

## Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Oberbauschichten in situ

FA 6.069

Forschungsstelle: Institut für Materialprüfung Dr. Schellenberg  
GbR, Rottweil

Bearbeiter: Schellenberg, K. / Schellenberg, P.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Abschluss: Dezember 2000

### 1. Aufgabenstellung

Aus ökologischen und bautechnischen Gesichtspunkten ist die Wasserdurchlässigkeit von Oberbauschichten bei der Befestigung von Verkehrsflächen von großer Bedeutung. Unter wasserdurchlässigen Oberbauschichten werden Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) und Dränbeläge beispielweise aus Pflaster oder Asphalt verstanden.

Im kommunalen Straßenbau werden vermehrt befestigte Verkehrsflächen verlangt, die das durch Niederschlag anfallende Oberflächenwasser direkt in den Untergrund ableiten sollen. Sehr gebräuchlich sind speziell konzipierte wasserdurchlässige Beläge.

Auch beim Einsatz von Dränasphalten wird neben der Lärminderung eine Ableitung des Oberflächenwassers innerhalb dieser Asphalttschicht angestrebt, um Sprühhahnenbildung und Aquaplaning zu vermeiden.

Der Wasserdurchlässigkeit kommt bei der Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) eine sehr wichtige Funktion zu. ToB müssen, der Begriffsdefinition der ZTVT-StB 95 entsprechend, an der verdichteten und fertig hergestellten Schicht eine „ausreichende Wasserdurchlässigkeit“ aufweisen. Eine Überprüfung dieser Anforderung wird üblicherweise nicht vorgenommen, da zum Einen kein geeignetes und handhabbares Prüfverfahren und zum Anderen auch keine näheren Festlegungen über einen einzuhaltenden Wasserdurchlässigkeitsbeiwert vorliegen. Hilfsweise wird derzeit zur Ansprache einer „ausreichenden Wasserdurchlässigkeit“ das ungebundene Material im Labor, beispielsweise im Rahmen von Eignungsprüfungen, nach DIN 18130 untersucht. Auch Kennwerte von Korngrößenverteilungen werden zur Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit des später einzubauenden Materials herangezogen.

Zur Überprüfung einer „ausreichenden“ Wasserdurchlässigkeit von ungebundenen Schichten im Straßenoberbau soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein praxistaugliches Feldprüfverfahren für ToB entwickelt werden, welches dann eventuell auch für Dränbeläge eingesetzt werden kann.

Bei der Entwicklung des Prüfverfahrens stehen folgende Prämissen im Vordergrund:

- leichte Handhabung des Prüfgerätes,
- kurze Zeitdauer für eine Prüfung,
- einfache und rasche Versuchsauswertung (möglichst vor Ort),
- geringe Gerätekosten,
- ausreichende Präzision.

### 2. Untersuchungsmethodik

Das Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit wird auf dem wissenschaftlich-technischen Know-how der Arbeit von Berner aufgebaut. Dies wird deshalb für sinnvoll erachtet, weil mit diesem Verfahren an der zu prüfenden ToB der tatsächlich vorhandene Wasserdurchlässigkeitsbeiwert ziemlich exakt bestimmt werden kann.

Diese neu konzipierten Prüfverfahren werden unter Baustellenbedingungen an ToB mit den beiden Verfahren nach Berner in drei Baufeldern unter definierten Bedingungen miteinander verglichen. Unter Variation der Mineralstoffart, des Wassergehaltes und der Verdichtungsarbeit werden die Prüfverfahren unterschiedlichen Prüfbedingungen ausgesetzt. An den in-situ geprüften Materialien werden entsprechende Laboruntersuchungen durchgeführt.

Die Auswertung der Messergebnisse zur Berechnung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte wird von Dr. Berner (Ingenieurbüro Kempfert und Partner, Konstanz) unter Verwendung des in der Arbeit von Berner verwendeten EDV-Programms bzw. der entsprechenden theoretischen Grundlagen vorgenommen.

Mögliche Zusammenhänge zwischen den „tatsächlichen“ Wasserdurchlässigkeiten und den Ergebnissen der anderen Prüfmethoden sollten zur Auswahl eines geeigneten Prüfverfahrens führen. Im Idealfall kann erwartet werden, dass zwischen den Mess- bzw. Auswerteergebnissen der ausgewählten Methode und den „tatsächlichen“ Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten (bestimmt nach dem Verfahren von Berner) eventuell eine empirische Funktion mit hohem Bestimmtheitsmaß gefunden werden kann. Das ausgewählte Prüfverfahren soll abschließend näher untersucht werden. Dabei sollen insbesondere die Durchführbarkeit und die Handhabung des Verfahrens getestet und dabei mögliche Schwachstellen erkannt werden. Es ist vorgesehen, das Verfahren an fünf verschiedenen Anwendungsfällen zu überprüfen und auch Aussagen über die Wiederholbarkeit zu machen.

### 3. Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens (Untersuchungsergebnisse)

#### 3.1 Vergleichende Untersuchungen in Baufeldern

Neben den zwei Verfahren nach Berner (Kreisquellenversuch und Stabquellenversuch) wurde ein Muldenversuch in Anlehnung an DIN 18125 (Flüssigkeitersatzverfahren), ein Beregnungsversuch und ein Versuch zur Bestimmung der pneumatischen Leitfähigkeit (Prüfmedium: Luft) entwickelt und in drei Baufeldern erprobt.

Die Durchlässigkeitsmessungen der fünf Verfahren wurden an drei Baufeldern aus den Mineralstoffgemischen Kalkstein, Betonaufbruch (im Folgenden als RC-Beton bezeichnet) und Ziegelaufbruch (im Folgenden als RC-Ziegel bezeichnet) durchgeführt. Durch die zusätzliche Variation des Einbauwassergehaltes (3fach) und der Verdichtungsarbeit (3fach) ergaben sich somit je Baufeld 9 Prüffelder. Die fünf Verfahren wurden in jedem Prüffeld angewandt. Somit wurden mit den fünf Verfahren insgesamt 135 Durchlässigkeitsmessungen durchgeführt.

Um vergleichende Aussagen treffen zu können, sind jeweils für die Baufelder Kalkstein, RC-Beton und RC-Ziegel in den nebenstehenden Bildern die mit den fünf Prüfverfahren an jedem Prüffeld bestimmten k-Werte gegenübergestellt.

Daraus können nachfolgende Aussagen getroffen werden:

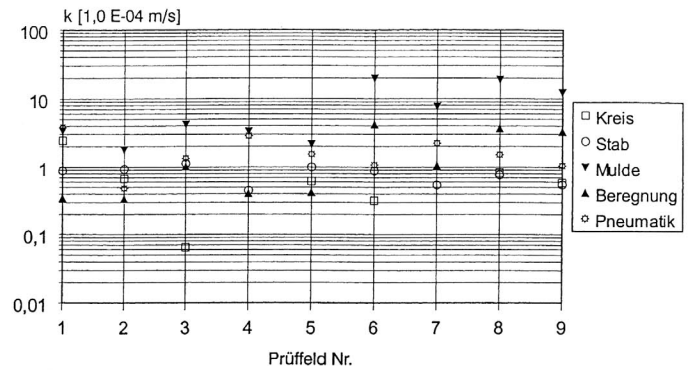
- Die nach den unterschiedlichen Prüfverfahren ermittelten k-Werte liegen bei den drei verschiedenen Baufeldern insgesamt in einer Bandbreite von rd.  $1 \times 10^{-3}$  bis  $1 \times 10^{-5}$  m/s. Sie können in Orientierung an DIN 18130 als wasserdurchlässig bezeichnet werden.
- Die Bandbreite der aus den unterschiedlichen Prüfverfahren bei jeweils gleichem Prüffeld ermittelten k-Werte liegt bei rd. einer Zehnerpotenz. Dabei streuen die k-Werte innerhalb der Prüffelder des Baufeldes aus RC-Beton und RC-Ziegel stärker als in den Prüffeldern des Baufeldes aus Kalkstein.
- In der Tendenz ist das Baufeld aus Kalkstein als durchlässiger einzustufen als die Baufelder aus RC-Ziegel und RC-Beton.

Auffallend ist, dass sich die k-Werte des Kreisquellenversuchs im Vergleich zum Stabquellenversuch bei allen drei Baufeldern auf einem relativ gleichmäßigen Niveau befinden und gut übereinstimmen. In der Tendenz wurden mit dem Stabquellenversuch keine höheren k-Werte bestimmt als mit dem Kreisquellenversuch. Dies wäre jedoch plausibel gewesen, da die Durchlässigkeit bei ToB aufgrund der Verdichtungsarbeit, welche zu Kornumlagerungen und zur horizontalen Ausrichtung der plattigen Körner führt, in horizontaler Richtung dann höher ist als in vertikaler Richtung. Insgesamt weisen die k-Werte, welche mit dem Kreis- und dem Stabquellenversuch bestimmt wurden, geringere Schwankungsbreiten auf als die der übrigen Verfahren.

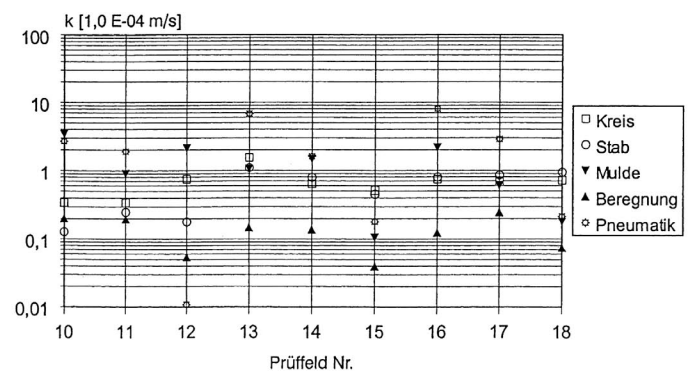
Es ist gut zu erkennen, dass mit dem Beregnungsversuch im Vergleich zu den anderen Verfahren die insgesamt niedrigsten k-Werte bestimmt wurden. So wurde beim Baufeld aus RC-Beton ein durchschnittlicher k-Wert von nur  $1 \times 10^{-5}$  m/s ermittelt.

Im Vergleich zum Beregnungsversuch wurden mit dem Muldenversuch durchweg bei allen Prüffeldern höhere k-Werte bestimmt. Auffallend ist, dass beim Kalkstein die k-Werte des Muldenversuchs bei allen Prüffeldern um gleichmäßig rd. 7 bis 8fach höher liegen als beim Beregnungsversuch.

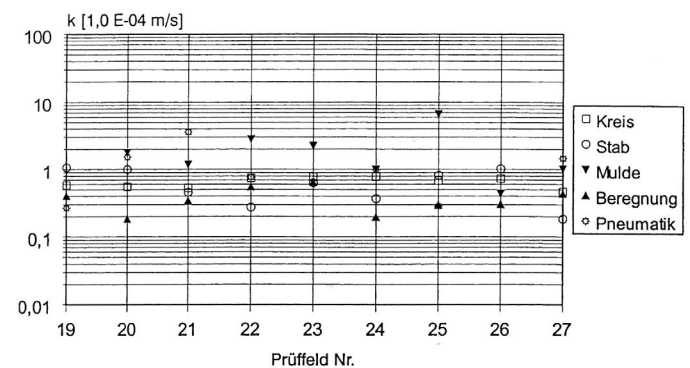
Entsprechend der Arbeitshypothese dieses Vorhabens kann mit den Verfahren von Berner (Kreisquellen- und Stabquellenversuch) der an einer ToB tatsächlich vorhandene k-Wert ziemlich exakt bestimmt werden. In den drei Baufeldern wurden mit dem Kreisquellen- und dem Stabquellenversuch k-Werte auf sehr gleichmäßigem Niveau bestimmt, welche auch gut übereinstimmen. Dies, obwohl beim Kreisquellenversuch auf der Schichtoberfläche und beim Stabquellenversuch in der Schicht sehr



1: Bestimmte Wasserdurchlässigkeiten (k-Werte) je Prüffeld und Prüfverfahren, Baufeld: Kalkstein



2: Bestimmte Wasserdurchlässigkeiten (k-Werte) je Prüffeld und Prüfverfahren, Baufeld: RC-Beton



3: Bestimmte Wasserdurchlässigkeiten (k-Werte) je Prüffeld und Prüfverfahren, Baufeld: RC-Ziegel

unterschiedlich geprüft wird. Anhand der vorliegenden Erkenntnisse ist anzunehmen, dass aufgrund der bei beiden Verfahren aufgebrachtten Wasserdruckhöhe von bis zu 1 Meter während der Versuchsdurchführung nicht unerhebliche Wassermengen eingegeben wurden und es daher zu Materialauspülungen gekommen ist und sich dadurch die Prüfmatrix bzw. die Durchlässigkeit beider Verfahren mehr oder weniger angeglichen haben.

Es stellt sich daher die Frage, ob mit einem Durchlässigkeitsverfahren überhaupt der „wahre“ an der Schicht tatsächlich vorhandene k-Wert bestimmt werden kann. Auch deshalb, weil in einer ToB – davon ist auszugehen – in der Schicht und auf der Schicht lokal sehr unterschiedliche Durchlässigkeiten vorliegen können. Es wird daher als nicht zweckmäßig angesehen – wie angedacht – die k-Werte des neu zu entwickelnden Verfahrens an die k-Werte, welche mit den Verfahren von Berner ermittelt wurden, anzuhängen bzw. zu kalibrieren.

Beispielsweise wurden hierzu für den Beregnungsversuch, relativ zu den Verfahren nach Berner betrachtet, insgesamt zu niedrige k-Werte bestimmt. Dies erscheint auch plausibel, da beim Beregnungsversuch keine Wasserdruckhöhe auf die Schicht gesetzt wird und somit einerseits eine geringere Wassersättigung im Strömungsfeld vorhanden ist und andererseits dadurch keine oder nur geringe Materialausspülungen entstanden sind. Es ist daher sogar anzunehmen, dass diese mit dem Beregnungsversuch ermittelten k-Werte praxisnäher sind als die entsprechend höheren Werte aus den beiden Verfahren, welche nach Berner ermittelt wurden.

Insgesamt ist der Verlauf und die Größe der aus den fünf verschiedenen Verfahren gewonnenen k-Werte gleichartig, so dass die Ergebnisse aus allen Versuchstypen als plausibel anzusehen sind. Aus diesem Grunde erscheinen nach den vorliegenden Ergebnissen alle fünf eingesetzten Verfahren grundsätzlich geeignet. Eine Auswahl wird daher auch aufgrund von Vorteilen bei der praktischen Durchführung erfolgen.

Aus der Matrix (Tabelle 1) geht hervor, dass die beiden Verfahren Pneumatik- und Beregnungsversuch bis auf das Kriterium „Zeitdauer einer Prüfung“ ähnlich günstig bewertet werden. Aus diesem Grunde werden für die weitere Erprobung im praktischen Einsatz beide Verfahren ausgewählt. Damit ist es auch möglich, die grundlegende Eignung beider Verfahren für die „Prüfung auf der Schicht“, also von Oberbauschichten generell (Drän- und Pflasterbeläge), zu untersuchen, auch im Vergleich.

Tabelle 1: Matrix zur Bewertung bzw. Auswahl des Prüfverfahrens

Kriterium/ Versuchstyp	Kreis	Stab	Mulde	Beregnung	Pneumatik
Prüfung auf der Schicht	+	-	-	+	+
Zeitdauer einer Prüfung	-	-	0	0	+
Gerätekosten	0	0	0	0	0
Einfache und vor Ort Auswertung	0	0	0	0	0
Handhabung des Prüfgerätes/Versuchseinrichtung	-	-	-	+	+

+ günstig, 0 neutral, - ungünstig

### 3.2 Praktischer Einsatz der ausgewählten Verfahren

Die Eignung beider Verfahren Beregnungsversuch und Pneumatikversuch wurden im praktischen Einsatz an fünf verschiedenen Oberbauschichten vergleichend überprüft. Dabei wurden zwei Pflasterbeläge (Natursteinpflaster und Pflasterung aus Rasengittersteinen), ein Dränasphalt der Körnung 0/16 mm und zwei Tragschichten ohne Bindemittel ausgewählt.

An jeder der fünf Oberbauschichten wurde an fünf aufeinanderfolgenden Tagen an derselben Stelle mit dem Beregnungsversuch und mit dem Pneumatikversuch jeweils eine Messung durchgeführt.

Um die Ergebnisse der beiden Versuchstypen Beregnungsversuch und Pneumatikversuch miteinander vergleichen zu können, wurde für jede Prüffläche ein statistischer Mittelwertvergleich durchgeführt. In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse des statistischen Mittelwertvergleichs zusammenfassend dargestellt.

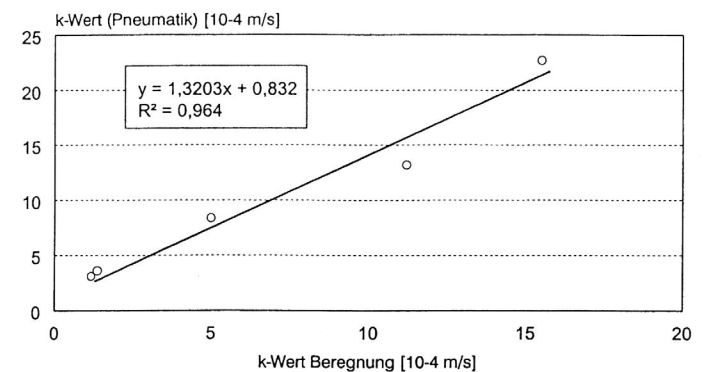
Tabelle 2: Ergebnisse des statistischen Mittelwertvergleichs für die fünf Prüfflächen

Prüffläche	Varianzen	Mittelwerte
Natursteinpflaster	gleich	ungleich
Rasengittersteine	gleich	gleich
Dränasphalt	gleich	gleich
ToB, Beispiel 1	gleich	ungleich
ToB, Beispiel 2	gleich	ungleich

Bei dem statistischen Mittelwertvergleich wurden für die jeweiligen Einzelwerte der fünf Prüfflächen gleiche bzw. übereinstimmende Varianzen festgestellt. Dies bedeutet, dass unter den vorgegebenen Prüfbedingungen im statistischen Sinne vergleichbare Einzelwerte bei gleicher Prüfmatrix bestimmt wurden.

Für die Prüffläche Rasengittersteine und die Prüffläche Dränasphalt konnten beim Mittelwertvergleich der beiden Verfahren „gleiche“ Mittelwerte bestimmt werden. Für die Prüffläche Natursteinpflaster und die Prüfflächen der beiden ToB wurden „ungleiche“ Mittelwerte berechnet. Diese „ungleichen“ Mittelwerte der beiden Verfahren können möglicherweise auf die unterschiedlichen Prüfmedien Luft bzw. Wasser zurückgeführt werden. Wie beobachtet, kam es während der Beregnungsversuche auf den ungebundenen Prüfflächen zu Ausschlämmungen der feinen Anteile bzw. zu Kornumlagerungen, mit der Folge, dass im Vergleich zum Pneumatikversuch noch geringere k-Werte bestimmt wurden.

Zur weiteren Auswertung wurde in Bild 4 der funktionale Zusammenhang zwischen den mit dem Beregnungsversuch und den entsprechenden mit dem Pneumatikversuch ermittelten k-Werte für die fünf Prüfflächen dargestellt.



4: Funktionaler Zusammenhang zwischen den mit dem Beregnungsversuch und den entsprechenden mit dem Pneumatikversuch ermittelten k-Werte (arithmetische Mittelwerte aus 5 Einzelbestimmungen)

Aus dieser Darstellung ist zu erkennen, dass mit einem Bestimmtheitsmaß von 96,4 % ein relativ guter Zusammenhang zwischen den k-Werten des Beregnungsversuchs und den entsprechenden k-Werten des Pneumatikversuchs gefunden werden konnte. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die spezifischen Durchlässigkeiten der zum Teil sehr unterschiedlichen Prüfflächen mit beiden Verfahren gleich angesprochen wurden. So wurden beispielsweise bei der Prüffläche Dränasphalt mit beiden Verfahren die insgesamt größten k-Werte bestimmt.

Im Ergebnis dieser Auswertung kann für die untersuchten fünf Prüfflächen festgehalten werden, dass beide Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in-situ gut geeignet sind und hier k-Werte lieferten, die als plausibel und praxisnah bezeichnet werden können.

In Bezug auf die hier durchgeführten Untersuchungen können die beiden Verfahren Beregnungsversuch und Pneumatikversuch als gleichwertig beurteilt werden. Das heißt, dass die Abwägung bei der Auswahl des Verfahrens auf der Basis der Handhabbarkeit bzw. der Versuchseinrichtung bzw. -durchführung vorgenommen werden kann. Durch die umfangreichen Untersuchungen wurde dabei generell die Erkenntnis gewonnen, dass das Prüfmedium Luft gegenüber dem Prüfmedium Wasser deutliche Vorteile aufweist, die wie folgt zusammengefasst werden können:

- der Transport bzw. die Beschaffung des Wassers fällt weg,
- die präzise Dosierung des Wassers in die Versuchseinrichtung ist technisch sehr schwierig zu bewerkstelligen,
- bei der Verwendung von Wasser muss bei der Auswertung der Temperaturkoeffizient des Wassers bzw. die Prüftemperatur berücksichtigt werden,
- beim Prüfmedium Wasser muss zuerst der stationäre Prüfzustand gefunden werden, damit die Durchlässigkeitsmessung überhaupt durchgeführt werden kann,
- bei der Verwendung von Luft als Prüfmedium ist die Dauer eines Versuchs mit rd. 7 Minuten um das 3fache kürzer als bei der Verwendung von Wasser als Prüfmedium; es können daher innerhalb relativ kurzer Zeit mehrere Messungen durchgeführt werden,
- während der Durchführung von Durchlässigkeitsversuchen mit Wasser besteht bei ungebundenen Prüfflächen, insbesondere bei ToB, das Problem, dass mit zunehmender Prüfdauer sich die Prüfmatrix durch Kornumlagerungen bzw. durch das Ausschlämmen der Feinanteile verändern kann.

Bei der Verwendung von Luft besteht jedoch die Unklarheit, in wie weit der im Prüfmaterial vorhandene Wassergehalt als Widerstand und nicht wie beim Wasser für die Durchlässigkeit als effektiv zur Verfügung stehender Hohlraum wirkt. Es ist anzunehmen, dass bei Prüfmaterialien, welche einen relativ hohen Wassergehalt aufweisen, dieser Einfluss beim Pneumatikversuch nicht zu vernachlässigen ist.

In Abwägung der aufgeführten Kriterien wird der Pneumatikversuch gegenüber dem Beregnungsversuch günstiger bewertet und als geeignetes Prüfverfahren ausgewählt.

#### 4. Folgerungen für die Praxis

Ziel dieser Arbeit war, ein Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel in-situ unter praktikablen Bedingungen zu finden. Bereits Floss und Berner haben sich mit einem nahezu gleichlautenden Forschungsthema befasst und dabei ein Verfahren vorgeschlagen, welches zwar „hinreichend genaue Ergebnisse liefert“, jedoch auf Grund der sehr aufwändigen Versuchseinrichtung, -durchführung und -auswertung praktisch nicht zum Einsatz kommt.

Mit dem Pneumatikversuch wurde nun ein Verfahren konzipiert, welches grundsätzlich gut geeignet ist, die Durchlässigkeit von Oberbauschichten in-situ zu bestimmen. Dabei weist das Prüfmedium Luft gegenüber dem Prüfmedium Wasser deutliche verfahrenstechnische Vorteile auf. Allein beim Kriterium „Zeitdauer für eine Prüfung“ werden für das Pneumatikverfahren entscheidende Vorteile gesehen. So werden für die Durchführung eines Versuches nur rd. 7 Minuten benötigt. Mit dem Pneumatikversuch ist es daher möglich, innerhalb relativ kurzer Zeit mehrere Messungen durchzuführen. Speziell bei ToB wird die Durchführung von mehreren Messungen innerhalb einer zu prüfenden Fläche für sinnvoll erachtet, da lokale Inhomogenitäten zu stark streuenden Durchlässigkeiten führen können.

Zur abschließenden Entwicklung des Pneumatikverfahrens sind im Weiteren folgende Punkte noch zu klären:

- In wie weit ist bei der Verwendung von Luft als Prüfmittel der im Prüfmedium vorhandene Wassergehalt als Widerstand wirksam im Gegensatz zum Prüfmittel Wasser?
- Sollte das ausgewählte Verfahren zur Bestimmung einer „ausreichenden Wasserdurchlässigkeit“, wie sie beispielsweise in der Begriffsdefinition der ZTVT für eine Tragschicht ohne Bindemittel verlangt wird, eingesetzt werden, müsste speziell der Bereich zwischen  $k = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  und  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  noch näher untersucht werden.
- Zum Nachweis der Prüfpräzision des Pneumatikverfahrens sind in entsprechenden Versuchsreihen die statistischen Kenngrößen Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit zu bestimmen. □