials 2/4 fein vor und nach den Versuchen

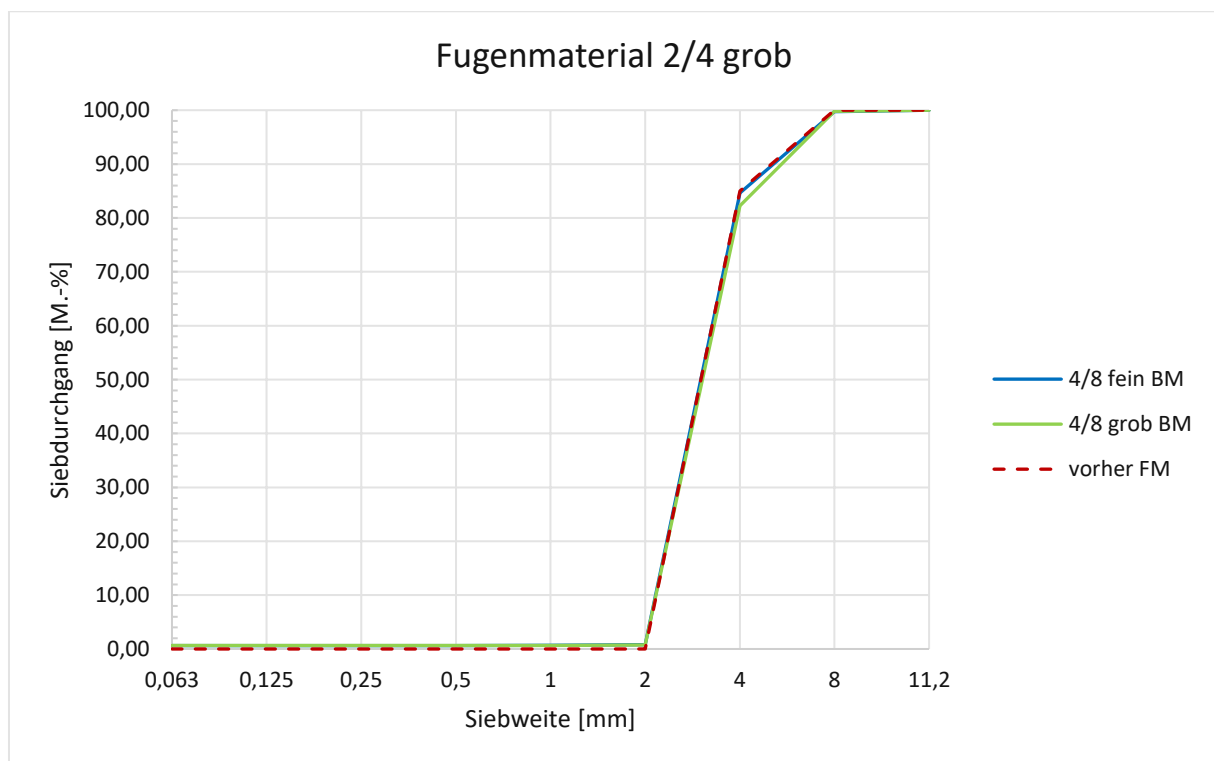


Abbildung 6.14: Sieblinie des Fugenmaterials 2/4 grob vor und nach den Versuchen

6.3 Bewertung anhand des Krümmungskriteriums

Die Ergebnisse der Filterstabilitätsversuche wurden auch anhand des Krümmungskriteriums gemäß Kapitel 3.2.4 mit den Grenzwerten aus Kapitel 4.5 ausgewertet. Dazu wurde ausgehend von den

entstandenen Sieblinien die Korngröße bei 10, 30 und 60 M.-% ermittelt. Um diese Werte zu erhalten, wurde eine Interpolation im Logarithmus der Korngröße durchgeführt. In Tabelle 6.2 sind die Verhältnisse der Krümmungszahlen von Bettungs- und Fugenmaterial dargestellt. Die Krümmungsverhältnisse des Bettungsmaterials vor und nach dem Versuch sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. In Abbildung 6.15 ist der Zusammenhang zwischen den beiden Krümmungsverhältnissen grafisch veranschaulicht: Der Quotient der C-Werte des Bettungsmaterials vor und nach den Versuchen ist auf der Ordinate eingezeichnet, jener der Krümmungszahlen von Bettungs- und Fugenmaterial auf der Abszisse. Dabei stellen die blauen Datenpunkte die gemäß RVS 08.18.01 [4] empfohlenen Kombinationen dar, die zusätzlich untersuchten Kombinationen (Versuche 17-20 in Tabelle 6.1) sind grün gekennzeichnet. Die rot strichlierten Linien stellen die Grenzwerte gemäß Kapitel 4.5 dar.

Tabelle 6.2: Krümmungsverhältnisse von Bettungs- und Fugenmaterial

$C_{0,BM} / C_{0,FM} \leq 2$									
Bettungsmaterial		Fugenmaterial							
		0/2		0/4		0/8		2/4	
		fein	grob	fein	grob	fein	grob	fein	grob
2/4	fein	0,63	0,85	0,53	0,46				
	grob	0,46	0,63	0,39	0,34				
2/8	fein			0,50	0,43	0,59	0,72		
	grob			0,43	0,36	0,50	0,61		
4/8	fein							1,00	1,36
	grob							0,74	1,00

Tabelle 6.3: Krümmungsverhältnisse Bettungsmaterial

$C_{0,BM} / C_{1,BM} \geq 0,6 \text{ und } \leq 1,5$									
Bettungsmaterial		Fugenmaterial							
		0/2		0/4		0/8		2/4	
		fein	grob	fein	grob	fein	grob	fein	grob
2/4	fein	0,93	1,06	1,00	1,06				
	grob	1,00	1,01	1,00	1,00				
2/8	fein			0,88	1,04	0,84	0,97		
	grob			1,07	1,08	1,09	1,04		
4/8	fein							1,13	1,09
	grob							1,00	1,00

Krümmungsverhältnisse Bettungsmaterial

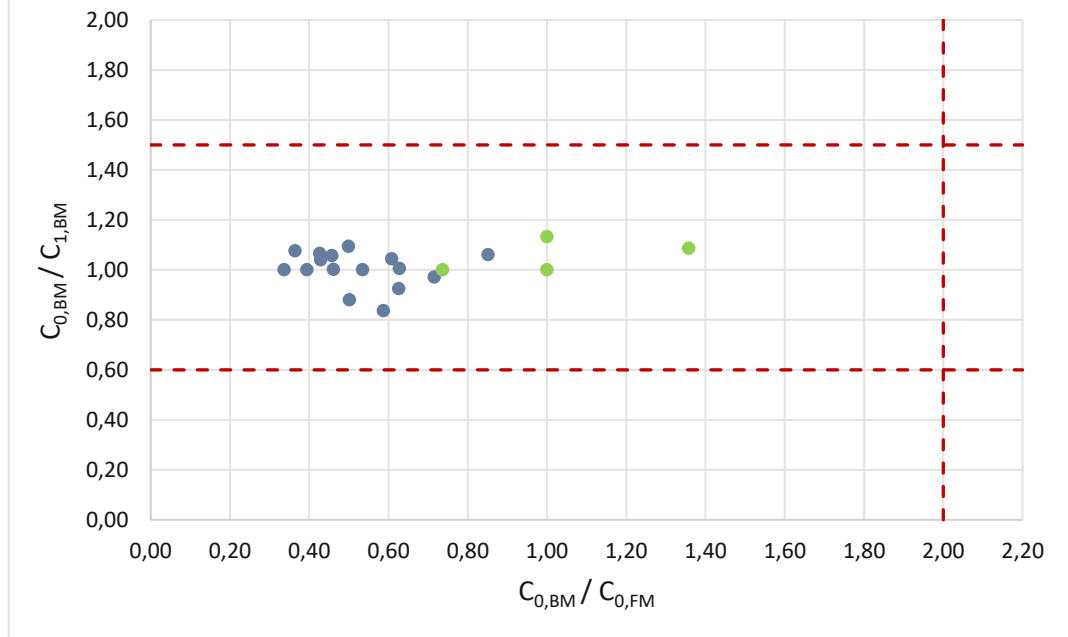


Abbildung 6.15: Krümmungsverhältnisse Bettungsmaterial

Abbildung 6.15 zeigt deutlich, dass die Krümmungsverhältnisse des Bettungsmaterials innerhalb eines sicheren Bereichs der Grenzwerte liegen. Das Krümmungsverhältnis $C_{0,BM}/C_{1,BM}$, welches die experimentell verursachte Veränderung der Sieblinie quantifiziert, befindet sich für alle Kombinationen innerhalb des Bereichs von 0,8 - 1,2. Auf der Abszisse konzentriert sich die Mehrzahl der Werte im Bereich um 0,5 und unterschreitet den Grenzwert von 2,0 somit signifikant. Dadurch zeigt sich, dass die von Hofko und Gruber [7] festgelegten Grenzwerte auch für die überarbeiteten Sieblinien gültig sind. Der Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Diplomarbeit mit jenen des Projektberichtes [7] zeigt, dass die Veränderungen des Bettungsmaterials bei den neu definierten Sieblinien geringer ausfallen als bei jenen, die in der vorhergehenden Fassung der RVS 08.18.01 festgelegt wurden. Demnach bestätigen sich die überarbeiteten Sieblinien in der aktuellen Version der RVS 08.18.01 [4]. Jene Kombinationen, welche sich in dem Projektbericht [7] als problematisch erwiesen, werden in der neuen RVS 08.18.01 [4] nicht mehr empfohlen.

Zusätzlich zu den Krümmungsverhältnissen des Bettungsmaterials wurden auch jene des Fugenmaterials vor und nach dem Versuch ermittelt, welche in Tabelle 6.4 dargestellt sind. Abbildung 6.16 zeigt den Zusammenhang zwischen den beiden Krümmungsverhältnissen $C_{0,BM}/C_{0,FM}$ und $C_{0,FM}/C_{1,FM}$. Außerdem sind die Grenzwerte eingezeichnet, welche ursprünglich für die Krümmungsverhältnisse des Bettungsmaterials festgelegt wurden [7].

Tabelle 6.4: Krümmungsverhältnisse Fugenmaterial

$C_{0,FM} / C_{1,FM} \geq 0,6 \text{ und } \leq 1,5$									
Bettungsmaterial		Fugenmaterial							
		0/2		0/4		0/8		2/4	
		fein	grob	fein	grob	fein	grob	fein	grob
2/4	fein	0,75	0,99	0,97	1,32				
	grob	0,82	1,00	0,99	1,25				
2/8	fein			0,84	1,46	1,17	0,98		
	grob			0,70	1,13	1,17	1,12		
4/8	fein							1,29	1,00
	grob							1,35	1,00

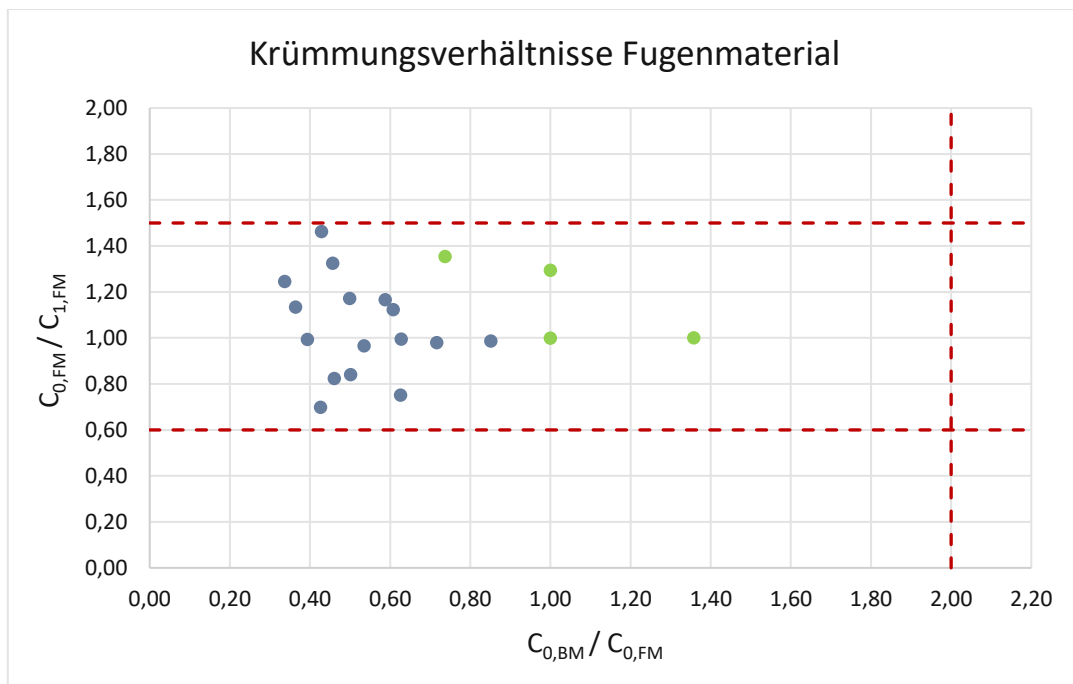


Abbildung 6.16: Krümmungsverhältnisse Fugenmaterial

Die Krümmungsverhältnisse des Fugenmaterials weisen eine breitere Streuung auf, wie in Abbildung 6.16 ersichtlich ist. Dennoch liegen auch diese innerhalb der ursprünglich für Bettungsmaterialien geltenden Grenzen.

6.3.1 Analyse und Einordnung des Krümmungskriteriums

Im Zuge der Auswertung zeigte sich, dass die Zusammenhänge in Gleichung (4.3) und (4.4) nicht haltbar belegt werden können. Durch die Anwendung der Gleichung (4.3) auf die Krümmungsverhältnisse von Bettungs- und Fugenmaterial in Tabelle 6.2 erwies sich dieser Zusammenhang als fehlerhaft. Demnach wäre bei allen in der RVS 08.18.01 [4] empfohlenen Kombinationen das Fugenmaterial gröber als das Bettungsmaterial, da der Verhältniswert $C_{0,BM}/C_{0,FM}$ stets den Wert 1 unterschreitet. In Abbildung 6.17 sind die Sieblinien der Bettungsmaterialien (strichliert dargestellt) jenen der Fugenmaterialien gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass das Fugenmaterial im Allgemeinen feiner als das Bettungsmaterial ist.

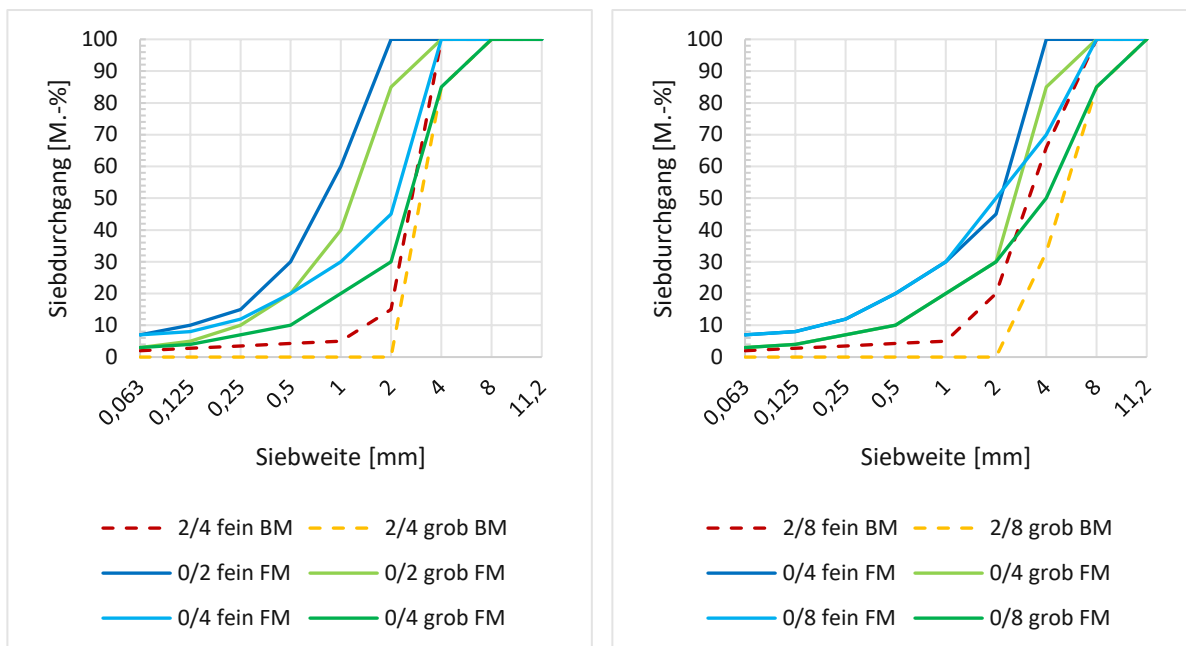


Abbildung 6.17: Vergleich der Sieblinien von Fugen- und Bettungsmaterial

Von besonderem Interesse sind zudem die Quotienten der Krümmungszahlen der zusätzlich untersuchten Kombinationen, bei welchen die Korngruppe 2/4 als Fugenmaterial verwendet wurde. Bei diesen Kombinationen ergeben sich teilweise Verhältniswerte ≥ 1 (siehe Tabelle 6.2). Zu exakt 1,0 ergibt sich das Krümmungsverhältnis bei den Kombinationen von fein-fein sowie grob-grob. Vergleicht man in Abbildung 6.18 die entsprechenden Sieblinien miteinander (die blaue Linie mit der rot strichlierten sowie die grüne Linie mit der gelb strichlierten) zeigt sich, dass diese Sieblinien jeweils die gleiche Form aufweisen – lediglich etwas versetzt auf der Abszisse. Dies lässt vermuten, dass das Krümmungsverhältnis nicht direkt etwas über die Feinheit bzw. Grobheit eines Materials aussagt, sondern vielmehr über deren Sieblinienform.

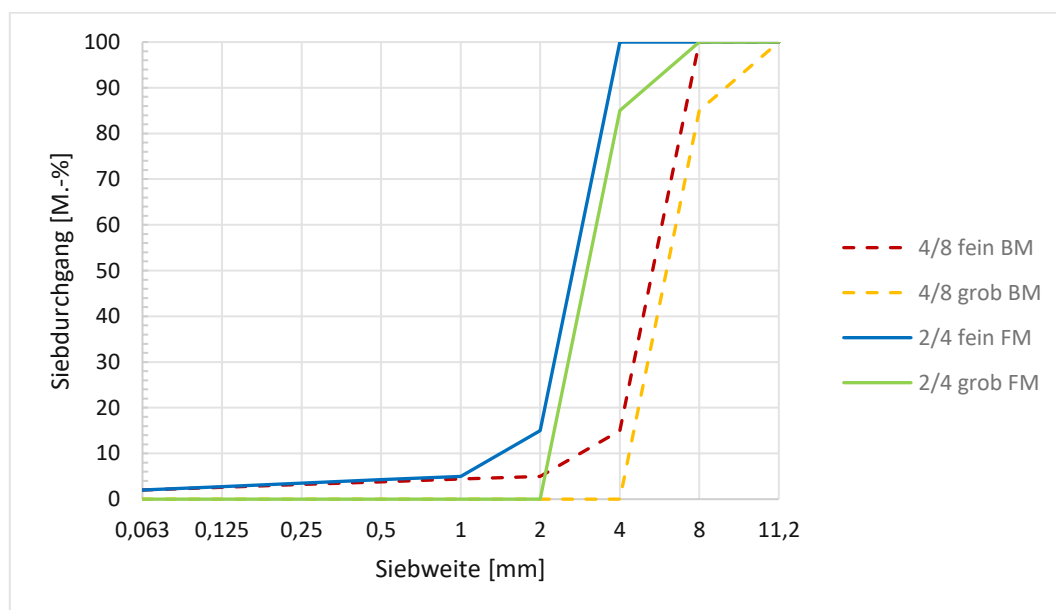


Abbildung 6.18: Sieblinien von Fugen- und Bettungsmaterial der zusätzlich untersuchten Kombinationen

Für jene im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchten Kombinationen wurde dabei folgender Zusammenhang beobachtet: Je kleiner der Wert der Krümmungszahl ist, desto steiler verläuft die Sieblinie in dem Bereich zwischen 10 und 60 M.-%. Bei den untersuchten Kombinationen weist das Bettungsmaterial im Allgemeinen einen steileren Sieblinienverlauf als das Fugenmaterial auf. Dementsprechend ergibt sich für das Verhältnis der Krümmungszahlen von Bettungs- und Fugenmaterial in den meisten Fällen ein Wert < 1 .

Gemäß den obigen Erklärungen erscheinen die Zusammenhänge in Gleichung (4.3) und (4.4) als unzutreffend, da kein direkter kausaler Zusammenhang zwischen der Krümmungszahl und der Feinheit bzw. Grobheit eines Materials festgestellt werden konnte. Dennoch erweisen sich die Krümmungsverhältnisse als geeignetes Instrument zur Quantifizierung der Sieblinienveränderungen. Auch die in Gleichung (4.1) und (4.2) festgelegten Grenzwerte haben sich für die untersuchten Kombinationen als zuverlässig bewiesen.

7 Schlussfolgerung

Im Mittelpunkt dieser Diplomarbeit stand die Untersuchung der Filterstabilität der ungebundenen Schichten von Pflasterbefestigungen, insbesondere des Fugen- und Bettungsmaterials. Ziel war es, das Verhalten verschiedener Sieblinienkombinationen unter realitätsnahen Belastungen im Labor zu analysieren und zu bewerten, ob die in der RVS 08.18.01 empfohlenen Materialzusammensetzungen in der Praxis tatsächlich ausreichend filterstabil sind.

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass die in der Richtlinie empfohlenen Kombinationen eine gute Filterstabilität aufweisen. Besonders die Sieblinien der Korngruppe 0/2 als Fugenmaterial lieferten stabile Ergebnisse, bei denen nur geringe Veränderungen in der Kornverteilung beobachtet wurden. Kritischer hingegen waren Kombinationen mit der Korngruppe 2/8 als Bettungsmaterial, wobei auch diese Sieblinienverschiebungen als unproblematisch einzustufen sind. Bei den zusätzlich durchgeführten Versuchen mit der Kombination von 2/4 als Fugenmaterial mit 4/8 als Bettungsmaterial zeigten nur die feinen Sieblinien Veränderungen. Da hierbei sowohl Fugen- als auch Bettungsmaterial gröber wurden, kann dies nicht auf unzureichende Filterstabilität zurückgeführt werden. Insgesamt zeigten alle labortechnisch untersuchten Kombinationen gute Ergebnisse und gelten daher als filterstabil. Gestützt wird diese Beobachtung durch die Anwendung der Krümmungskriterien zur Quantifizierung der Sieblinienveränderungen. Die Krümmungsverhältnisse der Bettungsmaterialien vor und nach dem Versuch streuten nur geringfügig rund um den Wert 1 und lagen somit deutlich innerhalb des zulässigen Bereichs von 0,6 bis 1,5. Auch die Quotienten der Krümmungszahlen von Bettungs- und Fugenmaterial blieben klar unter dem Grenzwert von 2.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden auch die in der RVS 08.18.01 festgelegten Filterkriterien analysiert und auf potenzielle Kombinationen ungebundener Schichten angewandt. Die Resultate bestätigten die empfohlenen Materialpaarungen für Fugen- und Bettungsschichten, welche die zulässigen Werte problemlos einhalten. Basierend auf klassischen geometrischen Ansätzen wie den Filterregeln nach Terzaghi und Čištin/Ziems liefern diese Kriterien eine einfache und praxistaugliche Methode zur Beurteilung der Filterstabilität. Ihre Anwendung erlaubt eine erste Abschätzung, kann jedoch die tatsächlichen Wechselwirkungen unter Verkehrs- und Wassereinwirkungen nicht vollständig abbilden. Die Ergebnisse aus dem Labor bestätigen jedoch in weiten Teilen die Aussagen der theoretischen Kriterien, was deren Relevanz für die Praxis stützt.

Zudem haben die in dieser Arbeit durchgeführten Laboruntersuchungen bestätigt, dass der verwendete Versuchsaufbau ein verlässliches und praxisnahes Instrument zur Beurteilung der Filterstabilität zwischen ungebundenen Schichten darstellt. Der Aufbau ermöglicht es, die reale Beanspruchungssituation auf Pflasterbefestigungen zu simulieren und das Verhalten der Materialkombinationen unter Belastung zu bewerten.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die RVS 08.18.01 sinnvolle Vorgaben zur Sicherstellung der Filterstabilität liefert. Sowohl die empfohlenen Materialkombinationen für Fugen- und Bettungsmaterial als auch die definierten Filterkriterien haben sich versuchstechnisch bewährt. Dennoch bieten diese Kriterien lediglich eine Grundlage für die Auswahl geeigneter Kornzusammensetzungen und ersetzen nicht die Notwendigkeit einer experimentellen Überprüfung, insbesondere bei weniger gängigen Materialkombinationen oder unter spezifischen Anwendungsbedingungen. Die durchgeführten Laborversuche leisten einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Materialverlagerungsprozesse unter Belastung und ermöglichen eine

praxisnahe Beurteilung der bestehenden Empfehlungen. Künftige Arbeiten könnten daran anknüpfen, um einerseits weitere Kombinationen zu testen, und andererseits vermehrt Praxiserfahrungen mit den empfohlenen Materialpaarungen zu sammeln.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Mentlein, *Pflaster Atlas. Planung, Konstruktion und Herstellung*, 5. Auflage. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2020.
- [2] B. Shackel, *Handbuch Betonsteinpflaster. Bemessung, Konstruktion, Ausführung*. Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH, 1996.
- [3] W. Ablinger, G. Geiger, G. Prett-Preza, R. Sam, und S. Weissenböck, *Planungshandbuch. Planung und Qualitätssicherung für nachhaltige Pflasterflächen*, 2. Auflage. Forum Qualitätspflaster, 2022.
- [4] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, *RVS 08.18.01 Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen*, Wien, 2025.
- [5] K. Krass und E. Görener, *Anforderungen an das Bettungs- und Fugenmaterial für Pflasterdecken bei statischer und dynamischer Verkehrsbeanspruchung*, Forschungsbericht, Ruhr-Universität Bochum, Bonn, 2006.
- [6] A. Mladenov, *Bewertung der Filterstabilität von Bettungs- und Fugenmaterial bei Pflasterungen*, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2015.
- [7] B. Hofko und M. Gruber, *Untersuchungen zur Filterstabilität von Fugen- und Bettungsmaterialien*, Projektbericht, Technische Universität Wien, Wien, 2018.
- [8] G. Janda, *Erarbeitung eines Bemessungsvorschlages für Pflaster- und Plattenbefestigungen*, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2003.
- [9] Austrian Standards Institute, *ÖNORM B 2214 Pflasterarbeiten - Werkvertragsnorm*, Wien, 2020.
- [10] M. Köhler, D. Ulonska, und F. Wellner, *Dauerhafte Verkehrsflächen mit Betonpflastersteinen*, 5. Auflage. Bonn: Betonverband Straße, Landschaft, Garten e. V. (SLG), 2022.
- [11] R. Blab, J. Füssl, B. Gagliano, T. Hessmann, und W. Kluger-Eigl, *Beiträge zur Weiterentwicklung von Pflasterbefestigungen*. Professur für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau, Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien, Wien, 2013.
- [12] M. Wolf, *Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel in Straßenbefestigungen*, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014.
- [13] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, *RVS 08.15.01 Ungebundene Tragschichten*, Entwurf, Wien, 2017.
- [14] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, *RVS 03.08.63 Oberbaubemessung*, Wien, 2016.
- [15] S. Velske, H. Mentlein, und P. Eymann, *Straßenbautechnik*, 5. Auflage. Düsseldorf: Werner Verlag, 2002.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 18196 Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*, Berlin, 2023.
- [17] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *ZTV E-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag, 2009.
- [18] Austrian Standards Institute, *ÖNORM B 4811: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau. Bewertung der Frostsicherheit*, Wien, 2013.
- [19] W. Donderer, A. Eichler, und M. Gerigk, „Verkehrsflächen in ungebundener Bauweise - Oberbaumechanik von mit Lkw befahrenen Pflasterflächen“, *Straße und Autobahn*, 2019.

- [20] Forum Qualitätspflaster, *Richtlinie für hydroaktive Pflaster- und Plattenflächen*, Schwanenstadt, 2025.
- [21] K.-U. Voß, *Schäden an Flächenbefestigungen aus Betonpflaster I. Ausblühungen, Kantenabplatzungen und Verfärbungen*, 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2020.
- [22] L. Wichter, S. Borgwardt, W. Orth, und G. Vogel, *Der richtige Aufbau von Pflasterflächen. Grundlagen für das Verlegen von Pflaster- und Verbundsteinen aus Beton*. Ratingen: Readymix Betonbauteile GmbH, 1996.
- [23] L. Wittmann, *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1980.
- [24] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), *BAW Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB)*. Karlsruhe, 2013.
- [25] K.-F. Busch, L. Luckner, und K. Tiemer, *Geohydraulik*, 3. Auflage. Berlin/Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1993.
- [26] J. Ziems, *Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe*, Dissertation, Technische Universität Dresden, Sektion Wasserwesen, Dresden, 1969.
- [27] K. J. Witt, „Hydraulisch bedingte Grenzzustände“, in *Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren*, 8. Auflage., Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2018, pp. 821–861.
- [28] K. J. Witt, „Phänomene, Kinematik und Strategien zur Risikobewertung einer inneren Bodenerosion“, *geotechnik* 47, Nr. 1, pp. 3–11, 2024, doi: 10.1002/gete.202400005.
- [29] W. Sichardt, „Kies- und Sandfilter im Grund- und Wasserbau“, *Die Bautechnik*, Nr. 3, pp. 72–76, 1952.
- [30] K. Terzaghi und R. B. Peck, *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1961.
- [31] K. J. Witt, *Filtrationsverhalten und Bemessung von Erdstoff-Filtern*, Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1986.
- [32] K. J. Witt, „Der Selbstfiltrationsindex als Suffosionskriterium für nichtbindige Erdstoffe“, *geotechnik* 36, Nr. 3, pp. 160–168, 2013, doi: 10.1002/gete.201300006.
- [33] T. C. Kenney und D. Lau, „Internal stability of granular filters“, *Can. Geotech.*, Bd. 22, pp. 215–225, 1985.
- [34] T. C. Kenney und D. Lau, „Internal stability of granular filters: Reply“, *Can. Geotech.*, Bd. 23, pp. 420–423, 1986.
- [35] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *ZTV Pflaster-StB 20: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen*. Köln: FGSV Verlag, 2020.
- [36] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *ZTV SoB-StB 04: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag, 2007.
- [37] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren*, Berlin, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufbau einer Pflasterfläche	9
Abbildung 2.2: Verbandsarten	10
Abbildung 2.3: Außermittige Belastung einer Platte.....	15
Abbildung 2.4: Statisches System bei mittlerer Belastung von Pflasterplatten mit ungleichmäßiger Bettung	15
Abbildung 2.5: Modellvorstellung der Kräfte infolge vertikaler Belastung.....	15
Abbildung 2.6: Lastverteilung in der Fuge.....	16
Abbildung 2.7: Modellvorstellung der Kräfte infolge horizontaler Belastung	17
Abbildung 2.8: Unebenheit durch ungleichmäßige Dicke der Tragschicht	17
Abbildung 2.9: Kippbewegung durch Fugenentleerung.....	18
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Suffosion bei Erdstoffen mit Einzelkorngefüge	19
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Erosion bei nichtbindigen Erdstoffen.....	20
Abbildung 3.3: Kugelmodelle und minimale Porendurchmesser	21
Abbildung 3.4: Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ nach Versuchen von Čišťin und Ziems	23
Abbildung 3.5: Ermittlung der Krümmungszahl	24
Abbildung 3.6: Definitionen zur Berechnung des Selbstfiltrationsindex	25
Abbildung 3.7: Suffosionskriterium nach Kenney und Lau	26
Abbildung 4.1: Verdichtete und verfestigte Bettung	27
Abbildung 4.2: Sieblinie des Fugenmaterials 0/2	29
Abbildung 4.3: Krümmungsverhältnisse verschiedener Kombinationen für Bettungs- und Fugenmaterial	36
Abbildung 5.1: links: verwendete Materialien – rechts: Versuchsapparatur während der Versuchsdurchführung	38
Abbildung 5.2: Skizze des Versuchsaufbaus inkl. Geotextile.....	40
Abbildung 5.3: links: Konstruktion zum Ausbau der Probe – rechts: Schichtgrenze	41
Abbildung 6.1: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/4 fein vor und nach den Versuchen	46
Abbildung 6.2: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/4 grob vor und nach den Versuchen.....	46
Abbildung 6.3: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/8 fein vor und nach den Versuchen	47
Abbildung 6.4: Sieblinie des Bettungsmaterials 2/8 grob vor und nach den Versuchen.....	47
Abbildung 6.5: Sieblinie des Bettungsmaterials 4/8 fein vor und nach den Versuchen	48
Abbildung 6.6: Sieblinie des Bettungsmaterials 4/8 grob vor und nach den Versuchen.....	48
Abbildung 6.7: Sieblinie des Fugenmaterials 0/2 fein vor und nach den Versuchen.....	49
Abbildung 6.8: Sieblinie des Fugenmaterials 0/2 grob vor und nach den Versuchen	49
Abbildung 6.9: Sieblinie des Fugenmaterials 0/4 fein vor und nach den Versuchen.....	50
Abbildung 6.10: Sieblinie des Fugenmaterials 0/4 grob vor und nach den Versuchen	50
Abbildung 6.11: Sieblinie des Fugenmaterials 0/8 fein vor und nach den Versuchen.....	51
Abbildung 6.12: Sieblinie des Fugenmaterials 0/8 grob vor und nach den Versuchen	51
Abbildung 6.13: Sieblinie des Fugenmaterials 2/4 fein vor und nach den Versuchen.....	52
Abbildung 6.14: Sieblinie des Fugenmaterials 2/4 grob vor und nach den Versuchen	52
Abbildung 6.15: Krümmungsverhältnisse Bettungsmaterial	54
Abbildung 6.16: Krümmungsverhältnisse Fugenmaterial	55
Abbildung 6.17: Vergleich der Sieblinien von Fugen- und Bettungsmaterial	56

Abbildung 6.18: Sieblinien von Fugen- und Bettungsmaterial der zusätzlich untersuchten Kombinationen	56
Abbildung A.1: Sieblinien Fugenmaterial 0/2.....	65
Abbildung A.2: Sieblinien Fugenmaterial 0/4.....	65
Abbildung A.3: Sieblinien Fugenmaterial 0/8.....	66
Abbildung A.4: Sieblinien Bettungsmaterial 2/4	66
Abbildung A.5: Sieblinien Bettungsmaterial 2/8	67
Abbildung A.6: Sieblinien Bettungsmaterial 4/8	67
Abbildung A.7: Sieblinien Tragschicht 0/22.....	68
Abbildung A.8: Sieblinien Tragschicht 0/32.....	68
Abbildung A.9: Sieblinien Tragschicht 0/45.....	69
Abbildung A.10: Sieblinien Tragschicht 0/63.....	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Kriterien der Filterstabilität lt. RVS 08.18.01 [4] und ZTV Pflaster-StB [35]	28
Tabelle 4.2: Kriterium der Erosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 0/2, 0/4 und 0/8	30
Tabelle 4.3: Kriterium der Erosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 2/4, 2/8 und 4/8	31
Tabelle 4.4: Kriterium der Kontakterosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 0/2, 0/4 und 0/8	31
Tabelle 4.5: Kriterium der Kontakterosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 2/4, 2/8 und 4/8	31
Tabelle 4.6: Kriterium der Kontaktsuffosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 0/2, 0/4 und 0/8.....	32
Tabelle 4.7: Kriterium der Kontaktsuffosion - Fuge/Bettung mit Fugenmaterial 2/4, 2/8 und 4/8.....	32
Tabelle 4.8: Kriterium der Erosion - Bettung/Tragschicht.....	33
Tabelle 4.9: Kriterium der Kontakterosion - Bettung/Tragschicht	33
Tabelle 4.10: Kriterium der Erosion - Obere/Untere Tragschicht	34
Tabelle 4.11: Kriterium der Kontakterosion - Obere/Untere Tragschicht	35
Tabelle 6.1: Übersicht der durchgeführten Versuche	43
Tabelle 6.2: Krümmungsverhältnisse von Bettungs- und Fugenmaterial	53
Tabelle 6.3: Krümmungsverhältnisse Bettungsmaterial	53
Tabelle 6.4: Krümmungsverhältnisse Fugenmaterial.....	55
Tabelle A.1: Werte Sieblinien Fugenmaterial.....	70
Tabelle A.2: Werte Sieblinien Bettungsmaterial	70
Tabelle A.3: Werte Sieblinien Tragschichten.....	71
Tabelle B.1: Berechnungen Filterkriterien Fuge - Bettung.....	71
Tabelle B.2: Berechnungen Filterkriterien Bettung - Tragschicht	74
Tabelle B.3: Berechnungen Filterkriterien Obere Tragschicht - Untere Tragschicht	77
Tabelle C.1: Berechnungen Krümmungszahlen.....	79

Anhang

A. Sieblinien laut RVS 08.18.01 [4]

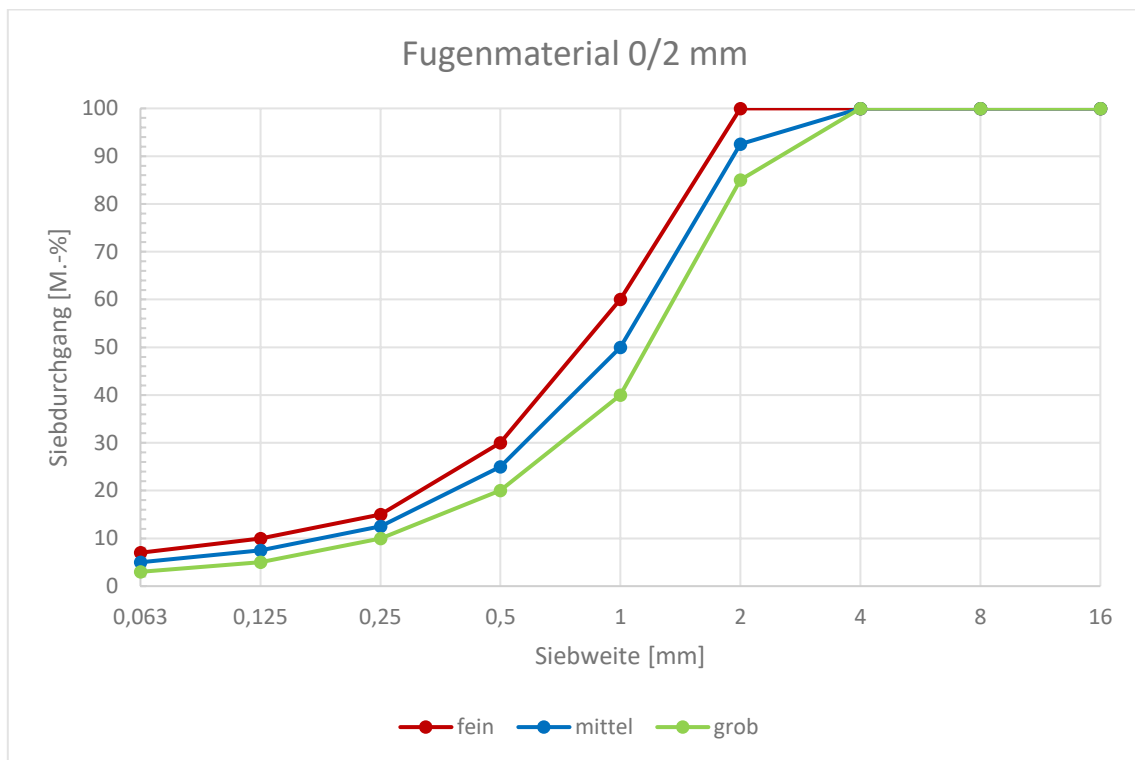


Abbildung A.1: Sieblinien Fugenmaterial 0/2. Eigene Darstellung nach [4]

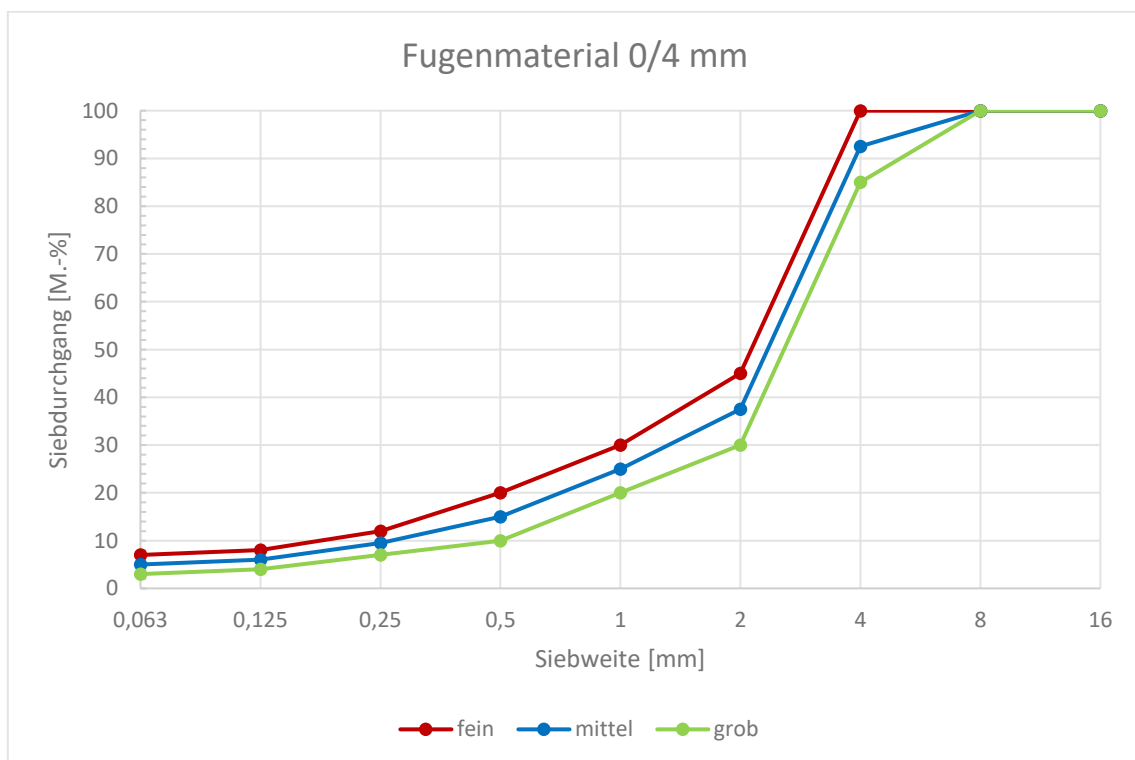


Abbildung A.2: Sieblinien Fugenmaterial 0/4. Eigene Darstellung nach [4]

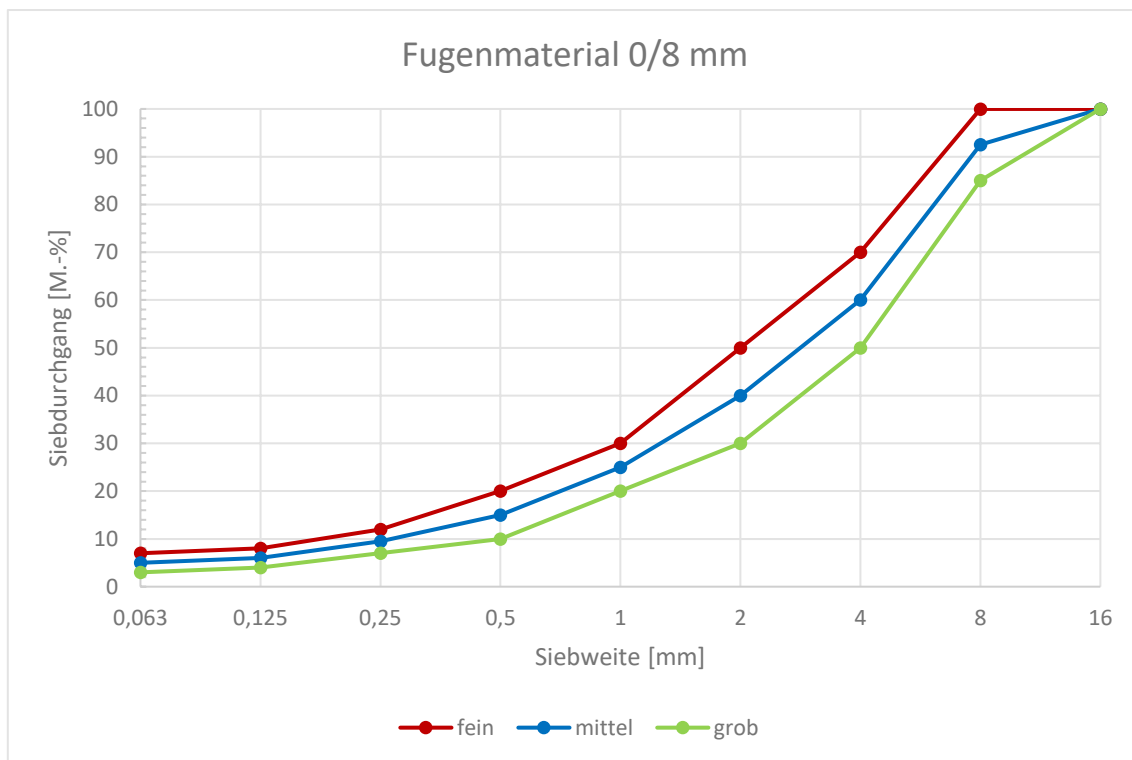


Abbildung A.3: Sieblinien Fugenmaterial 0/8. Eigene Darstellung nach [4]

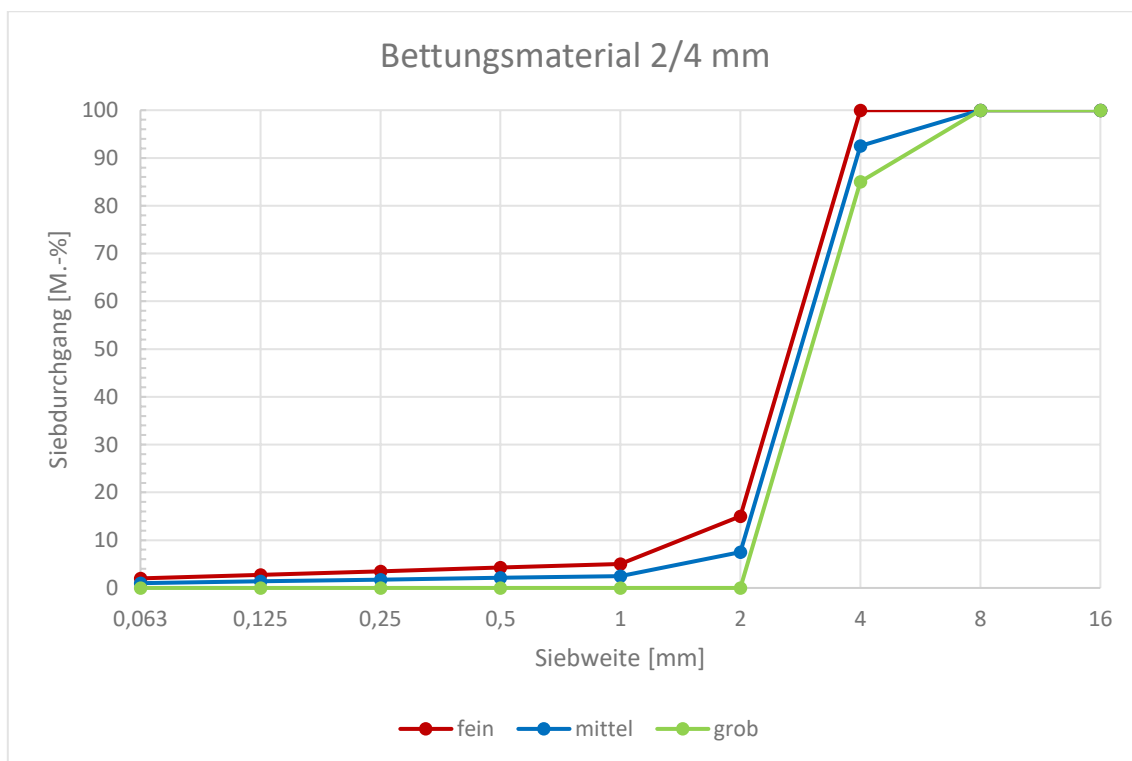


Abbildung A.4: Sieblinien Bettungsmaterial 2/4. Eigene Darstellung nach [4]

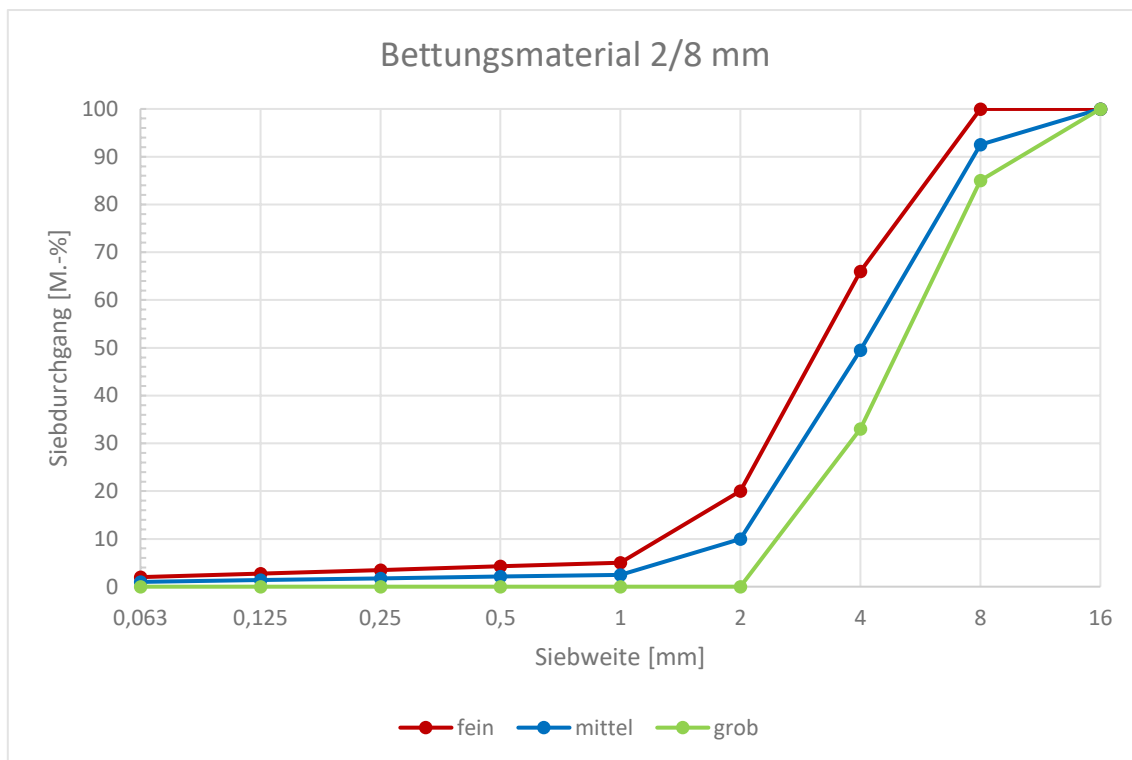


Abbildung A.5: Sieblinien Bettungsmaterial 2/8. Eigene Darstellung nach [4]

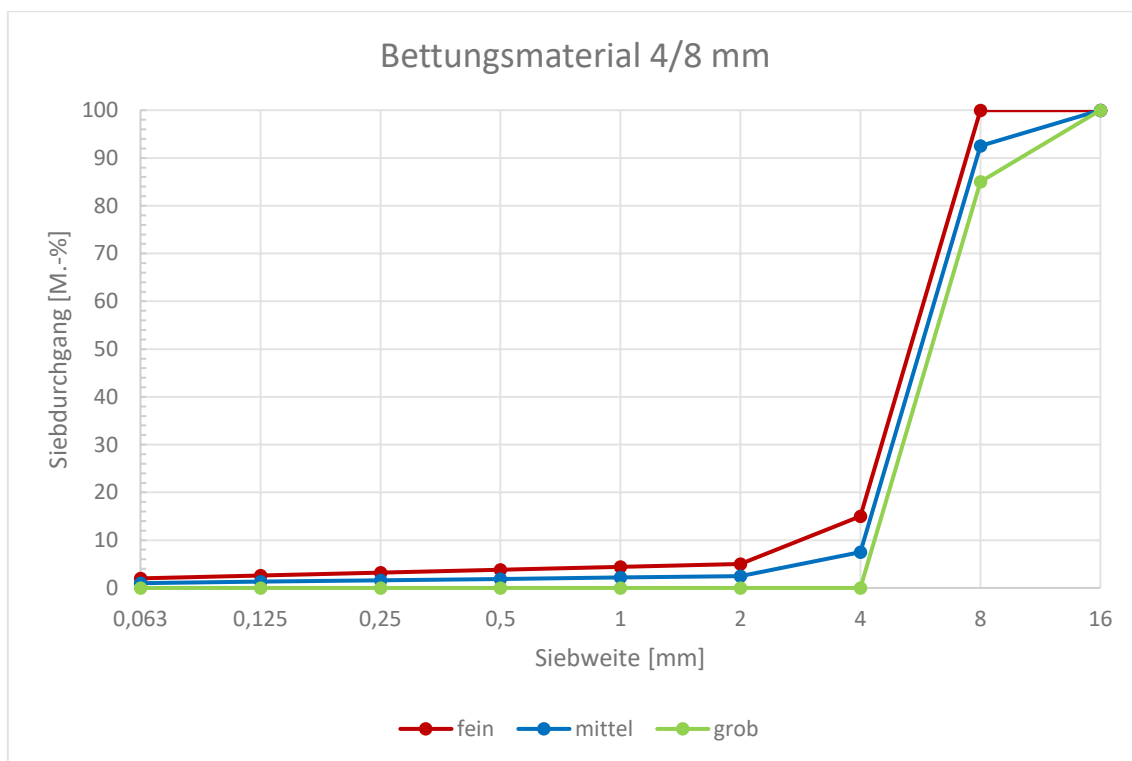


Abbildung A.6: Sieblinien Bettungsmaterial 4/8. Eigene Darstellung nach [4]

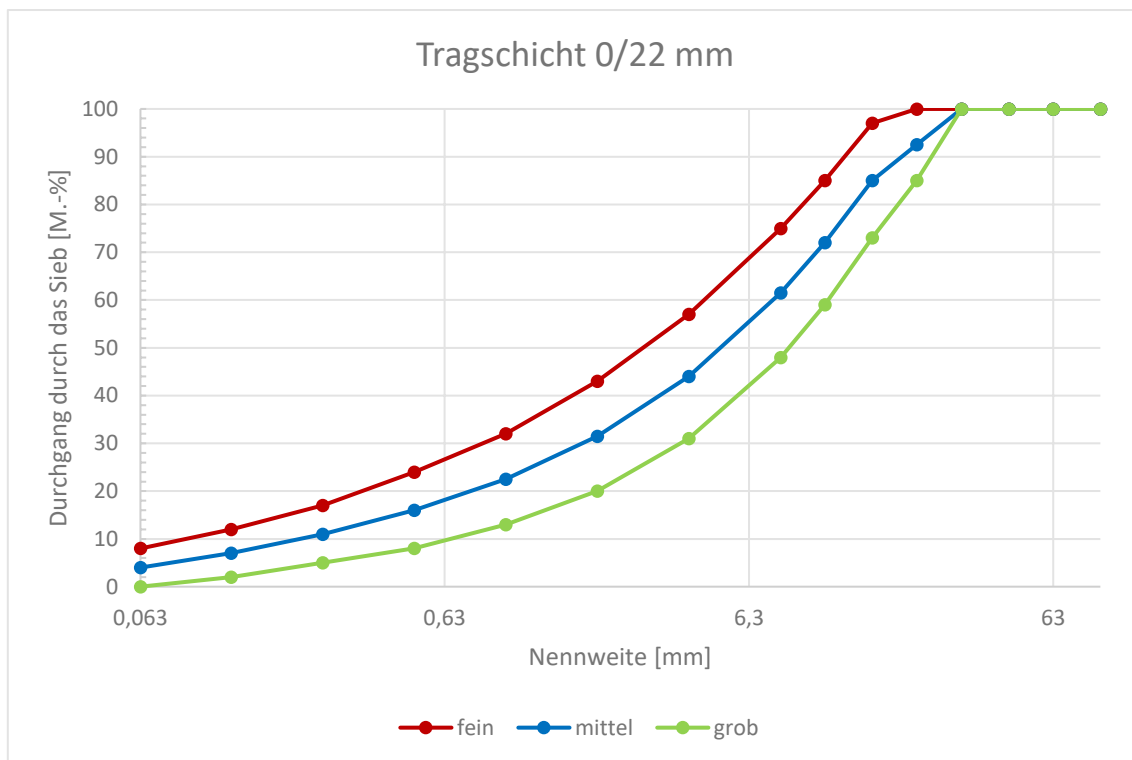


Abbildung A.7: Sieblinien Tragschicht 0/22. Eigene Darstellung nach [13]

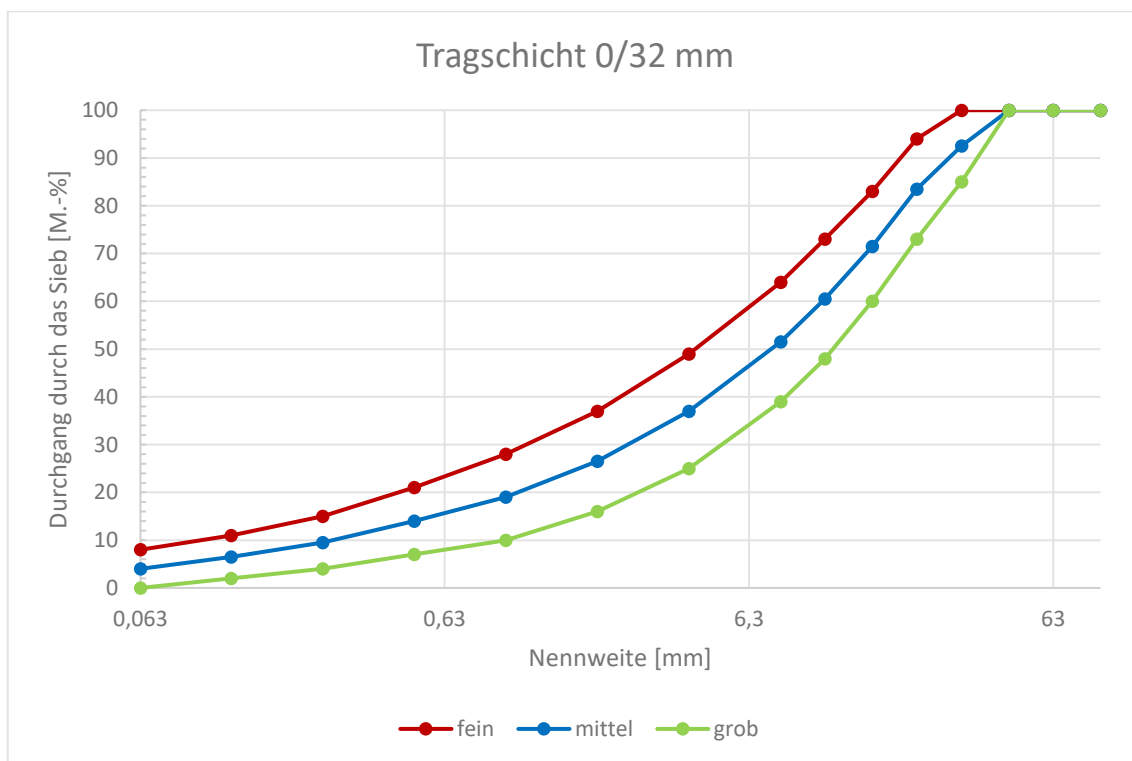


Abbildung A.8: Sieblinien Tragschicht 0/32. Eigene Darstellung nach [13]

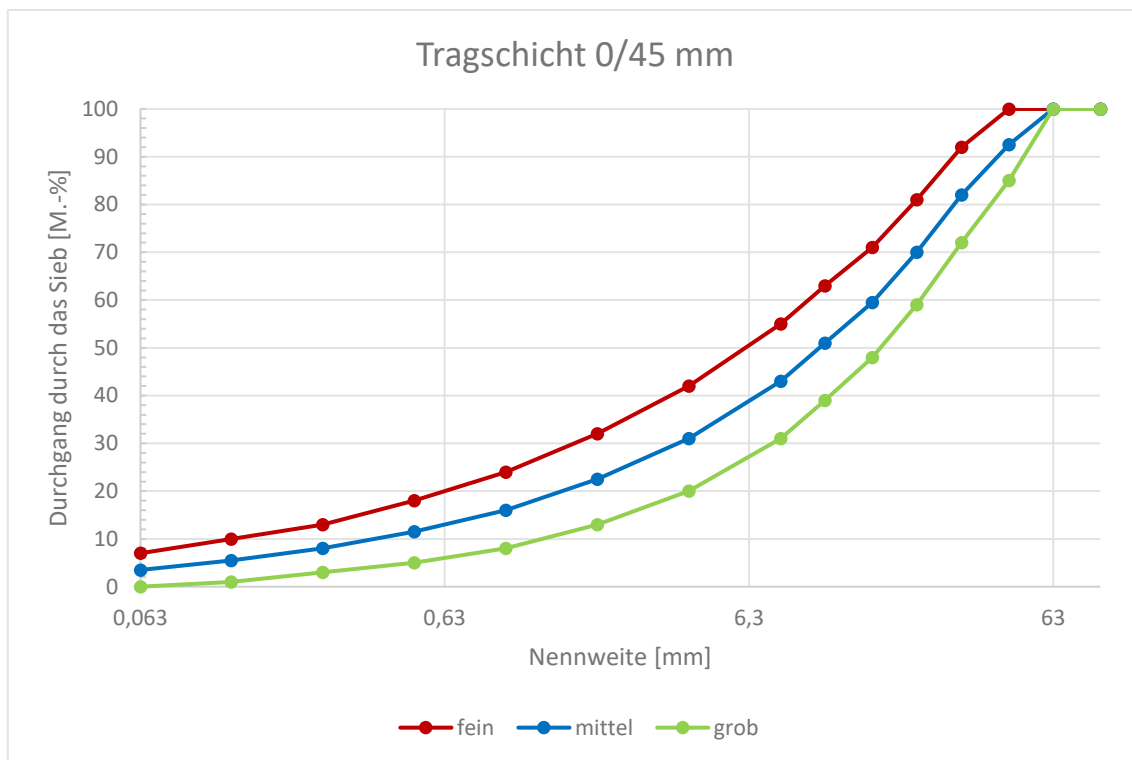


Abbildung A.9: Sieblinien Tragschicht 0/45. Eigene Darstellung nach [13]

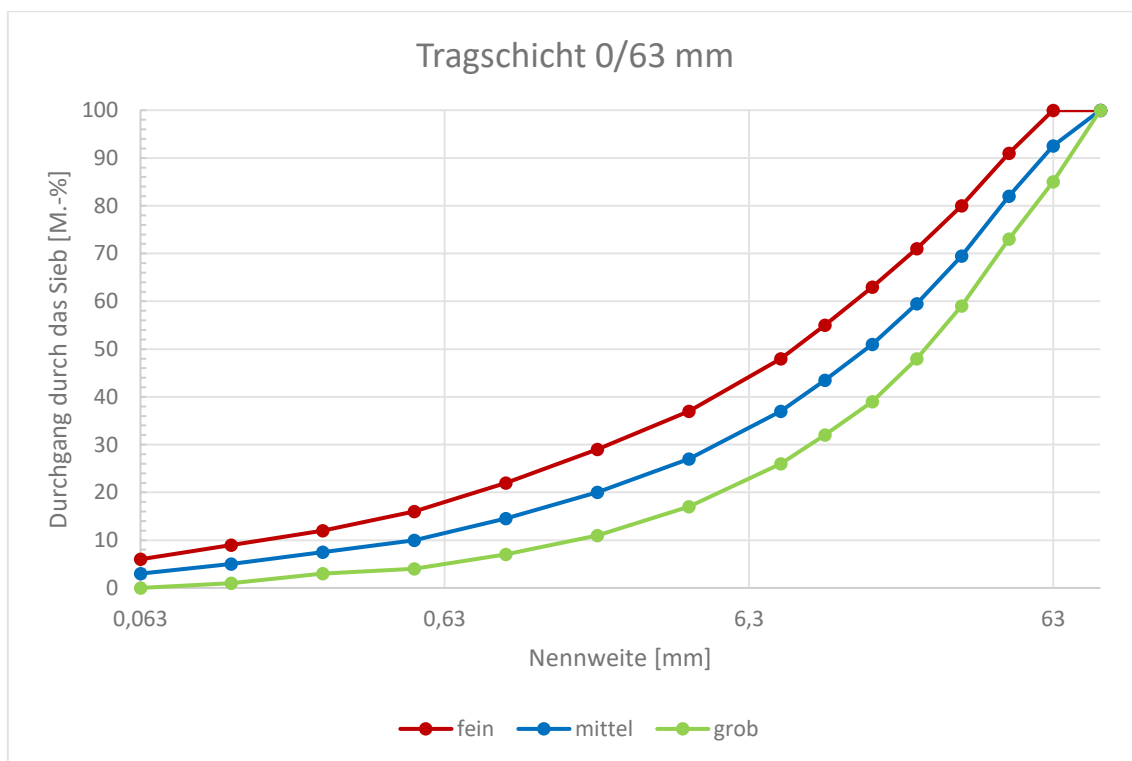


Abbildung A.10: Sieblinien Tragschicht 0/63. Eigene Darstellung nach [13]

Tabelle A.1: Werte Sieblinien Fugenmaterial

Siebweite	Siebdurchgang [M.-%]								
	0/2			0/4			0/8		
[mm]	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0,063	7	5	3	7	5	3	7	5	3
0,125	10	7,5	5	8	6	4	8	6	4
0,25	15	12,5	10	12	9,5	7	12	9,5	7
0,5	30	25	20	20	15	10	20	15	10
1	60	50	40	30	25	20	30	25	20
2	100	92,5	85	45	37,5	30	50	40	30
4	100	100	100	100	92,5	85	70	60	50
8	100	100	100	100	100	100	100	92,5	85
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle A.2: Werte Sieblinien Bettungsmaterial

Siebweite	Siebdurchgang [M.-%]								
	2/4			2/8			4/8		
[mm]	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0,063	2	1	0	2	1	0	2	1	0
0,125	2,75	1,375	0	2,75	1,375	0	2,6	1,3	0
0,25	3,5	1,75	0	3,5	1,75	0	3,2	1,6	0
0,5	4,25	2,125	0	4,25	2,125	0	3,8	1,9	0
1	5	2,5	0	5	2,5	0	4,4	2,2	0
2	15	7,5	0	20	10	0	5	2,5	0
4	100	92,5	85	66	49,5	33	15	7,5	0
8	100	100	100	100	92,5	85	100	92,5	85
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle A.3: Werte Sieblinien Tragschichten

Siebweite [mm]	Siebdurchgang [M.-%]											
	0/22			0/32			0/45			0/63		
	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
0,063	8	4	0	8	4	0	7	3,5	0	6	3	0
0,125	12	7	2	11	6,5	2	10	5,5	1	9	5	1
0,25	17	11	5	15	9,5	4	13	8	3	12	7,5	3
0,5	24	16	8	21	14	7	18	11,5	5	16	10	4
1	32	22,5	13	28	19	10	24	16	8	22	14,5	7
2	43	31,5	20	37	26,5	16	32	22,5	13	29	20	11
4	57	44	31	49	37	25	42	31	20	37	27	17
8	75	61,5	48	64	51,5	39	55	43	31	48	37	26
11,2	85	72	59	73	60,5	48	63	51	39	55	43,5	32
16	97	85	73	83	71,5	60	71	59,5	48	63	51	39
22,4	100	92,5	85	94	83,5	73	81	70	59	71	59,5	48
31,5	100	100	100	100	92,5	85	92	82	72	80	69,5	59
45	100	100	100	100	100	100	100	92,5	85	91	82	73
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92,5	85
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

B. Berechnungen Filterkriterien

Tabelle B.1: Berechnungen Filterkriterien Fuge - Bettung

Fuge	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Bettung	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 2	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 5	1 ≤ D ₁₅ /d ₁₅ ≤ 10
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	2/4 fein	2,00	2,66	1,30	3,35	8,00
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	2/4 mittel	2,13	2,83	1,38	3,56	8,50
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	2/4 grob	2,26	3,01	1,47	3,79	9,04
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	2/4 fein	2,00	2,66	1,13	2,66	8,83
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	2/4 mittel	2,13	2,83	1,20	2,83	9,39
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	2/4 grob	2,26	3,01	1,28	3,01	9,98
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	2/4 fein	2,00	2,66	1,00	2,28	5,66
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	2/4 mittel	2,13	2,83	1,06	2,42	6,01
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	2/4 grob	2,26	3,01	1,13	2,58	6,39
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	2/4 fein	2,00	2,66	0,60	1,25	6,17
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	2/4 mittel	2,13	2,83	0,64	1,33	6,56
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	2/4 grob	2,26	3,01	0,68	1,41	6,97
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	2/4 fein	2,00	2,66	0,55	1,14	4,00
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	2/4 mittel	2,13	2,83	0,58	1,21	4,25
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	2/4 grob	2,26	3,01	0,62	1,28	4,52
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	2/4 fein	2,00	2,66	0,50	1,03	2,83
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	2/4 mittel	2,13	2,83	0,53	1,10	3,01
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	2/4 grob	2,26	3,01	0,57	1,17	3,20
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	2/4 fein	2,00	2,66	0,35	1,33	6,17

Fuge	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Bettung	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 2	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 5	1 ≤ D ₁₅ /d ₁₅ ≤ 10
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	2/4 mittel	2,13	2,83	0,38	1,41	6,56
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	2/4 grob	2,26	3,01	0,40	1,50	6,97
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	2/4 fein	2,00	2,66	0,29	0,94	4,00
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	2/4 mittel	2,13	2,83	0,31	1,00	4,25
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	2/4 grob	2,26	3,01	0,33	1,06	4,52
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	2/4 fein	2,00	2,66	0,25	0,67	2,83
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	2/4 mittel	2,13	2,83	0,27	0,71	3,01
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	2/4 grob	2,26	3,01	0,28	0,75	3,20
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	2/8 fein	1,59	3,14	1,03	3,96	6,35
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	2/8 mittel	2,18	4,03	1,42	5,08	8,73
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	2/8 grob	2,74	5,02	1,78	6,32	10,96
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	2/8 fein	1,59	3,14	0,90	3,14	7,01
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	2/8 mittel	2,18	4,03	1,23	4,03	9,64
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	2/8 grob	2,74	5,02	1,55	5,02	12,10
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	2/8 fein	1,59	3,14	0,79	2,69	4,49
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	2/8 mittel	2,18	4,03	1,09	3,46	6,18
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	2/8 grob	2,74	5,02	1,37	4,30	7,75
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	2/8 fein	1,59	3,14	0,48	1,48	4,90
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	2/8 mittel	2,18	4,03	0,66	1,89	6,73
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	2/8 grob	2,74	5,02	0,83	2,36	8,45
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	2/8 fein	1,59	3,14	0,44	1,34	3,17
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	2/8 mittel	2,18	4,03	0,60	1,72	4,37
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	2/8 grob	2,74	5,02	0,75	2,14	5,48
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	2/8 fein	1,59	3,14	0,40	1,22	2,24
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	2/8 mittel	2,18	4,03	0,55	1,57	3,09
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	2/8 grob	2,74	5,02	0,69	1,95	3,88
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	2/8 fein	1,59	3,14	0,28	1,57	4,90
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	2/8 mittel	2,18	4,03	0,39	2,02	6,73
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	2/8 grob	2,74	5,02	0,48	2,51	8,45
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	2/8 fein	1,59	3,14	0,23	1,11	3,17
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	2/8 mittel	2,18	4,03	0,32	1,43	4,37
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	2/8 grob	2,74	5,02	0,40	1,77	5,48
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	2/8 fein	1,59	3,14	0,20	0,79	2,24
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	2/8 mittel	2,18	4,03	0,27	1,01	3,09
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	2/8 grob	2,74	5,02	0,34	1,25	3,88
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	4/8 fein	4,00	5,32	2,59	6,70	16,00
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	4/8 mittel	4,25	5,66	2,76	7,13	17,01
0/2 fein	0,25	0,79	1,54	4/8 grob	4,52	6,01	2,93	7,58	18,08
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	4/8 fein	4,00	5,32	2,26	5,32	17,67
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	4/8 mittel	4,25	5,66	2,40	5,66	18,78
0/2 mittel	0,23	1,00	1,77	4/8 grob	4,52	6,01	2,55	6,01	19,96
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	4/8 fein	4,00	5,32	2,00	4,56	11,31
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	4/8 mittel	4,25	5,66	2,13	4,85	12,03
0/2 grob	0,35	1,17	2,00	4/8 grob	4,52	6,01	2,26	5,16	12,79

Fuge	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Bettung	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 2	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 5	1 ≤ D ₁₅ /d ₁₅ ≤ 10
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	4/8 fein	4,00	5,32	1,21	2,50	12,34
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	4/8 mittel	4,25	5,66	1,28	2,66	13,12
0/4 fein	0,32	2,13	3,31	4/8 grob	4,52	6,01	1,37	2,82	13,94
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	4/8 fein	4,00	5,32	1,10	2,27	8,00
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	4/8 mittel	4,25	5,66	1,17	2,42	8,50
0/4 mittel	0,50	2,34	3,64	4/8 grob	4,52	6,01	1,24	2,57	9,04
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	4/8 fein	4,00	5,32	1,00	2,07	5,66
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	4/8 mittel	4,25	5,66	1,06	2,20	6,01
0/4 grob	0,71	2,57	4,00	4/8 grob	4,52	6,01	1,13	2,34	6,39
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	4/8 fein	4,00	5,32	0,71	2,66	12,34
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	4/8 mittel	4,25	5,66	0,75	2,83	13,12
0/8 fein	0,32	2,00	5,66	4/8 grob	4,52	6,01	0,80	3,01	13,94
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	4/8 fein	4,00	5,32	0,59	1,88	8,00
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	4/8 mittel	4,25	5,66	0,62	2,00	8,50
0/8 mittel	0,50	2,83	6,82	4/8 grob	4,52	6,01	0,66	2,13	9,04
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	4/8 fein	4,00	5,32	0,50	1,33	5,66
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	4/8 mittel	4,25	5,66	0,53	1,41	6,01
0/8 grob	0,71	4,00	8,00	4/8 grob	4,52	6,01	0,57	1,50	6,39
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	2/8 fein	1,59	3,14	0,27	1,00	1,00
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	2/8 mittel	2,18	4,03	0,37	1,28	1,38
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	2/8 grob	2,74	5,02	0,47	1,60	1,73
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	2/8 fein	1,59	3,14	0,22	0,78	0,73
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	2/8 mittel	2,18	4,03	0,31	1,00	1,00
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	2/8 grob	2,74	5,02	0,39	1,24	1,26
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	2/8 fein	1,59	3,14	0,20	0,63	0,58
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	2/8 mittel	2,18	4,03	0,27	0,80	0,80
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	2/8 grob	2,74	5,02	0,34	1,00	1,00
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	4/8 fein	4,00	5,32	0,57	1,00	1,00
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	4/8 mittel	4,25	5,66	0,60	1,06	1,06
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	4/8 grob	4,52	6,01	0,64	1,13	1,13
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	4/8 fein	4,00	5,32	0,53	0,94	0,94
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	4/8 mittel	4,25	5,66	0,57	1,00	1,00
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	4/8 grob	4,52	6,01	0,60	1,06	1,06
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	4/8 fein	4,00	5,32	0,50	0,88	0,88
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	4/8 mittel	4,25	5,66	0,53	0,94	0,94
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	4/8 grob	4,52	6,01	0,57	1,00	1,00
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	2/8 fein	1,59	3,14	0,45	1,18	0,79
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	2/8 mittel	2,18	4,03	0,62	1,52	1,09
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	2/8 grob	2,74	5,02	0,77	1,89	1,37
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	2/8 fein	1,59	3,14	0,42	1,11	0,75
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	2/8 mittel	2,18	4,03	0,58	1,43	1,03
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	2/8 grob	2,74	5,02	0,73	1,77	1,29
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	2/8 fein	1,59	3,14	0,40	1,05	0,70
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	2/8 mittel	2,18	4,03	0,55	1,34	0,97

Fuge	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Bettung	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 2	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 5	1 ≤ D ₁₅ /d ₁₅ ≤ 10
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	2/8 grob	2,74	5,02	0,69	1,67	1,21
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	4/8 fein	4,00	5,32	1,13	2,00	2,00
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	4/8 mittel	4,25	5,66	1,20	2,13	2,13
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	4/8 grob	4,52	6,01	1,28	2,26	2,26
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	4/8 fein	4,00	5,32	1,06	1,88	1,88
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	4/8 mittel	4,25	5,66	1,13	2,00	2,00
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	4/8 grob	4,52	6,01	1,20	2,13	2,13
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	4/8 fein	4,00	5,32	1,00	1,77	1,77
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	4/8 mittel	4,25	5,66	1,06	1,88	1,88
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	4/8 grob	4,52	6,01	1,13	2,00	2,00
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	4/8 fein	4,00	5,32	0,68	1,69	2,52
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	4/8 mittel	4,25	5,66	0,72	1,80	2,68
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	4/8 grob	4,52	6,01	0,77	1,91	2,85
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	4/8 fein	4,00	5,32	0,56	1,32	1,83
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	4/8 mittel	4,25	5,66	0,60	1,40	1,95
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	4/8 grob	4,52	6,01	0,64	1,49	2,07
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	4/8 fein	4,00	5,32	0,50	1,06	1,46
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	4/8 mittel	4,25	5,66	0,53	1,13	1,55
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	4/8 grob	4,52	6,01	0,57	1,20	1,65

Tabelle B.2: Berechnungen Filterkriterien Bettung - Tragschicht

Bettung	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Tragschicht	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 5	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 25
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/22 fein	0,84	4,49	0,24	1,69
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/22 mittel	1,78	7,54	0,50	2,83
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/22 grob	3,76	11,49	1,06	4,32
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/22 fein	0,84	4,49	0,22	1,59
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/22 mittel	1,78	7,54	0,47	2,67
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/22 grob	3,76	11,49	1,00	4,06
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/22 fein	0,84	4,49	0,21	1,49
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/22 mittel	1,78	7,54	0,45	2,51
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/22 grob	3,76	11,49	0,94	3,82
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/22 fein	0,84	4,49	0,14	1,43
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/22 mittel	1,78	7,54	0,30	2,40
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/22 grob	3,76	11,49	0,64	3,66
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/22 fein	0,84	4,49	0,12	1,11
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/22 mittel	1,78	7,54	0,25	1,87
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/22 grob	3,76	11,49	0,53	2,85
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/22 fein	0,84	4,49	0,11	0,89
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/22 mittel	1,78	7,54	0,22	1,50
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/22 grob	3,76	11,49	0,47	2,29
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/22 fein	0,84	4,49	0,12	0,84
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/22 mittel	1,78	7,54	0,25	1,42
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/22 grob	3,76	11,49	0,53	2,16

Bettung	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Tragschicht	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 5	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 25
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/22 fein	0,84	4,49	0,11	0,79
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/22 mittel	1,78	7,54	0,24	1,33
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/22 grob	3,76	11,49	0,50	2,03
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/22 fein	0,84	4,49	0,11	0,75
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/22 mittel	1,78	7,54	0,22	1,25
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/22 grob	3,76	11,49	0,47	1,91
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/32 fein	1,17	6,65	0,33	2,50
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/32 mittel	2,52	10,99	0,71	4,13
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/32 grob	5,12	16,00	1,45	6,01
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/32 fein	1,17	6,65	0,31	2,35
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/32 mittel	2,52	10,99	0,67	3,89
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/32 grob	5,12	16,00	1,36	5,66
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/32 fein	1,17	6,65	0,29	2,21
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/32 mittel	2,52	10,99	0,63	3,66
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/32 grob	5,12	16,00	1,28	5,32
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/32 fein	1,17	6,65	0,20	2,12
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/32 mittel	2,52	10,99	0,43	3,50
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/32 grob	5,12	16,00	0,87	5,09
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/32 fein	1,17	6,65	0,16	1,65
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/32 mittel	2,52	10,99	0,36	2,73
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/32 grob	5,12	16,00	0,72	3,97
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/32 fein	1,17	6,65	0,15	1,33
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/32 mittel	2,52	10,99	0,31	2,19
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/32 grob	5,12	16,00	0,64	3,19
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/32 fein	1,17	6,65	0,16	1,25
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/32 mittel	2,52	10,99	0,36	2,07
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/32 grob	5,12	16,00	0,72	3,01
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/32 fein	1,17	6,65	0,16	1,18
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/32 mittel	2,52	10,99	0,33	1,94
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/32 grob	5,12	16,00	0,68	2,83
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/32 fein	1,17	6,65	0,15	1,11
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/32 mittel	2,52	10,99	0,31	1,83
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/32 grob	5,12	16,00	0,64	2,66
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/45 fein	1,68	9,87	0,48	3,71
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/45 mittel	3,69	16,26	1,04	6,11
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/45 grob	7,51	23,00	2,12	8,64
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/45 fein	1,68	9,87	0,45	3,49
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/45 mittel	3,69	16,26	0,98	5,75
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/45 grob	7,51	23,00	2,00	8,13
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/45 fein	1,68	9,87	0,42	3,28
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/45 mittel	3,69	16,26	0,92	5,41
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/45 grob	7,51	23,00	1,88	7,65
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/45 fein	1,68	9,87	0,29	3,14
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/45 mittel	3,69	16,26	0,63	5,17

Bettung	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Tragschicht	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 5	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 25
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/45 grob	7,51	23,00	1,27	7,32
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/45 fein	1,68	9,87	0,24	2,45
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/45 mittel	3,69	16,26	0,52	4,03
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/45 grob	7,51	23,00	1,06	5,70
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/45 fein	1,68	9,87	0,21	1,97
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/45 mittel	3,69	16,26	0,46	3,24
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/45 grob	7,51	23,00	0,94	4,58
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/45 fein	1,68	9,87	0,24	1,86
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/45 mittel	3,69	16,26	0,52	3,06
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/45 grob	7,51	23,00	1,06	4,32
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/45 fein	1,68	9,87	0,22	1,75
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/45 mittel	3,69	16,26	0,49	2,87
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/45 grob	7,51	23,00	1,00	4,07
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/45 fein	1,68	9,87	0,21	1,64
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/45 mittel	3,69	16,26	0,46	2,70
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/45 grob	7,51	23,00	0,94	3,82
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/63 fein	2,18	14,00	0,62	5,26
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/63 mittel	4,92	22,79	1,39	8,56
2/4 fein	2,00	2,66	3,54	0/63 grob	10,01	32,31	2,83	12,14
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/63 fein	2,18	14,00	0,58	4,95
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/63 mittel	4,92	22,79	1,31	8,06
2/4 mittel	2,13	2,83	3,76	0/63 grob	10,01	32,31	2,66	11,42
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/63 fein	2,18	14,00	0,55	4,66
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/63 mittel	4,92	22,79	1,23	7,58
2/4 grob	2,26	3,01	4,00	0/63 grob	10,01	32,31	2,50	10,75
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/63 fein	2,18	14,00	0,37	4,45
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/63 mittel	4,92	22,79	0,84	7,25
2/8 fein	1,59	3,14	5,89	0/63 grob	10,01	32,31	1,70	10,28
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/63 fein	2,18	14,00	0,31	3,47
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/63 mittel	4,92	22,79	0,69	5,65
2/8 mittel	2,18	4,03	7,09	0/63 grob	10,01	32,31	1,41	8,01
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/63 fein	2,18	14,00	0,27	2,79
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/63 mittel	4,92	22,79	0,62	4,54
2/8 grob	2,74	5,02	8,00	0/63 grob	10,01	32,31	1,25	6,44
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/63 fein	2,18	14,00	0,31	2,63
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/63 mittel	4,92	22,79	0,70	4,28
4/8 fein	4,00	5,32	7,08	0/63 grob	10,01	32,31	1,41	6,07
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/63 fein	2,18	14,00	0,29	2,47
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/63 mittel	4,92	22,79	0,65	4,03
4/8 mittel	4,25	5,66	7,53	0/63 grob	10,01	32,31	1,33	5,71
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/63 fein	2,18	14,00	0,27	2,33
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/63 mittel	4,92	22,79	0,62	3,79
4/8 grob	4,52	6,01	8,00	0/63 grob	10,01	32,31	1,25	5,37

Tabelle B.3: Berechnungen Filterkriterien Obere Tragschicht – Untere Tragschicht

Obere Tragschicht	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Untere Tragschicht	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 5	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 25
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/22 fein	0,19	2,83	0,02	1,00
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/22 mittel	0,44	5,07	0,04	1,79
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/22 grob	1,22	8,50	0,11	3,01
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/22 fein	0,19	2,83	0,01	0,56
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/22 mittel	0,44	5,07	0,03	1,00
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/22 grob	1,22	8,50	0,08	1,68
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/22 fein	0,19	2,83	0,01	0,33
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/22 mittel	0,44	5,07	0,02	0,60
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/22 grob	1,22	8,50	0,05	1,00
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/32 fein	0,25	4,19	0,02	1,48
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/32 mittel	0,57	7,45	0,05	2,63
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/32 grob	1,78	11,89	0,16	4,20
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/32 fein	0,25	4,19	0,02	0,83
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/32 mittel	0,57	7,45	0,04	1,47
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/32 grob	1,78	11,89	0,11	2,34
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/32 fein	0,25	4,19	0,01	0,49
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/32 mittel	0,57	7,45	0,03	0,88
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/32 grob	1,78	11,89	0,08	1,40
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/32 fein	0,25	4,19	0,01	1,00
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/32 mittel	0,57	7,45	0,03	1,78
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/32 grob	1,78	11,89	0,10	2,84
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/32 fein	0,25	4,19	0,01	0,56
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/32 mittel	0,57	7,45	0,02	1,00
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/32 grob	1,78	11,89	0,08	1,60
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/32 fein	0,25	4,19	0,01	0,35
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/32 mittel	0,57	7,45	0,02	0,63
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/32 grob	1,78	11,89	0,06	1,00
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/45 fein	0,33	6,13	0,03	2,17
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/45 mittel	0,86	10,74	0,08	3,80
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/45 grob	2,44	17,01	0,22	6,01
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/45 fein	0,33	6,13	0,02	1,21
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/45 mittel	0,86	10,74	0,05	2,12
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/45 grob	2,44	17,01	0,15	3,35
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/45 fein	0,33	6,13	0,01	0,72
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/45 mittel	0,86	10,74	0,04	1,26
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/45 grob	2,44	17,01	0,11	2,00
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/45 fein	0,33	6,13	0,02	1,46
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/45 mittel	0,86	10,74	0,05	2,56
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/45 grob	2,44	17,01	0,14	4,06
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/45 fein	0,33	6,13	0,01	0,82
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/45 mittel	0,86	10,74	0,04	1,44
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/45 grob	2,44	17,01	0,10	2,28

Obere Tragschicht	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Untere Tragschicht	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 5	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 25
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/45 fein	0,33	6,13	0,01	0,52
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/45 mittel	0,86	10,74	0,03	0,90
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/45 grob	2,44	17,01	0,08	1,43
0/45 fein	0,33	6,13	25,36	0/45 fein	0,33	6,13	0,01	1,00
0/45 fein	0,33	6,13	25,36	0/45 mittel	0,86	10,74	0,03	1,75
0/45 fein	0,33	6,13	25,36	0/45 grob	2,44	17,01	0,10	2,78
0/45 mittel	0,86	10,74	34,88	0/45 fein	0,33	6,13	0,01	0,57
0/45 mittel	0,86	10,74	34,88	0/45 mittel	0,86	10,74	0,02	1,00
0/45 mittel	0,86	10,74	34,88	0/45 grob	2,44	17,01	0,07	1,58
0/45 grob	2,44	17,01	45,00	0/45 fein	0,33	6,13	0,01	0,36
0/45 grob	2,44	17,01	45,00	0/45 mittel	0,86	10,74	0,02	0,63
0/45 grob	2,44	17,01	45,00	0/45 grob	2,44	17,01	0,05	1,00
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/63 fein	0,42	8,81	0,04	3,11
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/63 mittel	1,07	15,26	0,10	5,39
0/22 fein	0,19	2,83	11,20	0/63 grob	3,17	23,83	0,28	8,43
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/63 fein	0,42	8,81	0,03	1,74
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/63 mittel	1,07	15,26	0,07	3,01
0/22 mittel	0,44	5,07	16,00	0/63 grob	3,17	23,83	0,20	4,70
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/63 fein	0,42	8,81	0,02	1,04
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/63 mittel	1,07	15,26	0,05	1,79
0/22 grob	1,22	8,50	22,40	0/63 grob	3,17	23,83	0,14	2,80
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/63 fein	0,42	8,81	0,02	2,10
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/63 mittel	1,07	15,26	0,06	3,64
0/32 fein	0,25	4,19	17,01	0/63 grob	3,17	23,83	0,19	5,69
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/63 fein	0,42	8,81	0,02	1,18
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/63 mittel	1,07	15,26	0,04	2,05
0/32 mittel	0,57	7,45	23,71	0/63 grob	3,17	23,83	0,13	3,20
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/63 fein	0,42	8,81	0,01	0,74
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/63 mittel	1,07	15,26	0,03	1,28
0/32 grob	1,78	11,89	31,50	0/63 grob	3,17	23,83	0,10	2,01
0/45 fein	0,33	6,13	25,36	0/63 fein	0,42	8,81	0,02	1,44
0/45 fein	0,33	6,13	25,36	0/63 mittel	1,07	15,26	0,04	2,49
0/45 fein	0,33	6,13	25,36	0/63 grob	3,17	23,83	0,13	3,89
0/45 mittel	0,86	10,74	34,88	0/63 fein	0,42	8,81	0,01	0,82
0/45 mittel	0,86	10,74	34,88	0/63 mittel	1,07	15,26	0,03	1,42
0/45 mittel	0,86	10,74	34,88	0/63 grob	3,17	23,83	0,09	2,22
0/45 grob	2,44	17,01	45,00	0/63 fein	0,42	8,81	0,01	0,52
0/45 grob	2,44	17,01	45,00	0/63 mittel	1,07	15,26	0,02	0,90
0/45 grob	2,44	17,01	45,00	0/63 grob	3,17	23,83	0,07	1,40
0/63 fein	0,42	8,81	37,04	0/63 fein	0,42	8,81	0,01	1,00
0/63 fein	0,42	8,81	37,04	0/63 mittel	1,07	15,26	0,03	1,73
0/63 fein	0,42	8,81	37,04	0/63 grob	3,17	23,83	0,09	2,71
0/63 mittel	1,07	15,26	49,54	0/63 fein	0,42	8,81	0,01	0,58

Obere Tragschicht	d ₁₅	d ₅₀	d ₈₅	Untere Tragschicht	D ₁₅	D ₅₀	D ₁₅ /d ₈₅ ≤ 5	D ₅₀ /d ₅₀ ≤ 25
0/63 mittel	1,07	15,26	49,54	0/63 mittel	1,07	15,26	0,02	1,00
0/63 mittel	1,07	15,26	49,54	0/63 grob	3,17	23,83	0,06	1,56
0/63 grob	3,17	23,83	63,00	0/63 fein	0,42	8,81	0,01	0,37
0/63 grob	3,17	23,83	63,00	0/63 mittel	1,07	15,26	0,02	0,64
0/63 grob	3,17	23,83	63,00	0/63 grob	3,17	23,83	0,05	1,00

C. Berechnungen Krümmungszahlen

Tabelle C.1: Berechnungen Krümmungszahlen

Versuch	Material	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	C _c
1	BM (0)	1,41	2,26	2,89	1,25
	BM (1)	1,30	2,25	2,88	1,35
	FM (0)	0,13	0,50	1,00	2,00
	FM (1)	0,09	0,50	1,07	2,66
2	BM (0)	2,17	2,55	3,26	0,92
	BM (1)	2,12	2,51	3,23	0,92
	FM (0)	0,13	0,50	1,00	2,00
	FM (1)	0,10	0,49	1,05	2,43
3	BM (0)	1,41	2,26	2,89	1,25
	BM (1)	1,52	2,28	2,90	1,18
	FM (0)	0,25	0,71	1,36	1,47
	FM (1)	0,29	0,81	1,56	1,49
4	BM (0)	2,17	2,55	3,26	0,92
	BM (1)	2,13	2,53	3,29	0,92
	FM (0)	0,25	0,71	1,36	1,47
	FM (1)	0,25	0,76	1,56	1,48
5	BM (0)	1,41	2,26	2,89	1,25
	BM (1)	1,43	2,27	2,90	1,25
	FM (0)	0,18	1,00	2,42	2,34
	FM (1)	0,28	1,32	2,56	2,43
6	BM (0)	2,17	2,55	3,26	0,92
	BM (1)	2,14	2,53	3,25	0,92
	FM (0)	0,18	1,00	2,42	2,34
	FM (1)	0,31	1,39	2,61	2,36
7	BM (0)	1,41	2,26	2,89	1,25
	BM (1)	1,50	2,30	2,99	1,18
	FM (0)	0,50	2,00	2,92	2,74
	FM (1)	0,73	2,18	3,14	2,07
8	BM (0)	2,17	2,55	3,26	0,92
	BM (1)	2,15	2,53	3,25	0,92
	FM (0)	0,50	2,00	2,92	2,74
	FM (1)	0,72	2,22	3,11	2,20

Versuch		Material	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	C _c
9	BM (0)	2/8 fein	1,26	2,33	3,65	1,17
	BM (1)		1,15	2,38	3,68	1,33
	FM (0)	0/4 fein	0,18	1,00	2,42	2,34
	FM (1)		0,41	1,74	2,68	2,78
10	BM (0)	2/8 grob	2,47	3,76	5,73	1,00
	BM (1)		2,33	3,46	5,50	0,93
	FM (0)	0/4 fein	0,18	1,00	2,42	2,34
	FM (1)		0,40	1,90	2,71	3,35
11	BM (0)	2/8 fein	1,26	2,33	3,65	1,17
	BM (1)		1,44	2,47	3,76	1,13
	FM (0)	0/4 grob	0,50	2,00	2,92	2,74
	FM (1)		0,84	2,23	3,13	1,87
12	BM (0)	2/8 grob	2,47	3,76	5,73	1,00
	BM (1)		2,36	3,47	5,52	0,93
	FM (0)	0/4 grob	0,50	2,00	2,92	2,74
	FM (1)		0,61	2,12	3,03	2,42
13	BM (0)	2/8 fein	1,26	2,33	3,65	1,17
	BM (1)		1,04	2,22	3,36	1,40
	FM (0)	0/8 fein	0,18	1,00	2,83	2,00
	FM (1)		0,43	1,69	3,81	1,72
14	BM (0)	2/8 grob	2,47	3,76	5,73	1,00
	BM (1)		2,12	3,22	5,35	0,91
	FM (0)	0/8 fein	0,18	1,00	2,83	2,00
	FM (1)		0,52	1,90	4,09	1,71
15	BM (0)	2/8 fein	1,26	2,33	3,65	1,17
	BM (1)		1,31	2,41	3,68	1,21
	FM (0)	0/8 grob	0,50	2,00	4,88	1,64
	FM (1)		0,89	2,83	5,39	1,68
16	BM (0)	2/8 grob	2,47	3,76	5,73	1,00
	BM (1)		2,23	3,43	5,51	0,95
	FM (0)	0/8 grob	0,50	2,00	4,88	1,64
	FM (1)		1,00	2,88	5,64	1,46
17	BM (0)	4/8 fein	2,83	4,52	5,77	1,25
	BM (1)		3,23	4,56	5,82	1,10
	FM (0)	2/4 fein	1,41	2,26	2,89	1,25
	FM (1)		1,90	2,34	2,98	0,97
18	BM (0)	4/8 grob	4,34	5,11	6,52	0,92
	BM (1)		4,27	5,04	6,47	0,92
	FM (0)	2/4 fein	1,41	2,26	2,89	1,25
	FM (1)		2,01	2,35	2,98	0,92
19	BM (0)	4/8 fein	2,83	4,52	5,77	1,25
	BM (1)		3,05	4,51	5,79	1,15
	FM (0)	2/4 grob	2,17	2,55	3,26	0,92
	FM (1)		2,16	2,55	3,26	0,92

Versuch		Material	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	C _c
20	BM (0)	4/8 grob	4,34	5,11	6,52	0,92
	BM (1)		4,30	5,09	6,56	0,92
	FM (0)	2/4 grob	2,17	2,55	3,26	0,92
	FM (1)		2,16	2,57	3,31	0,92