Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/ Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Bewertung der Filterstabilität von Bettungs- und Fugenmaterial bei Pflasterungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald BLAB

Und

Proj. Ass. Dipl. – Ing. Torsten HESSMANN

Institut für Verkehrswissenschaften,

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Aleksandar MLADENOV

E 610/1029209

Buxton 31A, A, 14, 61

1618 Sofia

Wien, am eigenhändige Unterschrift

Kurzfassung

Bewertung der Filterstabilität von Bettungs- und Fugenmaterial bei Pflasterungen

Die Pflasterbefestigungen sind die älteste Bauweise im Bereich des Straßenwesens. Aus unterschiedlichen Gründen wie Wirtschaftlichkeit, Ökologie und Kulturgeschichte werden in vielen Städten und auf Landwegen Pflasteroberflächen hergestellt. Mit den immer steigenden Verkehrsbelastungen und klimatischen Beanspruchungen wird eine immer steigende Zahl von Schadensfällenbeobachtet.Diese Probleme sind auf mangelhafte Planung, ungünstige Materialien oder fehlerhafte Bauprozesse zurückzuführen. Damit sind in der Regel hohe Kosten verbunden.

Die Bedeutung der Filterstabilität zwischen der Bettung und der Fugenfüllung ist für einen schadensfreien Zustand bedeutsam. Die Bewegungen von Körnern unter der Wirkung der Prozesse Erosion, Suffosion und Kolmatation aus einer Schicht zu einer darunter liegenden führen zur Entleerung der Fugen und sind in allen Fällen zu vermeiden.Dieser Prozess führt oft zu unterschiedlichen Schäden bei den Pflasterbefestigungen, wie Praxiserfahrungen der letzten Jahre gezeigt haben. Deshalb entsteht die Notwendigkeit, neue Versuche durchzuführen, um die schon existierenden Filterregeln zu überprüfen und gegebenenfalls zu ergänzen.

Die vorliegende Diplomarbeit ist ein Teil von einem größeren Projekt, dessen Ziel die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung und Bewertung der Filterstabilität ist. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Pflasterbauweise (Herstellung, Konstruktion und Materialien), die Beanspruchungen von Pflasterflächen sowie die Bedeutung von Fugen- und Bettungsmaterial und insbesondere die Filterstabilität auf ihr Verhalten ausführlich beschrieben. Dazu werden die Filterkriterien einiger Ländern bewertet.

Mit der Konzeption von Versuchen zur Ermittlung der Filterkriterien und die Durchführung der ersten Versuche wird die Zielsetzung verfolgt, ein Konzept zur Bestimmung der Filterstabilität von Fugen- und Bettungsmaterial aufzustellen.

Abstract

Evaluation of filter stability of bedding and jointing material

The block pavements are the oldest construction in the road system. For various reasons such as economy, ecology and cultural history pavement surfaces are produced in many cities and on country roads. With the ever increasing traffic loads and climatic stresses an ever increasing number of cases of damage is observed. These problems are due to poor planning, unfavorable materials or faulty construction processes. High costs are usually associated with the abovementioned issues.

The importance of filter stability between the bed material and the joint filling is enormous for damage-free condition. The movements of grains under the action of erosion processes, suffusion and colmation from one layer to the underlying one cause the emptying of the joints and should be avoided in all cases. This process often leads to different damages in the block pavements, which practical experiences of recent years have shown. Therefore, the need arises to conduct new tests to check the already existing filter rules and complete them if necessary.

This thesis is part of a larger project whose goal is the development of methods for the determination and evaluation of the filter stability. In this thesis, the pavement construction (manufacturing, construction and materials), the stresses of paved areas and the importance of joints and bedding material and in particular the filter stability would be described in detail in accordance with their behavior. The filter criteria of some countries will be also assessed.

With the design of experiments to determine the filter criteria and the implementation of the first experiment the objective is pursued to establish a concept for determining the filter stability of joints and bedding material.

Vorwort

Die folgende Diplomarbeit wurde im Institut für Verkehrswissenschaften an der Technischen Universität Wien verfasst. Diese Diplomarbeit bildet den Abschluss meines Bauingenieurstudiums.

Ich möchte mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald Blab herzlich bedanken, der es mir ermöglichte, meine Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften in dem Forschungsbereich Straßenwesen durchzuführen.

Weiter möchte ich mich besonders bei Herrn Proj.-Ass. Dipl.-Ing. Torsten Hessmann für seine ausgezeichnete Betreuung und das exzellente kollegiale Arbeitsklima bedanken. Er half mir die ganze Zeit und war immer da, wenn ich Fragen oder Probleme hatte.

Außerdem möchte ich mich auch herzlich bei dem ganzen Laborteam für die Mithilfe und für das nette und kollegiale Arbeitsklima bedanken.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, meiner Mutter Tanya, meinem Vater Nikolay, und meiner Schwester Yana, die mir im Laufe meines Studiums die schwere Last des Alltags von den Schultern genommen haben.

Für die Unterstützung meines Studiums bedanke ich mich bei der Fakultät für Straßenbau an der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie – Sofia.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Studienkollegen und Freunden für die Unterstützung bedanken.

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung 7

2 Grundlagen 9

2.1. Geschichte der Pflasterbefestigungen 9

2.2. Herstellung und Konstruktion von Pflasterbefestigungen 10

2.2.1. Bauweise 10

2.2.1.1. Ungebundene Bauweise 10

2.2.1.2. Gebundene Bauweise 10

2.2.1.3. Gemischte Bauweisen 11

2.2.2. Konstruktionselemente 11

2.2.2.1 Untergrundund Unterbau 12

2.2.2.2. Oberbau 13

2.2.3. Konstruktion von Pflasterdecken 13

2.2.3.1. Nicht klassifizierte Flächen 14

2.2.3.2. Bauklassen VI bis III 15

2.2.4. Herstellung der Pflasterdeckschicht 16

2.2.4.1. Tragschichten 16

2.2.4.2. Bettung 17

2.2.4.3. Pflasterung 18

2.2.4.4. Fugen 19

2.3. Anforderungen an das Material 20

2.3.1. Tragschichten 20

2.3.2 Pflaster 21

2.3.3 Bettung 23

2.3.4 Fugen 24

2.3.5. Prüfungen für Pflasterbefestigungen 25

2.4. Beanspruchungen von Pflasterbefestigungen 26

2.4.1. Klimatische Beanspruchungen 26

2.4.1.1. Wasser 26

2.4.1.2. Frost 27

2.4.1.3 Hitze 27

2.4.1.4 Wind 27

2.4.2. Dynamische Belastungen 27

2.4.3. Schäden 28

2.5. Wirkungsweise Bettung-Fuge 29

3 Filterstabilität 30

3.1. Definition von Filterstabilität 30

3.2. Definition und Einfluss der Begriffe Erosion, Kontakterosion, Suffosion und Kolmation 31

3.3. Methoden zur Ermittlung der Filterstabilität zwischen zwei benachbarten Schichten. 33

3.3.1 Filterregeln von Terzaghi 33

3.3.2. Filterregeln von Cistin/Ziems 34

3.3.3. Weitere Filterregeln 35

3.4. Nationale und internationale Filterkriterien von Pflasterbefestigungen 36

3.5. Untersuchungen zur Bestimmung von Filterkriterien 37

4 Voruntersuchungen zur Bestimmung der Grenzbedingungen 38

4.1. Zielsetzung und Versuchskonzept 38

4.2. Versuchsapparatur und Materialien 38

4.3.Versuchsaufbau 40

4.4.Vorversuchsdurchführung 41

4.4.1. Vorversuch 1 41

4.4.2. Vorversuch 2 44

4.4.3. Vorversuch 3 46

4.4.4. Vorversuch 4 49

4.4.5. Vorversuch 5 51

4.4.6. Vorversuch 6 54

4.4.7. Vorversuch 7 55

4.4.8. Zusammenfassung 57

4.5. Analyse und Bewertung der Voruntersuchungen 59

4.6. Grenzbedingungen der Hauptversuche 60

4.6.1. Dicke der Schichten 60

4.6.2. Bewässerung 61

4.6.3. Amplitude 61

4.6.4. Versuchsdauer 62

4.6.5. Verdichtung 62

5 Hauptuntersuchungen 64

5.1 Versuchsaufbau und Plan der Versuche 64

5.2. Untersuchungsmaterialien 65

5.3. Versuchsdurchführung 69
5.4. Ergebnisse 70
5.4.1. Wasserdurchlässigkeit 70
5.4.2. Korngrößenverteilung 71
5.4.3 Verluste an Material 75
6 Analyse 76
6.1. Wasserdurchlässigkeit 76
6.2. Korngrößenverteilung und Filterkriterien 77
6.3. Verluste an Materialien 78
7 Schlussfolgerung 79
8 Zusammenfassung 81
9 Tabellenverzeichnis 82
10 Abbildungsverzeichnis 84
11 Gleichungsverzeichnis 86
12 Literaturverzeichnis 87

1 Einleitung

Die Flächenbefestigungen mit Pflasterdecken haben im Straßenbau eine große Bedeutung. In Österreich beträgt die gesamte Länge des Straßennetzes 124.510 km, welches sich aus 2.180 km Autobahnen und Schnellstraßen (2%), 33.660 km Landesstraßen(27%) und 88.670 km Gemeindestraßen (71%) zusammensetzt. Insgesamt verwendet man die Pflasterbefestigungen in mehr als 40% der Gemeindestraßen. Der Prozentanteil nimmt in den städtischen Bereichen rasch zu. In Deutschland betragen nach Angaben des Statistischen Bundesamtes die Pflasterbefestigungen rund 48% der gesamten befestigten Fläche. Sie sind nach den Asphaltdeckschichten die weitverbreitetste Bauweise und werden wegen wesentlicher Vorteile im Bereich untergeordneter Straßenklassen und bei landwirtschaftlichen Wegen bevorzugteingesetzt. Als solche Vorteile können die geringeren Herstellungs- und Unterhaltungskosten der Pflasterbefestigungen im Unterschied zu den Asphalt- und Betondeckschichten genannt werden. Aus einem Kostenvergleich der Radwege in Hamburg wird deutlich, dass Asphaltbefestigungen um 20 % höhere Neubaukosten und um 50 % höhere jährliche Erhaltungskosten (Bauberatung Zement, S 17, 1. 2002) aufweisen. Ein großer Teil der Pflasterbefestigungen befindet sich in den kommunalen Bereichen der Städte, wo ständige Reparaturen der unterirdischen Leitungen der öffentlichen Versorgung stattfinden. Hier spielen die minimalen Wiederherstellungskosten eine wesentliche Rolle. Bei einer fachgerechten Bauausführungweisen die Straßen eine gute Nachhaltigkeit auf, wie sich am Beispiel der Wiener Höhenstraße zeigt, die in den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts mit heimischem Granitkleinstein errichtet wurde und heute noch, 80 Jahre später, teilweise noch im Originalzustand unter Verkehr ist. Die Pflaster sind zudem wiederverwendbar und deshalb sehr günstig bei Reparaturen. Außerdem weisen Pflasterbefestigungen aus ästhetischen Gesichtspunkten vielfältige Möglichkeiten hinsichtlich Formen und Farben auf.

Die Pflasterbefestigungen besitzen auch einige wesentliche Nachteile hinsichtlich des Verformungswiderstandes und der Schichtsteifigkeit. Deshalb dürfen Pflasterdeckschichten nur bis zur Lastklasse III hergestellt werden. Bei den hochbelasteten Klassen ist diese Bauweise nicht zu verwenden.

Aus Erfahrungen der letzten Jahre, traten Schadensfälle mit Pflasterbefestigungen immer häufiger auf.Folgende Probleme treten besonders bei den höher belasteten Bauklassen III und IV auf: Verformungen in horizontaler oder vertikaler Richtung, Aufkippungen von einzelnen oder mehreren Pflastersteinen, Zerstörungen der Kanten der Steine, geringere Wasserdurchlässigkeit und Anderes. Es ist nicht immer möglich, die genaue Ursache dieser Schäden richtig abzuschätzen. Große Verformungen, die Bildung von Spurrinnen und Aushebungen entstehen durch stetig steigende Lasten auf Grund des Verkehrs und des Einflusses des fließenden Wassers.

Das Verhalten der Pflasterbefestigung hängt von dem Zusammenwirkender drei Komponenten - dem Bettungsmaterial, dem Fugenmaterial und den Pflastersteinen ab. Um ein nachhaltiges System zu schaffen, muss das Fugenmaterial in den Fugen ständig verbleiben, um die Bewegungsfreiheit zwischen den Einzelpflastersteinen zu gewährleisten und horizontale Kräfte zu übergeben. Nach den Daten der Fachvereinigung Betonprodukte für Straßen-, Landwirtschaft- und Gartenbau e.V. aus dem Jahr 2003, verursachen die nicht passenden Fugen- und Bettungsmaterialien bei Pflasterbefestigungen Verluste um 18,5 Mio. Euro jährlich für Sanierung und Reparaturen der mangelhaften Straßen. Als wichtiger Faktor für die Mitwirkung zwischen Fugen- und Bettungsmaterial kann die Filterstabilität genannt werden, die die Wanderung von Teilchen zwischen den beiden Materialien verhindert. Bisher gebrauchte Filterkriterien von z.B. Terzaghi und von Cistin/Ziems berücksichtigen nur die Wirkung des fließenden Wassers ohne die Beanspruchungen von Verkehrslasten. Die Kriterien in der RVS 08.18.01 in Österreich sowie der ZTV P-StB 06 in Deutschland basieren auf diesen Überlegungen und bilden die reale Beanspruchungssituation nur unzureichend ab.

Diese Diplomarbeit verfolgt das Ziel, einen neuen konventionellen Versuch für die Überprüfung der existierenden Filterkriterien zu entwickeln. Neben dem primären Ziel können noch Ergänzungen bzw. Verbesserungen dieser Regeln gemacht werden. Zu diesem Zweck werden auch die Grenzbedingungen ermittelt, die Versuchsapparatur eingebaut und die ersten Untersuchungen durchgeführt. Nach einer ausführlichen Analyse und Bewertung der Ergebnisse können wir zum Entschluss kommen, ob die Richtlinien verbessert werden können.

2 Grundlagen

2.1. Geschichte der Pflasterbefestigungen

Das Wort „Pflaster“ stammt aus dem griechischen Wort „εμπλαστρον“, was ein Stückchen Leinwand bedeutet. Schon seit Jahrhunderten werden die ersten befestigten Wege mit Pflaster (zu dieser Zeit waren das sehr große Natursteine) hergestellt. Vermutlich befindet sich die älteste Pflasterstraße der Welt mit einer Länge von 12 Kilometer in der Wüste 70 km südwestlich von Kairo, Ägypten (Pittochka, 2008). Reste von Pflasterflächen wurden auch in Mesopotamien gefunden und die zeigen, dass die Anwendung der Pflastertechnik um das Jahr 4000 v. Chr. schon bekannt war. Die Ägypter und die Babylonier nutzten Pflasterbeläge für den leichteren Transport von Waren.

Im Römischen Reich wurde die Pflasterbautechnik gründlich verbessert. Scarre (2004) schreibt in seinem Buch “Die siebzig Weltwunder”, dass die Römer die Vorteile des Pflasterbelags für den Bau von Hauptstraßennutzten und bemerkten die Wichtigkeit eines tragfähigen Unterbaus. Sie wählten je nach Bodenverhältnissen zwischen zwei verschiedenen Bauweisen aus. In Gelände mit schwächerem Untergrund erstellten sie eine Tragkonstruktion aus Längs- und Querhölzern und erst dann wurden die Pflaster verlegt. Wenn der Untergrund fest war, schütteten die Römer zuerst ganz grobe Bruchsteine, dann Kies oder Schotter und zuletzt Sand auf. In das Sandbett wurden daraufhin die Pflastersteine verlegt. Die Arbeiter verlegten Natursteine aus Basalt oder Kalkstein in unregelmäßiger Anordnung (sogenannter wilder Verband) und bauten eine Querneigung zur Entwässerung der Fahrbahn ein. Zu dieser Zeit konnte man auch bis zu 5 Zentimeter Fugen beobachten. Ein berühmtes Beispiel für eine pflasterbefestigte römische Straße ist Via Apia. Sie wurde 312 v. Chr. angelegt. Sie beginnt in Rom an der Porta San Sebastiano, führte ursprünglich über 195 Kilometer bis Capua und wurde um 265 v. Chr. bis Brindisi verlängert, das zum bedeutendsten Handelsplatz für Waren und Sklaven aus dem Orient aufstieg.

Nach dem Fall des Römischen Reiches nahm die Bedeutung der Pflasterbefestigungen in Europa ab. Nur in den Städten Europas wurden Straßen und Plätze gepflastert, die Landstraßen blieben unbefestigt. Mit der Industriellenrevolution und der Zunahme des Verkehrs nahm der Pflasterbau wieder zu. So erschienen in der Mitte des 19. Jahrhunderts erste Richtlinien zum richtigen Einbau von Straßenpflaster. Einige Inhalte davon sind noch heute gültig und zwar sind das die Techniken zur richtigen Verlegung der Pflaster, Position der Fugen zueinander, Größe der einzelnen Steine usw.

Eisenmann (2003) beschäftigt sich mit der örtlichen Verwendung von Materialien bei den pflasterbefestigten Straßen. Zuerst wurden nur Natursteine für Pflastereinbau verwendet (Steinbruch, Flussbett, Feldsteine). Ihre Benutzung war aber hauptsächlich regional – Entfernungen von 100 bis 150 Kilometer von den Steinbruchorten. Falls solche Natursteine nicht in der Nähe des Bauplatzes vorhanden waren, wie beispielsweise in Norddeutschland oder in den Niederlanden, wurden Steine aus Ziegel oder Klinker gefertigt. „Die Idee Natursteine durch Betonsteine zu ersetzen hat sich erst nach 1950 entscheidend durchgesetzt, wobei als Vorteil neben der möglichen Variantenvielfalt, die Maßhaltigkeit und wirtschaftliche Verlegbarkeit mit Hilfsgeräten sowie die Verwendung von „ungelernten Arbeitskräften“ gesehen wurde“(Eisenmann, 2003).

Heutzutage ist die Pflasterung ganzer Straßen nicht mehr möglich, hauptsächlich wegen der steigenden Belastungen und höheren Geschwindigkeiten. Diese neuen Anforderungen sind für die Pflasterdeckschichten ungünstig. Außerdem sind die horizontalen Beanspruchungen durch Schubkräfte auf dem Verband in den Anfahr-, Brems- oder Kurvenbereichen nicht aufzunehmen. Mit der zunehmenden Bedeutung der Stadtkulturpflege und der Verkehrsberuhigung seit den 1970er Jahren werden Pflasterbefestigungen eher in Fußgängerzonen, auf Radwegen, in Altstädten und auf Plätzen angelegt.

2.2. Herstellung und Konstruktion von Pflasterbefestigungen

2.2.1. Bauweise

Mit der Zeit haben sich in der Praxis verschiedene Arten und Bauweisen des Pflasterbaus entwickelt, hauptsächlich wird aber die ungebundene Bauweise ausgeführt und in Richtlinien festgeschrieben. In der RVS 08.18.01 ist das klar definiert: „Die ungebundene Bauweise stellt die Regelbauweise dar und hat sich über viele Jahrzehnte bewährt. Die gebundene und die gemischte Bauweisen stellen Sonderbauweisen dar und sind als solche zu planen und auszuführen.“ Nicht normierte Bauweisen weisen üblicherweise geringeres Qualitätsniveau auf.

2.2.1.1. Ungebundene Bauweise

Die ungebundene Bauweise zählt heute zur Standardbauweise und ist die älteste Pflasterbautechnik. Die Steine werden auf ein „loses“ Bett aus Splitt, Sand oder Granulat mit bestimmten Korngruppen verlegt, die in den deutschen Richtlinien als Sand 0/2 mm oder 0/4 mm, oder Brechsand-Splitt-Gemisch 0/5 mm, 0/8 mm oder 0/11 mm angegeben sind. In den Normen, die in der Vergangenheit benutzt wurden, stehen auch Splitte mit Korngrößenverteilungen 1/3 mm oder 2/5 mm, die aber aus unterschiedlichen Gründen in den neueren Ausgaben nicht mehr angewendet werden. In der RVS 08.18.01 sind dabei Gesteinskörnungen der Korngruppen 2/4, 4/8 und 8/11, sowie Gemische aus diesen Korngruppen zulässig. DasGrößtkorn darf nicht größer als 8 mm sein. Die Dicke der Bettung soll zwischen 3 und 5 cm in verdichtetem Zustand sein. Daher ist es sehr wichtig, dass das Fugenmaterial mit der ähnlicher Korngrößenverteilung ausgeführt wird und aus dem gleichen Material besteht. Als geeignet für Fugenmaterial sind nach RVS die folgenden Kornklassen – 0/2, 0/4 oder 0/8. Die Fugen sollen 3-5 mm breit sein. Diese Konstruktion reagiert auf statische oder dynamische Belastungen mit elastischer Verformung. Temperaturspannungen werden durch ungehinderte Verformung abgebaut, so dass keine Zwängungen und zusätzliche Spannungen dabei entstehen. Die Pflasterdecke bleibt grundsätzlich wasserdurchlässig. Als Nachteil existiert die Gefahr, dass das Fugenmaterial aus den Fugen gewaschen oder beispielsweise durch Kehrsaugmaschinen ausgetragen wird. Als Folge kann der Verband zwischen den Steinen verloren gehen. Zudem kann sich bei geringerem Verkehr rasch eine Fugenvegetation ausbilden, deren Wurzelwerk die Steine verdrückt.

2.2.1.2. Gebundene Bauweise

Die Bettung und die Fugen werden bei dieser Bauweise mit einem Zementmörtel oder mit anderen Materialien befestigt, die oft mit Zusätzen verbessert werden. In älteren Büchern und Merkblättern wird die gebundene Bauweise als *starre Bauweise* bezeichnet. Das Wort „starr“ zeichnet die falsche Vorstellung, dass es keine Verformungen auftreten. Das ist jedoch nicht der Fall. Die Dehnungen bei gebundenen Pflasterflächen dürfen nur eine sehr kleinere Größe erreichen. Bei der Überschreitung der Bruchdehnung oder ebenfalls der Zugfestigkeit entstehen Risse und die Fugen werden ausgelöst, wodurch das ganze System nicht mehr zusammenwirkt und einzelne Steine aus dem Verband gelöst werden können. Nach RVS erlaubte Mörteltypen für Bettung sind Bettungswerkmörtel und bauseitig gemischter Bettungsmörtel, an denen es spezifische Anforderungen an Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit und Frostbeständigkeit gibt. Nach den selben Richtlinien soll das gebundene Fugenmaterial aus zementgebundenem Fugenmaterial, bauseitig gemischtem Fugenmörtel, Fugenwerksmörtel, bitumengebundenes Fugenmaterial oder kunststoffgebundenes Fugenmaterial gewählt werden.

Qualitativ hochwertige gebundene Pflasterbefestigungen werden nur nach einer ausführlichen Planung, passenden Materialien und professioneller Herstellung möglich. Die Benutzung dieser führt in vielen Fällen zu großen Schäden, bei denen auch enorme finanzielle Verluste für Sanierungen und andere Reparaturen entstehen.

2.2.1.3. Gemischte Bauweisen

Bei dieser Bauweise werden entweder die Fugen oder die Bettung durch ein gebundenes Material (Mörtel oder Bitumen) befestigt. Diese Technik ist nicht zu bevorzugen, da hier auch sehr große Zwängungen entstehen. Die klimatischen Beanspruchungen erzeugen zusätzliche Spannungen in der Oberfläche und es kommt zu Rissen, die den Verband zwischen den Steinen zerstören. Dann entstehen viele Schäden als horizontale und vertikale Verformungen, Verschiebungen und andere. Deshalb wird diese Technik auch nicht als Regelbauweise angewendet.

Die Bauweise der verfestigten Fuge zählt zu der ungebundenen Bauweise; in diesem Fall besteht der obere Teil der Fuge jedoch aus gebundenem Material. Die Tiefe der gebundenen Fuge beträgt dabei mindestens 3 cm und die Breite der Fuge soll mindestens 8 mm betragen. Durch die gebundene Fuge ist ein Versickern von Flüssigkeiten in die unteren Schichten nicht möglich und deshalb soll eine ausreichende Neigung der Pflasterfläche zur Entwässerung vorhanden sein. Diese Bauweise ist als Deckschicht in den Bereichen von Tankstellen und Werkstätten oder Fabriken besonders günstig, da die gefährlichen Flüssigkeiten – verschmutztes Sickerwasser, Öle oder Kraftstoffe nicht in den Untergrund eindringen können. Die Fugenmasse muss elastische Eigenschaften besitzen, um eventuell auftretende kleine Bewegungen und Verformungen zwischen den Pflastersteinen ausgleichen zu können. Hierfür eignen sich besonders Fugenmassen aus Bitumen – die sogenannten Bitumenvergussmassen.

Einen Vergleich zwischen den Bauweisen ist in der folgenden Tabelle 2-1 dargestellt.

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

Tabelle 2-1: Vergleich zwischen der ungebundenen, gebundenen und gemischten Bauweise mit deren Vor- oder Nachteile (RVS 08.18.01).

2.2.2. Konstruktionselemente

Alle Verkehrsflächen sollen tragfähig, eben, frostsicher und griffig sein. Das hängt von den Materialien, dem Zusammenwirken zwischen den Schichten und dem Einbau der Flächenbefestigung ab. Hauptsächlich können drei Konstruktionselemente in dem Straßenbau unterschieden werden: Untergrund, Unterbau und Oberbau. Auf dem Bild 2-1 ist ein Beispiel für die Konstruktion einer Pflasterbefestigung mit einem Pflasterbelag zu sehen.

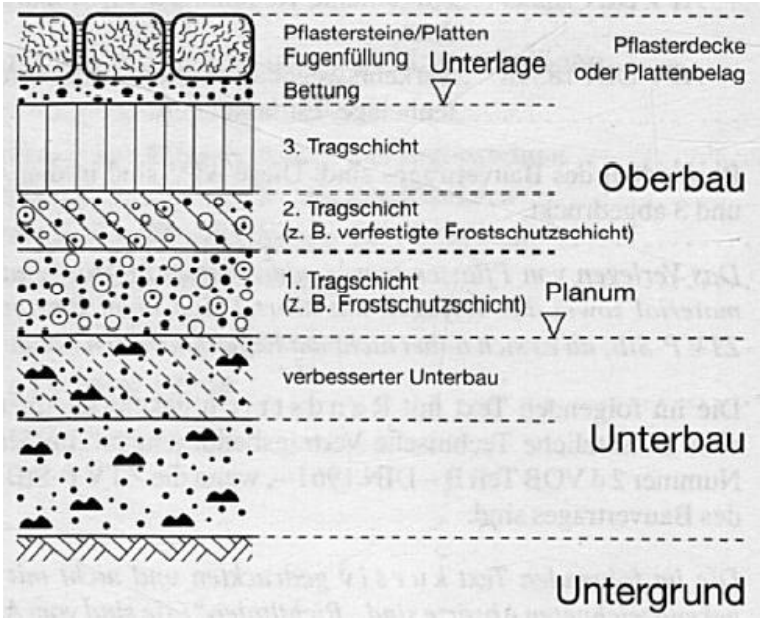


Abbildung 2- 1 Konstruktion von Pflasterbefestigung (ZTV-P StB)

2.2.2.1 Untergrundund Unterbau

Der Begriff Untergrund beschreibt den schon vorhandenen Boden in dem Bereich der Straße. Der Untergrund erscheint als Fundament der ganzen Oberbaukonstruktion.Der kann entweder tragfähig oder nicht tragfähig sein. Wenn der Untergrund eine ausreichende Tragfähigkeit für die bemessenen Belastungen aufweist und eine ausreichende Frostsicherheit besitzt, darf die Pflasterbefestigung direkt darauf verlegt werden. Das ist aber in der Regel nicht möglich. Es kann aber mit Sicherheit angenommen werden, dass die Eigenschaften des existierenden Untergrundes die Dicke der Konstruktion und die Schichten des Oberbaus beeinflussen. Oft wird die obere Schicht des Untergrundes bei geringerer Tragfähigkeit durch Zugabe von unterschiedlichen Mitteln z.B. Kalk oder Bitumen verbessert. Eine andere Möglichkeit wäre der Bodenaustausch. Die obere Grenze hier wird als Erdplanum bezeichnet, wenn kein Unterbau hergestellt werden soll. Als Unterbau werden Schüttungen bei ungenügender Tragfähigkeit des Bodens bezeichnet. Die oberste Schicht des Unterbaus wird als Planum bezeichnet.

An den Untergrund und Unterbau gibt es drei wesentliche Anforderungen. Zuerst sollen diese eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. In der RStO kommt der Wert für die Verformungsmodul von mindestens 45 MN/m^2 vor und nach der RVS 03.08.63 für Oberbaubemessung ist der Verformungsmodul E_{v1} mindestens 35 MN/m^2.Sofern das Erreichen von höheren Verformungswerten als Ev1 = 35 MN/m2 gemäß RVS 08.03.01 auf dem Unterbauplanum sichergestellt ist, kann aufgrundeiner gesonderten Bemessung von den Dickenfestlegungen der Bemessungstabellen abgegangen werden. “Besteht der Untergrund (Unterbau) unterhalb des Oberbaues in ausreichender Dicke aus frostsicherem Material und erfüllt diese Schicht die Anforderungen an ungebundene untere Tragschichten (Frostschutzschichten) gemäß RVS 08.15.01 hinsichtlich Verformungsmodul und Verdichtungsgrad, kann die Anordnung einereigenen ungebundenen unteren Tragschicht entfallen“(RVS 03.08.63). Diese Werte werden vor der Verlegung der nächsten Schichten durch die Durchführung eines Plattendruckversuchs ermittelt. Als zweite Bedingung ist die Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes bzw. Unterbaus zu gewährleisten. Unter einer Pflasterdeckschicht soll diese einen Mindestdurchlässigkeitskoeffizient K_f= 5x10^{-6} m/s besitzen. Die dritte Anforderung besteht hinsichtlich der Ebenheit und der profilgerechten Lage des Planums. Ein Gefälle von 2-3 % soll immer vorhanden

sein, um das Wasser während des Bauprozesses und dann das Sickerwasser schnell und sicher aus den Schichten abzuleiten. Der Untergrund soll auch gut verdichtet werden, um zukünftige Verformungen zu vermindern.

2.2.2.2. Oberbau

Der Oberbau hat die Aufgabe, die vertikalen und horizontalen Lasten zu dem Unterbau bzw. Untergrund abzuleiten. Außerdem sichert der die Ebenheit und die Wasserausleitung des Straßenkörpers. Üblicherweise besteht der Oberbau aus Frostschutzschicht, einer oder mehreren Tragschichtenund einer Deckschicht. Die ungebundenen unteren Tragschichtenbzw. Frostschutzschichten müssenden Anforderungen gemäß RVS 08.15.01 genügen. Sie dienen dem Frostschutz, sollen aber auch dabei genug verformungsstabil bleiben. Alle Tragschichten unter Pflasterdecken sollen eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Wenn diese Anforderungen nicht vorhanden sind, soll das Wasser durch ausreichendes Gefälle abgeleitet werden. Deshalb ist für die zweite Tragschicht in der Regel eine ungebundene obere Tragschicht einzubauen. Um ausreichende Wasserdurchlässigkeit zu gewährleisten, sollen alle Schichten auf einem profilgerechten und verdichteten Planum ausgeführt werden. In der RVS 03.08.63 stehen als verwendete obere Tragschichten, Kies- oder Schottertragschichten, Asphalttragschichten oder Drainbetontragschichtenund zementstabilisierte Tragschichten zur Verfügung. Die Dicken dieser Schichten und die Anforderungen sind in verschiedenen Richtlinien dargelegt. Die Wahl von Tragschichten bei Pflasterbefestigungen ist in der Regel von den vorhandenen Klima- und Untergrundbedingungen abhängig.

Der oberste Teil des Oberbaus ist die Pflasterdeckschicht, die aus Bettung, Pflaster und Fugen besteht. Die Bettung hat einige wichtige Aufgaben bei den Pflasterbefestigungen.Erstens soll diese die Unregelmäßigkeiten in den Höhen von den einzelnen Pflastersteinen ausgleichen und somit eine gleichmäßigesHöhenniveau der Straße gewährleisten. Außerdem nimmt die Bettung die vertikalen Belastungen aus rollendem Verkehr oder aus statischen Beanspruchungen auf und überträgt diesezu den Tragschichten. Ihr elastisches Verhalten hilft dabei, dass die konzentrierten Lasten aus dem Rad keine plastischen Deformationen an der Oberfläche hervorrufen. Deshalb soll sich die Bettung kurzfristig unter zulässiger Belastung deformieren lassen und dann wieder seine ursprüngliche Lage erreichen. Die Wasserdurchlässigkeit ist bei der Bettung auch sehr wichtig, da sie das Wasser immer schnell und sicher nach unten in der Tragschicht ableiten soll. Die Fugen sichern die Übertragung der horizontalen Kräfte. Sie sind auch sehr wichtig für die Wasserdurchlässigkeit und die Verteilung der Spannungen in den Richtungen längs und quer zu dem Verkehr. Durch die Fugen sollen diese zu den Randeinfassungen geleitet werden. Die Pflaster im Straßenbau werden aus Naturstein, Klinker oder Beton hergestellt und besitzen üblicherweise Höhen zwischen 8 und 12cm, was grundsätzlich von der Größe der Verkehrsbelastungen abhängt. Mit einer Zunahme des Schwerverkehrs nimmt die Dicke der Pflastersteine zu.

Die Anforderungen an das Bettungs- und Fugenmaterial sind in der RVS 08.18.01 aufgeführt. Eine ausführlichere Betrachtung der notwendigen Eigenschaften kannman in den folgenden österreichischen Normen(ÖNORM EN 13242, ÖNORM B 3132, ÖNORM B 3108, ÖNORM EN 1341-1343, ÖNORM 1367-6) finden. Die Standfestigkeit und der Verformungswiderstand der Pflasterdecke besonders in horizontaler Richtung sind auch von dem Verband abhängig.

2.2.3. Konstruktion von Pflasterdecken

In vielen Bereichen des Straßenbaus und auch zur Befestigung von Hofflächen, Industrieböden oder Parkflächen wird heute Pflaster verwendet. Die Wahl des Pflasters orientiert sich nach der Art der Verkehrsfläche und ihrer Belastung sowie nach optischen, ästhetischen und technischen Gesichtspunkten. Die hohe Qualität, die Widerstandsfähigkeit gegen Treibstoffe, Öle, Fette, Frost- und Frost-

Tausalz-Einwirkung geben dem Steinpflaster eine lange Lebensdauer bei geringen Bau- und Unterhaltungskosten. Die Anwendungsgebiete für Pflaster sind: Wohn-, Anlieger- und Sammelstraßen, Busverkehrsflächen, Parkplätze, Rastplätze, Tankstellenbereiche, befahrene Gleisflächen von Schienenbahnen, Industrieflächen, Hafenstraßen, ländliche Wege, Fußgängerzonen, Geh- und Radwege, gestaltete Plätze, private Einfahrten, Hofflächen, Abstellplätze, Ufer- und Böschungsbefestigungen.

2.2.3.1. Nicht klassifizierte Flächen

Nicht klassifizierte Flächen sind Bereiche ohne oder mit geringer Verkehrsbelastung wie Radwege, Gehwege und Zufahrten. Die Belastungen hier kommen nur aus dem Rad- oder Fußgängerverkehr und deshalb sind diese sehr klein. Daher ist es möglich bei diesen Befestigungen eine nicht so dicke Tragschicht einzubauen, oder falls der Boden genug frostsicher ist, kann auf eine Frostschutzschicht verzichtet werden. Bei den nicht klassifizierten Flächen werden nicht nur Pflastersteine sondern auch Plattenbeläge verwendet.

In Wichter (1996) werden die Oberbauausbildungen nach RstO 86/89 zusammengefasst. Nach 30 Jahren ist diese Oberbaudimensionierung nach RStO 2010 für nicht klassifizierten Flächen wegen der kleinen Belastungen noch gültig. In Deutschland ordnet man die Frostempfindlichkeit des Bodens in 3 Klassen: F1- nicht frostempfindlich, F2- gering bis mittel frostempfindlich und F3- sehr frostempfindlich. Auf dieser Basis geben die deutschen Ingenieure Zuschläge von 0 bis 15 cm zu den Solldicken der Frostschutzschicht. Bei diesen Arten von Straßen variiert die Gesamtdicke von Tragschichten(Frostschutzschicht und obere Tragschichten) von 15 bis 35cm. Hier dient die untere Frostschutzschicht auch als Tragschicht. Es soll eine Querneigung von 3% ausgeführt werden. Die Dicke der Pflastersteine ist 8cm und der Bettung ist 3 cm in verdichtetem Zustand. Als Bettungsmaterial wird ein Splitt-Brechsand-Gemisch 0/8 mm und als Fugenmaterial 0/2 mm Brechsand verwendet. Die Verformungsmoduln E_{v2} bei dem Erdplanum sollen einen Wert von mindestens 45 MN/m^2 besitzen und auf der oberen Grenze der obersten Tragschicht soll E_{v2} zwischen 80 und 120 MN/m^2 sein, in Abhängigkeit von der Frequenz der Überfahrungen der Pflaster- oder Plattenbefestigung.

In Österreich gibt es für die Befestigungen von nicht klassifizierten Flächen keine ausführlichen Daten über die Errichtung der Konstruktion. Nach RVS 03.08.63 bezeichnet man als Sonderflächen die folgenden Elemente: Rampen- und Knotenfahrbahnen, Beschleunigungs- und Verzögerungsstreifen, Abstellstreifen, Mittelstreifenüberfahrten, Parkstreifen und sonstige Flächen des ruhenden Verkehrs. Hier wird die Lastklasse der dazugehörigen Straße verwendet.

Andere Arten der Pflasterbefestigungen sind zum Beispiel begrünbare Pflasterbeläge, die besonders bei Landwirtschaftswegen oder bei Garageneinfahrten bzw. Gartenwege verbreitet sind. Die Besonderheit bei dieser Bauart ist die Anwesenheit von einer Rasendeckschicht mit einem bestimmten Anteil an Humusboden und auch verschiedene Fugenfüllung. Als Nachteil bleibt die Gefahr, dass die Wurzeln eine Verstopfung verursachen und damit die ganze Decke undurchlässig werden kann.

Eine andere Art der Sonderpflasterdeckschichten sind die sogenannten wasserdurchlässigen Pflasterbeläge. Bei dieser wird das Regenwasser durch Sickeröffnungen oder breite durchlässige Fugen schnell zu den unterliegenden Schichten abgeleitet. Es muss aber sehr genau geprüft werden, ob der Untergrund und der Oberbau genügend durchlässig ist. Außerdem sind die Betonpflastersteine mit breiteren Fugen oder mit Sickeröffnungen für den Fußverkehr nicht immer geeignet Die Erfahrung zeigt, dass dir Durchlässigkeit der Beläge mit der Zeit abnimmt. Das hängt von den Arten der verwendeten Steine, der Verschmutzung in dem entsprechenden Bereich und die Frequenz des Verkehrs ab. Deshalb ist die Herstellung von solchen Belägen nur nach sorgfältiger Planung und professionellem Einbau sinnvoll.

Eine weitere Art von wasserdurchlässigen Pflasterbelägen sind solche aus haufwerksporigem Dränbeton. Der höhere Hohlraumgehalt erlaubt dem Wasser ein Durchströmen des Steines. Neben der

Druckfestigkeit sind außerdem Probleme hinsichtlich der Frost- und Tausalzbeständigkeit zu erwarten.

Pflaster auf Betondecken werden oft auf Tiefgaragendecken verlegt. Das Problem hier besteht darin, dass der Beton wasserundurchlässig ist und die Entwässerung des Wassers durch ein ausreichendes Gefälle zu sichern ist.

2.2.3.2. Bauklassen VI bis III

In Österreich unterscheidet man sieben Lastklassen- von I bis VI und S. Pflasterbefestigungen dürfen nur bei den Bauklassen VI bis III eingebaut werden. Bei höheren Lastklassen ist ihre Verwendung wegen ungünstigen Belastungen nicht vorgesehen.Nach RVS 03.08.63 werden die Lastklassen aufgrund der Funktion der Fläche unterteilt. So wird Lastklasse VI bei Verkehrsflächen mit Pkw und gelegentlichem Lkw-Verkehr, ständig benutzte Parkflächen für Pkw-Verkehr und gelegentlichem Lkw- und Busverkehr benutzt. Lastklasse V bedeutet Siedlungsstraßen, Fußgängerzonen mit Ladeverkehr, ständig benutzte Parkflächen für Pkw-Verkehr und geringem Lkw- und Busverkehr und Lastklasse VI - Sammelstraßen, Fußgängerzonen mit schwerem Ladeverkehr, ständig benutzte Parkflächen für Lkw- und Busverkehr, Verkehrsflächen in Nebenanlagen für Pkw und Lkw. Die Lastklasse wird durch die Berechnung derBemessungsnormlastwechsel (BNLW) nach der folgenden Formel berechnet:

$$BNLW = NLWtägl.R.V.S.365.n.z \qquad \textbf{Gleichung 1}$$

Wenn die mittlere tägliche Verkehrsstärke bekannt ist, kann der BNLW leicht mit der Hilfe von zusätzlichen Formeln und Tabellen die Lastklasse bestimmter Straße berechnet werden. Die Grenze für Verwendung von Pflasterbefestigungen ist in Österreich bei einem maximalen BNLW-Wert von 1,3 Mio. festgelegt. Wegen der schwereren Verkehrsbelastung als bei den untergeordneten nicht klassifizierten Straßen sind die Anforderungen an der Oberbaukonstruktion in diesen Bauklassen wesentlich größer. In den österreichischen Richtlinien für Dimensionierung des Straßenoberbaus istein Verformungsmodul E_{v1} 35 MN/m^{2}auf dem Unterbauplanum vorgesehen. In den österreichischen Richtlinien werden drei Bautypen für die Konstruktion von Straßenbefestigungen normiert, die mit den Buchstaben a, b und c bezeichnet sind. Der Bautyp hängt von der Art der Decke(ob die aus Beton, Asphalt oder Pflaster hergestellt ist), von dem Typ der unteren Tragschichten(gebundene oder ungebundene) und von ihren Dicken ab. Für Pflasterbefestigungen gelten die Bautypen 7, wo die untere Tragschicht aus ungebundenem Material ist und 8, wo diese aus Drainbeton hergestellt wird. Üblicherweise nutzt man die Bautypen b und c nur bei niedrig beanspruchten Straßen. Bautyp c darf z. B. nur bei Lastklassen V und VI verwendet werden und man baut Bautyp a bis zur Lastklasse III. Die Konstruktion von dem gesamten Pflasteroberbau kann in der RVS 03.08.63 auf dem Tabellen 10 und 11 angesehen werden. In Abhängigkeit von der Lastklasse und Bautyp variieren die Dicken der Frostschutzschicht und der Tragschicht von 15 zu 30 cm. In einigen Fällen wie z.B. bei Lastklasse VI und Bautyp 7a kann auf eine Tragschicht verzichtet werden, da die Frostschutzschicht auch diese Rolle erfüllen kann.Das kann auf der folgenden Abbildung 2-2in der letzten Säule angesehen werden.

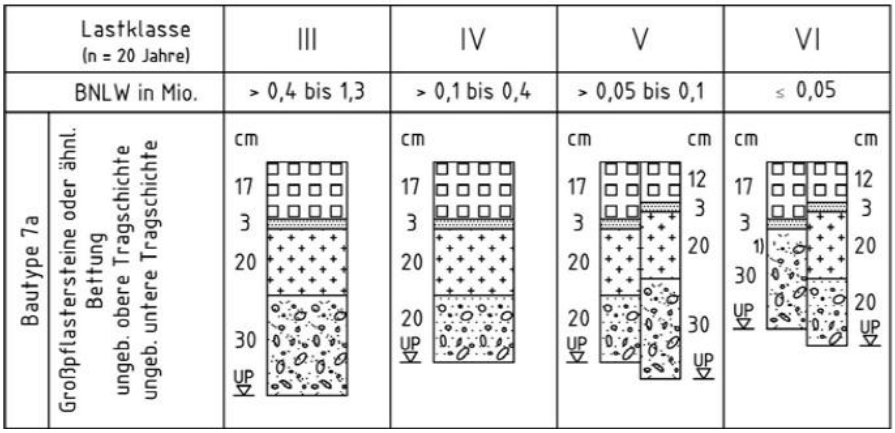


Abbildung 2- 2 Oberbaukonstruktionen von gepflasterten Wegen (RVS 03.08.63).

2.2.4. Herstellung der Pflasterdeckschicht

Der Einbau erfolgt größtenteils in Handarbeit. In der Vergangenheit ist die Verlegung des Pflasters nur von hochqualifizierten Arbeitern durchgeführt worden, da die Natursteinpflaster in sehr komplexen Verbänden verlegt werden. Mit der Entwicklung der Klinkerpflaster und der Betonsteinpflaster ist die Herstellung schneller und einfacher geworden. Ein Verlegen mit maschineller Unterstützung ist heute bei geeigneten Pflastersteinen, besonders bei großen Flächen möglich. Die Tagesleistung eines Arbeitersbeträgt circa 30-35 m^2 Pflasterdecke, bei maschineller Verlegung kann diese bis 450 m^2 steigen. Die Handverlegung wird aber dennoch bevorzugt trotz der höheren Lohnkosten und geringeren Tagesleistung, da die Maschinen für Pflasterverlegung nicht immer für alle Pflasterformen geeignet sind. Deshalb sind bei dieser Bauweise nur speziell dafür hergestellte Betonpflaster zu verlegen. Naturstein- oder Klinkerpflaster kann man maschinell nicht ausführen.

2.2.4.1. Tragschichten

Die Tragschichten haben ähnliche Anforderungen wie der Untergrund und der Unterbau.Sie sollen immer eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen, um sich nicht bei den auftretenden vertikalen Belastungen zu deformieren.Die Tragfähigkeit der Schicht wird durch Plattendruckversuche nachgewiesen. Bei nicht ausreichender Tragfähigkeit zwischen dem Untergrund und der Tragschicht können Geotextilien verlegt werden. Ein Gefälle von mindestens 2,5 % muss vorhanden sein. Tragschichten aus ungebundenem Material sind zu bevorzugen, da neben der Quer- und Längsneigung auch die Sickerfähigkeit zur Ableitung des Wassers besser ist. Bei gebundenen Tragschichten ist die Entwässerung zu überprüfen. Am Bild 2-3 ist eine Entwässerungsmöglichkeit in der Randeinfassung dargestellt. In diesem Fall wird das Wasser durch kleine Röhre in der Randeinfassung aus der Oberbaukonstruktion ausgeleitet.

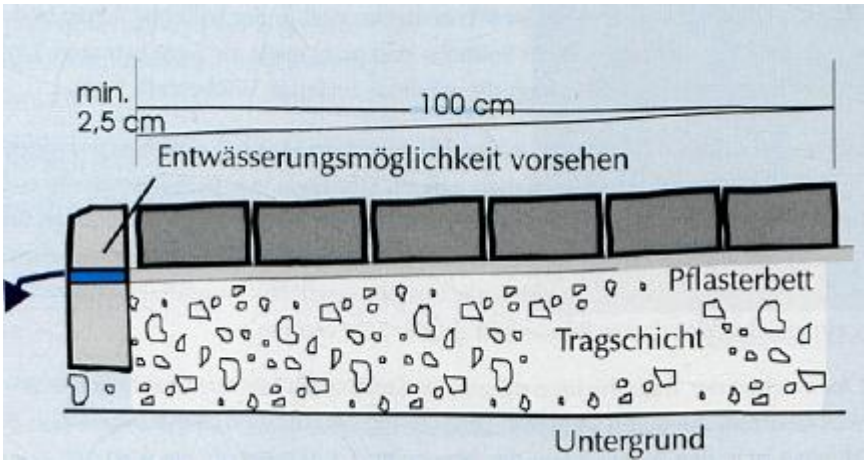


Abbildung 2- 3 Entwässerungsmöglichkeit bei der Randeinfassung (Wichter, 1996).

Unebenheiten sind bei den Tragschichten ein enormer Nachteil, da diese immer in der darüber liegenden Deckschicht durchschlagen und zu Verformungen der Straßenoberfläche führen. Diese Erscheinung ist in der Abbildung 2-4 dargestellt.

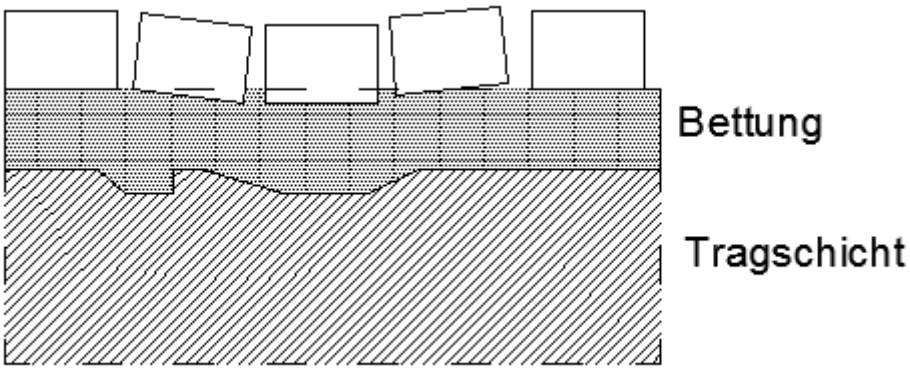


Abbildung 2- 4 Schäden infolge Unebenheiten in der Tragschicht

Die Abweichung von der Sollhöhe darf nicht mehr als 2 cm sein. Dabei soll die Prüfung mit einem 4 Meter langen Richtscheit einen Unterschied von 1 cm nicht überschreiten. Wenn die Filterstabilität noch nicht gesichert ist, verlegt man zwischen Tragschicht und Bettung Geovliese oder Geotextilien. Vor der Herstellung der Tragschicht sollen die Ränder der ganzen Konstruktion durch Einfassungen stabilisiert werden. Dadurch soll das seitliche Ausweichen der Pflastersteine verhindert werden. Es werden Bord- und Randsteine verwendet die hauptsächlich aus Beton hergestellt werden und dabei auf einer Betonbettung stehen. Die Abmessungen und Regelquerschnitte der Randeinfassungen können in der RVS 08.18.01 Anhang 3, sowie in DIN 18318 und DIN EN 1343 nachgelesen werden.

2.2.4.2. Bettung

Die Bettung soll im verdichteten Zustand eine Dicke zwischen 3 und 5 cm haben. Der Wert von 5 cm darf nicht überschritten werden, da Verformungen wegen Nachverdichtung entstehen können. Die Querneigung des Pflasterbettes soll gleich der Pflasteroberfläche sein. Das ungebundene Bettungsmaterial soll nach RVS 08.18.01 die Anforderungen der ÖNORM EN 13242, sowie die Qualitätskriterien nach ÖNORM B 3132 erfüllen. In Deutschland gelten DIN EN 13285 und DIN EN 18318.

Hier sind Unterschiede hinsichtlich der Lieferkörnungen festzustellen. In Deutschland werden Baustoffgemische mit Körnungen 0/4, 0/5, 0/8 und 0/11 mm verwendet, während in Österreich gebrochene Gesteinskörnungen aus der Klasse $C_{90/3}$ der Korngruppen 2/4, 4/8 und 8/11 mm oder auch Gemische aus dieser Korngruppen Verwendung finden. In dem Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflaster und Plattenbelägen kommen auch Splitte mit Korngruppe 1/3 mm und 2/5 mm in Betracht.In Deutschland bevorzugt man die Bettungsmaterialien, die in sich feinere Sande und Füller enthalten.In Österreich wird auf die feineren Kornklassen in der Bettung verzichtet.Sonstigere Anforderungen an das Bettungsmaterial werde im Zusammenhang mit verschiedenen Normen im Kapitel 2.3.3. erklärt.Dabei soll aber beachtet werden, dass das Größtkorn maximal 8 mm ist. Unebenheiten in der Tragschicht dürfen mit der Bettung keinesfalls ausgeglichen werden. Die Dicke soll einen konstanten Wert aufweisen. Die Bettung wird mit der Hilfe von Lehren abgezogen. Sie ist so zu überhöhen, dass nach der Verdichtung die Sollhöhe erreicht wird. Das hängt von der Art des Bettungs- und Pflastermaterials und der Pflasterbettdicke ab und wird meistens durch Versuche nachgeprüft. In besonderen Fällen (z.B. bei Bushaltestellen oder Bereichen mit schwererem Verkehr) kann eine Zugabe von Zement, Kalk oder Traßzement sinnvoll sein. Nach dem Einbau der Bettung ist das Befahren oder Betreten verboten.

2.2.4.3. Pflasterung

Das Verlegen der Pflastersteine auf die Bettung unterscheidet sich in vielen Arten von Verbänden. In den Bildern 2-5 und 2-6 sind einige Arten von Verbänden zu sehen. In RVS 08.18.01 sind insgesamt 10 Arten von Pflastersteinverbänden(Anhang 1) und 4 Arten von Plattensteinverbänden(Anhang 2) normiert.

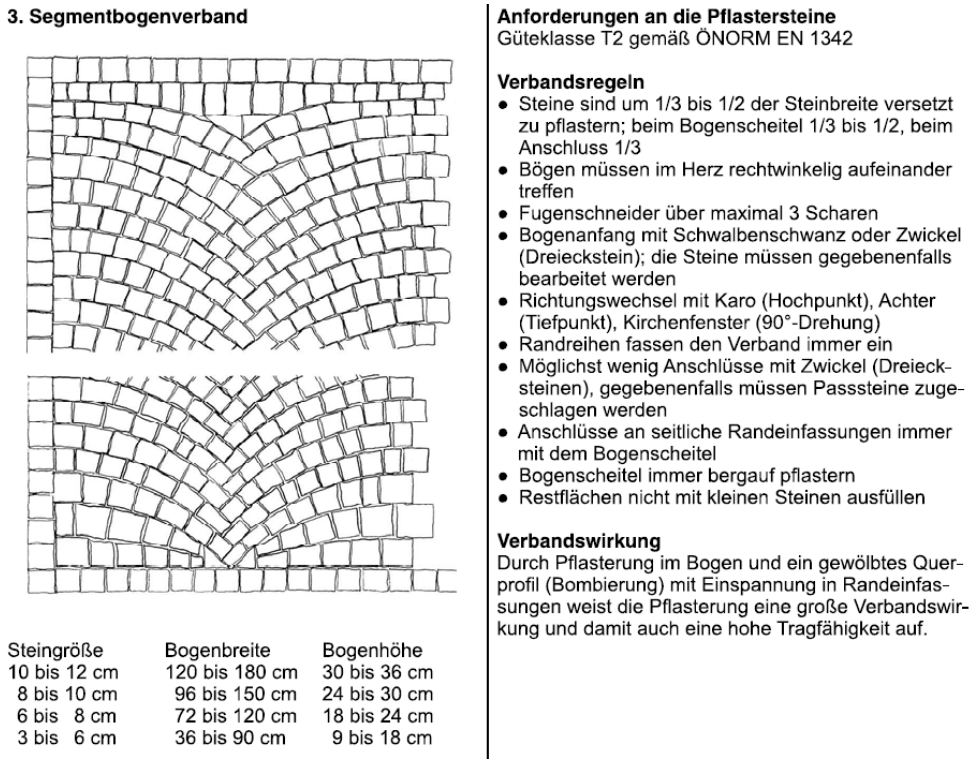
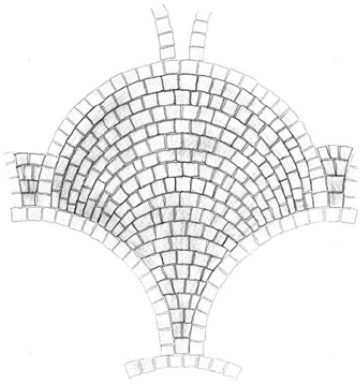


Abbildung 2- 5 Segmentbogenverband – Skizze und Anforderungen an die Geometrie und den Einbau gemäß RVS 08.18.01.

4. Schuppenverband
auch Tulpen- und Lilienverband, Schuppenanfang taucht in Schuppe davor ein;
Spitzbogenverband, Schuppenanfang taucht nicht in Schuppe davor ein.



Steingröße	rechn. Steingröße (h)	Schuppenbreite (SB)	Radius (R)
z.B. 6 bis 8	7,0 cm	110 bis 140 cm	52 bis 67 cm
z.B. 3 bis 6	4,5 cm	100 bis 130 cm	48 bis 63 cm

Faustformel:
R = ca.10 • h
SB = 2 • R + n • h; (n = Anzahl der Steine am Fußpunkt)

Anforderungen an die Pflastersteine
Güteklasse T2 gemäß ÖNORM EN 1342

Verbandsregeln
- Versetzen der Steine, Fugenschneider und Anschlüsse wie Punkt 3
- Anschlüsse an seitliche Randeinfassungen möglichst mit Halbschuppe
- Voraussetzung: rechteckige oder kreisförmige Grundfigur, keine Dreiecksflächen
- Steine sind so zu bearbeiten (trapezförmig), dass eine normgemäße Fugenbreite eingehalten werden kann
- Bogenscheitel immer bergauf pflastern

Verbandswirkung
Im Vergleich zum Segmentbogenverband eingeschränkte Tragfähigkeit; die Bogenformen haben mehr gestalterische Funktion und weniger Verbandswirkung.

Abbildung 2- 6 Schuppenverband – Skizze und Anforderungen an die Geometrie und den Einbau gemäß RVS 08.18.01.

Bei dem Verlegen soll eine Fugenbreite von 3 bis 5 mm gesichert werden.Wenn größeren Flächen in kommunalen Bereichen gepflastert werden, wo ständig Ausbrüche für Versorgungsleitungen stattfinden, ist es zweckmäßig, die Pflasterdecken in Teilflächen zu unterteilen, die vollständig neu verlegt werden können. Das wird durch eine Unterteilung von quadratisch angeordneten Randsteinen gemacht.

Nach der Verlegung der Pflastersteine auf der ebenen und profilgerechten Bettung, beginnt das Rütteln des Pflasters. Es soll gleichmäßig von den Rändern beginnend zur Mitte hin bis zur Standfestigkeit gerüttelt werden. Der Pflasterbelag soll dabei absolut sauber und in trockenem Zustand sein. Die Platte des Verdichtungsgeräts ist auch vor dem Prozess unbedingt zu säubern.

2.2.4.4. Fugen

Die Fugen sollen kontinuierlich mit dem Baufortschritt des Pflasterbelags geschlossen werden. Das erhöht die Stabilität der Konstruktion und verringert die Empfindlichkeit gegen die Beanspruchungen des Weiterrüttelns. Der Fugensand ist trocken einzubringen. Das überschüssigeMaterial ist zu entfernen. Die Fläche wird bis zur Sollhöhegerüttelt. Es soll nie bei unvollständig vollen Fugen verdichtet werden. Nach dem Rütteln sind die Fugen neu zu schließen. Unter einer ständigen Wasserzugabe wird das Fugenmaterial in die Fugen eingeschlämmt. Nach Rixner (1998) sind folgende Geräte zum Rütteln geeignet:

- Für 6 cm Pflasterdicke – Geräte mit Betriebsgewicht von 130 kg und Zentrifugalkraft 18 – 20 kN
- Für 8 cm und 10 cm Pflasterdicke – Geräte mit Betriebsgewicht von 170 kg bis 200 kg und Zentrifugalkraft 20 – 30 kN

- Für 12 cm und 14 cm Pflasterdicke – Geräte mit Betriebsgewicht von 200 kg bis 600kg und Zentrifugalkraft 30 – 60 kN

Wenn hohe Beanspruchungen aus Öle, Kraftstoffe oder Wasser vorhanden sind, können die Fugen bituminös vergossen werden. Deshalb werden sie mindestens 30mm tief ausgekratzt und freigelegt. Die Vergußmasse wird nach den örtlichen klimatischen Randbedingungen ausgewählt. Wenn es um eine gebundene Bauweise geht, sollen Dehnungsfugen in einem maximalen Abstand von 8 m eingebaut werden. Dazu sind Dehnungsfugen über Fugen in Betontragschichten oder Bauwerken und bei Anschluss an Bauwerke erforderlich.

Die Pflasteroberflächen brauchen keine komplexe Nachbehandlung. Wenn die Fugen kurzfristig nach dem Ausbau entleert sind, sollen diese nochmals mit Fugenmaterial verfüllt werden. Dabei ist der frühe Einsatz von Kehrmaschinen schädlich, da diese das Material aus den Fugen saugen. Mit der Zeit wird das Material durch die Steinbewegungen eingespannt und durch Witterungsbedingungen besser in den Fugen gebunden.

2.3. Anforderungen an das Material

Wegen des spezifischen Verhaltens der Pflasteroberbaukonstruktionen sind die Anforderungen an das Material für Tragschichten, Pflastersteine, Bettung und Fugen auch sehr unterschiedlich. Die Eigenschaften dieser Elemente sind für das Zusammenwirken der ganzen Konstruktion entscheidend, und wenn das Material keine hohe Qualität und die benötigten Eigenschaften aufweist, führt das zu wesentlichen Schäden. Deshalb sind die Anforderungen an Materialien für Herstellung von Pflasterbefestigungen von großer Wichtigkeit.

2.3.1. Tragschichten

Die Tragschichten müssen entsprechend den Anforderungen, eine gewisse Tragfähigkeit, sowie profilgerechte Lage und Ebenheit aufweisen. In Österreich werden die Tragschichten nach der RVS 08.15.01 hergestellt.Die Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten werden in zehn verschiedenen Gesteinsklassen – U1 bis U10 zusammengefasst. Es existieren unterschiedliche Anforderungen und Gesteinsklassen in Abhängigkeit, ob es um obere oder untere Tragschichten geht. Übersichtlich können die spezifischen Anforderungen an das Material für die ungebundenen Tragschichten in der folgenden Tabelle 2-2nachgelesen werden.

Bezug zur ÖNORM EN 13242		Klassen für									
		ungebundene Obere Tragschicht					ungebundene Untere Tragschicht			ungebundene Tragschichten ohne gebundene Überbauung	
		für alle LK		LK II bis VI			für alle LK				
Abschnitt	Merkmal	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
4.3.1	Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 933-1	G_A85 und Abbildungen 1 bis 4					G_A85			G_A75	
4.4	Kornform von groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-4	SI_{40}					SI_{NR}				
4.5	Anteil gebrochener Körner in groben Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 933-5[1])	$C_{90/3}$	$C_{50/30}$	$C_{90/3}$	$C_{50/30}$	C_{NR}	$C_{90/3}$	$C_{50/30}$	C_{NR}	$C_{50/30}$	C_{NR}
4.6	Gehalt an Feinanteilen gemäß ÖNORM EN 933-1	f_3, f_5, f_7, f_9, f_{12}								f_{NR}	
4.7	Qualität der Feinanteile	bestanden[2])								keine Anforderung	
5.2	Widerstand gegen Zertrümmerung gemäß ÖNORM EN 1097-2 (an Korngruppe 8/11)	LA_{30}		LA_{40}						LA_{NR}	
5.5	Wasseraufnahme gemäß ÖNORM EN 1097-6, Abschnitt 8	*Wasseraufnahme v. Recyclingbaustoffen geprüft am Kornanteil 4/32, rezyklierte Gesteinskörnungen mit Kategorie Rc_{80} oder $Rc_{80} \leq 4$ %[3])* *Sonstige rezyklierte Gesteinskörnungen ≤ 2 %[3])* *Natürliche Gesteinskörnungen: keine Anforderung*								keine Anforderung	

Tabelle 2-2 Anforderungen an Korngemische für ungebundene Tragschichten (RVS 08.15.01).

Für die gebundenen Tragschichten gibt es zusätzliche Anforderungen.Außerdem sollen die Tragschichten immer ein minimales Verformungsmodul von E_{v1}>90MN/m^2 aufweisen.Dieser Wert hängt aber von der Lastklasse und von der Gesteinsklasse U ab. Dabei soll die maximale Dicke 45 cm nicht überschreitenund das Größtkorn ist üblicherweise 1/3 der Dicke der Schicht, aber soll nicht mehr als 90 mm sein. Bei den Tragschichten darf auch rezykliertes Material unter bestimmten Bedingungen verwendet werden.Die Dicke der Schichten variiert und kann in RVS 03.08.63 oder in RStO2010 gefunden werden. Alle Eigenschaften werden durch Prüfungen nachgewiesen.

Natürlich werden auch gebundene Tragschichten verwendet, deren Anforderungen in RVS 08.16.01 (Asphalttragschichten), RVS 08.17.01 (zementstabilisierte Tragschichten) und RVS 08.18.01 (Tragschichten aus Dränbeton) beschrieben sind. Hier sind zusätzliche Bedingungen an die Durchlässigkeit beschrieben.

2.3.2 Pflaster

In dem Straßenbau werden im Allgemeinen 3 Typen von Pflastern verwendet: Natursteinpflaster, Klinkerpflaster, Betonpflaster und Plattenbeläge. Der Unterschied zwischen Pflaster und Platte ist das Verhältnis Dicke zu Breite. Bei den Platten ist dieses L > 4 x D.

Die spezifischen Anforderungen an die Steine betreffen die Form des Pflasters, zulässige Abweichungen, Witterungswiderstand, Abriebwiderstand und anderen.

Die Natursteinpflaster sollen widerstandsfähig sein und ein CE-Kennzeichen aufweisen. Nach RVS 08.18.01 sollen die Natursteine die Eigenschaften in der dort stehenden Tabelle 1erfüllen und zwar sind das Anforderungen an Produktkennzeichnung, Abmessungen und mechanische Anforderungen und Widerstand gegen Frost-Tau Wechsel.Die ÖNORM EN 1341, 1342 und 1343 bestimmen die Leistungsanforderungen zur Produktkennzeichnung und Konformitätsbewertung.ÖNORM EN B 3108 beschäftigt sich mit den Abmessungen und denmechanischen Anforderungen an die Natursteine für Pflasterbau. In Österreich ermittelt man den Widerstand der Natursteinpflaster gegen Frost-Tau Wechsel bei Einwirkung von Salzen mit der Hilfe von ÖNORM EN 1367-6. Eine Konformitätsanforderung der Naturpflastersteine, sowie Bewertung der Kennzeichnung und Verpackung nach

DIN EN 1342 ist immer nötig. Nach der Größe werden die Pflaster nach drei Arten unterschieden: Mosaikpflastersteine mit Nenndicke bis 60 mm, Kleinpflastersteine – 60 bis unter 120 mm und Großpflastersteine – ab 120mm. Die Normen werden auf zwei große Bereiche geteilt. Der erste beschäftigt sich mit den Abmessungen der Pflastersteine und die erlaubten Abweichungen und der zweite – mit den Anforderungen. Die Natursteinpflaster sollen widerstandsfähig gegen Frost-Tau-Wechsel mit Tausalz sein. Das wird durch eine Prüfung nach ÖNORM EN 1367-6 oder DIN EN 1367-1 ermittelt, wo 48 Wechselbeanspruchungen mit 2-prozentiger Kochsalzlösung stattfinden. Diese Widerstandsfähigkeit wird erreicht, wenn die Absplitterungen nach der Prüfung höchstens 2% des Gesamtgewichtes beträgt. Dabei darf die Druckfestigkeit um maximal 20% vermindert sein. Die Anforderung an die Druckfestigkeit ist von dem Herstellungsmaterial abhängig. Die Mindestwerte sind in Tabelle 2-3aufgeführt und sind zwischen 80 N/mm² bei der Basaltlava und 220 N/mm² bei dem Basalt und dem Melaphyr. Andere wichtige Eigenschaftenkriterien, die bei den Pflastern aus Naturstein erfüllt werden sollen, sind: Biegefestigkeit, Griffigkeit, Beständigkeit gegen Taumittelangriff, Abriebwiderstand, Vergleichsmuster, Wasseraufnahme.

	Gestein/Gesteinsgruppe	Mindestwert für die Druckfestigkeit	Orientierungswerte für die Rohdichte
		N/mm²	g/cm³
1	Granit, Granodiorit, Syenit	160	2,60 – 2,80
2	Diorit, Gabbro	170	2,70 – 3,00
3	Rhyolith, Rhyodazit, Trachyt, Phonolith, Mikrodiorit, Andesit	180	2,50 – 2,85
4	Basalt, Melaphyr	220	2,85 – 3,05
5	Basaltlava	80	2,40 – 2,85
6	Diabas	180	2,75 – 2,95
7	Kalkstein, Dolomitstein	80	2,65 – 2,85
8	Grauwacke, Quarzit, Gangquarz, Quarz, Sandsteine	120	2,60 – 2,75
9	Gneis, Granulit, Amphibolit, Serpentinit	160	2,65 – 3,10

Tabelle 2-3 Pflaster aus Naturstein-Druckfestigkeit gemäß TL-Pflaster StB.

Bei den Pflastersteinen aus Klinker und Beton werden die gleichen Konformitätsanforderungen gefordert. Die Anforderungen an die Betonpflastersteine sind in DIN und ÖNORM EN 1338, 1339 und 1340 beschrieben. Die Nutzung von Verbundpflastersteine führt zu einer Vielfalt von Steinformen und -farben, weshalb die Formkriterien wichtig sind. Nach ÖNORM EN 1338 teilen sich die Anforderungen an die Betonwerksteine in drei Hauptgruppen: Form und Maße(Nennmaße, Abstandshalter und zulässige Abweichungen), physikalische und mechanische Eigenschaften(Witterungsbeständigkeit, Spaltzugfestigkeit, Abriebwiderstand, Gleit-/Rutschwiderstand, Leistungsfähigkeit bei Brandbeanspruchung, Wärmeleitfähigkeit, Wasseraufnahme) und äußere Beschaffenheit(Aussehen, Oberflächenstruktur, Farbe). Nach diesen Kriterien bestimmt man die Klasse der Pflaster. Die deutschen Technischen Lieferbedingungen beschreiben ähnliche Daten.

Die Abmessungen der Pflasterplatten sind in Tabellen 2-4 und 2-5 anzusehen. Es existieren bestimmte Kriterien zu den Abweichungen der Geometrie der Platten, die in den Normen angesehen werden können. Der Witterungswiderstand und der Abriebwiderstand sollen bei Platten die gleichen Werte wie bei den Betonpflastersteinen aufweisen. Die charakteristische Biegezugfestigkeit muss 5 MPa sein und Mindestbiegezugfestigkeit 4 MPa. Die Bruchlast soll 5,6 kN nicht unterschreiten und

der charakteristische Wert soll 7 kN überschreiten. Zusätzliche Anforderungen an Pflasterplatten aus Klinker und Naturstein kann man in verschiedenen Normen finden.

Plattenformat bis L/B [cm]	Mindestplattendicke [cm]
24/24	8
32/32	10
36/24	10
48/32	12
48/48	12
72/48	14

Tabelle 2-4 Erforderliche Mindestdicke für Natursteinpflaster (RVS 03.08.63)

Plattenformat bis L/B [cm]	Mindestplattendicke [cm]
30/30	10
40/40	12
50/50	14
60/40	16
75/50	18
100/100	18

Tabelle 2-5 Erforderliche Mindestdicke für Betonpflasterplatten (RVS 03.08.63)

2.3.3 Bettung

Neben den Kriterien zu den Lieferkörnungen und die Unterschiede zwischen Österreich und Deutschland, gibt es auch einige wichtige Anforderungen an die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Bettungsmaterials. Die Bettung soll in allen Fällen eine Mindestdurchlässigkeit von $5x10^{-5}$ m/s und eine ausreichende Filterstabilität zu der Tragschicht aufweisen. Die Filterkriterien zwischen Bettung und Tragschicht bzw. Fugen werden im Kapitel 3 ausführlich erläutert. Andere Kriterien und Anforderungen an das Bettungsmaterial sind in den Tabellen 2-6 und 2-7 abgebildet, die den deutschen bzw. österreichischen Normen entsprechen.

Lieferkörnung	0/4, 0/5, 0/8, 0/11	
Feinanteil maximal	Durchgang 0,063 mm max. ≤ 5 M.-%	Kategorie UF_5
Feinanteil minimal	Durchgang 0,063 mm min. keine Anforderung	Kategorie LF_N
Überkorn	Durchgang oberes Sieb D = 90 bis 99 M.-%	Kategorie OC_{90}
Korngrößenverteilung	festgelegte Sieblinienbereiche	Kategorie G_U
Korngrößenverteilung	keine Anforderung	Kategorie G_N
Fließkoeffizient	4 Kategorien $E_{CS}35$ [1], $E_{CS}30$, E_{CS}angegeben, E_{CS}NR	
Kornform	SI_{50} (FI_{50})	
Zertrümmerung	$SZ_{18}(LA_{20})$, $SZ_{22}(LA_{25})$, $SZ_{26}(LA_{30})$	
Bruchflächigkeit	C_{NR} oder $C_{90/3}$	
Frostwiderstand	F_4	

Tabelle 2-6 Anforderungen an das Bettungsmaterial gemäß DIN-Norm 18318 (Pittochka, 2008)

Kriterien	Mindestanforderungen
Über- und Unterkorn	$G_C85–15$, G_F85
Kornform	SI_{20}
Anteil gebrochener Körner	$C_{90/3}$
Feinanteil grober Gesteinskörnungen	f_2
Feinanteil feiner Gesteinskörnungen	f_3 oder f_7
Festigkeit für LK III gem. RVS 03.08.63	LA_{20}
Festigkeit ab LK IV gem. RVS 03.08.63	LA_{25}
Wasseraufnahme	$WA_{24}1$
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit*)	F1

Tabelle 2-7 Anforderungen an das Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01

Hinsichtlich der Materialanforderungen bestehen zwischen den österreichischen und deutschen Anforderungen einige Unterschiede.Der Zertrümmerungswiderstand des Bettungsmaterials ist wichtig, da in der Bettung viele Spannungen aus Verkehrslasten und klimatischen Beanspruchungen auftreten. Die notwendigen Klassen für die Festigkeit bzw. Zertrümmerung sind nach den beiden Normen in Abhängigkeit von der Lastklasse LA_{20} und LA_{25}. Ähnliche Resultate sollen die Bettungsmaterialien auch bei den Kriterien Anteil gebrochener Körner oder Feinanteil feiner Gesteinskörnungen erzielen. Der Anteil gebrochener Körner muss eine Klasse $C_{90/3}$ besitzen, was bedeutet, dass 90% der Körner völlig gebrochen sein sollen und der Anteil der völlig runden Körner 3% nicht überschreiten darf. Der Durchgang in dem Sieb von 0,063 mm soll mehr als 5% betragen. Die Unterschiede sind bei den Kriterien Kornform, Frostwiderstand, Wasseraufnahme, bzw. Fließkoeffizient zu finden. Natürlich können die Unterschiede bei der Korngrößenverteilung wesentlich größere Werte aufweisen, wegen der Verwendung verschiedener Korngruppen in den Normen der beiden Staaten. Zusätzliche Kriterien befinden sich in TL Pflaster-StB und RVS 08.18.01. Lieferkörnungen aus der Kornklassen 2/5, 2/8 oder 2/11 sollen als Bettung nicht auf befahrenen Flächen hergestellt werden, wegen ungenügender Filterstabilität und Widerstand gegen Kornzertrümmerung.

2.3.4 Fugen

Die Anforderungen an das ungebundene Fugenmaterial sind in Deutschland und Österreich fast gleich. Das Fugenmaterial soll im Allgemeinen aus gebrochenen, kornabgestuften Gesteinskörnungen oder Baustoffgemischen bestehen. Das Größtkorn darf nicht die maximale Fugenbreite überschreiten. Deshalb sind Kornklassen 0/2, 0/4, 0/5 und 0/8 mm sehr geeignet. Fugenmaterial soll leicht einschlämmbarsein. Die wichtigste Anforderung an das Fugenmaterial ist die Filterstabilität gegenüberdem Bettungsmaterial.

In der Tabelle 2-9 sind die zusätzlichen Anforderungen an das ungebundene Fugenmaterial abgebildet. Der maximale Feinanteil darf einen Höchstwert von 9 % nicht überschreiten. Der minimale Feinanteil ist auf 2% beschränkt.

Lieferkörnung	0/2, 0/4, 0/5, 0/8, 0/11	
Feinanteil maximal	Durchgang 0,063 mm max. ≤ 5 M.-%	Kategorie UF_9
Feinanteil minimal	Durchgang 0,063 mm min. ≥ 2 M.-%	Kategorie LF_2
Überkorn	Durchgang oberes Sieb D = 90 bis 99 M.-%	Kategorie OC_{90}
Korngrößenverteilung	festgelegte Sieblinienbereiche	Kategorie G_U
Korngrößenverteilung	keine Anforderung	Kategorie G_N
Fließkoeffizient	4 Kategorien $E_{CS}35$, $E_{CS}30$, E_{CS}angegeben, E_{CS}NR	
Kornform	SI_{50} (FI_{50})	
Zertrümmerung	$SZ_{18}(LA_{20})$, $SZ_{22}(LA_{25})$, $SZ_{26}(LA_{30})$	
Bruchflächigkeit	C_{NR} oder $C_{90/3}$	
Frostwiderstand	F_4	

Tabelle 2-8 Anforderungen an das Fugenmaterial nach DIN 18318 (Pittochka, 2008)

Viele von diesen Kriterien sind ähnlich mit den Anforderungen an das Bettungsmaterial. Deshalb wird in den letzten Jahren empfohlen, die gleichen Sieblinien von Bettungs- und Fugenmaterial zu verwenden. Das führt zu zusätzlichen Vorteilen zu der Filterstabilität zwischen den beiden Schichten und dem besseren Zusammenwirken der ganzen Pflasterdecke. In Österreich sollen die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Fugenmaterials genau diesen des Bettungsmaterials entsprechen – also für das Fugenmaterial gelten auch die Anforderungen aus der Tabelle 2-8.

Nach RVS 08.18.01 gelten zusätzliche Anforderungen an das gebundene Fugenmaterial. Die Vielfältigkeit von gebundenem Fugenmaterial erhöht auch die Anzahl der Kriterien und Prüfungen für dieses. In der Praxis verwendet man Fugenwerksmörtel, Zementmörtel, bitumengebundenes Fugenmaterial und kunststoffgebundenes Fugenmaterial. Fugenwerksmörtel und kunststoffgebundenes Fugenmaterial sollen eine ausreichende Druckfestigkeit(mindestens 30 N/mm^2), Biegezugfestigkeit(mindestens 6 N/mm^2), Haftzugfestigkeit(mindestens 1 N/mm^2), Frostbeständigkeit und Wasserdurchlässigkeit nachweisen. Für die hydraulisch gebundenen Stoffe gelten auch zusätzliche Anforderungen an den W/B-Wert oder den Zementgehalt, die mit der Wahl von Pflaster bzw. Platten verbunden sind. Unter bitumengebundenem Fugenmaterial versteht man eigentlich eine bituminöse Vergußmasse.

2.3.5. Prüfungen für Pflasterbefestigungen

Nach RVS 08.18.01 teilen sich die Prüfungen insgesamt auf zwei Gruppen auf und zwar sind das die Eignungsprüfungen und die Abnahmeprüfungen.

Die Eignungsprüfungen sind von dem Hersteller bzw. dem Lieferanten durchzuführen und können von dem Auftragnehmer veranlasst werden. Die Ergebnisse sind dem Auftraggeber vor dem Einbau vorzulegen.

Die Abnahmeprüfungen werden im Allgemeinen von dem Auftraggeber veranlasst. Das Ziel dieser Prüfungen ist das Qualitätsniveau der bisher gemachten Produktion zu bestimmen. Die Prüfungen bestimmen die folgenden Kriterien:

- Lage- und Höhentoleranz – mittels Vermessungsbehelfe (z.B. Schnur, Latte, Maßband oder Maßstab) zu überprüfen
- Formabweichungen - mittels Vermessungsbehelfe (z.B. Schnur, Latte, Maßband oder Maßstab) zu überprüfen
- Querneigung - mittels Vermessungsbehelfe (z.B. Latte, Wasserwaage oder Maßstab) zu überprüfen

- Längsneigung der Wasserführenden Rinnen- wird in einem Abschnitt (zwischen Hochpunkt und Tiefpunkt) bestimmt und mittels Vermessungsbehelfe (z.B. Latte, Wasserwaage oder Maßstab) zu überprüfen
- Ebenheit – Nach ÖNORM B 2214 mittels Latte und Messkeil zu überprüfen
- Höhengleiche Anschlüsse - gemäß ÖNORM B 2214 mittels Latte und Messkeil zu überprüfen
- Versatz – gemäß ÖNORM B 2214 mittels Latte und Messkeil zu überprüfen
- Fugenbreite – mittels Maßstab zu überprüfen
- Verbandsregeln – Überprüfung erfolgt durch Sichtprüfungen in dem Baulos
- Fugenfüllung - Überprüfung erfolgt durch Sichtprüfungen in dem Baulos
- Materialanforderungen – Mit Handelsbegleitpapiere nachzuweisen

Die folgende Tabelle 2-10 zeigt die Arten und die Zahl der Abnahmeprüfungen in Abhängigkeit von der Prüflosgröße.

	Prüflosgröße und Anzahl der Prüfungen		
Art der Prüfung	≤ 500 m²	> 500 m²	Einfassungen
Lage- und Höhentoleranz	2	1 • je 250 m²	1 • je 100 m
Formabweichungen	–	–	1 • je 100 m
Querneigung	2	1 • je 250 m²	–
Längsneigung der Rinne	–	–	1 • je Abschnitt
Ebenheit	2	1 • je 250 m²	–
Höhengleiche Anschlüsse	x	x	–
Versatz	x	x	–
Fugenbreiten	x	x	–
Verbandsregeln	x	x	–
Fugenfüllung	x	x	—
Materialanforderungen	–*)	x	1 • je 250 m

Tabelle 2-9 Abnahmeprüfungen, Prüflosgröße und Anzahl der Prüfungen (RVS 08.18.01)

2.4. Beanspruchungen von Pflasterbefestigungen

2.4.1. Klimatische Beanspruchungen

2.4.1.1. Wasser

Die Wirkung des Wassers bei Pflasterbefestigungen kann als negativ bezeichnet werden. Eine möglichst schnelle Entwässerung der Oberfläche ist dabei nötig. Durch Quer- und Längsneigung kann nicht die ganze Wassermenge abgeleitet wird. Ein Teil davon versickert immer durch die Fugen in die unteren Schichten – Bettung, Trag- und Frostschutzschichten bis zum Untergrund. So entstehen große Probleme und Schäden. Das Wasser soll keinesfalls in den Schichten bleiben, deshalb sollen diese eine ausreichende Durchlässigkeit aufweisen.

Die Sickerung des Wassers nach unten hat zusätzliche Nachteile. Das Sickerwasser spült die feineren Körner aus und ändert damit die Korngrößenverteilung und die Eigenschaften. Außerdem werden oft ganze Kanäle ausgebildet. Diese Kanäle sind nicht tragfähig und bei geringerer Belastung aus Verkehr schließen sich diese improvisierten Wasserwege und die Schicht verformt sich. Unter Belastung und ungenügender Wasserdurchlässigkeit steigt die Flüssigkeit wieder nach oben und bringt Material aus den unteren Schichten mit. Dieses Phänomen wir als Pumpeffekt bezeichnet. Dabei

bestehtdie Gefahr, dass mit dem steigenden Wasser auch das Fugenmaterial aus den Fugen auf die Oberfläche eingebracht werden kann.

Auch ist es möglich, dass das Wasser das Fugenmaterial in die Entwässerungsrinnen und Schächte transportiert. Zusammenfassend wirkt das Wasser aus drei Gründen negativ auf die Pflasterbefestigungen aus: es ändert die Korngrößenverteilung und damit die Eigenschaften der Schichten, spült das Fugenmaterial aus den Fugen, kann in den Schichten bleiben und in der Frostperiode zu Verformungen führen.

2.4.1.2. Frost

Eine Frostschutzschicht oder frostsicherer Boden soll immer im Straßenbau vorhanden sein. Falls das Wasser in der Tragschicht oder in der Bettung bleibt und nicht nach unten sickert, ist das Problem vorhanden, dass bei der Frostperiode das Wasser Eislinsen ausbildet, die ein mit 20% größeres Volumen aufweisen.

2.4.1.3 Hitze

Jedes Material hat einen unterschiedlichen Temperaturausdehnungskoeffizient und verhält sich bei großen Temperaturen unterschiedlich. Bei den ungebundenen Pflasterdecken verlängert sich das Pflaster nur geringfügig, was zu vernachlässigbaren Spannungen in dem Fugenmaterial führt. Das Problem aus den Hitzebeanspruchungen entsteht bei den gebundenen Pflasterbefestigungen, da diese eine größerezusammenwirkende Fläche aufweisen. Dann sind hier die Spannungen und die Verlängerungen bzw. die Verkürzungen auch wesentlich. Das ist besonders bei Pflastern ausgeprägt, die mit Zementmörtel befestigt sind. Deshalb ist in diesen Fällen die Anordnung von Dehnungsfugen in der gemörtelten Bettung in einem Abstand von ca. 8 m notwendig.

2.4.1.4 Wind

Bei nicht gut verzahntem Fugenmaterial zwischen den Steinen kann der Wind auch zu Schäden führen. Bei nicht guter Verdichtung und losem und feinem Material kann die stark gerichtete Luft Körner aus den Fugen aussaugen und damit diese entleeren.

2.4.2. Dynamische Belastungen

Die häufigste und größte Belastung, die auf die Pflasterbefestigung einwirkt, resultiert aus der Verkehrsbeanspruchung. Am häufigsten werden unterschiedliche Arten von Verformungen beobachtet. Die Verteilung der Kräfte infolge des bewegenden Fahrzeugs ist für die Befestigung sehr ungünstig, da neben der vertikalen Kraft aus dem Gewicht des Fahrzeuges auch eine horizontal gerichtete Kraft aus dem Rollen des Rades vorkommt. Das erzeugt Spannungen in horizontale und vertikale Richtung.

In den Kurvenbereichen und in Flächen, in denen oft Beschleunigungs- und Bremskräfte auftreten, entsteht die Gefahr vor größeren horizontalen Spannungen und starken Verformungen. Üblicherweise sind in solchen Fällen zusätzliche Maßnahmen zur Schubfestigkeit der Pflasterbefestigung zu treffen. Als solche zählen die Verwendung von dicken Steinen, Vermörtelung der Bettung usw.

Bei nicht beweglichen Fahrzeugen wie geparkte Autos und LKW entstehen die sogenannten Punktlasten, die auch die Pflasterbefestigung beanspruchen. Die Pflasterdecken sollen auch Stoßlasten ertragen, die aus Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche entstehen. Die Belastungen aus Rad- und Fußgängerverkehr sind vergleichsweise gering.

Andere dynamische Beanspruchungen, die auf Pflasterdeckschichten einwirken, entstehen durch das Rütteln bei der Herstellung der Pflasterbefestigungen. Dabei ist es beim Rütteln sehr wichtig, eine ausreichende Verdichtung zu schaffen ohne das elastische Verhalten der Bettung zu stören.

2.4.3. Schäden

Die Schäden bei Pflasterdeckschichten werden aus unterschiedlichen Gründen verursacht. Oft führt die ungenügende Tragfähigkeit desUntergrundes oder der Tragschicht zu starken vertikalen Verformungen. Am Übergang zwischen Pflasterbelag und Asphaltdecken können horizontale Verformungen auftreten, die von Horizontalkräften wie Brems- oder Anfahrkraft verursacht werden. Auch nichttragfähige Randeinfassungen werden durch die Schubbeanspruchungen zerstört. Die Pflasterdecke verliert die seitliche Abstützung.

Abbildung 2- 7 Mangelhafte Randeinfassung (Wichter, 1996).

Die häufigsten Schadensfälle geschehen wegen der ungünstigen Entwässerung. Nicht ausreichendes Gefälle oder undurchlässige Tragschichten führen zu einem Verbleiben des Wassers in der Bettung. Die Körner des Bettungsmaterials werden mit dem des Fugenmaterials ausgetragen. Dabei entstehen Kippbewegungen der Pflastersteine, wodurch die Kanten zerstört werden.

Außerdem ist die Stützfunktion der Fugen durch falsche Kombination der Körnung von Fugenfüllung und Bettung gefährdet. Bei zu grobem und hohlraumreichem Bettungsmaterial dringen die Feinsande aus den Fugen in die Bettung hinein. Die Fugen werden entleert und die Bettung wird sehr hart und verliert teilweise das elastische Verhalten.

Abbildung 2- 8 (links) Ungenügende Filterstabilität zwischen Bettungs- und Fugenmaterial (Wichter, 1996)

Abbildung 2- 9 (rechts) Schäden durch mangelhafte Entwässerung (Wichter, 1996)

In den Abbildungen 2-7, 2-8 und 2-9 sind einige dieser Schadensfälle dargestellt. Ein Unebenheitsausgleich durch Bettung kann sehr schädlich sein, da die Gefahr besteht, dass bestimmte Bereiche der Pflasterbefestigung, wo die Bettung dicker ist, sich stärker verformen.

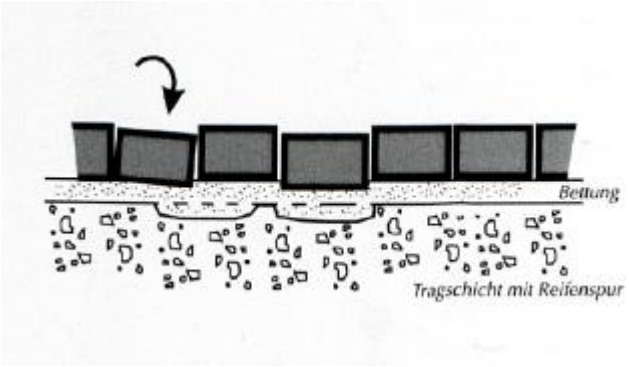


Abbildung 2- 10 Schäden durch unterschiedliche Dicke der Bettung (Wichter, 1996)

2.5. Wirkungsweise Bettung-Fuge

Die Bettung hat die Hauptaufgabe Unregelmäßigkeiten in den Pflastersteinmaßen zu eliminieren. Dabei hilft sie für die Übertragung der Spannungen zu den unteren Tragschichten. Die Fugen unterstützen das Zusammenwirken einzelner Steine und wirken positiv auf der Verminderung der horizontalen Verschiebungen der Konstruktion. Sie garantieren die Zusammenarbeit und die Mitwirkung aller Pflastersteine in einem Verbund.

Als Zusammenfassung der in der Praxisauftretenden Schäden ist festzustellen, dass die Fuge und Bettung eine wesentliche Rolle für das Zusammenwirken haben. Dabei sind die Wasserdurchlässigkeit und die Tragfähigkeit von großer Bedeutung, dass die Sieblinien der beiden Materialien eine konstante Korngrößenverteilung besitzen. Unter Verkehrsbelastungen und Strömungen von Wasser wandert das Fugenmaterial in die Bettung.Das ist immer zu vermeiden, da sonst die Eigenschaften der beiden Konstruktionselemente verändert werden können. Um das zu gewährleisten sind die Materialien so zu wählen, dass keine Wanderung stattfindet. Normalerweise ist die Filterstabilität zwischen Bettung und Fuge dafür verantwortlich.Sie hat für das Verhalten der Pflasterbefestigung und ihre Lebensdauer und Tragfähigkeit eine enorme Bedeutung

3 Filterstabilität

3.1. Definition von Filterstabilität

Bei den Pflasterbefestigungen wird über Filterstabilität zwischen Tragschicht und Bettung und zwischen Bettung und Fugen gesprochen. In Schichten, wo Wasser ständig fließt, besteht die Gefahr, dass feine Körner aus der verdichteten feinkörnigeren Schicht in die grobkörnigere Schicht eindringen.

Die Filterstabilität verfolgt die Zielsetzung, welche Korngrößenverteilungen zwei aneinander grenzende Schichten aufweisen dürfen, ohne dass feine Körner der feinkörnigen Schicht in die grobkörnige Schicht eindringen, wenn Wasser strömt und dynamische Belastungen vorhanden sind. Wenn zwei benachbarten Schichten filterstabil sind, gibt es keine Gefahr, dass ein großer Teil des Materials in eine andere Schicht wandert.

Bei den Pflasterbefestigungen ist es von besonderer Bedeutung, dass das Bettungs- und Fugenmaterial eine festdefinierte und konstante Sieblinie erhalten, die nach dem Einbau und im Betriebszustand keine große Unterschiede aufweisen. Ohne Filterstabilität zwischen Fugen und Bettung wird das Fugenmaterial in die Bettung durch die Wirkung des strömenden Wassers eingeschlämmt. Die Fugen bleiben leer und können nicht mehr den Verband zwischen den Einzelsteinpflastern gewährleisten. Die letzten beginnen sich zu verschieben und die Konstruktion wird damit nicht stabil und zu diesem Zeitpunkt erscheinen die ersten Schäden. Das sind z. B. Aufkippungen der Steine, horizontale oder vertikale Verschiebungen und andere. Neben den leeren Fugen beginnen die Pflastersteine aneinander zu schlagen und die Kanten werden damit abgebrochen. Ein anderes Szenario ist, wenn das Eindringen des feinkörnigeren Materials die Hohlräume verstopft und das Wasser nicht mehr nach unten frei sickern kann. Dann fließt das wieder nach oben und spült das Material aus den Fugen auf die Oberfläche (der sogenannte Pumpeffekt). Als Resultat sind die Fugen wieder leer und die Schadensbildung beginnt. Außerdem wird die Bettung sehr steif, da fast keine Hohlräume geblieben sind.

Genauso ist die Situation auch zwischen der Bettung und der oberen Tragschicht. Die fehlende oder mangelhafte Filterstabilität zwischen den beiden führt zu Verformungen, die an der der Oberfläche durchschlagen. Hier kann in einigen Fällen die Filterstabilität durch Verlegung von Geotextilien gesichert werden. In dem nächsten Bild ist die vertikale Verformung wegen ungenügender Filterstabilität zwischen Bettung und Tragschicht zusehen. Dort, wo das feinere Material nach unten sinkt, entstehen auf der Oberfläche Senkungen von einzelnen Pflastersteinen und auch von ganzen Bereichen.

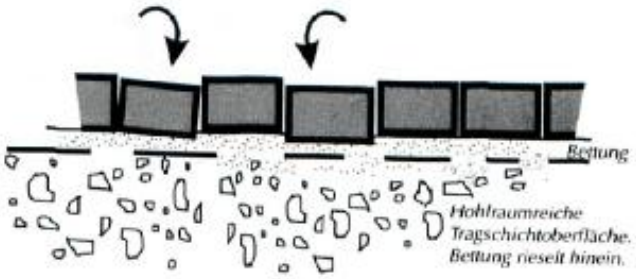


Abbildung 3- 1 Bewegung der Pflastersteine infolge ungenügender Filterstabilität zwischen Bettungs- und Tragschicht (Wichter,1996).

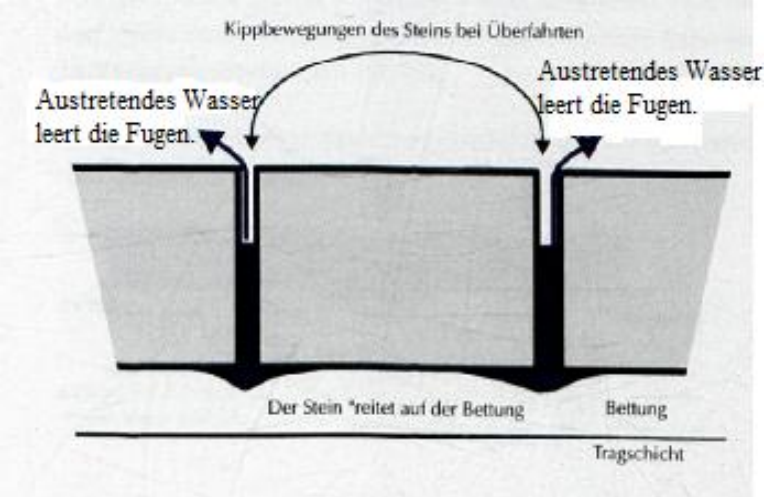


Abbildung 3- 2 Kippbewegungen des Steins wegen Entleerung der Fuge (Wichter, 1996).

Diese Schadensfälle sind bei nicht ausreichender Filterstabilität zwischen den Schichten zu beobachten und werden von den Erscheinungen Erosion, Kontakterosion, Suffosion und Kolmation verursacht.

3.2. Definition und Einfluss der Begriffe Erosion, Kontakterosion, Suffosion und Kolmation

Unter Erosion versteht man die Umlagerung und den Transport von fast allen Korngrößen eines Bodens infolge Wasserströmung. Man unterscheidet zwischen:

- äußere Erosion: Die Schleppkraft des an der Schichtoberfläche strömenden Wassers überwindet die zusammenhaltenden Kräfte der Feinteilchen.
- innere Erosion: Das strömende Wasser bildet Kanäle in dem inneren Teil der Schicht
- Kontakterosion: Das ist eigentlich die Erosion, die in der Kontaktfläche zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Schichten entsteht; also Kontakterosion tritt auf, wenn ein derartiger Materialtransport an der Grenze zwischen zwei Bodenschichten verschiedene Körnungslinien entsteht.

Die Erosion ist für eine große Menge der Schadensfälle verantwortlich, da diese eine Umstrukturierung der Schicht verursacht. Es kommt zu Bildung von Erosionskanälen, die die Tragfähigkeit der Schicht vermindern.

Eine andere Erscheinung ist die Suffosion. Bei der Suffosionwerden nur die feinkörnigen Bestandteile einer Schicht ausgespült, während ein grobkörniges Korngerüst erhalten bleibt. Dabei wird die Struktur des Bodens nicht zerstört und die Wasserdurchlässigkeit erhöht sich wesentlich. Die Klassifizierung der Suffosionsvorgänge ist analog zu dieser der Erosion und wird auch unterschieden zwischen:

- äußerer Suffosion
- innerer Suffosion
- Kontaktsuffosion

Eine ausführliche Veranschaulichung der Vorgänge kann in den unteren Bildern entnommen werden. Die Suffosions- bzw. Erosionserscheinungsmöglichkeit hängt von einer komplexen Zahl von Werten – Korngröße, Korngrößenverteilung, Filterfestigkeit der benachbarten Schichten, Fließgeschwindigkeit des Wassers u.a. ab. Nach zahlreichen Prüfungen und Untersuchungen wurde ermittelt, dass am

meistens gefährdet ist der Kornbereich von 0,02 bis 0,6mm. Bei Böden mit höherer innerer Kohäsion ist diese Gefahr nicht so hoch. Von Erosionsgrundbruch oder rückschreitender Erosion wird gesprochen, wenn durch das Austreten von Sickerwasser aus dem Boden in zunehmendem Umfang Bodenteilchen mitgerissen werden und sich dabei im Boden eine Röhre (Erosionskanal) bildet, die im Endzustand Wasser frei durchströmen lässt. Wenn an Sickerwasseraustrittsflächen das hydraulische Gefälle unter den Grenzwerten liegt, besteht keine Gefahr rückschreitender Erosion, die vom Ungleichförmigkeitsgrad des Bodens stark beeinflusst wird.

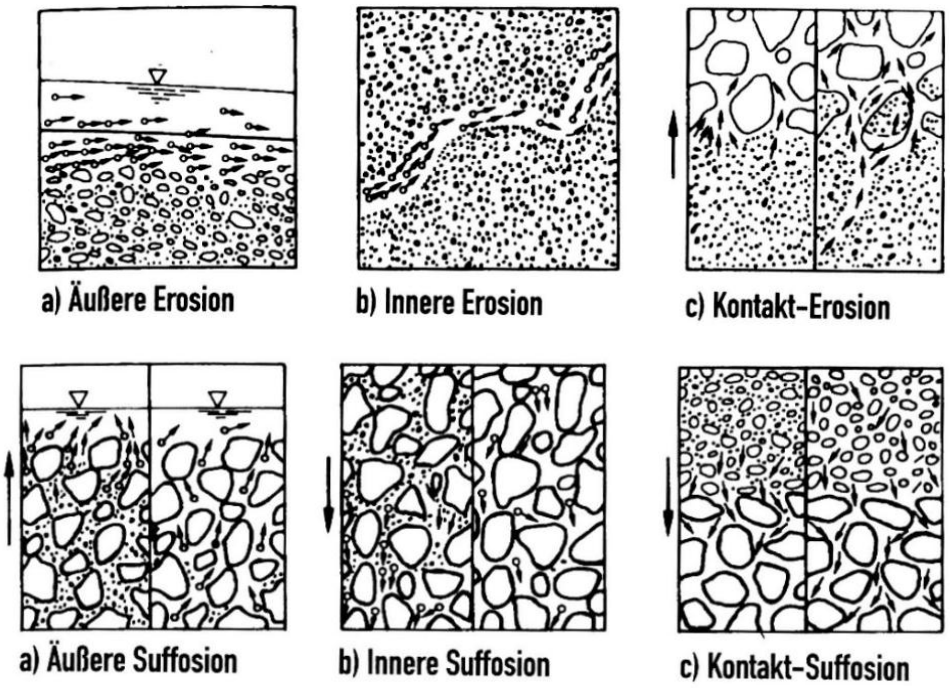


Abbildung 3- 3 Veranschaulichung von den Prozessen Erosion und Suffosion in verschiedenen Formen (Sherhard, 1976).

Zur Beurteilung einer Erosionsgefahr kann auch das Hjulstrøm-Diagramm benutzt werden. Es zeigt eine Beziehung zwischen dem entsprechenden Korndurchmesser und der kritischen Geschwindigkeit v_w an, die die Körner in Bewegung bringt. Es wird auch die Verwendung einer Formel empfohlen, wenn man das genaue Material zur Vermeidung von Erosion wissen will und zwar:

$d = 40 \cdot v_w^2 / (0{,}9 - \tan \beta)$, wo d (mm) der erforderliche Korndurchmesser, v_w (m/s) dielokale Geschwindigkeit des Wassers und β der Böschungswinkel

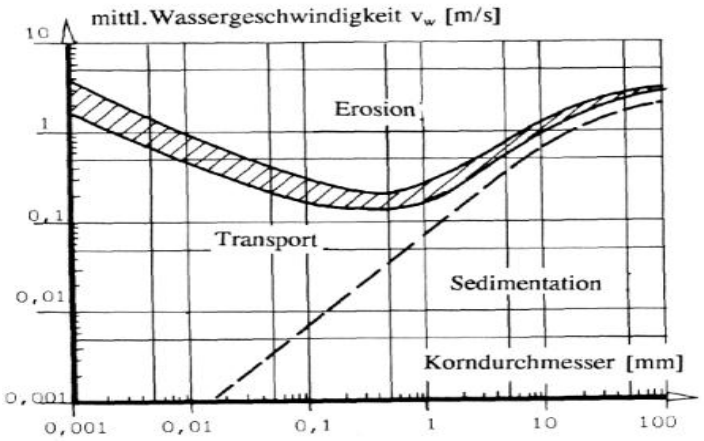


Abbildung 3- 4 Hjulstrøm-Diagramm (Hjulstrøm)

Wenn die Körner in einem guten Verbund verzahnt sind, kann d bis auf die Hälfte vermindert werden. Es ist allerdings zu beachten, dass es in dem Hjulstrøm-Diagramm um ein gleichförmiges Anströmen geht.

Um Suffosion und Kontakterosion zu vermeiden, sind Filterregeln zu beachten. Die Sicherheit gegen diese Erscheinungen ist von der Filterstabilität zwischen benachbarten Bodenbereichen bzw. innerhalb eines gemischtkörnigen Bodens mit Ausfallkörnungen sowie vom hydraulischen Gradienten, der die Fließgeschwindigkeit des Wassers bestimmt, abhängig.

Mit Kolmation wird die Verstopfung von Bodenporen durch feinere Bodenteilchen bzw. durch Ausfällungsprodukte bezeichnet, die an anderer Stelle infolge Erosion oder Suffosion herausgelöst wurden.

Alle diese Prozesse führen bei den Pflasterbefestigungen zu großen Schäden infolge Entleerung von Fugen oder Versteifung der Bettung und Zerstörung der Pflastersteinkanten. Da diese Erscheinungen hauptsächlich von der Korngrößenverteilung der Schichten abhängen, besteht die Notwendigkeit, Regeln zu definieren, die die Anfälligkeit dieser Prozesse behindern.

3.3. Methoden zur Ermittlung der Filterstabilität zwischen zwei benachbarten Schichten.

Die Notwendigkeit zur Ermittlung von Filterregeln ist noch Anfang des 20. Jahrhundert entstanden. Zuerst wurde die ungenügende Filterstabilität und die Schäden aus Erosion und Suffosion bei dem Bau von Brunnen, Dämmen und Rohrleitungen beobachtet. Aus dieser Zeit stammen auch die ersten Filterkriterien, die von Terzaghierarbeitet wurden.

3.3.1 Filterregeln von Terzaghi

Das sind die ersten Filterkriterien, die von Terzaghi theoretisch mittels Kugelmodellen oder praktisch mit spezifischen Filteruntersuchungen ermittelt wurden. Sie gibt an, welche Kornverteilungen zwei aneinandergrenzende Böden haben dürfen, ohne dass feine Körner des dichteren Bodens ausgespült werden, wenn Wasser durch den Boden strömt. Diese Kriterien darf man nur verwenden wenn die Ungleichförmigkeitszahl kleiner oder gleich 2 ist. Das bedeutet, dass das Verhältnis zwischen den Korndurchmessern bei 60% und bei 10% der beiden Materialien(von Bettung und von Fugen) kleiner als 2 sein muss. Die Kornverteilungen von Böden werden durch Siebe mit ihren entsprechenden Sieblinien ermittelt. Der durchlässigere Boden mit den größeren Körnern (in unserem Fall das Bettungsmaterial) darf nicht so große Hohlräume besitzen, dass die feinen Körner des dichteren Bodens(Fugenmaterial) hindurch passen. Um das zu gewährleisten, muss die sogenannte mechanische

Filterfestigkeit erfüllt sein. Das Verhältnis der Korngröße D_{15} des Filtermaterials zu d_{85} des abzufilternden Bodens muss dazu kleiner/gleich 4 sein. D_{15} und d_{85} sind dabei die Siebgrößen, bei denen 15 bzw. 85 % der Körner durch das Sieb durchgehen.

$$D_{15}/d_{85}<4$$

- D_{15} = Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang (des Bettungsmaterials)
- d_{85} = Durchmesser bei 85 % Siebdurchgang (des Fugenmaterials)

Eine weitere Regel bei der Auswahl des Filtermaterials ist die Durchlässigkeitsregel bzw. die sog. hydraulische Wirksamkeit. Diese wird berechnet mit:

$$D_{15}/d_{15}>4$$

als Zusatzbedingung muss $D_{15}/d_{15}<20$ erfüllt sein. Das ist auch als erweiterte Filterregel bekannt. Für die Gewährleistung der Filterstabilität sollen alle drei Regeln erfüllt werden. Nach Terzaghi können auch die dazu geeigneten Diagramme benutzt werden. So können durch die Sieblinien die notwendigen Werte ermittelt und so auch die Filterstabilität bestimmt werden.

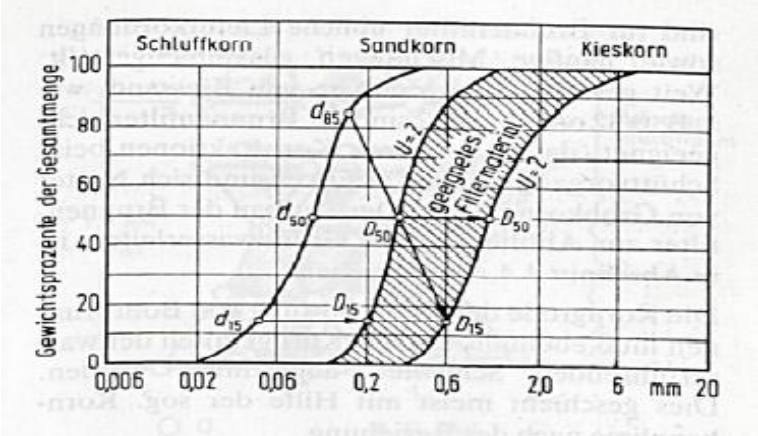


Abbildung 3- 5 Bereich und Diagramm zur Bestimmung der Filterregeln von Terzaghi (Terzaghi, 1961).

3.3.2. Filterregeln von Cistin/Ziems

In der Praxis bei höheren Ungleichförmigkeitszahlen(U>2) werden oft die Filterkriterien von Cistin/Ziems bevorzugt. Das gilt auch für die Pflasterbefestigungen und für die Filterstabilität zwischen Bettungs- und Fugenmaterial. In diesem Fall ist ein Diagramm zu benutzen, wo eigentlich zwei Werte zu beobachten sind. Um die Filterstabilität zwischen den Schichten zu sichern ist die Formel $A_{50} \leq A_{zul.}$ zu beachten. A_{50} ist das Verhältnis D_{50}/d_{50} und dann kann man leicht $A_{zul.}$ nach dem Diagramm ermitteln.

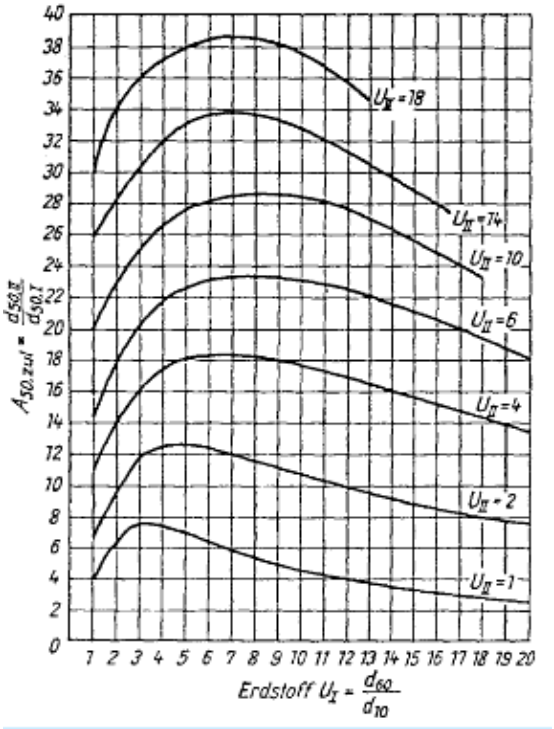


Abbildung 3- 6 Diagramm von Cistin/Ziems

Hier wird die Korngrößenverteilung aus der Sicht des zulässigen Abstandsverhältnisses betrachtet. Diese Relation hängt von der Ungleichförmigkeitszahl ab. Deshalb werden die Böden in 2 Teilen- Bettungs- und Fugenmaterial - geteilt und haben die entsprechenden Werte von UI und UII, nach denen der zulässige Wert ermittelt werden kann.

3.3.3. Weitere Filterregeln

Eine andere Filterregel, die in der Praxis benutzt wird, ist das Filterkriterium von Sichard. Er schlägt vor, dass eine Relation $D_{50}/d_{50} \leq 4{,}5$ vorhanden sein soll, um die Filterstabilität zu sichern. Diese Kriterien berücksichtigen nicht die Ungleichförmigkeitszahl im Unterschied zu den Filterregeln von Terzaghi und Cistin/Ziems. Die US BureauofReclamation(USBR, 1960) gibt für gleichförmige Feinsande ein Verhältnis D_{50}/d_{50} von 5 bis 10 an.

Weitere Filterregeln sind in den Büchern von Striegler und Werner(1969), Günther(1970), Wittmann(1980), Floss (1979) und Wehner, Siedek und Schulze(1977) nachzulesen.

Es gibt auch andere Formeln, die die Verhinderung der Prozesse Erosion und Suffosion sichert. Die Sicherheit gegen Kontakterosion ergibt sich bei einer vertikalen Durchströmung von unten nach oben also gegen das Eigengewicht des Bodens nach MÜLLNER (1991) mit der Hilfe der Formel:

$$\frac{6c_o}{D_P(i\gamma_w - \gamma')}$$ **Gleichung 2**

mit c_o = Zugfestigkeit des durchströmten Bodens

D_p = Durchmesser offener Poren im benachbarten groben Material

i = hydraulisches Gefälle

γ_w = Wichte des Wassers

γ' = Wichte des Bodens unter Auftrieb

Nach Davidenkoff sieht die gleiche Formel ein bisschen anders aus:

$$\frac{15c_o}{D_P(i\gamma_w + \gamma')}$$ **Gleichung 3**

Untersuchungen zum Nachweis der Sicherheit gegen Suffosion beschränken sich auf Untersuchungen zur Kontaktsuffosion in der Kontaktzone zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Schichten (Davidenkoff). Zur Übertragung der Sicherheit gegen Kontaktsuffosion kann ein Durchlässigkeitsversuch durchgeführt werden, bei dem der Filterstein an der Abflussseite der Probe einen maximalen Porendurchmesser von 0,04 bis 0,1 mm aufweist. Dieser Durchlässigkeitsversuch wird mit i = 30 über einen Zeitraum von 10 Tagen durchgeführt. Zur Vermeidung von Kolmation im Filterstein ist dieser mindestens einmal während des Versuchs zu reinigen bzw. auszutauschen.

3.4. Nationale und internationale Filterkriterien von Pflasterbefestigungen

Der Nachteil dieser Filterregeln besteht darin, dass diese nur die Wirkung des strömenden Wassers durch die Schichten in Betracht ziehen. Bei der Pflasterbefestigung treten aber auch viele Spannungen, Verformungen und Bewegungen auf, die von Verkehrsbelastungen verursacht werden. Diese Beanspruchungen werden nicht beachtet, da die Filterregeln ursprünglich nur bei dem Bau von Dämmen, Rohrleitungen und anderen Wasserbauten als wichtig erachtet wurden. Und bei solchen Anlagen ist der dynamische Anteil der Belastungen viel geringer.

In den österreichischen Normen und Richtlinien (RVS 08.18.01) ist die Filterstabilität zwischen Tragschicht und Bettung und zwischen Bettung und Fuge normiert. Damit die Tragschicht und die Bettung filterstabil ist, sollen zwei Kriterien bzw. Parameter erfüllt werden: d_{15}(Tragschicht)/d_{85}(Bettung) ≤ 5, was eine Sicherheitsbedingung für Erosion ist und d_{50}(Tragschicht)/d_{50}(Bettung) ≤ 25, welche die Sicherheitsbedingung von Kontakterosion ist. Die Filterkriterien zwischen Bettung und Fuge sind noch strenger - d_{15}(Bettung)/d_{85}(Fuge) ≤ 2 und d_{50}(Bettung)/d_{50}(Fuge) ≤ 10, welche wie oben die Bedingungen für Sicherheit von Erosion und Kontakterosion sind.

In den deutschen Normen und Richtlinien und zwar in der ZTV-Pflaster-StB und DIN 18318 ist das Bild im Vergleich zu Österreich fast ähnlich. Die Sicherheitsbedingungen für Filterstabilität zwischen Tragschicht und Bettung sind die gleichen. Der erste Unterschied besteht in dem Verhältnis für Erosionssicherheit d_{15}(Bettung)/d_{85}(Fuge), wo nach ZTV Pflaster-StB statt 2 eine 4 steht. Dann kommt bei den Deutschen eine zusätzliche Durchlässigkeitsbedingung, die in den österreichischen Richtlinien RVS 08.18.01 nicht zu finden ist. Dabei spielt in Deutschland auch die Ungleichförmigkeitszahl eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung der Filterkriterien zwischen den Schichten.

Für Pflasterbefestigungen in den USA werden die Filterkriterien von den sogenannten Corps of Engineers verwendet, die auch mit den entsprechenden modifizierten Terzaghikriterien rechnen. Diese sind mit den europäischen fast gleich: $D_{15}/d_{85} \leq 5$, $D_{15}/d_{15} \geq 5$ und $D_{50}/d_{50} \leq 25$, wo D der Korndurchmesser der Bettung und des Fugenmaterials ist. Das Verhältnis D_{50}/d_{50} wurde dann von dem so genannten Bureau of Reclamation aktualisiert und verändert zu 5 bis 10.

In Bulgarien ist die Richtlinie für die im Straßenbau erlaubten Gesteinskörnungen БДС EN 13139:2004. Diese Normen ermitteln das Verhältnis zwischen den Kornweiten von Fugen- und Bettungsmaterial nicht. In meinem Land gelten nur die Bedingungen zur Erosion und Kontakterosion zwischen den Materialien. Dazu kommen auch Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit, die aber nicht mit der Korngrößenverteilung zwischen den verwendeten Materialien ermittelt wird. Das

Problem besteht darin, dass die gepflasterten Straßen keine Regelbauweise sind und deshalb bleiben diese unnormiert. Hauptsächlich vermörtelt man hier die Fugen und die Bauweise mit hydraulisch gebundenen Fugen wird offen benutzt. In den älteren Normen können für die Filterstabilität zwischen den Schichten die erweiterten Filterregeln von Terzaghi gefunden werden, dass $D_{15}/d_{85} < 4$ und $D_{50}/d_{50} < 25$ sein soll.

3.5. Untersuchungen zur Bestimmung von Filterkriterien

Die Filterkriterien in den Normen werden seit Jahren nicht verbessert oder ergänzt trotz den steigenden Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften der Straßen.Einige wenige Untersuchungen sind in (Krass,2006), (Shackel, 1997) und (Bartley, 1980) dargelegt.

Die Zahl von komplexen Faktoren, die die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial bestimmen, ist ziemlich groß. Deshalb finden ständige Veränderungen der Filterregeln statt. Diese kommen hauptsächlich aus den Erfahrungen und Schadensfällen bei den Pflasterbefestigungen. Dazu dienen auch die Untersuchungen von dem Material für Fugen und Bettung in verschiedenen Laboratorien. Durch unterschiedliche Versuche unter bestimmten Randbedingungen werden die Filterstabilität und die besten Kombinationen von Sieblinien der beiden Schichten ermittelt.

In vielen Universitäten werden die in den Normen und Richtlinien gegebenen Filterkriterien wegen der zunehmenden Verkehrsbelastung bei Pflasterbefestigungen noch mal überprüft. Ein Beispiel dazu sind die Untersuchungen an der Universität Bochum über die Filterstabilität zwischen Bettungs- und Fugenmaterial. Mit einer Vielfalt von Voruntersuchungen und Hauptuntersuchungen werden die besten und die schlechtesten Kombinationen zwischen verschiedenen Materialien für Bettung und Fuge bestimmt.Die Versuche werden mit Bettungs- und Fugenmaterialien aus Diabas, Kalkstein und Natursand mit verschiedenen Körnungen durchgeführt. Die Randbedingungen variieren von Rütteln bei nassem und trockenem Zustand, reiner Beregnung bis Kombination von Beregnung und Rütteln. Im Allgemeinen ist der schlimmste Fall für die Filterstabilität genau bei der komplexen Belastung aus fließendem Wasser und dynamischer Beanspruchung. Bei den Voruntersuchungen ist die dynamische Last das Rütteln und bei den Hauptuntersuchungen wird ein Model gebaut, das dem Pflasteroberbau entspricht. Dann kommt ein Überrollen mit einem Rad mit Vertikalbelastung von 25kN und 30000 Überrollungen. Vor dem Beginn der Untersuchungen werden die Sieblinien der Bettungs- und Fugenmaterialien und auch die Korngrößenverteilungen ermittelt. Nach der Durchführung wird das gleiche gemacht und die Resultate werdenmiteinander verglichen. So wird der Verlust von feinkörnigen Fugenmaterial berechnet.

Dann werden die Ergebnisse ausführlich analysiert und Schlussfolgerungen werden herausgezogen. Dabei werden die Filterkriterien im Zusammenhang der Untersuchungen ein bisschen verbessert und es kommt zu dem Entschluss, dass die Sieblinien zwischen der Bettung- und der Fugenschicht näher parallel zueinander stehen oder sogar fast übereinstimmen sollen. Um die Bedingungen zu Erfüllung sind nach Krass die folgenden Filterkriterien einzuhalten:

$$D_{15}/d_{85} \leq 4$$

$$D_{50}/d_{50} \leq 5$$

$$D_{15}/d_{15} \geq$$

4 Voruntersuchungen zur Bestimmung der Grenzbedingungen

4.1. Zielsetzung und Versuchskonzept

Das Ziel der Versuche ist Kriterien zu der Filterstabilität zwischen Bettungs- und Fugenmaterial zu verbessern oder zu ergänzen. Die bisher gebrauchten Filterkriterien von Terzaghi und von anderen Autoren sind hauptsächlich im Bereich des Dammbaus verwendbar und sind für Pflasterbefestigungen nicht oder nur begrenzt geeignet. Außerdem soll der Versuchsaufbau leicht und konventionell sein, so dass er in jedem Labor mit geringerem Aufwand von Kosten und Apparatur durchgeführt werden kann. Um das zu schaffen, werden einige Voruntersuchungen durchgeführt, um die optimalen Parameter der weiteren Versuche zu bestimmen.

Die Idee ist eigentlich den ganzen Prozess der Bewegung der Bodenteile in den Formen Erosion, Suffosion oder Kontakterosion zu beobachten, um die schädlichsten Versuchsbedingungen genauer zu beschreiben. Der Versuchsprozess wird insgesamt in 2 Teilen durchgeführt– Voruntersuchungen und Hauptuntersuchungen. Deswegen werden bei den Voruntersuchungen unterschiedliche dynamische Belastungssituationen und Wasserbeanspruchungen ausprobiert und auf der Grundlage der Resultatewird eine genaue Versuchsdurchführung für die zukünftigen Versuche ermittelt.

Die Probe soll immer stabil sein – das Bettungs- und das Fugenmaterial sollen nicht ganz völlig vermischt sein, da in diesem Fall eine Grenze nicht eindeutig bestimmt werden kann. Man soll bei den Versuchen alle Änderungen in den Mengen der Materialien und in dem prozentuellen Anteil an einzelnen Kornklassen vorsichtig beschreiben und messen. Auf der Basis der Ergebnisse nach den Versuchen kann man leicht die Kriterien der Filterstabilität $D_{15}/d_{85} < 2$ und $D_{50}/d_{50} < 10$ (nach den österreichischen RVS 08.18.01) überprüfen und falls nötig auch zusätzliche Filterstabilitätsregeln bestimmen. Außerdem können auch zusätzliche Bedingungen mit der Hilfe der Korngrößenverteilung und Sieblinienbildung ermittelt werden.

4.2. Versuchsapparatur und Materialien

Zur Erfüllung des so beschriebenen Ziels benutzen wir die folgende Versuchsapparatur- durchsichtlicher Zylinder mit Außendurchmesser 20cm und Innendurchmesser rund 19 cm, der die Beobachtung der Teilchenbewegung zwischen den Bettungs- und Fugenschichten ermöglicht. Dieser Zylinder wird durch Messstriche so eingeteilt, dass man die genaue Grenzen zwischen den Schichten und das maximaleWasserniveau erkennen kann. Platte mit Löchern und Stützbeinen, die als Boden des Zylinders dienen und durch die Stützbeine zu einen Sieb gestützt wird. Diese Platte soll sich leicht in dem Zylinder einpassen. Die Löcher sollen leicht das fließende Wasser nach unten ermöglichen. Der Durchmesser dieser Löcher ist aber 5 mm und das bedeutet, dass auch ein großer Teil des Materials ausgelöst werden kann. Deswegen brauchen wir zwei runde Scheiben Geotextil, die nur die feineren Bodenteilchen nach unten durchlassen. Als nächster Teil der Untersuchungsapparatur kommt eine Platte mit Löchern, aber ohne Stützbeine, die zur Profil- und Ebenheitsregelung dient. Mit ihrer Hilfe kann man leicht die Ebenheit der Schichten regulieren und sie kann auch als Auflage für mögliche zusätzliche Auflast dienen. Als Letztes brauchen wir natürlich auch eine Rüttelsiebapparatur mit Bewässerungsmöglichkeit, die die dynamische bzw. Wasserbeanspruchung ermöglicht. Alle Teile, die bei den Untersuchungen verwendet wurden, können am Bild 4-1 betrachtet werden.

Abbildung 4- 1 Teile der Versuchsapparatur- durchsichtliches Zylinder, Sieb, Stahlplatte mit Löchern und Stahlplatte mit Löchern und Stützbeinen

Als Materialien für die ersten Untersuchungen wird ein Gemisch Loja 0/2 als Fugenmaterial und Loja 0/4 als Bettungsmaterial verwendet. Die Sieblinien der entsprechenden Materialien können in der Abbildung4-2angesehen werden. Die Sieblinien werden nach dem Beispiel von ähnlichen schon durchgeführten Versuchen in Deutschland ermittelt.

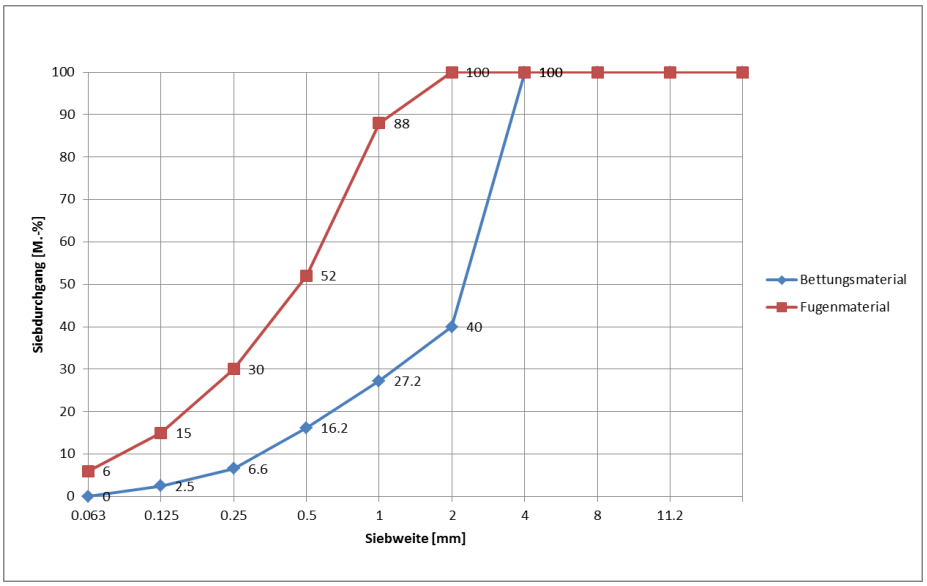


Abbildung 4- 2 Sieblinien des Bettungs- und Fugenmaterials

Aus der Abbildung 4-2 kann leicht ermittelt werden, dass D_{15}=0,23 mm und d_{85}=0,48 mm sind. Außerdem sind die Werte D_{50}=1,17 mm und d_{50}=0,24 mm. Die Verhältnisse D_{15}/d_{85} = 0,23/0,48 = 0,48 < 2 und D_{50}/d_{50} = 1,17/0,24 = 4,88 < 10 sind damit erfüllt. Wir können hier auch hinzufügen, dass D_{15}/d_{15} = 0,23/0,063 = 3,65 ist. Mit diesen Werten sind alle in den Normen existierenden Filterregeln erfüllt und die Materialien können für die gewählte Fragestellung verwendet werden.

4.3.Versuchsaufbau

Auf der gelöcherten Platte mit Stützbeinen, die schon auf einem groben Sieb eingebaut ist, werden die 2 Schichten Geotextil verlegt und das alles wird in den Zylinder als Bodenteil gelegt. Es soll eine gute Haftung zwischen dem Sieb, dem Zylinder und der Platte anwesend sein, da diese bei den dynamischen Beanspruchungen nachher wie ein ganzes System vibrieren sollen.

Auf dem Geotextil wird eine 5 cm dicke Schicht aus Bettungsmaterial Loja 0/4 eingebaut und dann durch Stampfen gut verdichtet. Loses Material darf zusätzlich hinzugefügt werden, bis die Schicht in verdichtetem Zustand 5 cm ist. Es wird auch darauf geachtet, dass die obere Kante der Schicht ein ebenes Profil besitzt. Dann werden noch 5 cm Fugenmaterial Loja 0/2 eingebaut und mit der Platte mit Löchern bedeckt. Es ist auch hier zu beachten, dass die obere Fläche eine gute Ebene aufweist. Das Fugenmaterial ist im Unterschied zu dem Bettungsmaterial nicht heftig zu verdichten. Die Verdichtung hier hat nur die Rolle eine ebene Oberfläche zu schaffen.

Das Bettungsmaterial soll nach der ÖNORM B 13242 und der ÖNORMB 3132 sowie den Richtlinien für Pflasterbefestigungen RVS 08.18.01 3 bis 5 cm in verdichtetem Zustand sein. In unserem Fall nehmen wir die obere Grenze, da so ein größerer Bereich beobachtet werden kann. Für die Voruntersuchungen werden das Eindringen und das Wandern von Teilen genauer ermittelt und deshalb teilen wir dieses auf 5 Schichten. Jede Schicht besitzt eine Dicke von 1 cm und ihre Sieblinie wird nach dem Versuch ermittelt um die Unterschiede zwischen dem ursprünglichen Zustand und Ist-Zustand zu zeigen. Die schematische Teilung der Schichte bei dem Versuchsaufbau ist in der folgenden Skizze 4-3 dargestellt.

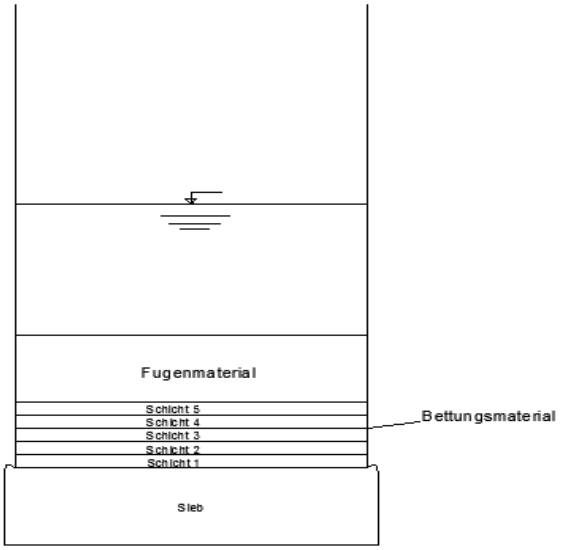


Abbildung 4- 3 Skizze des Versuchsaufbaus – 5 virtuelle Schichten von Bettungsmaterial je 1 cm dick, 5 cm dicke Fugenmaterialschicht, 10 cm Wassersäule

Die so geschaffene Konstruktion wird auf eine Rüttelsiebapparatur gebracht, mit der die Amplitude (von 0 bis 3 mm möglich), die Frequenz (von 0 bis 100 Hz) und die Dauer des Rüttelns eingestellt werden kann. Bei der Entwässerung des Probekörpers strömt der Füller mit dem in der Probe dazugegebenem Wasser aus und kann in einem Kübel gesammelt werden. Die Resultate des Versuchsaufbaus sind in dem Bild 4-5 veranschaulicht. Nach der Anordnung des Zylinders auf dem unteren Stahlbecher kommt eine höhere Platte mit Schlauch als Zylinderdeckung darauf. Durch diesen Schlauch wird die Probe bei den Versuchen mit Wasser beaufschlagt. Die Siebapparatur wird mit Hilfe von Schrauben verspannt. Der Endzustand des Versuchsaufbaus ist in dem folgenden Foto zu sehen:

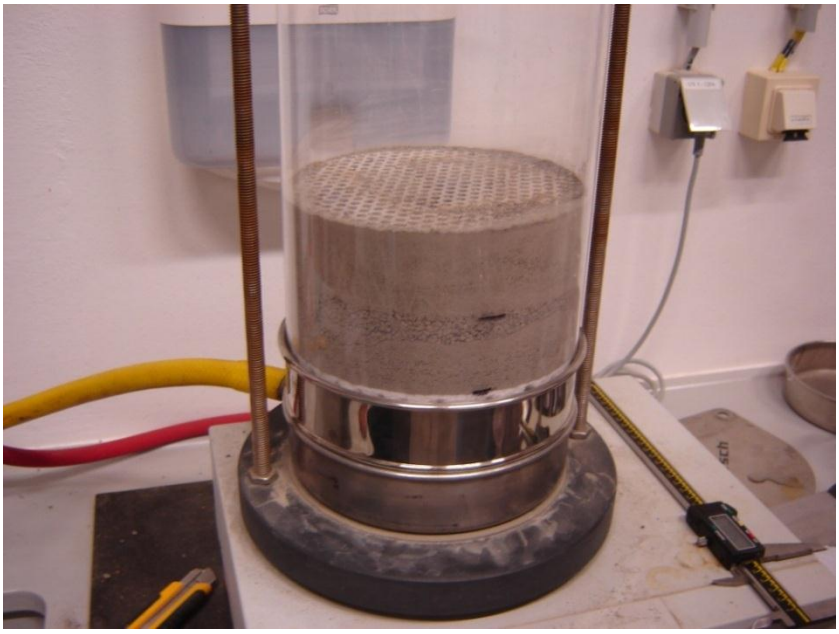


Abbildung 4- 4 Foto des fertigen Versuchsaufbaus

Wie schon erwähnt wurde, werden mit diesen ersten Versuchen die genauen Parameter für die weiter durchzuführenden Untersuchungen bestimmt. Deshalb testen wir unterschiedliche Amplituden des Rüttelns (oder der dynamische Belastung) und unterschiedlicher Wasserauflasten (es werden verschiedene Wassersäulen benutzt). Die Schäden oder das Wandern und Eindringen bestimmter Materialien in die anderen Schichten werden einerseits visuell beobachtet und andererseits durch die Ermittlung der Sieblinien nach den Versuchen praktisch aufgewiesen.

4.4. Vorversuchsdurchführung

4.4.1. Vorversuch 1

Für die erste Voruntersuchung werden möglichst kritische Grenzbedingungen von Kombination zwischen dynamischer Beanspruchung und Wasserbelastung gewählt. Die Probe hat eine ständige Auflast von 10 cm Wassersäule und wird mit unterschiedlichen Amplituden von 50 % bis 100 % (1,5 mm bis 3 mm) gerüttelt, was insgesamt 15 Minuten dauert. Während der Versuchsdurchführung kann man klar die Bewegung von Bodenteilen beobachten. Die Einwanderung von Partikeln ist hauptsächlich von der Fugen- nach der Bettungsschicht zu erkennen, aber es entsteht auch der umgekehrte Prozess. Das Wasser bildet viele Kanäle, fließt durch diese und nimmt eine sichtbare Menge von Feinanteilen mit sich. Dieser Prozess ist auf der ganzen Probe zu beobachten. Das Rütteln beschleunigt rasch diese Bewegung und die Schäden können genau gesehen werden. Unter diesen Bedingungen treten bei dem unverdichteten Fugenmaterial Dickeänderungen auf. Auch die gröberen Anteile des Materials beginnen zu springen und in einigen Bereichen verschieben sie sich langsam nach oben. Bei größeren Amplituden beginnt die ganze Probe zu springen. Das Gesamtgewicht von den beiden Schichten ist rund 6 kg. Deshalb ergibt sich der Schluss, dass Amplituden 80%-100% in unserem Fall für die Versuche keinesfalls gebraucht werden sollen. Die Versuchsdurchführung kann mit dem folgenden Foto 4-5 veranschaulicht werden.

Abbildung 4- 5 Durchführung des ersten Vorversuchs

Nach dem Ausbau wird das Material zum Trockner gebracht und nach dem vollständigen Trocknen werden je zwei Proben aus dem Bettungs- und Fugenmaterial entnommen. Die werden trocken gesiebt und nachher wird die neue Sieblinie bestimmt.

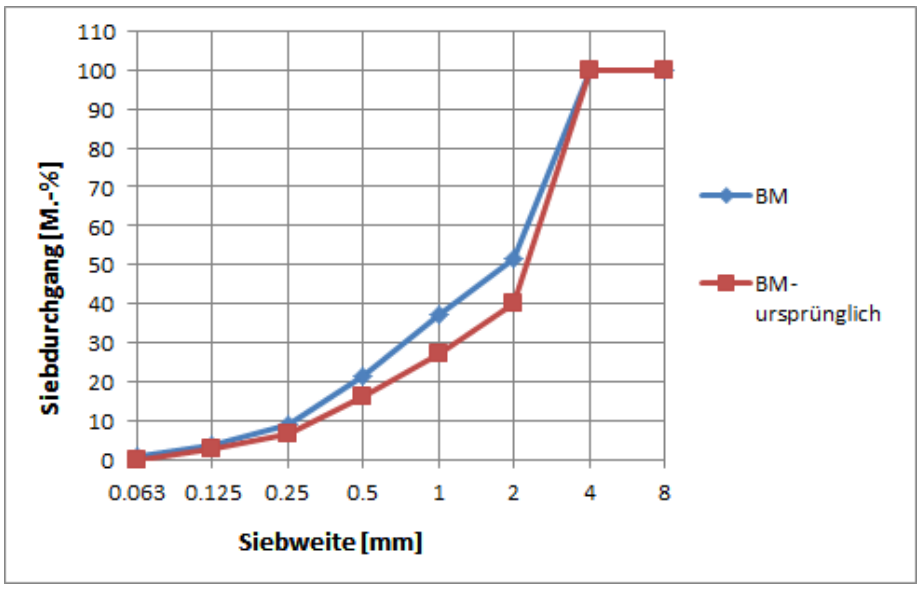


Abbildung 4- 6 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem ersten Vorversuch

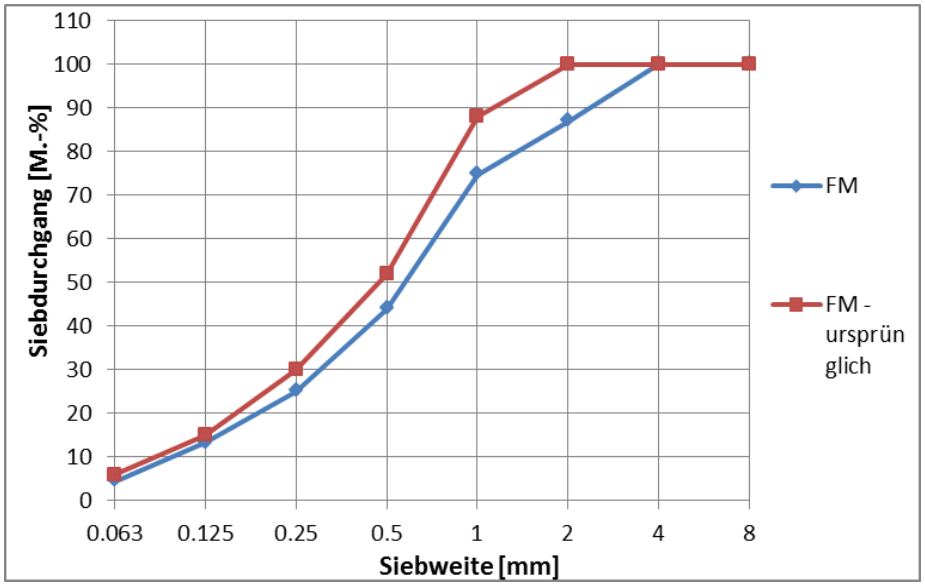


Abbildung 4- 7 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem ersten Vorversuch

Bei dem ersten Vorversuch ist deutlich eine Verfeinerung des Bettungsmaterials zu erkennen. Das kann aus der Tabelle 4-1 entnommen werden.

Vorversuch 1 – Bettungsmaterial				Vorversuch 1 – Fugenmaterial			
Kornklasse[mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung	Kornklasse[mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung
0	0.063	0	1	0	0.063	6	4.5
0.063	0.125	2.5	2.7	0.063	0.125	9	8.8
0.125	0.25	4.1	5.1	0.125	0.25	15	11.6
0.25	0.5	9.6	12.4	0.25	0.5	22	18.9
0.5	1	11	16.1	0.5	1	36	30.9
1	2	12.8	14.4	1	2	12	12.2
2	4	60	48.4	2	4	0	13.1

Tabelle 4- 1 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen nach der ersten Vorversuch

Wenn man die Zahlen für das Bettungsmaterial beobachtet, wird es offensichtlich, dass dieses sich verfeinert hat. Alle Körner, die feiner sind, haben nach der Versuchsdurchführung prozentuell zugenommen. Besonders groß ist die Differenz bei der Kornklasse 0,5-1, die sich mit mehr als 5 % unterscheidet. Die anderen mittelfeineren Kornklassen weisen auch größere prozentuelle Anteile im Unterschied zu ihrem ursprünglichen Zustand. Die Zunahme hier bleibt aber in den Grenzen von 2-3 Prozenten. Es ist interessant zu erwähnen, dass die feinste Kornklasse vor und nach der Durchführung des Versuchs fast konstant bleibt. Aufgrund der Resultate können wir feststellen, dass das Bettungsmaterial feiner geworden ist und dass das Fugenmaterial teilweise in die untere Schicht eingedrungen ist. Bei dem Versuch kann eine Kornzertrümmerung nicht geschehen und deshalb nehmen wir an, dass die Veränderungen nur aufgrund des Eindringens von Fugenmaterial ins Bettungsmaterial hervorgerufen werden kann.

In der Tabelle (4-1) ist bei dem Fugenmaterial der umgekehrte Prozess anzusehen. Dieses ist im Allgemeinen gröber geworden. Bei den feineren Kornklassen beobachten wir eine prozentuelle Abnahme und bei den gröberen eine Zunahme. Die Verfeinerung ist zwischen zwei und vier Prozent für jede feinere Kornklasse. Eine Ausnahme kann bei der Kornklasse 0,063-0,125 gesehen werden, wo der Prozentanteil konstant bleibt.

4.4.2. Vorversuch 2

Für den nächsten Vorversuch wird nur die dynamische Beanspruchung verwendet und in unserem Fall bedeutet das, dass der Probekörper ohne Wasserzugabe oder Beregnung nur gerüttelt werden soll. Hier kann man die Bewegung der Partikeln wieder beobachten, aber diesmal nicht so klar. Die bewegen sich mit nicht so großen Geschwindigkeiten. Die verwendeten Amplituden sind zwischen 50%-66% oder 1,5-2 mm und die Versuchsdauer ist ungefähr 15 Minuten. Bei diesem Versuch und auch in den Folgenden wird das Bettungsmaterial in 5 Schichten geteilt und für jede Schicht wird eine selbstständige Sieblinie bestimmt. Die Teilung des Bettungsmaterials in Einzelschichten wird durch die Benutzung einer hydraulischen Presse ermöglicht. Die Arbeitsweise der hydraulischen Presse ist in der folgenden Abbildung 4-8 zu sehen. Sie hilft dabei, dass die Schichten eben und genau geschnitten werden können.

Abbildung 4- 8 Hydraulische Presse und Ausbildung des Bettungsmaterials

Die Sieblinien sind hier nach einer trockenen Siebung bestimmt und sehen so aus:

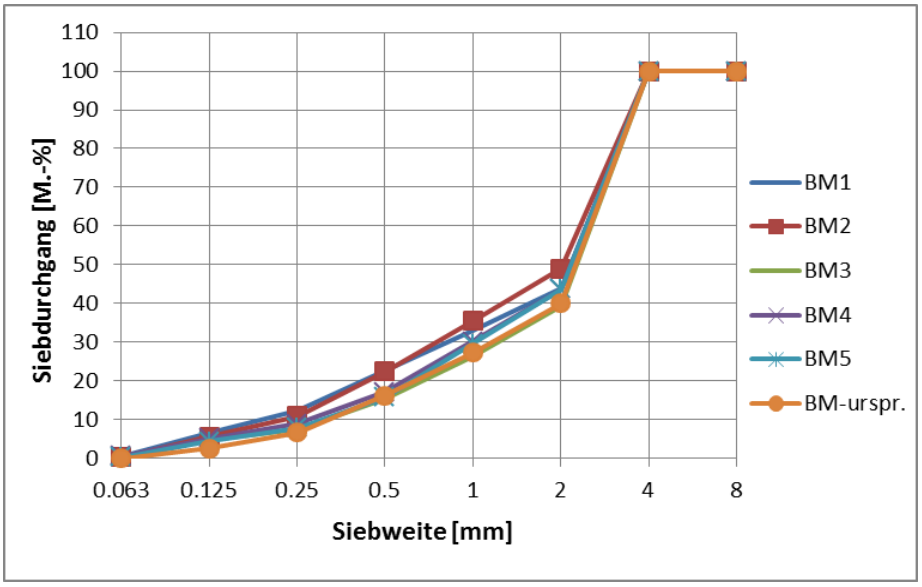


Abbildung 4- 9 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem zweiten Vorversuch

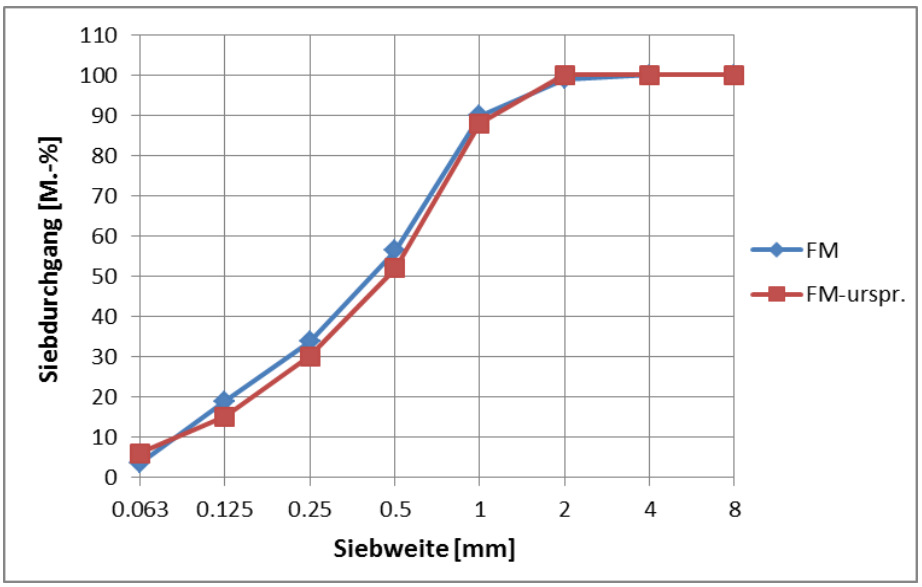


Abbildung 4- 10 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem zweiten Vorversuch

Vorversuch 2 - Bettungsmaterial							
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 1)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 2)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 3)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 4)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 5)
0	0.063	0	0.4	0.2	0.3	0.6	0.2
0.063	0.125	2.5	6.3	5.4	4.3	4.5	4.1
0.125	0.25	4.1	5.5	5.3	3.1	3.8	3.5
0.25	0.5	9.6	10.4	11.5	7.6	8.2	7.9
0.5	1	11	10.5	13	10.9	13.1	13.7
1	2	12.8	10.8	13.6	13	13.5	14.1
2	4	60	56.1	51	60.8	56.3	56.4

Tabelle 4- 2 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der zweiten Vorversuch

Im Allgemeinen ist auch hier das Bettungsmaterial feiner geworden. Der prozentuelle Anteil der feinsten drei Kornklassen (0-0,063; 0,063-0,125 und 0,125-0,25) ist gestiegen von 6,6% zu 12,2%; 10,9%; 7,7%; 8,9% und 7,8% in den Schichten 1 bis 5 und dieser der gröberen ist gesunken. In Unterschied zu dem ersten Versuch bleibt das Bettungsmaterial aber näher zu der ursprünglichen Sieblinie und das bedeutet, dass die Wanderung der Partikeln nicht so stark ist. Der Anteil der gröbsten Kornklasse 2-4 bleibt bei den Schichten, die sich fern von dem Fugenmaterial befinden, fast der gleiche wie bei dem ursprünglichen Zustand und verändert sich nur mit maximal 3 bis 3,5%. Dazu kommt auch das Resultat, dass die ersten 2 Schichten die meisten Feinanteile aufweisen und die Bettungsschicht Nummer 3 fast gleiche Daten mit der ursprünglichen Sieblinie aufweist. Die Klasse 1-2 ist auch mit ein paar Prozenten gestiegen. Das Fugenmaterial hier verändert sich unwesentlich.

Bei dem Versuch mit dem trockenen Rütteln verändert sich die Sieblinie des Fugenmaterials nicht wesentlich. Im Allgemeinen wird es nur ein bisschen gröber. Der Anteil an Füller hat um die Hälfte abgenommen, aber die anderen Klassen haben teilweise zugenommen oder bleiben in etwa gleiche.

Als Schlussfolgerung kann festgestellt werden, dass bei diesem Versuch keine großen Schäden auftreten. Die Sieblinien der beiden Materialien bleiben in bestimmten Grenzen unverändert. Nur durch Rütteln kann der Hohlraumgehalt des Bettungsmaterials nicht vollständig gefüllt werden. Das zufällige Hüpfen der Körner ist für eine wesentliche Durchmischung zwischen den Materialien nicht genug. Außerdem fehlt der Druck der Wassersäule, der die Bewegung der Körner signifikant beeinflusst. Die Abwesenheit von Wasser führt zu keiner Bildung von Kanälen, wo eigentlich die heftigste Bewegung nach unten stattfindet.

4.4.3. Vorversuch 3

Für den dritten Vorversuch wird nur die Wasserbeanspruchung gewählt. Die Probe wird nicht gerüttelt, aber es soll eine ständige Wassersäule von 10 cm anwesend sein. Die Probe wird völlig nass und anschließend werden noch 15 Minuten mit dieser Wassersäule die Probe beansprucht. Während der Durchführung dieses Versuchs ist die Bewegung der Partikeln nicht sichtbar. Es ist hier interessant, dass wegen der Inhomogenität und der nicht gleichen Verdichtung der Schichten eine stark unterschiedliche Durchlässigkeit entsteht. Es gibt Stellen, wo das Wasser sehr rasch fließt, und solche, die nach 10 Minuten noch trocken geblieben sind. Nach dem Ausbau werden die Sieblinien der ausgebauten Materialien durch eine Trockensiebung ermittelt und in den folgenden Grafiken 4-11 und 4-12 veranschaulicht. Das Bettungsmaterial wird wieder in 5 Schichten je 1 cm Dicke geteilt.

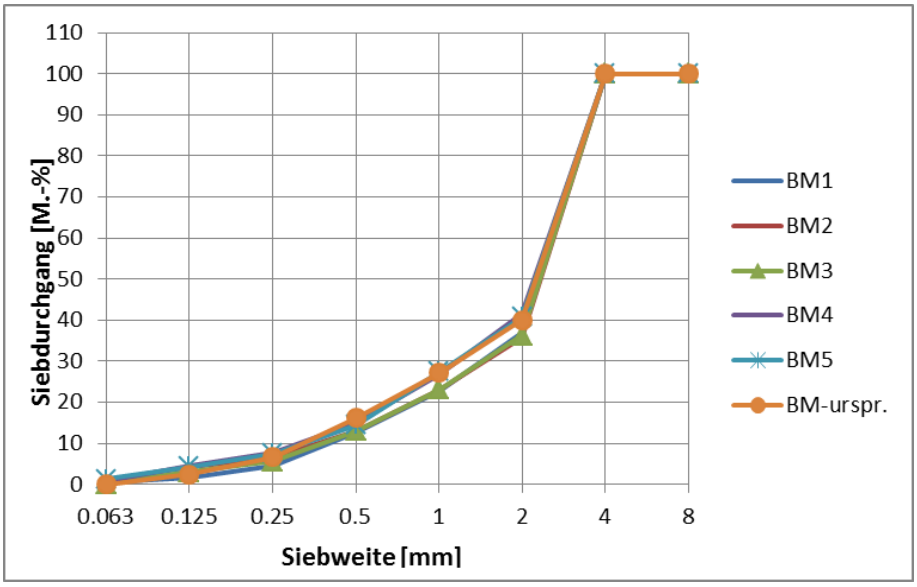


Abbildung 4- 11 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem dritten Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten

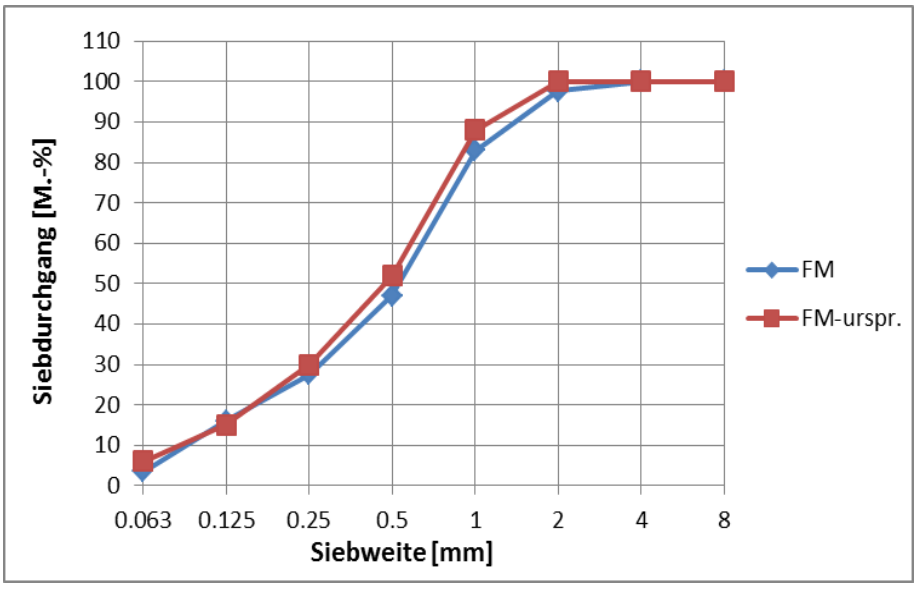


Abbildung 4- 12 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem dritten Vorversuch

Vorversuch 3 - Bettungsmaterial							
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 1)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 2)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 3)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 4)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 5)
0	0.063	0	0.5	1.1	0.2	0.9	1.3
0.063	0.125	2.5	1.2	3	2.9	3.6	3.1
0.125	0.25	4.1	3	2.5	2.6	3.1	3.1
0.25	0.5	9.6	7.9	6.3	7.4	7.6	7
0.5	1	11	10.3	10.2	10.2	11.5	13.1
1	2	12.8	14	12.7	13.1	14.9	13.2
2	4	60	63.1	64.2	63.7	58.4	59.3

Tabelle 4- 3 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der dritten Vorversuch

Die Resultate aus diesem Versuch zeigen, dass sich das Bettungsmaterial fast nicht verändert hat. Die Sieblinien der unterschiedlichen Bettungsschichten bleiben sehr knapp zueinander und sind fast ähnlich mit dem ursprünglichen Zustand. Der Anteil von der gröbsten Kornklasse 2-4 ist in 3 Schichten sogar gestiegen und wird mehr als 60 Prozent, was aber hauptsächlich wegen Inhomogenität des Voruntersuchungsmaterials erzeugt wird. Der Anteil an feinen Kornklassen 0,063-0,125 oder an mittleren 0,125-0,5 und 0,5-1 hat auch abgenommen. Diese Erscheinung kann durch die Wirkung des Wassers und die Suffosion erklärt werden. Die Kornklasse 1-2 hat überall mit 1-2% zugenommen und die gröbste Fraktion bleibt ca. 60%.

Das Fugenmaterial ist bei dem Versuch nur ein bisschen gröber geworden, was in der Tabelle 4-3 angesehen werden kann. Der prozentuelle Anteil an gröberen Kornklassen ist leicht gestiegen (Kornklassen 2-4, 1-2, 0,5-1) von 48% zu 52,8%. Es bleibt aber eine ziemlich große Menge Füllermaterial, das nicht nach unten gewandert ist. Bei den feineren Kornklassen findet eine Veränderung von 30% zu 27,5% statt und die Klasse 0,25-0,5 ist von 22% zu 19,6% vermindert.

Vorversuch 3 - Fugenmaterial			
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung
0	0.063	6	3.5
0.063	0.125	9	12.5
0.125	0.25	15	11.5
0.25	0.5	22	19.6
0.5	1	36	35.8
1	2	12	14.7
2	4	0	2.3

Tabelle 4- 4 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der dritten Vorversuch

Die sehr kleinen Unterschiede in den Sieblinien vor und nach diesem Versuch zeigen, dass nur Bewässerung nicht zu großen Schäden führt. Die fehlende dynamische Belastung kann bei der Bildung der Wasserkanäle nicht helfen. Solche existieren fast nicht. Die Wasserkräfte können in diesem Fall die Verdichtung der Schichten nicht überwinden und die Bewegung von Partikeln hört rasch auf. Das

bedeutet, dass nur eine Kombination von den beiden Belastungen – Bewässerung und Rütteln bei der Bestimmung der Filterkriterien maßgebend ist.

4.4.4. Vorversuch 4

Der vierte Vorversuch ist eine Kombination von Bewässerung und dynamische Belastung (in diesem Fall Rütteln), aber diesmal soll die Wassersäule minimal bleiben – zwischen 0,5 bis 1 cm, um die Wasserauflast möglichst gering zu halten. Die Probe wird ständig entwässert bis sie vollständig nass wird. Die Bewässerung hört auf und es wird darauf gewartet bis es nichts aus dem Schlauch unten hinauskommt. Dann wird es 15 Minuten mit Amplitude zwischen 60% und 70% oder circa 2mm gerüttelt und inzwischen wieder bewässert, aber die Wassersäule wird durch die ganze Zeit im Rahmen von 0,5 bis 1 cm reguliert. Die Bewegung der Partikeln ist leicht und klar zu beobachten. Die Wasserkanäle sind gut erkennbar. Im Allgemeinen findet die Wanderung nach unten statt. Trotz der starken Wanderung von Körner bewegt sich die Grenze zwischen Bettungs- und Fugenmaterial unwesentlich. Die Fugenschicht schrumpft und weist eine geringe Dicke nach dem Versuch auf. Nach dem Ausbau des Versuches wird das Bettungsmaterial wieder in 5 Schichten geteilt. Die neuen Sieblinien sind durch trockene Siebung zu ermitteln und sind graphisch in den Abbildungen 4-13 und 4-14 dargestellt.

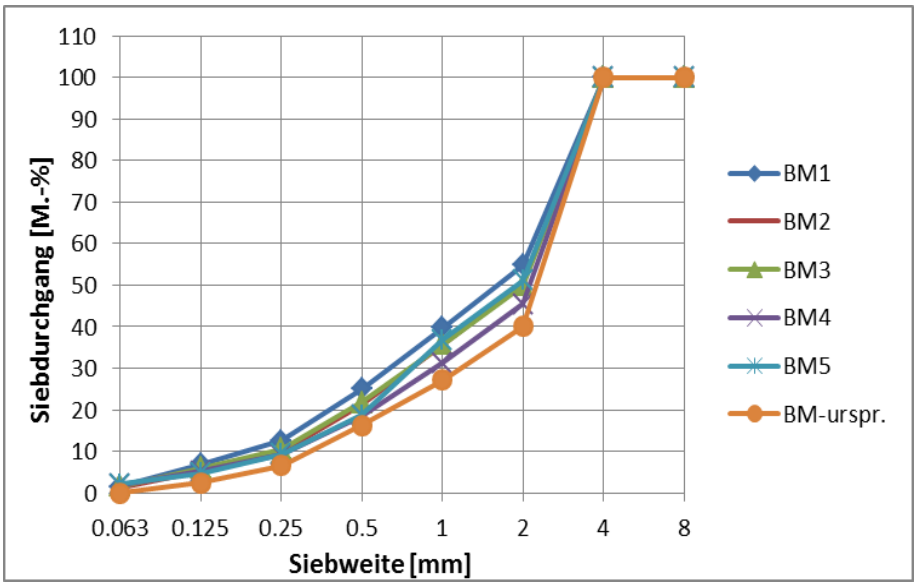


Abbildung 4- 13 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem vierten Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten.

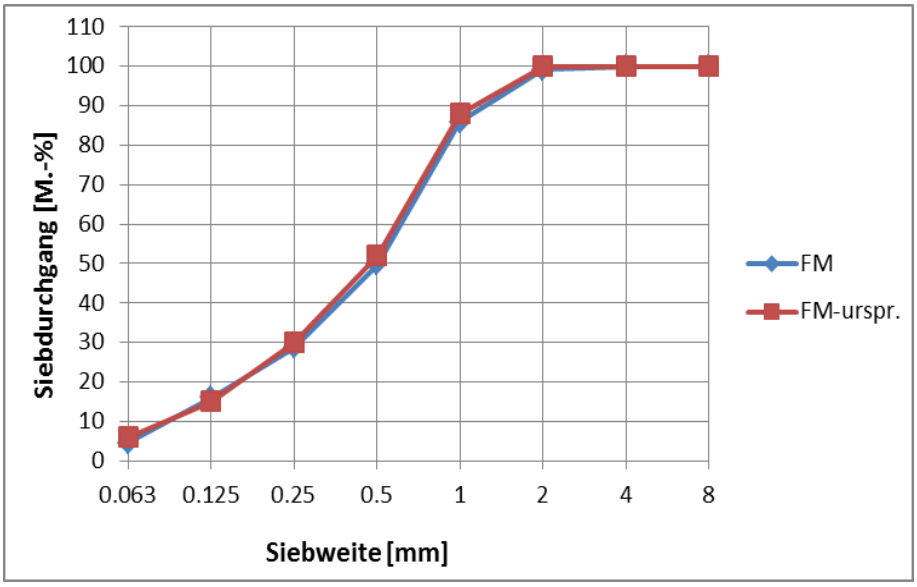


Abbildung 4- 14 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem vierten Vorversuch

Vorversuch 4 - Bettungsmaterial							
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 1)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 2)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 3)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 4)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 5)
0	0.063	0	1.5	1.3	1.7	2	2.1
0.063	0.125	2.5	5.3	4	4.2	3.2	2.6
0.125	0.25	4.1	5.7	4.6	4.6	4	4.6
0.25	0.5	9.6	12.4	11.2	11.2	9.3	9.4
0.5	1	11	14.8	14.4	14.1	12.8	18.2
1	2	12.8	15	14.7	14.1	14.2	14.2
2	4	60	45.2	49.7	50.1	54.5	48.9

Tabelle 4- 5 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der vierten Vorversuch

Vorversuch 4– Fugenmaterial			
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung
0	0.063	6	4.5
0.063	0.125	9	11.5
0.125	0.25	15	12.7
0.25	0.5	22	21.2
0.5	1	36	36
1	2	12	13.2
2	4	0	0.9

Tabelle 4- 6 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der vierten Vorversuch

Das Bettungsmaterial wird nach der Ermittlung der neuen Sieblinien der 5 Schichten feiner. Der Anteil an Kornklasse 2-4 hat wesentlich abgenommen und weist eine Zahl von 45-50 Prozent auf. Die Schicht Nummer 1, die sich direkt über dem Geotextil befindet, ist am feinsten von allen. Der Anteil an feineren Kornklassen wird von 6,6% zu 12,5% bei Schicht Nummer 1 nahezu verdoppelt. Die mittleren Kornklassen nehmen auch von 20,6% zu 27,2% zu. Bei der Schicht Nummer 1 hat die gröbste Kornfraktion 2-4 von 60% zu 45,2% abgenommen. Ähnliche Ergebnisse bekommen wir bei der zweiten Schicht. Für Schicht 3 ist die Verfeinerung auch wesentlich: Für die Schichten 4 und 5 ist der Feinanteil 9,3% und die gröbste Kornklasse besitzt zwischen 49% und 54%. Hier ist es interessant zu erwähnen, dass in Schicht 5 Material aus der Kornklasse 0,5-1 eine Zahl von 18,2% aufweist, was bedeutet, dass auch mittlere Kornklassen in das Bettungsmaterial eingewandert sind. Hauptsächlich nimmt die Verfeinerung mit der Zunahme der Schichtnummer ab. Bei allen Schichten ist der Anteil der feineren Kornklassen ziemlich größer geworden. Das bedeutet, dass bei solchen Bedingungen wesentliche Schäden auftreten.

Das Fugenmaterial hat sich vergröbert. Der Anteil an gröberen Körner ist prozentuell gestiegen und der feineren hat abgenommen. Die feineren Fraktionen haben von 30% zu 28,7% und die mittleren von 58% zu 57,2% abgenommen. Insgesamt nehmen die Kornklassen 1-2 und 2-4 zu – von 12% zu 13,2% und von 0% zu 0,9%.

4.4.5. Vorversuch 5

Der fünfte Vorversuch hat als Ziel nicht nur die Veränderungen der Sieblinien anzuzeigen, sondern auch die Durchlässigkeit der beiden Schichten zu ermitteln. Die Frage, die sich stellt ist, wie verändert sich die Durchlässigkeit während der Durchführung des Versuchs. Gibt es eine Verstopfung in Folge der Ablagerung von feineren Partikeln? Der Versuchseinbau folgt der üblichen Versuchsbauweise. Als Versuchsbedingungen wird eine Amplitude von 50% oder 1,5 mm mit ständiger Bewässerung und einer konstanten Wassersäule von 10 cm gewählt. Die Probe wird 30 Minuten gerüttelt. Dann wird das Fugenmaterial ausgebaut und das Bettungsmaterial wieder in 5 Schichten geteilt.

Für die Wasserdurchlässigkeit wird die Wassermenge bemessen, die aus dem Schlauch ausfließt, jede 2 Minuten oder insgesamt 15 Messungen für den ganzen Versuch. Am Anfang bis der Mitte der Versuchsdauer kommt aus dem Schlauch Wasser mit feineren Körnern, obwohl der Boden mit Geotextil bedeckt ist. Das Wasser ist schmutzig und enthält in sich offensichtlich Füllermaterial. Die Menge dieser Teilchen ist aber nicht wesentlich groß und kann bei den nächsten Versuchen vernachlässigt werden. Am Ende fließt klares Wasser aus, ohne sichtbare Zeichen von mitfließenden Partikeln. Dann ist die bemessene Wassermenge wesentlich höher und kann in der Tabelle 4-7 nachgelesen werden.

Minute	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30
Wassermenge [g]	0	0	310	320	320	310	300	320	310	300	300	300	290	290	280

Tabelle 4- 7 Wasserdurchlässigkeit während des Versuchs

Die Resultate zeigen, dass das Wasser mit einer konstanten Rate durch die Probe fließt. Wegen vermutlicher Verstopfung aufgrund von Umlagerungen von feineren Gesteinskörnungen nach unten, kann die Verminderung der Durchlässigkeit am Ende des Versuchs erklärt werden. Eine Ursache dafür kann auch der geringere Hohlraumgehalt des Bettungsmaterials sein, da viele feinere Körner von oben eingedrungen sind.

Nach dem Ausbau des Versuchs werden die folgenden Sieblinien für die Fugen- und Bettungsmaterialschichten ermittelt:

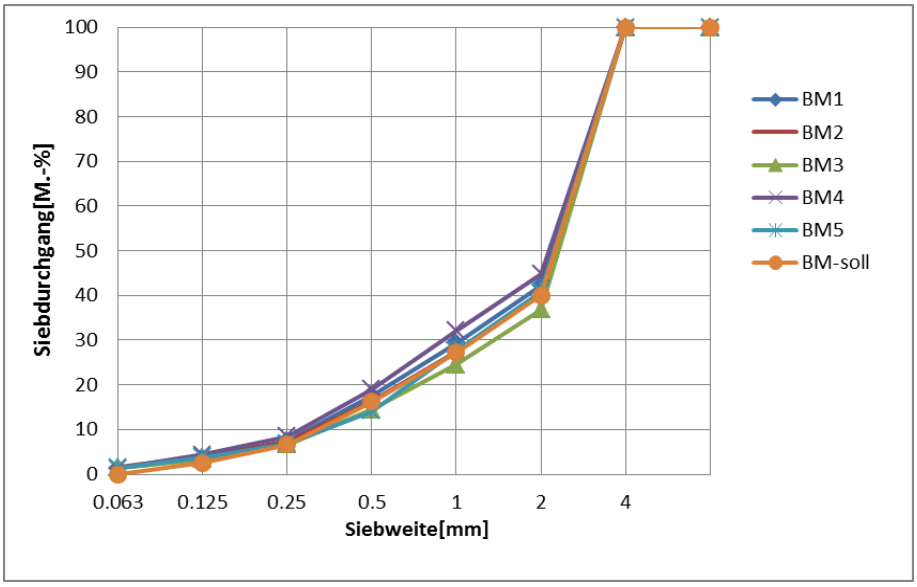


Abbildung 4- 15 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem fünften Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten

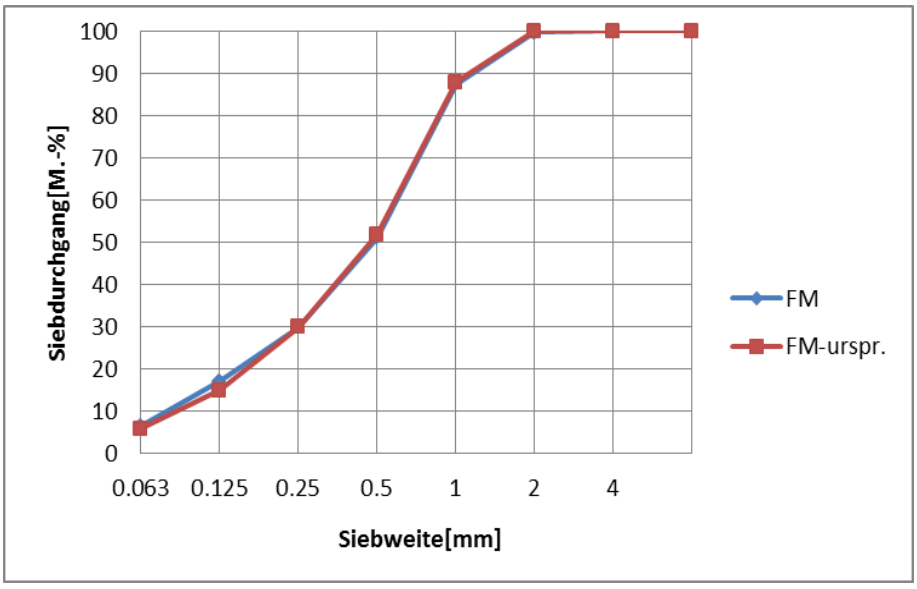


Abbildung 4- 16 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem fünften Vorversuch

Vorversuch 5 - Bettungsmaterial							
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 1)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 2)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 3)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 4)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 5)
0	0.063	0	1.3	1.6	1.5	1.4	1.5
0.063	0.125	2.5	2.3	2.3	1.9	3	2.4
0.125	0.25	4.1	3.9	3.5	3.2	4.2	3
0.25	0.5	9.6	10.1	9	7.8	10.5	7.3
0.5	1	11	11.8	11.1	10.1	13.1	13.6
1	2	12.8	12.8	12.8	12.3	12.7	13.1
2	4	60	57.8	59.7	63.2	55.2	59.2

Tabelle 4- 8 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der fünften Vorversuch

Bei dem Bettungsmaterial ist nach der Ermittlung der Sieblinien eine leichte Verfeinerung festzustellen. Bei den Schichten 1 und 2 beobachtet man eine Anwesenheit von Füllerteilen, die von den oberen Schichten eingedrungen sind. Eine kleine Abnahme von dem prozentuellen Anteil der Fraktion 0,063-0,125 kann damit erklärt werden, dass ein kleiner Teil von Wasser nach unten abgespült ist oder bei Verstopfung wegen Pump-Effekt wieder nach oben verschoben wird. Bei den gröberen Fraktionen ist eine sehr kleine Verminderung zu sehen. Die Bettungsschicht 3 verliert einen Teil der mittleren Kornklassen. Bei diesem Versuch verfeinern sich die oberen zwei Bettungsschichten – Nummer 4 und 5 am meisten. Bei diesen ist eine allgemeine Zunahme des prozentuellen Anteils von feineren und mittleren Fraktionen zu beobachten. In der Schicht vier ist Kornklasse 2-4, die üblicherweise 60% des ganzen Materials umfasst, jetzt 55%.

Vorversuch 5 - Fugenmaterial			
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung
0	0.063	6	6.6
0.063	0.125	9	10.6
0.125	0.25	15	12.9
0.25	0.5	22	21.2
0.5	1	36	36.3
1	2	12	12.2
2	4	0	0.3

Tabelle 4- 9 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der fünften Vorversuch

Bei dem Fugenmaterial ist die Verschiebung bei der Sieblinie sehr klein. Von den kleineren Kornklassen steigt die 0,063-0,125 von 9% zu 10,6 %, was wegen der Inhomogenität des Materials erklärt werden kann. Gleichzeitig sinkt aber die 0,125-0,25 von 15% zu 12,9%. Im Allgemeinen vergröbert sich das Fugenmaterial in sehr kleinen Mengen.

4.4.6. Vorversuch 6

Als nächsten Vorversuch werden die Bedingungen von dem vorigen herausgezogen – eine konstante Amplitude von 50% (1,5 mm), Dauer von 30 Minuten und fixe Wassersäule von 10 cm. Die Durchlässigkeit wird auch hier beobachtet. Der Unterschied besteht darin, dass bei dem Versuchsausbau das Bettungsmaterial aus der Probe auf zwei Teilen geteilt wird. Ein zylinderförmiges Blech wird in die Probe eingebaut. Zuerst wird das Material aus dem äußeren Bereich ausgehoben und dann dieses aus dem Inneren. Das Ziel ist zu ermitteln, ob die Feinanteile mehr in der Mitte der Probe oder am Rand eingedrungen sind.

Während des Versuchs bleibt die Durchlässigkeit des Materials fast die ganze Zeit konstant mit einer kleinen Verringerung am Ende. Die Wassermengen, die aus dem Schlauch ausgegangen sind, sind in der folgenden Tabelle 4-2 angezeigt.

Minute	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30
Wassermenge [g]	0	0	100	200	200	200	200	200	200	200	200	180	180	170	150

Tabelle 4- 10 Wasserdurchlässigkeit während des sechsten Versuchs

Am Ende der Versuchsdurchführung geht nur reines Wasser aus dem Schlauch und das spricht dafür, dass die Bewegung der Körner fast aufgehört haben. Nach dem Ausbau mit der Hilfe des Zylinderkörpers wird das Bettungsmaterial auf zwei geteilt und es werden 2 Sieblinien für Bettungs- und eine für Fugenmaterial ermittelt. Die oberste Schicht des Bettungsmaterials, die sich in der Nähe von dem Fugenmaterial befindet und deren Dicke 1 cm aufweist, wird ausgekratzt und spielt bei diesem Versuch keine Rolle.

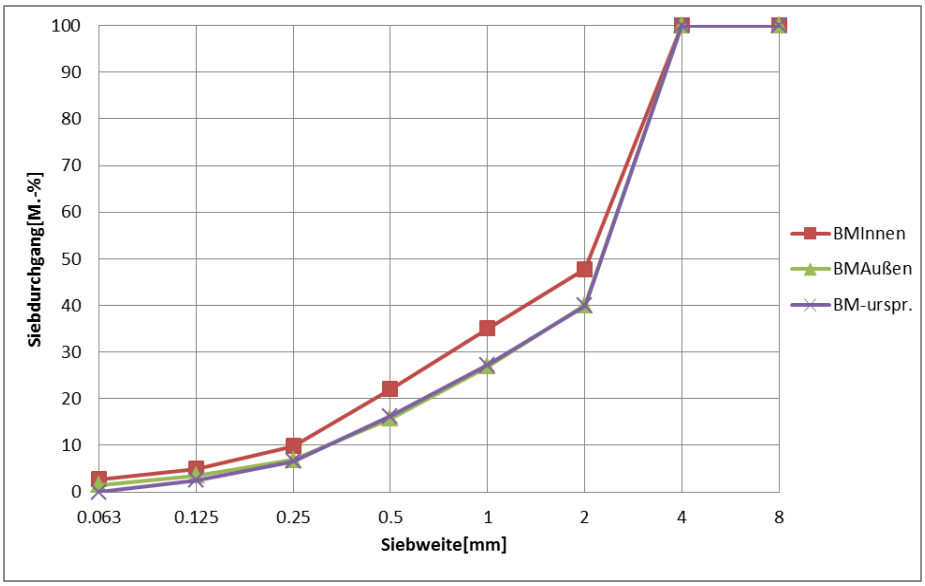


Abbildung 4- 17 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem sechsten Vorversuch, geteilt in vertikalen Schichten

Das Bettungsmaterial aus dem inneren Bereich der Probe hat sich mehr verfeinert als dieses aus dem äußeren Bereich. Bei dem inneren Bettungsmaterial hat der Prozentanteil an feineren Kornklassen, die einen Korndurchmesser kleiner als 0,25 mm besitzen, von 6,6 % zu 9,8% zugenommen. Die Situation mit den mittleren Fraktionen (0,25-1) ist ähnlich- eine Veränderung von 20,6% zu 25,3% ist zu beobachten und dazu gibt es eine wesentliche Verminderung des Anteils der gröbsten Kornklasse (2-4), die von 60% zu 52,2% gesunken ist. Bei dem äußeren Bettungsmaterial sind die Daten ein bisschen anders. Die feineren Kornklassen sind von 6,6% zu 6,9% kaum gestiegen. Die mittleren haben sich von 20,6% zu 19,9% verändert. Die Fraktion 2-4 bleibt bei rund 60%.

Vorversuch 6 - Bettungsmaterial				
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung (Innen)	Prozentanteil nach der Durchführung (Außen)
0	0.063	0	2.7	1.5
0.063	0.125	2.5	2.2	2
0.125	0.25	4.1	4.9	3.4
0.25	0.5	9.6	12.2	8.7
0.5	1	11	13.1	11.2
1	2	12.8	12.7	13.2
2	4	60	52.2	59.9

Tabelle 4- 11 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der sechsten Vorversuch

4.4.7. Vorversuch 7

Bei dem siebten Vorversuch werden die Grenzbedingungen verändert. Die Zeitdauer von 30 Minuten ist lang genug, da nach dieser Zeit es überhaupt keine sichtbare Bewegung von Körnern gibt. Die Wassersäule von 10 cm bringt einerseits ein sicheres, ständiges und konstantes Durchströmen in den Schichten und andererseits dient es als zusätzliche Auflast. Die Amplitude des Rüttelns ist bei unserem Fall nicht eindeutig. Bei 50% oder 1,5 mm ist die Bewegung der Körner nicht so heftig und die gröberen Partikeln bewegen sich fast nicht. Bei 66% oder rund 2mm entsteht aber die Gefahr, dass die ganze Probe springt, die Schichten sich wellenweise mischen und damit die Probe zerstört wird. Deshalb wird bei diesem Versuch eine Anfangsamplitude von 1,5 mm ausprobiert und wenn das Material voll nass ist und die Wasserauflast schon anwesend ist, wird die Amplitude auf 2 mm oder 66% erhöht. Die Wasserdurchlässigkeit wird auch in diesem Fall gemessen und die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zu finden. Die ist wieder fast konstant mit kleiner Verringerung am Ende des Versuchs.

Minute	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30
Wassermenge [g]	0	0	230	300	270	280	300	270	280	270	250	230	230	220	230

Tabelle 4- 12 Wasserdurchlässigkeit während des siebten Versuchs

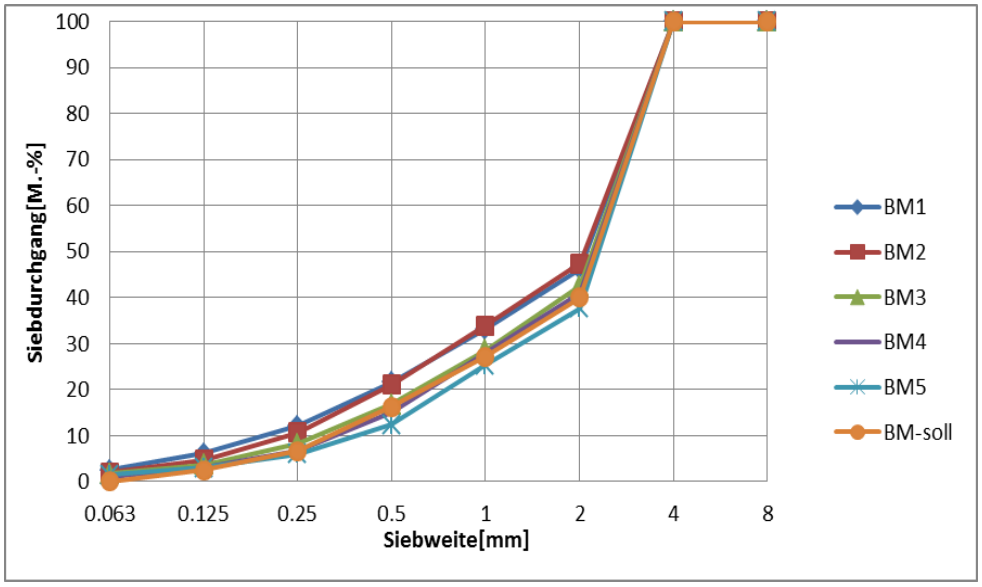


Abbildung 4- 18 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem siebten Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten

Vorversuch 7 - Bettungsmaterial							
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 1)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 2)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 3)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 4)	Prozentanteil nach der Durchführung (Schicht 5)
0	0.063	0	2.5	1.9	1.7	1.1	1.4
0.063	0.125	2.5	3.6	2.8	2	1.9	1.5
0.125	0.25	4.1	6	6	4.5	3.8	3.1
0.25	0.5	9.6	9.5	10.3	8.6	8.2	6.2
0.5	1	11	11.5	12.9	11.8	12.8	13
1	2	12.8	13	13.5	13.8	13.2	12.4
2	4	60	53.8	52.6	57.6	58.9	62.3

Tabelle 4- 13 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der siebten Vorversuch

Die Bewegung von Feinanteilen kann beobachtet werden, aber mit größeren Amplitude springen auch einzelne gröbere Gesteine. Der Ausbau wird wieder in horizontalen Schichten mit einer Dicke von je 1 cm bei dem Bettungsmaterial gemacht. Die feineren Kornklassen sind durch die ganze Bettungsschicht eingedrungen und in den tiefsten 2 Bettungsschichten eingedrungen. Die feineren Fraktionen haben sich bei diesen beiden Schichten von 6,6% zu 12,1% und bzw. 10,7% fast verdoppelt. Die mittleren Kornklassen haben auch zugenommen, aber mit nicht so großen Zahlen. Die Abnahme der gröbsten Kornklasse 2-4 ist auch wesentlich mit 7-8% von 60% zu 53,8% und bzw. 52,6%. Das Bettungsmaterial, das sich in der Nähe des Fugenmaterials befindet hat sich auch verfeinert, aber nicht so viel wie in den tiefsten Schichten. Es gibt Sprünge in dem Füllermaterial und bei den mittleren Kornfraktionen, die in den Tabellen 4-13 und 4-14 angesehen werden können.

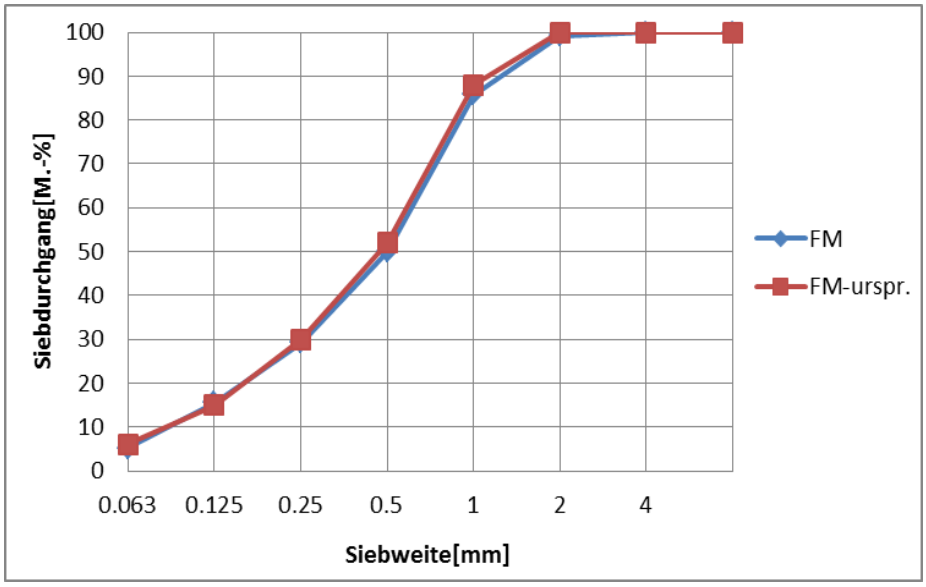


Abbildung 4- 19 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem siebten Vorversuch

Vorversuch 7 – Fugenmaterial			
Kornklasse [mm]		Prozentanteil vor der Durchführung	Prozentanteil nach der Durchführung
0	0.063	6	5.2
0.063	0.125	9	10.4
0.125	0.25	15	13.7
0.25	0.5	22	20.6
0.5	1	36	35.9
1	2	12	13.4
2	4	0	0.8

Tabelle 4- 14 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der siebten Vorversuch

Bei dem Fugenmaterial stehen die Dinge genauso wie bei den bisherigen Versuchen. Sieblinien und Korngrößenverteilung sind in der Abbildung 4-19 und in der Tabelle 4-14 veranschaulicht. Es ist ein bisschen gröber geworden. Der prozentuelle Anteil an Feinkornklassen nimmt von 30% zu 29,3% und an Mittelkornklassen von 58 % zu 56,5 % ab. Eine Zunahme bei der Fraktion 1-2 von 12 % zu 13,4 % und die Anwesenheit von 0,8 % Überkorn sind auch zu beobachten.

4.4.8. Zusammenfassung

Für bessere Ansicht der Ergebnisse werden die prozentuellen Anteile jeder Kornklasse in Massenprozent für jedes Material und Versuch tabellarisch zusammengefasst veranschaulicht:

BM[M.-%]	VV1	VV2	VV3	VV4	VV5	VV6	VV7
0-0,063	1.00	0.34	0.80	1.72	1.46	2.10	1.72
0,063-0,125	2.70	4.92	2.76	3.86	2.38	2.10	2.36
0,125-0,25	5.10	4.24	2.86	4.70	3.56	4.15	4.68
0,25-0,5	12.40	9.12	7.24	10.70	8.94	10.45	8.56
0,5-1	16.10	12.24	11.06	14.86	11.94	12.15	12.40
1-2	14.40	13.00	13.58	14.44	12.74	12.95	13.18
2-4	48.40	56.12	61.74	49.68	59.02	56.05	57.04

Tabelle 4- 15 Prozentueller Anteil der Einzelkornklassen für das Bettungsmaterial bei jedem Vorversuch

FM[M.-%]	VV1	VV2	VV3	VV4	VV5	VV6	VV7
0-0,063	4.5	3.4	3.5	4.5	6.6	6.4	5.2
0,063-0,125	8.8	15.5	12.5	11.5	10.6	9.1	10.4
0,125-0,25	11.6	14.9	11.5	12.7	12.9	12.6	13.7
0,25-0,5	18.9	22.6	19.6	21.2	21.2	21.4	20.6
0,5-1	30.9	33.5	35.8	36	36.3	36.3	35.9
1-2	12.2	9.1	14.7	13.2	12.2	13.6	13.4
2-4	13.1	1	2.3	0.9	0.3	0.6	0.8

Tabelle 4- 16 Prozentueller Anteil der Einzelkornklassen für das Fugenmaterial bei jedem Vorversuch

Noch dazu kommen die Verluste an jeder Kornklasse im Verhältnis zu dem ursprünglichen Zustand:

BM[M.-%]	VV1	VV2	VV3	VV4	VV5	VV6	VV7
0-0,063	1	0.34	0.8	1.72	1.46	2.1	1.72
0,063-0,125	0.2	2.42	0.26	1.36	-0.12	-0.4	-0.14
0,125-0,25	1	0.14	-1.24	0.6	-0.54	0.05	0.58
0,25-0,5	2.8	-0.48	-2.36	1.1	-0.66	0.85	-1.04
0,5-1	5.1	1.24	0.06	3.86	0.94	1.15	1.4
1-2	1.6	0.2	0.78	1.64	-0.06	0.15	0.38
2-4	-11.6	-3.88	1.74	-10.32	-0.98	-3.95	-2.96

Tabelle 4- 17 Verluste der Einzelkornklassen in [M.-%] bei dem Bettungsmaterial für jeden Vorversuch

FM[M.-%]	VV1	VV2	VV3	VV4	VV5	VV6	VV7
0-0,063	-1.5	-2.6	-2.5	-1.5	0.6	0.4	-0.8
0,063-0,125	-0.2	6.5	3.5	2.5	1.6	0.1	1.4

0,125-0,25	-3.4	-0.1	-3.5	-2.3	-2.1	-2.4	-1.3
0,25-0,5	-3.1	0.6	-2.4	-0.8	-0.8	-0.6	-1.4
0,5-1	-5.1	-2.5	-0.2	0	0.3	0.3	-0.1
1-2	0.2	-2.9	2.7	1.2	0.2	1.6	1.4
2-4	13.1	1	2.3	0.9	0.3	0.6	0.8

Tabelle 4- 18 Verluste der Einzelkornklassen in [M.-%] bei dem Fugenmaterial für jeden Vorversuch

4.5. Analyse und Bewertung der Voruntersuchungen

Für die durchgeführten Voruntersuchungen wird das Material gemäß der erweiterten Filterregel von Terzaghi und der österreichischen Richtlinien für Pflasterbefestigungen gewählt. Das bedeutet, dass die Verhältnisse $D_{15}/d_{85} < 4$, $D_{15}/d_{15} > 4$ und $D_{50}/d_{50} < 10$ beachtet worden sind. Das Fugen- und das Bettungsmaterial sind ein Gemisch aus dem Material Loja.

Die Ergebnisse von den durchgeführten Vorversuchen zeigen, dass die größten Schadensfälle und der Verlust an Filterstabilität bei kombinierter Beanspruchung aus dynamischen Lasten und Wasser zu beobachten ist. Bei Untersuchungen mit nur einer von den obenerwähnten Belastungen wandern nicht so viele Feinkörner in die unter- oder obenliegenden Schichten ein. Das spricht dafür, dass für die Hauptuntersuchungen nur eine Kombination von Rütteln und Bewässern als maßgebend für die Ermittlung der Filterstabilitätskriterien ist.

Der Massenprozentanteil der einzelnen Kornfraktionen soll in bestimmten Grenzen bleiben. Die Korngrößenverteilung soll sich bei den beiden Fugen- und Bettungsmaterialien nach einer bestimmten Menge von Lastzyklen nur wenig unterscheiden. Wenn zu viel feines Material nach unten gesunken ist bedeutet das, dass die Hohlräume in der Bettungsschicht wesentlich weniger sind und das Wasser kann nicht mehr ungestört fließen. Unter dem Druck von oben beginnt es sich wieder nach der Oberfläche zu bewegen und so wird auch Bettungsmaterial in das Fugenmaterial eingebracht. Das Wasser hört auf zu sinken und die Entwässerung wird nur durch Längs- und Querneigung durchgeführt.

Eine genaue Amplitude für das Rütteln kann man leider nach der Voruntersuchungsdurchführung nicht eindeutig bestimmen. Die Versuche werden mit variierender Amplitude von 1,5 mm bis 3 mm durchgeführt. Es hängt vom gewählten Material ab, sowie von der Verdichtung der Schichten und von der dazugehörigen Auflast des Wassers. Einige Proben haben bei den Amplituden bis zu 2,5 mm und ständiger Wassersäule von 10 cm gute Ergebnisse gezeigt, aber bei Proben mit einem anderen Material wird der Probekörper total zerstört. Es bilden sich wellenförmige Grenzen zwischen den Schichten von Bettungs- und Fugenmaterial und somit wird es unmöglich die Schichten genau zu schneiden und die Filterstabilität kann nicht gemessen werden.

Die Resultate zeigen auch, dass am meisten sich die Schichten am unteren Teil des Bettungsmaterials verfeinern. In einigen Fällen sind auch diese, die sich in der Nähe des Fugenmaterials befinden, ein bisschen mehr feiner geworden. Das bedeutet, dass die feineren Körner die ganze Probe durchdringen und mit dem Wasser ausgespült werden oder an der Oberfläche des Geotextils bleiben. Der andere Fall ist, dass die Schichten 4 und 5, die ganz oben liegen, wegen totaler Durchmischung der Materialien feiner sind.

4.6. Grenzbedingungen der Hauptversuche

Hier stehen einige große Fragen und zwar die Bestimmung der Grenzbedingungen, die für die Durchführung der nächsten Untersuchungen in diesem Bereich nötig sind. Der Versuchsaufbau ist für die Bewertung der Filterstabilität geeignet. Was für eine Dicke soll das Fugenmaterial besitzen? Welche ist die optimale Wassermenge für die Bewässerung? Was für eine Amplitude ist am besten hier geeignet? Wie lange sollen die Versuche dauern? Wie soll man das Material verdichten? Deshalb werden zusätzliche Versuche durchgeführt, um das Verhalten der Probe bei unterschiedlichen Beanspruchungen zu beobachten und die Grenzbedingungen genauer zu fassen.

4.6.1. Dicke der Schichten

Die Dicke des Bettungsmaterials von 5 cm weist bei den Voruntersuchungen gute Ergebnisse auf. In der Praxis ist das Verhältnis zwischen den Bettungs- und Fugenmaterial aber nie 1:1. Außerdem befinden sich die Fugen nur zwischen den Pflastersteinen. Deshalb ist es zweifelhaft, dass das Fugenmaterial die gleiche Menge besitzt. Andererseits ist eine 1cm Schicht nicht genug stabil und beginnt zu springen, was für den Versuch ungünstig ist. Deshalb werden zusätzliche Untersuchungen mit einer Fugenmaterialschicht von 2 cm durchgeführt. Bei mittleren Amplituden des Rüttelns von 50% (1,5 mm) und gleichzeitiger Bewässerung bleibt diese standsicher in der Mitte und das Material weist nur am Rande des Zylinders eine geringere Dicke auf. Das kann durch die Bewegung infolge vom Rütteln erklärt werden und kann auch bei dem sechsten Vorversuch beobachtet werden.

Bei den zusätzlichen Untersuchungen wird einen Vergleich zwischen den Probekörpern mit 2 cm und bzw. 5cm Fugenmaterialschicht gemacht. Die zwei werden bei den gleichen Bedingungen (Bewässerung und Rütteln) durchgeführt. Das Bettungsmaterial war Dolomit 2/8 und das Fugenmaterial Loja 0/2. Die Stabilität der Probe mit 5 cm Fugenschicht ist höher. Die Grenze zwischen den Materialien bleibt im Allgemeinen nach dem Versuch unverändert und die Dicke sinkt regelmäßig nach unten. Bei dem Ausbau beobachtet man einen Fugenmaterialeintrag nur am Rande der Probe, in der Nähe der Zylinderwand. Der mittlere Bereich der Bettungsmaterialschicht in einer Tiefe von 1cm bleibt ohne sichtbare Zeichen von feineren Körnern aus dem Fugenmaterial. Im Unterschied zu diesen Ergebnissen ist die 2 cm Fugenmaterialschicht nicht so stabil. Man kann Körner mit Korndurchmesser von 8 mm auf der Oberfläche der Probe sehen. Das bedeutet, dass die Materialien untereinander vermischt wurden. Die Dicke des Fugenmaterials ist auch nicht konstant und kann am Ende des Versuchs eine Neigung haben. Auf der Abbildung 4-24 und Abbildung 4-25 kann man die Schäden in 1 cm Tiefe bei Fugenschichten von 2 cm und 5 cm sehen. Es ist sichtbar, dass bei dünnerer Fugenmaterialschicht größere Schäden entstehen.

Abbildung 4- 20 (links) Schnitt der Bettungsmaterialschicht in 1 cm Tiefe bei 2 cm Fugenschicht

Abbildung 4- 21 (rechts) Schnitt der Bettungsmaterialschicht in 1 cm Tiefe bei 5 cm Fugenschicht

Eine andere Möglichkeit wäre, dass das geringe Gewicht durch zusätzliche Auflast kompensiert wird. So wiegt z.B. die 5 cm Schicht rund 3 kg und die 2 cm rund 1,2 – 1,3 kg. Man kann leicht durch den Einbau von zusätzlichen Körpern mit Gewicht von rund 1,7 kg, die auf der gelöcherten Platte liegen, das Gewicht von 5cm Fugenmaterialschicht imitieren. Einerseits ermöglicht die Platte die ungestörte Bewässerung des Probekörpers und andererseits dient die als gleich verteilte Beanspruchung auf der ganzen Probe. Die Nachteile bei diesem Vorschlag sind die Unmöglichkeit zur Bewässerung von den Bereichen, die sich unter dem zusätzlichen Auflasten befinden und die nicht immer zentrische Belastung des Materials.

Auf der Basis von diesen Ergebnissen wird vorgeschlagen die beiden Schichten mit einer Dicke von 5 cm einzubauen.

4.6.2. Bewässerung

Die Bewässerung der Probe hängt wesentlich von einer komplexen Zahl von Faktoren - der Verdichtung, der Sieblinie des Materials (ob es gröber oder feiner ist), der Dicke der Schichten und der Art des Materials - ab. Bei einer dünneren Schicht von 2 cm ist das Material ziemlich durchlässiger als bei 5 cm. Die Verdichtung spielt eine große Rolle, da sie die Zahl und die Größe der Hohlräume bewirkt. Durch zusätzliche Untersuchungsdurchführungen, die bei 2 cm Fugenschicht aus Loja-Material gemacht werden, wird eine Wassersäule von 10 cm auch bei dem maximalen Wasserdurchfluss (Beregnung mit 2,4 l/min) nicht geschafft. Der höchste Wasserfilm ist bei 1 cm zu beobachten. Die zusätzliche Auflast von 1,7 kg ermöglicht die Entstehung von dickeren Wassersäulen, weil sie die Zahl und die Größe der Hohlräume reduziert und einen höheren Druck bei diesen erzeugt. Es entstehen Luftblasen in der ganzen Probe, die die freie Durchströmung der Wasser stören. Mein Vorschlag für die Durchführung der nächsten Versuche ist ursprüngliche maximal mögliche Durchflussmenge und dann manuelle Regulierung des Wasserniveaus.

4.6.3. Amplitude

Die nächste große Frage ist bei welcher Amplitude muss man rütteln. Hier kann die Antwort auch nicht eindeutig sein. Bei den Voruntersuchungen kann das Material auch bei 66% (2 mm) gerüttelt werden. In trockenem Zustand ist der Gestein leichter und beginnt sich bei solchen Amplituden ständig zu bewegen. Bei den anderen Materialien, mit denen die anderen Versuche durchgeführt werden, sind ähnliche Schadensfälle zu beobachten. Die Schichten bekommen eine ungünstige Neigung und die Grenze zwischen Bettungs- und Fugenmaterial befindet sich nicht mehr in der ursprünglichen horizontalen Ebene, sondern in einer geneigten. In diesem Fall ist es bei dem Ausbau fast unmöglich

die beiden Materialien voneinander zu trennen und die Ergebnisse können damit verfälscht werden. Bei zu kleineren Amplituden von 30-40 % findet aber fast keine Bewegung zwischen den Schichten statt und die dynamische Beanspruchung bleibt ungenügend und deshalb können solche nicht als maßgebend für die Ermittlung der Filterstabilität angenommen werden. Ein guter Zusammenhang zwischen Verhalten der Probe und Ergebnissen als Sieblinienveränderungen bei den Materialien ergibt sich bei einer Amplitude von 50% oder 1,5 mm. Bei dieser wird weder die Probe zerstört noch die Bewegung der Partikel verhindert. Nach der Erfahrung von den vorigen Untersuchungen sollten die nächsten Versuche mit genau dieser Amplitude durchgeführt werden.

Bei feineren Bettungsmaterialien wie z.B. Korngruppe 0/4 oder 0/8, kann man auch größere Amplituden benutzen, da der Hohlraumgehalt gering ist und die Probe stabiler bleibt. Im Unterschied dazu sind die Materialien 2/4 oder 2/8 reicher an Hohlräume und eine Amplitude von mehr als 50% oder 1,5 mm kann den Probekörper total zerstören.

4.6.4. Versuchsdauer

Eine andere Grenzbedingung ist die Dauer des Versuchs. Wie vorher bei den Voruntersuchungen erwähnt wurde, variiert die Dauer zwischen 15 und 30 Minuten. In manchen Situationen ist eine Dauer von 15 Minuten ungenügend, da es offensichtlich ist, dass es noch Bewegung von Körnern vorhanden ist. Die 30 Minuten Dauer ist in einigen Fällen aber zu viel, da die Einwanderung schon aufgehört hat und aus dem Schlauch fließt klares Wasser aus. Die beiden Beobachtungen sind bei einer Dicke der Fugenmaterialschicht von 5 cm zu beschreiben. Mit der Dicke von 2 cm existiert eine größere Sicherheit, dass nach 10-15 bis 20 Minuten die Bewegung nicht mehr stattfindet. Diese Dauerzeit ist aber nur für eine Amplitude von 50% oder 1,5 mm maßgebend. Es kann auch sinnvoll sein, dass die dynamische Beanspruchung erst nach voller Verwässerung der Probe anfängt oder dass während der ursprünglichen Bewässerung eine kleinere Amplitude genutzt wird und somit die Standsicherheit des Probekörpers gewährleistet wird.

Die Dauer hängt auch von der Korngrößenverteilung der Materialien ab. Bei Bettungen aus Korngruppen 2/4 oder 2/8 gibt es mehrere Hohlräume und das Wasser kann leichter mit den feineren Partikeln durchfließen, wenn die noch nicht verstopft sind. Bei Bettungsmaterialien 0/4 oder 0/8 geht die ganze Bewegung ein bisschen langsamer.

Eine mögliche Lösung wäre z.B. 2-3 Minuten reine Bewässerung und dann rund 10-15 Minuten Rütteln und Beregnung mit Amplitude 1,5 mm. Mit gleichzeitigem Anfangen von Rütteln und Bewässerung, sowie bei Anwesenheit von Bettungen mit feineren Partikeln wäre es sinnvoll, dass die Versuchsdauer 30 Minuten umfasst.

4.6.5. Verdichtung

Die Verdichtung der Schichten hat auch eine enorme Bedeutung für die Filterstabilität zwischen Fuge und Bettung. Die Bettungsmaterialschicht soll sehr gut verdichtet und profilgerecht (in diesem Fall eben) sein. Bei den Versuchen, die in der Ruhruniversität Bochum (Krass, 2006) durchgeführt wurden, wird zur Verdichtung des Bettungsmaterials in Abhängigkeit der Versuche 30 Sekunden oder 3 Minuten Vorverdichtung verwendet. Bei den Voruntersuchungen wird in unserem Labor nur Stampfen benutzt. Bei dem Rütteln entsteht die Gefahr, dass die feineren Kornklassen nach unten vor der Einfüllung des Fugenmaterials eindringen und so entstehen viele Hohlräume an der Oberfläche und das begünstigt die Einwanderung des Fugenmaterials. Die 30 Sekunden sind aber nicht so viel als Dauer und das kann in diesem Fall kaum passieren. Bei dynamischen Belastungen von 3 Minuten aber ist der Prozess der Einwanderung ganz möglich. Für die bessere Verdichtung ist aber vielleicht eine Kombination von den beiden (Rütteln und Stampfen) nötig. Hier entsteht das Problem, dass beim keine genaue Verdichtungsenergie bestimmt werden kann. Deshalb ist es sinnvoll, wenn

man zur Verdichtung Rütteln bei Amplitude 50% oder 1,5 mm für eine Zeit von 1 Minute durchführt und das Stampfen nur zur Profilfertigung und Ausgleich der Unebenheiten verwendet.

Das Fugenmaterial wird nicht so streng verdichtet. Wenn wir das Material nach der Einfüllung noch vor dem Beginn des Versuchs rütteln, bedeutet das, dass der Eindrang von feineren Kornklassen schon gestartet hat. Deshalb soll das Fugenmaterial nur durch Stampfen verdichtet werden bis eine ebene Oberfläche vorhanden ist.

5 Hauptuntersuchungen

5.1 Versuchsaufbau und Plan der Versuche

Die Hauptuntersuchungen werden mit den folgenden Kombinationen (Tabelle 5-1) zwischen Fugen- und Bettungsmaterial und unter den schon beschriebenen Grenzbedingungen durchgeführt.

Kombinationen "Filterstabilität"			Fugenmaterial [mm]					
			0/2			0/4		
			fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
Bettungsmaterial [mm]	0/4 (3 M-% < 0,09 mm)	fein	x	(x)	x			
		mittel	(x)	(x)	(x)			
		grob	x	(x)	x			
	2/4		x	(x)	x	x	(x)	x
	0/8	fein	x	(x)	x	x	(x)	x
		mittel	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
		grob	x	(x)	x	x	(x)	x
	2/8	fein	x	(x)	x	x	(x)	x
		mittel	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
		grob	x	(x)	x	x	(x)	x
	4/8		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)

Tabelle 5- 1 Kombinationen zwischen Bettungs- und Fugenmaterial für die Hauptuntersuchungen (Hessmann, 2013)

Die gesamte Zahl der geplanten Versuche ist 24 und jeder Typ soll mindestens 2 Mal durchgeführt werden, wenn man eine gewisse Abhängigkeit bekommen will. Die vollständige Anzahl der Versuche ist damit 48. Zusätzlich können auch weitere Materialien gemischt werden, um die Schlussfolgerungen über die Filterkriterien präziser zu machen. Diesen stehen in der Tabelle oben in Klammern. Im Rahmen meiner Diplomarbeit werden nur Versuche mit Fugenmaterial 0/2 durchgeführt und umfassen die Kombinationen von feinstem und gröbstem Bettungsmaterial bzw. Fugenmaterial. Die von mir gemachten Versuche werden mit grün in der oberen Tabelle markiert.

Der Versuchsaufbau wird in den folgenden Schritten beschrieben und basiert im Allgemeinen auf den durchgeführten Voruntersuchungen:

- Einbau der Versuchsapparatur – Zylinder, gelöcherte Platte mit 2 Schichten Geotextil
- Wiegen der Einbaumenge des Bettungsmaterials
- Einfüllung des Bettungsmaterials
- Verdichtung durch 1 Minute langes Rütteln
- Wiegen der Einbaumenge des Fugenmaterials
- Einbau des Fugenmaterials
- 30 Minuten Rütteln und ständige Bewässerung der Probe
- Durchflussmessung des Wassers alle 2 Minuten
- Ausbau mit der Hilfe der hydraulischen Presse, um die Grenze zwischen den Materialien genauer zu ermitteln
- Trocknen der Materialien

- Die Mengen von Bettungs- und Fugenmaterial noch einmal wiegen
- Neue Sieblinien bestimmen

5.2. Untersuchungsmaterialien

Das Material, das für die Hauptuntersuchungen verwendet wird, ist Dolomit. Es werden für das Fugenmaterial 2 Sieblinien ermittelt, die in den Grenzen der Korngrößenverteilung der Technischen Lieferbedingungen TL-Pflaster 06 übereinstimmen. Die Anforderungen an das Fugenmaterial nach der oben erwähnten Richtlinie bedeuten, dass der Anteil von Füller zwischen 2% und 9% sein muss. Als zweite Nebenbedingung nehme ich an, dass der Siebdurchgang in Massenprozenten bei dem 1 mm-Sieb zwischen 40% und 80% sein soll. So können mit der Hilfe der Fuller-Formel für die optimale Bildung von Sieblinien die Grenzwerte des Fugenmaterialbereiches leicht gefunden werden. Nach dieser Weise bekommt man eine gröbere und eine feinere Fugenmaterialsieblinie. Die Formel, die nach der Untersuchungen von Fuller und Thompson am Anfang des 20. Jahrhunderts erfunden wird, lautet:

$$S[\%]=100\left(\frac{d}{dmax}\right)^{q}, \qquad \textbf{Gleichung 4}$$

s=Massenanteil mit Korndurchmesser kleiner als d, bezogen auf Gesamtmasse,

d_{max} =Größtkorndurchmesser des Korngemenges,

d =Korndurchmesser ($0 \leq d \leq d_{max}$),

q =Körnungsexponent.

Diese Formel wird als Formel für idealisierte Sieblinien benutzt. Hauptsächlich ermittelt man somit die Sieblinien für die Betonmischungen, wo man einen relativ geringen Hohlraumgehalt braucht. In diesen Fällen soll der Exponent ca. 0,4 bis 0,5 sein. Bei unseren Versuchen ist das aber nicht der Fall, deshalb ist hier der Körnungsexponent eine Variable.

Es werden solche Prüfungen für Filterstabilität bei Pflasterbefestigungen in Neuseeland durchgeführt, die als Basis die Fuller-Formel benutzen. Die Forscher dort haben die folgenden Entscheidungen getroffen. Bettungsmaterialien mit Körnungsexponent q kleiner als 0,4 soll man nicht verwenden; Bettungsmaterialien mit Körnungsexponent q zwischen 0,4 und 0,45 können in speziellen Fällen verwendet werden, aber der hohe Anteil an Feinkörner macht diese ziemlich empfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Wegen der Gefahr von nicht ausreichender Filterstabilität zu dem Fugenmaterial können diese nur bei niedrig klassifizierten Straßen verwendet werden.

Bettungsmaterialien mit Körnungsexponent q zwischen 0,45 und 0,6 sind sehr stabil und können bei hochbeanspruchten Pflasterbefestigungen und trockenen Klimabedingungen verlegt werden. Nach der Meinung der Autoren können diese auch bei nasseren Klimabedingungen benutzt werden, aber das Fugenmaterial und die Drainage der Bettungsschicht sollen vorsichtig beachtet werden.

Bettungsmaterialien mit Körnungsexponent q zwischen 0,7 und 1 haben eine gute Standsicherheit und Festigkeit und sind nicht so empfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Sie weisen eine gute Stabilität und Scherfestigkeit auf die aber geringer ist, als die von dem Material mit Exponent zwischen 0,4 und 0,6.

Bettungsmaterialien mit Körnungsexponent q größer als 2 sind für Straßenbau ungeeignet. Sie haben eine gute Festigkeit und können von der Nässe nicht bewirkt werden, aber besitzen keine Stabilität und Scherfestigkeit. Das kann zur Verformungen auch in leicht beanspruchten Straßen führen.

Insgesamt werden nach den neuseeländischen Untersuchungen die folgenden Schlussfolgerungen ermittelt

- Die Einzelpartikeln sollen stabil und aus hartem Material sein
- Der Körnungsexponent q soll zwischen 0,45 und 1 sein
- Bei Körnungsexponenten zwischen 0,45 und 0,6 soll eine sichere Drainage der Bettungsschicht gesichert werden
- Das Anteil an Füllermaterial soll kleiner als 4% sein.
- Die Körner des Bettungsmaterials sollen gebrochen sein

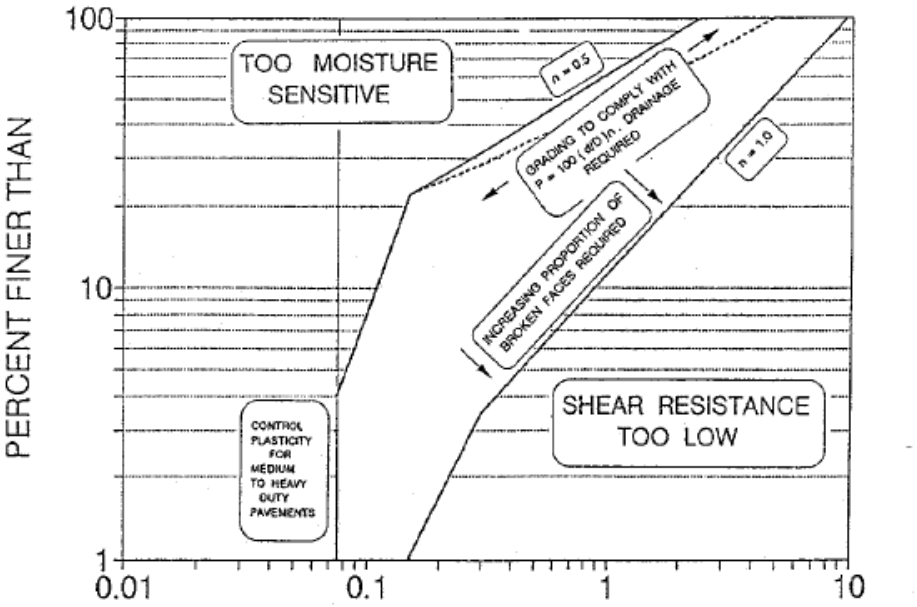


Abbildung 5- 1 Zulässige Bettungsmaterialsieblinien nach den neuseeländischen Versuchen (Bartley, 1980).

Für die Ermittlung der Sieblinien für die Hauptuntersuchungen wird die Fuller-Formel mit kleineren Veränderungen verwendet und in unserem Fall sieht die so aus:

$$s[\%]=\alpha\left(\frac{d}{dmax}\right)^{\beta}, \qquad \textbf{Gleichung 5}$$

wo

s=Massenanteil mit Korndurchmesser kleiner als d, bezogen auf Gesamtmasse,

d_{max} =Größtkorndurchmesser des Korngemenges,

d =Korndurchmesser ($0 \leq d \leq d_{max}$),

α=Körnungskoeffizient

β = Körnungsexponent.

Die Werte von α und β sind Variable und werden durch zusätzliche Nebenbedingungen bestimmt. Der Körnungsexponent β reguliert die Krümmung der Sieblinie und der Körnungskoeffizient α bestimmt die genaue Lage. Das Ziel ist mit der Hilfe von Nebenbedingungen (bei dem Fugenmaterial sind das ein Füllermassenanteil zwischen 2% und 9% und Kornklasse 0,5/1 Massenanteile zwischen 40% und 80%) eine Grenzsieblinie zu schaffen. Mit der Hilfe von Solver wird das Problem gelöst. So bekommen wir je 2 unterschiedliche Werte für die Variablen α und β und 2 unterschiedliche

Sieblinien – eine gröbere und eine feinere. Die Körnungsexponenten haben bei diesen Nebenbedingungen die Werte 0,75 (grob) und 1 (fein) und die Sieblinien des Fugenmaterials sind in dem folgenden Bild 5-2 anzusehen.

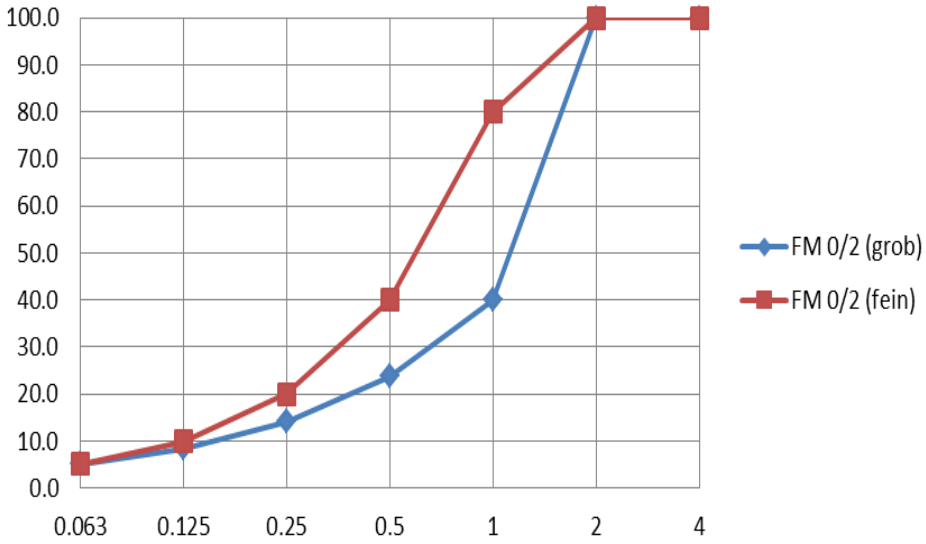


Abbildung 5- 2 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Fugenmaterialien

Für das Bettungsmaterial stehen 7 Varianten zur Verfügung und zwar die Materialien mit Korngruppen 0/4, 2/4, 0/8 und 2/8 mm. Bei den unterschiedlichen Kombinationen für 0/4, 0/8 und 2/8 Material wird die Formel von Fuller mit den 2 Variablen benutzt. Als Kriterium werden ebenfalls die Anforderungswerte der TL-Pflaster 06 benutzt. Die Sieblinien sind in den Nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

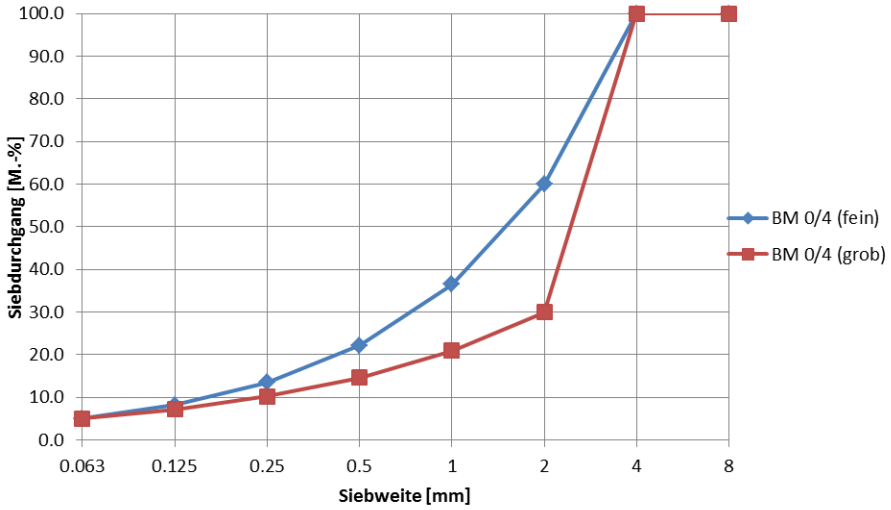


Abbildung 5- 3 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Bettungsmaterialien aus der Korngruppe 0/4 – ein groberes und ein feineres

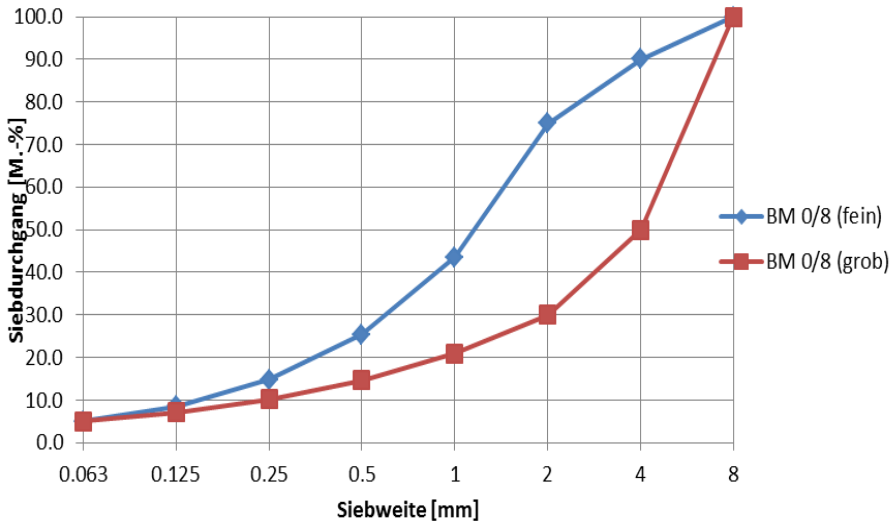


Abbildung 5- 4 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Bettungsmaterialien aus der Korngruppe 0/8 – ein groberes und ein feineres

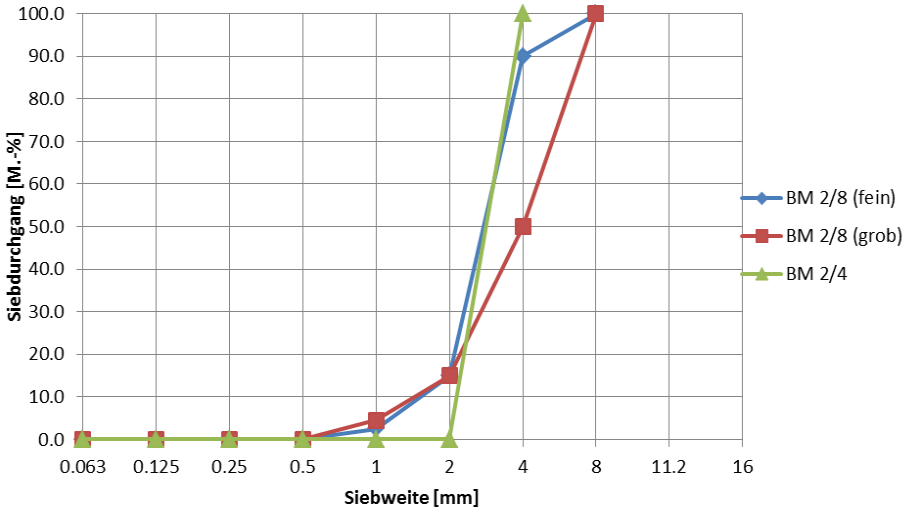


Abbildung 5- 5 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Bettungsmaterialien aus den Korngruppe 2/4 und 2/8

Nach der Ermittlung der Sieblinien sind die in den österreichischen Richtlinien existierenden Bedingungen der Filterstabilität für Pflasterbefestigungen berücksichtigt. $D_{15}/d_{85} < 2$ und $D_{50}/d_{50} < 10$ sind für alle in den Versuchen gebrauchte Kombinationen erfüllt. Die Tabellen unten zeigen die genauen Werte. Die erste Tabelle zeigt die ermittelte Siebweite bei dem entsprechenden Prozentsiebdurchgang. Die zweite veranschaulicht die Werte von D_{15}/d_{85} und D_{50}/d_{50} für jede Kombination aus Fugen und Bettungsmaterial.

Material	D15	D50	d15	d50	d85
FM 0/2 fein	x	x	0.19	0.625	1.25
FM 0/2 grob	x	x	0.27	1.167	1.75
BM 0/4 fein	0.29	1.57	x	x	x
BM 0/4 grob	0.53	2.57	x	x	x
BM 2/4	2.3	3	x	x	x
BM 0/8 fein	0.26	1.2	x	x	x
BM 0/8 grob	0.53	4	x	x	x
BM 2/8 fein	2	2.933	x	x	x
BM 2/8 grob	2	4	x	x	x

Tabelle 5- 2 Korndurchmesser in mm bei dem entsprechenden Siebdurchgang in [M.-%] von 15, 50 oder 85-%

BM/FM	D15/d85	D15/d15	D50/d50
BM 0/4 fein-FM 0/2 fein	0.232	1.526	2.512
BM 0/4 fein-FM 0/2 grob	0.166	1.074	1.345
BM 0/4 grob-FM 0/2 fein	0.424	2.789	4.112
BM 0/4 grob-FM 0/2 grob	0.303	1.963	2.202
BM 2/4-FM 0/2 fein	1.840	12.105	4.800
BM 2/4-FM 0/2 grob	1.314	8.519	2.571
BM 0/8 fein-FM 0/2 fein	0.208	1.368	1.920
BM 0/8 fein-FM 0/2 grob	0.149	0.963	1.028
BM 0/8 grob-FM 0/2 fein	0.424	2.789	6.400
BM 0/8 grob-FM 0/2 grob	0.303	1.963	3.428
BM 2/8 fein-FM 0/2 fein	1.600	10.526	4.693
BM 2/8 fein-FM 0/2 grob	1.143	7.407	2.513
BM 2/8 grob-FM 0/2 fein	1.600	10.526	6.400
BM 2/8 grob-FM 0/2 grob	1.143	7.407	3.428

Tabelle 5- 3 Werte der Verhältnisse D_{15}/d_{85} und D_{50}/d_{50}, die gemäß RVS 08.18.01 kleiner als 2 bzw. 10 sein sollen

Diese Materialien werden im Labor manuell gemischt. Wegen der großen Mengen von Material, die man für die Versuchsdurchführung braucht und wegen der theoretisch bestimmten Sieblinien des Ausgangsmaterialien wird das angelieferte Ausgangsmaterial in die Einzelkornklassen gesiebt.

Bei den feineren Kornklassen wie z.B. 0,063/0,125 und 0,125/0,25 ist der prozentuelle Anteil an Unterkorn ziemlich hoch. Hier kann man die Zusammensetzung der Kornklasse theoretisch ermitteln, wenn man für diese Kornklassen eine Sieblinie durch Nasssiebung ermittelt. Die Mittelwerte bei dem gemischten Material Dolomit zeigen, dass die Kornklasse 0,063/0,125 einen Unterkorn von über 50% besitzt. Bei der Klasse 0,125/0,25 ist dieser Anteil rund 22%.

5.3. Versuchsdurchführung

Nach der Ermittlung der Sieblinien für die Ausgangsmaterialien werden die Verhältnisse D_{15}/d_{85}, D_{50}/d_{50} und D_{15}/d_{15} für jede Kombination von Materialien bestimmt. Die Werte α und β sind auch für jedes Material schon bekannt. Die Durchführungsbedingungen sind im Kapitel 5.1. beschrieben. Die genauen Mengen von Bettungs- und Fugenmaterial sind vor dem Einbau zu bestimmen. Nach der

Durchführung werden diese Mengen noch einmal in trockenem Zustand gemessen und somit werden die Verluste ermittelt. Das Ziel ist die günstigsten und schlechtesten Kombinationen zwischen Bettungs- und Fugenmaterial zu finden und die Verhältnisse D_{15}/d_{85}, D_{50}/d_{50} und D_{15}/d_{15} bei diesen zu vergleichen und in Abhängigkeit von Kornverlusten die Filterkriterien zu überprüfen. Die Nummerierung der von mir im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen ist in der folgenden Tabelle anzusehen.

Versuch	Bettungsmaterial	Fugenmaterial
1	0/4 grob	0/2 fein
2	0/4 grob	0/2 grob
3	0/4 fein	0/2 fein
4	0/4 fein	0/2 grob
5	2/4	0/2 fein
6	2/4	0/2 grob
7	0/8 fein	0/2 grob
8	0/8 fein	0/2 fein
9	0/8 grob	0/2 grob
10	0/8 grob	0/2 fein
11	2/8 fein	0/2 grob
12	2/8 fein	0/2 fein
13	2/8 grob	0/2 grob
14	2/8 grob	0/2 fein

Tabelle 5- 4 Genaue Nummerierung der Versuche und Kombinationen zwischen Materialien

Die Versuche sind so gewählt, dass die beiden Extremfälle möglich sind. Die Korngrößenverteilung des feineren Bettungsmaterial 0/4 unterscheidet sich von der des gröberen Fugenmaterials 0/2 micht wesentlich. Vermutlich treten hier nicht zu große Filterstabilitätsschaden, da die Sieblinien der beiden sehr knapp zueinander liegen. Auf der anderen Seite steht die Kombination zwischen den Gemischen 2/8 und 0/2 fein. Hier sind vermutlich größere Schäden zu erwarten.

5.4. Ergebnisse

Bei allen durchgeführten Versuchen werden die ausgehenden Wassermengen, sowie alle Veränderungen in der Korngrößenverteilung im Unterschied zu der Ausgangssieblinie beobachtet. Die vollständigen Ergebnisse in Protokollen kann man in dem Anhang zu dieser Diplomarbeit finden. Die interessantesten Abhängigkeiten sind auch in diesem Kapitel veranschaulicht.

5.4.1. Wasserdurchlässigkeit

Die unterschiedlichen Kombinationen zwischen Bettungs- und Fugenmaterialien weisen eine variierende Durchlässigkeit auf. Bei einigen Versuchen fließt das Wasser fast ungestört durch die ganze Probe und es ist unmöglich eine konstante Wassersäule von mehr als 1-2 cm zu gewährleisten. In anderen Fällen tritt eine rasche Verstopfung auf der Oberfläche des Geotextils auf und der Durchfluss bleibt sehr gering. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle 5-5 dargestellt.

Minute/ Versuchsnummer	1(BM0/4g +FM0/2f) [ml]	2(BM0/4g +FM0/2g) [ml]	3(BM0/4f +FM0/2f) [ml]	4(BM0/4f +FM0/2g) [ml]	5(BM2/4+ FM0/2f)[ml]	6(BM2/4+ FM0/2g)[ml]	7(BM0/8f +FM0/2g) [ml]	8(BM0/8f +FM0/2f) [ml]	9(BM0/8g +FM0/2g) [ml]	10(BM0/8 g+FM0/2f)[ml]	11(BM2/8 f+FM0/2g)[ml]	12(BM2/8 f+FM0/2f)[ml]	13(BM2/8 g+FM0/2 g)[ml]	14(BM2/8 g+FM0/2f)[ml]
2	210	500	400	120	685	3000	860	280	340	320	2800	800	3100	1700
4	320	340	500	480	1550	3300	280	420	160	110	3000	1550	4000	1600
6	120	360	460	280	1500	3200	225	330	110	110	3200	1670	4000	1550
8	70	370	360	270	1500	2300	230	330	110	150	3600	1500	4000	1600
10	70	360	320	190	1350	1500	220	350	110	130	4000	1250	4400	1550
12	80	330	300	300	1390	1000	170	330	100	130	4000	1300	4500	1500
14	110	370	290	270	1300	800	145	290	100	120	4000	1250	4500	1450
16	130	380	290	240	1100	1100	125	260	130	110	4000	1350	4600	1450
18	120	360	285	260	1050	1100	115	250	110	85	4000	1300	4500	1500
20	60	380	260	280	950	850	110	230	130	80	4000	1300	4400	1450
22	62	400	250	270	800	750	110	240	110	80	4000	1160	4400	1420
24	60	400	250	270	860	650	110	230	130	75	4150	1110	4300	1350
26	56	380	210	240	750	620	110	220	140	70	4200	1000	4100	1280
28	60	350	190	220	650	570	100	210	120	65	4100	1100	4000	1280
30	48	350	220	210	585	500	105	190	100	60	4000	1000	4000	1250

Tabelle 5- 5 Wassermengen für jede 2 Minuten und Versuch.

Eine ausführliche Analyse der gezeigten Ergebnisse folgt in dem nächsten Kapitel. Es ist aber offensichtlich, dass die Durchlässigkeit bei Bettungsmaterialien größer ist, die keine feineren Kornklassen besitzen. Ein Beispiel dafür sind die Bettungsmaterialien 2/4 und 2/8. Außerdem gibt es eine klare Abhängigkeit, dass bei feineren Fugenmaterialien die Durchlässigkeit der ganzen Probe abnimmt. Am durchlässigsten ist die Kombination zwischen Materialien BM 2/8 grob und FM 0/2 grob, was auch zu erwarten ist. Hier gibt es fast keine feineren Anteile, die die Bewegung des Wassers stören können. Am schlechtesten sind die Ergebnisse der Versuche 1 und 10. Das Bettungsmaterial enthält eine gewisse Menge von feineren Partikeln und wird zusätzlich von dem Fugenmaterial verstopft.

5.4.2. Korngrößenverteilung

In den nächsten Abbildungen sind die Sieblinien als Ausgangssieblinie und nach den Versuchen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass je größer die Unterschiede in der Feinheit zwischen den beiden Ausgangsmaterialien sind, umso größere Veränderungen in den Sieblinien auftreten. Eine Ausnahme sind die Versuche mit dem Bettungsmaterial 0/8 fein, wo die Sieblinien von dem Ausgangsmaterial und dem Material nach den Untersuchungen sehr knapp zueinander stehen bleiben. Interessant sind auch die Ergebnisse aus den letzten zwei Versuchen, wo man eine wesentliche Verfeinerung beobachtet, aber fast keinen Unterschied zwischen den Kombinationen von den 2 Fugenmaterialien findet. Die Antwort dafür kann das sehr grobe Bettungsmaterial sein.

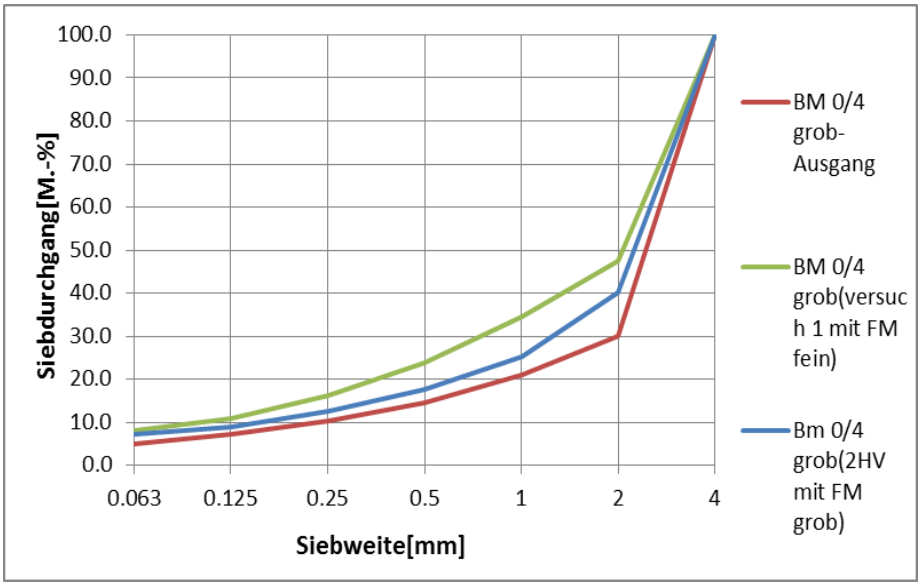


Abbildung 5- 6 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/4 grob

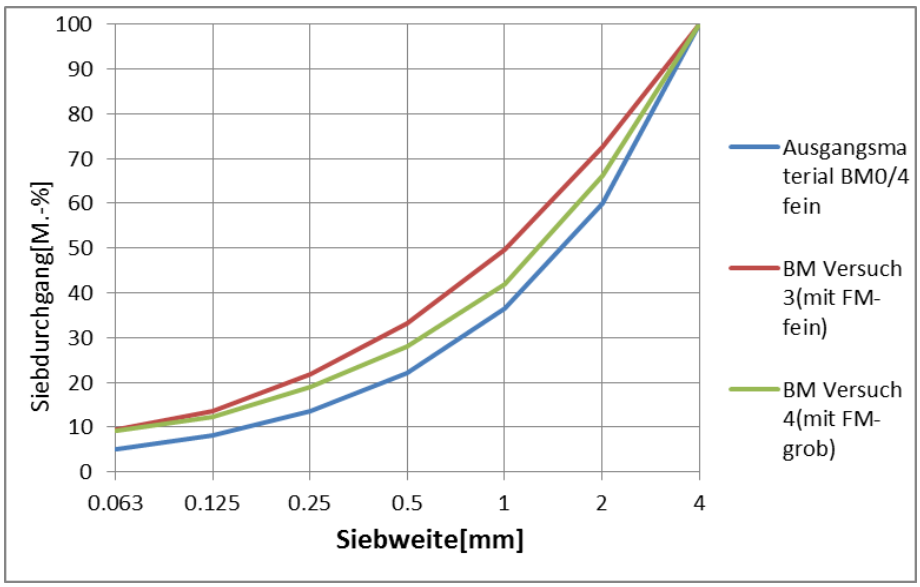


Abbildung 5- 7 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/4 fein

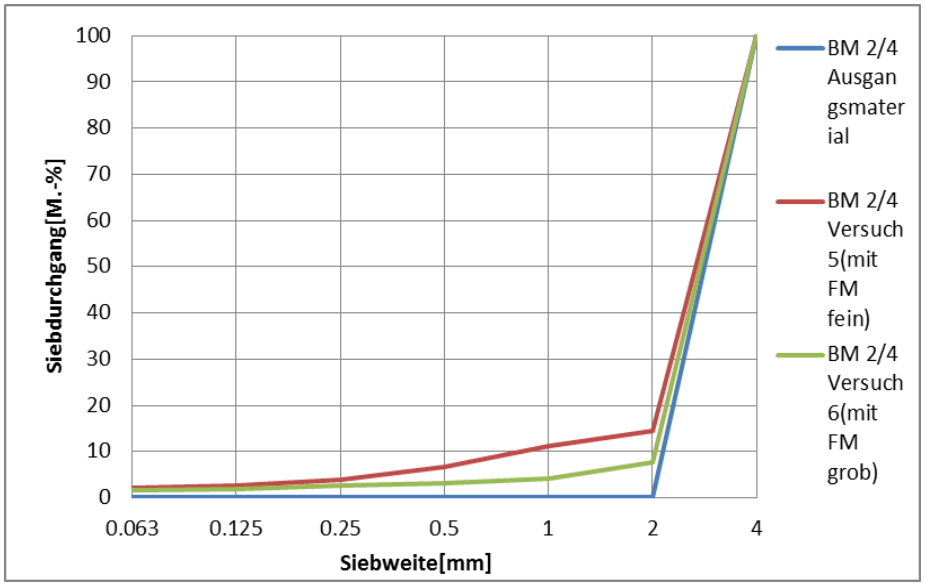


Abbildung 5- 8 Sieblinien von Bettungsmaterial 2/4

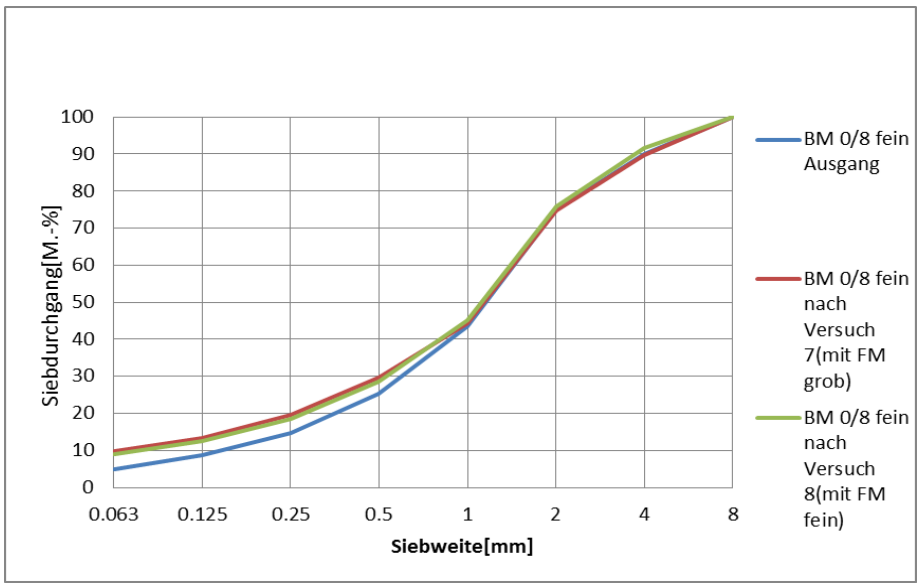


Abbildung 5- 9 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/8 fein

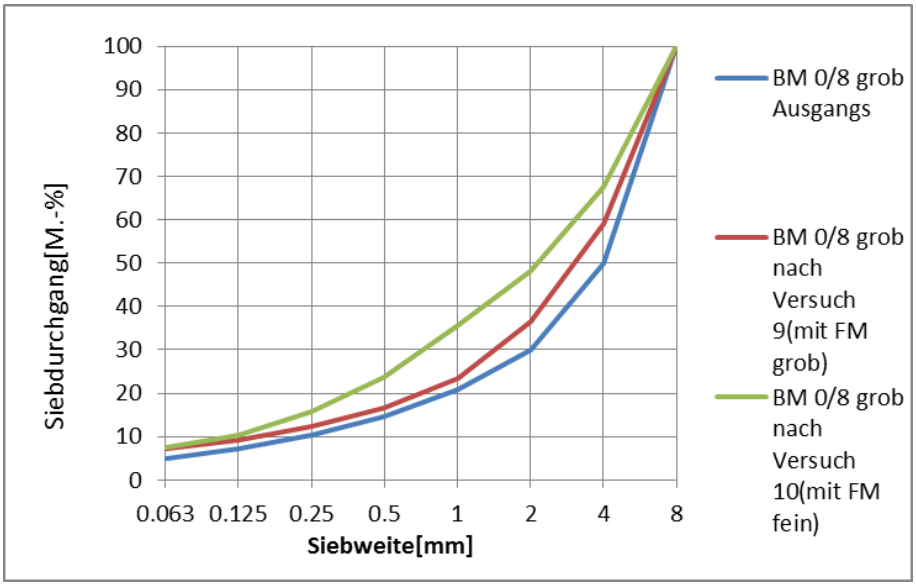


Abbildung 5- 10 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/8 grob

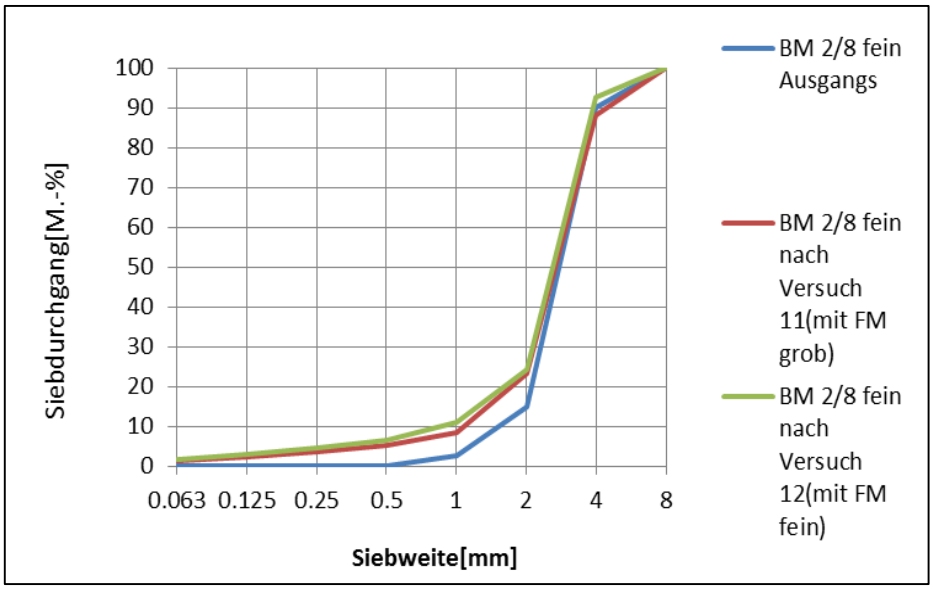


Abbildung 5- 11 Sieblinien von Bettungsmaterial 2/8 fein

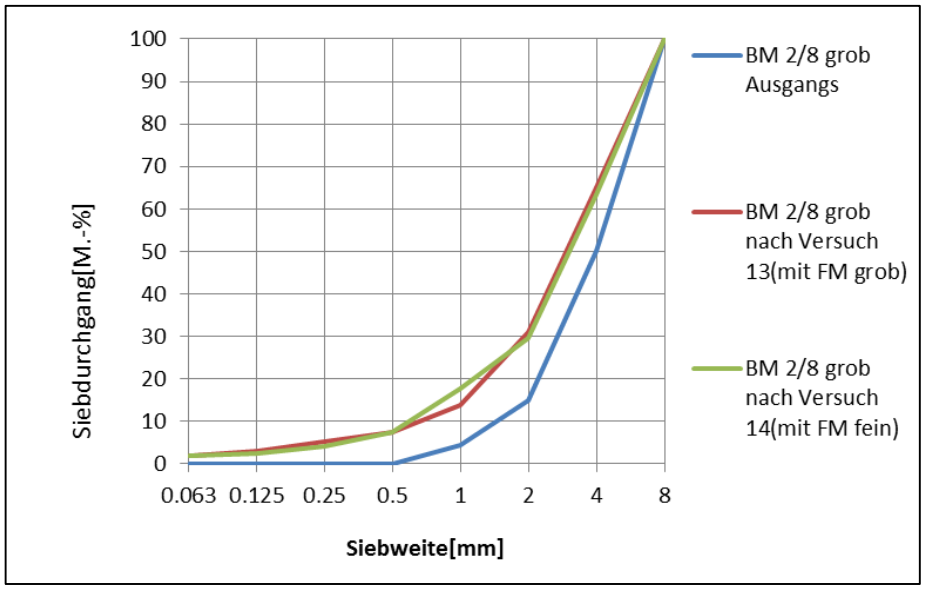


Abbildung 5- 12 Sieblinien von Bettungsmaterial 2/8 grob

5.4.3 Verluste an Material

Die Massen des ein- und ausgebauten Materials sind in der Tabelle 5-6 dargestellt. Es ist eine gleichmäßige Zunahme der Masse des Bettungsmaterials und gleichzeitige Abnahme des Gewichtes des Fugenmaterials festzustellen.

Versuch	BM				FM				Insgesamt
	vor	nach	BM-Zunahme	Prozentuell	vor	nach	FM-Abnahme	Prozentuell	
1	2954.3	3126.4	172.1	5.83	2699.5	2362.4	-337.1	-12.487498	-165
2	2690	3053	363	13.49	2670	2247.1	-422.9	-15.838951	-59.9
3	2903.5	3110.7	207.2	7.14	2610.9	2385.1	-225.8	-8.6483588	-18.6
4	2993	3097.6	104.6	3.49	2764.2	2524	-240.2	-8.6896751	-135.6
5	2561.5	2852.6	291.1	11.36	2594.2	2198.1	-396.1	-15.268676	-105
6	2597.8	2683.6	85.8	3.30	2605.5	2293.5	-312	-11.974669	-226.2
7	2931.3	3063.9	132.6	4.52	2806.6	2528.3	-278.3	-9.9159125	-145.7
8	3078.3	3143.5	65.2	2.12	2658.5	2464.5	-194	-7.2973481	-128.8
9	3014.7	3249.7	235	7.80	2780	2420.1	-359.9	-12.946043	-124.9
10	2897	3294.6	397.6	13.72	2728.9	2211.3	-517.6	-18.967349	-120
11	2672.1	2849.8	177.7	6.65	2646.2	2347.7	-298.5	-11.280327	-120.8
12	2656.6	2879.4	222.8	8.39	2587.8	2302.2	-285.6	-11.036402	-62.8
13	2734.4	3109.8	375.4	13.73	2636.4	2066.2	-570.2	-21.627978	-194.8
14	2712.5	3090.7	378.2	13.94	2787.5	2278.9	-508.6	-18.24574	-130.4
Mittelwert	2814.07	3043.24	229.16	8.25	2684.01	2330.67	-353.34	-13.16	-124.18

Tabelle 5- 6 Verluste von Materialien

6 Analyse

Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen sind hinsichtlich der Filterstabilität zu analysieren. Aus der Sicht der Praxis sind die Wasserdurchlässigkeit, die Korngrößenverteilung und die Verluste an Bettungs- bzw. Fugenmaterialien zu beachten. Die durchgeführten Untersuchungen führen zu Ergebnissen, aus denen einige interessante Schlussfolgerungen gezogen werden können. Es ist sinnvoll zusätzliche Untersuchungen an Materialkombinationen durchzuführen, um detaillierte Aussagen zur Filterstabilität treffen zu können.

6.1. Wasserdurchlässigkeit

In der Tabelle 5-5 ist die Wassermenge, die alle 2 Minuten aus der Probe austritt, aufgeführt. Auf Grund dieser Ergebnisse kann man zum Entschluss kommen, dass das Bettungsmaterial für die Wasserdurchlässigkeit der Probe verantwortlich ist. Bettungsmaterialien ohne feinere Fraktionen, wie z.B. 2/4, 2/8 fein und 2/8 grob weisen eine sehr höhere Wasserdurchlässigkeit auf. Bei Versuchen mit Nummern 5, 6, 11, 12, 13 und 14 ist der mittlere Durchfluss größer als 1000 ml pro 2 Minuten. Besonders große Mengen von über 4000 ml pro 2 Minuten fließen bei Versuchen 11 und 13 aus. Hier kann man keine 10 cm Wassersäule bilden, da der Durchfluss den maximalen möglichen Zufluss der Apparatur übersteigt. Da ist bei weiteren Prüfungen zu beachten, da die Abwesenheit einer Wassersäule bedeutet, dass die Bedingungen bei den unterschiedlichen Untersuchungen nicht gleich sind.

Bei den mit gröberen Bettungsmaterialien (2/4, 2/8 fein und grob) durchgeführten Versuchen (5, 6, 11, 12, 13, 14) beeinflusst das Fugenmaterial offensichtlich die gesamte Durchlässigkeit der Probe. Bei den Versuchen mit dem gröberen Fugenmaterial 0/2 ist die bemessene Wassermenge 2 bis 3 Mal höher als bei den Versuchen mit feinerem 0/2 Fugenmaterial.

Bei den Prüfungen mit Bettungsmaterial 2/4 beobachtet man diesen Unterschied nur in den ersten 10 Minuten der Versuchsdauer, wobei die Wassermengen bei der Kombination mit gröberem 0/2 Fugenmaterial 2-mal höher sind, als bei dem mit feinerem Fugenmaterial. Es ist hier festzustellen, dass das Bettungsmaterial keinen Kornanteil im Sandbereich enthält. Das bedeutet, dass die feineren Fraktionen aus dem Fugenmaterial sehr rasch durch die ganze Schicht eindringen können und sich auf der Oberfläche des Geotextils ablagern. Das führt zu einer Verstopfung und wesentlichen Verringerung der Wasserdurchlässigkeit.

Bei den anderen Untersuchungen mit gröberen Bettungsmaterialien 2/8 grob und fein gibt es eine geringe Verstopfung am Ende der Durchführung. Bei allen diesen Versuchen 5, 6 und 11 bis 14 entsteht keine oder eine deutlich niedrigere Wassersäule als die angestrebten 10 cm. Wegen des höheren Hohlraumgehaltes wird das Material sehr schnell nass und größere Schwankungen bei der Fugenmaterialschicht sind zu beobachten. Bei den Proben mit Bettungsmaterialien 2/4 und 2/8 grob und fein entstehen üblicherweise Blasen in der Bettungsmaterialschicht. Die werden hauptsächlich von der hohen Zahl der Hohlräume und größeren Durchlässigkeit verursacht. Wenn diese Blasen an die Oberfläche treten, transportieren sie grobe Körner aus der Bettungsschicht in das Fugenmaterial.

Bei den Bettungsmaterialien mit höherem Gehalt an feineren Fraktionen ist die Durchlässigkeit niedriger. Der Füller und die feineren Fraktionen verstopfen rasch das Geotextil und stören damit den Abfluss des Wassers. Bei den Untersuchungen mit Bettungsmaterialien 0/4 fein und grob in Kombination mit unterschiedlichen Fugenmaterialien, besonders bei dem Versuch Nummer 1, findet eine Verstopfung nach den ersten 6-8 Minuten statt und dann fließt das Wasser mit einer konstanten Rate. Im Allgemeinen weist das gröbere Bettungsmaterial höhere Durchflussmengen als das feinere Bettungsmaterial auf, wobei das Durchflussmaximum zwischen der zweiten und der vierte Minute des Versuchs gemessen wird. Dann nimmt die Durchlässigkeit langsam und stetig ab.

Bei den Versuchen mit Bettungsmaterialien 0/4 grob und fein kann man die Rolle des Fugenmaterials nicht eindeutig bestimmen. In einigen Fällen wie z.B. Versuche 1 und 2 ist die Probe mit gröberem Fugenmaterial auch durchlässiger. Die ausfließenden Wassermengen bei den Untersuchungen mit feinerem Bettungsmaterial 0/4 (Nummer 3 und 4) werden von dem Fugenmaterial nicht beeinflusst. Eine mögliche Erklärung dazu kann die Feinheit des Bettungsmaterials sein. Mit der Verwässerung der Probe sinken die feineren Körner nach unten und verstopfen zusammen mit dem feinen Material der Bettungsmaterialschicht das Geotextil. Deshalb spielt in diesen Fällen das Fugenmaterial nur eine begrenzte Rolle. Ähnliche Ergebnisse bekommt man aus den Versuchen mit Bettungsmaterial 0/8 fein, wo die Kombination mit feinerem Fugenmaterial zu höherer Durchlässigkeit führt. Diese Theorie ist aber nur eine Vermutung und kann durch zusätzliche Untersuchungen in diesem Bereich überprüft werden.

Als undurchlässigste Fälle können die Kombinationen zwischen gröberen Bettungsmaterialien mit Korngruppen 0/4 und 0/8 mit feinerem Fugenmaterial 0/2 angenommen werden. Die Erklärung dafür kann nur der nicht so große Anteil an feineren Körnern im Bettungsmaterial sein. Das Fugenmaterial dringt schnell nach unten ein und verstopft das Geotextil. Damit wird der gesamte Prozess der Verstopfung beschleunigt und die Wasserdurchlässigkeit nimmt rasch ab. Am durchlässigsten sind die Versuche 11 und 13, die mit Bettungsmaterialien 2/8 und gröberem Fugenmaterial 0/2 durchgeführt werden.

Die Versuche zeigen, dass je gröber das Bettungsmaterial ist, die Durchlässigkeit umso größer wird. Mit wenigen Ausnahmen beeinflusst das gröbere Fugenmaterial den Durchfluss positiv. Interessant ist es auch, dass bei gröberen Bettungsschichten aus dem Schlauch nur klares Wasser fließt und man Feinanteile mit den Augen nicht bemerken kann. In diesem Fall ist einerseits die Wasserdurchlässigkeit höher und andererseits die Verstopfung unwesentlich.

6.2. Korngrößenverteilung und Filterkriterien

Die Veränderungen in den Sieblinien hängen hauptsächlich von der gewählten Kombination zwischen Fugen- und Bettungsmaterial ab. Die prozentuale Veränderung der Kornklassen der durchgeführten Versuche ist der Tabelle 6-1 zu entnehmen.

	Versuchsnummer													
Korngröße[mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
< 0.063	3	2.1	4.5	4.2	2.1	1.6	4.7	4.1	2.1	2.5	1.5	1.7	2.0	1.9
< 0.125	0.8	-0.2	0.7	0	0.6	0.5	0	-0.3	-0.1	0.8	0.8	1.2	1.1	0.7
< 0.25	2.2	0.5	3	1.3	1.4	0.5	0.2	0	0.2	2.3	1.4	1.6	2.0	1.7
< 0.5	3.1	0.6	2.6	0.3	2.7	0.6	-0.7	-0.5	-0.1	3.7	1.7	2.1	2.4	3.3
< 1	4.4	1.2	2.2	-0.4	4.4	1	-3.4	-1.6	0.4	5.6	0.8	2	1.7	5.5
< 2	4	6	-0.5	0.7	3.4	3.4	-0.8	-0.8	3.9	3.4	2.1	0.8	6.8	1.6
< 4	-17.5	-10.2	-12.6	-6.2	-14.5	-7.6	-0.2	0.9	2.5	-0.6	-10	-6.9	-1.1	-1.1
< 8							0.2	-1.7	-8.9	-17.6	1.8	-2.5	-15.0	-13.5

Tabelle 6- 1 Prozentuale Veränderungen in einzelnen Kornklassen bei jedem durchgeführten Versuch

Eine wesentliche Abnahme des Anteils findet man bei den gröbsten Kornfraktionen 2-4 und 4-8 mm. Man darf auch damit rechnen, dass ein Teil von dem Füller mit dem Wasser durch die Geotextilschicht ausgespült wurde. Diese Massen variieren bei den einzelnen Prüfungen.

Auf der Basis von diesen Ergebnissen kann man zu einigen Entschlüssen kommen, die eng mit der Filterstabilität zusammenhängen. Besonders filterstabil sind feinere Bettungsmaterialien mit Korngruppen 0/4 und 0/8 und besonders wenn diese mit gröberem Fugenmaterial 0/2 kombiniert werden.

In der Tabelle 6-1 zeigen das die Versuche mit den Nummern 4 und 7. Die Sieblinien der Untersuchungen, die mit gröberem Fugenmaterial durchgeführt werden, verlaufen in der Regel näher zu der Ausgangssieblinie des ursprünglichen Materials. Das heißt, dass in diesen Fällen nicht so große Einträge in die unteren Schichten auftreten und die Kombination eine bessere Filterstabilität aufweist. Als Ausnahmen können die Versuche 7 und 8 angenommen werden, wo alle drei Sieblinien sehr nah zueinander liegen.

Eine wesentliche Verfeinerung findet bei Bettungsmaterialien statt, die arm an feineren Kornklassen sind (2/4 und 2/8 mm). In diesen Fällen nehmen die feinsten und die mittleren Kornklassen stark zu im Gegensatz zu den gröbsten, wo Abnahmen bis zu fast 20 % festzustellen sind. Beispiele dafür sind die Versuche 5 und 11 bis 14. Schwankungen sind auch bei dem Versuch 10 mit Bettungsmaterial 0/8 grob und feinerem Fugenmaterial 0/2 zu erkennen.

Das Bettungsmaterial 0/4 besitzt eine bessere Filterstabilität im Unterschied zu dem 2/4. Außerdem sind die feineren 0/4 Materialien filterstabiler als dieselben gröberen.Genauso stehen die Dinge bei den 0/8 im Vergleich mit 2/8, wo das Bettungsmaterial 0/8 sich deutlich besser verhält.

6.3. Verluste an Materialien

Die Ergebnisse von den bisher durchgeführten Versuchen sind nicht ganz eindeutig und dafür gibt es mehrere Ursachen. Erstens ist die Trennung der beiden Schichten nicht eindeutig möglich, da die Probe teilweise durch die Wellenbewegungen deformiert ist und der lineare Schnitt nicht genau passt. Bei dem Ausbau der Probe entsteht auch die Gefahr, dass ein Teil des Materials seitlich ausfällt.

Die mittlere Verminderung der Masse des Fugenmaterials bei allen Versuchen ist 13,16 %. Man beobachtet einen Zusammenhang zwischen der Zunahme des Gewichtes der unteren Schicht und der gleichzeitigen Abnahme der Masse der oberen Schicht. Insgesamt ist bei allen Versuchen eine Verminderung der gesamten Masse des Probekörpers zu beobachten. Diese Verluste variieren zwischen 20 g und 200 g. Im Allgemeinen gilt, je größerder Unterschied in der Korngrößenverteilung zwischen dem Bettungs- und Fugenmaterial ist, desto größere Verluste sind vorzufinden. Ein Teil des Materials wird mit dem Wasser durch den Schlauch ausgespült. Eine bestimmte Menge bleibt auf der Oberfläche des Geotextils und kann nicht leicht ausgekratzt werden. Dazu gehören auch die seitlichen Verluste bei dem Ausbau.

Der so aufgebaute Versuch funktioniert im Allgemeinen und kann zur weiteren Ermittlung der Filterkriterien im Straßenbau verwendet werden. Das Verhältnis D_{15}/d_{15} sollte zusätzlich in die österreichischen Richtlinien einfließen. Im Allgemeinen dient dieses dazu, dass das Material genug durchlässig ist. Das Verhältnis sollte > 1 sein, da sonst die Probe sehr undurchlässig wird. Sehr große Werte von über 10 sind aber auch ungünstig, da die Gefahr vor Suffosion sich erhöht und große Veränderungen in den Sieblinien auftreten.

7 Schlussfolgerung

Die Filterstabilität ist für die Dauerhaftigkeit der Pflasterbefestigungen von wesentlicher Wichtigkeit. Die Filterkriterien die in den Normen stehen, können nicht immer eine Bewegung von Körnern zwischen den Schichten verhindern und brauchen deshalb eine Aktualisierung. Eine ausführlichere Analyse und weiter Durchführung von Versuchen mit unterschiedlichen Verhältnissen D_{15}/d_{85}, D_{50}/d_{50} und D_{15}/d_{15} von den Bettungs- und Fugenmaterialien kann dabei helfen, dass diese Kriterien ergänzt oder neu ermittelt werden.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei den Werten von D_{15}/d_{85} von 0,3 bis 0,4 kleinere Veränderungen in den Sieblinien auftreten. Dabei weisen auch die Verhältnisse D_{50}/d_{50} von unter 5 oder sogar 4 bessere Ergebnisse im Sinn von Filterstabilität auf.

Diese Resultate können aber nicht eindeutig interpretiert werden. Das Verhältnis D_{15}/d_{85} soll in allen Fällen unter 4 sein. Das Verhältnis D_{50}/d_{50} sollte nach der Analyse der Ergebnisse aus den Versuchen von 10 auf 5 reduziert werden. Die Kombinationen zwischen Materialien 0/4 mit 0/2 haben eine kleinere Veränderung als diese zwischen 2/4 mit 0/2. Dasselbe gilt bei Probekörpern mit Bettungen 0/8 und 2/8. Deshalb ist die Filterstabilität bei Schichten mit knapp zueinander liegenden Sieblinien garantiert und die Zahl der Schadensfälle bleibt sehr gering.

Als Schlussfolgerung kann man sagen, dass die Filterstabilität als erbracht gilt, wenn die Bedingungen erfüllt werden:

- $D_{15}/d_{85}<4$, aber möglichst klein oder Werte von 0,5 bis 2 aufweist
- $D_{50}/d_{50}<5$
- $1<D_{15}/d_{15}<10$
- Körnungsexponent β zwischen 0,6 und 0,8

Ein Problem besteht darin, dass in allen Normen und Richtlinien als Basis die Filterregeln von Terzaghi dienen, die nur den Einfluss von den Wasserbelastungen beachten. Bei dem Straßenbau kommt aber eine sehr große dynamische Beanspruchung, die von den Verkehrslasten verursacht wird, hinzu. Die dynamischen Belastungen beeinflussen die Filterstabilität in negativer Weise und beschleunigen die Bewegung sowie den Transport von Körnern in die unterliegenden Schichten.

In der TL-Pflaster StB 06 sind die Materialien aus Korngruppen 0/4, 0/8 oder 0/11 als geeignet für Bettungsmaterial klassifiziert. Dort werden auch Grenzen der Sieblinie definiert. Die österreichischen Richtlinien bevorzugen als Bettungsmaterialien aus den Korngruppen 2/4 oder 2/8, die aber eindeutig bei den durchgeführten Versuchen eine geringere Filterstabilität aufgewiesen haben. Bei dem gröberen Material kann das feinere Fugenmaterial leichter nach unten eindringen und die Fuge damit entleeren.

Im Rahmen der gegenwärtigen Arbeit entwickelten Versuch hat seine Ziele erreicht und kann weiter entwickelt werden. Der wichtigste Vorteil ist der einfache Aufbau und die nicht so aufwendige Apparatur. Die Untersuchung zählt sich zu den konventionellen Arten von Prüfungen und kann in jedem Labor durchgeführt werden. Natürlich sind die Versuchsbedingungen nicht exakt die realen, die in der Praxis vorhanden sind.

Der Versuch zeigt klar die Unterschiede zwischen den Materialkombinationen und die Veränderungen der Sieblinie. Damit sind die in der Arbeit erwähnten Ziele erfüllt. Der einfache Aufbau und die Arbeitsweise bietet eine vorteilhafte Untersuchungsmethodik. Der Vorteil hier ist die Beobachtung der reinen Filterstabilität ohne zusätzliche Einflüsse von anderen Faktoren, wie z.B. Kornzertrümmerung usw. Weitere Durchführungen können mit einer anderen Schichtdicke, Amplitude oder Versuchsdauer gemacht werden. Eine andere Variante kann die Fixierung des Gewichtes der einzelnen

Schichten sein. Für diesen Fall wird vorgeschlagen, dass die Masse der Schichten nicht mehr als 2 oder 2,5 kg und nicht weniger als 1 kg betragen soll. Es bestehen Nachteile, da die Trennung der Schichten nicht immer genau möglich ist. Außerdem können zusätzliche Verluste an Material auftreten, wenn man bei dem Ausbau der Probe nicht achtsam ist.

Die Dauerhaftigkeit der Pflasterstraßen hängt von der richtigen Bauweise und von den gewählten Materialien ab. Die Filterstabilität zwischen den einzelnen Schichten beeinflusst aber wesentlich das Verhalten der ganzen Konstruktion und wenn die mangelhaft ist, bekommt man üblicherweise Schäden, die mit vielen Kosten verbunden sind. Deshalb ist es sehr wichtig, dass die Planung, Konstruktion, Materialauswahl, Bauweise und Wartung in Ordnung sind. Erst dann ist man sicher, dass solche Schäden nicht auftreten.

8 Zusammenfassung

Das Ziel der Diplomarbeit bestand darin, ein Konzept zur Bestimmung der Filterstabilität von Fugen- und Bettungsmaterial aufzustellen und eine Versuchseinrichtung zur Ermittlung von Filterstabilität zu schaffen. Als sekundäres Ziel gilt die Durchführung der ersten Versuche mit unterschiedlichen Bettungs- und Fugenmaterialien und Auswertung der Untersuchungsergebnisse.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Versuchseinrichtung konzipiert, die einerseits sehr einfach zum Handhaben ist und andererseits nur die reine Filterstabilitätswirkungen zwischen Bettungs- und Fugenmaterial unter bestimmten Bedingungen betrachtet. Der so durchgeführte Versuch ist einfach und nicht zeitaufwändig, zeigt aber gute Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Kombinationen von Fugen- und Bettungsmaterialien.

In der ersten Phase wurden die verwendeten Materialien fixiert und bestimmte Grenzbedingungen der Versuche ermittelt. Es wurde mit den Resultaten aus den Vorversuchen gezeigt, dass die Filterstabilität zwischen den Schichten am schlechtesten ist, wenn die Probe mit Wasser- und dynamischen Belastungen (Vibrationen) beansprucht wird. Außerdem wurden unterschiedliche Mengen und Dicken von Material eingebaut, um alle Parameter zu beobachten, die die Filterstabilität beeinflussen. Dazu zählen auch wechselnde Verdichtungsarten (Stampfen, Rütteln oder kombinierte) des eingebauten Materials.

Nach der Festlegung der Grenzbedingungen wurden die Hauptversuche durchgeführt, wo unterschiedliche Kombinationen von Materialien bei gleichen Beanspruchungen überprüft wurden. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die derzeit gültigen Filterkriterienzu großzügig sind. Bei einigen Versuchen wurden nur begrenzte Schäden beobachtet, aber bei anderen steigen die Verluste an einzelnen Kornklassen und an gesamter Menge von Material bis 20% an, was in der Praxis keinesfalls passieren sollte. Außerdem sind die Veränderungen bei den Korngrößenverteilungen von einigen Ausgansmaterialien zu groß.Nach der Analyse der Ergebnisse kann man zum Entschluss kommen, dass eine Verbesserung bzw. Ergänzung der Filterkriterien bei den Pflasterbefestigungen in Straßenbau notwendig ist.

In dem heutigeren Straßenbau soll man immer die letzten Innovationen und Technologien benutzen. Die Pflasterbefestigungen sind als Bauweise die älteste haben aber auch ihre Vorteile in sich und werden in den älteren europäischen Städten noch bevorzugt. Die Forschungen zur Speicherung der Kulturgeschichte sind in diesem Fall mit der Suche nach Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit kombiniert. Deshalb sind die Weiterentwicklung von solchen Versuchen und die ständige Erneuerung der Regelungen aus besonderer Wichtigkeit für die zukünftige Erhaltung der Pflasterbefestigungen. Die Verbesserung der Filterstabilität kann sehr positiv für die Gebrauchsdauer und Standsicherheit von solchen Straßen wirken.

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich zwischen der ungebundenen, gebundenen und gemischten Bauweise mit deren Vor- oder Nachteile (RVS 08.18.01)..... 11
Tabelle 2-2 Anforderungen an Korngemische für ungebundene Tragschichten (RVS 08.15.01). .. 21
Tabelle 2-3 Pflaster aus Naturstein-Druckfestigkeit gemäß TL-Pflaster StB. 22
Tabelle 2-4 Erforderliche Mindestdicke für Natursteinpflaster (RVS 03.08.63)..... 23
Tabelle 2-5 Erforderliche Mindestdicke für Betonpflasterplatten (RVS 03.08.63) 23
Tabelle 2-6 Anforderungen an das Bettungsmaterial gemäß DIN-Norm 18318 (Pittochka, 2008). 23
Tabelle 2-7 Anforderungen an das Bettungsmaterial gemäß RVS 08.18.01 24
Tabelle 2-8 Anforderungen an das Fugenmaterial nach DIN 18318 (Pittochka, 2008)..... 25
Tabelle 2-9 Abnahmeprüfungen, Prüflosgröße und Anzahl der Prüfungen (RVS 08.18.01) 26

Tabelle 4- 1 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen nach der ersten Vorversuch 43
Tabelle 4- 2 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der zweiten Vorversuch 45
Tabelle 4- 3 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der dritten Vorversuch 48
Tabelle 4- 4 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der dritten Vorversuch..... 48
Tabelle 4- 5 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der vierten Vorversuch 50
Tabelle 4- 6 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der vierten Vorversuch..... 50
Tabelle 4- 7 Wasserdurchlässigkeit während des Versuchs..... 51
Tabelle 4- 8 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der fünften Vorversuch 53
Tabelle 4- 9 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der fünften Vorversuch 53
Tabelle 4- 10 Wasserdurchlässigkeit während des sechsten Versuchs 54
Tabelle 4- 11 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der sechsten Vorversuch 55
Tabelle 4- 12 Wasserdurchlässigkeit während des siebten Versuchs 55
Tabelle 4- 13 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen der Bettung nach der siebten Vorversuch 56
Tabelle 4- 14 Veränderungen bei den prozentuellen Anteilen der einzelnen Kornklassen des Fugenmaterials nach der siebten Vorversuch..... 57
Tabelle 4- 15 Prozentueller Anteil der Einzelkornklassen für das Bettungsmaterial bei jedem Vorversuch 58
Tabelle 4- 16 Prozentueller Anteil der Einzelkornklassen für das Fugenmaterial bei jedem Vorversuch 58

Tabelle 4- 17 Verluste der Einzelkornklassen in [M.-%] bei dem Bettungsmaterial für jeden Vorversuch 58

Tabelle 4- 18 Verluste der Einzelkornklassen in [M.-%] bei dem Fugenmaterial für jeden Vorversuch 59

Tabelle 5- 1 Kombinationen zwischen Bettungs- und Fugenmaterial für die Hauptuntersuchungen (Hessmann, 2013) 64

Tabelle 5- 2 Korndurchmesser in mm bei dem entsprechenden Siebdurchgang in [M.-%] von 15, 50 oder 85-% 69

Tabelle 5- 3 Werte der Verhältnisse D_{15}/d_{85} und D_{50}/d_{50}, die gemäß RVS 08.18.01 kleiner als 2 bzw. 10 sein sollen 69

Tabelle 5- 4 Genaue Nummerierung der Versuche und Kombinationen zwischen Materialien 70

Tabelle 5- 5 Wassermengen für jede 2 Minuten und Versuch. 71

Tabelle 5- 6 Verluste von Materialien 75

Tabelle 6- 1 Prozentuale Veränderungen in einzelnen Kornklassen bei jedem durchgeführten Versuch 77

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2- 1 Konstruktion von Pflasterbefestigung (ZTV-P StB) 12
Abbildung 2- 2 Oberbaukonstruktionen von gepflasterten Wegen (RVS 03.08.63) 16
Abbildung 2- 3 Entwässerungsmöglichkeit bei der Randeinfassung (Wichter, 1996) 17
Abbildung 2- 4 Schäden infolge Unebenheiten in der Tragschicht 17
Abbildung 2- 5 Segmentbogenverband – Skizze und Anforderungen an die Geometrie und den Einbau gemäß RVS 08.18.01. 18
Abbildung 2- 6 Schuppenverband – Skizze und Anforderungen an die Geometrie und den Einbau gemäß RVS 08.18.01. 19
Abbildung 2- 7 Mangelhafte Randeinfassung (Wichter, 1996). 28
Abbildung 2- 8 (links) Ungenügende Filterstabilität zwischen Bettungs-und Fugenmaterial (Wichter, 1996) 28
Abbildung 2- 9 (rechts) Schäden durch mangelhafte Entwässerung (Wichter, 1996) 28
Abbildung 2- 10 Schäden durch unterschiedliche Dicke der Bettung (Wichter, 1996) 29

Abbildung 3- 1 Bewegung der Pflastersteine infolge ungenügender Filterstabilität zwischen Bettungs- und Tragschicht (Wichter,1996). 30
Abbildung 3- 2 Kippbewegungen des Steins wegen Entleerung der Fuge (Wichter, 1996). 31
Abbildung 3- 3 Veranschaulichung von den Prozessen Erosion und Suffosion in verschiedenen Formen (Sherhard, 1976). 32
Abbildung 3- 4 Hjulstrøm-Diagramm (Hjulstrøm) 33
Abbildung 3- 5 Bereich und Diagramm zur Bestimmung der Filterregeln von Terzaghi (Terzaghi, 1961). 34
Abbildung 3- 6 Diagramm von Cistin/Ziems 35

Abbildung 4- 1 Teile der Versuchsapparatur- durchsichtliches Zylinder, Sieb, Stahlplatte mit Löchern und Stahlplatte mit Löchern und Stützbeinen 39
Abbildung 4- 2 Sieblinien des Bettungs- und Fugenmaterials 39
Abbildung 4- 3 Skizze des Versuchsaufbaus – 5 virtuelle Schichten von Bettungsmaterial je 1 cm dick, 5 cm dicke Fugenmaterialschicht, 10 cm Wassersäule 40
Abbildung 4- 4 Foto des fertigen Versuchsaufbaus 41
Abbildung 4- 5 Durchführung des ersten Vorversuchs 42
Abbildung 4- 6 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem ersten Vorversuch 42
Abbildung 4- 7 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem ersten Vorversuch 43
Abbildung 4- 8 Hydraulische Presse und Ausbildung des Bettungsmaterials 44
Abbildung 4- 9 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem zweiten Vorversuch 45
Abbildung 4- 10 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem zweiten Vorversuch 45
Abbildung 4- 11 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem dritten Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten 47

Abbildung 4- 12 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem dritten Vorversuch..... 47
Abbildung 4- 13 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem vierten Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten. 49
Abbildung 4- 14 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem vierten Vorversuch 50
Abbildung 4- 15 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem fünften Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten 52
Abbildung 4- 16 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem fünften Vorversuch..... 52
Abbildung 4- 17 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem sechsten Vorversuch, geteilt in vertikalen Schichten 54
Abbildung 4- 18 Sieblinien des Bettungsmaterials vor und nach dem siebten Vorversuch, geteilt in horizontalen Schichten 56
Abbildung 4- 19 Sieblinien des Fugenmaterials vor und nach dem siebten Vorversuch..... 57
Abbildung 4- 20 (links) Schnitt der Bettungsmaterialschicht in 1 cm Tiefe bei 2 cm Fugenschicht61
Abbildung 4- 21 (rechts) Schnitt der Bettungsmaterialschicht in 1 cm Tiefe bei 5 cm Fugenschicht 61

Abbildung 5- 1 Zulässige Bettungsmaterialsieblinien nach den neuseeländischen Versuchen (Bartley, 1980). 66
Abbildung 5- 2 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Fugenmaterialien 67
Abbildung 5- 3 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Bettungsmaterialien aus der Korngruppe 0/4 – ein groberes und ein feineres 67
Abbildung 5- 4 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Bettungsmaterialien aus der Korngruppe 0/8 – ein groberes und ein feineres 68
Abbildung 5- 5 Sieblinien der verwendeten für die Hauptuntersuchungen Bettungsmaterialien aus den Korngruppe 2/4 und 2/8..... 68
Abbildung 5- 6 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/4 grob..... 72
Abbildung 5- 7 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/4 fein..... 72
Abbildung 5- 8 Sieblinien von Bettungsmaterial 2/4..... 73
Abbildung 5- 9 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/8 fein..... 73
Abbildung 5- 10 Sieblinien von Bettungsmaterial 0/8 grob..... 74
Abbildung 5- 11 Sieblinien von Bettungsmaterial 2/8 fein..... 74
Abbildung 5- 12 Sieblinien von Bettungsmaterial 2/8 grob..... 75

11 Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1 15
Gleichung 2 35
Gleichung 3 36
Gleichung 4 65
Gleichung 5 66

12 Literaturverzeichnis

Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen ATV DIN 18318, Verkehrswegebauarbeiten – Pflasterdecken und Plattenbeläge in ungebundener Ausführung, Einfassungen (VOB – Teil C), DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) Beuth-Verlag

Bartley F .G. "Unbound Granular Pavements" Proceedings New Zealand Roading Symposium. 1979.

Bartley F.G. "A Review of Aggregate Research in Ne" Zealand" RRU Bulletin No.50. National Roads Board New Zealand. 1980.

BOETSCHER, Sabine – Fachbeitrag Pflasterverlegetechnik-Anforderungen an Asphalttragschichten beim Einsatz unter Pflasterdecken, 2010

BOULTON, N. S. (1951): Das Strömungsnetz in einem Gravitationsbrunnen (engl.). Journ. Inst. CivilEngng., London, S.534.

Chris Scarre: *Die Siebzig Weltwunder*.2004

CISTIN, J. (1967): Zum Problem mechanischer Deformationen nichtbindiger Lockergesteine durch die Sickerwasserströmung in Erddämmen, in Wasserwirtschaft, 1967 Heft

DAVIDENKOFF, R. N.: Anwendung von Filtern im Wasserbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn. 1979. Siehe auch: Müllner, B.: Erosionsbeständigkeit mineralischer Abdichtungen bei hydraulischer Belastung. Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der LGA Nürnberg, Heft 56 (1990), S. 245-278.

Eisenmann, G. Leykauf: *Betonfahrbahnen*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003, ISBN 3-4330-1341-1, S. 187

GRUNDBAU, TUM - Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Wasser im Baugrund, Skript

Horst Mentlein: *Pflaster Atlas*. Rudolf Müller Verlag, Köln 2007

KRASS, Klaus - Anforderungen an das Bettungs- und Fugenmaterial für Pflasterdecken bei statischer und dynamischer Beanspruchung, Bochum 2006

KRASS, Klaus - Untersuchung über die Verteilung von auftretenden Schub- und Torsionskräften in Pflasterbelägen, Bochum 2001

KURTH, Norbert – Schadensfälle bei Pflasterbauweisen, 2010

LANG, Hans-Jürgen - Bodenmechanik und Grundbau, 1990

LEOPOLDSEDER, Thomas – Stabile Fugen bei Betonpflaster, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Abteilung Landespflege, 2004

LERCH, Tobias - Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Betonpflasterkonstruktionen unter praxisrelevanter Belastung, 2006

Merkblatt für den Bau von Busverkehrsflächen –Ausgabe 2000

Merkblatt für Dränbetontragschichten (DBT) – Ausgabe 1996

Merkblatt für farbige Betonerzeugnisse für den Straßenbau – Ausgabe 1985

Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflaster und Plattenbelägen

Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflaster und Plattenbelägen – Ausgabe 1989, Ergänzte Fassung 1994

PICHOTTKA, Stefan – Pflaster – ungebundene Bauweisen, Potsdam 2008

PRINZ, Helmut - Abriß der Ingenieurgeologie, 1991

Richtlinien für die Anlage von Straßen

RINN, Christian - Planungshandbuch, Zukunft nachhaltig gestalten, 2013

RIXNER, Sepp – Praxistips für die Pflaster- und Verbundsteinverlegung, 1998

ROHLEDER, Michael- Horizontale Verschiebungen in Pflasterdecken und deren Visualisierung, 2002

ROSSBERG, Konrad – Dynamische Belastungsversuche an Pflasterkonstruktionen

RVS 03.08.63 – Oberbaubemessung, Bundesministerium für Verkehr, Österreich 2008

RVS 08.18.01 – Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen, Bundesministerium für Verkehr, Österreich 2009

Shackel, B. (1997). Water Penetration and structural Evaluations of Permeable Eco-Paving. Betonwerkund, Fertigteil-Technik BFT, Heft 3, 1997.Sonderdruck.

Shackel, B. and A. Pearson (NA).Permeable concrete eco-paving as best management practice in Australian urban road engineering, University of New South Wales, Concrete Masonry Association of Australia.

SMOLTCZYK, Ulrich – Grundbau – Taschenbuch, Teil 2: Geotechnisches Verfahren

TERZAGHI, Karl - Die Bodenmechanik in der Baupraxis, Wien 1961

TERZAGHI, Karl - Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Wien 1925

TL Pflaster-StB 06 Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen, Ausgabe 2006 (FGSV), FGSV-Verlag

Van Barneveld J .8."A Quality Management Strategy for New Zealand Pavement Construction".Proceedings New Zealand Roading Symposium.1987.

WICHTER, L. – Der richtige Aufbau von Pflaster 1996

WU, Wie – Filter und Filterregel, Universität für Bodenkultur, Wien 2007

ZIEMS, J.: Ein Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation TU Dresden, 1968.

ZTV Pflaster-StB 06 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen, Ausgabe 2006 – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV-Verlag

Bauberatung Zement, S 17, 1. 2002

БДС 13139:2004, Български институт за стандартизация 2004 г., София