

## Bewertung der Verdichtungsanforderungen bei Erdarbeiten im Straßenbau unter Berücksichtigung nationaler und internationaler Erfahrungen

FA 5.127

Forschungsstelle: Technische Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (Prof. Dr.-Ing. W. Kudla)  
 Bearbeiter: Kudla, W. / Höbelbarth, Y.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn  
 Abschluss: Dezember 2004

### 1. Aufgabenstellung

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden Anforderungen und Prüfmethode in internationalen Regelwerken gesammelt und ausgewertet.

Dabei wurden sowohl die in internationalen Regelwerken angegebenen Anforderungen an den Verdichtungsgrad und den Verformungsmodul als auch die Art der vorgeschriebenen Überprüfung erfasst. Der Vergleich bezog sich auf die Art der Anforderung (Quantilenanforderung/Mindestwert), auf die Art des Proctorversuches (Standard-/modifiziert) und auf die Art der vorgeschriebenen Überprüfung (Prüfpläne auf statistischer Grundlage/Schwachstellenprüfung/Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) usw.) im Unterbau und im ungebundenen Oberbau.

Für die Bearbeitung der Forschungsarbeit wurde eine umfangreiche Recherche zu internationalen Regelwerken und begleitender Fachliteratur durchgeführt. Neben dem Regelwerk Deutschlands wurden die Regelwerke von 11 europäischen (Österreich, Schweiz, Belgien, Frankreich, Spanien, Italien, Portugal, Großbritannien, Norwegen, Schweden und Estland) und 4 Ländern aus Übersee (USA, Kanada, Brasilien und Australien) ausgewertet. Von jedem Land wurden die länderspezifischen Daten und Angaben in einzelnen Kapiteln wiedergegeben.

Anschließend wurden die umfangreichen Daten zusammengefasst. Um diese übersichtlich darzustellen, wurden Tabellenwerke entworfen, die im Anhang des kompletten Forschungsberichtes unter Z1 bis Z4 zu finden sind.

Des Weiteren erfolgte der Vergleich der internationalen Vorschriften mit den in Deutschland gültigen Regelwerken.

Schließlich wurde der Versuchsteil der Forschungsarbeit dargestellt, erläutert und ausgewertet. Weiterführende Arbeiten konnten vorgeschlagen werden.

### 2. Ergebnisse und Erkenntnisse der Studie

#### 2.1 Gliederung des Dammkörpers

Der Dammkörper ist in allen betrachteten Ländern grundsätzlich in Oberbau und Unterbau gegliedert. Dies entspricht auch der in Deutschland üblichen Einteilung. Die Schichtgrenze zwischen Ober- und Unterbau, welche in Deutschland das Planum darstellt, wird ebenfalls in nahezu allen der betrachteten Länder definiert. Der Unterbau wird in nahezu allen betrachteten Ländern in einen unteren (Haupt-)Teil des Unterbaus und in einen oberen Bereich der Dammschüttung, einer Schicht von ca. 0,5 m Mächtigkeit, unterteilt.

#### 2.2 Anforderungen an die Prüfmerkmale

Der Verdichtungsgrad als Prüfmerkmal für die Verdichtung wird in allen betrachteten Ländern bestimmt. Für einen Großteil der betrachteten Länder gelten die Anforderungen an den Verdichtungsgrad sowohl in den Schichten des ungebundenen Oberbaus als auch im Unterbau. Lediglich in Schweden bestehen die Anforderungen nur für den ungebundenen Oberbau.

Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad variieren zwischen den Ländern. In den meisten Fällen liegen die Werte zwischen 95 und 100 % der Standard-Proctordichte sowohl in den Schichten des ungebundenen Oberbaus als auch in den Schichten des Unterbaus. Dabei erfolgt eine Unterscheidung der Anforderungen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten.

In Deutschland sind die Anforderungen an den Verdichtungsgrad im ungebundenen Oberbau von der Bauklasse und im Unterbau von der anstehenden Bodengruppe und vom Abstand zum Planum abhängig.

Als Bezugsdichte zur Bestimmung des Verdichtungsgrades im Oberbau wird in Deutschland und allen betrachteten Ländern außer Spanien, Norwegen und Australien die einfache Proctordichte im standardisierten Proctorversuch verwendet. Im spanischen, norwegischen und australischen Regelwerk ist die modifizierte Proctordichte als Bezugsdichte im Oberbau vorgesehen. In Kanada kann als Bezugsdichte im Oberbau sowohl die Standard-Proctordichte als auch die modifizierte Proctordichte herangezogen werden. Zu beachten ist allerdings, dass in den verschiedenen Ländern die Standard-Proctordichte nicht unbedingt genau mit einer Verdichtungsarbeit von  $0,6 \text{ MNm/m}^3$  und die modifizierte Proctordichte nicht genau mit  $2,7 \text{ MNm/m}^3$  bestimmt werden. Diese Werte variieren teilweise. In Brasilien stehen für die Wahl der Bezugsdichte sogar drei verschiedene Varianten zur Verfügung. Neben der Standard- und modifizierten Proctordichte existiert dort eine "mittlere" Proctordichte mit einer Verdichtungsarbeit von  $1,31 \text{ MNm/m}^3$ .

Im Unterbau erfolgt die Ermittlung der Bezugsdichte für den Verdichtungsgrad in Deutschland und allen betrachteten Ländern außer Italien, Portugal und Kanada ebenfalls mit der einfachen Proctordichte im standardisierten Proctorversuch. In Spanien kann sowohl der Standard- als auch der modifizierte Proctorversuch zur Bestimmung der Bezugsdichte durchgeführt werden. Die Entscheidung, welcher Proctorversuch zur Anwendung kommt, trifft in diesem Fall der Bauherr bzw. dies wird vorab vertraglich festgeschrieben. In Großbritannien wird neben dem standardisierten Proctorversuch bei bestimmten Materialien der Vibrationshammerversuch zur Bestimmung der Bezugsdichte durchgeführt. Für Brasilien gilt im Unterbau, dass drei Verfahren zur Bestimmung der Bezugsdichte zur Auswahl stehen (wie im Oberbau).

Die Angaben zum Verformungsmodul variieren teils recht stark zwischen Deutschland und den betrachteten Ländern, was jedoch u. a. in den unterschiedlichen Kennwerten  $E_{V2}$ ,  $E_{V1}$  und  $M_E$  begründet liegt. In Deutschland, Frankreich, Spanien, Schweden, Norwegen und den USA wird der  $E_{V2}$ -Modul für die Beurteilung der Tragfähigkeit als maßgebend angesehen.

In Österreich ist dagegen der  $E_{V1}$ -Modul maßgeblich. Dieser wird aus der Erstbelastungskurve des statischen Plattendruckversuches ermittelt.

Als maßgebender Modul für die Beurteilung der Tragfähigkeit wird in der Schweiz, Belgien und Italien der Verformungsmodul  $M_E$  ermittelt. Angaben über Belastungszyklen und Belastungsintervalle können den einzelnen Länderkapiteln entnommen werden.

In Deutschland werden zudem Anforderungen an den Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  für Kies- und Schottertragschichten und Frostschutzschichten im ungebundenen Oberbau gestellt. Für die Dammsohle bis zum Planum gelten bei grobkörnigen Böden Richtwerte für den Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$ , sofern der Plattendruckversuch als indirektes Prüfverfahren verwendet wird.

In Österreich, Spanien und Norwegen werden ebenfalls Verhältniswerte angegeben, welche für die Schichten im ungebundenen Oberbau und für den Unterbau erreicht werden sollen. In Schweden gelten die Anforderungen an das Verdichtungsverhältnis nur für die Schichten im ungebundenen Oberbau. Die angegebenen Werte unterscheiden sich nur geringfügig von den in Deutschland geforderten Werten. In den anderen betrachteten Ländern sind keine Verhältniszahlen vorgeschrieben.

In Deutschland sind als einziges der betrachteten Länder Quantilanforderungen für die zu ermittelnden Prüfmerkmale Verdichtungsgrad im Unterbau und Verformungsmodul auf dem Planum in der ZTVE-StB 94/97 formuliert. Für den Verdichtungsgrad und den Verformungsmodul der ungebundenen Oberbauschichten gelten die üblichen "Grenzwerte" (Mindestwerte) [ZTVT-StB-95]. In den anderen betrachteten Ländern gelten generell Grenzwerte (Mindestwerte) für die zu bestimmenden Prüfmerkmale Verdichtungsgrad und Verformungsmodul.

Die Anforderung an das Verdichtungsverhältnis ist in Deutschland für die Schichten des ungebundenen Oberbaus als Grenzwert und für den Unterbau als Höchstquantil (allerdings als Richtwert bei Anwendung des Plattendruckversuches als indirektes Prüfverfahren) formuliert. In Österreich, Spanien, Schweden und Norwegen sind die Anforderungen an das Verdichtungsverhältnis als Grenzwerte (Höchstwerte) formuliert. In Schweden gilt außerdem, dass die Anforderungen an das Verdichtungsverhältnis für jeden Versuchspunkt erfüllt werden müssen. Generell werden in anderen Ländern keine Unterscheidungen zwischen der "Anforderung" und der "Entscheidungsgrenze" bei einer statistischen Abnahme vorgenommen.

### 2.3 Art der Prüfverfahren

In den Regelwerken der verschiedenen Länder finden sich Angaben zu direkten und indirekten Prüfverfahren. Direkte Prüfverfahren zur Bestimmung der Dichte des Bodens wie das Ballonverfahren, das Sandersatzverfahren, die Messung mit dem Ausstechzylinder und radiometrische Dichtemessungen sind in allen betrachteten Ländern üblich. Von den Ersatzverfahren sind das Ballonverfahren und das Sandersatzverfahren die am häufigsten vertretenen Untersuchungsverfahren. Das Ausstechzylinder-Verfahren kommt in Deutschland, in der Schweiz, in Spanien, Großbritannien, den USA und Brasilien zum Einsatz. Das Wasserersatzverfahren wird in Österreich, Italien und Australien zur Bestimmung der in situ Dichte durchgeführt. Des Weiteren kommen Öl-Ersatzverfahren in Spanien und Brasilien zum Einsatz. Radiometrische Untersuchungen mittels der Isotopsonde werden in jedem der betrachteten Länder außer Italien, Estland und Brasilien durchgeführt, bzw. es finden sich in den jeweiligen Regelwerken der drei Länder keine Angaben darüber.

Als Besonderheit sei die Überprüfung in Frankreich erwähnt. Dort wird eine kontinuierliche Kontrolle über die Bestimmung des Q/S-Verhältnisses durchgeführt. Mit Q wird das Volumen des verdichteten Bodens und mit S die verdichtete Fläche be-

zeichnet. Beide Kennwerte werden immer in der gleichen Zeiteinheit betrachtet. Die Q/S Werte werden in einem umfangreichen Tabellenwerk in Abhängigkeit von den Verdichter-Typen und den Bodenarten angegeben. Das komplette Tabellenwerk ist in französischer Sprache im *Guide Technique – Annexes techniques* enthalten. Die für die Bodengruppen  $A_1$  und  $A_2$  in englischer Sprache vorliegende Tabelle kann im Anhang F3 des Forschungsberichtes eingesehen werden.

Als indirekte Verfahren sind in Deutschland der statische Plattendruckversuch nach DIN 18134, der Dynamische Plattendruckversuch mit leichtem Fallgewichtsgerät nach TP BF-StB Teil B 8.3, das Arbeiten mit dem Benkelman-Balken, Druck- und Rammsondierungen, Setzungsmessungen sowie die flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) im Vorschriftenwerk geregelt.

Dieselben Verfahren finden sich auch im Regelwerk Österreichs wieder. In Österreich wird mit der FDVK ("kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis") nach RVS 8S.02.6 die Verdichtung auf Dammaufstandsflächen, auf dem Planum sowie bei unteren und oberen ungebundenen Tragschichten überprüft.

Im Schweizer Regelwerk finden sich außerdem Angaben zum "proof rolling". Mit modernen Verfahren wie der FDVK und dem dynamischen Plattendruckversuch wird ebenfalls gearbeitet, in den Normenwerken sind sie allerdings nicht enthalten, was in den veralteten Ausgaben der Schweizer Richtlinien begründet liegt (SNV 640 586 von 1971):

Die flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle ist in Deutschland, Österreich und Schweden ein häufig durchgeführtes Verfahren zur Verdichtungsprüfung. Die ZTVE-StB 94/97 sieht für Deutschland drei gleichrangige Methoden zur Verdichtungsprüfung vor, wovon die FDVK als Methode M2 im Regelwerk niedergeschrieben ist. Sollte sie für die Abnahme zur Anwendung kommen, ist eine Kalibrierung auf die örtlichen Bodenverhältnisse notwendig. Gleiches gilt für die Anwendung der FDVK in Österreich und Schweden. Die schwedische Richtlinie VÄG 94 sieht die FDVK nicht zwingend und nicht als alleiniges Verfahren vor, gibt aber aufgrund der deutlichen Reduzierung des Prüfaufwandes gegenüber den konventionellen Prüfverfahren einen starken Anreiz für den Einsatz dieser. In der Schweiz wird die flächendeckende Verdichtungskontrolle ebenfalls durchgeführt, es ist allerdings noch kein Regelwerk über deren Einsatz erschienen.

Eine Verdichtungsüberprüfung auf statistischer Grundlage, ähnlich der in Deutschland eingeführten Methode M1, ist in Schweden, Brasilien und Australien eingeführt. Dabei werden die Ansatzpunkte der Versuche zufällig mittels Zufallszahlen ausgewählt.

Im Vergleich der internationalen Regelwerke mit den in Deutschland gültigen Regelwerken ZTVE-STB und ZTVT-StB kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Regelwerke von Deutschland, Österreich, Schweden und Norwegen umfassend und gut gegliedert sind. Die Regelwerke anderer Länder sind bezüglich der Übersichtlichkeit schwieriger handhabbar. Besonders das US-amerikanische Regelwerk ist aufgrund der bundesstaatabhängigen Angaben schwer zu überblicken. Das Regelwerk Frankreichs bildet eine Ausnahme, da darin nicht die Anforderungen an die Verdichtungskenngrößen niedergeschrieben sind, sondern die darin enthaltenen Tabellenwerke Arbeits- und Verdichtungsanweisungen für die auszuführenden beinhalten.

## 3. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm wurde so konzipiert, dass Versuche an drei verschiedenen Böden (grob-, gemischt- und feinkörnig) und

bei drei verschiedenen Verdichtungszuständen (schwach verdichtet, mittel verdichtet, stark verdichtet) durchgeführt wurden. Das Versuchsprogramm diente zur Aufstellung von Korrelationen zwischen verschiedenen Prüfmerkmalen von direkten und indirekten Prüfverfahren. Auf den 3 Versuchsfeldern erfolgten folgende Arbeiten:

1. Bestimmung des Verdichtungsgrades  $D_{Pr}$  (Messung der Dichte im Feld mittels Ballonverfahren; Bestimmung der einfachen und modifizierten Proctordichte im Labor),
2. Bestimmung der Verformungsmoduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  mit dem statischen Plattendruckversuch,
3. Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  mit dem Dynamischen Plattendruckversuch,
4. Bestimmung der FDVK-Messwerte mit flächendeckender dynamischer Verdichtungskontrolle, sofern diese vom Auftragnehmer auf der Baustelle eingesetzt wird,
5. Bestimmung von Kennwerten mit der Leitungsgrabensonde, sofern diese zur Verfügung steht.

In den einzelnen Abschnitten werden die drei Versuchsfelder vorgestellt, die Versuche und deren Ergebnisse werden erläutert. Eine statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgt am Ende eines jeden Kapitels.

#### 4. Folgerungen und weiterer Forschungsbedarf

Den Hauptteil der Forschungsarbeit stellt der Vergleich der Anforderungen und Prüfungen im Erdbau und den ungebundenen Tragschichten in den verschiedenen Ländern dar. Für diesen Vergleich gilt:

1. Es können nicht einfach einzelne Anforderungen (z. B. Verdichtungsgrad in 1,5 m Tiefe unter Straßenoberkante) bei den einzelnen Ländern miteinander verglichen werden. Es muss immer die Gesamtkonstruktion der Straße mit beachtet werden.
2. Für einen Vergleich zwischen den einzelnen Ländern müssen die vorhandenen klimatischen Randbedingungen beachtet werden. Dies gilt nicht nur, wenn die Dicke des frost-sicheren Oberbaus in den einzelnen Ländern miteinander verglichen wird.
3. Es sollte diskutiert werden, inwieweit eine höhere Anforderung bzw. eine Verfestigung des oberen Bereiches des Unterbaus bei bindigem Boden zur langfristigen Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit sinnvoll ist.
4. Nur im deutschen, österreichischen und schwedischen Regelwerk sind Angaben für die Durchführung der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle FDVK vorhanden. Die FDVK ist eines der fortschrittlichsten Systeme zur Tragfähigkeitsüberprüfung.

5. Bei inhomogenen und steinigem gemischt-körnigen Böden ist es oft prüftechnisch schwierig die Proctordichte zu bestimmen. Es sollte deshalb überlegt werden, inwieweit die Vorgabe einer bestimmten Mindestzahl an Verdichtungsübergängen bei diesen Böden ausreichend ist und eine nachträgliche Prüfung entfällt.
6. Es wird vorgeschlagen, den  $E_{V1}$ -Modul zusätzlich oder auch alternativ zum  $E_{V2}$ -Modul in die Bewertung der Tragfähigkeit mit einzubeziehen.
7. In einigen wenigen Ländern wird als Bezugsdichte beim Proctorversuch nicht die Standard-Proctordichte, sondern die modifizierte Proctordichte verwendet. Dabei muss jedoch jeweils beachtet werden, dass die Verdichtungsarbeit zur Feststellung der Standard- und der modifizierten Proctordichte in den einzelnen Ländern unterschiedlich ist. Insofern ist ein Vergleich zwischen den Ländern schwierig. Der Vergleich der Anforderungen in den verschiedenen Ländern lässt keinen eindeutigen Schluss zu, ob als Bezugsdichte die Standard-Proctordichte oder modifizierte Proctordichte besser geeignet ist. Dahingehende Überlegungen sollten eher auf die durch die heutigen Verdichtungsgeräte in den Boden eingetragene Verdichtungsarbeit Bezug nehmen.
8. Die bei den Versuchsfeldern gewonnenen Ergebnisse zeigen zum großen Teil Korrelationen mit geringem Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Bodenkennwerten. Es sind dabei offensichtlich Auflockerungen bei einzelnen Prüfpunkten in sehr kleinräumigem Abstand aufgetreten. Zudem zeigte sich, dass nach dem ersten Verdichtungsübergang der erreichte Verdichtungsgrad noch sehr heterogen über das Kalibrierfeld verteilt war. Vor diesem Hintergrund sollte festgestellt werden, inwieweit eine optimale Anzahl von Verdichtungsübergängen festgelegt werden kann, bei der auf einer Fläche eine relativ gleichmäßige Verdichtung über die gesamte Fläche erreicht wird.
9. Neuere, in Deutschland weitgehend unbekannte Verfahren zur Verdichtungs- und Tragfähigkeitsüberprüfung z. B. Geogauge, RCCD und Loadmann sollten auf ihre Tauglichkeit im Rahmen von weiteren Forschungsprojekten getestet werden.

Die im deutschen Regelwerk geforderten Werte für Verdichtungsgrad, Verformungsmodul, Luftporenanteil und das Verhältnis  $E_{V2}/E_{V1}$  gehen aus jahrzehntelanger Erfahrung hervor und haben sich als sinnvoll erwiesen. Die wie in Deutschland untergliederten Anforderungen in Abhängigkeit von der Boden-Gruppe sind in den Ländern Österreich, Schweiz, Großbritannien und Norwegen üblich. In vielen anderen Ländern wird dagegen nur ein Einzelwert als Anforderung in Abhängigkeit der zu untersuchenden Schicht formuliert. Man kann also diesbezüglich das deutsche Regelwerk durchaus als eines der Fortschrittlichsten bezeichnen. □