

# Einsatzmöglichkeiten ingenieurgeophysikalischer Methoden zum Feststellen der Verdichtung bei Erd- und Felsarbeiten im Straßenbau

FA 5.112

Forschungsstelle: Geophysik GGD mbH, Leipzig  
 Bearbeiter: Dörrer, T./Fröhlich, K./Geiling, P./Lorenz, K. / Schulze, E.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn  
 Abschluss: April 1999

## 1. Aufgabenstellung

Ingenieurgeophysikalische Methoden werden bisher bei Erd- und Felsarbeiten im Straßenbau nicht entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit eingesetzt. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass diese Methoden für andere Bereiche der Angewandten Geowissenschaften, wie der Lagerstättenkunde, entwickelt und angewendet wurden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird untersucht, ob und wie die verschiedenen geophysikalischen Methoden (Seismik, Gravimetrie, Elektrik, Radiometrie) zur Ermittlung von Verdichtungsgrad, Fehlstellen, Verdichtungsfähigkeit, Wassergehalt und Porenanteil eingesetzt werden können.

## 2. Untersuchungsmethodik

Neben allgemeinen Angaben werden in den ersten drei Kapiteln die Ergebnisse der Recherchen und die Ausgangsgrundlagen beschrieben.

Die bisher gültige Definition der Verdichtung wird in Voß u. a. (1986), wie folgt, gegeben:

„Unter Verdichtung ist jeder Vorgang zu verstehen, bei dem der Hohlraumgehalt eines Bodens verringert wird. Sie führt zu einer Vergrößerung der Scherfestigkeit des Bodens und zu einer Verminderung einer Zusammendrückbarkeit, seiner Durchlässigkeit sowie seiner Neigung, Wasser aufzunehmen und zu schwellen.“

Mit der Verdichtung werden folgende Kenngrößen des Bodens verändert:

- |                   |               |
|-------------------|---------------|
| – Porenzahl       | Verringerung  |
| – Rohdichte       | Vergrößerung  |
| – Scherfestigkeit | Vergrößerung. |

Die Veränderung dieser nutzbaren petrophysikalischen Kontraste wird dem weiteren Bearbeitungsmodell zugrunde gelegt.

## 3. Untersuchungsergebnisse

Im Kapitel 4 werden die ingenieurgeophysikalischen Verfahren (Gravimetrie, Seismik, Georadar, Geoelektrik und Radiometrie) beschrieben und es erfolgt eine Beurteilung ihrer Einsatzfähigkeit für die Lösung der Aufgabenstellung des Forschungsthemas.

Es erweist sich, dass die Verfahren Gravimetrie und Georadar für die Verdichtungskontrolle nicht geeignet sind. Die Radiometrie als Routineverfahren wird bei den weiteren Arbeiten nicht berücksichtigt.

Aufgrund der bestehenden theoretischen Abhängigkeiten zwischen geophysikalischen und bodenmechanischen Kennwerten richten sich die weiteren Untersuchungen auf die geoelektrischen und seismischen Verfahren aus.

Vor dem Einsatz von geophysikalischen Methoden bei der Kontrolle der Verdichtungsarbeiten im Feld sollten zuerst mit einem Laborversuchsprogramm die Zusammenhänge zwischen den petrophysikalischen Kontrasten (Dichte und Porenzahl, Verdichtungsgrad) und den geophysikalischen Parametern (Boden-

widerstand, Longitudinalwellengeschwindigkeit) untersucht werden.

Zur Untersuchung boten sich folgende Bodenproben an: Mineralgemisch, Kies-Sand, kiesiger Sand, eng gestufter Sand, Geschiebesand und Geschiebemergel. Für jeden Boden wurden Ausgangsproben mit 3 unterschiedlichen Wassergehalten hergestellt.

Bei unterschiedlicher Verdichtung erfolgte eine Messung der Ultraschallgeschwindigkeit und des elektrischen Widerstandes. Gleichzeitig wurden die Rohdichte und der Wassergehalt bestimmt und daraus die Trockendichte, die Porosität und der Verdichtungsgrad berechnet.

Die Laboruntersuchungen bestehen aus dem Einbau und der Messung der gesamten Parameter an 155 Einzelproben.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen für die elektrischen Messungen zeigen, dass

- zwischen dem Verdichtungsgrad und dem Bodenwiderstand vielfach kein statistisch gesicherter Zusammenhang vorhanden ist,
- die Abhängigkeit des Widerstandes vom Verdichtungsgrad bei mehreren Bodenproben mit steigendem Wassergehalt abnimmt,
- bei den Untersuchungen, für die ein statistisch gesicherter Zusammenhang nachweisbar ist (z. B. Probe 3 – Wassergehalt 6,5 %), der Erwartungswert der Wiederholungsmessung das Mehrfache der Widerstandsveränderung bei 1 % Verdichtungsänderung beträgt,
- die Messwertveränderung des Widerstandes durch Schwankung des Wassergehaltes um 1 % deutlich größer ist als die Widerstandsabnahme durch die Erhöhung des Verdichtungsgrades. Das gilt nicht für den Geschiebemergel.
- Darüber hinaus ist vielfach zu erkennen, dass mit Zunahme der Verdichtung der Widerstand abnimmt. Über diesen qualitativen Zusammenhang kann bei praktischen Messungen eine Aussage über eine gleichmäßige Verdichtung im Untergrund getroffen werden.

## 4. Folgerungen für die Praxis

Als Schlussfolgerungen für den Einsatz elektrischer Messungen ergeben sich:

1. Veränderungen des Verdichtungsgrades sind durch Widerstandsmessungen nicht quantitativ erfassbar: Somit scheidet das Widerstandsmessverfahren für weitere Untersuchungen zum Nachweis des Verdichtungsgrades aus.
2. Aufgrund des nachgewiesenen qualitativen Zusammenhanges ist das Verfahren zum flächenhaften Nachweis einer gleichmäßigen Verdichtung des Untergrundes geeignet.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen für die akustischen Messungen zeigen, dass

- für sehr grobkörnige Böden (Mineralgemisch) akustische Messverfahren zur Lösung der Aufgabenstellung nur bedingt geeignet sind,
- für alle anderen Bodenarten deutliche Abhängigkeiten zwischen Verdichtungsgrad und Geschwindigkeit erkennbar sind,
- der Erwartungswert der Wiederholungsmessungen im Bereich der zu erreichenden Genauigkeit liegt und
- mit einer statistisch ausreichenden Anzahl von Messungen eine reproduzierbare Aussage zum Verdichtungsgrad für bindige und sandig-kieselige Böden zu erreichen ist.

Aufgrund der akustischen Laborergebnisse ist zu erwarten, dass ein seismisches Verfahren das einzige Verfahren neben der Radiometrie ist, welches unter Berücksichtigung von Randbedingungen (Testfläche, annähernd gleicher Wassergehalt) für die Kontrolle der Verdichtung beim Einbau von Böden im Straßenbau geeignet ist.

In einem weiteren Schritt wurden auf drei Testflächen seismische und geoelektrische Feldmessungen durchgeführt.

Die Auswertung der Feldmessungen ergibt:

- Die Widerstandsmessungen in situ lassen ebenfalls qualitativ eine Abnahme der Widerstände mit der Verdichtung erkennen. Die Veränderung des Widerstandes vor und nach der Verdichtung ist jedoch so gering, dass keine quantitativen Aussagen über den Verdichtungserfolg möglich sind.
- Die seismischen Feldmessungen zeigen eine signifikante Abhängigkeit der P- und S-Wellen-Geschwindigkeit von der Verdichtung. Dies gilt für alle untersuchten Böden (Geschiebemergel und Mineralgemisch). Innerhalb einer Testfläche kann ermittelt werden, welche Mindestgeschwindigkeit bzw. welcher Geschwindigkeitsquotient vorliegen muss, um eine ausreichende Verdichtung des eingebauten Bodens nachweisen zu können.
- Bei den S-Wellen-Messungen ist eine ähnliche Abhängigkeit des Geschwindigkeitsniveaus vom Verdichtungsgrad wie bei den P-Wellen-Untersuchungen erkennbar. Da S-Wellen-Messungen im Vergleich zu den P-Wellen-Untersuchungen sehr

zeitaufwendig und technologisch anspruchsvoll sind, sollten nach dem gegenwärtigen Stand der Felduntersuchungen vorrangig P-Wellen-Messungen zur Verdichtungskontrolle eingesetzt werden.

Nach den bisherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist neben dem radiometrischen Verfahren die Messung der P-Wellen-Geschwindigkeit als günstigste geophysikalische Methode zur Kontrolle der Verdichtung im Straßenbau anzusehen. Die hohen Anforderungen, die aus der geforderten Genauigkeit für die analytische Bestimmung des Verdichtungsgrades resultieren, können mit der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Messtechnologie auf der Basis empirischer Beziehungen jedoch noch nicht erreicht werden.

Mit dem vorliegenden Ergebnis wurde unter Nutzung von Ausschließungsprinzipien zielgerichtet die hochauflösende P-Wellen-Seismik als einziges methodisches und wirtschaftlich anwendbares Verfahren herausgefunden.

Die Anpassung des eingesetzten geophysikalischen Beobachtungssystems, insbesondere die apparative und technologische Weiterentwicklung der hochauflösenden P-Wellen-Seismik, wird als erfolgversprechend für eine schnelle und kostengünstige Verdichtungskontrolle angesehen. Künftige Entwicklungsarbeiten sollten daher auf die technische und technologische Umsetzung der im vorliegenden Bericht ermittelten grundlegenden Beziehungen zwischen Verdichtungsgrad und geophysikalischen Messparametern ausgerichtet sein. □