

## Konzeption einer Anforderung an die Verdichtung von Böden auf der Basis der Messergebnisse der FDVK

FA 5.119

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)  
 Bearbeiter: Bräu, G. / Pelz, G.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn  
 Abschluss: März 2003

### 1. Aufgabenstellung

Mit der Einführung der ZTVE-StB 94/97 (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau 1994, Fassung 1997) stehen für die Verdichtungs- bzw. Tragfähigkeitsprüfung drei Prüfmethode zur Verfügung:

- Methode M 1: Vorgehensweise gemäß statistischem Prüfplan,
- Methode M 2: Vorgehensweise bei Anwendung flächendeckender dynamischer Messverfahren,
- Methode M 3: Vorgehensweise zur Überwachung des Arbeitsverfahrens.

Für die einzelnen Methoden sind Anweisungen zur systematischen Vorgehensweise für die Kontrolle der erreichten Qualität jedes einzelnen Prüfloses vorgegeben. Mit den in der ZTVE-StB definierten Entscheidungsregeln können die gestellten Anforderungen an die Verdichtung hinsichtlich "Annahme" oder "Rückweisung" bei Methode M 1 und M 3 objektiv beurteilt werden. Unter Prüflos wird dabei die zu prüfende oder geprüfte Fläche verstanden. Alle drei Methoden sind geeignet, diese Nachweise zu erbringen, allerdings mit unterschiedlicher Aussagegenauigkeit. Die Voraussetzung für den Vergleich von Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen ist die Anwendung der gleichen Prüfmethode.

Durch die maschinentechnische Entwicklung der Baugeräte konnte die maximal mögliche Einbau- und Förderleistung im Erdbau gewaltig gesteigert werden, sodass arbeitsintegrierte Prüfverfahren immer mehr an Bedeutung gewinnen. Für den Einsatz der flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im Rahmen der Methode M 2 sind allerdings die Entscheidungsregeln über "Annahme" oder "Rückweisung" noch nicht ausreichend transparent geregelt. Vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen wurde deshalb ein Forschungsvorhaben mit der Aufgabenstellung "Konzeption einer Anforderung an die Verdichtung von Böden auf der Basis der Messergebnisse der FDVK" initiiert. Hierbei soll versucht werden, Abnahmekriterien für die Methode M 2 zu entwickeln, mit denen sichergestellt werden kann, dass die Qualität des erstellten Erdbauwerkes den grundlegenden Anforderungen der ZTVE-StB entspricht. Weiterhin sollen Anwendungsmöglichkeiten der FDVK dargestellt werden.

### 2. Untersuchungsmethodik und -ergebnisse

#### 2.1 Anwendung der FDVK ohne Kalibrierung der Messwalze

Die Einsatzfähigkeit der FDVK ist neben der Anwendung im Rahmen der Methode M 2 vielfältig. Zunächst werden deshalb Anwendungsmöglichkeiten der FDVK vorgestelt, bei denen die

FDVK als Prüfverfahren ohne Kalibrierung der Messwalze und somit außerhalb einer Anwendung der Methode M 2 eingesetzt werden kann. Hierzu zählen:

- Anwendung der FDVK für das Proof-Rolling,
- Anwendung der FDVK zum Nachweis der Arbeitsanweisung,
- Anwendung der FDVK zur Steuerung der Verdichtung,
- Anwendung der FDVK zum Nachweis der maximal möglichen Verdichtung,
- Anwendung der FDVK zur Beurteilung des Untergrundes.

Die ersten beiden Anwendungen sind im Rahmen der Methode M 3 möglich. Die Methode M 3 beschreibt die Vorgehensweise zur Überwachung des Arbeitsverfahrens und eignet sich besonders für beengte Arbeitsräume, kleine Bauvorhaben, Hinterfüllungen, sowie Wiederverfüllungen von Leitungs- und Kabelgräben. Sofern in der Leistungsbeschreibung keine der drei Prüfmethode festgelegt wurde, gilt nach ZTVE-StB die Methode M 3 einschließlich des Mindestumfangs der Eigenüberwachungsprüfungen gemäß Tabelle 7 der ZTVE-StB als vereinbart.

Wird die FDVK für das Proof-Rolling bei Methode M 3 vereinbart, kann nach dem Einföhrungserlass für die ZTVE-StB durch das Bundesland Bayern der Umfang der punktuellen Prüfungen auf ein Drittel des erforderlichen Umfanges nach Tabelle 7 reduziert werden.

Bei Anwendung der FDVK zum Nachweis der Arbeitsanweisung kann nach dem "Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau" auf Einzelversuche verzichtet werden, wenn die bei einer Probeverdichtung erstellte Arbeitsanweisung so nachweislich kontrolliert wird.

Die Anwendung der FDVK zur Steuerung der Verdichtung und zum Nachweis der maximal möglichen Verdichtung kann als arbeitsintegriertes Verfahren zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Verdichtungsarbeit herangezogen werden. Dabei wird die optimale Anzahl an nötigen Überfahrten ermittelt und beim Nachweis der maximal möglichen Verdichtung zusätzlich dokumentiert. Die vorgestellte Entscheidungsregel berücksichtigt neben der Veränderung des arithmetischen Mittels bei aufeinanderfolgenden Messfahrten auch die Veränderung der Standardabweichung, die ein Indiz für die Gleichmäßigkeit der Verdichtung im Prüflos oder in der Prüfspur ist.

Die Anwendung der FDVK zur Beurteilung des Untergrundes ist ein einfaches Verfahren zur flächendeckenden Bewertung des Untergrundes. Es können Schwachstellen lokalisiert, anschließend punktuell geprüft und gegebenenfalls Bodenverbesserungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Insbesondere die letzten Anwendungsmöglichkeiten stellen keine vertragsrelevanten Abnahmekriterien von Prüflosen dar, die mit den Anforderungen der ZTVE-StB in Einklang zu bringen sind.

#### 2.2 Anwendung der FDVK im Rahmen der Methode M 2

Die Methode M 2 beschreibt die Vorgehensweise bei der Anwendung flächendeckender dynamischer Messverfahren. Sie ist im statistischen Sinne eine Vollprüfung und erlaubt die Beurteilung aller Punkte des Prüfloses. Auf Grund dieser Informationen

können durch Teilflächenbildungen einzelne Bereiche getrennt untersucht und bewertet werden, wenn die geforderten Anforderungswerte nicht überall erreicht werden. Weil in der ZTVE-StB keine Grenzwerte für die Anwendung der FDVK im Rahmen der Methode M 2 als indirektes Prüfverfahren definiert sind, ist durch eine Kalibrierung der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der FDVK und dem direkten Prüfmerkmal zu ermitteln. Da bislang keine objektiven Abnahmekriterien existieren, die eine einfache Beurteilung – möglichst auf der Grundlage eines zusammenfassend ermittelten einzelnen Wertes – erlauben, werden in diesem Forschungsbericht verschiedene Kriterien entwickelt und untersucht.

Die Anforderungswerte nach der ZTVE-StB sind 10 %-Mindestquantile. Damit kann ein Unterschreitungsanteil bis zu 10 % der Grundgesamtheit toleriert werden. Diese Forderung wurde bei der Entwicklung der Methode M 1 abgeleitet. Da die Methode M 1 somit als Basis für die Anwendung der Quantilwerte bei der ZTVE angesehen werden kann, wurde sie für die Untersuchungen in dieser Forschungsarbeit als eines der Referenzkriterien gewählt.

Hierzu wurde zunächst bei einem nach Methode M 2 zu prüfenden Bauprojekt zusätzlich die Methode M 1 im vollen Umfang im Rahmen dieser Forschungsarbeit zur Anwendung gebracht. Da die zusätzliche Durchführung der Methode M 1 jedoch sehr aufwändig ist, wurde mit Hilfe eines am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München entwickelten Computerprogramms mittels der Messwerte der flächendeckenden dynamischen Prüfung die Methode M 1 simuliert. Die Simulationen erzielten annähernd die gleichen Ergebnisse wie die tatsächlich durchgeführten Versuche bei Methode M 1 und wurden deshalb bei allen Prüflosen angewendet.

Anhand von 795 Prüflosen wurden in dieser Forschungsarbeit fünf verschiedene Abnahmekriterien untersucht, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Tab. 1: Abnahmekriterien

Kriterien- gruppe	Kriterien	Beschreibung
1	1 bis 6	Beschränkung der Gesamtschlechtfläche
2	7 bis 13	Beschränkung der Schlechtfläche mit Abstufungen
3	14 bis 21	Beschränkung der größten zusammenhängenden Schlechtfläche mit Abstufungen
4	22 bis 27	Statistische Kriterien $\mu - k_S \cdot \sigma \geq T_M$
5	28 bis 31	Gewichtete Schlechtflächen $P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot F_i \leq q$

Kriteriengruppe 1 beschränkt die Gesamtschlechtfläche und kann zum Nachweis der Mindestanforderungen der ZTVE-StB verwendet werden. Die Anzahl der Messwerte, die den aus der Kalibrierung ermittelten Mindestwert unterschreiten, geteilt durch die Gesamtanzahl an Messwerten eines Prüfloses, ergeben einen prozentualen Anteil, den Schlechtflächen- bzw. Unterschreitungsanteil. Die Begrenzung des Schlechtflächenanteils auf maximal 10 % entspricht dem 10 %-Mindestquantil der ZTVE-StB. Der Informationsgehalt bei der Vollprüfung wird bei der Auswertung nicht ausgeschöpft.

Kriteriengruppe 2 ist eine Erweiterung der Gruppe 1 und begrenzt zusätzlich starke Unterschreitungen der Anforderung.

Die Entscheidung über Annahme oder Ablehnung eines Prüfloses muss allerdings anhand mehrerer Prüfgrößen erfolgen.

Kriteriengruppe 3 beurteilt die größte zusammenhängende Schlechtfläche. Hierbei wird die Ausdehnung der größten zusammenhängenden Schlechtfläche für verschiedene Anforderungswerte beschränkt. Der Gesamtschlechtflächenanteil wird bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Deshalb ist diese Kriteriengruppe nur in Kombination mit Kriteriengruppe 1 zu empfehlen.

Zur Beurteilung, in welchem Umfang Schlechtflächen zusammenhängen und wie sie verteilt sind, können weitere Verfahren und Kriterien angewendet werden wie die "Nearest Neighbour"-Analyse oder Verfahren mit Flächenmomenten. In Abstimmung mit der Betreuergruppe der Forschung wurden hier jedoch keine weiteren Kriterien eingeführt und näher untersucht.

Kriteriengruppe 4 ist ein statistisches Kriterium. Es basiert auf der Annahme einer Normalverteilung der Einzelwerte der Vollprüfungsergebnisse. Die Entscheidungsregel  $\mu - 1,28 \cdot \sigma \geq T_M$  wurde analog zur Methode M 1 für die Vollprüfung abgeleitet. Diese einfache Entscheidungsregel berücksichtigt nicht nur den Unterschreitungsanteil, sondern auch die Gleichmäßigkeit der Verdichtung.

Bei der Überprüfung auf Normalverteilung wurde festgestellt, dass die Ergebnisse vieler Prüffelder nicht normalverteilt sind. Nur 41 % der 795 untersuchten Prüffelder konnten als annähernd normalverteilt angesehen werden. Die überwiegende Anzahl der untersuchten Prüflose besitzt eine positive Schiefe, das heißt, die Verteilung ist links-steil.

Untersuchungen über die Auswirkung einer positiven Schiefe bei Prüflosen mit einem begrenzten Unterschreitungsanteil in Anlehnung an die Vorgaben der ZTVE-StB haben folgende Ergebnisse geliefert:

- In Abhängigkeit von der Schiefe wurde der Unterschreitungsanteil bei einem Prüflos bei Anwendung der Entscheidungsregel  $\mu - 1,28 \cdot \sigma \geq T_M$  um bis zu 10 %-Punkte höher ermittelt als der tatsächlich vorhandene Unterschreitungsanteil (Schiefe > 1).
- Für den Auftragnehmer besteht ein erhöhtes Risiko, dass das Prüflos fälschlicherweise abgelehnt wird, wenn die Anpassung an die Normalverteilung nicht vorhanden ist.
- Für den Auftraggeber besteht kein erhöhtes Risiko, dass das Prüflos fälschlicherweise angenommen wird, wenn die Anpassung an die Normalverteilung nicht vorhanden ist.

Ein Vorteil des statistischen Kriteriums ist die Beurteilung über Annahme oder Ablehnung des Prüfloses, anhand einer Prüfgröße. Dabei wird neben dem Unterschreitungsanteil auch die Gleichmäßigkeit der Verdichtung beurteilt.

Kriteriengruppe 5 berücksichtigt sowohl den Schlechtflächenanteil als auch das Maß der Anforderungsverletzung an den Unterschreitungsstellen. Der Vorteil gegenüber Kriteriengruppe 4 besteht darin, dass die Güte der Übereinstimmung mit der Normalverteilung keinen Einfluss bei der Auswertung der Prüflose besitzt, weil die Grundgesamtheit unmittelbar beurteilt wird. Die Entscheidung über Annahme oder Ablehnung des Prüfloses erfolgt anhand einer Prüfgröße. Dabei werden bei einer geringen Unterschreitung der Schlechtflächen unter den FDVK-Grenzwert größere Schlechtflächen toleriert als bei großen Unterschreitungen. Zum Beispiel können bei dem Kriterium

$$P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot F_i \leq 100 \%$$

alle Messwerte unterhalb des geforderten FDVK-Grenzwerts liegen, wenn dieser um höchstens 1 % unterschritten wird. Bei

einem Schlechtfächenanteil von 10 % darf der FDVK-Grenzwert im Mittel um 10 % unterschritten werden. Je schlechter die Qualität einer Schlechtfäche, umso stärker wird diese bei der Auswertung berücksichtigt.

Kriteriengruppe 5 ist als Entscheidungsregel bei Anwendung der FDVK im Rahmen der Methode M 2 als baupraktisch orientiertes Kriterium gut geeignet. Der Entscheidungswert  $q$  kann dem gewünschten Qualitätsniveau und dem Arbeitshorizont (z. B. Dammaufstandsfläche, Planum, Tragschicht, usw.) angepasst werden.

Vor erfolgter Annahme eines Prüfloses muss nach dem "Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau" die gleichmäßige Verteilung der Unterschreitungsstellen im Prüflos untersucht werden. Dabei ist die visuelle Betrachtung des Flächenplots subjektiv. Die Anwendung von geostatistischen Verfahren erlaubt eine objektivere Beurteilung. Mit der Nearest Neighbour-Analyse kann anhand einer einzigen Prüfgröße die Verteilung der Unterschreitungsstellen in der Fläche abgeschätzt werden.

Desweiteren kann die gleichmäßige Verteilung der Unterschreitungsstellen im Prüflos mit Hilfe von Variogrammen oder anhand von Flächenmomenten der Unterschreitungsstellen abgeschätzt werden.

## 4. Folgerungen für die Praxis

Mit Hilfe der definierten Abnahmekriterien können bei der Anwendung der FDVK im Rahmen der Methode M 2 eindeutige Entscheidungen über Annahme oder Ablehnung eines Prüfloses getroffen werden. Für die Auswertung bieten sich vor allem das statistische Kriterium  $\mu - 1,28 \cdot \sigma \geq T_M$  und die Entscheidungsregel  $P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot F_i \leq q$  an. Allerdings zeigt sich ein

deutlicher Einfluss bei den statistischen Kriterien, wenn die Verteilung der Messwerte nicht annähernd einer Normalverteilung entspricht. Die Entscheidungsregel

$P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot F_i \leq q$  beurteilt unmittelbar die Grundgesamtheit

und ist somit von der Art der Verteilung unabhängig.

Zusätzlich kann die gleichmäßige Verteilung der Unterschreitungsstellen im Prüflos mit Hilfe der Nearest Neighbour-Analyse abgeschätzt werden.

Die Größe zusammenhängender Flächen kann auch sinnvoll und unter Heranziehung einer skalaren Beurteilungsgröße mit Hilfe von Flächenmomenten beurteilt werden.

Bei Anwendung der Entscheidungsregel

$P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot F_i \leq q$  mit anschließender Nearest Neighbour-

Analyse oder einer anderen Analyse der flächigen Schlechtfächenverteilung kann die Qualität eines Prüfloses ohne Fehlent-

scheidungsrisiko für Auftraggeber und -nehmer mit objektiven Kriterien beurteilt werden.

In Abstimmung mit dem Betreuungsausschuss dieses Forschungsvorhabens wurden keine weiteren Untersuchungen bei den Verfahren, die die flächige Verteilung der Schlechtfächen bewerten, durchgeführt. Im Rahmen weiterführender Auswertungen und baupraktischer Anwendungen sollten diese Abnahmekriterien aber weiter getestet werden.

Eine baupraktische Anwendung der definierten Kriterien liefert im Ergebnis eine einheitliche Qualität der Verdichtung. Die Abnahmekriterien können in den auf den Messwalzen installierten Auswerteeinheiten implementiert werden. Somit kann bereits direkt nach der Messfahrt die Verdichtungsqualität objektiv beurteilt werden. Der Walzenfahrer kann die Verdichtungsarbeit gezielt steuern. Dem Fachkundigen vor Ort wird dadurch die Bewertung der Messergebnisse erleichtert. Eine effiziente Verdichtung mit anschließend eindeutig geregelten Entscheidungskriterien führt zu einer Zeitersparnis im Bauablauf und wirkt sich positiv auf die Qualität und Kosten aus.

Neben den Anwendungsmöglichkeiten der FDVK kann für die Praxis anhand der Forschungsergebnisse eine erste Abschätzung über das Qualitätsniveau zwischen Methode M 1 und M 2 abgeleitet werden.

Die einzelnen Prüfmethode sind nicht direkt miteinander vergleichbar. Deshalb ist die Anwendung der gleichen Prüfmethode die Voraussetzung für den Vergleich von Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen.

Ein Vergleich des Qualitätsniveaus zwischen der Methode M 1 bei Anwendung der Variablenprüfung und Methode M 2 bei Anwendung der Entscheidungsregel  $\mu - 1,28 \cdot \sigma \geq T_M$  haben bei der Untersuchung der 795 Prüflose unter anderem gezeigt, dass

- Methode M 1 ein abschätzbares, aber im Vergleich zur Methode M 2 relativ hohes Risiko einer Fehlentscheidung besitzt,
- Methode M 2 auf Grund der Vollprüfung das Risiko einer Fehlentscheidung nicht besitzt,
- die Anforderungen an ein Prüflos bei Methode M 2 bei Anwendung der Entscheidungsregel  $\mu - 1,28 \cdot \sigma \geq T_M$  höher sind als bei Methode M 1.

Wird ein Prüflos flächendeckend geprüft und der Unterschreitungsanteil ermittelt, kann bei Annahme einer Normalverteilung der Einzelergebnisse die mittlere Annahmewahrscheinlichkeit des Prüfloses für Methode M 1 in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs  $n$  ermittelt werden.

Im Rahmen weiterführender Auswertungen kann ein Zusammenhang zwischen den Qualitätsniveaus von Methode M 1 und M 2 hergestellt werden. Die Ansätze dazu können diesem Forschungsvorhaben entnommen werden. □