

Ermittlung der bodenspezifischen Anwendungsgrenzen der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK)

FA 5.139

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Bräu, G./ Vogt, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Juli 2008

1 Aufgabenstellung

Seit der Einführung der ZTV E-StB 94 (Ausgabe 1994 / Fassung 1997) stehen für die Qualitätssicherung im Erdbau drei Prüfmethode zur Verfügung: Neben der Methode M1, welche eine nach einem statistischen Prüfplan zu führende Vorgehensweise vorschreibt, und der Methode M3, die eine Überwachung des Arbeitsverfahrens vorschreibt, werden vor allem aufgrund der hohen Einbauleistung bei großen Erdbaumaßnahmen flächendeckende und arbeitsintegrierte dynamische Messverfahren (Methode M2) eingesetzt. Bei den dynamischen Messverfahren der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) werden die mit einer geeigneten Messtechnik aufgezeichneten Schwingungscharakteristiken während der Fahrt einer Vibrationswalze analysiert. Die sich einstellenden Schwingungen der Bandage einer Vibrationswalze hängen direkt von der Steifigkeit und Dämpfung des befahrenen Bodens ab.

Die Qualitätskontrolle der Verdichtungsleistung im Erdbau mittels der FDVK und einer direkten Kalibrierung der FDVK-Messwerte zu einer Prüfgröße ist für grobkörnige Böden der Gruppe GE, GW, GI, SE, SW und SI (DIN 18196) anerkannt. Es bestehen nahezu unabhängig vom Wassergehalt sehr gut korrelierende Zusammenhänge zwischen dem Messwert der FDVK und dem Verdichtungsgrad bzw. dem Verformungsmodul der zu prüfenden Bodenschicht. Bei gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil ≤ 15 M.-% der Bodengruppen GU, SU, GT und ST ist nach dem Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau (FDVK-Merkblatt, 1993; Anmerkung: Merkblatt zum Zeitpunkt der Berichterstellung Mitte 2008 in Überarbeitung) für Einbauwassergehalte unter dem Proctorwassergehalt ebenfalls eine gute Kalibrierung zwischen dem FDVK-Messwert und der Prüfgröße möglich. Liegt der Wassergehalt über dem optimalen Wassergehalt, ist eine eindeutige Zuordnung des FDVK-Messwerts zum Verdichtungsgrad und Verformungsmodul nicht mehr möglich. Liegt bei gemischtkörnigen Böden der Feinkornanteil > 15 M.-%, sind nach Angaben des FDVK-Merkblatts die Einflüsse des Porenwassers bereits knapp über dem optimalen Wassergehalt sehr groß. Nur bei Wassergehalten, welche deutlich unter dem optimalen Wassergehalt liegen, sind nach der zitierten Quelle Korrelationen möglich und eine Aussagekraft des FDVK-Messwerts gegeben. Bei feinkörnigen Böden ist ebenfalls nur für Einbauwassergehalte deutlich unter dem optimalen Wassergehalt ein abgesicherter Zusammenhang zwischen dem FDVK-Messwert und dem Verformungsmodul der zu prüfenden Bodenschicht möglich. Die aus den Aussagen des FDVK-Merkblatts abgeleiteten Anwendungsgrenzen beziehen sich nur auf die Anwendung der FDVK mit einer direkten Kalibrierung des FDVK-Messwerts auf eine Prüfgröße (z. B. E_{v2} -Wert) und nicht auf das Vorgehen beim Einsatz der FDVK

zur Feststellung einer homogenen Prüffläche. In dieser Forschungsarbeit ist die Methodik der Problemlösung und Systematik der durchgeführten Versuche darauf ausgelegt, eine Konkretisierung der Anwendungsgrenzen der FDVK mit Kalibrierung zur Prüfgröße erreichen zu können.

Im Zuge der Überarbeitung der ZTV E-StB 94 (Ausgabe 1994 / Fassung 1997) werden die oben genannten drei Prüfmethode bezüglich ihrer Aussagekraft neu bewertet. Es ist geplant, den besonderen Informationsgehalt der FDVK gegenüber den anderen Prüfmethode herauszuarbeiten. Hierfür ist es notwendig, die bisher aus Erfahrungswerten stammenden bodenspezifischen Anwendungsgrenzen mit systematischen Untersuchungen zu belegen. Wie oben gezeigt, ist eine Reproduzierbarkeit der Messungen mittels FDVK und eine Korrelation von FDVK-Messwerten zu Verformungsmodul und Verdichtungsgrad für grobkörnige Böden gut möglich. Für gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil ≤ 15 M.-% ist diese Beurteilung für Wassergehalte unter dem optimalen Wassergehalt möglich. Bei Verwendung von anderen Bodengruppen ist es nur bei Wassergehalten deutlich unter dem optimalen Wassergehalt w_{p_r} möglich, einen erfolgreichen Einsatz der FDVK vorherzusagen.

Hauptziel der durchgeführten Versuche war eine möglichst genaue Festlegung der Anwendungsgrenzen bezogen auf die Bodenart und den Wassergehalt. Neben der Betrachtung vorhandener Literatur und der Erstellung eines eigenen Modells für theoretische Überlegungen, wurden vor allem durch versuchs-technische Arbeiten Zusammenhänge deutlich gemacht, um eine möglichst eindeutige Interpretation der Ergebnisse zu sichern.

2 Untersuchungsmethodik und -ergebnisse

2.1 Methodik und Versuchsböden

Hauptziel der Forschungsarbeit ist die Konkretisierung von Anwendungsgrenzen der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle im Bezug auf bodenspezifische Einflussgrößen. Hierfür wurden Reihen von Versuchen im Labor durchgeführt, die durch Versuche unter Verwendung einer Vibrationswalze im Feld stichprobenartig bestätigt werden sollten. Aufgrund der Vielzahl von Einflüssen mussten zur serienmäßigen Untersuchung von möglichst vielen für den Erdbau repräsentativen Böden Vereinfachungen getroffen werden.

Zur Durchführung der Labor- und Feldversuche wurden insgesamt 6 Versuchsböden ausgewählt. Die Versuchsböden repräsentieren eine große Bandbreite an Sanden, gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden (vergleiche Kornverteilungskurven in Bild 1, sowie Tabelle 1). Das Größtkorn wurde aufgrund der begrenzten Probenhöhe in den Ödometerversuchen (siehe Abschnitt 2.2) auf 4 mm begrenzt.

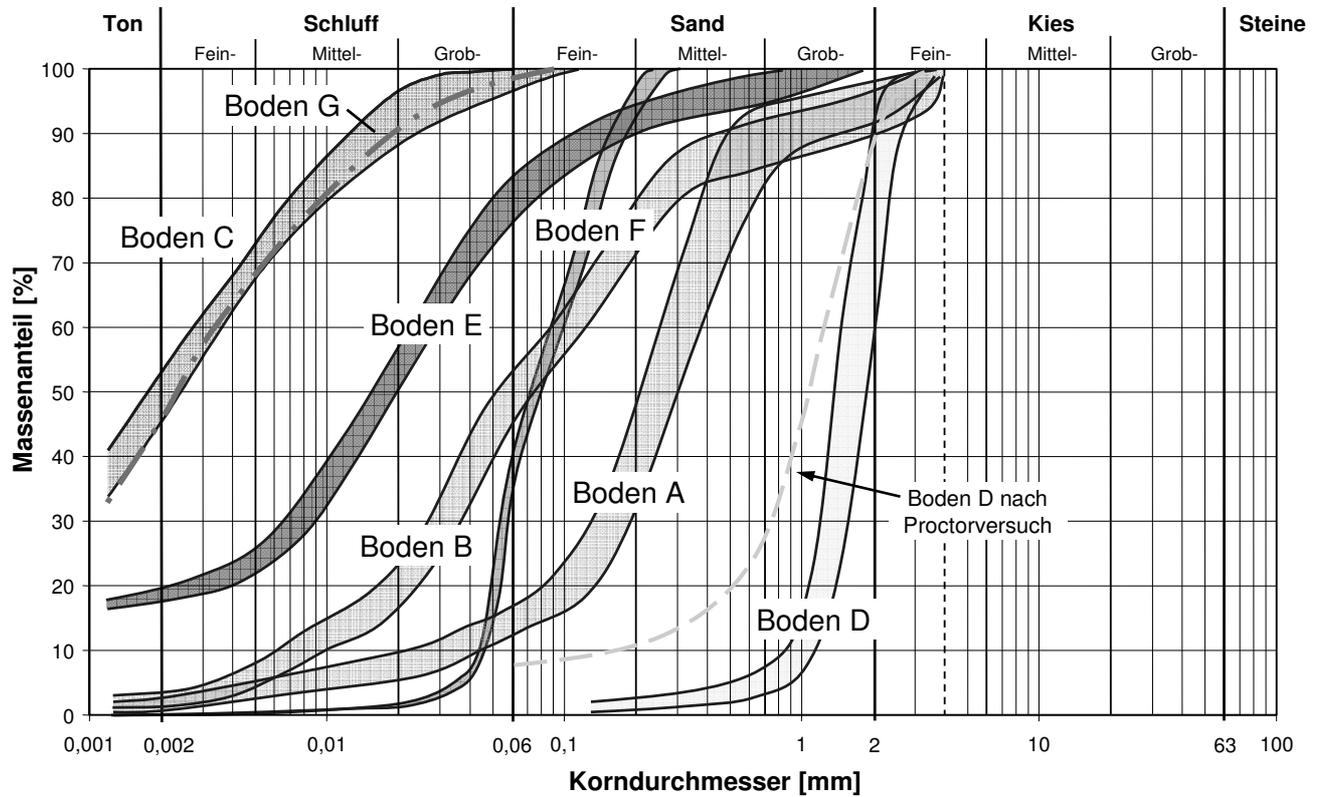


Bild 1: Kornverteilungen der untersuchten Böden

Tabelle 1

Boden	Bodenart Bezeichnung nach DIN EN ISO 14688-1 (2003)	Feinkornanteil < 0,06 mm (Mittelwert)	Bodengruppe Bezeichnung nach DIN 18196
A	Sand, schluffig, schwach feinkiesig	15 %	SU
B	Schluff, stark sandig	50 %	TL
C	Ton	100 %	TA
D	Grobsand, feinkiesig	0 %	SE
E	Schluff, tonig, sandig	80 %	TM
F	Feinsand, stark schluffig	35 %	SU*
G	Ton	100 %	TA

2.2 Laborversuche

Aufgrund der Vielzahl an Einflussparametern und den sehr komplexen Vorgängen während einer dynamischen Verdichtung des Bodens müssen für die versuchstechnischen Durchführungen klare Randbedingungen herrschen. Dies umfasst sowohl die Herstellung der Probe als auch deren Belastung und Verformungsmöglichkeit. Ziel der Versuche war es, mit einem möglichst einfachen Versuch den Einfluss des Wassergehalts auf das Bodenverhalten der auf eine bestimmte Trockendichte eingepressten Bodenproben zu ermitteln. So wurde festgelegt, dass Effekte, welche allein aus der Dichte des Bodens herrühren, nicht weiter betrachtet werden, da die gegebene Problematik vor allem im Hinblick auf feinkörnige Böden überwiegend vom Wassergehalt beeinflusst wird. Es wurde daher bei allen Untersuchungen versucht, die Ausgangstrockendichte möglichst konstant einzustellen und den Wassergehalt zu variieren.

Aufgrund der Komplexität des Verhaltens teilgesättigter Böden unter zyklisch dynamischer Beanspruchung und der daraus resultierenden aufwendigen messtechnischen Erfassung im Labor wurde zur Annäherung an die Problematik der Verformungsmechanismus der eindimensionalen (ödometrischen) Kompression in einer zylindrischen Bodenprobe ($D = 100 \text{ mm}$, $H = 20 \text{ mm}$) gewählt. In den Ödometerversuchen wurde das Verhalten von 4 Versuchsböden (Böden A bis D) unter einer zyklisch dynamischen Belastung untersucht. Die zyklisch dynamischen Versuche wurden mit einer definierten Belastungsabfolge kraftgesteuert durchgeführt. Ergänzend zu den zyklisch dynamischen Versuchen wurden statische Versuche mit konstanter Dehnungsrate durchgeführt, um Aussagen zum Einfluss der raschen dynamischen Belastung auf die Steifigkeit der Böden tätigen zu können.

Zunächst wurde so das Verhalten der 4 Versuchsböden (Böden A bis D) in Abhängigkeit vom Wassergehalt untersucht. Sowohl die dynamische Belastung als auch die Beanspruchung in der statischen Versuchsreihe wurden nicht variiert. Durch das Einpressen der Proben in die Ödometerzelle mit dem Ziel, eine fest definierte Ausgangstrockendichte zu erreichen, war eine sorgfältige Herstellung der Bodenproben gewährleistet. Damit waren vor Versuchsbeginn der Wassergehalt und die Dichte bekannt. Während der Versuchsdurchführung ändern sich diese Bodenzustände durch die eingebrachte Energie wesentlich (Verdichtungsarbeit). Um aussagekräftige Ergebnisse erhalten zu können, war die möglichst kontinuierliche Überwachung der relevanten Parameter während des Versuchs ein wesentliches Ziel. Dazu wurden Änderungen der Trockendichte durch die gemessenen Setzungen der Probe im Ödometerring berechnet und die Entwicklung von Porendrücken registriert. Nach jeweils einer bestimmten Anzahl von Zyklen wurde ferner die ödometrische Steifigkeit der Bodenprobe ausgewertet, welche in Abhängigkeit des Wassergehalts mit der Steifigkeit verglichen wurde, die sich aus einer langsamen "statischen" Belastung ergab.

2.3 Feldversuche

Mit dem Ziel, die Ergebnisse der Laborversuche auf die Bedingungen, welche beim Einsatz der FDVK auf Erdbaustellen realistisch sind, zu übertragen, wurden zwei Versuchsstrecken im Feld angelegt und untersucht (Böden E und F). Dabei sollen die Aussagen der Versuche im Labor bestätigt und Ergebnisse auf die Maßstäbe, welche von bautechnischer Relevanz sind, übertragen werden. Ferner wurde ein früherer Feldversuch im Hinblick auf die Fragestellung dieser Forschungsarbeit neu ausgewertet (Boden G).

Der ausgewählte Untergrund, auf welchem das Versuchsfeld erstellt wurde, wurde vorab mittels der zur Verfügung stehenden 12-t-Vibrationswalze mit 10 Walzenüberfahrten verdichtet und die Steifigkeit des Untergrunds mittels FDVK aufgezeichnet. Damit konnte eine relativ homogene Steifigkeit des Untergrunds nachgewiesen werden. Der jeweilige Versuchsboden wurde aus einer möglichst homogenen Bodenschicht mittels Radlader gewonnen und klumpig auf eine Länge von 25 m aufgebracht. Das zu erstellende Versuchsfeld besaß eine Fahrspur von etwa 4,5 m Breite. Die Höhe der Schüttlage betrug etwa 0,4 m. Zunächst wurde der locker geschüttete und im Wassergehalt relativ homogene Versuchsboden durch 10 Überfahrten der Vibrationswalze auf eine möglichst gleichmäßige Trockendichte verdichtet. Danach wurde dem Versuchsboden über die Fahrspurlänge unterschiedlich viel Wasser zugegeben. Die Wasserzugabe erfolgte stufenweise über einen Zeitraum von etwa 3 Stunden, um eine Wasseraufnahme zu ermöglichen. Nach der Wässerung wurde am darauffolgenden Tag mit den Messüberfahrten begonnen. Die Messüberfahrten führten in Abhängigkeit vom Wassergehalt zu einer leichten Erhöhung der Trockendichte gegenüber dem zuvor bereits intensiv verdichteten Boden. Es wurde direkt die Beschleunigung der Bandage (m/s^2) über die gesamte Fahrspurlänge aufgezeichnet, ohne das Auswertesystem des Walzenherstellers zu benutzen. Dazu wurde das Rohsignal des Beschleunigungsaufnehmers mittels eigenem, vom Walzenhersteller unabhängigem Messequipment aufgezeichnet. Später erfolgten die Auswertung und die Berechnung der FDVK-Messwerte durch eine spezielle Software. Es fanden insgesamt 8 Messüberfahrten bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2 km/h statt. Dabei wurde die Amplitude der Beschleunigung ($0,9 \text{ mm/s}^2$) und Frequenz (30 Hz) der Vibrationswalze stets konstant gehalten. Die Auswertung der Bandagenschwingung zur Berechnung der ortsabhängigen (Rückrechnung über die Fahrtgeschwindigkeit) FDVK-Messwerte erfolgte analog zweier in der Praxis weitverbreiteten Messverfahren. Nach den 8 Messüberfahrten wurden entlang der Fahrspur in Abständen von 1 m mittels Ausstechzylinder die Dichten und Wassergehalte ermittelt. Ferner erfolgte die Prüfung der Tragfähigkeit des Versuchsbodens mit der dynamischen (E_{vd} -Wert) und statischen Lastplatte (E_{v2} -Wert).

Zu den durchgeführten Feldversuchen wurde ein weiterer Anfang der neunziger Jahre unternommener Feldversuch im Hinblick auf die aktuelle Fragestellung neu ausgewertet. In einer damals neuartigen Anwendung wurde das Messprinzip der FDVK benutzt, um die Homogenität einer mineralischen Basisabdichtung einer Deponie zu prüfen. Zu diesem Vorhaben liegen detaillierte Messergebnisse vor, welche nun neu ausgewertet wurden. Die Daten enthalten unter anderem umfangreiche Korrelationen von FDVK-Messwerten zu Trockendichten und Verdichtungsgraden. Zur Herstellung der Probestrecken wurden der Wassergehalt und die Struktur des verwendeten Einbaumaterials (Boden G) in speziellen Aufbereitungsverfahren in sehr homogener Weise eingestellt. Innerhalb einer Probestrecke wurde der Wassergehalt des Einbaumaterials planmäßig variiert. Die Dokumentation der Trockendichte, des Wassergehalts, die Ermittlung der statischen Tragfähigkeit sowie die Aufzeichnung des FDVK-Messwerts erfolgten weitestgehend analog zu den im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Feldversuchen. Die Ergebnisse waren somit gut in die bestehenden Erkenntnisse einzuordnen.

3 Folgerungen für die Praxis

Sowohl aus den Ergebnissen der Labor- als auch der Feldversuche konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Sowohl bindige Böden als auch Sande neigen vor allem bei geringer Dichte bzw. lockerer Lagerung und hohen Sättigungsgraden zum Aufweichen unter der dynamischen Belastung einer Vibrationswalze. Dann können Messfahrten mit einer Prüfwalze keine zuverlässigen Messdaten erzeugen. Der Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit kann dann ohnehin in der Regel nicht erbracht werden. Die Erhöhung der Tragfähigkeit zur Sicherstellung der Befahrbarkeit mit einer Vibrationswalze ist nach einer Reduzierung des Wassergehalts etwa durch Trockenlegung der Prüfspur oder der Zugabe von bodenverbessernden Stoffen möglich.
- Sobald eine zu prüfende Fläche befahrbar ist und ein reproduzierbarer FDVK-Messwert erhalten wird, kann die FDVK zum Nachweis einer homogenen Verteilung von Prüfgrößen (z. B. Dichte, Tragfähigkeit, Wassergehalt) d. h. zum Auffinden von Unregelmäßigkeiten (besonders "gute" oder "schlechte" Bereiche) in Prüflosen angewendet werden. Dies ist prinzipiell für alle Bodenarten möglich. Die Eingrenzung der Aussage auf nur eine Prüfgröße wie z. B. die Dichte gelingt dann, wenn die anderen Prüfgrößen z. B. der Wassergehalt und die Struktur von bindigen Böden über die zu prüfende Fläche nur in sehr engen Grenzen schwanken. Diese Homogenität der Prüffläche ist im Allgemeinen nur mit hohem gerätetechnischen Aufwand (Mischanlage zum Bau von mineralischen Tonabdichtungen) zu erreichen.
- Ist es notwendig, direkte Korrelationen zwischen einem Tragfähigkeitsindex (z. B. E_{v2} , E_{vd} oder CBR) und dem FDVK-Messwert zu schaffen, sind in Abhängigkeit von der Bodenart bezüglich des Wassergehalts Grenzen zu setzen. Da in den Versuchen nur einige für den Erdbau repräsentative Böden untersucht werden konnten und somit die Datenbasis vergleichsweise klein ist, wurden die Anwendungsgrenzen der FDVK auf der sicheren Seite liegend festgelegt. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere bei den Feldversuchen die Anwendungsgrenze der FDVK nicht überschritten wurde. Bei grobkörnigen Böden können bis zur vollen Wassersättigung ($S_r = 100\%$) stets eindeutige Korrelationen gefunden werden. Bei gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil von $\leq 15\%$ wird eine Grenze der Sättigung von $S_r = 90\%$ ($w = 1,2 \cdot w_{Pr}$) für Verdichtungsgrade $D_{Pr} > 95\%$ (Ausschluss der Bodenverflüssigung) abgeschätzt, bis zu welcher gute Korrelationen zwischen einem Tragfähigkeitsindex und dem FDVK-Messwert möglich sind. Bei gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil von $> 15\%$ und bei feinkörnigen Böden ist zumindest bis zum Proctorwassergehalt w_{Pr} , was etwa einer Sättigung $S_r = 80\%$ ($w = 1,0 \cdot w_{Pr}$) entspricht, der Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit mittels FDVK möglich. Grundsätzlich sollte dabei die Trockendichte nur in einer untergeordneten Größenordnung variieren.

Die getätigten Vorschläge sind in Bild 2 grafisch dargestellt.

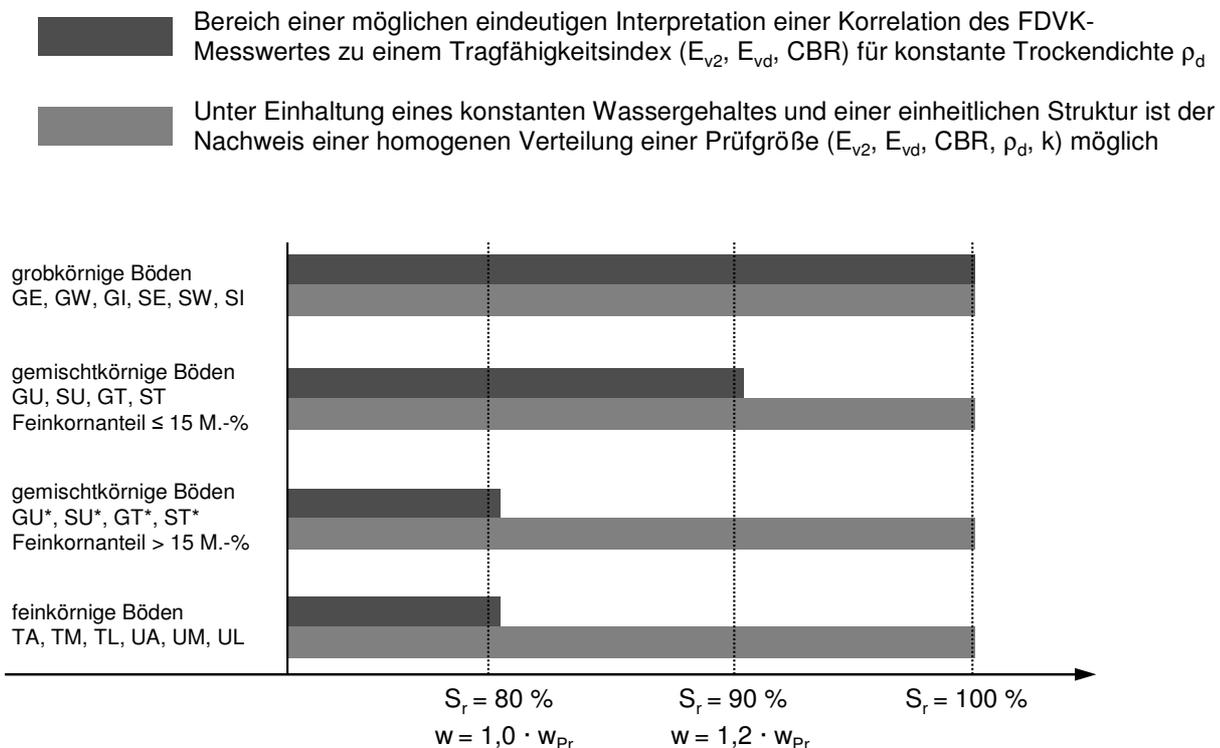


Bild 2: Aussagekraft der FDVK-Messwerte in Abhängigkeit von der Bodengruppe nach DIN 18196 und der Sättigung bzw. dem Wassergehalt