

# Anpassung der flächendeckenden dynamischen Prüfung der Verdichtung an die baustellen-spezifischen Anforderungen

FA 5.104

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. R. Floss)  
 Bearbeiter: Bräu, G. / Hartmann, K.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn  
 Abschluss: August 2000

## 1. Aufgabenstellung

Mit der Einführung der neuen ZTVE-StB 94 und den begleitenden Prüfvorschriften sind verschiedene Wege zur Qualitätskontrolle aufgezeigt worden. Insbesondere die Methode M2 „Flächendeckende Verdichtungskontrolle“ (FDVK) stellt hier ein Hauptverfahren dar, welches in starkem Maße Eingang in die Praxis des Erdbaues und des Straßenbaues fand.

Das hier bearbeitete Forschungsvorhaben hat das in der Methode M2 vornehmlich zur Anwendung kommende Verfahren der FDVK zum Inhalt.

Innerhalb der Aufgabenstellung sollten folgende Aspekte betrachtet werden:

- Ableitung von Grenzwerten an den dynamischen Messwert der FDVK
- Positionierung von Prüfwalzen.

### 1.1 Grenzwertfindung für Regelanwendungen

Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand der FDVK ist für jede Baumaßnahme eine Kalibrierung der Prüfwalze auf die speziellen Verhältnisse vor Ort durchzuführen, um die FDVK-Werte als Abnahmekriterium einsetzen zu können.

Die Kalibrierung des FDVK-Messsystems wird über eine Regressionsrechnung erreicht. Bei dieser wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem dynamischen Messwert und einer Reihe von Vergleichswerten aufgestellt. Aufgrund der gefundenen Beziehung kann über die Rückbindung an einen vorgegebenen Anforderungswert, wie beispielsweise den statischen Verformungsmodul  $E_v$ , ein dynamischer Messwert als Grenzwert für eine ausreichende Verdichtungsqualität festgelegt werden. Da dies einen nicht unerheblichen Aufwand darstellt und sich diese Vorgehensweise für kleinere bis mittlere Baumaßnahmen womöglich als nicht rentabel erweist, sollte versucht werden, für Regelanwendungen Vorschläge für mögliche Grenzwerte an den dynamischen Messwert der FDVK abzuleiten. Diese Grenzwerte sollen letztendlich eine Abnahme der Bauleistung erlauben, ohne jeweils eine Kalibrierung der dynamischen Messwerte vor Ort durchführen zu müssen. Der Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit lag auf der Betrachtung der Zusammenhänge bei der Anwendung der FDVK auf grob- und gemischtkörnigen Bodenarten.

### 1.2 Positionierung

Ein weiterer Aspekt, der in Verbindung mit diesem Forschungsvorhaben behandelt wurde, betrifft die Walzenpositionierung während der Prüffahrt. Da bei den derzeit auf dem Markt erhältlichen Mess- und Dokumentationssystemen die Messwerte manuell den jeweiligen Baustellenkoordinaten zugeordnet werden müssen, was situationsbedingt aufwändig und fehleranfällig sein kann, wurde hier die Einsatzmöglichkeit der Walzenpositionierung mittels des Global Positioning Systems (GPS) und alternativer Systeme untersucht. Das Positionierungssystem sollte in das FDVK-Messsystem integriert werden und die Position (bzw. die Fahrspur) der Messwalze automatisch während der Verdich-

tungskontrolle erfassen. Die Untersuchungen geschahen im Hinblick auf die erzielbare Genauigkeit der verschiedenen Systeme und der damit verbundenen Kosten. Das angestrebte Ziel war die Klärung der Frage, ob mit den auf dem Markt befindlichen „Positionierungssystemen“ eine gegenüber umständlicher geometrischer Vermessung, einfachere und somit auch wirtschaftlichere Erfassung der Walzenfahrspur in Verbindung mit den dynamischen Messwerten möglich ist.

## 2. Untersuchungsmethodik

Als Grundlage für die Ableitung von Anforderungswerten musste eine möglichst umfangreiche Datenbasis erstellt werden. Somit bestand die erste Aufgabe bei diesem Forschungsvorhaben darin, möglichst viele Daten der verschiedensten Anwendungsbereiche zu sammeln und in einer Datenbank zusammenzufassen. Hierzu wurden in einer Rundschreibenaktion Baufirmen, Ingenieurbüros, Straßenbauämter etc. um Unterstützung gebeten. Dadurch ließen sich bundesweit eine Reihe von Daten sammeln. Als Ergänzung zu den gesammelten Daten wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens zusätzlich eigene Versuche durchgeführt.

Bei der Ableitung von möglichen Grenzwerten für Regelanwendungen der FDVK vollzog sich die Vorgehensweise über das Zusammenfassen von möglichst allgemeinen Daten, die ein breites Spektrum von Randbedingungen abdecken, bis hin zu immer engeren Auswahlkriterien. Im ersten Schritt wurden sämtliche Daten zusammengefasst, für die jeweils ein einheitlicher dynamischer Mess- und Vergleichswert vorlag. Dies ist für den dynamischen Messwert der Omega-Wert bzw. der CMV-Wert, welcher der Bomag Terrameter bzw. der Compactometer von Geodynamik liefert. Als Vergleichswerte wurden der Verformungsmodul  $E_{v2}$  und der Verdichtungsgrad  $D_{pr}$  herangezogen. Sonstige Einflüsse aus den Randbedingungen für den Boden und der Vibrationswalze blieben zunächst unberücksichtigt.

In den folgenden Schritten wurden dann die Messdaten betrachtet, die für einen grobkörnigen bzw. einen gemischtkörnigen Boden bis zu einem Feinkorngehalt von 15 % ermittelt wurden. Im weiteren Vorgehen wurde zwischen den dynamischen Messwerten unterschieden, bei denen ein Einfluss aus dem Untergrund auf die zu prüfende Bodenschicht und bei denen kein Untergrundeinfluss auf die Messwertbildung der dynamischen Messwerte zu erwarten war. Anschließend fand eine weitere Differenzierung der Versuchsdaten nach dem Einfluss der „großen“ und „kleinen Verdichtungsamplitude“ der Walzen statt. Um hierbei die Randbedingungen bezüglich der Walzenparameter möglichst konstant zu halten, sind nur Vibrationswalzen berücksichtigt worden, deren Walzengewicht und das Verhältnis Walzenachslast zu Unwuchtkraft in einem bestimmten Bereich zu liegen kamen. Das Walzengewicht und Achslast-Unwuchtkraftverhältnis wurden für die Auswertung so festgelegt, dass eine möglichst große Anzahl von Daten berücksichtigt werden konnte.

Unberücksichtigt blieben bei der Auswahl der Daten die bei den verschiedenen Baumaßnahmen vorliegenden Fahrgeschwindigkeiten der Prüfwalzen sowie mögliche geringe Schwankungen der für jede Walze typen- und amplitudengerecht eingestellten Unwuchtfrequenz. Eine Auswahl der Daten nach diesen und weiteren Gesichtspunkten führt derzeit noch zu einer zu starken Datenreduktion, so dass eine Auswertung aufgrund der geringen Messwertanzahl nicht sinnvoll erscheint.

Für die Auswertung der gesammelten Versuchsdaten kamen Methoden der Statistik zur Anwendung. Es wurden Regressions- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Bei der Regressionsanalyse wurde ein linearer Funktionsansatz zur Beschreibung der Beziehung zwischen dem dynamischen Messwert und

dem Vergleichswert gewählt. Die Regressionsrechnung wurde jeweils mit logarithmierten und nicht logarithmierten Daten durchgeführt.

Bei der Bearbeitung der Fragestellung betreffend der Positionierung der FDVK-Prüfwalzen ist schwerpunktmäßig das Global Positioning System (GPS) in der Untersuchung mit aufgenommen worden. Da aber auch alternative Konzepte mit zu betrachten waren, ist im Vorfeld in den Bereichen der Navigation bzw. der Geodäsie auch nach alternativ einsetzbaren Systemen gesucht worden. Nach einer rein theoretischen Behandlung der Fragestellung konnten mit einem Differentiellen GPS-Empfänger (Geometer 12L) der Firma GEOsat GmbH Versuche durchgeführt werden. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen 12 Kanal DGPS-Empfänger mit separater Antenne und einem im Gerät integrierten Korrekturdatenempfänger.

### 3. Untersuchungsergebnisse

Die gesammelten und zur Auswertung herangezogenen Versuchsdaten weisen in Bezug auf den Informationsgehalt der bei den Kalibrierungen bestehenden Randbedingungen starke Unterschiede auf. Für eine Auswertung und für die durchzuführende Zuordnung der Daten zur jeweiligen Auswerteeinheit war die Frage zu klären, welche der Randbedingungen auf die Bildung der dynamischen Messwerte einen entscheidenden Einfluss hatte. Oftmals konnten nur vage Annahmen über die Randbedingung und deren Einfluss und somit auf die Einteilung der Versuchsdaten zu einer gemeinsamen Auswertung getroffen werden.

Aus dieser Unsicherheit heraus wurde die Auswertung der Versuchsdaten mit relativ groben Forderungen an die einzuhaltenen Randbedingungen innerhalb einer Auswerteeinheit durchgeführt. Bei der Auswertung blieb der Einfluss der Unwuchtfrequenz und der Fahrgeschwindigkeit unberücksichtigt. Der Einfluss einer Schichtung innerhalb der Messtiefe der FDVK Prüfwalze, die Korngrößenverteilung, der Wassergehalt, die Kornform, die Walzenparameter (Gewicht, Amplitude usw.) konnten nur näherungsweise von ihrer Größenordnung erfasst werden. Für eine detailliertere Betrachtung liegen derzeit noch nicht genügend Kalibrierdaten vor. Hieraus ergaben sich größere Schwankungen in den Ergebnissen. Die Ergebnisse der Auswertung bezüglich der Omega-Werte und auch der CMV-Werte zeigen, dass eine Zusammenfassung der Daten von Kalibrierfeldern unterschiedlicher Herkunft zu interpretierbaren Resultaten führen kann.

Die Auswertungen der Omega-Werte im Hinblick auf die Verdichtungsamplitude konnte wegen der relativ großen Messwertanzahl, bei denen einigermaßen konstante Randbedingungen vorlagen, zielführend durchgeführt werden. Bei den CMV-Werten lässt sich diese detaillierte Betrachtungsweise aufgrund der zu verschiedenen Randbedingungen, besonders die der Walzenparameter, nicht so ohne weiteres durchführen.

Bei der Untersuchung der verschiedenen Konzepte zur Lösung der Positionierungsfrage wurde schnell deutlich, dass es bis zum Erscheinen des GPS kein Navigationsverfahren auf dem Markt gab, welches bezüglich Verfügbarkeit, Genauigkeit, Gerätepreis und der Handhabung den gestellten Anforderungen gerecht wurde.

Es sollen noch einmal kurz die wesentlichen Punkte aufgeführt werden, die für den Einsatz des GPS bei der Positionierung von FDVK Messwalzen sprechen:

- Das System ist überall und zu jeder Zeit einsetzbar.
- Es hat eine ausreichende Genauigkeit.
- Es ist im Vergleich zu anderen in Frage kommenden Systemen kostengünstig.

- Es ist ein vollautomatisches System.
- Es ist sehr anwenderfreundlich. Man benötigt keine Fachkräfte, um die entsprechende Positionierungsaufgabe durchführen zu können.

Die gestellte Aufgabe, ob die Echtzeitpositionierung von FDVK-Messwalzen in einem Genauigkeitsbereich des GPS-Systems von 1 bis 3 Metern zu realisieren ist, konnte im Rahmen von zwei Baumaßnahmen erprobt werden.

Der Differentielle GPS-Empfänger (DGPS) wurde an zwei Baumaßnahmen zur Aufzeichnung der Walzenspur eingesetzt. Auf einem Baufeld waren die Ergebnisse sehr zufriedenstellend. Die Fahrspur der Prüfwalze konnte genau nachvollzogen werden. Die Positionsaufzeichnung und die damit in Verbindung stehende Positionskorrektur wurde zuverlässig vom Empfänger durchgeführt.

Auf dem Baufeld einer anderen Baumaßnahme war die Aufzeichnung der Position durch einen häufigeren Ausfall der Korrekturdatenübertragung gekennzeichnet. Das GPS-Signal von den Satelliten konnte hingegen immer empfangen werden. Bei dieser Baustelle befanden sich Brückenbauwerke, hohe Dämme, Baumgruppen und eine 4 bis 5 m hohe Wand aus Beton im Wechsel in unmittelbarer Nähe zur Fahrspur der Prüfwalze.

Die gesamte Durchführung dieser Positionierungsaufgabe konnte mit einem minimalen Aufwand durchgeführt werden und zeigte ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis bezüglich der aufgezeichneten Fahrspur.

### 4. Folgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse bezüglich der Grenzwertfindung zeigen eine Tendenz auf, die bei Fehlen einer gültigen Messwertbeziehung aus einer Kalibrierung vor Ort eine Richtung vorgibt, welche zur ersten Beurteilung der Tragfähigkeit bzw. der Verdichtung einen Anhalt bieten kann. Nicht zuletzt liegt es am System mit seinen vielen variablen Parametern selbst, dass die Messwerte in einem relativ großen Band streuen. Trotzdem können die gezeigten Messbereiche für eine erste Orientierung bei der Wahl eines Anforderungswertes herangezogen werden.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen die Notwendigkeit, die bestehende Datenbank weiter zur ergänzen, um somit auch die Bereiche, die aufgrund mangelnder Daten nicht genügend oder überhaupt nicht betrachtet werden konnten, auswerten zu können.

Bei der Untersuchung über die Anwendbarkeit von modernen Positionierungssystemen hat sich gezeigt, dass der Verfolgungstachymeter und das Global Positioning System (GPS) zielführend eingesetzt werden können. Die Vorteile des GPS gegenüber dem Verfolgungstachymeter sprechen für die Anwendung des GPS bei der FDVK.

Aufgrund der verschiedenen Systeme, die sich in den erzielbaren Genauigkeiten bei der Positionsermittlung und der dafür anfallenden Kosten unterscheiden, muss für den entsprechenden Anwendungsfall unterschieden werden. Für Anwendungsfälle, bei denen es nur um die Aufzeichnung zur Überprüfung der gefahrenen Walzenspuren geht, sind die hier dargestellten Möglichkeiten mit einem realisierbaren Genauigkeitsbereich von 1 bis 3 m ausreichend.

Im Hinblick auf die Kalibrierung der Messwalzen ist dieser Genauigkeitsbereich des GPS-Systems vollkommen unzureichend. Durch die relativ große Schwankungsbreite der ermittelten Positionen ist eine genaue Messwertzuordnung zum Vergleichsversuch nicht möglich. Diese Aufgabenstellung wird sich nur mit einem sehr teuren und hochgenauen geodätischen GPS-System lösen lassen. □