

Schnellverfahren zur Verdichtungskontrolle durch Messung der Setzung: Klärung offener Fragen zur Fertigstellung der zugehörigen Technischen Prüfvorschrift

FA 5.132

Forschungsstelle: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. J. Brauns)

Bearbeiter: Bieberstein, A. / Saucke, U. / Reith, H.

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

Abschluss: Mai 2004

1. Problemstellung

In der ZTVE-StB 94 (Fassung 1997) wird als ein indirektes Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle die "Prüfung durch Setzungsmessungen nach den einzelnen Verdichtungsübergängen bei Felsschüttungen und Böden mit Steinen über 200 mm oder hohem Kies- und Steinanteil" genannt. Um dieses Verfahrensprinzip (FLOSS 1974) für die baupraktische Anwendung verfügbar zu machen, führte die Abteilung Erddamm- und Deponiebau am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut Karlsruhe (beide Uni Karlsruhe (TH)) im Jahre 1999 das Forschungsvorhaben "Schnellverfahren zur Bestimmung der Verdichtung durch Messung der Setzung" (FA 5.109) durch. In diesem Projekt wurde ein Verfahren zur Verdichtungsprüfung durch Setzungsmessung entwickelt, das zwei Verfahrensschritte vorsieht:

- Probefeld zur Erarbeitung der erforderlichen Arbeitsanweisung und zur Festlegung des maßgebenden Setzmaßes,
- Abnahmeprüfung von Schüttlagen (Prüflosen) durch Setzungsmessung, die gemäß Arbeitsanweisung verdichtet wurden.

Auf Grundlage dieser Forschungsarbeit hat der Arbeitsausschuss "Prüftechnik" der FGSV mit der Erarbeitung einer Technischen Prüfvorschrift (TP BF-StB) für die Anwendung des "Schnellverfahren zur Verdichtungskontrolle mittels Setzungsmessung" begonnen. Die TP ist so weit strukturiert und erarbeitet, wie dies die Erkenntnisse der o. g. Forschungsarbeit zulassen. Es wurde jedoch deutlich, dass diese nur fertiggestellt werden kann, wenn folgende offenen Punkte geklärt sind:

- Erstellung eines Probefeldes zur Ermittlung des zulässigen Setzmaßes: Die Vorgehensweise zur Ermittlung des zulässigen Setzmaßes ist festzulegen. Insbesondere ist zu klären, inwieweit der Mittelwert aus verschiedenen Messpunkten repräsentativ für eine Probeschüttung ist.
- Abnahme von Schüttlagen (Prüflosen): Untersuchung inwieweit die beabsichtigte Vorgehensweise praxistauglich für Baustelleneinsätze ist.
- Entwicklung einer angepassten Software zur Durchführung und Auswertung der Setzungsmessungen im Rahmen des Probefeldes sowie zur Abnahmeprüfung von Prüflosen.

Ziel des hier berichteten Forschungsvorhabens war die Schließung dieser Wissenslücken.

2. Untersuchungsmethodik

Wesentlich für die Durchführung der Verdichtungsprüfung mittels Setzungsmessung ist die Ermittlung bzw. Festlegung sowie die Überprüfung des zulässigen Setzmaßes $\Delta_{s,n}$ – also die maximal zulässige Setzung der abzunehmenden Schüttung (Prüflos) beim letzten Verdichtungsübergang, und zwar in Abhängigkeit vom vorliegenden Schüttstoff sowie vom erforderlichen Verformungswiderstand des Erdbauwerkes. Die Vorgehensweise im Entwurf zur TP sieht hierfür stets ein Probefeld vor, in dessen Rahmen auch die Arbeitsanweisung (An-

zahl der Übergänge mit definiertem Verdichtungsgerät bei gegebener Schüttlagenstärke) zu erarbeiten ist.

Es war zu untersuchen, inwieweit diese Vorgehensweise unter Berücksichtigung des tatsächlichen Verhaltens von Probeschüttungen zielführend ist. Hierzu wurden

- vorliegende Datensätze aus Probeverdichtungen mit Felsschüttungen untersucht sowie
- als Ergänzung Verdichtungsmaßnahmen messtechnisch begleitet, ausgewertet und analysiert.

Ferner wurde die Software zur Durchführung und Auswertung von Setzungsmessungen im Rahmen des Probefeldes sowie zur Abnahmeprüfung von Prüflosen auf Basis von MS Excel entwickelt.

Es ist anzumerken, dass im Mittelpunkt der Aufgabenstellung die Weiterentwicklung sowie die Festlegung des Prüfverfahrens standen. Nicht Gegenstand dagegen war die Fragestellung des Verdichtungsverhaltens von Felsschüttmaterialien oder Böden, die im Zuge der beschriebenen Untersuchungen herangezogen wurden. Somit konnte – neben den Untersuchungen zur Setzungsmessung – auf ergänzende Untersuchungen zur Charakterisierung entsprechender Schüttungen verzichtet werden.

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Allgemeines

Das untersuchte Prüfverfahren war ursprünglich für die Verdichtung grober Schüttstoffe mittels Glattmantelwalzen konzipiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch deutlich, dass die Verdichtung von Felsschüttmaterialien in der heutigen Baupraxis nicht ausschließlich mittels Glattmantelwalzen erfolgt. Vielmehr wird durch den Einsatz spezieller Bandagen mit Oberflächenstruktur zu Beginn der Verdichtung (z. B. 3 Übergänge mittels Schafffuß- bzw. Octagonwalze) versucht, das Haufwerk durch massiven Kornbruch zumindest oberflächennah zu vergleichmäßigen bzw. zu homogenisieren.

Hieraus resultierte eine Änderung der Ausrichtung der Untersuchungen. Es war wesentlich zu untersuchen, ob bzw. inwieweit die Verdichtung von Felsschüttungen mit dem Verfahren der Setzungsmessung erfolgen kann, auch wenn die Verdichtung nicht ausschließlich mittels Glattmantelwalzen erfolgt.

3.2 Vorgehensweise zur Festlegung des zulässigen Setzmaßes

Zur Festlegung des zulässigen Setzmaßes $\Delta_{s,n}$ sieht die entwickelte Vorgehensweise ein Probefeld mit 50 Messpunkten vor, deren Setzung nach jedem Verdichtungsübergang zu bestimmen und das zulässige Setzmaß anhand des Mittelwertes zu ermitteln ist. Die Ergebnisse aus verschiedenen Probefeldern zeigen, dass das Schnellverfahren zur Verdichtungskontrolle durch Messung der Setzung praxistauglich ist.

Außerdem hat sich gezeigt, dass die Einhaltung einiger Randbedingungen unabdingbar ist. Die wesentlichen Resultate zur Durchführung von Probefeldern lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Mittelwert aus den jeweiligen Einzelsetzungen kann als Charakteristikum für das Setzungsverhalten der gesamten Schüttung als zielführend betrachtet werden.
- Da der Einsatz von Schafffußwalzen oder Octagonwalzen in der Baupraxis bei derartigen Schüttstoffen zumindest während der ersten Verdichtungsübergänge üblich ist, sollten die entsprechenden Übergänge bei der Auswertung der Setzungsmessung zu einem Übergang zusammengefasst

werden; zwischen den einzelnen Übergängen ist lediglich die Markierung der Punkte aufrecht zu erhalten. Die eigentlichen Messungen im Rahmen des Probefeldes zur Ermittlung des Setzungsverlaufes sowie zur Erarbeitung der Arbeitsanweisung beginnen dann vor dem ersten Übergang mit der Glattmantelwalze. Es wird empfohlen, den Anteil der Übergänge mit Glattmantelwalze auf mindestens 2/3 aller Übergänge festzulegen.

- Messergebnisse im Rahmen eines Probefeldes auf geneigtem Planum zeigen, dass für derartige Fälle mit lateralen Bewegungen der Messpunkte hangabwärts gerechnet werden muss. Gibt die Auswertung der Messdaten hierzu begründeten Anlass, so empfiehlt es sich, die Messpunkte in ihrer Höhenlage zu korrigieren. Prinzipiell ist es ratsam, ein Probefeld auf horizontalem Planum auszuführen.
- Andere Messergebnisse haben gezeigt, dass ein ausreichender Messpunktabstand zu den Randböschungen des Probefeldes erforderlich ist.
- Die Markierung der Messpunkte mittels Farbspray hat sich als geeignet erwiesen.
- Der Zeitaufwand zur Durchführung einer Messepoche (Einnahme aller 50 Messpunkte) hat sich mit etwa 20 Minuten als gering herausgestellt.

Für die Festlegung des zulässigen Setzmaßes Δs_n wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Zur Ermittlung der Arbeitsanweisung (Schüttstoff, Schüttlagenstärke, Verdichtungsgerät) wird der Schüttstoff in das Probefeld eingebaut und übergangsweise verdichtet. Nach jedem Verdichtungsübergang werden für die 50 Messpunkte die zugehörigen Setzungsverläufe messtechnisch erfasst. Weiter wird nach jedem Verdichtungsübergang das Verdichtungsmaß a für jeden Messpunkt sowie der resultierende Mittelwert aus der beim jeweils letzten Verdichtungsübergang eingetretenen Setzung zu der bis dahin ermittelten Gesamtsetzung bestimmt.
- Aufgrund der Struktur und der natürlichen Variation in der räumlichen Schüttung bzw. der Oberfläche (z. B. erhebliche Variationen im Größtkorn) ergeben sich u. U. stark unterschiedliche Setzungsverläufe für verschiedene Messpunkte. Daher lässt sich die Verdichtung einer Schüttung mit vorgegebenen Parametern allein anhand des Mittelwertes (M_w) nicht immer sinnvoll beschreiben. Es ist also zweckmäßig, neben dem Mittelwert auch die Standardabweichung ($Stab_w$) der ermittelten Gesamtsetzungen zu bestimmen.
- Liegen aus einem Probefeld nur die Messwerte der Setzungsmessung vor, wird empfohlen, das zulässige Setzmaß Δs_n beim Wert $M_w + Stab_w$ festzusetzen.
- Aufgrund des relativen Charakters des Prüfverfahrens ist es zwingend erforderlich, im Rahmen der Probeverdichtung nicht nur den Setzungsverlauf in Betracht zu ziehen, sondern Kriterien zum mechanischen Verhalten der Schüttung hinzuzuziehen. Das zulässige Setzmaß ist schließlich vom Geotechnischen Sachverständigen auf Grundlage aller Untersuchungsergebnisse festzulegen.

3.3 Vorgehensweise zur Abnahme eines Prüfloses

Zur Abnahme eines Prüfloses wird empfohlen, sich an der Charakteristik der Verteilung der im Probefeld gemessenen Gesamtsetzungen zu orientieren.

Das im Probefeld ermittelte zulässige Setzmaß Δs_n ist bei der Abnahme eines Prüfloses konsequent mittels Methode M3 zu prüfen. Hierzu wird vorgeschlagen, jedem Prüfpunkt (z. B. 3 Prüfpunkte pro Prüflos) 9 Messpunkte in einem Raster von 0,5 m zuzuordnen und diese zu markieren. Vor und nach dem Prüfübergang werden somit für jeden Prüfpunkt 9 Einzelsetzungswerte ermittelt. In Bezug auf die Abnahme des Prüfloses ist für

jeden Prüfpunkt zu fordern, dass mindestens 8 von 9 Messpunkten das zulässige Setzmaß Δs_n nicht überschreiten.

3.4 Software zur Durchführung und Auswertung von Setzungsmessungen

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Leistungsfähigkeit des Prüfverfahrens nur ausgeschöpft werden kann, wenn die Prüfergebnisse unmittelbar nach der jeweiligen Messepoche vorliegen – und zwar sowohl während der Durchführung des Probefeldes als auch insbesondere bei der Abnahmeprüfung von Schüttlagen. Neben einem digitalen Nivelliertachymeter ist eine anwendungsorientierte Software zur Durchführung, Auswertung und Darstellung der Messergebnisse das maßgebende Werkzeug, das die Durchführung der Verdichtungsprüfung mittels Setzungsmessung erst ermöglicht. Daher wurde eine einheitliche Software in Form von Makro-Modulen auf Basis von MS Excel zur Durchführung und Auswertung der Messungen – also Probefeld wie auch Prüflos – entwickelt. Die Makro-Module können unter www.ibf.uni-karlsruhe.de/abt2 kostenfrei heruntergeladen werden.

4. Zusammenfassung und Folgerungen

Der erzielte Sachstand wurde in einem zweiteiligen Bericht dargelegt, wobei

- Teil A des Berichtes auf die Ermittlung des zulässigen Setzmaßes im Rahmen eines Probefeldes sowie auf das Kriterium und die Vorgehensweise zur Abnahme von Prüflosen eingeht, und ein aktualisierter Entwurf der TP "Schnellverfahren zur Verdichtungskontrolle durch Messung der Setzung" enthalten ist, während
- Teil B das Handbuch der Auswertungssoftware enthält, die mit dem Ziel der Erhöhung der Anwendungsbreite auf Basis von MS Excel entwickelt wurde.

Bei der Bearbeitung des Vorhabens wurden Probefelder im Rahmen verschiedener Baustelleneinsätzen durchgeführt, und es wurden vorhandene Datensätze im Hinblick auf die Aufgabenstellung ausgewertet. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Durchführung des Prüfverfahrens der Setzungsmessung hat sich als praktikabel, der Einsatz der entwickelten Software als geeignet erwiesen.
- Die Mittelwertbildung der Einzelsetzungen der 50 Messpunkte zur Ableitung des zulässigen Setzmaßes hat sich als geeignet erwiesen.
- Wegen des relativen Charakters des Kriteriums hat sich die Einbeziehung eines Geotechnischen Sachverständigen – wie es der Entwurf der TP vorsieht – zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Felsschüttungen als unabdingbar herausgestellt.
- Erschwerend für die Anwendungsbreite hat sich bei den Baustelleneinsätzen ergeben, dass derartige Felsschüttmaterialien heute nicht mehr oder nicht mehr ausschließlich mit Glattmantelwalzen, sondern mit Schafffuß- bzw. Octagonwalzen mit dem Ziel der Homogenisierung bzw. Zerkleinerung des Haufwerkes verdichtet werden. Es hat sich gezeigt, dass
 - die ausschließliche Verwendung von Bandagen mit Oberflächenstruktur (z. B. Schafffußwalzen und Octagonwalzen) die Anwendung des Prüfverfahrens unmöglich macht,
 - das Verfahren jedoch bei einer Verdichtung von Schüttlagen zunächst mit zerkleinernd wirkenden Bandagen (z. B. 2 Übergänge) und nachgeschalteten Verdichtungsübergängen mittels Glattmantelwalzen angewendet werden kann. Hierzu wird vorgeschlagen, den Anteil der Bandagen mit Oberflächenstruktur auf maximal ein Drittel der Verdichtungsübergänge zu begrenzen.

Die nun vorliegenden Ergebnisse haben unmittelbar Eingang in den Entwurf der Technischen Prüfvorschrift gefunden. □