

## Einfluss der Tragfähigkeit auf die Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel

FA 6.086

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Wolf, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Oktober 2011

### 1 Aufgabenstellung

#### 1.1 Einleitung und Problemstellung

Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) sind heute als Kies- oder Schottertragschichten und/oder Frostschutzschichten Bestandteil nahezu jeder Straßenbefestigung. Für diese Tragschichten wird in den Regelwerken des Straßenbaus (z. B. ZTV SoB-StB, ZTV Pflaster-StB) neben einer ausreichenden Tragfähigkeit auch eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit gefordert. Während die Forderung nach ausreichender Tragfähigkeit je nach Bauweise, Bauklasse und Schichtdicke in konkreten Anforderungen an den  $E_{v2}$ -Wert ihren Ausdruck findet, gibt es derartig konkrete Forderungen für die Wasserdurchlässigkeit bisher nicht. Dies liegt einerseits daran, dass die Prüfung dieser Eigenschaft noch nicht verbindlich geregelt ist. Andererseits liegen kaum Erkenntnisse vor, was für welche Bauweise unter "ausreichend durchlässig" zu verstehen wäre und welche Wasserdurchlässigkeiten mit ToB unter Praxisbedingungen überhaupt erzielt werden können.

Auch bei der Herstellung der ToB orientieren sich die Anforderungen hauptsächlich an den Zielgrößen Tragfähigkeit und Verdichtungsgrad. So soll nach den ZTV SoB-StB [1] ein für den Einbau (Vermeidung von Entmischung) und die Verdichtung (geringer Verdichtungswiderstand) günstiger Wassergehalt gewählt werden. Als Abnahmekriterien werden an der fertigen Schicht neben den geometrischen Parametern (z. B. Ebenheit) vor allem die Eigenschaften Tragfähigkeit, Verdichtungsgrad und Korngrößenverteilung, letztere als Hilfskriterium für die Frostunempfindlichkeit, geprüft. Der Eigenschaft Wasserdurchlässigkeit wird hingegen kaum Aufmerksamkeit zuteil; es wird allgemein vorausgesetzt, dass bei Einhaltung der vorgegebenen Korngrößenverteilung eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit gewährleistet ist. Wie Schäden, vor allem an Oberbauten mit Pflasterdecken oder Plattenbelägen immer wieder zeigen, ist jedoch eine schnelle und ungehinderte Wasserabführung aus dem Oberbau auch bei Einhaltung der vorgegebenen Korngrößenverteilung in den Tragschichten nicht immer gegeben.

Dass für die Lebensdauer einer Verkehrsfläche die beiden Eigenschaften Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit der ToB von großer Bedeutung sind, ist heute ebenso unstrittig wie die Tatsache, dass die beiden Eigenschaften in einem gewissen Konflikt miteinander stehen. Zunehmend werden deshalb die Anforderungen an die Verformungsmoduln der ToB kontrovers diskutiert, wobei insbesondere die Notwendigkeit der in den ZTV SoB-StB geforderten  $E_{v2}$ -Werte  $\geq 180 \text{ MN/m}^2$  und deren Vereinbarkeit mit der Forderung nach einer ausreichenden Wasserdurchlässigkeit immer wieder in Frage gestellt werden.

#### 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften Wasserdurchlässigkeit und Tragfähigkeit von ToB zu finden. Dabei sollen Abhängigkeiten dieser beiden Parameter von anderen Eigenschaften, wie z. B. Korngrößenverteilung, Kornform und Sandtyp sowie Verdichtungswassergehalt und Verdichtungsgrad aber auch Einwirkungen aus Bauverkehr untersucht werden. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge und Abhängigkeiten soll dazu beitragen, die Baustoffgemische und deren Einbau dahingehend zu optimieren, dass die eigentlich konträren Forderungen nach einer hohen Tragfähigkeit und einem hohen Verdichtungsgrad auf der einen Seite und einer hohen Wasserdurchlässigkeit auf der anderen Seite vereinbart werden können. Eine weitere Zielsetzung besteht darin, die Eignung der Prüfverfahren Doppelring-, Tropf- und Standrohr-Infiltrometer zur Bewertung der Wasserdurchlässigkeit von eingebauten ToB zu beurteilen.

### 2 Untersuchungsmethodik

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in folgende Teilkomplexe:

- Untersuchung und Auswahl, ggf. Modifizierung der Prüfverfahren Doppelring-Infiltrometer, Tropf-Infiltrometer und Standrohr-Infiltrometer zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit eingebauter ToB,
- Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit von ToB auf zwei Versuchsstrecken.

Die Untersuchungen zur Eignung der Infiltrationsprüfverfahren wurden auf acht Schottertragschichten in einem Freiluft-Lysimeter durchgeführt. Um die Aussagekraft der Einzelversuche bewerten zu können, wurde zunächst die Durchlässigkeit eines jeden Messfelds mit Feldberechnungsversuchen ermittelt ( $k_{i, \text{Lys}}$ ). Anschließend wurden auf jedem der acht untersuchten Felder jeweils sechs Infiltrationsmessungen mit dem Doppelring-Infiltrometer und dem Tropf-Infiltrometer durchgeführt. Auf vier Feldern wurde außerdem das modifizierte Standrohr-Infiltrometer eingesetzt. Die weiteren Untersuchungen fanden auf zwei Versuchsstrecken in Schotterwerken statt (Werk 1: Grauwacke/Werk 2: Granodiorit). Dabei sollten die Auswirkungen der baustofftechnischen und bautechnologischen Unterschiede auf die Eigenschaften der ToB im Neuzustand ermittelt werden. Im weiteren Verlauf wurde untersucht, wie sich diese Eigenschaften durch Beanspruchung durch Bauverkehr verändern. Die variierten Parameter sind in den Bildern 1 und 2 dargestellt.

Auf der Versuchsstrecke 1 wurden insgesamt drei Messkampagnen durchgeführt (Neuzustand, nach etwa 1000 Lkw-Überfahrten und nach weiteren etwa 900 Lkw-Überfahrten, davon jeweils die Hälfte Leerfahrten).

Auf der Versuchsstrecke 2 wurden insgesamt vier Messkampagnen durchgeführt (Neuzustand sowie dreimal nach jeweils etwa 750 Lkw-Überfahrten, davon je die Hälfte Leerfahrten).

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zur Eignung der Infiltrometer im Lysimeter sind im Bild 3 zusammengefasst. Die Mittelwerte der mit den Infiltrometern auf einem Feld gemessenen Infiltrationsbeiwerte  $k_i$  sind dem jeweiligen Infiltrationsbeiwert  $k_{i, \text{Lys}}$  des Felds gegenübergestellt. Ein Großteil der Mittelwerte liegt unterhalb der Korrelationslinie. Das heißt, dass die mit den Infiltrometern ermittelten Infiltrationsbeiwerte i. d. R. niedriger sind, als der im Lysimeterversuch ermittelte Infiltrationsbeiwert  $k_{i, \text{Lys}}$  für das jeweilige Feld. Eine Erklärung für diese system-

## Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen

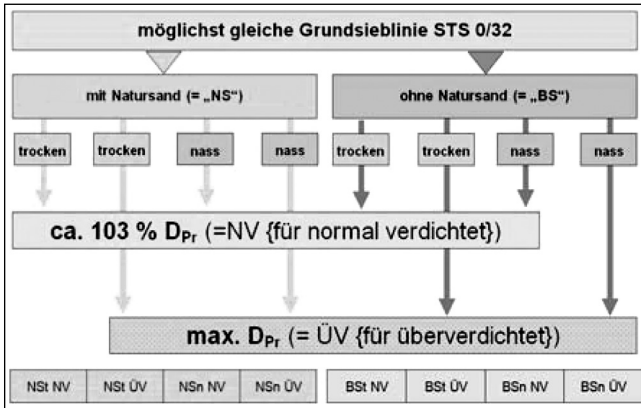


Bild 1: Parameter der Versuchsstrecke 1 (Grauwacke)

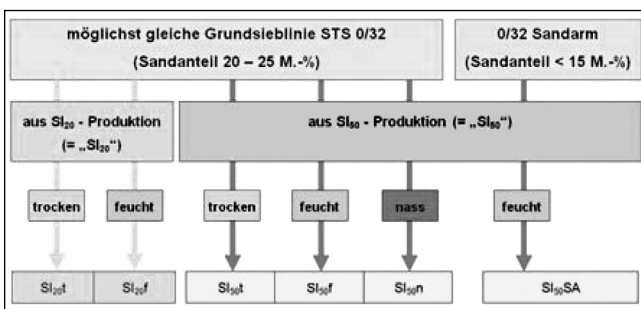


Bild 2: Parameter der Versuchsstrecke 2 (Granodiorit)

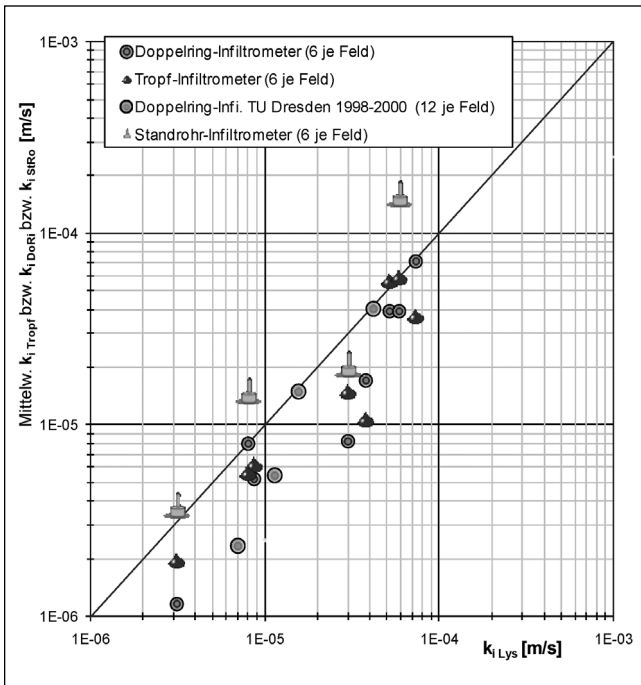


Bild 3: Lysimeterversuche: Gegenüberstellung der Mittelwerte der Infiltrationsmessungen MW  $k_{i \text{ Tropf}}$ , MW  $k_{i \text{ DoRi}}$  und MW  $k_{i \text{ StRo}}$  mit den Felddurchlässigkeiten  $k_{i \text{ Lys}}$

matische Abweichung ist, dass beim Lysimeterversuch Randumläufigkeiten zwischen den Baustoffgemischen und der Betonwand des Lysimeters nicht vollständig vermieden werden konnten, wodurch die  $k_{i \text{ Lys}}$ -Werte zumindest teilweise etwas zu hoch sind. Insgesamt zeigen aber die Messergebnisse aller Infiltrationsverfahren eine zufrieden stellende Korrelation mit den im Beregnungsversuch ermittelten Infiltrationsbeiwerten  $k_{i \text{ Lys}}$ . Das heißt, mit allen drei Infiltrometern lassen sich recht zuverlässige Aussagen zur tatsächlichen Wasserdurchlässigkeit einer ToB treffen.

Vergleicht man die Mittelwerte der drei Infiltrometer je Feld miteinander, so zeigt sich, dass mit dem Standrohr-Infiltrometer immer der höchste Infiltrationsbeiwert gemessen wird. Ursache dafür sind die besonderen Messbedingungen beim Standrohr-Infiltrometer. Im Unterschied zum Tropf- und zum Doppelping-Infiltrometer arbeitet das Standrohr-Infiltrometer ohne Bewässerung der Messumgebung und mit vergleichsweise großer Druckhöhe. Dadurch fließt ein Teil des Wassers, um Druckausgleich bemüht, auf kürzestem Wege neben der Dichtung wieder aus der Oberfläche der ToB heraus. Dies macht sich umso deutlicher bemerkbar, je durchlässiger die ToB ist.

Für die Untersuchungen auf den Versuchsstrecken wurden die Baustoffgemische so konzipiert und eingebaut, dass sich die vermuteten bzw. im Labor nachgewiesenen Abhängigkeiten der Wasserdurchlässigkeit oder der Tragfähigkeit von Parametern wie z. B. Korngrößenverteilung, Verdichtungswassergehalt oder Verdichtungsintensität nachweisen lassen sollten. Ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt. Die Bilder 4 und 5 zeigen die Verformungsmodul  $E_{v2}$  und die Infiltrationsbeiwerte  $k_{i \text{ DoRi}}$ , gemessen mit dem Doppelping-Infiltrometer jeweils als Mittelwerte je Versuchsfeld im Neuzustand (nach Einbau und Verdichtung) sowie jeweils nach den Bauverkehrszyklen. Die unten dargestellten Balken sind gegen die linke y-Achse aufgetragen ( $E_{v2}$ -Wert, nach oben ansteigend), die oben dargestellten Balken sind gegen die rechte y-Achse abgetragen ( $k_{i \text{ Lys}}$ -Wert, nach unten hin abnehmend).

Es zeigt sich, dass eindeutige Abhängigkeiten der Tragfähigkeit oder der Wasserdurchlässigkeit von den variierten Parametern nicht erkennbar sind. So wurde z. B. vermutet, dass die Verwendung von Natursand einen positiven Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit hat und eventuell niedrigere Tragfähigkeiten hervorbringt. Ebenso wurde aus den Beobachtungen auf diversen Baustellen die Vermutung abgeleitet, dass eine sehr intensive Verdichtung ("Überverdichtung") zu einer niedrigen Durchlässigkeit und einer hohen Tragfähigkeit führt. Beide Vermutungen wurden durch die Versuchsreihen nicht bestätigt. Die Verdichtungswassergehalte in den Versuchsfeldern wurden variiert ("trocken, feucht, nass"), weil aus Laborversuchen bekannt war, dass die Wasserdurchlässigkeit von Probekörpern mit gleicher Dichte (und gleichem Porenanteil) vom Verdichtungswassergehalt abhängt, mit dem die Proben eingebaut worden sind. Auch dieser Einfluss ließ sich unter Feldbedingungen nicht nachweisen.

In den Bildern 4 und 5 ist außerdem erkennbar, dass sich die Eigenschaften Tragfähigkeit (Verformungsmodul) und Wasserdurchlässigkeit (Infiltrationsbeiwert) durch Befahrung mit Baufahrzeugen (in diesem Fall Lieferverkehr) ändern. Exemplarisch wird dies für die Versuchsstrecke 2 im Bild 6 gezeigt, wobei hier nicht mehr nach dem Verdichtungswassergehalt unterschieden wird. Die Einzelwerte  $E_{v2}$  sind als Punkte gegen die linke y-Achse abgetragen, die Einzelwerte  $k_{i \text{ Lys}}$  als Kreuze gegen die rechte y-Achse. Die Ergebnisse werden für die vier Messkampagnen dargestellt (x-Achse), wobei zur Veranschaulichung die Anzahl der Lkw-Überfahrten in ein dementsprechendes Betondeckenäquivalent umgerechnet wurde (entspricht der Menge an geliefertem Frischbeton für eine durchschnittliche Betondeckenbaustelle).

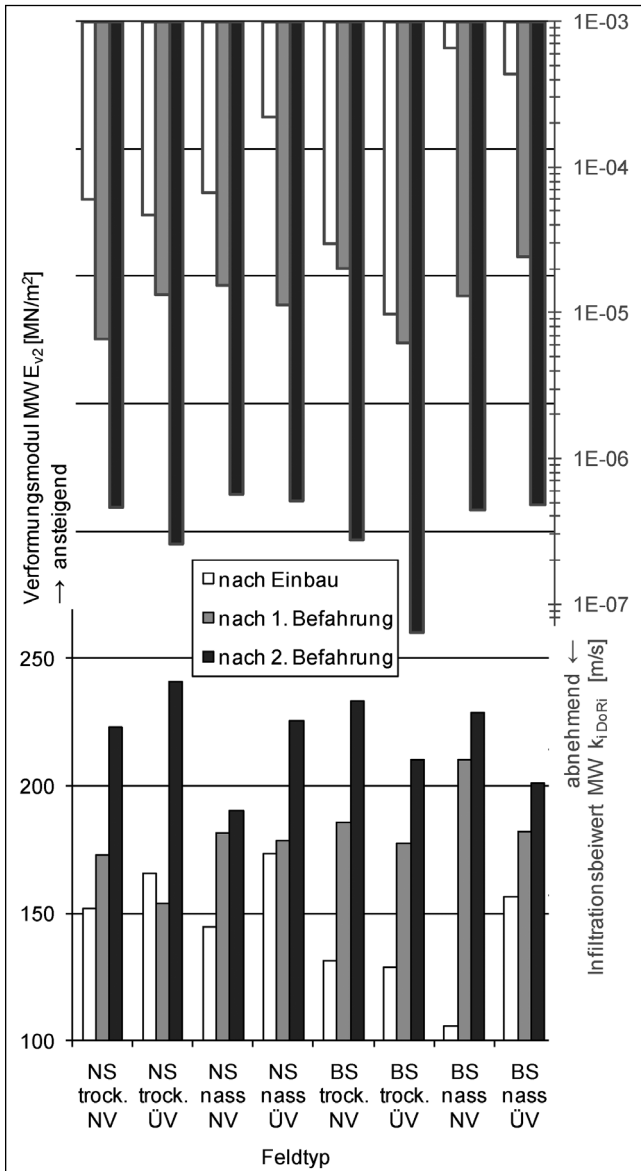


Bild 4: Verformungsmodul  $E_{v2}$  und Wasserdurchlässigkeit  $k_i$  der einzelnen Versuchsfelder zu verschiedenen Zeitpunkten (drei Zustände der Versuchsstrecke 1)

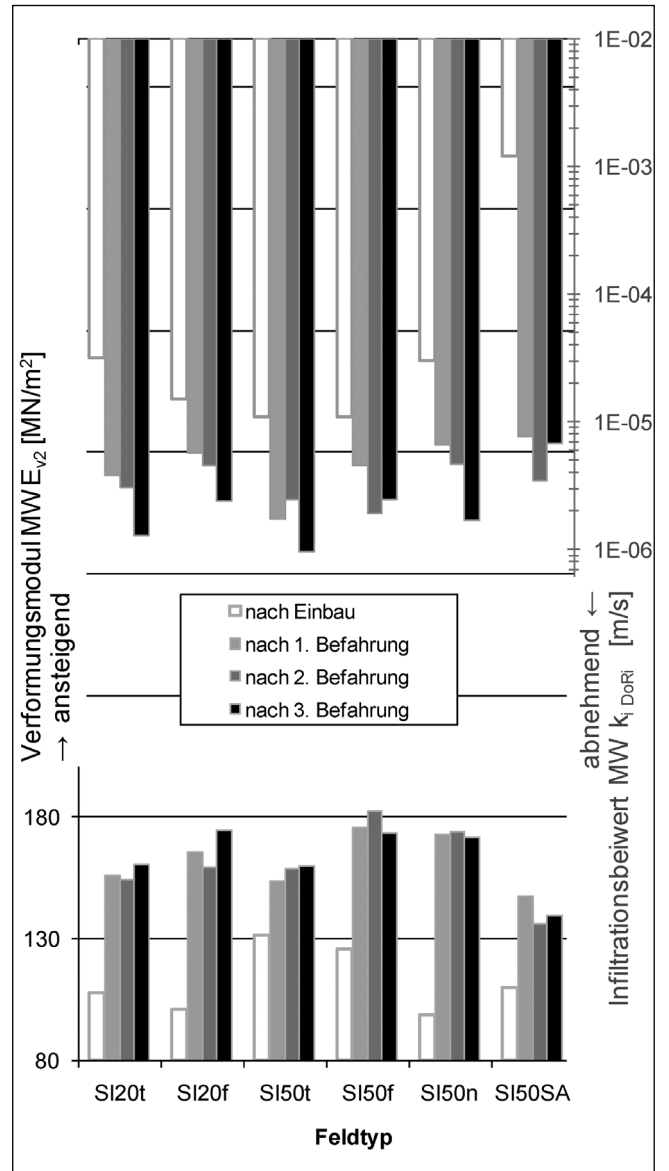
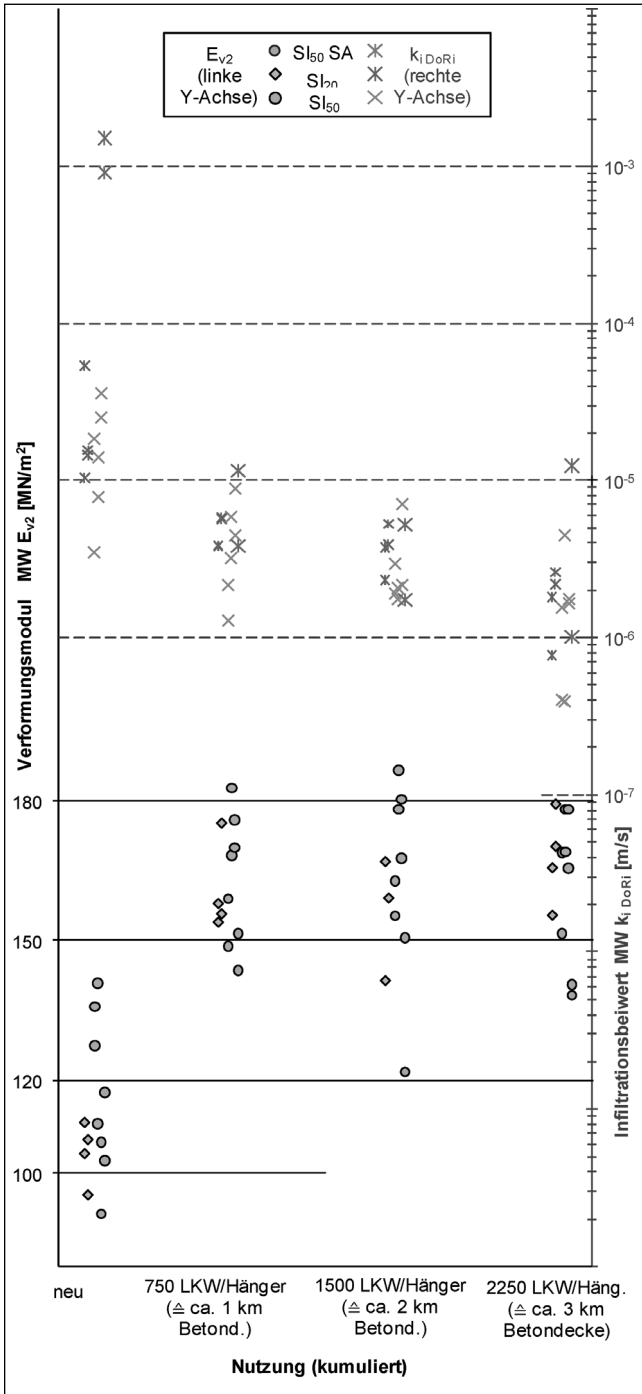


Bild 5: Verformungsmodul  $E_{v2}$  und Wasserdurchlässigkeit  $k_i$  in Abhängigkeit vom Zustand der Versuchsstrecke 2

Nach Tabelle 8 der RStO 01 hätten mit den hier herrschenden Bedingungen ( $E_{v2}$  Unterlage  $\approx 65 \text{ MN/m}^2$  und Schichtdicke 24 bis 27 cm) im Neuzustand  $E_{v2}$ -Werte zwischen 130 und 150  $\text{MN/m}^2$  erreicht werden können. Mit dem hier verwendeten Walzenzug (10,3 Tonnen) wurden diese Werte nur zum Teil erreicht. Es zeigt sich aber, dass bereits innerhalb des ersten Befahrungszyklus die Verformungsmoduln aller Felder deutlich zunehmen und dabei das Erwartungsniveau nach RStO erreichen. Die knetende Wirkung der Lkw-Reifen führt hier offenbar zu einer Nachverdichtung und einer zunehmenden Verspannung der Gesteinskörner untereinander. Dies wird im Bild 7 deutlich. Obwohl sicherlich die Ermittlung des Porenanteils bedingt durch die Ungenauigkeit der Bestimmung der Trockendichte (Densitometerverfahren) mit Fehlern behaftet ist, zeigt sich hier zumindest tendenziell, dass der Porenanteil innerhalb des ersten Befahrungszyklus durch die knetende Wirkung abnimmt. Dies ist eine Ursache dafür, dass sich die Wasserdurchlässigkeit verschlechtert (siehe Bild 6).

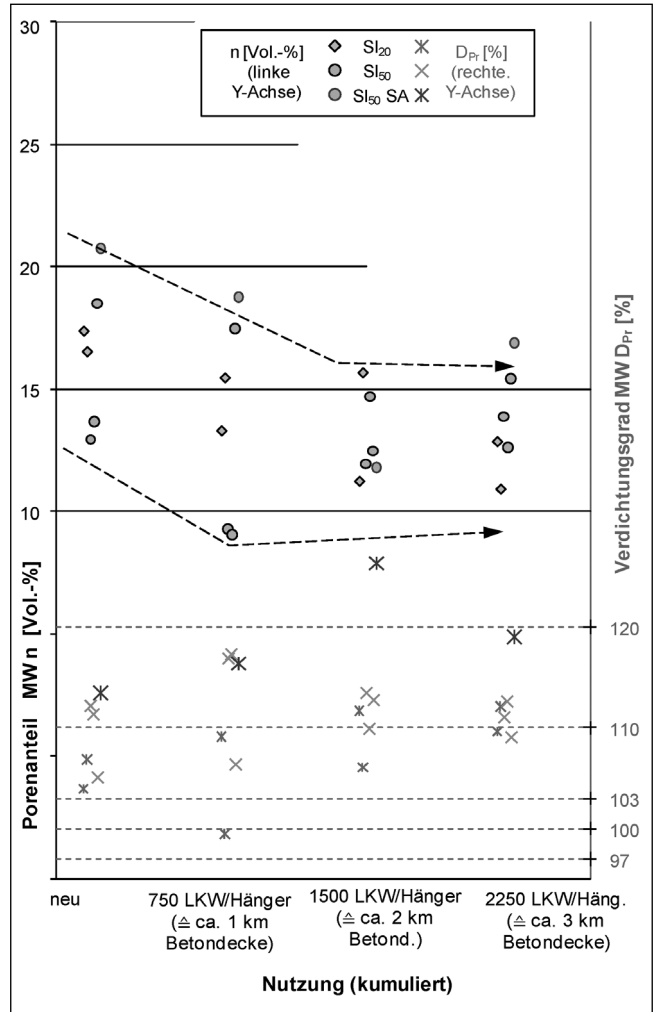
Dabei ist zu beobachten, dass auch die anfänglich sehr hohe Durchlässigkeit der ToB mit niedrigem Sandanteil (SI<sub>50</sub>SA,  $k_i \approx 10^{-3} \text{ m/s}$ ) auf ein Niveau abfällt, das etwa den übrigen Baustoffgemischen entspricht. Es ist außerdem festzustellen, dass die Verformungsmoduln nach dem Anstieg innerhalb des ersten Befahrungszyklus im weiteren Verlauf keine wesentlichen Steigerungen mehr erfahren. Dies ist auch bei den Porenanteilen der Fall – hier findet keine messbare Abnahme mehr statt (Bild 7). Dagegen ist bei der Durchlässigkeit zumindest die Tendenz zu erkennen, dass durch weitere Nutzung eine weitere Abnahme des Infiltrationsbeiwerts  $k_i$  stattfindet. Die vergleichende Untersuchung der Korngrößenverteilungen zeigte, dass bei allen Baustoffgemischen eine Kornverfeinerung durch Bauverkehr stattgefunden hat, und dies umso ausgeprägter, je sandärmer das Baustoffgemisch zuvor war. Diese Verfeinerung ist eine weitere Ursache für die Verschlechterung der Wasserdurchlässigkeit. Während die Abnahme der Porenanteile und der Anstieg der Verformungsmoduln degressiv verlaufen, also während der Befahrungszyklen irgend-



**Bild 6: Verformungsmodul  $E_{v2}$  und Wasserdurchlässigkeit  $k_{i DoRi}$  in Abhängigkeit vom Zustand der Versuchsstrecke 2 (Einzelwerte, ohne Unterscheidung nach  $W_{Verd.}$ )**

wann kaum noch ab- bzw. zunehmen, schreitet die Kornverfeinerung stetig voran, bis die Sieblinien die Form einer Fullerkurve annehmen. Dies ist die Ursache dafür, dass die Wasserdurchlässigkeit durch Bauverkehr stetig abnimmt.

Die Einflüsse der Parameter Kornform, Korngrößenverteilung, Sandtyp oder Verdichtungswassergehalt sind unter Praxisbedingungen vergleichsweise gering oder verlieren unter dem Einfluss des Bauverkehrs schon nach kurzer Zeit an Relevanz. Im Bild 8 sind ohne Berücksichtigung der o. g. Parameter alle auf den Versuchsstrecken je Feld und Zustand gemessenen Mittel-



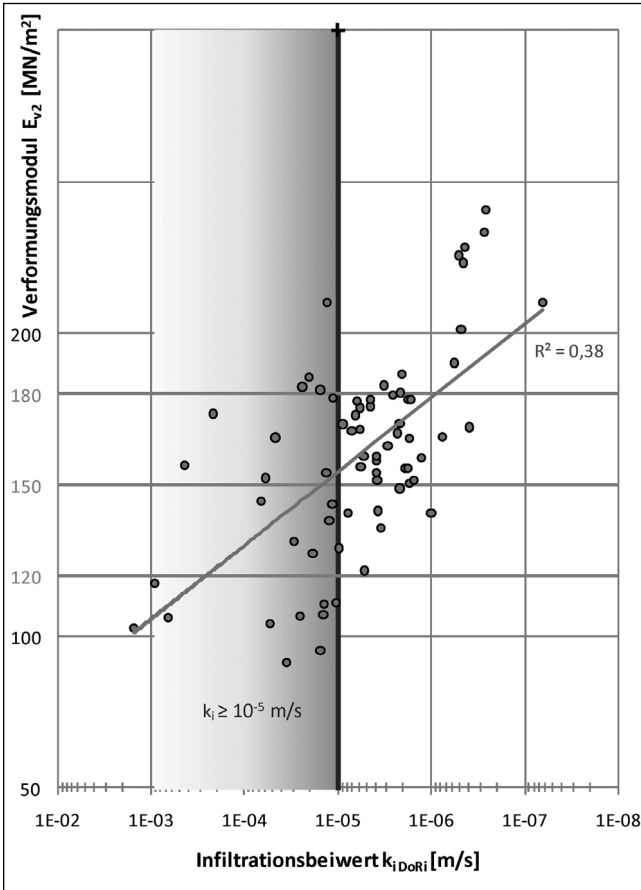
**Bild 7: Porenanteil  $n$  und Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  in Abhängigkeit vom Zustand der Versuchsstrecke 2 (Einzelwerte, ohne Unterscheidung nach  $W_{Verd.}$ )**

werte für  $E_{v2}$  und  $k_{i DoRi}$  zusammenfassend gegenübergestellt. Es zeigt sich als unscharfer Trend, dass mit zunehmendem  $E_{v2}$ -Wert die Wasserdurchlässigkeit abnimmt. Die Streuung der Wertepaare soll nun verringert werden, indem jene Faktoren Berücksichtigung finden, die die Verformungsmoduln, nicht aber die Durchlässigkeit beeinflussen (Schichtdicke und Qualität der jeweiligen Unterlage).

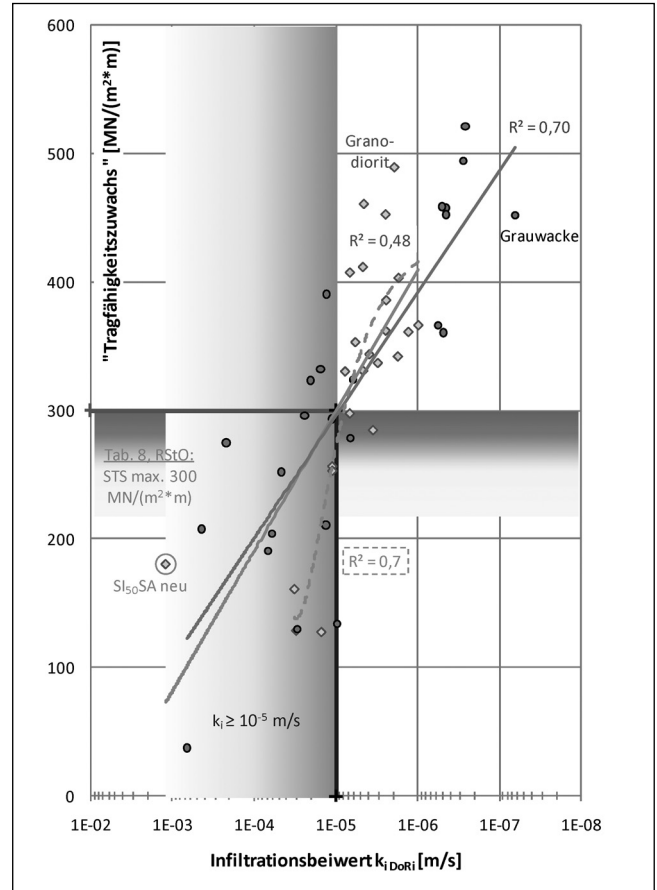
Ausgehend vom Verformungsmodul der Unterlage der jeweiligen Versuchsstrecke ( $E_{v2 Unterl.}$ ) und der Schichtdicke des jeweiligen Versuchsfeldes ( $d_{ToB}$ ) werden die gemessenen Verformungsmoduln ( $E_{v2 ToB}$ ) nach folgender Gleichung in einen Zuwachs des Verformungsmoduls  $E_{v2}$  umgerechnet:

$$\frac{E_{v2 ToB} - E_{v2 Unterl.}}{d_{ToB}} = \text{“Tragfähigkeitszuwachs”} \left[ \frac{MN}{m^2 \cdot m} \right]$$

Die anderen Einflüsse (Verdichtungsgrad, Wassergehalt usw.) werden für diese vereinfachende Betrachtung vernachlässigt. Auch wird vereinfachend angenommen, dass dieser Zuwachs über die Schichtdicke linear verläuft. Mit dieser Betrachtungsweise ergibt sich für jedes Versuchsfeld ein um Unterlage und Dicke bereinigter Anstieg des Verformungsmoduls je Meter Dicke, der hier als “Tragfähigkeitszuwachs” bezeichnet wird. Die Ergebnisse enthält Bild 9.



**Bild 8: Zusammenhang zwischen Wasserdurchlässigkeit (Infiltrationsrate  $k_i$ ) und Verformungsmodul ( $E_{v2}$ ), zusammengefasst für alle Messfelder der Versuchsstrecken 1 und 2**



**Bild 9: Zusammenhang zwischen Wasserdurchlässigkeit (Infiltrationsrate  $k_i$ ) und Tragfähigkeit (hier als "Tragfähigkeitszuwachs"), zusammengefasst für jeweils alle Messfelder der Versuchsstrecken 1 und 2**

Es ist erkennbar, dass zwischen dem "Tragfähigkeitszuwachs" und der Durchlässigkeit ein Zusammenhang besteht und zwar derart, dass mit steigendem "Tragfähigkeitszuwachs" die Durchlässigkeit geringer wird. Die Bestimmtheitsmaße der aus den Einzelwerten jeweils resultierenden Trends sind erwartungsgemäß recht gering. Neben der begrenzten Datenmenge und den Messungenauigkeiten (z. B. wurden die  $E_{v2}$ -Werte der Unterlage nicht für jedes Versuchsfeld bestimmt) spielt hier eine Rolle, dass die beiden dargestellten Eigenschaften von weiteren Parametern abhängig sind, z. B. vom Verdichtungsgrad und von der Korngrößenverteilung (Porengeometrie). Trotzdem zeigen die Trendlinien, dass ein Zusammenhang zwischen "Tragfähigkeitszuwachs" und Infiltrationsbeiwert vorhanden ist, und dass dieser Zusammenhang scheinbar bei beiden Baustoffen weitgehend ähnlich ist. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Trendlinie für Granodiorit wesentlich durch die Durchlässigkeit des sandarmen Gemischs  $Sl_{50}SA$  beeinflusst wird (eingekreister Messwert im Bild 9). Diese hohe Durchlässigkeit ist auf die im Neuzustand noch stark von den anderen Gemischen abweichende Korngrößenverteilung zurückzuführen und stellt insofern einen Ausreißer bei dieser Pauschalbetrachtung aller Messwerte dar. Wenn dieser Wert bei der Ermittlung eines Trends unberücksichtigt bleibt, ergibt sich für Granodiorit die gestrichelt dargestellte Trendlinie mit einem deutlich verbesserten Bestimmtheitsmaß von 0,7. Allerdings ist der Verlauf der Trendlinien dann weniger ähnlich, woraus sich ableiten lässt, dass es durchaus unterschiedliche gesteins- bzw. gemischspezifische Potenziale hinsichtlich der Durchlässigkeit und des "Tragfähig-

keitszuwachses" gibt. Die Bestimmtheitsmaße von 0,7 lassen den Schluss zu, dass dieses Potenzial bei einem bestimmten "Tragfähigkeitszuwachs" eine bestimmte Wasserdurchlässigkeit zu gewährleisten für ein Baustoffgemisch zumindest annähernd beschreibbar ist.

Für die in Tabelle 8 der RStO enthaltenen Unterlagen-Schichtdicken-Kombinationen ergibt sich nach obiger Gleichung maximal ein "Tragfähigkeitszuwachs" von 300  $MN/m^2/m$  (siehe Bild 10).

Im Bild 9 ist diese Grenze als waagerechter Balken dargestellt. Die meisten Wertepaare, deren "Tragfähigkeitszuwachs" über dieser Grenze liegt, weisen Infiltrationsbeiwerte  $k_i < 10^{-5}$  m/s auf.

Unterlage	$E_{v2}$ auf Planum				$E_{v2}$ auf Frostschuttschicht			
	$\geq 45 MN/m^2$	$\geq 80 MN/m^2$	$\geq 100 MN/m^2$	$\geq 120 MN/m^2$	$\geq 100 MN/m^2$	$\geq 120 MN/m^2$	$\geq 150 MN/m^2$	$\geq 180 MN/m^2$
Zu bauende Tragschicht ohne Bindemittel	Schotter-Splitt-Sand-Gemisch	Kies-Sand-Gemisch	Schotter-Splitt-Sand-Gemisch	Kies-Sand-Gemisch	Schotter-Splitt-Sand-Gemisch	Kies-Sand-Gemisch	Schotter-Splitt-Sand-Gemisch	Kies-Sand-Gemisch
Auf Frostschuttschicht mit $E_{v2}$	$\geq 100MN/m^2$	20	25	15	20			
	$\geq 120MN/m^2$	30	35	20	25			
Auf Schotter- oder Kies-tragschicht mit $E_{v2}$	$\geq 120MN/m^2$	25	30	-	-	15	20	-
	$\geq 150MN/m^2$	30	40	-	-	20	30	20
	$\geq 180MN/m^2$	Tragfähigkeitszuwachs: 300 $MN/(m^2 \cdot m)$				20		

**Bild 10: "Tragfähigkeitszuwachs" für Unterlagen-Schichtdicken-Kombinationen in der Tabelle 8 der RStO**

### 4 Folgerungen für die Praxis

Die durchgeführten Untersuchungen führten zu folgenden Schlussfolgerungen für die Praxis:

Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit lassen sich baustofftechnisch (Brech- oder Rundkorn, Korngrößenverteilung, Kornform usw.) und bautechnologisch (Verdichtungsgrad, Dicke der Einbaulage, Verdichtungsgerät usw.) beeinflussen. Unter Baustellenbedingungen wird der Einfluss dieser Parameter jedoch stark zurückgedrängt. Es zeigte sich, dass bereits nach kurzer Beanspruchung mit baustellenüblichem Bauverkehr die Verformungsmoduln zunehmen, wobei im Neuzustand noch festgestellte Unterschiede zwischen verschiedenen Gemischen/Schichten weitgehend verschwinden. Ein umgekehrter Trend wurde auch für die Eigenschaft Wasserdurchlässigkeit festgestellt. Weitgehend unabhängig vom Ausgangswert der Durchlässigkeit reduziert sich die Durchlässigkeit unter Bauverkehr i. d. R. deutlich, wobei anfänglich noch bestehende Unterschiede kaum noch zu Tage treten. Dies zeigt, dass der baustofftechnischen Beeinflussung der Wasserdurchlässigkeit Grenzen gesetzt sind. So ließen sich zunächst mit einem abweichend vom Regelwerk sehr sandarm zusammengesetzten Gemisch im Neuzustand hohe Durchlässigkeiten erzielen, die über denen lagen, die unter gleichen Bedingungen mit regelkonform zusammengesetzten Gemischen erreicht wurden. Dieser Vorteil wurde aber durch Bauverkehr schnell beseitigt. Insgesamt wurde deutlich, dass bereits Bauverkehr geringer Intensität die baustofftechnischen und bautechnologischen Einflüsse auf die Durchlässigkeit überlagert. Dem Bauverkehr kommt deshalb bei der Beeinflussung der Wasserdurchlässigkeit große Bedeutung zu. Für die Bauweisen, bei denen die Wasserdurchlässigkeit der ToB wegen des Wasserzutritts von oben von besonderem Interesse ist (Pflaster-, Betondecken), muss dies beachtet werden.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit (Verformungsmodul  $E_{v2}$ ) und Wasserdurchlässigkeit (Infiltrationsbeiwert  $k_i$ ) konnte nicht ermittelt werden. Ursächlich dafür ist, dass es Einflüsse gibt, die nur eine der beiden Eigenschaften beeinflussen (z. B. Einfluss der Schichtdicke auf die Tragfähigkeit oder Einfluss der Kornverfeinerung an der Oberfläche auf die Durchlässigkeit). Es ist jedoch möglich, durch eine rechnerische Berücksichtigung der Einflussgrößen Schichtdicke und Verformungsmodul der Unterlage einen Zusammenhang zwischen dickeabhängigem "Tragfähigkeitszuwachs" und Wasserdurchlässigkeit von ToB darzustellen. Für die hier untersuchten Baustoffgemische konnten jeweils tendenzielle Beziehungen zwischen "Tragfähigkeitszuwachs" und Wasserdurchlässigkeit beschrieben werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Messgrößen Infiltrationsbeiwert  $k_i$  und Verformungsmodul  $E_{v2}$  unter Baustellenbedingungen erheblichen Veränderungen unterliegen. Für die Bewertung einer ToB hinsichtlich dieser beiden Eigenschaften ist es deshalb von erheblicher Bedeutung, zu welchem Zeitpunkt (Zustand) diese Messgrößen ermittelt werden. Deutlich wurde auch, dass weder die Einhaltung einer bestimmten Grenzsieblinie noch der Nachweis einer bestimmten Wasserdurchlässigkeit im Labor eine ausreichende Sicherheit bieten, dass auch unter Einbaubedingungen eine hohe Wasserdurchlässigkeit gewährleistet ist. Wenn also die Wasserdurchlässigkeit von ToB von Interesse ist, sind Feldprüfungen zur Bestimmung des Infiltrationsbeiwerts  $k_i$  erforderlich. Es wird empfohlen, bei der Festlegung der Anzahl der Infiltrationsmessungen und bei der Auswahl der Messpunkte so vorzugehen wie bei den Tragfähigkeitsmessungen.

Für die Ermittlung des Infiltrationsbeiwerts  $k_i$  sind grundsätzlich das Tropf-, das Doppelring- und das modifizierte Standrohr-Infiltrometer geeignet. Die hier durchgeführten Vergleichsmessungen zeigen, dass die Messergebnisse eine zufrieden stellende Übereinstimmung zeigen. Insbesondere bei der Frage nach der Durchlässigkeit eines Loses kommt man mit allen drei Verfahren zu weitgehend gleichen Aussagen. Bedingung ist, dass mehrere Messungen auf einem Los durchgeführt werden, um die einbaubedingten Inhomogenitäten zu kompensieren. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse des Standrohr-Infiltrometers sollten vor allem im Bereich  $k_i > 10^{-5}$  m/s weitere Erfahrungen gesammelt werden.

Bei der Prüfung der Wasserdurchlässigkeit von Baustoffgemischen im Labor wird das Ergebnis bei gleichem Verdichtungsgrad deutlich vom Verdichtungswassergehalt des Baustoffgemischs beeinflusst. Eher trocken verdichtete Gemische erzielen bei gleicher Dichte höhere Durchlässigkeiten als Gemische, die mit optimalem Wassergehalt eingebaut werden. Unter Feldbedingungen war dieser Einfluss nicht nachweisbar. Im Neuzustand lagen die im Feldversuch gemessenen Durchlässigkeiten der Schicht i. d. R. in den Größenordnungen, die im Labor an den eher trocken verdichteten Gemischen ermittelt worden sind. Man erhält also eher niedrige Prognosewerte im Laborversuch, wenn die Laborproben mit dem optimalen Wassergehalt verdichtet werden.

### 5 Literaturverzeichnis

[1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2004, Fassung 2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB), Köln