

Dr. Sönke Borgwardt

**Versickerungsfähige
Verkehrsflächen**

Copyright © 2017

KGK Kluth GaLaBau Kompetenz GmbH

Waldstr. 118a, D - 44869 Bochum

Alle Rechte sind vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung und Übersetzung. Kein Teil darf in irgendeiner Art und Weise ohne schriftliche Genehmigung der KGK Kluth GaLaBau Kompetenz GmbH reproduziert werden.

Die Autorinnen und Autoren haben ihre Beiträge nach bestem Wissen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung erarbeitet. Sie sind für den Inhalt allein verantwortlich, können jedoch eine Gewähr für die Richtigkeit angesichts uneinheitlicher Ergebnisse in Forschung, Rechtsprechung und bei der Beurteilung des Standes der Technik in keiner Weise übernehmen.

KGK Kluth GaLaBau Kompetenz GmbH haftet nicht für den Inhalt der Beiträge, eingebetteten Anhänge, Verweise und Links.

Inhalt

1	Bedeutung	4
2	Verfahren	6
2.1	Schachtversickerung.....	6
2.2	Rohr- und Rigolenversickerung	6
2.3	Muldenversickerung.....	7
2.4	Flächenversickerung.....	8
2.5	Versickerung über durchlässig befestigte Verkehrsflächen.....	8
3	Rechtliche Grundlagen	9
4.1	Bemessungsregenspende und erforderliche Wasserdurchlässigkeit	12
4.2	Ergebnisse von Infiltrationsmessungen	16
4.2.1	Versickerungsleistung in Abhängigkeit zum Verfüllmaterial	20
4.2.4	Bewertung der Ergebnisse	30
4.3	Schutz von Boden und Grundwasser.....	32
4.4	Bauliche Anforderungen.....	34
4.4.1	Untergrund.....	35
4.4.2	Oberbau.....	36
4.4.3	Versickerungsfähige Pflasterdecke	39
4.5	Zusätzliche Entwässerungseinrichtungen	46
4.6	Zusammenfassende Empfehlungen für den Einsatz	47
4.7	Überwachung und Unterhaltung.....	49
4.8	Ausschreibungshinweise	51
5	Anhänge	54
5.1	Abbildungsverzeichnis	54
	Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.	Fehler!
	Textmarke nicht definiert.	
5.2	Tabellenverzeichnis	55
5.3	Literaturverzeichnis	56
6	Zur Person	60

1 Bedeutung

Die Versickerung von Niederschlagswasser stellt heute eine eingeführte Methode der technischen Entwässerung und der umweltgerechten Bewirtschaftung von Regenwasser dar. Neben der ordnungsgemäßen Dachentwässerung von Gebäuden kommt der Beseitigung des Oberflächenabflusses von Verkehrsflächen aufgrund des zunehmenden Anteiles an versiegelter Fläche und der einhergehenden Überlastung konventioneller Ableitungssysteme neben der technischen Notwendigkeit auch eine umweltpolitisch hohe Bedeutung zu.

Der Begriff der „*entwässerungstechnischen Versickerung*“ ist – als Gegensatz zur natürlichen Versickerung des Regenwassers – in der Bundesrepublik Deutschland durch das Arbeitsblatt A 138 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall [1] eingeführt. Gemeint ist die gezielte und bewußte Einleitung der Oberflächenabflüsse von befestigten Siedlungs- oder Verkehrsflächen in besonders für diese Zwecke geeignete und ausgebildete bodengebundene Anlagen oder in einen für diese Maßnahme funktional ausgerichteten Bereich. Hierdurch können Abflüsse gering oder nicht verschmutzten Niederschlagswassers dezentral am Entstehungsort vermieden, verringert oder gedrosselt werden. Sie stellt siedlungswasserwirtschaftlich neben der konventionellen Ableitung im Trenn- oder Mischwassersystem eine alternative Form der Bewirtschaftung von Regenwasser dar [2].

Darüber hinaus wird mit der entwässerungstechnischen Versickerung ein Verfahren zur ordnungsgemäßen Entwässerung von Erdbauwerken des Straßenbaues im Sinne der Richtlinien für die Anlagen von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew) [3] beschrieben. Dies sind Verkehrsflächenbefestigungen innerhalb und außerhalb geschlossener Ortslagen für fahrenden und ruhenden Verkehr bestimmter Bauklassen nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO) [4]. Unter einer „*ordnungsgemäßen*“ Entwässerung werden die in der RAS-Ew beschriebenen Maßnahmen zur Aufnahme, Weiterleitung und Beseitigung der „*zu erwartenden beeinträchtigenden Auswirkungen des an der Oberfläche anfallenden und im Boden vorhandenen Wassers auf die Benutzbarkeit und den Bestand der Straße*“ verstanden.

Mit einem modernen Regenwassermanagement kann den negativen Folgen entgegengewirkt und somit ein wichtiger ökologischer, aber auch wirtschaftlicher Beitrag geleistet werden. Der Grundgedanke besteht darin, Abflüsse am Entstehungsort oder in der näheren Umgebung zu vermeiden, zu verringern oder zumindest stark zu verzögern. Eine optimierte Regenwasserbehandlung bedeutet: kein Regenwasser oder aber nur eine stark reduzierte Restmenge in die Kanalisation abfließen zu lassen. Die Ziele und Effekte können unter anderem wie folgt umrissen werden (Abbildung 1):

- Minderung von Hochwasserabflüssen: Die schnelle Ableitung von Niederschlagswasser führt zu einer Erhöhung der Abflußspitzen. Dadurch ergeben sich höhere Kosten für den Ausbau von Regenrückhaltebauwerken.

- Entlastung der Kläranlagen: Durch die Ableitung von Regenwasser in die Mischwasserkanalisation wird das vergleichsweise saubere Regenwasser im Kanal mit dem Schmutzwasser verdünnt. Dadurch steigen die Abwassermengen und belasten so unnötig die Kläranlagen und deren Reinigungsleistung.
- Erhaltung der Grundwasserneubildung: Die Versiegelung großer Flächen in urbanen Gebieten wirkt der Grundwasserneubildung entgegen. Die Bereitstellung von sauberem Grundwasser wird dadurch erschwert.
- Verbesserung des Mikroklimas: Die Versickerung von Regenwasser am Ort der Entstehung trägt zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und zu einer Bodendurchfeuchtung bei. Die Staubbildung wird dadurch herabgesetzt.
- Einsparung von Kosten: Aufwendungen für Sanierung, Reparatur und Unterhaltung überlasteter Mischwasserkanalisationen und Investitionen für Regenwasserkanäle in Neubaugebieten sowie für Speicherbecken, Kläranlagenausbau und Gewässersanierung fallen in geringerem Umfang an.

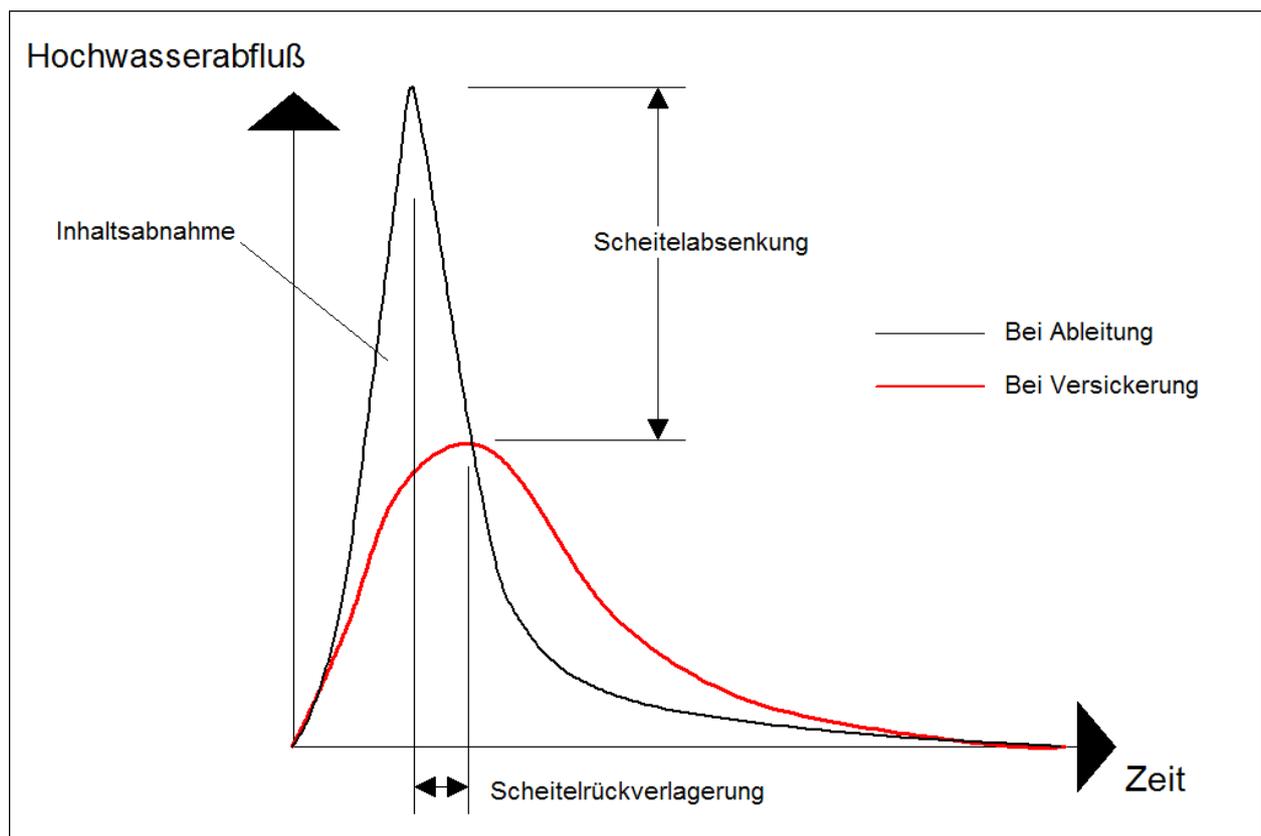


Abbildung 1: Wasserwirtschaftliche Effekte einer umweltgerechten Bewirtschaftung von Regenwasser

2 Verfahren

Die Verfahren der entwässerungstechnischen Versickerung unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten. Unterschieden werden daher zunächst zentrale Verfahren zur Entwässerung größerer Einzugsgebiete (z.B. Wohngebiete) und dezentrale Verfahren mit der Zuordnung einzelner kleinerer Abflußflächen zu separaten Versickerungsanlagen. Entscheidungskriterien für die Auswahl des geeigneten Anlagentyps sind:

- Versickerungseignung des Bodens,
- Platzangebot,
- Unterhaltungsaufwand,
- Kontrollierbarkeit,
- Lebensdauer und
- Herstellungsaufwand und Kosten.

Zu bevorzugen sind hierbei Anlagen, bei denen der Oberflächenabfluß durch die oberflächige Versickerung über begrünte und belebte Oberbodenschichten eine ausreichende Reinigung erfährt. Als zentrale Verfahren sind vor allem Versickerungsbecken seit langem bekannt.

Bei den dezentralen Verfahren werden vor allem unterschieden:

2.1 Schachtversickerung

Grundprinzip des Versickerungsschachtes ist es, das Niederschlagswasser einem unterirdischen Schacht zuzuleiten, es dort zu sammeln und es über die perforierten Wände und den offenen Schachtboden verzögert versickern zu lassen. Die Versickerungsleistung von Schächten läßt allerdings durch Fein- und Schwebstoffeinträge, zumindest am Schachtboden, nach einigen Jahren stark nach. Zudem sind Schächte aus Gründen des Grundwasserschutzes nur im Ausnahmefall zu betreiben.

2.2 Rohr- und Rigolenversickerung

Bei der Rohr- und Rigolenversickerung dienen kiesverfüllte Gräben oder in Kies gebettete perforierte Rohrstränge der Zwischenspeicherung, bevor das Niederschlagswasser allmählich in den Boden versickert. Da hier die belebte Oberbodenschicht durch dränendes Material ersetzt wird, wird die biologische Filterfunktion zur Aufnahme von Schadstoffen erheblich gemindert.

2.3 Muldenversickerung

In begrünten Versickerungsmulden kann der zulaufende Oberflächenabfluß kurzzeitig zwischengespeichert werden. Dies hat gegenüber der Flächenversickerung den Vorteil, daß dadurch der Platzbedarf wesentlich reduziert werden kann. Gerade im Zusammenhang mit der begleitenden Begrünung von Siedlungsflächen und Verkehrsräumen sind Versickerungsmulden leicht zu integrieren (Abbildung 2).



Abbildung 2: Versickerungsmulde

Möglich sind Kombinationen aus mehreren Verfahren. Hierbei kann mit den jeweils geeigneten Komponenten flexibel auf verschiedene Objektsituationen reagiert werden. Eine systematische Verbindung großräumiger Versickerungsanlagen stellt hierbei zum Beispiel das Mulden-Rigolen-System dar. Gerade bei größeren Bauobjekten mit zumeist sehr inhomogenen Untergründen besteht die Notwendigkeit, die höchste Versickerungsleistung bei geringstem Flächenverbrauch durch die Anwendung verschiedener miteinander verbundener Versickerungsanlagen zu erzielen. Wichtig ist hierbei vor allem die Erkenntnis, daß die Anwendung der entwässerungstechnischen Versickerung fast immer zum Erfolg führt. Selbst bei einer nur teilweisen Versickerung oder einer zeitweisen Rückhaltung kann durch die Drosselung der Einleitung eine Entlastung vorhandener Ableitungssysteme oder die kostengünstigere Entwässerung befestigter Flächen erreicht werden. Ziel ist es in jedem Fall, für jedes Objekt – unter Einbeziehung aller Möglichkeiten – das preiswerteste, leistungsfähigste und umweltgerechteste Entwässerungssystem zu finden. Dazu gehört auch das auf das notwendige Minimum begrenzte Einleiten in den Kanal.

2.4 Flächenversickerung

Unter Flächenversickerung versteht man die seitliche Entwässerung befestigter Flächen in Pflanz- oder Grünflächen bzw. die Entwässerung der auf versickerungsfähig ausgebildeten Oberflächenmaterialien auftreffenden Niederschläge. Eine zeitweilige Speicherung des Niederschlagswassers findet hierbei nicht statt. Die Versickerungsfähigkeit der Fläche muß der Intensität des Bemessungsregens entsprechen, die Anschlußfläche ist also mindestens ebenso groß wie die Versickerungsfläche. Dies bedeutet, daß der Platzbedarf für die Flächenversickerung sehr hoch ist.

2.5 Versickerung über durchlässig befestigte Verkehrsflächen

Die Versickerung über versickerungsfähig ausgebildete Befestigungssysteme stellt eine unterstützende Möglichkeit dar, das anfallende Niederschlagswasser temporär zwischen zu speichern, zum Teil – je nach Durchlässigkeit des Untergrundes – zu versickern und verzögert an weitere angeschlossene Versickerungsanlagen weiterzugeben.

Innerhalb des Gesamtkonzepts der umweltgerechten Bewirtschaftung von Regenwasser stellen versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsflächen folglich einen wesentlichen Baustein dar: *„Sie dienen somit der Abflußminderung und sind als flankierende Maßnahmen im Sinne einer guten Regenwasserbewirtschaftung zu begrüßen“* [1]. Diese Bauweisen sollten daher überall dort eingesetzt werden, wo dies technisch möglich und ökologisch unbedenklich ist. Die technischen Vorteile dieser Bauweisen liegen in einer Kombination aus Rückhaltung und Versickerung sowie aus einer gegebenenfalls gedrosselten Einleitung in das Kanalnetz oder weitere Versickerungseinrichtungen (Abbildung 3). Und das wird wie folgt realisiert:

- Aufnahme des Niederschlagswassers durch die versickerungsfähig ausgebildete Pflasterdecke.
- Zeitweise Rückhaltung des im Oberbau der Verkehrsfläche eingesickerten Wassers.
- Vollständige oder teilweise Versickerung unmittelbar in den Baugrund (Boden), je nach dessen Durchlässigkeit.
- Abführung von Regenmengen, die über der Bemessungsregenspende liegen (im Sinne eines „*Notüberlaufs*“) und Abführung von nicht in den Baugrund einsickernden Wassers in seitliche Entwässerungs- oder Versickerungsanlagen.

Voraussetzung für den sachgerechten Einbau von versickerungsfähigen Verkehrsflächenbefestigungen ist aber die fachgerechte Auseinandersetzung mit Einsatzgebiet, Bautechnik und Baustoff. Planer, Ausführende wie Baustofflieferanten müssen die grundlegenden technisch-kon-

strukturellen Anforderungen sowohl hinsichtlich der Tragfähigkeit und Standfestigkeit der Verkehrsfläche als auch in Hinblick auf die Versickerungsfähigkeit beachten. Nur so kann neben der dauerhaft gebrauchsfähigen und verkehrssicheren Fläche auch der Erfolg der Entsiegelung erzielt werden. Derzeitiger Stand der Technik hierfür sind die Ausführungen im *Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen – M VV* [5].



Abbildung 3: Versickerungsfähige Pflasterbeläge mit Überlauf in Versickerungsmulde

3 Rechtliche Grundlagen

Bei der Einleitung von Oberflächenabflüssen sind die wasserrechtlichen Bestimmungen des Bundes und der Länder zu beachten. Generell muß bei der Entsorgung von Niederschlagswasser die Gefährdung von Vegetation, Boden und Grundwasser ausgeschlossen werden. Eine wasserrechtliche Erlaubnis ist nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) immer dann erforderlich, wenn Niederschlagswasser über Anlagen zur Versickerung gezielt in den Untergrund abgeleitet wird. Folglich ist die Versickerung von Regenwasser über durchlässig befestigte Verkehrsflächen grundsätzlich erlaubnisfrei, da das Regenwasser hier ungesammelt und nicht zielgerichtet abläuft bzw. versickert [6]. Dies gilt jedoch nur, solange kein Oberflächenabfluß entsteht. Ist mit einem Abfluß

zu rechnen, greift für denjenigen Anteil des Niederschlagswassers, der abfließt, wiederum der im Abwasserabgabengesetz definierte Abwasserbegriff, das heißt eine entsprechende Abwasseranlage ist einzuplanen und genehmigen zu lassen.

Bei einem getrennten Bemessungsmaßstab für häuslichem Abwasser und Regenwasserabfluß (Abwasser-Splitting) kann die Versickerung finanziell gefördert werden. Während die Schmutzwasserbeseitigung am Trinkwasserverbrauch bemessen wird, richtet sich die Niederschlagswasserbeseitigung nach der Größe der befestigten Fläche. Versickerungsfähige Flächen und solche, die an eine Versickerungsanlage angeschlossen sind, brauchen nicht in die Gebührenerhebung einbezogen werden.

Aufgrund sehr unterschiedlich ausgestalteter Abwassersatzungen der einzelnen Kommunen sind häufig auch die Anerkennungsmodalitäten abweichend, wenn es um die Frage geht, was versickerungsfähiges Pflaster ist. Dies kann zu völlig unterschiedlichen Bewertungen ein und desselben Pflasterbelages in unterschiedlichen, manchmal in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden Kommunen führen. Ein Umstand, der durch mangelnde Aufklärung und fehlende Information begünstigt wird, aus bautechnischen und physikalischen Gründen allerdings nicht gerechtfertigt ist.

Zunächst einmal ist die Erkenntnis wichtig, daß ein versickerungsfähiges Pflastersystem allein noch keine versickerungsfähige Pflasterbauweise ausmacht. Ein Pflastersystem mit einer hohen Wasserdurchlässigkeit nützt nichts, wenn die darunter befindlichen Schichten des Oberbaues oder der Baugrund nicht ebenfalls die notwendige Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Im Gegenteil, eine solche Konstellation wäre höchst gefährlich, bildet sie doch beste Voraussetzungen für einen mehr oder weniger schnell eintretenden Totalschaden an der Flächenbefestigung. Auf keinen Fall darf ein Pflaster, sei es nun ein wasserdurchlässiges oder auch ein konventionelles, in der Bettung oder auf der Tragschicht „schwimmen“.

Grundsätzlich sollten versickerungsfähige Pflasterbauweisen als solche anerkannt werden, wenn sie nach dem anerkannten Stand der Technik hergestellt worden sind. Dies ist bei der Umsetzung des *Merkbblattes für versickerungsfähige Verkehrsflächen – M VV* grundsätzlich sichergestellt. Das bedeutet, daß neben der Hauptfunktion der Nutzbarkeit als *Verkehrsfläche* auch die Zusatzfunktion der *Aufnahme von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser und Einleitung in das Grundwasser* zuverlässig und dauerhaft erfüllt ist. Hierfür sind Nachweise hilfreich, daß hierfür einerseits geeignete Baustoffe verwendet worden sind, und daß andererseits die Befestigung fachgerecht ausgeführt worden ist.

Der Nachweis der Eignung des versickerungsfähigen Pflastersystems, also der Deckschicht der Befestigung, ist relativ einfach zu erbringen. Bei den neueren versickerungsfähigen Betonpflastersystemen ist bereits bei einem relativ geringen versickerungsfähigen Anteil der Fläche (Fugen und ggf. Sickeröffnungen) die erforderliche Wasserdurchlässigkeit des Pflastersystems gegeben. Hierzu müssen die Fugen und ggf. Sickeröffnungen mit geeigneten Gesteinskörnungen,

die eine hohe Wasserdurchlässigkeit zulassen, verfüllt werden. Die meisten Hersteller von versickerungsfähigen Betonpflastersystemen bieten aber auch Prüfzeugnisse für ihre Systeme an, die Auskunft über die erreichbare Wasserdurchlässigkeit geben.

4 Die Versickerung von Niederschlägen auf Verkehrsflächen

Da das an der Oberfläche anfallende Wasser von den konstruktiven Oberbauschichten verkehrsbelasteter Flächen aufgenommen werden muß, wird beim Einsatz versickerungsfähiger Pflastersysteme vom traditionellen Grundsatz des Straßenbaues, alles anfallende Wasser von der tragenden Konstruktion fernzuhalten, abgewichen. Zwar gelten auch sämtliche konventionellen Pflasterbauweisen von je her als teildurchlässig, es ist aber bei versickerungsfähigen Bauweisen dem gezielten und vermehrten Zuführen von Sickerwasser bei der Planung und Ausführung Rechnung zu tragen.

Um einer Beeinträchtigung der Standsicherheit unter Einfluß von Wasser entgegenwirken zu können, muß die Verkehrsbelastung begrenzt werden. Zum anderen müssen die konstruktiven Merkmale hinsichtlich der Dimensionierung und der Auswahl der Mineralstoffgemische so festgelegt werden, daß über eine ausreichend lange Betriebsdauer gleichzeitig eine hohe Versickerungsfähigkeit bei dauerhaft tragfähiger Verkehrsfläche gewährleistet ist. Bei versickerungsfähig ausgebildeten Befestigungen ist hinsichtlich des bautechnischen Einsatzes das 1998 erstmals erschienene *Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen* [7] und 2013 überarbeitete *Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen* [5] zu beachten. Darin werden vor allem folgende Inhalte behandelt:

- Einsatzgrenzen im Hinblick auf die Verkehrsbelastung und den Schutz von Boden und Grundwasser.
- Bautechnische Anforderungen an Untergrund, Unterbau, Tragschichten und Entwässerungsmaßnahmen.
- Anwendungskriterien für versickerungsfähig ausgebildete Deckschichten.
- Durchführung von Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen.
- Unterhaltung derartiger Verkehrsflächen im Laufe der Nutzungsdauer.

Hinsichtlich weitergehender Entwässerungsfragen gelten zusätzlich die Hinweise der RAS-Ew und des DWA-Arbeitsblattes A 138.

Für die Anwendung versickerungsfähiger Pflastersysteme sind somit zwei zentrale Fragen zu beantworten:

1. Wo können diese Systeme eingesetzt werden; das heißt, welche Voraussetzungen sind zu erfüllen und wo liegen die Grenzen?
2. Wenn versickerungsfähig gebaut werden kann, wie werden diese Systeme eingesetzt; das heißt, wie sehen konstruktive Lösungen aus, um dauerhaft eine verkehrssichere Befestigung mit dem Zusatznutzen „versickerungsfähig“ ausbilden zu können?

4.1 Bemessungsregenspende und erforderliche Wasserdurchlässigkeit

Die Eingangsgröße zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit versickerungsfähiger Verkehrsflächen ist der auf die befestigte Fläche auftreffende Niederschlag. Der maßgebliche Bemessungsregen ist nach dem DWA-Arbeitsblatt A 138 mit Hilfe einfacher Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung statistischer Niederschlagsdaten oder aufgrund von Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes [8] – den KOSTRA-Daten – zu ermitteln. Dabei wird die Bemessungsregenspende $r_{10(0,2)}$ zugrunde gelegt. Sie bezeichnet einen statistisch einmal in fünf Jahren auftretenden Regen bei einer Regendauer von 10 Minuten. Diese Regenspende muß durch eine versickerungsfähig befestigte Verkehrsfläche dauerhaft und vollständig versickern, um eine ordnungsgemäße Entwässerung gewährleisten zu können [5].

Die maßgebende Bemessungsregenspende beträgt für versickerungsfähige Verkehrsflächenbefestigungen grundsätzlich mindestens $270 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$. Örtlich können höhere Regenereignisse auftreten, die dann aufgrund vorliegender Daten zugrunde zu legen sind. Eine ordnungsgemäße Entwässerung der Verkehrsfläche kann grundsätzlich zunächst einmal nur erfolgen, wenn das anfallende Regenwasser vollständig abgeführt wird.

Um die maßgebliche Regenspende versickern zu können, müssen der Oberbau – zu dem auch die versickerungsfähige Pflasterdecke gehört – und der Untergrund eine entsprechend hohe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Im theoretischen Zustand eines wassergesättigten Befestigungsaufbaues würde man den erforderlichen Durchlässigkeitsbeiwert der Bemessungsregenspende gleichsetzen können. Da sich ein Befestigungsaufbau in der Örtlichkeit aber stets im wasserungesättigten Zustand befindet, gilt nach empirischen Beobachtungen $k_{f,u} \approx k_f/2$. Das bedeutet, daß der für den Befestigungsaufbau in der Praxis erforderliche Durchlässigkeitsbeiwert doppelt so hoch sein muß wie der theoretisch ermittelte Beiwert. Ausgehend von einer maßgeblichen Regenspende von $r_{10(0,2)} = 270 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$ (entspricht rechnerisch $2,7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) muß also ein Durchlässigkeitsbeiwert von mindestens $k_f = 2 \times (2,7 \times 10^{-5}) = 5,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ vorausgesetzt werden.

Da aber nun der Oberflächenabfluß ausschließlich über die Fugen oder das Haufwerk der versickerungsfähigen Pflastersteine aufgenommen werden kann und das Porensystem des Fugenmaterials oder des Haufwerks dem umwelt- und nutzungsbedingten Einfluß durch Eintrag von mineralischen und organischen Feinanteilen unterliegt, ist von einer Abnahme der Wasserdurchlässigkeit der Pflasterdecke auszugehen.

Die Versickerungsleistung von versickerungsfähigen Verkehrsflächen ist in zahlreichen Untersuchungen aufgrund von Labor- und Feldversuchen charakterisiert worden. Neben der jeweiligen produkt- oder objektspezifischen Leistungsfähigkeit einzelner Baustoffe oder Untersuchungsflächen ist im Zusammenhang mit der anforderungsgerechten Planung, der bautechnischen Beurteilung und der rationellen Unterhaltung solcher Flächen vor allem die Abhängigkeit der versickerbaren Regenspende von verschiedenen Faktoren aufschlußreich.

Es zeigt sich, daß das Infiltrationsvermögen versickerungsfähig ausgebildeter Verkehrsflächen im wesentlichen von der Versickerungsleistung der Oberfläche abhängt. Diese ist wiederum abhängig von der Art der Deckschicht – nämlich vom Öffnungsanteil, der über Poren, Fugen und Sickeröffnungen bereitgestellt wird. Bei Pflaster und Plattenbelägen besteht zusätzlich ein Einfluß von der Durchlässigkeit des für die Verfüllung von Fugen und Sickeröffnungen verwendeten Mineralstoffgemisches.

Weiter besteht bei allen versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen eine Beziehung zwischen der Infiltration und dem Einbualter, das heißt eine Abhängigkeit vom Ausmaß des Eintrages von mineralischen und organischen Feinanteilen. Ein Einfluß der unter der Deckschicht liegenden konstruktiven Schichten auf die Versickerungsleistung kann nach [9] und [10] nicht festgestellt werden. Dieser könnte nur vorliegen, wenn es während des Regenereignisses zu einer Sättigung kommen würde. Dies kommt bei anforderungsgerecht ausgebildeten Tragschichten unter Praxisbedingungen nicht vor [11], [12].

Häufig wird die Leistungsfähigkeit verschiedener Produkte zur Befestigung versickerungsfähig ausgebildeter Verkehrsflächen am Öffnungsanteil, das heißt am Anteil der durchlässigen Fläche, gemessen. Hierbei wird ein theoretisch-mathematischer Rückschluß zwischen der zu erwartenden Durchlässigkeit des einzusetzenden Mineralstoffgemisches für die Verfüllung der Öffnungen und dem Öffnungsanteil gezogen. Diese theoretischen Werte haben in der Praxis wenig Aussagekraft. Die Durchlässigkeit von Mineralstoffgemischen ist trotz relativ eindeutiger Anforderungen in den entsprechenden Technischen Lieferbedingungen im Straßenbau [13], [14], [15] regional äußerst unterschiedlich. Darüber hinaus wirken bei Lieferung und Einbau vielfältige und komplexe Einflußfaktoren auf die Wasserdurchlässigkeit, so daß zwischen theoretischen Richtwerten und auch im Labor durchgeführten Eignungsuntersuchungen auf der einen Seite und Felduntersuchungen im eingebauten Zustand auf der anderen Seite stark unterschiedliche Ergebnisse auftreten können.

Während sich im Neuzustand bei bekannter Durchlässigkeit der zur Verfüllung eingesetzten Baustoffe noch ein gewisser Zusammenhang herstellen läßt, bestätigen weitere Untersuchungen die von [9] und [10] getroffene Feststellung, daß im gealterten Zustand der Zusammenhang zwischen Öffnungsanteil und Versickerungsleistung nicht mehr besteht. Ein hoher Öffnungsanteil kann sich hiernach nur positiv auf die Versickerungsleistung auswirken, wenn gleichzeitig der Anteil an Feinteilen im Mineralstoffgemisch gering ist. Liegt ein höherer Feinanteil vor – was im Laufe der Gebrauchsdauer in zunehmendem Maße regelmäßig der Fall ist, ist die Durchlässigkeit

der Öffnungen gering und damit auch die Versickerungsfähigkeit der gesamten Fläche, unabhängig vom Öffnungsanteil. Abbildung 4 zeigt, daß bei Infiltrationsmessungen im Neuzustand Infiltrationsleistung und Durchlässigkeit mit steigendem Öffnungsanteil zunimmt. Im gealterten Zustand ist der Zusammenhang zwischen Infiltrationsleistung und Öffnungsanteil nicht mehr eindeutig herstellbar.

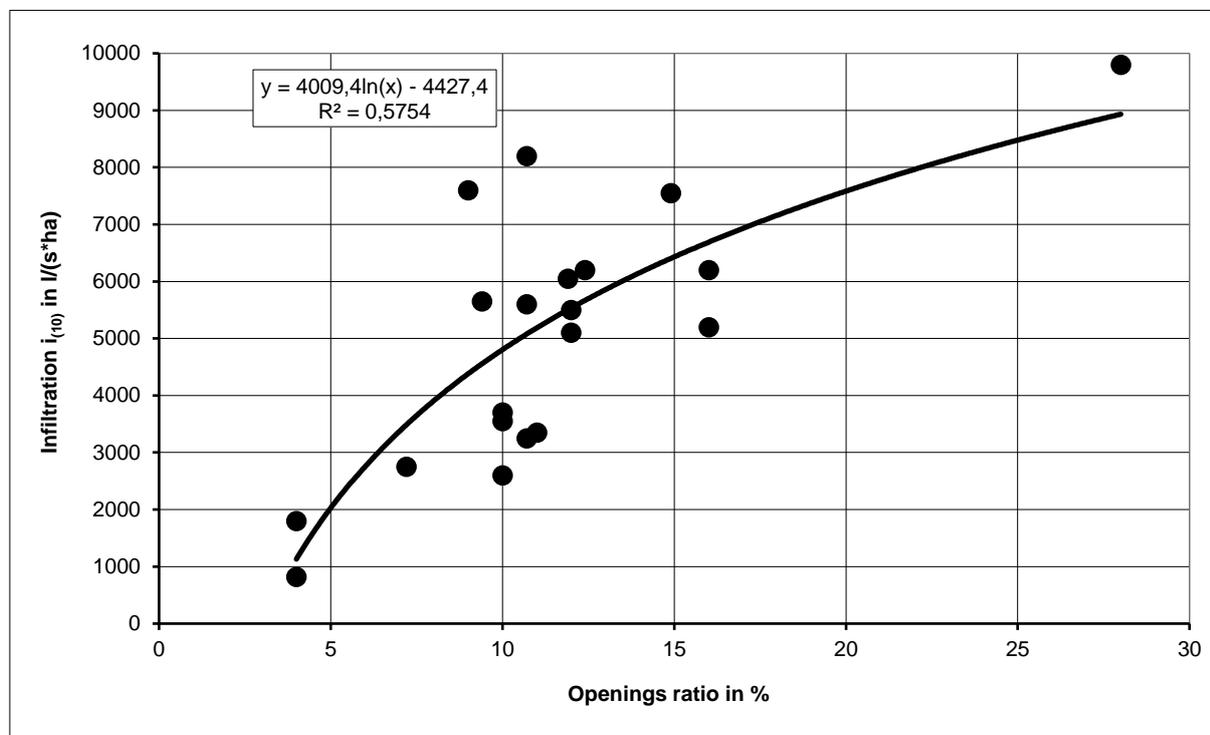


Abbildung 4: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum Öffnungsanteil im Neuzustand

Im Neuzustand ist die Versickerungsleistung natürlich zunächst einmal abhängig von der Durchlässigkeit der zur Verfüllung der Fugen und Öffnungen verwendeten Mineralstoffgemische [16], [17]. Diese Durchlässigkeit hängt vom Anteil abschlämmbarer Bestandteile im Ausgangsmaterial ab [9]. Dieser darf nach TL Gestein-StB je nach Körnung nicht mehr als 3 bzw. 4 Massen-% betragen. In der Praxis zeigt sich allerdings, daß dieser Anteil häufig überschritten wird.

Die Qualität dieses Ausgangsmaterials entscheidet aber über die Höhe der im Neuzustand versickerbaren Regenspende und – eine empirische Gesetzmäßigkeit der Abnahme der Versickerungsfähigkeit nach den oben genannten Kriterien vorausgesetzt – auch über die Entwässerungsleistung der befestigten Fläche über den gesamten Gebrauchszustand hinweg. Anders ausgedrückt, um die vom M VV geforderte Bemessungsregenspende $r_{(10)0,2}$ über den gesamten Nutzungszeitraum einer Verkehrsfläche aufnehmen zu können, muß das einzusetzende Mineralstoffgemisch zur Verfüllung der Fugen und Öffnungen, genauso wie die Poren bei haufwerksporigen Betonsteinen, Dränasphalt oder Dränbeton, von vornherein eine entsprechend hohe Durchlässigkeit aufweisen. Damit hat man zumindest für optimale Einbaubedingungen gesorgt. Da aber die Durchlässigkeit dieser Mineralstoffgemische durch Umwelt- und Nutzungseinflüsse zeitlich einer Veränderung unterliegt und diese Einflüsse sehr diffus und komplex sein können,

kann die zukünftige Entwicklung der Versickerungsleistung einer Verkehrsfläche derzeit nur prognostiziert werden. Daher scheint die Forderung nach einer ordnungsgemäßen Entwässerung für dauerhaft eventuell auftretende Oberflächenabflüsse nach jetzigem Kenntnisstand gerechtfertigt.

Der Einfluß der Alterung ist hierbei eindeutig. Durch den umwelt- und nutzungsbedingten Eintrag von mineralischen und organischen Feinteilen in Poren und in die für die Fugen und Sickeröffnungen eingesetzten Mineralstoffgemische kommt es im Laufe der Gebrauchsdauer einer Verkehrsfläche unabhängig von Lage und Ausbildung des Objekts zu einer signifikanten Abnahme der Versickerungsleistung (Abbildung 5). Hierbei kann nach Untersuchungen verschiedener Autoren von einer Abnahme der Wasserdurchlässigkeit auf 25 bis 10 % der Ausgangsleistung im Neuzustand in den ersten Betriebsjahren ausgegangen werden. Dieser Prozeß ist bei Pflasterflächen mit konventionellen Fugenbreiten bereits nach einem Einbualter von etwa zwei bis drei Jahren erreicht [9], [18]. Er verzögert sich beim Einsatz grobkörnigerer Mineralstoffe (zum Beispiel Splitt 2/5 mm) und gleichzeitig größerem Öffnungsanteil, wobei aber auch hier die Endleistung im wesentlichen nach drei bis fünf Jahren erreicht ist [9].

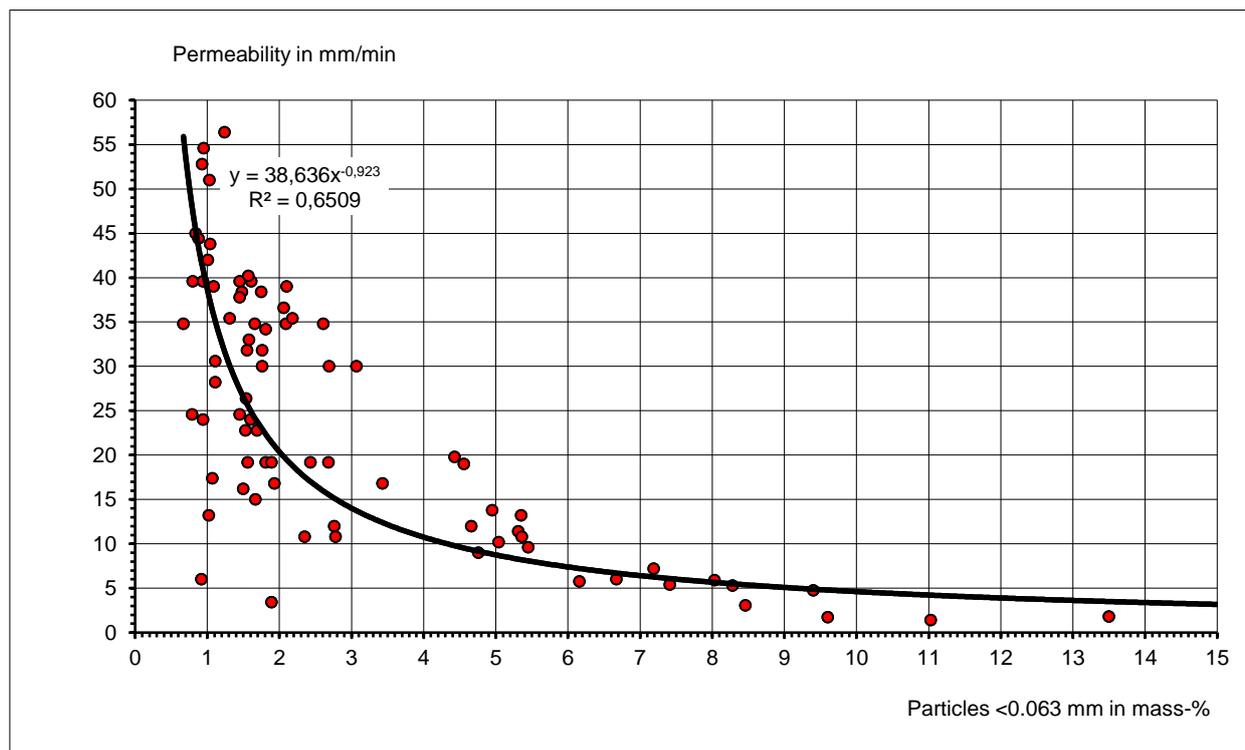


Abbildung 5: Korrelation zwischen Durchlässigkeit und Feinanteilen in Fugenmaterialien

Somit liegen bodenphysikalische Mechanismen vor, die im Laufe der Standzeit zu einer irreversiblen Verringerung der Durchlässigkeiten von Pflasterfugen unabhängig von der standörtlichen Lage, der Verkehrsbelastung und des Öffnungsanteiles führen. Zu diesen Ergebnissen kommen auch [9] und [10] bei konventionellen Pflasterflächen, [18], [19], [20] bei Rasengittersteinen [21] bei Dränasphalt sowie [17], [22], [23], [24], [25], [26], [27] bei versickerungsfähig ausgebildeten Pflasterflächen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die entscheidende Größe zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsfläche die im Nutzungszeitraum abnehmende Durchlässigkeit der Oberfläche ist. Diese ist unabhängig von Lage, Nutzung und Ausführung der Verkehrsfläche. Bei der dauerhaften Durchlässigkeit handelt es sich nicht um eine Konstante – im Gegensatz beispielsweise zum Verformungswiderstand einer Trag-schicht oder zur Druckfestigkeit eines Pflastersteines – und ein zuverlässiger Wert hinsichtlich der aufnehmbaren Regenspende kann nicht gegeben werden. Daher ist die Berücksichtigung der versickerungsfähigen Verkehrsfläche als abflußminderndes Element eher gerechtfertigt, denn als eigentliche Entwässerungsanlage.

Obwohl es in der Praxis auch langjährig bewährte Objekte ohne erkennbaren Oberflächenabfluß gibt, kann derzeit nicht ausgeschlossen werden, daß irgendwann im Laufe der Nutzungsdauer ein solcher Abfluß entsteht. Zumal, wie bereits dargelegt, wenn die Versickerungsleistung nicht von der Art der Deckschicht, sondern von der Qualität des verwendeten Baustoffes und der Qualität der Ausführung abhängt. Daß einige Flächen (noch) auch ohne angeschlossene Entwässerung funktionieren, liegt eher an dem seltenen Fall eines sehr durchlässigen Untergrundes, dem diffusen oder nicht erkennbaren Abfluß in benachbarte Fläche ohne deren Beeinträchtigung oder an doch vorhandenen aber nicht so deklarierten Notüberläufen – und das alles bei hervorragender Ausführung der Flächen. Leider zeigt die Praxis aber auch, daß versickerungsfähig ausgebildete Flächen existieren, die ohne zusätzliche Entwässerung nicht funktionieren oder funktionieren würden. Im Lichte einer ordnungsgemäßen Entwässerung zum Schutz der Verkehrsfläche selbst und von anliegenden Gebäuden oder Nutzungen muß darauf hingewiesen werden, daß nur die Anlage einer zusätzlichen Entwässerungseinrichtung, die diesen eventuell anfallenden Oberflächenabfluß aufnimmt, dem Stand der Technik entspricht.

Es stellt sich aber trotzdem die Frage, wie leistungsfähig sind versickerungsfähige Verkehrsflächen, wenn sie nach den Anforderungen des M VV ausgebildet werden, welche absoluten Werte für die aufnehmbare Regenspende können in Neuzustand und im gealterten Zustand erreicht werden und in wie weit ist der hier geforderte Abflußbeiwert von $\psi = 0,3$ bis $0,5$ gerechtfertigt? Die neuesten Ergebnisse zur Beantwortung dieser Fragen werden aufgrund eigener Untersuchungen im folgenden Abschnitt dargelegt.

4.2 Ergebnisse von Infiltrationsmessungen

Um die Versickerungsfähigkeit realitätsnah an ungestörten Standorten unter Einbezug der örtlichen Gegebenheiten wie Alterung und Belastung durchführen zu können, wird für die Infiltrationsmessungen ein für diesen Einsatz konstruiertes Infiltrationsgerät eingesetzt. So ist es möglich, Verkehrsflächen verschiedener Ausführung und Nutzung in jedem Alterszustand zu untersuchen. Diese Methode kann also für die Eigenüberwachung von Baustoffen für Deckschichten

und Mineralstoffen für Tragschichten wie auch für die Kontrollprüfung auf der Baustelle im eingebauten und anforderungsgerecht verdichteten Probemaßstab oder an der fertigen Fläche jederzeit durchgeführt werden (Abbildung 6). Bei der mehrjährigen Beobachtung von versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen erhält man somit zuverlässige Daten über das langfristige Verhalten im Gebrauchszustand und wertvolle Hinweise zu der Abhängigkeit der Versickerungsleistung zu Kriterien, wie Baustoffverwendung und Ausführung. Schließlich können aus der Bewertung dieser Ergebnisse Empfehlungen für die zukünftige Ausführung derartiger Flächen gegeben werden.

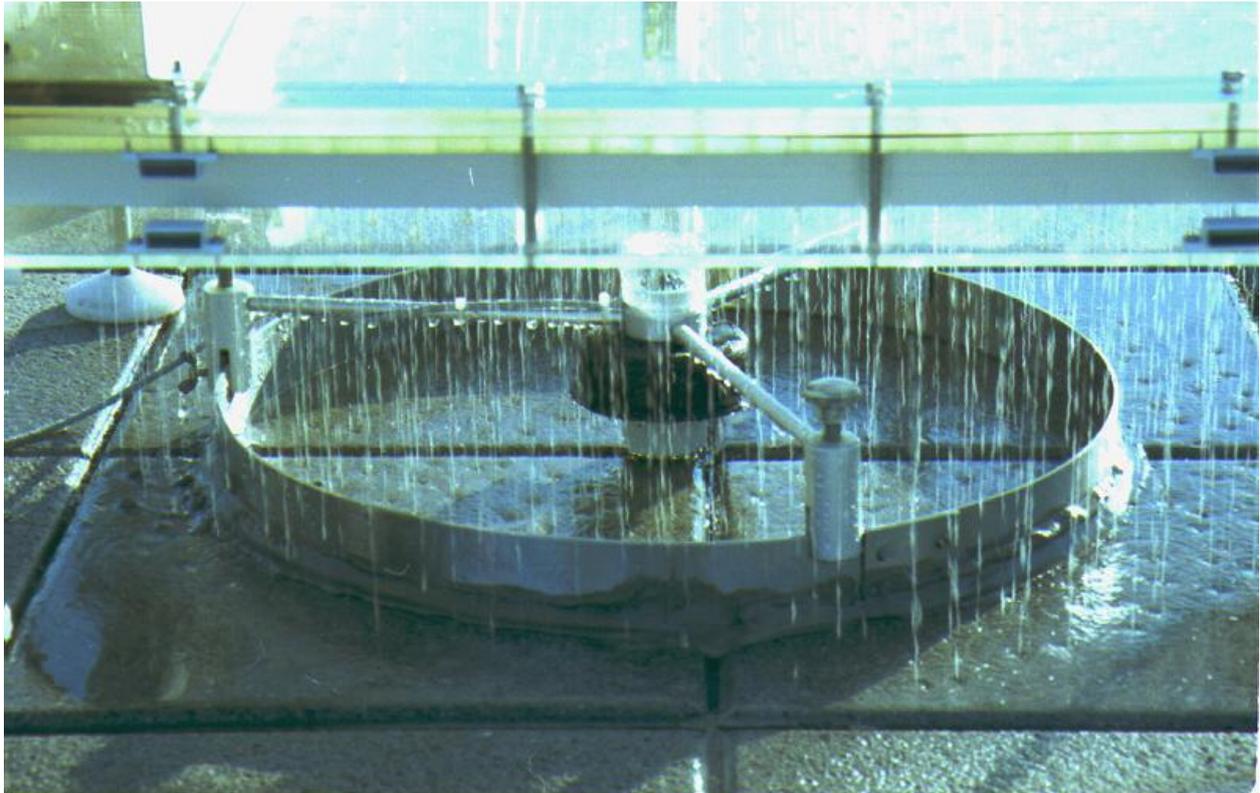


Abbildung 6: Infiltrationsgerät

Das eingesetzte Infiltrationsgerät dient der Ermittlung der Infiltrationsrate im Feldversuch in Anlehnung an DIN 19 682 Blatt 7 für die Überprüfung der Versickerungsfähigkeit in Eigen- und Fremdüberwachung nach dem M VV. Es entspricht den Anforderungen des genannten Merkblattes und den Anforderungen an Prüfgeräte nach DIN 45011 für die Güteüberwachung und Zertifizierung von versickerungsfähigen Flächenbefestigungen im Straßenbau.

Bei diesem Versuchsaufbau wird eine abgedichtete Untersuchungsfläche von ca. 0,25 m² gleichmäßig mit einem Modellregen konstanter Intensität beregnet. Die Intensität der Beregnung ist so gewählt, daß gerade kein Oberflächenabfluß entsteht, um einen in der Natur nicht auftretenden vertikalen Wasserdruck zu vermeiden. Dies wird dadurch erreicht, daß der Zulauf über einen Schwimmerschalter in der Untersuchungsfläche auf einen Aufstau von wenigen Millimetern begrenzt wird. Eine laterale Bewegung des infiltrierten Wassers wird durch die zusätzliche Beregnung außerhalb der Untersuchungsfläche verhindert (Prinzip des Doppelringinfiltrimeters). Die

Versickerungsintensität wird vollautomatisch über die Wasserzulaufmenge mittels eines Durchflußmessers registriert, von einem Mikrocontroller in Echtzeit erfaßt und in einem Speichermedium aufgezeichnet. So kann zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Versickerungsleistung abgelesen werden. Die Auswertung erfolgt später in einem Rechner bequem über Tabellenkalkulationsprogramme. Die Infiltrationsrate als versickerte Menge pro Zeit ergibt sich aus der Regelung des Zuflusses in Abhängigkeit zur Veränderung der Wasserfilmdicke auf der Untersuchungsfläche. Das Gerät kann im Akku- oder Strombetrieb entweder mit Frischwasseranschluß oder unabhängig von einem lokalen Wasseranschluß im Pumpenbetrieb betrieben werden. Der Meßbereich reicht hierbei von 0 bis ca. 6.000 l/(s×ha) bzw. mit einem entsprechenden Erweiterungsgerät bis über 10.000 l/(s×ha).

Die Ganglinien der Infiltration werden bei einer maximal einstündigen Beregnung als Regressionskurven der gemittelten Infiltrationswerte aus mindestens drei Einzelmessungen in [mm/min] und als aufnehmbare Regenspende in [l/(s×ha)] dargestellt. Sie zeigen in ihrem charakteristischen Verlauf einen hohen Anfangswert, der mit zunehmender Sättigung nach 10 bis 30 Minuten abfällt und sich schließlich asymptotisch einem konstanten Endwert nähert. Die Untersuchungsergebnisse werden anhand der Ganglinie der Infiltration und den Kennwerten $i_{(10)}$ und $i_{(60)}$ interpretiert. Der Wert der Infiltrationsrate $i_{(10)}$ nach 10-minütiger Beregnung wird als versickerbare Regenmenge mit der Regenspende $r_{(10)}$ in [l/(s×ha)] gleichgesetzt. Der Endwert $i_{(60)}$ nach 60 Minuten Messung entspricht der Versickerungsintensität im wassergesättigten Zustand und kann daher als Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,u}$ in [m/s] der Gesamtfläche interpretiert werden (Abbildung 7). Für die Ermittlung des k_f -Wertes des Verfüllmaterials muß der Fugenanteil bekannt sein. Wird keine weitere Abnahme der Infiltration festgestellt, kann die Messung bereits zu einem früheren Zeitpunkt beendet werden.

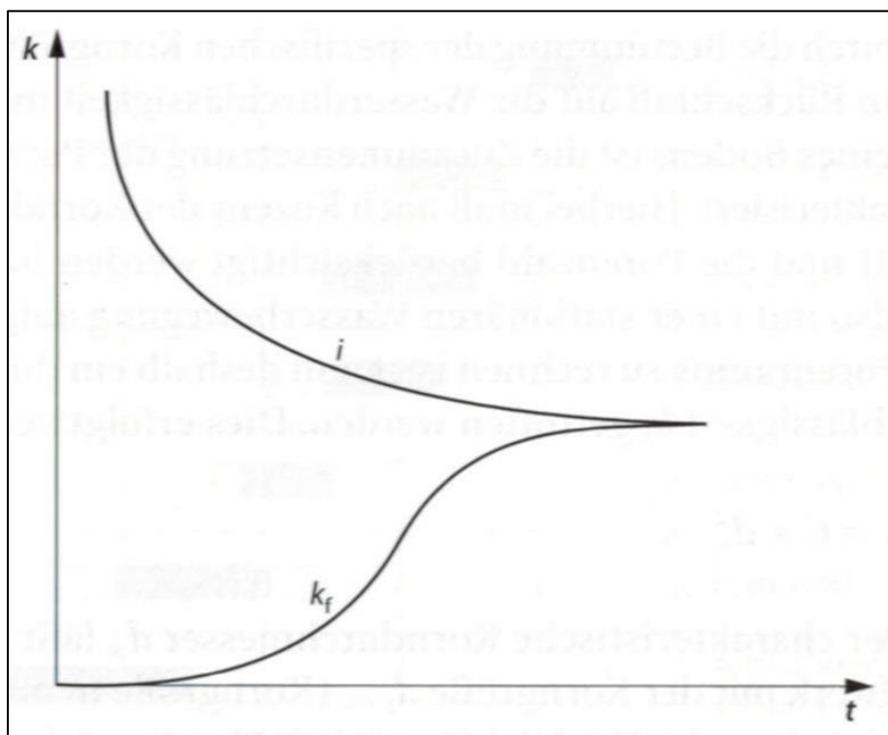


Abbildung 7: Schematischer Verlauf von i und k_f während des Infiltrationsvorgangs

Im folgenden kann nun aufgrund langjähriger Infiltrationsversuche mit dem Infiltrationsgerät an zahlreichen ausgeführten Verkehrsflächen für versickerungsfähige Pflastersysteme praxisnah festgestellt werden, in wie weit das Infiltrationsvermögen in Abhängigkeit zur Verfüllung der Poren, Fugen und Sickeröffnungen und zur Abnahme der Versickerungsfähigkeit im Laufe der Gebrauchsdauer über Leistungsfähigkeit und Einsatzgebiet entscheidet und welche Bedingungen für Baustoffproduzenten, Ausschreibende und Auftragnehmer bei Auswahl der Baustoffe und Herstellung der Flächen zu beachten sind. Die hier aufgeführten Untersuchungen sind als Fortschreibung der in [9], [17], [28] und [29] veröffentlichten Ergebnisse zu verstehen und können deshalb aufgrund weiter entwickelter Erkenntnisse hiervon abweichen.

Bei den durchgeführten Infiltrationsmessungen an versickerungsfähigen Pflastersystemen werden verschiedene Verkehrsflächen aus Pflaster mit aufgeweiteten Fugen („*Splittfuge*“), Pflaster mit Sickeröffnungen, Pflaster aus haufwerksporigem Beton und im Vergleich dazu konventionelle Pflasterflächen untersucht. Weiter werden auch begrünte Pflasterbeläge untersucht, und zwar Pflaster mit aufgeweiteter „*Rasenfuge*“ sowie begrünte Sickeröffnungen (hierunter fallen auch Rasenkammersteine). Hierbei wird bei der Fülle der unterschiedlichen Produkte eine weitere Gruppierung nach vergleichbarer Verfüllung der Öffnungen und verschiedenen Altersstufen – soweit nicht das tatsächliche Einbaualter analysiert wird – vorgenommen. Aufgrund der Beobachtung, daß im gealterten Zustand der Anteil der durchlässigen Fläche relativ unabhängig von der Versickerungsleistung der Pflasterfläche ist, können somit auch verschiedene Produkte mit verschiedenen Formaten und Öffnungsanteilen miteinander verglichen werden. Da nach den vorliegenden Forschungsergebnissen auch eine Beziehung zur Verkehrsbelastung signifikant nicht herstellbar ist, wird diese außer acht gelassen. Beispielhafte Einzelbetrachtungen ausgewählter Produkte ergänzen die Untersuchung.

Wie oben bereits dargelegt wurde, ist der wesentliche Einfluß auf die Versickerungsleistung eines bestimmten Objekts in der Auswahl der Baustoffe und der Güte der Bauausführung zu sehen. Da es sich bei den Untersuchungsflächen fast ausschließlich um ausgeführte Flächen im Verkehrsraum handelt, weichen somit auch die einzelnen Bedingungen im Einzelfall voneinander ab. Darum muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß trotz der großen Zahl an untersuchten Flächen aufgrund der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Pflastersysteme und der relativ kleinen Stichproben in einzelnen Gruppen die vorgestellten Ergebnisse lediglich einen Trend hinsichtlich der Versickerungsleistungen und deren Abhängigkeit zu verschiedenen Parametern darstellen können. Aufgrund der Streuung der Ergebnisse werden aus den zahlreichen untersuchten Standorten jeweils die Versuchsflächen herausgesucht, die aus der Gesamtheit der Standorte am nächsten am arithmetischen Mittel liegen, um einen relativ repräsentativen Durchschnitt zu erhalten. Entscheidend ist bei jeder Baumaßnahme immer die begleitende Überwachung von Baustoffen und Baustelle.

4.2.1 Versickerungsleistung in Abhängigkeit zum Verfüllmaterial

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Versickerungsleistung von der Durchlässigkeit des für die Verfüllung verwendeten Mineralstoffgemisches werden die Ergebnisse von Infiltrationsmessungen für Pflasterbeläge mit Sickeröffnungen und Pflaster mit aufgeweiteter Splittfuge zusammen ausgewertet. Der Stichprobenumfang besteht hierbei aus 50 Untersuchungsflächen. Es wird bei dieser Analyse deutlich, daß die Körnung und damit die Durchlässigkeit der Verfüllung in direktem Zusammenhang mit der Versickerungsleistung der Pflasterfläche stehen.

Betrachtet man Mineralstoffgemische mit relativ ähnlicher Sieblinie, erkennt man zunächst einmal, daß grobkörnigere Baustoffe – unter der Voraussetzung, daß sie den Anforderungen der TL Gestein-StB vor allem in Hinblick auf den zulässigen Anteil an abschlämmbaren Bestandteilen entsprechen – eine weitaus höhere Infiltrationsleistung aufweisen. Bei den untersuchten Pflasterflächen kann bei der Verfüllung der Fugen und Sickeröffnungen mit Splitt der Körnung 2/5 mm im Neuzustand wie im gealterten Zustand die höchste Versickerung erzielt werden (Abbildung 8). Es folgen Splitte der Körnung 1/3 mm, Brechsand-Splitt-Gemische 0/5 mm und letztendlich Sande 0/2 mm.

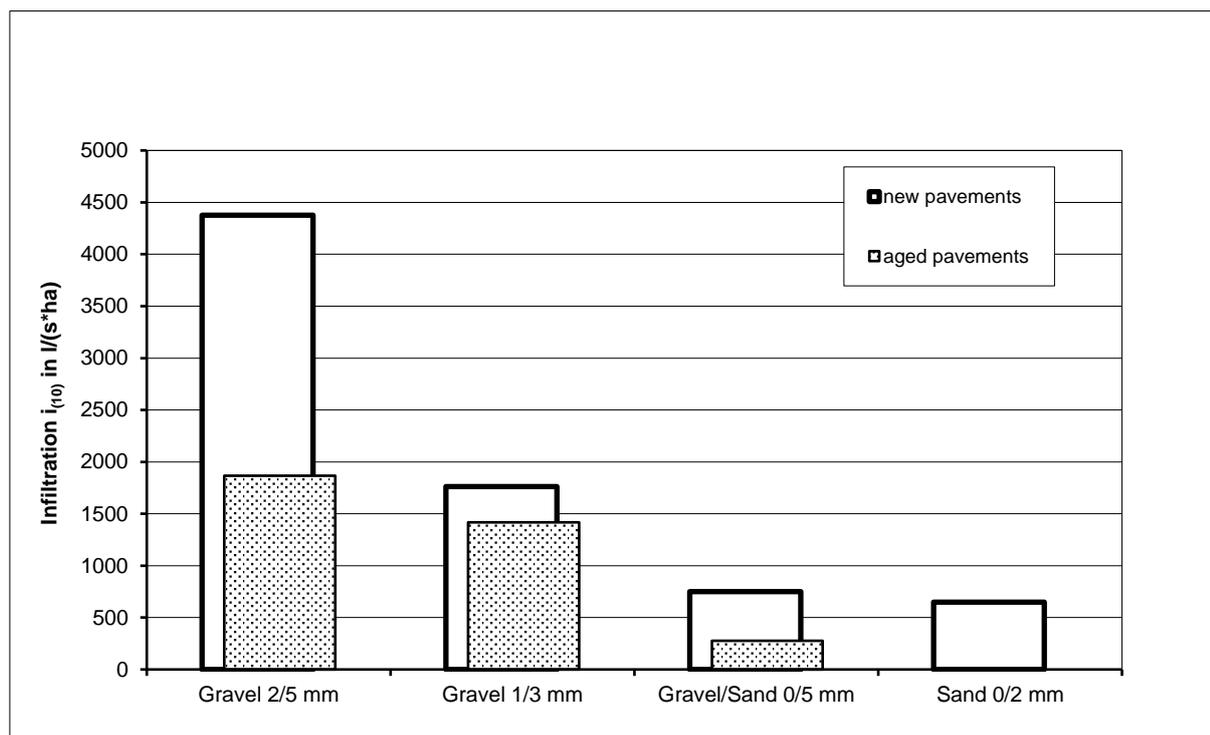


Abbildung 8: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum Verfüllmaterial von Fugen und Sickeröffnungen

Betrachtet man die absoluten Werte für die versickerbare Regenspende, kann bei einem durchschnittlichen Öffnungsanteil der untersuchten Pflasterbeläge von 12,0 % zumindest mit den verwendeten Splitten 2/5 und 1/3 mm eine Versickerungsleistung erzielt werden, die weit über den Bemessungskriterien des M VV liegt. Im gealterten Zustand wird offensichtlich, daß Brechsand-Splitt-Gemische 0/5 und Sande 0/2 mm aufgrund der feinen Bestandteile häufig nicht für den Einsatz bei versickerungsfähigen Pflaster und Plattenbelägen geeignet sind.

4.2.2 Versickerungsleistung in Abhängigkeit zum Einbualter

Bei der Betrachtung der Infiltrationsleistung versickerungsfähig ausgebildeter Verkehrsflächen in Abhängigkeit zum Einbualter, bestätigt sich die Abnahme der Versickerungsfähigkeit aufgrund des Eintrages von mineralischen und organischen Feinteilen. Diese Abnahme erfolgt bei einem Stichprobenumfang von 80 untersuchten Flächen vom Einbauzustand bis zu einer Gebrauchsdauer von sieben Jahren auf ungefähr 20 % der Ausgangsleistung (Abbildung 9). Es ist hierbei nicht zu erwarten, daß es im Zuge der weiteren Alterung zu einer weiteren Abnahme in größerem Maße kommt.

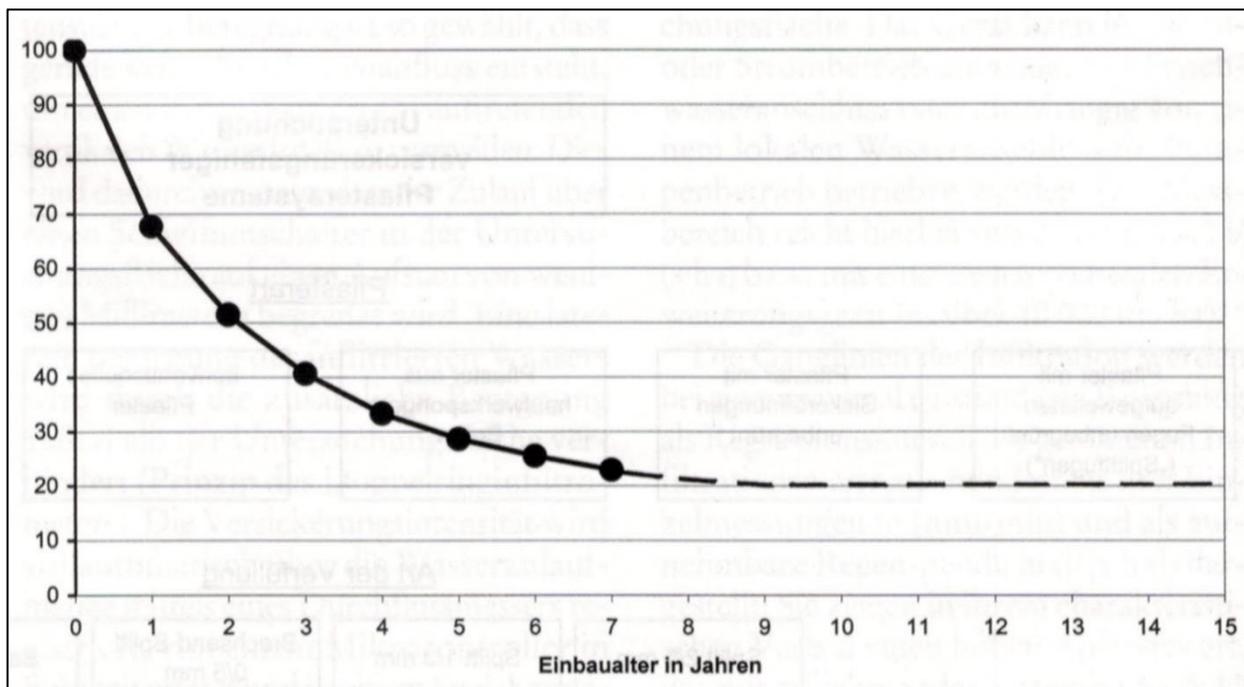


Abbildung 9: Prozentuale Abnahme der Infiltrationsleistung im Laufe der Nutzungsdauer

Diese Entwicklung ist für die verschiedenen Pflastersysteme – Pflaster mit Sickeröffnungen, mit aufgeweiteten Splittfugen und solche aus haufwerksporigem Beton – im wesentlichen gleich. Gemessen an verschiedenen Altersstufen liegen die absoluten Werte für die versickerbare Regenspende gegenüber früheren Ergebnissen [17] auf weit höherem Niveau. Der Verlauf der Abnahme wird aber anhand einer potentiellen Regression mit einer höheren statistischen Sicherheit aufgrund der besseren Datenbasis grundsätzlich bestätigt (Abbildung 10). Pflaster mit Sickeröffnungen und mit aufgeweiteten Splittfugen verzeichnen hiernach eine hohe Ausgangsleistung. Die Versickerungsleistung nimmt danach bei Pflaster mit Sickeröffnungen langsamer ab, scheint sich aber aufgrund der Schiefe der Regressionskurve im Laufe der weiteren Nutzungsdauer weiter zu reduzieren. Hier ist bei Pflastersystemen mit aufgeweiteten Splittfugen eher eine Konsolidierung zu erwarten, so daß das Endniveau in ähnlicher Höhe angenommen werden kann. Pflaster aus haufwerksporigem Beton zeigt von vornherein eine geringere Infiltration im Neuzustand und die Abnahme zeigt einen eher stetigen Verlauf auf niedrigerem Niveau.

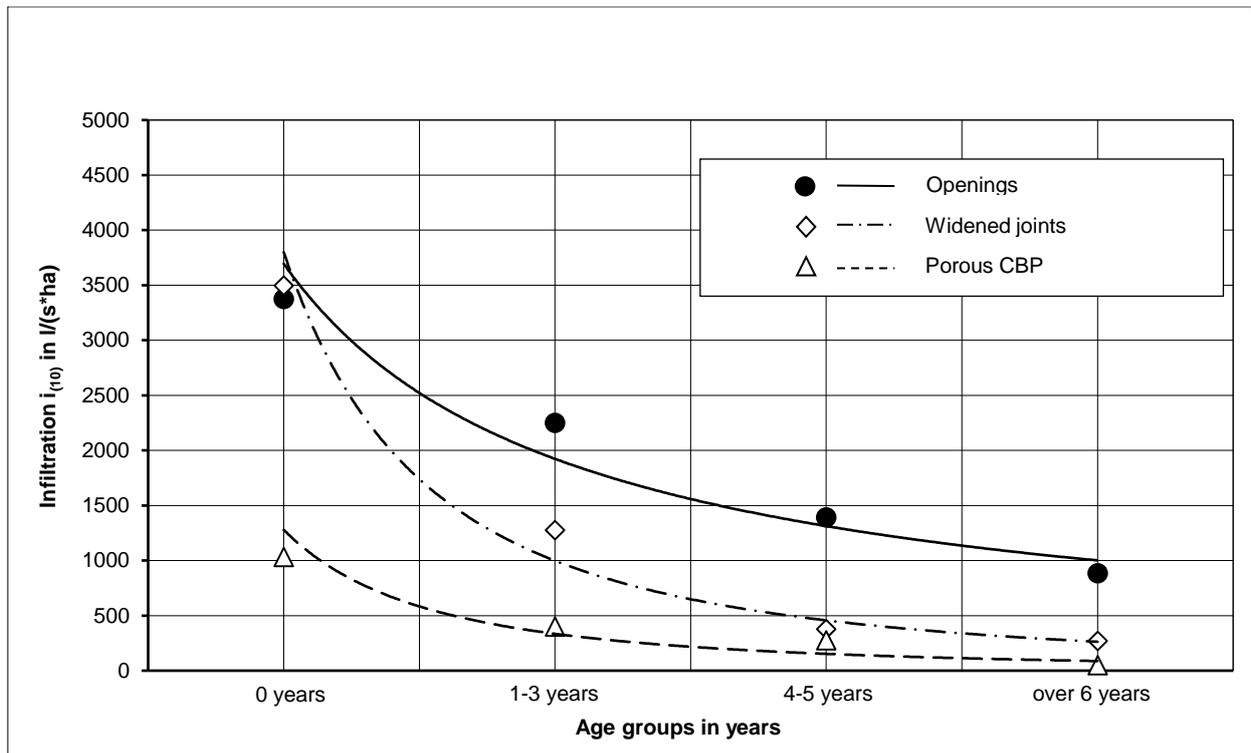


Abbildung 10: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zu verschiedenen Altersstufen nach Pflasterarten

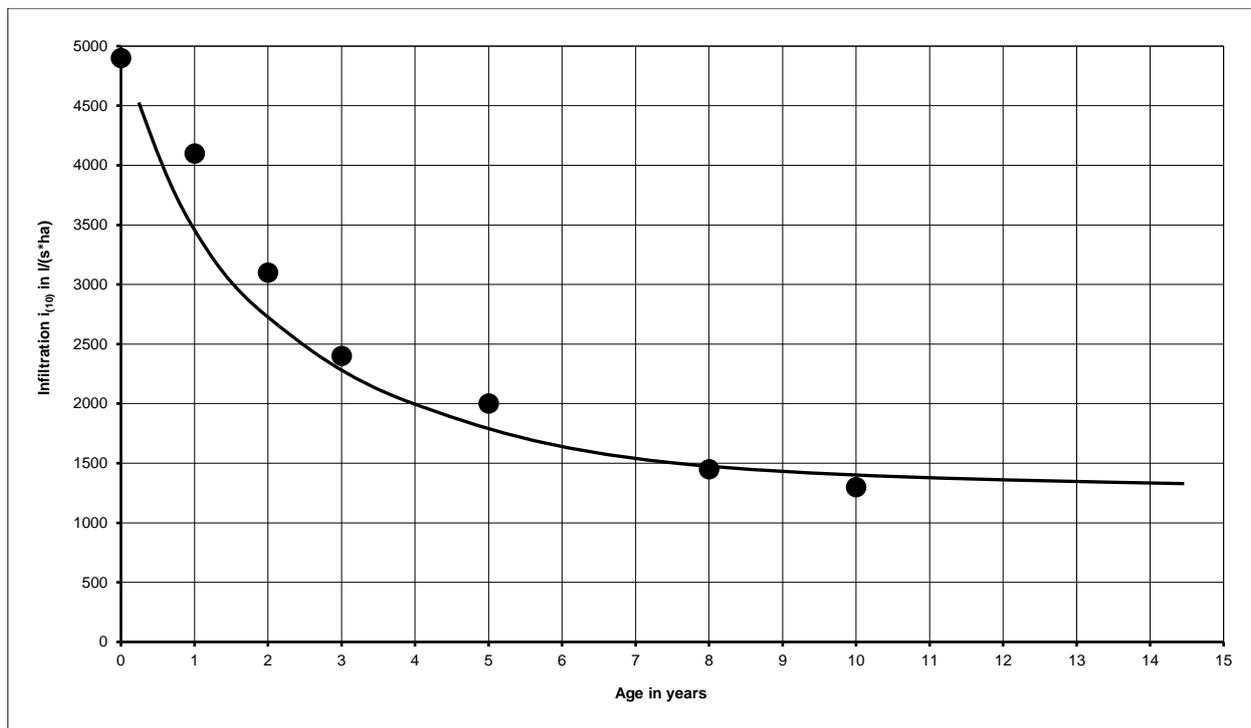


Abbildung 11: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum Alter bei Pflaster mit Sickeröffnungen (Splitt 2/5 mm)

Vergleicht man in weiterführenden Einzeluntersuchungen typische Vertreter der einzelnen Pflastersysteme mit ähnlichem Öffnungsanteil und von der Körnung her gleicher Verfüllung der Sickeröffnungen und/oder Fugen zeigt sich im folgenden an ausgewählten Beispielen nochmals deutlich der charakteristische Alterungsverlauf und die Abhängigkeit der absoluten Versickerungswerte von der Durchlässigkeit der zur Verfüllung verwendeten Mineralstoffe.

Beispielsweise bei Pflaster mit Sickeröffnungen bei einem durchschnittlichen Öffnungsanteil von 11,9 % und einer Verfüllung mit Splitt 2/5 mm liegt die versickerbare Regenspende im Neuzustand bei etwa 5.000 l/(s×ha). Sie nimmt bei einem Betrachtungszeitraum von ungefähr 10 Jahren auf Werte im Bereich 1.300 bis 1.400 l/(s×ha) ab (Abbildung 11).

Ähnlich verhält es sich bei Pflaster mit aufgeweiteten Splittfugen. Bei einem höheren durchschnittlichen Öffnungsanteil von 14,7 % ist bei Verlegung mit Splitt 2/5 mm ein Verlauf der Versickerungsleistung wie beim Pflaster mit Sickeröffnungen zu verzeichnen. Bei einer Verfüllung der aufgeweiteten Fugen mit Splitt 1/3 mm werden erwartungsgemäß geringere Werte erreicht. Die Ausgangsleistung im Neuzustand beträgt ca. 2.500 l/(s×ha) und es verbleiben nach sechs Jahren noch etwa 600 l/(s×ha). Auch hier zeigt sich wieder eindeutig der Einfluß der Durchlässigkeit des Mineralstoffgemisches auf die Versickerungsleistung der Fläche.

Dies wird auch beispielhaft durch ein ausgewähltes Referenzprodukt bestätigt. Bei dieser Beobachtung eines Einzelproduktes kann von gleichen Bedingungen bezüglich Baustoffeinsatz, Ausführung und Umweltbedingungen ausgegangen werden. Die jährlich wiederholten Infiltrationsmessungen werden auf einer gelegentlich mit Pkw-Verkehr frequentierten Parkfläche an Pflaster mit aufgeweiteten Splittfugen bei einem Öffnungsanteil von 10 % durchgeführt (Abbildung 12). Der Oberbau ist ordnungsgemäß dimensioniert und ausgeführt und die Fugen mit Splitt der Körnung 2/5 mm bzw. 1/3 mm verfüllt. Die anhand der Sieblinie festgestellte Durchlässigkeit beträgt 3×10^{-2} m/s bzw. 4×10^{-3} m/s (Abbildung 13). Theoretisch könnte also bei einem Öffnungsanteil von 10 % eine Durchlässigkeit der Gesamtfläche von 3×10^{-3} bzw. 4×10^{-4} m/s erreicht werden (siehe auch Untersuchungen unten). Dies entspricht nach der Bedingung $k_u = k_f/2$ im ungesättigten Bodenbereich [5] einer potentiell versickerbaren Regenspende von 15.000 bzw. 2.000 l/(s×ha) auf der Pflasterfläche. Im eingebauten Zustand beträgt die tatsächliche Durchlässigkeit anhand der erzielten Werte $i_{(60)}$ in der Infiltrationsmessung 7×10^{-5} m/s für den Splitt 2/5 mm und 3×10^{-5} m/s für den Splitt 1/3 mm. Aufgrund der Infiltrationsmessungen werden – gemessen am Bemessungswert $i_{(10)}$ – aufnehmbare Regenspenden von 3.700 bzw. 1.900 l/(s×ha) erzielt (Abbildung 14). Im fünften Jahr der Nutzung werden noch 1.900 bzw. 900 l/(s×ha) erreicht; also etwa 50 % der Ausgangsleistung. Also auch hier die Bestätigung dreier Erkenntnisse:

- (1) die Abhängigkeit der Versickerungsleistung von der Art der Verfüllung,
- (2) die Abnahme der Versickerungsleistung im Laufe des Betriebes und
- (3) schließlich die starke Differenz zwischen Durchlässigkeitswerten, die theoretisch errechnet werden und denjenigen, die im eingebauten Zustand festgestellt werden.



Abbildung 12: Beispielhafte Testfläche mit Referenzprodukt

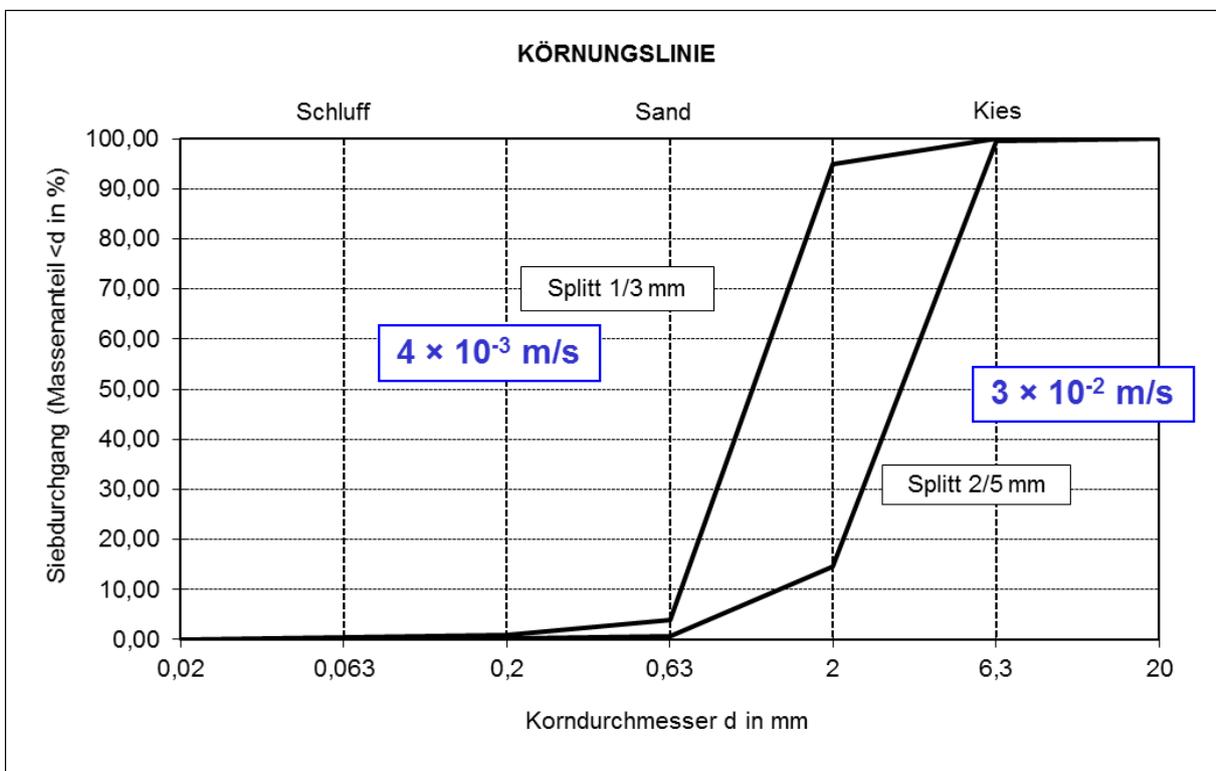


Abbildung 13: Sieblinien und Durchlässigkeit der getesteten Fugenmaterialien des Referenzprodukts

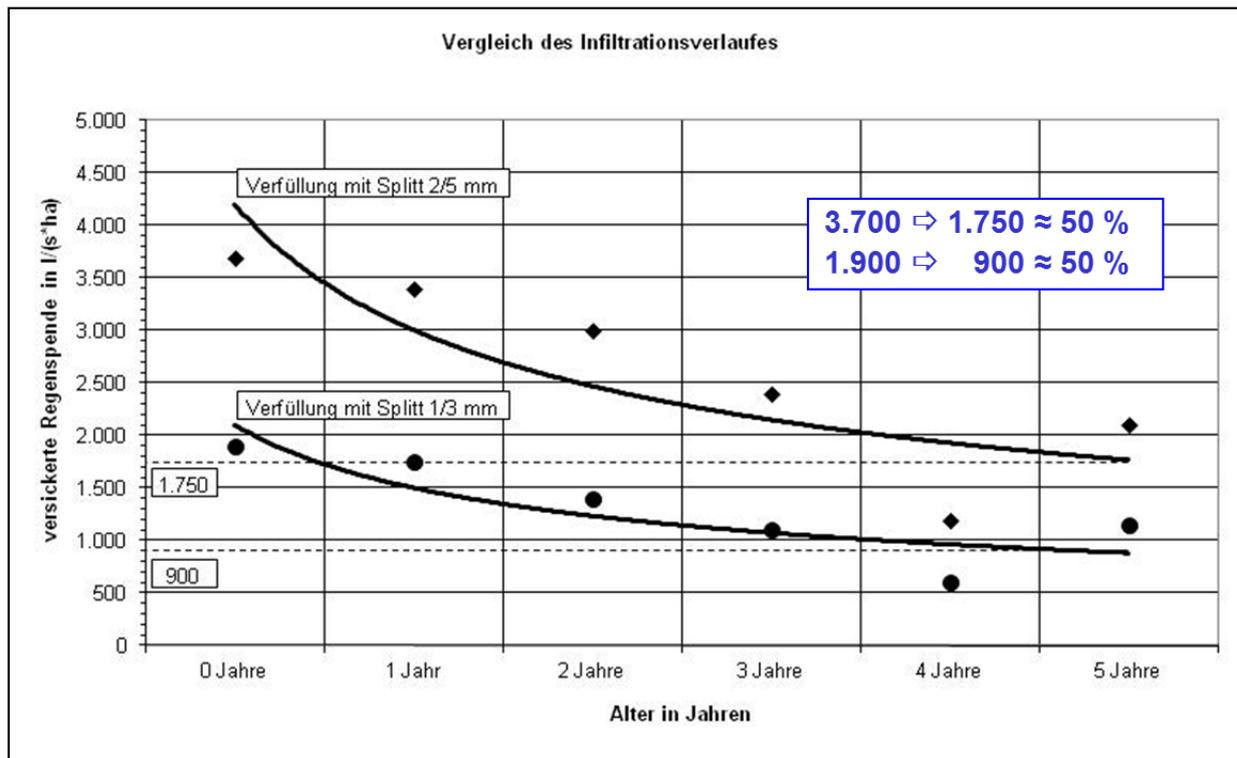


Abbildung 14: Verlauf der Versickerungsleistung mit zunehmenden Alter am Referenzprodukt

Vertreter der haufwerksporigen Betonsteine versickern das auftreffende Niederschlagswasser vor allem über die zur Verfügung stehenden Poren der Pflastersteine. Trotzdem ist die Art des Verfüllmaterials zu beachten, da auch hier ein hoher Feinanteil zur Verstopfung der Poren und damit zur Verringerung der Wasserdurchlässigkeit führen kann. Mit einer Verfüllung der Fugen mit Sand 0/2 mm erreicht dieses System hier anfangs eine Infiltrationsrate von etwa 500 l/(s×ha) bei einer Abnahme auf ca. 50 l/(s×ha) innerhalb von knapp 15 Jahren. Im Einzelfall ist die Leistungsfähigkeit haufwerksporiger Betonsteine neben der – auf die Porengrößen abzustimmenden – Verfüllung auch von seiner Ausbildung und der resultierenden Durchlässigkeit des Steines selbst abhängig.

Zum Vergleich werden schließlich konventionelle und begrünbare Pflasterbeläge untersucht. Ein konventionelles Pflaster mit einem üblichen Öffnungsanteil von ca. 3 % und verfüllt mit Sand 0/2 mm kann im Neuzustand durchaus eine Regenspende von ungefähr 200 l/(s×ha) aufnehmen. Durch die hier gezeigte charakteristische Abnahme der Versickerungsfähigkeit können nach mehreren Jahren aber nur noch geringe Regenmenge versickert werden.

Bei begrünten Pflasterbelägen, also Pflaster mit aufgeweiteter Rasenfuge oder mit begrüntem Sickeröffnungen, ist die Versickerungsleistung aufgrund der Verfüllung mit feinanteilreichen Substraten von vornherein als gering einzuschätzen. Obwohl die Substrate hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit optimiert werden können, liegt die ökologische Bedeutung der Entsiegelung hier eher in der starken temporären Rückhaltung der Niederschläge [30]. Dies wird auch auf-

grund der Infiltrationsmessungen deutlich. Werden anfangs noch hohe Regenspenden im Bereich von $800 \text{ l}/(\text{s}\times\text{ha})$ aufgenommen, geht diese Infiltrationsleistung im Laufe der weiteren Nutzungsjahre stark zurück. Die Endinfiltration liegt dann etwa in der Größenordnung von konventionellem Pflaster – allerdings bei weit höherer Rückhaltung, weshalb auch diesen Belägen im M VV ein Abflußbeiwert von $\psi = 0,3$ bis $0,5$ zugebilligt wird.

4.2.3 Versickerungsleistung in Abhängigkeit zum Öffnungsanteil

Basierend auf diesen Ergebnissen schließt sich die These an, ob unter Einbezug einer größeren Datenbasis generelle Aussagen zur Größenordnung der Leistungsfähigkeit versickerungsfähiger Pflasterbeläge in Abhängigkeit zum Öffnungsanteil überhaupt möglich sind [31].

Um hierbei den Vergleich der genannten Attribute anhand der Parameter $i_{(60)}$ und $i_{(10)}$ vornehmen zu können, werden insgesamt 204 Stichproben von Pflaster mit Sickeröffnungen und solchen mit aufgeweiteten Fugen in Klassen nach Alter, Verfüllmaterial und Öffnungsanteil eingeteilt. Obwohl aufgrund von unterschiedlichen baustellen- und umweltspezifischen Einflüssen eine sehr heterogene Streuung der Ergebnisse vorliegt, läßt sich die langfristige Entwicklung der Infiltrationsleistung sehr gut abbilden. Um diese klassifizierten Ergebnisse nun vergleichen und ein einfaches Modell zur Vorhersage der Abnahme der Infiltrationsleistung versickerungsfähiger Pflasterbeläge in Abhängigkeit zu ihrem Öffnungsanteil entwickeln zu können, werden diese nach ihrem Öffnungsanteil umgerechnet und weiterverarbeitet.

Zunächst einmal sei hier wiederholt, daß alle Daten – unabhängig von Öffnungsanteil oder Verfüllmaterial – bei Einteilung in verschiedene Altersgruppen die Abnahme der Infiltrationsleistung in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer zeigen (Abbildung 15).

Um nun die Infiltrationsleistung von versickerungsfähigen Pflasterbelägen mit verschiedenen Öffnungsanteilen mit einander vergleichen zu können, wird zunächst nach dem Verfüllmaterial in drei Klassen zwischen Splitt 2/5 mm, Splitt 1/3 mm und Sand 0/2 mm unterschieden. Dann werden diese Ergebnisse zur Vergleichbarkeit der jeweiligen Testflächen umgerechnet nach Infiltrationsrate je Öffnungsanteil. Um die Validität dieser Vorgehensweise zu prüfen, wird vorher die Korrelation geprüft.

Dieses Modell – das Infiltration Process Model (IPM) [31] – zeigt aufgrund der bereits erwähnten Streuung der Meßergebnisse mit einer dargestellten Bandbreite von $\pm 20 \%$ im Neuzustand und $+25 \%$ und -20% im Endzustand jeweils eine hohe Infiltrationsleistung am Anfang, dann eine Abnahme mit potentieller Regression und einem asymptotischen Verlauf zu einem Endwert nach etwa 8 bis 12 Jahren Betriebsdauer.

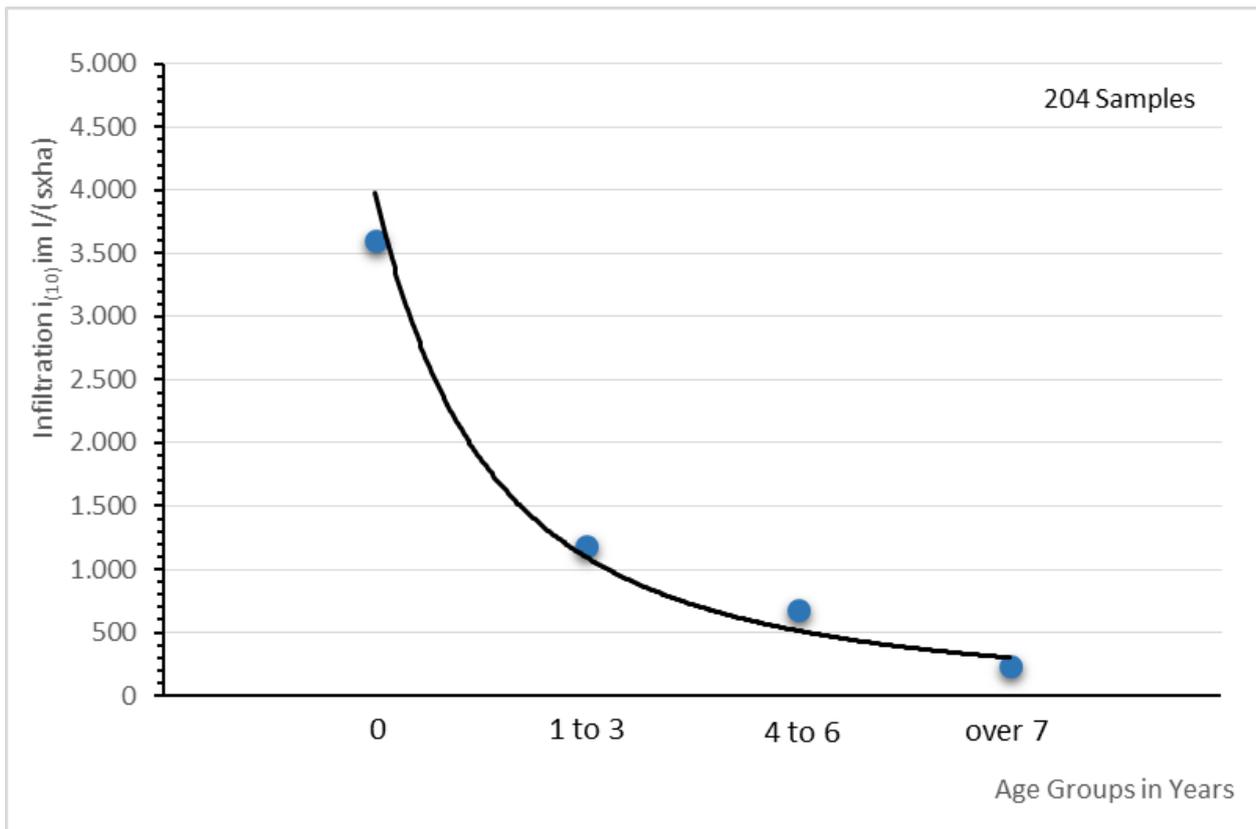


Abbildung 15: Infiltrationsleistung verschiedener Altersgruppen

Im Ergebnis zeigt sich, daß Pflaster bei Verfüllung mit Splitt 2/5 mm im Neuzustand eine Infiltrationsrate $i_{(10)}$ zwischen 600 und 400 l/(s*ha) je Prozent Öffnungsanteil erreichen kann, die dann auf 150 und 40 l/(s*ha) nach mehrjähriger Nutzung abnimmt (Abbildung 16). Die Werte für Splitt 1/3 mm sind mit 480 bis 320 im Neuzustand respektive 120 bis 30 l/(s*ha) im gealterten Zustand generell geringer (Abbildung 17). Bei Sand 0/2 mm sind dies 70 bis 50 bzw. 20 bis 5 l/(s*ha) (Abbildung 18). Tabelle 1 zeigt die die Werte zusammengefaßt.

Tabelle 1: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum prozentualen Öffnungsanteil

Verfüllmaterial	Neuzustand	Endzustand
Körnung in mm	$i_{(10)}$ in l/(s × ha)	
2/5	600-400	150-40
1/3	480-320	120-30
0/2	70-50	20-5

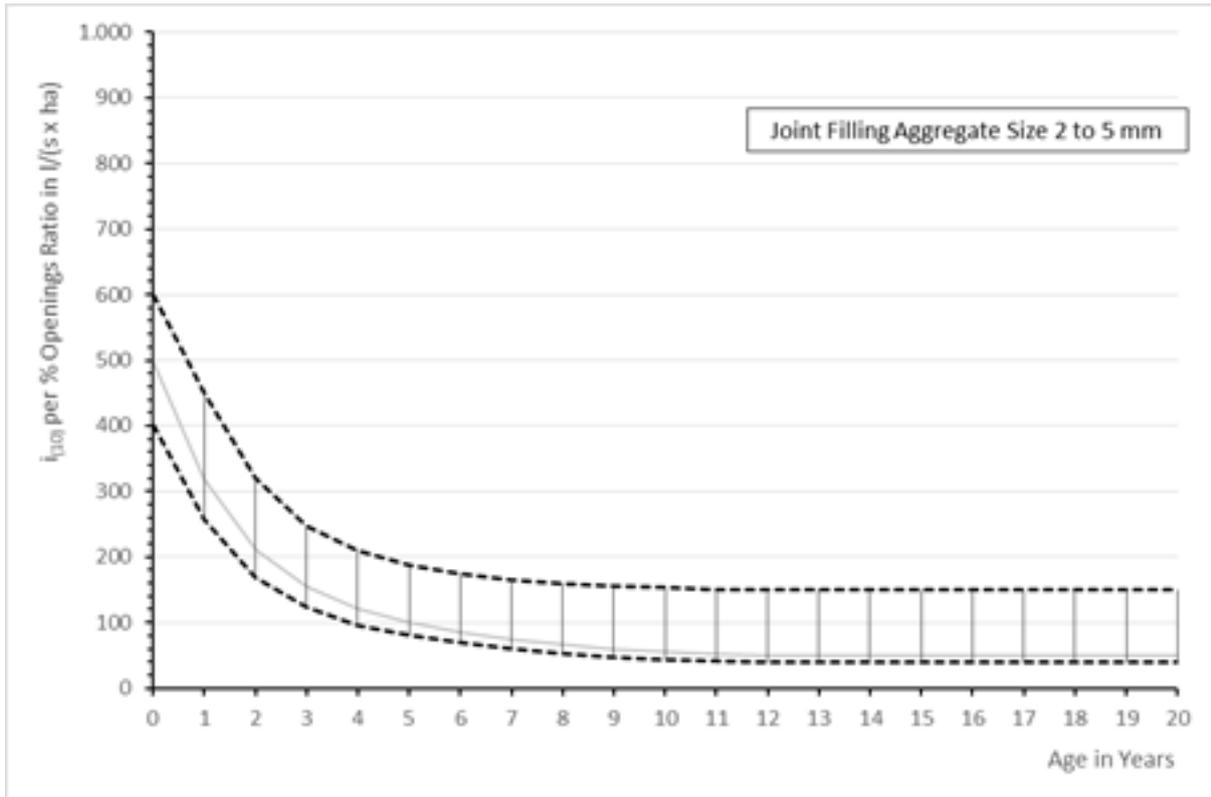


Abbildung 16: Infiltration Process Model bei versickerungsfähigem Pflaster je % Öffnungsanteil mit Splitt 2/5 mm

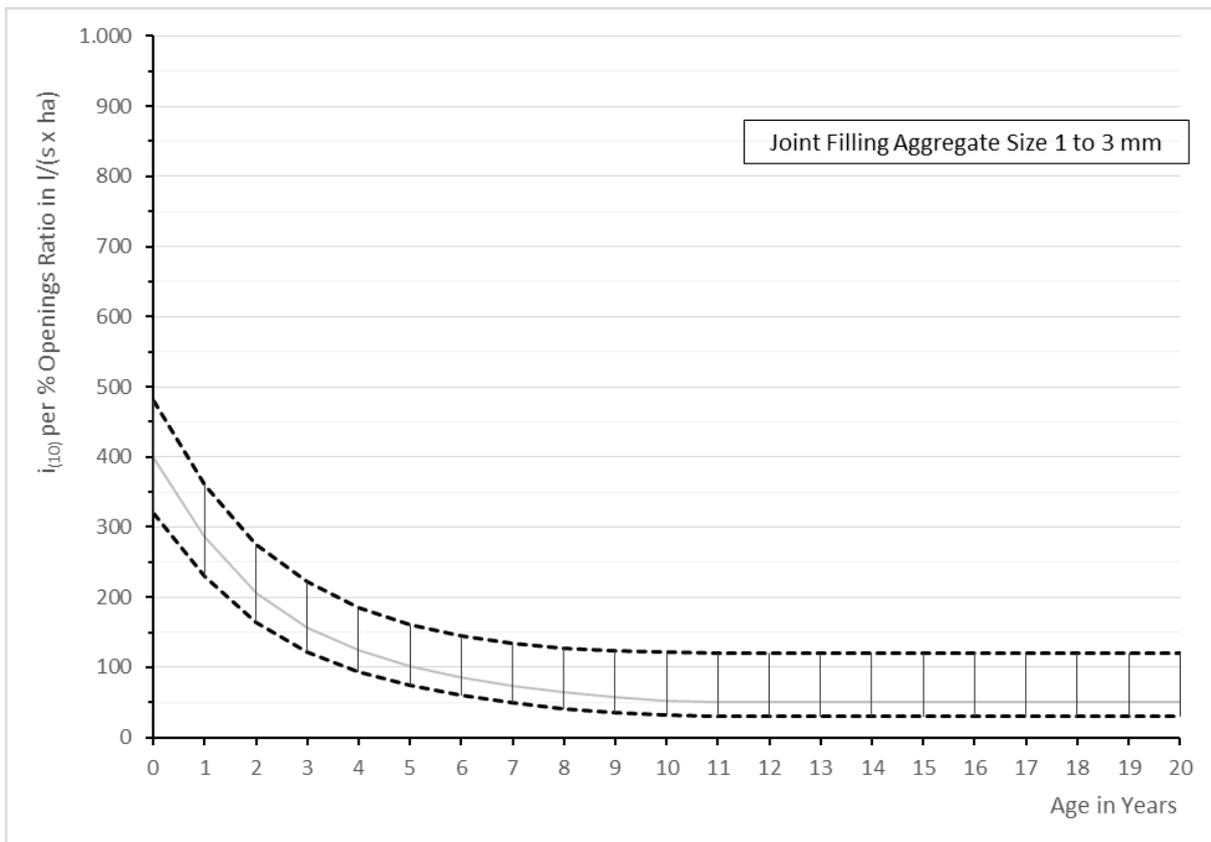


Abbildung 17: Infiltration Process Model bei versickerungsfähigem Pflaster je % Öffnungsanteil mit Splitt 1/3 mm

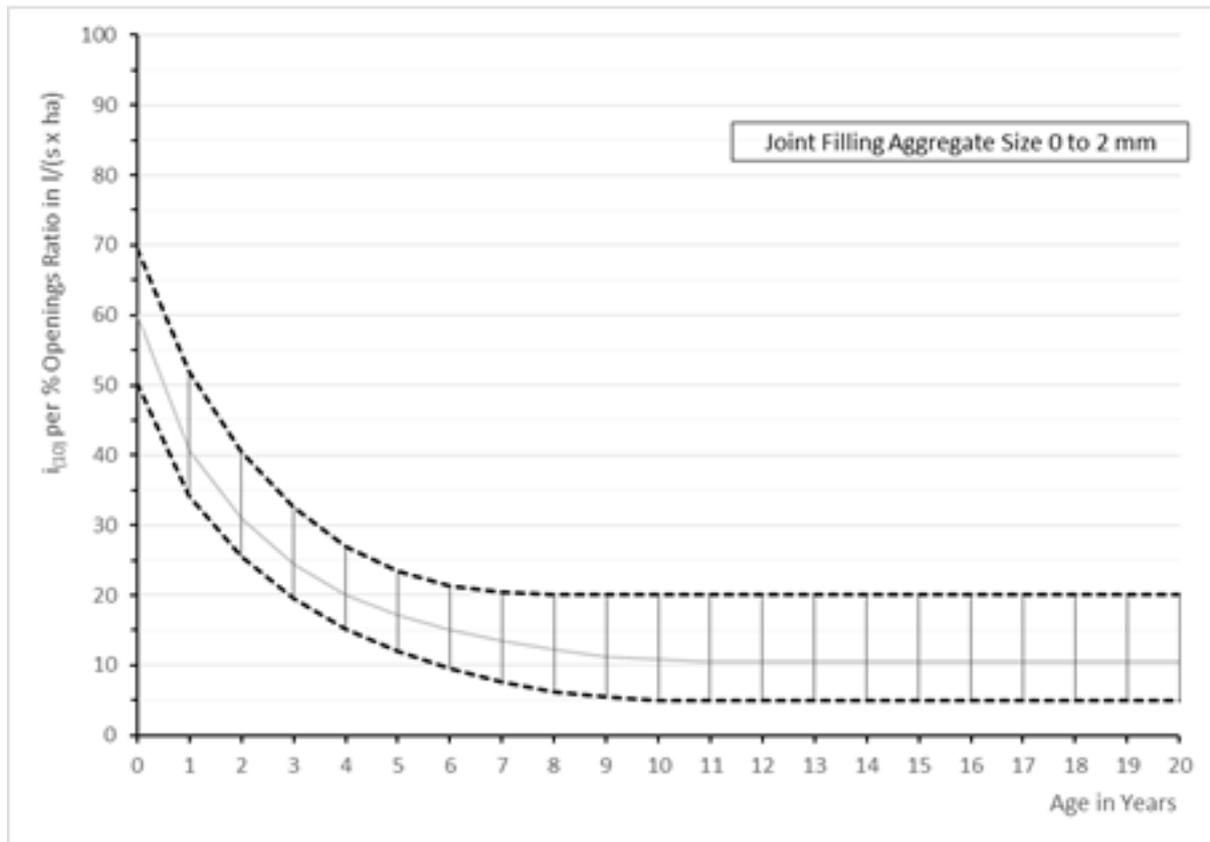


Abbildung 18: Infiltration Process Model bei versickerungsfähigem Pflaster je % Öffnungsanteil mit Sand 0/2 mm

Wie bereits erwähnt, kann die jeweilige Infiltrationsleistung eines Belags sehr stark variieren [25], [27] und einzelne Standorte können ein anderes Versickerungsverhalten aufweisen. Von daher kann dieses Modell nur als grobe Annäherung in den Gültigkeitsgrenzen der Durchlässigkeit von Verfüllmaterialien nach Tabelle 2 benutzt werden und muß durch Feldversuche auf der jeweilig zu prüfenden Fläche bestätigt werden. Die Gründe hierfür liegen im wesentlichen aufgrund [28]

- der in der Praxis anzutreffenden beträchtlichen Varianz der Durchlässigkeit von Verfüllmaterialien,
- der zum Teil zu konstatierenden schlechten Ausführungspraxis sowie
- der sehr unterschiedlich gehandhabten Intensität der Unterhaltung der Flächen.

Tabelle 2: Durchlässigkeit von Baustoffgemischen zur Fugenverfüllung (nach [29])

Körnung [mm]	k [m/s]
2/5	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$
1/3	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$
0/2	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$

Am Schluß dieser Einzelbetrachtungen muß erneut der Hinweis stehen, daß hiermit nur Tendenzen zu Höhe und Verlauf der Versickerungsleistung im Laufe der Nutzung einer Verkehrsfläche aufgezeigt werden können. Die für einzelne Produkte und Flächen erzielbaren Infiltrationsraten und das Verhalten bei zunehmender Alterung können aufgrund der tatsächlich verwendeten Baustoffe und der Art der Ausführung abweichen. Im diesem Sinne wird nochmals eindringlich auf die Notwendigkeit einer laufenden Produkt- und Baustellenüberwachung nach den Anforderungen des M VV verwiesen.

4.2.4 Bewertung der Ergebnisse

Durch die Auswertung der Infiltrationsmessungen können vor allem auch im Zusammenhang mit der Vielzahl anderer Untersuchungen folgende Aussagen getroffen werden:

- Versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsflächen können im Neuzustand sowie zum Teil auch im gealterten Zustand Regenmengen aufnehmen, die weit über die üblicherweise zur Bemessung herangezogenen Regenspenden hinausgehen. Ob dies für den gesamten Nutzungszeitraum einer Verkehrsfläche gilt, ist noch nicht abschließend geklärt.
- Die Versickerungsleistung nimmt aufgrund des Eintrages von mineralischen und organischen Feinteilen im Laufe der Gebrauchsdauer ab. Das Ausmaß der Abnahme ist unabhängig von Lage und Ausführung und kann für jede Verkehrsfläche sehr unterschiedlich sein. Die Abnahme wird im Bereich von 25 bis 10 % der Ausgangsleistung im Neuzustand angenommen.
- Die starke Streuung der Ergebnisse insgesamt legen den Schluß nahe, daß die Versickerungsleistung in erster Linie von der Qualität der Baustoffe und auch der Qualität der Ausführung abhängt.
- Die Versickerungsleistung ist auch von der Durchlässigkeit der für die Verfüllung der Öffnungen verwendeten Mineralstoffgemische abhängig. Ein Zusammenhang mit dem Öffnungsanteil kann nur bedingt hergestellt werden. Die mathematische Ableitung der Infiltrationsleistung einer versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsfläche aufgrund des Öffnungsanteils und der theoretisch oder experimentell ermittelten Durchlässigkeit eines Mineralstoffes ist nicht zulässig.
- Näherungsweise kann das theoretische Modell zur Bestimmung der Infiltrationsleistung je Prozent Öffnungsanteil des zu verwendenden Pflasters herangezogen werden.

Bei vielen untersuchten Flächen hat sich herausgestellt, daß selbst bei einer Abnahme der Versickerungsleistung auf 10 % der Ausgangsleistung die Bemessungsregenspende noch vollständig aufgenommen werden kann. Aus diesem Grund erscheint ein derart hoher Abflußbeiwert von $\psi = 0,3$ bis $0,5$, wie er im M VV empfohlen wird, zunächst nicht gerechtfertigt. Die Ergebnisse zeigen, daß bei ordnungsgemäßem Einbau und der Verfüllung der Sickeröffnungen und Fugen mit

einem von vornherein stark durchlässigen Mineralstoffgemisch die gesamte Bemessungsregenspende im Neuzustand und häufig auch im gealterten Zustand aufgenommen werden kann. Viele umgesetzte Beispiele bestätigen dies auch.

Darüber hinaus ist auch zu bedenken, daß die vorgesehene Bemessungsregenspende zwar aufgenommen werden kann und hier zumindest zu einem Rückhalt der Niederschläge entscheidend beiträgt [32], aber die weitaus meisten anzutreffenden Untergründe diese Regenmengen nicht vollständig an das Grundwasser weiterleiten können. Hieraus folgt, daß eine zusätzliche Entwässerung für das Planum unumgänglich ist, um Schäden von verkehrsbelasteten Flächen abzuwenden. Auch hier bewahrheitet sich wieder der Grundsatz, die versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsfläche eher als Baustein zur Verringerung und zur temporären Rückhaltung des Abflusses einzusetzen, denn als eigentliche Versickerungsanlage. Ob der Oberbau von verkehrsbelasteten Flächen als Speicherkörper genutzt werden kann, wie lange welche Regenmenge hier verweilen können, ohne Schäden an Planum und Konstruktion hervorzurufen und ob der Speicherraum generell für eine ordnungsgemäße Entwässerung ausreicht, ist derzeit nicht abschließend geklärt. Hierzu gibt es inzwischen trotz vorliegender Arbeiten [12], [32] weiteren Forschungsbedarf.

Zusammenfassend muß aus den folgenden Gründen der Anschluß an eine Entwässerungsanlage befürwortet werden:

- Es liegen noch keine abschließenden Erkenntnisse über den Verlauf der Versickerungsleistung über den gesamten Nutzungszeitraum einer Verkehrsfläche vor.
- Aufgrund der Veränderung der Versickerungsleistung, die in Höhe und Zeitraum keiner bekannten Gesetzmäßigkeit unterliegt, ist eine Bemessung als Entwässerungsanlage mit großer Unsicherheit behaftet.
- Wird die versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsfläche zumindest als Teil einer Entwässerungsanlage aufgefaßt, muß – wie bei allen Wasserbauwerke – eine Entlastungsmöglichkeit für den Versagensfall geschaffen werden.
- Für Regenereignisse, die über der Bemessungsregenspende liegen, muß eine ordnungsgemäße und verkehrssichere Entwässerung gewährleistet sein.
- Bei nicht ausreichend durchlässigen Untergründen muß zur Vermeidung von Schäden an der Verkehrsfläche das Planum entwässert und die Abflüsse einer Entwässerungsanlage zugeführt werden.
- Schließlich ist nicht außer acht zu lassen, daß derzeit die Anforderungen, die an Planung, Baustoffverwendung und Ausführung von versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen hinsichtlich der entwässerungstechnischen Optimierung zu stellen wären, nur ungenügend bei Auftraggebern, Planern, Baustofflieferanten und Auftragnehmern bekannt sind.

Für die Bemessung der Entwässerungsanlage, die an die versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsfläche (als vorgeschaltetes abflußminderndes Element einer Gesamtentwässerung) angeschlossen wird, kann der im M VV genannte Abflußbeiwert von $\psi = 0,3$ als realistisch bewertet werden. Die Anrechnung einer dauerhaften Versickerung der Bemessungsregenspende über die Verkehrsflächen – also eines Abflußbeiwertes von $\psi = 0,0$ – und damit ein Verzicht auf eine zusätzliche Entwässerungsanlage kann nur unter Abwägung der betreffenden Einflußfaktoren als Einzelfallentscheidung mit der Prüfung durch Fachleute und zuständige Behörden unter folgenden Voraussetzungen befürwortet werden:

- Der anstehende Untergrund wird mit geeigneten Methoden untersucht und weist eine Durchlässigkeit auf, bei der die maßgebliche örtliche Bemessungsregenspende vollständig und dauerhaft aufgenommen werden kann.
- Die Anforderungen und Überprüfungen des M VV müssen uneingeschränkt eingehalten werden.
- Es wird empfohlen, die Wasserdurchlässigkeit der Pflasterdecke so zu konzipieren, daß sie um etwa eine Zehnerpotenz höher ausfällt, als sich dies durch die eigentliche Bemessungsregenspende ergibt, d. h. der k_f -Wert der Pflasterdecke sollte im Neuzustand mindestens $5,4 \times 10^{-4}$ m/s betragen.
- Im Versagensfall oder bei Regenereignissen, die über der Bemessungsregenspende liegen muß ein eventuell entstehender Oberflächenabfluß schadlos für benachbarte Bauwerke und beeinträchtigungsfrei für die anliegenden Flächen und Nutzungen flächenhaft in der Umgebung versickert und rückgehalten werden können.

4.3 Schutz von Boden und Grundwasser

Bei der Versickerung von Niederschlägen ist zum Schutz von Boden und Grundwasser zum einen die Verkehrsbelastung zu begrenzen, und zum anderen ist ein Mindestabstand bis zur Grundwasser Oberfläche einzuhalten. Weiter darf die Versickerung nur außerhalb von Wasserschutzgebieten vorgenommen werden. Zudem gilt für alle versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen, daß auf diesen der Einsatz von Taumitteln im Winterdienst zu unterlassen ist.

Das Ausmaß einer potentiellen Beeinträchtigung von Boden und Grundwasser ist von der Nutzung der versickerungsfähigen Pflasterdecke, das heißt von Art und Menge des darauf stattfindenden Verkehrs abhängig. Unbedenklich ist der Einsatz von versickerungsfähigen Betonpflasterdecken für Fuß- und Radwege sowie für Parkflächen. Fahrbahnen von Straßen können ebenfalls mit versickerungsfähiger Betonpflasterdecke ausgeführt werden, wenn die Verkehrsbelastung nicht über das Maß von Wohn- und Anliegerstraßen hinausgeht. Gemäß dem DWA-Ar-

beitsblatt A 138 in Zusammenhang mit dem DWA-Merkblatt M 153 [33] sind derartige Niederschlagsabflüsse für die Versickerung „*tolerierbar*“. Von den in den RStO beschriebenen Verkehrsflächen können somit – neben Fuß- und Radwegen – solche mit versickerungsfähiger Betonpflasterdecke ausgebildet werden, die den Belastungsklassen Bk0,3 bis Bk1,0 entsprechen.

Im nichtöffentlichen Bereich gibt es zahlreiche Verkehrsflächen, die nicht unmittelbar von den RStO erfaßt werden, aber häufig in Anlehnung an diese Vorschrift geplant und bemessen werden. Dies gilt zum Beispiel für industriell und gewerblich genutzte Verkehrsflächen, wie Park- und Stellplätze, Lade-, Umschlag- und Abstellflächen. Hier können zwar hohe Achslasten auftreten, aber die für die Schadstoffbelastung entscheidende absolute Verkehrsmenge ist oftmals eher gering. Auch derartige Verkehrsflächen können daher mit versickerungsfähiger Pflasterdecke befestigt werden, sofern auf diesen der Umgang mit Wasser gefährdenden Stoffen ausgeschlossen ist und auch sonst keine schädliche Verunreinigung des Oberflächenwassers zu befürchten ist. Im privaten Wohnumfeld können praktisch alle Flächen versickerungsfähig ausgebildet werden.

Die nachfolgende Tabelle 3 faßt die Einsatzbereiche von versickerungsfähigen Betonpflasterbauweisen zusammen.

Tabelle 3: Verkehrsflächen für den Einsatz versickerungsfähiger Pflasterbauweisen aus der Sicht des Schutzes von Boden und Grundwasser

Art der Verkehrsfläche	Art der Nutzung
Fahrbahnen nach den RStO	Wohn- und Anliegerverkehr (Belastungsklasse Bk1,0)
	Wohn- und Anliegerverkehr (Belastungsklasse Bk0,3)
Parkflächen nach den RStO	Geringer Bus- und Lkw-Verkehr
	Pkw-Verkehr
Industriell oder gewerblich genutzte Verkehrsflächen	Umschlagsflächen industrieller und gewerblicher Nutzer
	Plätze mit schwerem Ladeverkehr
	Abstellplätze (z. B. für Container)
Besondere Verkehrsflächen	Gleis- und Schienenbereiche des ÖPNV
	Ufer- und Böschungsbefestigungen
sonstige Verkehrsflächen	Bahnsteige (vorwiegend nicht überdachte)
	Wirtschaftswege für die Land- und Forstwirtschaft
	Notfahrbereiche (z. B. für Feuerwehr, Rettungsfahrzeuge)
	Rad- und Gehwege
Wohnumfeld	Bewegungs- und Aufenthaltsflächen, Grundstückszufahrten, Pkw-Stellflächen, Gartenanlagen

Zum Schutz von Boden und Grundwasser muß der anstehende, durchlässige Untergrund eine Mächtigkeit von mindestens 1 Meter aufweisen, um eine schnelle Abführung des in den Oberbau eingeleiteten Oberflächenwassers zu erreichen. Der für die Versickerung maßgebliche Grundwasserabstand ist abhängig von der Durchlässigkeit des anstehenden Untergrundes oder Bodens. Entscheidend für den Schutz des Grundwassers ist die Mächtigkeit der reinigenden Filterpassage im ungesättigten Bereich des Bodenkörpers. Den Schichten des Oberbaues von Verkehrsflächen fehlen weitgehend die mechanischen und biologischen Reinigungsmechanismen, da sie aus relativ grobkörnigen Baustoffgemischen bestehen. Daher ist in Abhängigkeit zur anstehenden Bodenart ein Abstand von mindestens 2 Meter zwischen Oberkante der Flächenbefestigung und dem höchsten freien Grundwasserspiegel einzuhalten [34].

4.4 Bauliche Anforderungen

Das grundsätzliche Prinzip einer befestigten Verkehrsfläche ist ihr schichtweiser Aufbau zu einem Gesamttragwerk, das auf dem vorbereiteten Untergrund, dem Planum die aus dem auftretenden Verkehr resultierenden Kräfte aufnehmen kann. Statische Belastungen ergeben sich zum Beispiel aus der Achslast eines ruhenden Fahrzeugs. Diese wirken vertikal auf die Befestigung ein. Weit größeres Augenmerk ist allerdings auf die dynamischen Kräfte zu legen, die durch Kombination und Überlagerung der Fahrzeugeigenschaften Gewicht, Geschwindigkeit, Federung und Anordnung der Räder auftreten. Daneben sind gerade für Pflasterdecken Kräfte aus Brems-, Dreh- oder Beschleunigungsvorgängen von besonderer Bedeutung. Die daraus resultierenden Schubkräfte wirken horizontal auf die Konstruktion ein [35].

Die befestigte Verkehrsfläche hat also die Aufgabe, die durch Nutzung der Verkehrsfläche resultierenden Lasten, zum Beispiel aus Schwerfahrzeugen, dauerhaft aufzunehmen, ohne die Sicherheit und Nutzungskomfort der Verkehrsfläche beeinträchtigt werden. Insofern muß der gesamte Aufbau dauerhaft tragfähig, frostsicher, profilgerecht und eben sein. Dies gilt uneingeschränkt auch für versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsflächen, die noch zusätzlich die Aufgabe haben, anfallendes Regenwasser aufzunehmen und weiterzuleiten, und insofern dauerhaft ausreichend durchlässig sein müssen. Daher gilt auch hier das in Abbildung 19 für konventionelle Pflasterbauweisen genannte Regelwerk uneingeschränkt; aber unter zusätzlicher Beachtung der Inhalte des M VV.

Die Versickerung von Niederschlägen durch eine Pflasterdecke bewirkt eine vermehrte Zuführung von Wasser in die darunterliegenden Schichten. Dies widerspricht zunächst einmal den Regeln des Verkehrsflächenbaues, nach denen Wasser weitgehend aus der Konstruktion herauszuhalten ist. Versickerungsfähige Pflasterbauweisen funktionieren dennoch, wenn bestimmte Anforderungen und Einsatzgrenzen eingehalten werden. Besonderes Augenmerk ist dabei auch auf

die Einhaltung der Filterstabilität zu legen, damit die Wasserbewegungen innerhalb der ungebundenen Schichten und insbesondere an den Schichtgrenzen nicht zu Schäden innerhalb der Gesamtkonstruktion führen.

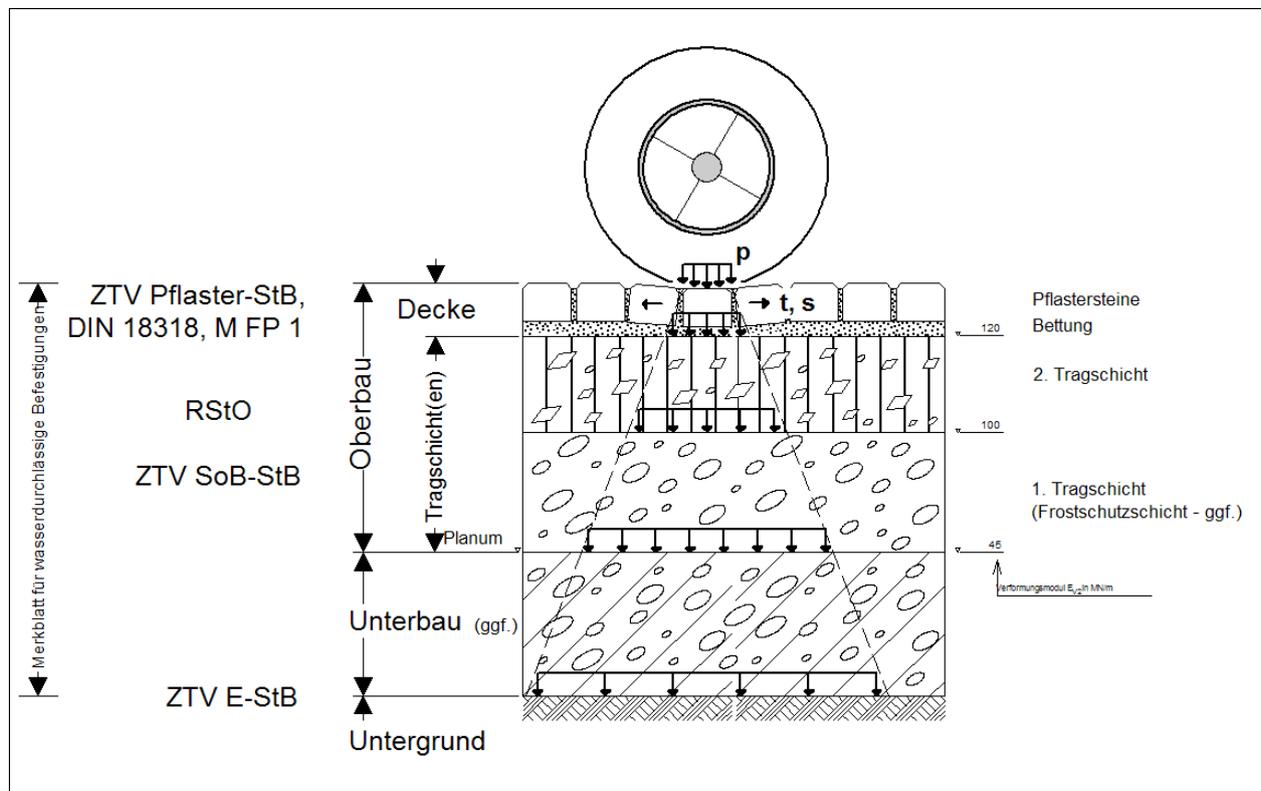


Abbildung 19: Beispiel für den Aufbau einer mit Betonpflasterdecke befestigten Verkehrsfläche unter Verkehrsbelastung mit den dazugehörigen wesentlichen Regelwerken [36], [37].

4.4.1 Untergrund

Die Eignung des Untergrundes für den Einsatz versickerungsfähig ausgebildeter Verkehrsflächen mißt sich an dem Regenereignis, das versickert werden soll. Um die Bemessungsregenspende von 270 l/(s×ha) ohne zusätzliche Maßnahmen schadlos aufnehmen und zügig weiterleiten zu können, muß der Untergrund – oder auch ein gegebenenfalls vorhandener Unterbau – neben der erforderlichen Tragfähigkeit auch eine Durchlässigkeit von $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$ m/s aufweisen. Die darunterliegende Bodenschicht muß mindestens 1 Meter mächtig sein.

Ist der Untergrund nicht so gut, aber immer noch ausreichend durchlässig, das heißt zwischen etwa $5,4 \times 10^{-5}$ m/s und $5,4 \times 10^{-6}$ m/s, sollte die darüber anzuordnende Frostschuttschicht – je nach regionaler Frosteinwirkung – 10 bis 20 cm dicker ausgeführt werden, als sich dies bei üblicher Bemessung ergeben würde.

Bei nicht oder nur gering durchlässigem Untergrund ($k_f < 5,4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) kann das in den Oberbau eingesickerte Wasser oberhalb des Planums seitlich aus der Konstruktion abgeleitet und anderen Entwässerungsanlagen (z. B. Dränrohren oder Rigolen) zugeführt werden, um es in durchlässigeren Bereichen versickern zu lassen (Abbildung 20). Die versickerungsfähige Pflasterbauweise ist daher auch noch bei nicht oder gering durchlässigen Baugründen funktionstüchtig. Sie ist dann jedoch vergleichsweise bautechnisch aufwendig und kostenintensiv und daher nur bei größeren oder besonderen Bauvorhaben zu empfehlen.

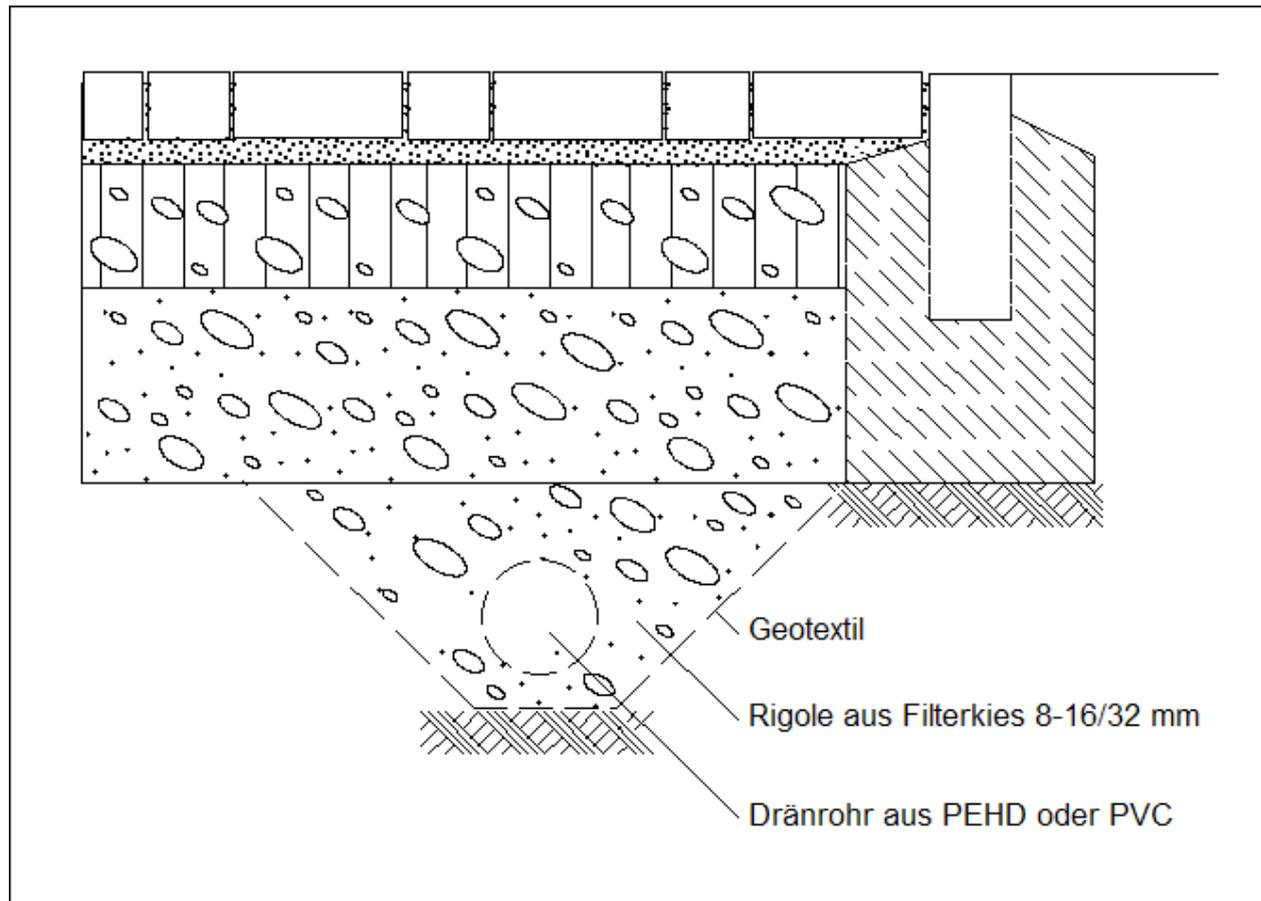


Abbildung 20: Prinzipskizze einer Planumsentwässerung

Die Ermittlung der Durchlässigkeit des Baugrundes erfolgt, wie in Abschnitt 8 des M VV dargestellt nach DIN 18130 oder vor Ort durch Infiltrationsversuche nach dem Open-End-Test [38].

4.4.2 Oberbau

Der Oberbau einer mit Pflasterdecke befestigten Verkehrsfläche besteht aus den Tragschichten und der Pflasterdecke selbst. In Bereichen größerer Frostempfindlichkeit besteht die untere Tragschicht aus einer Frostschutzschicht. Die auf der oberen Tragschicht befindliche Pflasterdecke wiederum besteht aus Bettung, Betonpflastersteinen und Fugenfüllung. Für versickerungsfähige Pflasterbauweisen sollten stets Tragschichten ohne Bindemittel (ungebundene

Tragschichten) als Kies- oder Schottertragschichten ausgeführt werden. Auch hier gilt dann – neben der anforderungsgerechten Dimensionierung, Tragfähigkeit, Querneigung und Ebenheit – das Kriterium der ausreichenden Wasserdurchlässigkeit von $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$ m/s (Tabelle 4). Daher sind für Tragschichten grundsätzlich nur korngestufte Baustoffgemische zu empfehlen, deren Sieblinie nahe der jeweils unteren Grenzsieblinie nach den TL SoB-StB bzw. den ZTV SoB-StB [39] verläuft.

Tabelle 4: Anforderungen an Tragschichten bei versickerungsfähigen Pflasterbauweisen [34], [39]

Bezeichnung	Verformungswiderstand E_{v2}	Feinanteil	Durchlässigkeit k bei dichtester Lagerung
	MPa	M.-%	m/s
Frostschuttschicht	≥ 100	≤ 5 ¹⁾	$\geq 5,4 \times 10^{-5}$
Kiestragschicht	≥ 120		
Schottertragschicht	≥ 120		
¹⁾ Im eingebauten Zustand. Bei Anlieferung sollte der Feinanteil 3 Masse-% nicht überschreiten.			

Von so genannten Baustoffgemischen 2/32, 2/45 oder mit einer ähnlichen Zusammensetzung, wie sie häufig in Ausschreibungen für versickerungsfähige Bauweisen zu finden sind, wird dringend abgeraten. Sie würden zwar für eine hohe Wasserdurchlässigkeit im eingebauten Zustand sorgen, jedoch lassen sie sich aufgrund des Fehlens von Feinanteilen in der Regel nicht mit der anforderungsgerechten Tragfähigkeit herstellen. Aus diesem Grund sind derartige Baustoffgemische auch nicht Bestandteil des Regelwerks für den Verkehrswegebau. Auf Recycling-Materialien und industrielle Nebenprodukte sollte nur zurückgegriffen werden, wenn diese hinsichtlich ihrer Qualität und ihrer umweltrelevanten Merkmale geeignet sind.

Die Ermittlung der Durchlässigkeit von Tragschichten erfolgt nach DIN 18130 [40] oder vor Ort durch Infiltrationsversuche mit dem Infiltrationsgerät.

Zur Ermittlung der erforderlichen Schichtdicken sind Verkehrsflächen grundsätzlich nach den *Richtlinien zur Standardisierung von Verkehrsflächen* – RStO auf der Grundlage von Verkehrsbelastung und regionaler Frosteinwirkung zu bemessen. Die Zugrundelegung dieser beiden erforderlichen Kriterien erfolgt unabhängig von der Bauweise und gilt demzufolge auch für Verkehrsflächenbefestigungen mit versickerungsfähiger Pflasterdecke [4]. Grundlegend ist deren Einsatz begrenzt auf die in Tabelle 3 bezeichneten Verkehrsflächen.

Weist der Untergrund eine ausreichende Durchlässigkeit von $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$ m/s auf (dies entspricht der Frostempfindlichkeitsklasse F1 gemäß den ZTV E-StB [41]), kann der Oberbau in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung mit den üblichen, in den RStO angegebenen Schichtdicken dimensioniert werden. Bei weniger durchlässigem Untergrund mit einer Durchlässigkeit zwischen $5,4 \times 10^{-5}$ und $5,4 \times 10^{-6}$ m/s (Frostempfindlichkeitsklasse F2 und F3) muß gemäß Tabelle 5 aufgrund der ungünstigen Wasserverhältnisse und der Frosteinwirkung nach Zone I/II oder III der Oberbau mit Mehrdicken von 10 oder 20 cm beaufschlagt werden. Es ergeben sich die maßgeblichen Regeldicken des Oberbaues nach Tabelle 6.

Tabelle 5: Mehr- oder Minderdicken des Oberbaues [cm] infolge örtlicher Verhältnisse [4]

Zeile	Örtliche Verhältnisse		A	B	C	D	E
1.1	Frosteinwirkung	Zone I	± 0				
1.2		Zone II	+ 5				
1.3		Zone III	+ 15				
2.1	Lage der Gradienten	Einschnitt, Anschnitt, Damm ≤ 2,0 m (ausg. Ziff. 2.2)		+ 5			
2.2		In geschlossener Ortslage und etwa in Geländehöhe		± 0			
2.3		Damm < 2,0 m		- 5			
3.1	Wasser-verhältnisse	Günstig				± 0	
3.2		Ungünstig gemäß ZTV E-StB				+ 5	
4.1	Ausführung der Randbereiche	Außerhalb geschlossenen Ortslage sowie innerhalb mit wasserundurchlässigen Randbereichen					± 0
4.2		In geschl. Ortslage mit wasserundurchlässigen Randbereichen sowie mit Entwässerungseinrichtungen					- 5
4.3		In geschl. Ortslage mit wasserundurchlässigen Randbereichen und geschlossener seitlicher Bebauung sowie mit Entwässerungseinrichtungen					- 10

Tabelle 6: Erforderliche Oberbaudicke für versickerungsfähige Bauweisen

Frostempfindlichkeitsklasse des Untergrundes	Frosteinwirkungszone	erforderliche Dicke des Oberbaues	
		bei Belastungsklasse Bk 1,0 und Bk 0,3	bei Rad- und Gehwegen
F1	-	400 – 500 mm*)	300 mm
F2 oder F3	I und II	600 mm	300 – 400 mm
	III	700 mm	

*) je nach Ausbildung der Tragschicht

4.4.3 Versickerungsfähige Pflasterdecke

Die versickerungsfähige Betonpflasterdecke bildet den Abschluß des Oberbaues und unterliegt demgemäß ebenfalls den genannten Anforderungen an Durchlässigkeit, Tragfähigkeit und Ebenheit. Darüber hinaus kommt dem Pflaster die Aufgabe zu, die an die Flächenbefestigung gestellten gestalterischen Ansprüche zu erfüllen. Grundsätzlich werden zwei Arten von versickerungsfähigem Pflaster unterschieden.

- Haufwerksporige Betonpflastersteine: Beide Komponenten – Steine und Fugen – sind durchlässig und
- Pflastersteine mit Sickeröffnungen oder aufgeweiteten Fugen: nur eine Komponente, nämlich die Fugen, sind durchlässig. Hierbei kommen ausschließlich gefügedichte Pflastersteine zum Einsatz.

Aufgrund der oben aufgeführten Untersuchungen zur Abnahme der Infiltrationsleistung im Laufe des Nutzungszeitraumes wird empfohlen, die Wasserdurchlässigkeit der Pflasterdecke hinsichtlich der Durchlässigkeit des Fugenmaterials in Abstimmung mit dem Öffnungsanteil so zu konzipieren, daß sie um etwa eine Zehnerpotenz höher ausfällt, als sich dies durch die eigentliche Bemessungsregenspende ergibt, das heißt der k_f -Wert der Pflasterdecke sollte im Neuzustand mindestens $5,4 \times 10^{-4}$ m/s betragen.

Begrünbare Pflasterdecken sind ebenfalls ökologisch sinnvoll und wertvoll; nicht aber als versickerungsfähige Pflasterdecken anzusehen. Der für eine Begrünung erforderliche Oberbodenanteil und die spätere Wurzelbildung verhindern in aller Regel eine ausreichend hohe Versickerungsleistung. Die Vorteile begrünbarer Pflasterdecken liegen primär darin, den Oberflächenabfluß erheblich mindern und vergleichsweise große Niederschlagsmengen speichern zu können, die dann durch Verdunstung wieder an die Umgebung abgegeben werden und somit zu einer Verbesserung des Kleinklimas beitragen. Insofern stellen begrünbare Pflasterdecken ebenso wie versickerungsfähige Pflasterdecken einen effektiven Baustein eines modernen Regenwassermanagements dar.

Die am Markt erhältlichen versickerungsfähigen Pflastersysteme lassen sich im Allgemeinen in drei Gruppen einteilen:

- **Haufwerksporige Pflastersteine** (Abbildung 21) mit einem offenporigen Gefüge, welches das Versickern des Wassers direkt durch den Stein ermöglicht. Diese Steine haben den Vorteil, daß sie mit relativ engen Fugen von 3 bis 5 mm verlegt werden können und damit in der Fläche einen guten Fahr- und Gehkomfort bieten. Ein weiterer Vorteil ist, daß haufwerksporige Steine im gleichen Format erhältlich sind, wie herkömmliche gefügedichte Steine. So lassen sich innerhalb einer Flächenbefestigung in ein und demselben Raster wahlweise versickerungsfähige und nicht versickerungsfähige Bereiche anlegen. Die Formenvielfalt und die Möglichkeiten der Oberflächengestaltung sind bei diesen Steinen allerdings eingeschränkt,

da sie nur soweit erfolgen kann, wie dadurch kein Verschließen des porigen Gefüges zustande kommt.

Aufgrund der nur punktuellen Verkittung der Zuschlagskörner verringert sich mit steigender Wasserdurchlässigkeit im Allgemeinen die Druckfestigkeit des Pflastersteins [42]. Hinsichtlich des Einsatzes ist also die gegenüber gefügedichten Betonpflastersteinen verringerte Belastbarkeit sowie eine in der Regel abgeminderte Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Taumittelbeanspruchung zu berücksichtigen. Die Anforderungen an haufwerksporige Pflastersteine aus Beton sind in der *Richtlinie für die Herstellung und Güteüberwachung von wasserdurchlässigen Pflastersteinen aus haufwerksporigem Beton* festgelegt [43]. Die Anwendung zielt insbesondere auf das private Wohnumfeld und den weniger belasteten Wegebau, in denen im Winter keine Taumittel eingesetzt werden sollten.



Abbildung 21: Haufwerksporiger Betonpflasterstein

- **Pflastersteine mit Sickeröffnungen** (Abbildung 22). Diese können als durchgehende Löcher (im Stein) oder Kammern (am Stein) vorhanden sein. In der Regel wird dadurch in der verlegten Fläche ein Öffnungsanteil ab etwa 15 Prozent aufwärts, bestehend aus den Fugen und den Sickeröffnungen, erreicht. Sickeröffnungen und Fugen sind – wie auch bei den Systemen mit aufgeweiteten Fugen - mit wasserdurchlässigen Gesteinskörnungen zu verfüllen. Pflaster-systeme mit Aussparungen werden häufig als Verbundsteine angeboten, so daß Flächen für höhere Verkehrsbelastungen realisierbar sind. Weiterhin haben diese Steinsysteme den Vor-

teil, daß sie hinsichtlich der Betonfestigkeit, der Formenvielfalt und den Gestaltungsmöglichkeiten bei der Oberflächenbearbeitung den herkömmlichen Betonsteinen nicht nachstehen. Auch der Geh- und Fahrkomfort ist bei derartig hergestellten Flächenbefestigungen in der Regel nicht besonders eingeschränkt. Ein weiterer Vorteil ist, daß passend zu den Steinen mit Sickeröffnungen auch solche ohne Sickeröffnungen im gleichen Raster bzw. Format angeboten werden, so daß innerhalb einer Flächenbefestigung wahlweise versickerungsfähige und nicht versickerungsfähige Bereiche angelegt werden können.



Abbildung 22: Pflaster mit Sickeröffnungen

- **Pflastersteine mit aufgeweiteten Fugen** (Abbildung 23). Angeformte Abstandhalter sorgen für größere Fugenbreiten beim Verlegen, die je nach Steinsystem im Allgemeinen zwischen 8 und 35 mm betragen. Die Versickerung des Regenwassers erfolgt bei derartigen Systemen ausschließlich über die Fugen, die mit wasserdurchlässigen Gesteinskörnungen zu füllen sind. Die Vorteile dieser Steinsysteme bestehen vor allem in der hohen Betonfestigkeit, der Formenvielfalt und den uneingeschränkten Gestaltungsmöglichkeiten bei der Oberflächenbearbeitung, wie dies auch von herkömmlichen Betonsteinen bekannt ist. Einschränkungen können je nach Steinsystem aufgrund der relativ großen Fugenbreiten bei Lastübertragung, Geh- und/oder Fahrkomfort der Flächenbefestigungen gegeben sein. Bei Systemen mit besonderer Verbundwirkung, die sich zum Beispiel durch spezielle Ausgestaltung der Abstandhalter erreichen läßt, sind auch höhere Verkehrsbelastungen möglich. Dies sollte jedoch im Einzelfall

genau geprüft werden. Derartige Steinsysteme können aus gestalterischen oder ökologischen Gründen auch begrünt werden; dazu sollten die Fugen aber mindestens 20 mm breit sein. Wie weiter vorn bereits beschrieben, ist jedoch zu berücksichtigen, daß begrünbares Pflaster kein versickerungsfähiges Pflaster ist.



Abbildung 23: Pflaster mit aufgeweiteten Fugen

Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 7 dargelegten Einsatzbereiche für die jeweiligen Pflaster-systeme.

Als Bettungsmaterial für versickerungsfähige Pflasterdecken sollten stets natürliche Gesteinskörnungen nach den TL Gestein-StB verwendet werden. Diese müssen eine ausreichend hohe Kornfestigkeit aufweisen, damit die durch das Pflaster eingetragenen Belastungen nicht zu Kornzertrümmerungen und -verfeinerungen führen. Das Bettungsmaterial ist zudem so auszuwählen, daß die Bettung dauerhaft eine Wasserdurchlässigkeit von $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$ m/s aufweist.

Auch als Fugenmaterial für versickerungsfähige Pflasterdecken sollten stets natürliche Gesteinskörnungen nach den TL Gestein-StB verwendet werden. Für befahrene Verkehrsflächen muß das Fugenmaterial eine ausreichend hohe Kornfestigkeit aufweisen, damit in den Fugen auftretende Schub- und Scherkräfte nicht zu Kornzertrümmerungen und -verfeinerungen führen. Hinsichtlich ihrer Versickerungsleistung sind Fugenmaterialien sorgfältig auszuwählen. Die Auswahl des Fugenmaterials muß somit erfolgen - unter Berücksichtigung:

- der Bemessungsregenspende respektive der Anforderung an die Wasserdurchlässigkeit des versickerungsfähigen Befestigungsaufbaues,
- des versickerungsfähigen Anteils der Pflasterfläche und
- der zu erwartenden Verschmutzung der Pflasterfläche während der Nutzungsdauer.

Tabelle 7: Einsatzbereiche für versickerungsfähige Pflasterdecken mit Angabe von geeigneten Pflastersystemen

Art der Verkehrsfläche	Geeignete Pflastersysteme
Straßenflächen nach RStO (Belastungsklasse Bk1,0)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen und Verbundwirkung
Straßenflächen nach RStO (Belastungsklasse Bk0,3)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen • Aufgeweitete Fugen • Haufwerksporige Betonsteine
Parkflächen nach RStO (geringer Bus- und Lkw-Verkehr)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen und Verbundwirkung
Parkflächen nach RStO (Pkw-Verkehr, Stellflächen)	<ul style="list-style-type: none"> • Haufwerksporige Betonsteine • Begrünbare Pflaster/Platten
Industrielle und gewerbliche Verkehrsflächen (Umschlagsflächen und Ladeverkehr)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen und Verbundwirkung
Industrielle und gewerbliche Verkehrsflächen (Abstellplätze)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen • Aufgeweitete Fugen
Besondere Verkehrsflächen (z.B. Gleis- und Schienenbereiche des ÖPNV, Ufer- und Böschungsbefestigungen)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen • Aufgeweitete Fugen • Begrünbare Pflaster/Platten
Untergeordnete Verkehrsflächen (z.B. Wirtschaftswege, Notfahrbereiche)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen • Aufgeweitete Fugen • Begrünbare Pflaster/Platten
Wohnumfeld*) (z.B. Bewegungs- und Platzflächen, Grundstückszufahrten, Gartenanlagen, Rad- und Gehwege)	<ul style="list-style-type: none"> • Sickeröffnungen • Aufgeweitete Fugen • Haufwerksporige Betonsteine • Begrünbare Pflaster/Platten

*) Versickerungsfähige Pflaster und Plattenbeläge sind hier unter Umständen aufgrund der schlechten Begeh- oder Befahrbarkeit in einigen Einsatzbereichen nicht geeignet.

Die oben dargelegte Abnahme der Versickerungsleistung im Laufe der Nutzung ist schon bei in der Planung zu berücksichtigen. Um von vornherein auf der Verkehrsfläche eine möglichst hohe

Regenspende aufnehmen zu können, sind nur Baustoffe einzusetzen, die hinsichtlich ihrer Wasserdurchlässigkeit optimiert sind. Hierbei genügt es in der Regel nicht, nur das gewünschte Mineralstoffgemisch mit einer bestimmten Körnung auszuschreiben. Die Güte und damit der entscheidende Anteil an abschlämmbaren Körnungen ist regional sehr schwankend. Von daher ist in der Ausschreibung die entsprechende Anforderung an die Durchlässigkeit zu benennen und durch eine Eignungsprüfung dokumentieren zu lassen. Hierbei ist für die Aufnahme der Bemessungsregenspende der Öffnungsanteil und gegebenenfalls auch die beobachtete Abnahme der Versickerungsleistung zu berücksichtigen. So könnte die Anforderung hinsichtlich der Baustoffoptimierung zum Beispiel wie folgt lauten:

gegeben:

- Bemessungsregenspende $270 \text{ l}/(\text{s}\times\text{ha})$,
- erforderlicher k_f -Wert des Befestigungsaufbaues (dauerhaft) $k_f > 5,4\times 10^{-5} \text{ m/s}$,
- Faktor „eine Zehnerpotenz“ zur Berücksichtigung der Abnahme der Wasserdurchlässigkeit während der Nutzungsdauer,
- Fugenanteil 12 %

gesucht:

- erforderlicher k_f -Wert für das Fugenmaterial

Berechnung:

$$\text{erf } k_{f \text{ Fuge}} = 5,4\times 10^{-5} \cdot 100 / 0,12$$

$$= 4,5\times 10^{-3} \text{ m/s}$$

Für die Auswahl einer geeigneten Körnung bieten die Arbeiten von BEYER [44] sowie Erfahrungen basierend auf Infiltrationsmessungen eine gute Grundlage (Tabelle 8). Einen Wert, wie im Rechenbeispiel ermittelt, erreichen in der Regel nur grobe Gesteinskörnungen, wie Splitt 2/5 und Splitt 1/3 (siehe Tabelle x). Die in Tabelle xx ebenfalls genannten Körnungen Sand 0/2, Sand 0/4 mm und Brechsand-Splitt-Gemische 0/5 mm sind im Allgemeinen nur geeignet, wenn sie so gut wie keine abschlämmbaren Bestandteile aufweisen. Werden derartige Körnungen eingesetzt, ist auf die unbedingte Einhaltung dieser Anforderung durch Kontrollprüfungen im eingebauten Zustand zu achten.

Tabelle 8: Durchlässigkeit von Gesteinskörnungen und Gesteinskörnungsgemischen [28]

Gesteinskörnung bzw. Gesteinskörnungsgemisch	Theoretische Durchlässigkeit k_f anhand der idealen Sieblinie nach BEYER [m/s]	Mittlere Durchlässigkeit k_f untersuchter Mineralstoffgemische nach Infiltrationsmessung [m/s]
Splitt 2/5 mm	1×10^{-2} bis 1×10^{-3}	1×10^{-2} bis 1×10^{-4}
Splitt 1/3 mm	1×10^{-3} bis 1×10^{-4}	1×10^{-3} bis 1×10^{-4}
Brechsand-Splitt-Gem. 0/5 mm	1×10^{-4} bis 1×10^{-5}	1×10^{-4} bis 1×10^{-5}
Sand 0/4 mm	1×10^{-4} bis 1×10^{-5}	-
Sand 0/2 mm	1×10^{-4} bis 1×10^{-5}	1×10^{-4} bis 1×10^{-6}
Oberbodengemisch	-	5×10^{-4} bis 5×10^{-7}

Um die Filterstabilität zwischen Fugen- und Bettungsmaterial sicherstellen und die Gefahr eines Wasserstauens auf der Bettung weitgehend ausschließen zu können, sollte für die Fugen und ggf. Sickeröffnungen die gleiche Gesteinskörnung bzw. das gleiche Gesteinskörnungsgemisch wie für die Bettung verwendet werden. Ist dies nicht möglich, d. h. müssen unterschiedliche Materialien verwendet werden, sind diese anhand der Filterregel nach den ZTV Pflaster-StB [45] aufeinander abzustimmen. Die Filterstabilität zweier angrenzender Schichten ist nach den ZTV Pflaster-StB gegeben, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Durchlässigkeitsbedingung: $D_{15}/d_{15} \geq 1$,
- Bedingung für die Sicherheit gegen Erosion: $D_{15}/d_{85} \leq 4$ und
- Bedingung für die Sicherheit gegen Kontakterosion: $D_{50}/d_{50} \leq 5$

mit:

- $D_{15; 50}$ = Korndurchmesser in mm des Filtermaterials, der bei 15 bzw. 50 Masse-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt und
- $d_{15; 50; 85}$ = Korndurchmesser in mm des abzufilternden Materials, der bei 15 bzw. 50 bzw. 85 Masse-% Siebdurchgang der Körnungslinie vorliegt.

4.5 Zusätzliche Entwässerungseinrichtungen

Versickerungsfähig befestigte Verkehrsflächen reduzieren den Oberflächenabfluß. Ihre Bedeutung liegt also nicht darin, eine herkömmliche Entwässerungsanlage zu ersetzen, sondern den Flächenverbrauch und damit die Kosten einer Entwässerung zu optimieren und damit zu einer wirtschaftlichen und umweltgerechten Bewirtschaftung von Regenwasser beizutragen. Aus diesem Grunde wird die versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsfläche nicht als eigentliche Entwässerungsanlage betrachtet, sondern als ein vorgeschalteter Baustein innerhalb des gesamten Entwässerungskonzeptes zur Reduzierung des Oberflächenabflusses. Somit wird der Verkehrsfläche ein Abflußbeiwert zugeordnet, der bei der Bemessung der eigentlichen Entwässerungsanlage berücksichtigt wird.

In der Praxis zeigt sich, daß bei vielen versickerungsfähigen Betonpflasterdecken auch nach langjähriger Nutzung sämtliche Niederschläge versickern können und angeschlossene Entwässerungseinrichtungen in den ersten Betriebsjahren überhaupt nicht und später auch nur bei extremen Regenereignissen in Anspruch genommen werden. Trotzdem kann Oberflächenabfluß auf versickerungsfähigen Pflasterdecken zum Beispiel bei Starkregenereignissen oberhalb der Bemessungsregenspende entstehen oder wenn die Flächen infolge übermäßiger Umwelteinflüsse, Verschmutzung oder mangelnder Pflege nachläßt. Damit eventuell anfallender Oberflächenabfluß kontrolliert werden kann, müssen die Pflasterdecken mit einem Gefälle von mindestens 1,0 Prozent ausgeführt werden, das heißt der Oberflächenabfluß ist entweder seitlich abzuleiten und an anderer Stelle zur Versickerung zu bringen oder zu sammeln und der Kanalisation zuzuführen. Letzteres sollte nach Möglichkeit vermieden werden, um die ökologischen Vorteile dieser Bauweise voll ausschöpfen zu können.

Bei der Ermittlung der Größe des Abflußbeiwertes für versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsflächen geht das FGSV-Merkblatt aufgrund der oben genannten Abnahme der dauerhaften Versickerungsleistung von einem Abflußwert von mindestens $\psi = 0,3$ aus. Dies bedeutet, daß auch einer derartig ausgebildeten Verkehrsfläche immer eine Entwässerungsanlage – zum Beispiel eine seitliche Versickerungsanlage – zuzuordnen ist. Diese kann aber entsprechend dem anrechenbaren Abflußbeiwert kleiner dimensioniert werden. Die Bemessung erfolgt also nach:

$$Q = A \times \psi \times r_{(T)n} / 10.000 = A \times 0,3 \times 270 / 10.000$$

mit: Q = Abfluß in l/s

A = angeschlossene befestigte Verkehrsfläche in m^2

ψ = Abflußbeiwert

$r_{(T)n}$ = Bemessungsregenspende in l/(s×ha)

Als Regel-Entwässerungselement sollten begrünte Versickerungsmulden dienen, da in diesen das Wasser durch die belebte Oberbodenschicht gefiltert wird. Versickerungsmulden sind im Allgemeinen auch gut zu kontrollieren und zu pflegen. Alternativ kann über klassische Entwässerungsrinnen an die Kanalisation angeschlossen werden. In beiden Fällen erfolgt die Bemessung unter Berücksichtigung des genannten abgeminderten Abflußbeiwertes von $\psi = 0,3$. Das heißt, im Gegensatz zu einer versiegelten Fläche braucht nur ein geringerer Oberflächenabfluß berücksichtigt werden. Dadurch lassen sich die zusätzlichen Entwässerungseinrichtungen kleiner dimensionieren als dies bei einer versiegelten Fläche der Fall wäre.

Ein genereller Verzicht auf zusätzliche Entwässerungseinrichtungen beschränkt sich in der Regel auf Flächen im privaten Wohnumfeld. Dazu ist sicherzustellen, daß eventuell anfallende Oberflächenabflüsse auf dem Grundstück verbleiben und dort schadlos für Anlieger versickern können. Die einfachste Methode ist, vorsorglich eine Ableitung des Wassers in zum Grundstück gehörende Grünflächen vorzusehen.

4.6 Zusammenfassende Empfehlungen für den Einsatz

Die Anforderungen, die an eine versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsfläche zu stellen sind, betreffen vor allem das Einsatzgebiet, die Dimensionierung des Oberbaues, die Auswahl der Mineralstoffe und die ordnungsgemäße Entwässerung. Weitere Anforderungen ergeben sich aus den beobachteten Bedingungen, die die Versickerungsleistung derartiger Flächen beeinflussen. Sie sind anhand von Infiltrationsmessungen dargelegt worden. Hinsichtlich der Höhe der Versickerungsleistung und des Aufrechterhaltens über einen möglichst langen Betriebszeitraum hängt die erfolgreiche Umsetzung vor allem von folgenden Bedingungen ab:

- hochwertige Qualität der verwendeten Baustoffe,
- fachgerechte Ausführung der Bauarbeiten,
- baubegleitende Überwachung von Baustoffen und Ausführung und
- praxisgerechte Durchführung von Unterhaltungsmaßnahmen.

Zusammenfassend gibt die Abbildung 24 Hilfestellung für den Einsatz von versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen mit Pflasterdecke. Die für die planerische und technische Umsetzung zu beachtenden Voraussetzungen und grundlegende Hinweise sind hier dargelegt. Aus Gründen des Grundwasserschutzes darf die Versickerung nur außerhalb von Wasserschutzgebieten vorgenommen werden. Der Flurabstand des Grundwassers muß mindestens 1 Meter ab Planum bzw. zwei Meter ab Pflasteroberfläche betragen. Darüber hinaus dürfen versickerungsfähige Verkehrsflächenbefestigungen nur dort eingesetzt werden, wo kein Umgang mit wassergefährdenden Stoffen erfolgt und auf den Einsatz von Taumitteln im Winterdienst verzichtet

wird. Der Einsatz ohne zusätzliche Maßnahmen ist grundsätzlich auf Bereiche mit durchlässigem Untergrund ($k_f \geq 5,4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) und auf Verkehrsflächen nach Tabelle 3 (siehe oben) begrenzt.

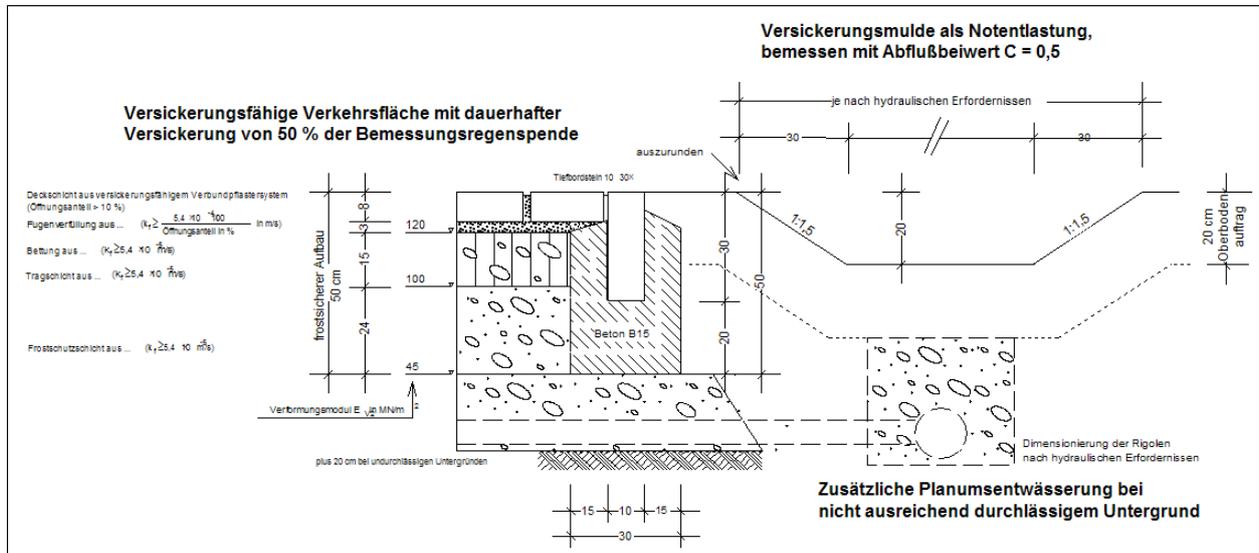


Abbildung 24: Regelaufbau für eine versickerungsfähige Pflasterbauweise

Auf eine Entlastungsmöglichkeit für Starkniederschläge kann aufgrund der ungesicherten dauerhaften Aufrechterhaltung der Versickerungsfähigkeit nicht verzichtet werden. Nach dem M VV kann gesichert von der Versickerung ein Drittel bis zur Hälfte des Bemessungsregens über die gesamte Nutzungsdauer einer Pflasterfläche ausgegangen werden, so daß die anschließende Entwässerungsanlage mit einem Abflußbeiwert von $\psi = 0,3$ bis $0,5$ zu bemessen ist. Die Entlastung kann aus einem Anschluß an einen Regenwasserkanal bestehen oder – will man 100 % ökologisch handeln – aus einer Versickerungsanlage. Beide Varianten können aufgrund der Versickerungsleistung der Pflasterfläche geringer dimensioniert werden und erzielen damit neben dem ökologischen Vorteil eine Einsparung bei den Investitionskosten.

Für den geeigneten Oberbau mit versickerungsfähiger Pflasterdecke werden die folgenden Hinweise gegeben:

Weist der Untergrund eine ausreichende Durchlässigkeit auf (entspricht der Frostepfindlichkeitsklasse F1 gemäß den ZTV E-StB), kann der Oberbau in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung nach en RStO dimensioniert werden.

Bei weniger durchlässigem Untergrund muß aufgrund der ungünstigen Wasserverhältnisse und der Frosteinwirkung nach Zone I, II oder III der Oberbau mit Mehrdicken von 10 oder 20 cm beaufschlagt werden. Aufgrund der für die Trag- und Frostschuttschichten geforderte Durchlässigkeit von mindestens $5,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ sind die in den ZTV SoB-StB genannten Baustoffgemische für Kies- und Schottertragschichten so zu wählen, daß deren Sieblinie nahe der jeweils unteren Grenzsieblinie verläuft.

Für Pflasterbettung und Fugenfüllung sollte aufgrund der im Laufe der Nutzungsdauer zu erwartenden Verschmutzung der Poren, Fugen und/oder Sickeröffnungen eine Durchlässigkeit der

Deckschicht in Abhängigkeit des versickerungsfähigen Anteils von vornherein bei mindestens $5,4 \times 10^{-4}$ m/s liegen, um eine dauerhaft hohe Versickerungsleistung zu gewährleisten.

Die Art des einzusetzenden Pflastersystems hängt neben der Versickerungsleistung maßgeblich von der zu erwartenden Verkehrsbelastung ab. Versickerungsfähige Pflastersysteme eignen sich in erster Linie für den Einsatz auf Flächen des ruhenden Verkehrs. Wenn eine Verbundwirkung entfaltet wird, können versickerungsfähige Pflasterdecken auch für den fahrenden Verkehr im Wohn- und Anliegerbereich verwendet werden. Pflastersteine aus haufwerksporigem Beton können insbesondere aufgrund der zumeist einfacheren Entwässerungsmöglichkeit (zum Beispiel in angrenzende Vegetationsflächen) und der ebenen Oberflächenstruktur vor allem im weniger belasteten Wegebau, auf Rad- und Gehwegen und im privaten Wohnumfeld eingesetzt werden.

4.7 Überwachung und Unterhaltung

Da die dauerhafte Funktionsfähigkeit einer versickerungsfähigen ausgebildeten Verkehrsfläche in erster Linie von der Qualität von Baustoff und Ausführung abhängt, kommt der baubegleitenden Überprüfung der Versickerungsleistung und Überwachung des Einbaues eine entscheidende Bedeutung zu [46]. Das M VV empfiehlt die Überprüfung der Anforderungen als Eignungsprüfung an den Baustoffen und als Kontrollprüfung an den fertig eingebauten Schichten des Oberbaues.

Die technischen Eigenschaften von Baustoffen werden nach den jeweiligen Anforderungen in den betreffenden Regelwerken in Eigen- und Fremdüberwachung kontrolliert und dokumentiert. Hinsichtlich der Anforderungen, die an die Baustoffe für die Verwendung in versickerungsfähigen Verkehrsflächen zu stellen sind, ist folgendes maßgeblich: Die Mineralstoffe, die für die jeweiligen Schichten des Oberbaues einzusetzen sind, müssen – neben den weiteren straßenbaulichen Anforderungen gemäß den einschlägigen Regelwerken – eine Durchlässigkeit aufweisen, die es erlaubt, eine örtliche Regenspende von $r_{10(0,2)}$ vollständig zu versickern. Das M VV nennt hier den pauschalen Wert von $5,4 \times 10^{-5}$ m/s. Die Prüfung erfolgt nach Vorliegen des Ausschreibungsergebnisses und Bekanntgabe des voraussichtlich liefernden Werkes anhand der ausgeschriebenen und zu liefernden Mineralstoffgemische. Die Eignungsprüfung sollte für jedes Mineralstoffgemisch im Labor mit der Versuchsanordnung nach DIN 18 130 durchgeführt werden.

Auf der Baustelle muß im Zuge der allgemeinen Baugrunderkundung zunächst die Durchlässigkeit des anstehenden Untergrundes ermittelt werden, um die Bemessung des Oberbaues, die Art der Entwässerung, die Dimensionierung weiterer Entwässerungsanlagen die Dimensionierung des Oberbaues und die Art der Entwässerung bestimmen zu können. Dies stellt in der Regel auch die Grundlage für den Genehmigungsbescheid der zuständigen Behörde dar. Zunächst kann der maßgebliche Durchlässigkeitsbeiwert annäherungsweise anhand der Bodenart nach DIN 18 196 im Zusammenhang mit einfachen Verfahren zum Benennen und Beschreiben von Böden

nach DIN 4022 Teil 1 oder aufgrund einer Sieblinienauswertung bestimmt werden. Darüber hinaus wird aber empfohlen, die Prüfung der Durchlässigkeit im Feldversuch mit dem Open-End-Test und den im M VV aufgeführten Versuchsbedingungen durchzuführen (Abbildung 25).



Abbildung 25: Versuchsaufbau nach dem Open-End-Verfahren

Zur Überwachung der Anforderungen an die Durchlässigkeit im eingebauten Zustand sollten Kontrollprüfungen ausgeschrieben werden. Dies umfaßt die einzelnen Tragschichten und die fertig eingebaute Deckschicht. Hierbei wird im Gegensatz zu den Eignungsprüfungen die Infiltrationsrate gemessen. Nach dem M VV erfolgt dies mit dem Infiltrationsgerät an maßstabsgerechten und anforderungsgerecht verdichteten Prüfflächen. Werden die Anforderungen nicht erreicht, kann den Mineralstoffgemischen und den fertigen Schichten nicht die zugesicherten Eigenschaften nachgewiesen werden und sind somit nicht abnahmefähig. Die in der Prüfung beanstandeten Mineralstoffgemische sind vom Unternehmer gegen geeignete Baustoffe auszutauschen und erneut zu prüfen. Diese Kontrollprüfungen sind vom Bauunternehmer zu beauftragen und von unabhängigen Prüfinstituten oder Baustofflabors durchzuführen.

Ist die versickerungsfähig ausgebildete Verkehrsfläche nach den genannten Anforderungen geplant, ausgeführt und überwacht worden, ist es wie bei jedem Bauwerk in der Folge dennoch unerlässlich, eine regelmäßige Kontrolle der ordnungsgemäßen Funktion durchzuführen. Während der Nutzungsdauer ist eine regelmäßig wiederholte Überwachung des Zustandes und der ordnungsgemäßen Funktion der Verkehrsfläche erforderlich. Wesentliches Augenmerk ist dabei

auf den Zustand der Fugen und der Fugenfüllung zu legen. Nur die ordnungsgemäße Beschaffenheit und die vollständige Füllung der Fugen gewährleisten neben der dauerhaften Versickerungsleistung die Standfestigkeit der Verkehrsfläche. Sind die Fugen nicht mehr vollständig gefüllt, muß unverzüglich nachgesandet werden. Andernfalls besteht die Gefahr, daß der Pflasterbelag Horizontalkräfte nicht mehr ordnungsgemäß übertragen kann. Verschiebungen und Verkantungen von Pflastersteinen wären die Folge. Weitreichende Schäden an der Fläche wären vorprogrammiert.

Bei der Reinigung von Verkehrsflächen ist grundsätzlich zu beachten, daß eine maschinelle Reinigung bei Pflasterflächen frühestens nach sechsmonatiger, besser einjähriger Liegezeit durchgeführt werden sollte, da es ansonsten aufgrund des Austrages von Fugenmaterial zu Schäden an der Verkehrsfläche kommen kann. Bei Unterhaltungsarbeiten an versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen ist aufgrund der zu verwendenden feinkornarmen Mineralstoffgemische für die Verfüllung der Fugen und Sickeröffnungen eine saugende Reinigung zu vermeiden oder das entfernte Fugenmaterial sofort zu ersetzen. Dies gilt auch bei Reinigungsverfahren durch Spülen mit Hochdruckwasserstrahl.

Aus Gründen des Grundwasserschutzes ist auf den Einsatz von Streusalzen im Winterdienst zu verzichten, da bei zu hohen Salzkonzentrationen mit der Mobilisierung von Schwermetallen im Boden zu rechnen ist. Somit ist im Winter auf versickerungsfähig ausgebildeten Verkehrsflächen mit einer Beeinträchtigung des Benutzungskomforts zu rechnen und der Verkehrssicherungspflicht besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Da es sich hierbei aber in der Regel um Flächen für den ruhenden Verkehr oder Straßenflächen mit geringer Verkehrsfrequenz und niedriger Fahrgeschwindigkeit handelt, kann auch unter dem Aspekt der Verkehrssicherheit der Winterdienst mit abstumpfenden Mitteln, wie zum Beispiel Splitt, befürwortet werden.

4.8 Ausschreibungshinweise

Für die grundlegenden Hinweise zur Ausschreibung folgt ein Beispiel zur Beschreibung der Leistungen für eine Pkw-Stellfläche der Belastungsklasse Bk0,3 mit einem versickerungsfähigen Pflastersystem mit aufgeweiteten Fugen auf einem Untergrund der Frostepfindlichkeitsklasse F2 in der Frosteinwirkungszone I gemäß den RStO:

Untergrund:

- Position Boden lösen:

Boden für Verkehrsflächen lösen, fördern und lagern. Bodenklasse [...] gemäß DIN 18300, Abtragtiefe bis [...] m, Förderweg bis [...] m. Untergrund verdichten, Verformungsmodul $E_{v2} \geq 45$ MPa. Die Mengenermittlung erfolgt nach [...] in m^3 .

Hinweise: Das zu erreichende Verformungsmodul E_{v2} ist nach DIN 18134 (Plattendruckversuch) nachzuweisen. Wird das nach den ZTV E-StB geforderte Verformungsmodul nicht erreicht, ist ein Bodenaustausch vorzunehmen. Maßnahmen zur Bodenverfestigung oder -verbesserung sind auszuschließen, da die benötigte Durchlässigkeit des Untergrundes hierdurch in der Regel nicht erreicht werden kann.

Die Durchlässigkeit des Untergrundes muß mindestens $5,4 \times 10^{-6}$ m/s betragen. Sie ist nach DIN 18130 oder vor Ort durch Infiltrationsversuche nach dem Open-End-Test nachzuweisen. Liegt die Durchlässigkeit unter dem genannten Wert, muß eine Planumsentwässerung angeordnet werden. Sie kann mit der folgenden Position ausgeschrieben werden:

- Position Sickerstrang herstellen:

Leitungsgraben für Sickerstränge herstellen, Grabenbreite [...] m, Grabentiefe [...] m, Bodenklasse [...] gemäß DIN 18300. Sickerstrang mit Geotextil [...] g/m², Durchlässigkeit [...] m/s ummanteln. Sickerrohrleitung als Vollsickerrohr aus PE-HD, DN [...] in Leitungsgraben verlegen. Verfüllung mit Filterkies der Körnung [...] mm. Die Mengenermittlung erfolgt nach [...] in m.

- Position Planum herstellen:

Planum herstellen, zulässige Abweichung von der Sollhöhe \pm [...] cm. Abrechnung in m².

Hinweis: Die vorgesehene Quer-, Längs- und Schrägneigung zur Entwässerung von Planum, Oberbau und Oberfläche ist bereits im Planum vorzusehen. Erlaubt es die vorgesehene Nutzung der Verkehrsfläche, kann die in den RAS-Ew vorgesehene Querneigung von 3 % zur Verringerung der Abflußmenge unterschritten werden.

Oberbau:

- Position Frostschutzschicht herstellen:

Frostschutzschicht gemäß den ZTV SoB-StB in Verkehrsflächen herstellen und verdichten. Verformungsmodul E_{v2} auf der Oberfläche 100 MPA. Baustoffgemisch aus frostsicherem Naturgestein, Frostschutzkies der Körnung 0/32 mm, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_f mind. $5,4 \times 10^{-5}$ m/s. Schichtdicke 34 cm. Anforderungen an die Höhenlage und Oberflächengenauigkeit \pm [...] cm. Abrechnung nach Auftragsprofilen in m³.

Hinweis: Die Schichtdicke ist gegenüber der Regeldicke gemäß Tafel 3, Zeile 1 der RStO aufgrund der Frosteinwirkungszone I in der Frostempfindlichkeitsklasse F2 mit 10 cm beaufschlagt worden.

- Position Tragschicht herstellen

Tragschicht gemäß den ZTV SoB-StB in Verkehrsflächen herstellen und verdichten. Verformungsmodul E_{v2} auf der Oberfläche 120 MPa. Baustoffgemisch aus gebrochenem Naturgestein, Schotter der Körnung [...] mm, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$ m/s. Schichtdicke 15 cm. Anforderungen an die Höhenlage und Oberflächengenauigkeit \pm [...] cm. Abrechnung nach Auftragsprofilen in m^3 .

Hinweise: Die geforderte Durchlässigkeit von mindestens $5,4 \times 10^{-5}$ m/s ist nach DIN 18130 oder vor Ort durch Infiltrationsversuche mit dem Infiltrationsgerät nachzuweisen.

Die zu erreichenden Verformungsmoduln E_{v2} sind nach DIN 18134 (Plattendruckversuch) unter der Berücksichtigung der o. g. Durchlässigkeit nachzuweisen. Dies ist in der Regel nur mit Baustoffgemischen zu erreichen, deren Sieblinie im unteren Bereich nach den Bildern 2.1 bis 2.6 in Abschnitt 2.2.4 den ZTV SoB-StB liegen. Die Verwendung von Recycling-Baustoffen ist auszuschließen.

- Position Pflasterdecke herstellen

Bettungsmaterial gemäß den TL Pflaster-StB aus natürlichen Gesteinskörnungen gemäß den TL Gestein-StB der Körnung [...] mm, filterstabil gegenüber darunterliegender Schicht, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_f mind. $5,4 \times 10^{-4}$ m/s, Dicke im verdichteten Zustand 3 bis 5 cm, ausführen.

Pflaster aus versickerungsfähigem Pflastersystem aus Beton nach DIN EN 1338, Qualität KDI, mit dauerhaft aufgeweiteten Fugen im [...] -Verband herstellen. Steinhöhe [...] mm, Format [...] \times [...] mm, Farbe: [...]. Ausführung auf Verkehrsflächen nach Bauklasse [...] gemäß den RStO. Einschließlich aller erforderlichen Randsteine liefern und fachgerecht gemäß den ZTV Pflaster-StB verlegen.

Fugenmaterial gemäß den TL Pflaster-StB aus natürlichen Gesteinskörnungen gemäß den TL Gestein-StB der Körnung [...] mm, filterstabil gegenüber dem Bettungsmaterial [möglichst gleicher Baustoff!], mit Fortschreiten der Verlegearbeiten vollständig in Fugen [und Sickeröffnungen] einfegen. Anschließend Belag abkehren und im trockenen Zustand mit geeignetem Flächenrüttler bis zur Standfestigkeit rütteln. Anschließend Fugen [und Sickeröffnungen] erneut vollständig füllen. Auf das in den ZTV Pflaster-StB vorgeschriebene Einschlämmen ist zu verzichten.

Abrechnung in m².

Hinweise: Die geforderte Durchlässigkeit von mindestens $5,4 \times 10^{-4}$ m/s ist nach DIN 18130 oder vor Ort durch Infiltrationsversuche mit dem Infiltrationsgerät nachzuweisen.

Bei verschiedenen Baustoffgemischen für Bettung und Fugenfüllung ist ein gesonderter Nachweis der Filterstabilität nach der Filterregel gemäß den ZTV Pflaster-StB vorzusehen.

Die Ausschreibungshinweise für andere versickerungsfähige Pflastersysteme oder andere Bauklassen bei anderen Frostempfindlichkeitsklassen und Frostempfindlichkeitszonen gelten unter Beachtung der jeweiligen Verformungsmoduln, Schichtdicken und Baustoffgemische und unter Beibehaltung der genannten Durchlässigkeitswerte analog.

5 Anhänge

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserwirtschaftliche Effekte einer umweltgerechten Bewirtschaftung von Regenwasser	5
Abbildung 2: Versickerungsmulde	7
Abbildung 3: Versickerungsfähige Pflasterbeläge mit Überlauf in Versickerungsmulde	9
Abbildung 4: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum Öffnungsanteil im Neuzustand.....	14
Abbildung 5: Korrelation zwischen Durchlässigkeit und Feinanteilen in Fugenmaterialien	15
Abbildung 6: Infiltrationsgerät	17
Abbildung 7: Schematischer Verlauf von i und k_f während des Infiltrationsvorgangs	18
Abbildung 8: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum Verfüllmaterial von Fugen und Sickeröffnungen	20
Abbildung 9: Prozentuale Abnahme der Infiltrationsleistung im Laufe der Nutzungsdauer	21
Abbildung 10: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zu verschiedenen Altersstufen nach Pflasterarten.....	22
Abbildung 11: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum Alter bei Pflaster mit Sickeröffnungen (Splitt 2/5 mm).....	22

Abbildung 12: Beispielhafte Testfläche mit Referenzprodukt	24
Abbildung 13: Sieblinien und Durchlässigkeit der getesteten Fugenmaterialien des Referenzprodukts.....	24
Abbildung 14: Verlauf der Versickerungsleistung mit zunehmenden Alter am Referenzprodukt	25
Abbildung 15: Infiltrationsleistung verschiedener Altersgruppen.....	27
Abbildung 16: Infiltration Process Model bei versickerungsfähigem Pflaster je % Öffnungsanteil mit Splitt 2/5 mm	28
Abbildung 17: Infiltration Process Model bei versickerungsfähigem Pflaster je % Öffnungsanteil mit Splitt 1/3 mm	28
Abbildung 18: Infiltration Process Model bei versickerungsfähigem Pflaster je % Öffnungsanteil mit Sand 0/2 mm.....	29
Abbildung 19: Beispiel für den Aufbau einer mit Betonpflasterdecke befestigten Verkehrsfläche unter Verkehrsbelastung mit den dazugehörigen wesentlichen Regelwerken [36], [37].....	35
Abbildung 20: Prinzipskizze einer Planumsentwässerung.....	36
Abbildung 21: Haufwerksporiger Betonpflasterstein	40
Abbildung 22: Pflaster mit Sickeröffnungen	41
Abbildung 23: Pflaster mit aufgeweiteten Fugen	42
Abbildung 24: Regelaufbau für eine versickerungsfähige Pflasterbauweise.....	48
Abbildung 25: Versuchsaufbau nach dem Open-End-Verfahren.....	50

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Infiltrationsleistung in Abhängigkeit zum prozentualen Öffnungsanteil	27
Tabelle 2: Durchlässigkeit von Baustoffgemischen zur Fugenverfüllung (nach [29]).....	29
Tabelle 3: Verkehrsflächen für den Einsatz versickerungsfähiger Pflasterbauweisen aus der Sicht des Schutzes von Boden und Grundwasser	33
Tabelle 4: Anforderungen an Tragschichten bei versickerungsfähigen Pflasterbauweisen [34], [39].....	37

Tabelle 5: Mehr- oder Minderdicken des Oberbaues [cm] infolge örtlicher Verhältnisse [4]	38
Tabelle 6: Erforderliche Oberbaudicke für versickerungsfähige Bauweisen	38
Tabelle 7: Einsatzbereiche für versickerungsfähige Pflasterdecken mit Angabe von geeigneten Pflastersystemen.....	43
Tabelle 8: Durchlässigkeit von Gesteinskörnungen und Gesteinskörnungsgemischen [28]	45

5.3 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (Hrsg.): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Arbeitsblatt A 138. Fassung August 2008.
- [2] Abwassertechnische Vereinigung e.V. – ATV (Hrsg.): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik – Band I: Wassergüterwirtschaftliche Grundlagen, Bemessung und Planung von Abwasserableitungen.3., überarbeitete Auflage. Ernst Verlag, Berlin 1982.
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil Entwässerung (RAS-Ew). Ausgabe 2005.
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen - RStO 12. Ausgabe 2012.
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen – M VV. Ausgabe 2013.
- [6] Nisipeanu, P.: Die wasserrechtliche Beurteilung der Versickerung von Niederschlagswasser aus durchlässigen Verkehrsflächen. Natur und Recht 15 (1993). Heft 9, S. 407-419.
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen. Ausgabe 1998.
- [8] Deutscher Wetterdienst – DWD (Hrsg.): Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland. Offenbach 1995.
- [9] Borgwardt, S.: Die Versickerung auf Pflasterflächen als Methode der Entwässerung von minderbelasteten Verkehrsflächen. Heft 41 der Schriftenreihe "Beiträge zur räumlichen Planung", hrsg. vom Fachbereich Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover. Hannover 1995.

- [10] Breuste, J., T. Keidel, G. Meinel, B. Münchow, M. Netzband und M. Schramm: Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben. Hrsg. vom Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH – UFZ Nr. 12 (1996).
- [11] Berner U., und R. Floss: Anforderungen an die Durchlässigkeit von ungebundenen Trag-schichten. Heft 619 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik". Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau. Bonn 1991.
- [12] Hanes, U., T. Hofmann und G. Wolf: Versuche an einer Testfläche mit wasserdurchlässigem Pflasterbelag. Bericht über das Forschungs- und Entwicklungsprojekt, Fachbereich Bauingenieurwesen der Fachhochschule Coburg. Bayerische Forschungstiftung 1997.
- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. – FGSV (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB. Ausgabe 2004.
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. – FGSV (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – TL SoB-StB. Ausgabe 2004.
- [15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. – FGSV (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen – TL Pflaster-StB. Ausgabe 2006.
- [16] Shackel, B.: Wasserdurchlässigkeit und Bewertung der Tragfähigkeit sickerfähiger Öko-Pflaster. Beton + Fertigteil-Jahrbuch 1998, S. 329-337. 46. Ausgabe. Bauverlag, Wiesbaden 1998.
- [17] Borgwardt, S.: Naturnahe Bewirtschaftung von Niederschlagswasser mit versickerungsfähigen Pflastersystemen aus Beton. Beton + Fertigteil-Jahrbuch 1998, S. 313-328. 46. Ausgabe. Bauverlag, Wiesbaden 1998.
- [18] Suda, S., S. Yamanaka, O. Kodama, M. Hata und T. Kunimura: Development and application of permeable paving concrete block. In: Concrete Block Paving. Tagung vom 17.-19.5.1988 in Rom, S. 130-136.
- [19] Field, R., H. Masters und M. Singer: Porous pavement: research; development; and demonstration. Transportation Engineering Journal of ASCE, New York 108 (1982). Heft 3, S. 244-258.
- [20] Hade, J.D. und D.R. Smith: Permeability of concrete block pavements. In: Concrete Block Paving. Tagung vom 17.-19.5.1988 in Rom, S. 217-223.
- [21] Springborn, M.: Langzeiterfahrungen mit zwei Dränasphaltversuchsstrecken im Zuge der BAB A 103 in Berlin. Straße und Autobahn 44 (1993), Heft 4, S. 202-212.

- [22] Wichter, L.: Anforderungen an Wasserdurchlässigkeit und die erforderliche unterirdische Entwässerung mit wasserdurchlässigen Pflaster- und Plattenbelägen. Abschlußbericht zum Forschungsauftrag FE-Nr. 06.059 G91D der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Cottbus 1997 (unveröffentlicht).
- [23] Beeldens, A., S. Perez and O. De Myttenaere, 2009: Water Permeable Pavements in Belgium. From Research Project to Real Application. *Proceedings of the 9th International Conference on Concrete Block Paving*. Buenos Aires, Argentina.
- [24] Pezzaniti, D., S. Beecham and J. Kandasamy, 2009: Influence of Clogging on the Effective Life of Permeable Pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management*. 211-220.
- [25] Lucke, T. and S. Beecham, 2011: Field Investigation of Clogging in a Permeable Pavement System. *Building Research & Information* 39. 603-615.
- [26] Fassmann, E., S. Blackbourne, 2010: Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. *Journal of Hydrological Engineering* 15. 475-485.
- [27] Boogaard, F., T. Lucke and S. Beecham, 2014: Effect of Age of Permeable Pavements on Their Infiltration Function. *Clean – Soil, Air Water* 42. 146-152.
- [28] Borgwardt, S.: Versickerungsfähige Verkehrsflächen. Teil 2: Messungen und Umsetzung. Stadt und Grün 49 (2000). Heft 10, S. 666-675.
- [29] Borgwardt, S.: Long-term In-situ Infiltration Performance of Permeable Concrete Block Pavement. Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving November 6-8, 2006; San Francisco, California, USA.
- [30] Borgwardt, S.: Hinweise für die Planung, Ausführung und Pflege von begrünbaren Pflasterbelägen. Stadt und Grün 45 (1996). Heft 12, S. 860 - 864.
- [31] Borgwardt, S.: In-Situ Infiltration Performance of Permeable Concrete Block Pavement – New Results. Proceedings of the 11th International Conference on Concrete Block Paving September 9-11, 2015, Dresden.
- [32] Beier, H.-E.: Entsiegelungswirkung verschiedener Oberbauarten, modellhaft an einem Parkplatz in Abhängigkeit von Witterungsverlauf und Nutzung. In: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. – FLL (Hrsg.): Entsiegelung und Oberflächenwasserversickerung mit durchlässigen Platten- und Pflasterbelägen, S. 66-78. Troisdorf 1996.
- [33] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (Hrsg.): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser – Merkblatt M 153. Fassung August 2007.

- [34] Borgwardt, S., A. Gerlach und M. Köhler: Kommentierung zum FGSV-Merkblatt für wasser-durchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen. Hrsg. von der SLG – Fachvereinigung für Straßen-, Landschafts- und Gartenbau e.V., Bonn 2001.
- [35] Shackel, B.: Handbuch Betonsteinpflaster - Bemessung, Konstruktion, Ausführung. Beton-Verlag, Düsseldorf 1996.
- [36] Ulonska, D.: Planung und Ausführung dauerhafter Betonpflasterbauweisen. Sonderdruck aus BDB Report, Ausgabe 2/2000. Bonn 2000.
- [37] Wellner, F., M. Köhler und D. Ulonska: Dauerhafte Verkehrsflächen mit Betonpflastersteinen. Hrsg.: Informationsstelle Beton-Bauteile, Bonn 1997.
- [38] Stecker, A.: Open-End-Test zur Feldmessung der Infiltrationsrate. Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 33, 1995.
- [39] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – ZTV SoB-StB 04. Fassung 2004.
- [40] Deutsches Institut für Normung e.V. - DIN (Hrsg.): DIN 18130 – Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Teil 1: Laborversuche. Ausgabe November 1989.
- [41] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau - ZTVE-StB 09. Fassung 2009.
- [42] Drinkgern, G.: Dränbeton - Aufbau, Eigenschaften und Anwendung. Heft 3 der Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. Betonverlag, Düsseldorf 1988.
- [43] Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V. - BDB (Hrsg.): Richtlinie für die Herstellung und Güteüberwachung von wasserdurchlässigen Pflastersteinen aus haufwerksporigem Beton. Überarbeitete Fassung April 1996.
- [44] Beyer, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. wwt-Wasserwirtschaft/Wassertechnik 14 (1964). Heft 6, S. 165-168.
- [45] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen – ZTV Pflaster-StB 06. Ausgabe 2006.
- [46] BORGWARDT, S.: Kontrollierter Einbau von wasserdurchlässigen Belägen. Beton + Fertigteil-Jahrbuch 1999, S. 95-102. 47. Ausgabe. Bauverlag, Wiesbaden 1999.

6 Zur Person

Dr. Sönke Borgwardt, Freischaffender Landschaftsarchitekt, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger

Studium der Landschaftsarchitektur an der Universität Hannover; von 1991 bis 1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur; Promotion zum Thema „Die Versickerung auf Pflasterflächen als Methode der Entwässerung von minderbelasteten Verkehrsflächen“; seit 1992 freiberuflich beratend, gutachterlich und planerisch tätig; seit 1998 im Bereich Qualitätssicherung und Zertifizierung für Pflasterbauarbeiten als Sachverständiger und Auditor tätig; 2003 bis 2008 auch Geschäftsführer des Vereins „Qualitätssicherung Pflasterbauarbeiten e.V.“.

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger der Industrie- und Handelskammer zu Lübeck für das Sachgebiet Garten- und Landschaftsbau.

Lehrauftrag für das Fach Verkehrsplanung an der FH Hannover 1994 bis 2006;

2002 Gastprofessur für das Fach Landschaftsarchitektur/Technik an der Universität Kassel.

Mitglied der Architekten- und Ingenieurkammer Schleswig-Holstein, der Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) und der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL).

Autor u.a. der Fachbücher: „Versickerungsfähige Verkehrsflächen – Anforderungen, Einsatz und Bemessung“, „Kommentierung zum FGSV-Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen“, „Planung und Ausführung von Pflasterbelägen aus Beton - Grundlegender Einsatz und neueste Entwicklungen in Sonderbereichen“, „Rinnensysteme zur Oberflächenentwässerung – Einsatzbereiche, Planung und Anwendung“, „Bodenverdichtung – Grundlagen, Geräte, Prüfverfahren“.

Dr. Sönke Borgwardt, Büro BWB Norderstedt

Winsener Straße 9, 24568 Kattendorf

Mail: info@bwb-norderstedt.de

www.bwb-norderstedt.de