Erste Erfahrungen mit neuen Schnellprüfverfahren im Erdbau

Dipl.-Wirt.-Ing. Martin Uhlig

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau,
Gustav-Zeuner-Straße 1 a, 09599 Freiberg
Tel.: 03731 / 39-3030, Fax: 03731/39-3581
E-Mail: martin.uhlig@mabb.tu-freiberg.de
E-Mail: wolfram.kudla@mabb.tu-freiberg.de

Im Ausland wurden zur Verdichtungsüberprüfung drei Schnellprüfverfahren entwickelt, die von den Autoren im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht worden sind.
1. Die Panda-Sonde (entwickelt in Frankreich), eine leichte Rammsonde, bei der die Rammenergie variabel über einen Hammer in den Boden eingetragen wird. Die Rammenergie und der Rammweg werden bei jedem Schlag ermittelt und daraus der Spitzenwiderstand des Bodens bestimmt. Dieser wird über der Tiefe aufgetragen. Neben der Baugrunderkundung eignet sich das Gerät auch zur Verdichtungskontrolle.
2. Das Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht (entwickelt in Ungarn), einem an das LFG angelehntes Prüfgerät, mit dem neben der Tragfähigkeit auch der Verdichtungsgrad im Feld bestimmt werden kann. Das zugrunde gelegte Messprinzip ist aus dem modifizierten Proctorversuch abgeleitet. Dabei wird der Verdichtungsgrad in Abhängigkeit der Deformation nach 18 Schlägen berechnet.
3. Das Geogauge (entwickelt in den USA), bei dem Schwingungen bei verschiedenen Frequenzen über einen Ringfuß in den Untergrund geleitet und die von der Bodensteifigkeit abhängige Verschiebungsamplitude des Rings bestimmt wird. Der gemessene Verformungsmodul entspricht aufgrund der minimalen Dehnungsamplituden nahezu dem Elastizitätsmodul der Schicht.
Die zugrunde liegenden Messverfahren werden dargelegt, Korrelationen zwischen den Prüfmerkmalen aufgestellt und die Handhabbarkeit und die Tauglichkeit der Geräte getestet.

1 Einführung

Die anforderungsgemäße Verdichtung von ungebundenen Schüttmaterialien ist ein zentrales und zudem weitreichendes Qualitätskriterium im Straßenbau. Der Überprüfung der Tragfähigkeit und des Verdichtungsgrades kommt somit eine große Bedeutung zu. Die Prüfverfahren sollten schnell und die Prüfgeräte einfach bedienbar sein. Steigende Anforderungen an die Qualitätskontrolle im Verkehrswegebau sowie die Entwicklung neuer Technologien führten in den letzten Jahren im Ausland zur Entwicklung von weiteren Schnellprüfverfahren. Zu diesen gehören:

1. die französische Panda-Sonde,
2. das ungarische Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht,
3. das US-amerikanische Geogauge.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.156/2009/CGB wurden die Messprinzipien der drei Schnellprüfverfahren analysiert und die Messtiefe und Messgenauigkeit der Geräte bestimmt. Des Weiteren wurden Versuchsreihen auf verschiedenen Böden und bei unter-

schiedlichen Verdichtungszuständen durchgeführt und die Prüfmerkmale der drei Schnellprüfverfahren mit denen der klassischen Verdichtungs- und Tragfähigkeitsmessverfahren korreliert. Die drei Schnellprüfverfahren wurden hinsichtlich Handhabbarkeit unter Baustellenbedingungen getestet und die Anwendungsgrenzen bestimmt.

2 Panda-Sonde

2.1 Allgemein

Die Panda-Sonde ist ein in Frankreich von der Firma Sol Solutions entwickeltes Messgerät zur Baugrunderkundung sowie zur Verdichtungskontrolle. Es handelt sich dabei um eine leichte Rammsonde mit variabler Rammenergie, die manuell über einen Hammer erzeugt wird. Seit 2002 existiert die zweite Entwicklungsstufe des Messgerätes. Das Verfahren ist in der französischen Norm XP P 94 – 105 (R2) standardisiert. In Deutschland kam die Panda-Sonde bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens „Minimal Trenching“ (Reichenbach, Schmidt 2008) durch die Firma Smoltczyk und Partner zum Einsatz. Die folgenden Ausführungen zur Panda-Sonde beziehen sich im Wesentlichen auf die beiden vorgenannten Quellen sowie die Angaben des Herstellers.

2.2 Aufbau

Der Aufbau der Rammsonde gliedert sich gemäß dem Bild 1 in die nachfolgend beschriebenen Systemkomponenten. Die Sonde besteht aus einem verschraubten Rohrgestänge an dessen Ende die Sondierspitze befestigt wird. Zehn Gestängeteile mit einer Länge von je 50 cm ermöglichen eine maximale Sondiertiefe von 5 m.

Für den Einsatz der Panda-Sonde in verschiedenen Böden werden 2 Typen von Sondierspitzen mit den spezifischen Querschnitten 2 cm² und 4 cm² mitgeliefert (Bild 1). Die Fixierung am Gestänge erfolgt entweder durch Verschraubung (2 cm² Spitze) oder nach dem Prinzip der verlorenen Spitze (4 cm² Spitze).

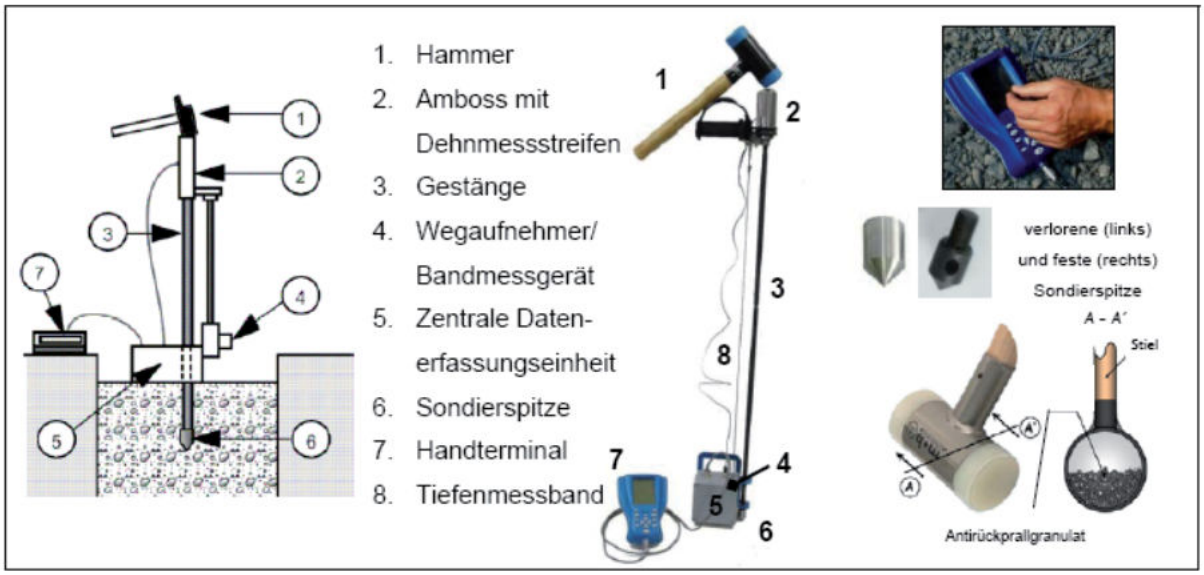

Bild 1: Schematischer Aufbau der Panda-Sonde (Benz Navarrete 2009), (R2), (Reichenbach, Schmidt 2008)

Auf das obere Ende des Sondiergestänges wird ein Amboss aufgesetzt, an dem über Dehnmessstreifen die eingebrachte Schlagenergie ermittelt wird. Seitlich des Ambosses befindet sich ein Griff mit Schutzbügel, mit dem die Standsicherheit sowie die Ausrichtung des Systems während des Versuches einhändig gewährleistet werden kann.

Ein zentrales Datenerfassungsgerät (Central Acquisition Unit – CAU) ist die Schnittstelle zwischen der Sondierapparatur und dem Handterminal sowie zugleich zentrale Rechen- und Steuereinheit. Die über die Dehnmesstreifen gemessenen axialen Verformungen werden erfasst, die eingeleitete Stoßkraft berechnet und über Integration die Stoßenergie E pro Schlag ermittelt. In der CAU ist zudem ein Bandmessgerät eingebaut, das den Penetrationsweg erfasst. Hierfür wird ein Tiefenmessband unterhalb des Ambosses befestigt und die Verschiebung bei jedem Schlag elektronisch gemessen.

Über den Handterminal (Dialog Terminal – DT) kann der Bediener die Messung konfigurieren, überwachen, speichern und das Messergebnis grafisch darstellen. Das dafür integrierte Anwendungsprogramm lässt sich mit Hilfe eines Taststiftes über den Touchscreen steuern. Aus der Stoßenergie und dem Penetrations- bzw. Rammweg wird mit einem Algorithmus der dynamische Spitzenwiderstand q_d bei jedem Schlag berechnet und angezeigt.

Die Messdaten können über eine USB-Schnittstelle auf einen PC übertragen und mit Hilfe eines Softwareprogrammes bearbeitet, ausgewertet sowie gedruckt werden.

2.3 Theoretische Berechnungsgrundlage

Als Tragfähigkeitskennwert berechnet das Gerät den dynamischen Spitzenwiderstandswert qd pro Rammschlag. Dieser errechnet sich über eine Abwandlung der holländischen Rammformel nach Cassan (1988). (Villavicencio Arancibia (2009):

$$q_d = \frac{1}{A} * \frac{E}{1 + {}^{P}/_{M}} * \frac{1}{x}$$

q_d dynamischer Spitzenwiderstand

A Querschnittsfläche der Spitze

M Masse des Hammers

P Masse vom Amboss, Gestänge und Sondierspitze

x Penetrationsweg pro Hammerschlag

E eingetragene Stoßenergie pro Hammerschlag.

Für die Gültigkeit des Rechenprinzips werden ausschließlich plastisches Verformungsverhalten, eine vernachlässigbare Mantelreibung und die vollständige Übertragung der eingebrachten Rammenergie auf die Sondierspitze vorausgesetzt (Blume, Reichenbach 2008).

Um die Funktionsweise sowie den Umfang des Softwareprogrammes zu beschreiben, werden vorab die verschiedenen Anwendungsfunktionen dargestellt.

2.4 Anwendungsfunktionen

Die Panda-Sonde kann grundlegend für folgende zwei Zwecke verwendet werden:

a) Untersuchung von Schichtdicken,

b) Verdichtungskontrolle.

Der Verdichtungsgrad kann zum einen mit Hilfe eines Referenzfeldes und zum andern über einen Katalog abgespeicherter Korrelationsbeziehungen ermittelt werden.

Funktion 1 – Schichtlagendicke

Mit dieser Funktion können aus dem Verlauf des Penetrationsgraphen Schichtgrenzen bestimmt und dadurch die Dicken von Einbaulagen bzw. von zu erkundenden Bodenschichten ermittelt werden.

Durch die Software wird zunächst das sogenannte „Hintergrundrauschen" erfasst. Hierbei handelt es sich um die Hüllkurve bzw. Bandbreite der tatsächlich gemessenen Spitzenwiderstände. Als Kennwert der Schwankungsbreite wird der Parameter s_b [%] berechnet. Die Schwankungskenngröße s_b ist der Quotient aus der Bandbreite $a_{m,i}$ der Spitzenwiderstände (Differenz der Spitzenwiderstände aus oberer und unterer Hüllkurve) und des geglätteten Spitzenwiderstandes $q_{dm,i}$ eines Bereiches i und damit:

$$s_b = \frac{\bar{a}_{m,i}}{\bar{q}_{dm,i}} \quad \text{(i … Laufvariable für den Glättungsbereich).}$$

Der geglättete und von Ausreißern bereinigte Penetrationsgraph dient nun als Ausgangspunkt der weiteren Analyse. Die Spitzenwiderstände q_a und q_b zweier aufeinanderfolgender Rammstöße werden hinsichtlich ihres Verhältnisses q_a/q_b untersucht. In Verbindung mit der Kennziffer sb ergeben sich die folgenden zwei Entscheidungsregeln für das Vorhandensein einer Schichtgrenze:

Eine Schichtgrenze existiert wenn

– für $s_b < 20$ %, $q_a/q_b < 0{,}7$ oder

– für $s_b > 20$ %, $q_a/q_b < 0{,}5$

ist. Im Falle einer erkannten Schichtgrenze ist somit q_a der Spitzenwiderstandswert an der tiefsten Stelle der ersten Schicht und q_b der erst gemessene Spitzenwiderstandswert der darunterliegenden Schicht (Bild 2) (R2).

Mit Hilfe der Funktion 1 können somit Schichtdicken schnell und flächendeckend bestimmt werden.

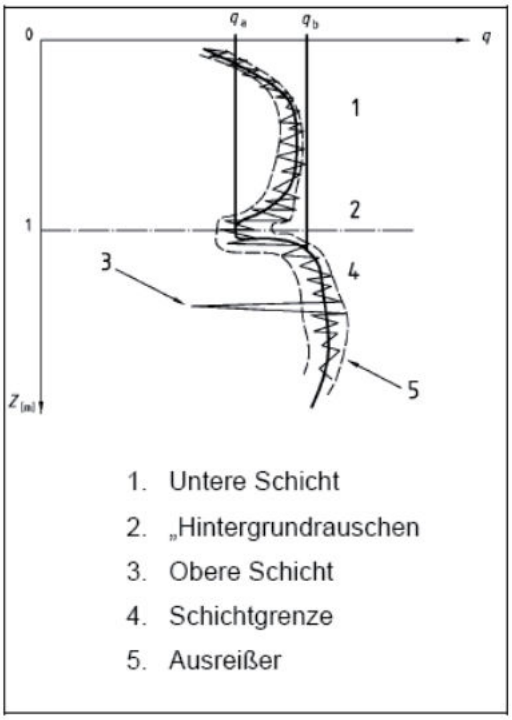

Bild 2: Funktion zur Erkennung von Schichtgrenzen (R2)

Funktion 2 – Verdichtungsgrad

Die Beurteilung des Verdichtungsgrades erfolgt mit Hilfe von Grenz- (q_l) sowie Referenzlinien (q_r). Die Referenzlinie gibt den mittleren Spitzenwiderstand einer Schicht an, bei dem ein geforderter Verdichtungsgrad im Mittel erreicht wird.

Die Grenzlinie beschreibt den Spitzenwiderstand, bei dem ein um 2 % bzw. 3 % niedrigerer Mindestverdichtungsgrad bei einem Konfidenzniveau von X % (80 bzw. 90 %) erreicht wird. Die Grenz- und die Referenzlinie beruhen auf der Korrelation des Verdichtungsgrades mit dem durch die Panda-Sonde bestimmten Spitzenwiderstand. Die Referenz- bzw. Grenzgraphen werden anhand von drei charakteristischen Kenngrößen modelliert. Dabei handelt es sich um:

1. q_{d0} den Sondierwiderstand an der Oberfläche,
2. z_c die kritische Tiefe, unterhalb der Sondierwiderstand konstant verläuft,
3. q_{d1} den Sondierwiderstand, unterhalb der kritischen Tiefe z_c.(Rechtes Diagramm Bild 3) .

Die kritische Tiefe kennzeichnet die Tiefe, bis zu der infolge der Penetration des Gestänges Auflockerungen des Bodens eintreten. Zwischen dem Spitzenwiderstand q_{d0} an der Oberfläche und dem Spitzenwiderstand q_{d1} unterhalb der kritischen Tiefe z_c wird die Referenzlinie bzw. die Grenzlinie als linear ansteigend angenommen. Ab der kritischen Tiefe z_c wird q_{d1} (bei entsprechendem Verdichtungsgrad) konstant über die Tiefe angenommen (Zhou 1997).

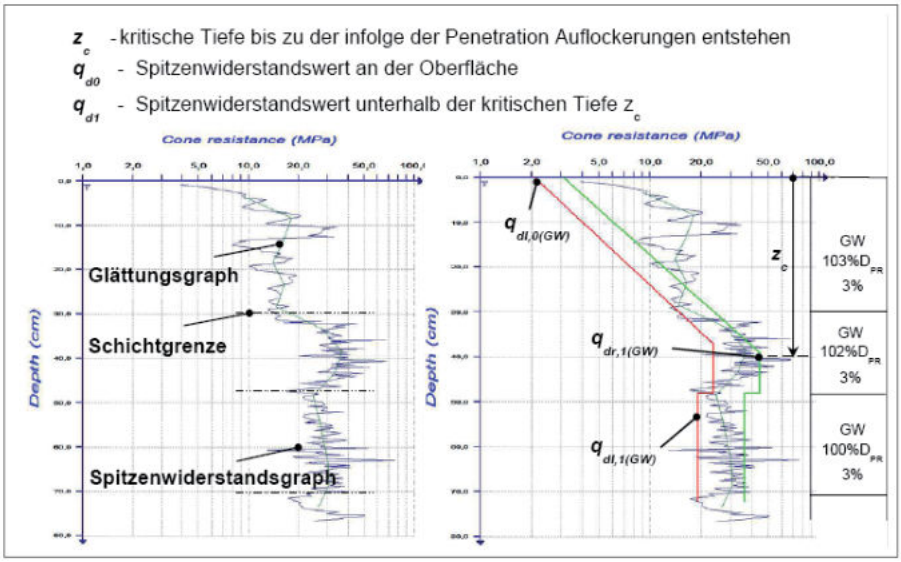

Bild 3: Darstellung und Analyse der Spitzenwiderstandsgraphen

Gemäß den länderspezifischen Bodenklassifizierungsnormen (D: DIN 18196 (R1)) lassen sich die Grenz- und Referenzlinien für verschiedene Böden, in Abhängigkeit vom Konsistenzbereich und Verdichtungsgrad über die Software abrufen.

Mit Hilfe der beiden Kennlinien lässt sich der Verlauf des Penetrationsgraphen nun wie folgt beurteilen. Der Spitzenwiderstand

1. unterschreitet die Grenzkurve (links von q_l).
   Schlussfolgerung: Der Mindestverdichtungsgrad wurde in diesem Bereich nicht erreicht.
2. liegt zwischen Grenz- und Referenzkurve (q_l und q_r).
   Schlussfolgerung: Der Mindestverdichtungsgrad wurde erreicht.
3. überschreitet der Referenzkurve (rechts von q_r).
   Schlussfolgerung: Es wurde ein höherer Verdichtungsgrad erreicht, als er im Mittel gefordert war.

3 Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht

3.1 Aufbau

Das B&C Small Plate Light Falling Weight Deflectometer, Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht (KSG), wurde 2003 von der ungarischen Firma Andreas Ltd. entwickelt. Der grundlegende Aufbau gleicht, wie im Bild 4 dargestellt, dem des Leichten bzw. Mittelschweren Fallgewichtsgerätes. Mit dem Kleinscheibengerät lassen sich jedoch Bodenpressungen von 0,3 MN/m² bis 0,35 MN/m² erzeugen, die somit größer als beim Mittelschweren Fallgewichtsgerät (0,2 MN/m²) sind. Erreicht werden diese Spannungen unter einer Lastplatte mit einem Durchmesser von 163 mm. Die Belastung wird über ein Fallgewicht mit einer Masse von 10,5 kg aus einer Höhe zwischen 72 bis 75 cm erzeugt. Das Federpaket überträgt die Belastung innerhalb von 18 ms auf die Lastplatte (Tompai 2008 [1]).

Bild 4: Aufbau des Kleinscheibengerätes mit Leichtem Fallgewicht (Tompai 2008 [2]), (Subert 2007)

3.2 Funktionsweise

Mit dem B&C Kleinscheibengerät kann neben der Tragfähigkeit auch der Verdichtungsgrad des Prüfuntergrundes ermittelt werden. Das Verfahren ist in der ungarischen Norm UT 2-2.124 umfassend beschrieben (R3).

Der Ablauf zur Messung des Verformungsmoduls gleicht dem Messablauf der Prüfung mit dem Leichten oder Mittelschweren Fallgewichtsgerät. Der vollständige Kontakt zwischen Lastplatte und Untergrund wird über drei Vorbelastungsstöße hergestellt.

Aus dem Mittelwert der drei folgenden Messstöße wird der dynamische Verformungsmodul E_{vd} ermittelt:

$$E_{vd} = c \cdot (1 - \mu^2) \cdot p_{dyn} \cdot {}^{r}\!/_{s_d}$$

c Dämpfungskonstante – „Scheibenmultiplikator nach Boussinesq“

s_d Mittelwert der senkrechten Amplitude der Lastplatte

μ Querdehnzahl

p_{dyn} maximale Flächenpressung unter der Lastplatte

r Radius der Lastplatte.

Sowohl die Querdehnzahl (μ = 0,3 / 0,4 / 0,5) als auch die Dämpfungskonstante (c = π / 2 - steif; c = 2 - flexibel) sind begrenzt wählbar.

Mit Hilfe des KSG kann des Weiteren über 12 zusätzliche Stöße (insgesamt 18) sowie dem modifizierten Proctor-Laborversuch nach DIN EN 13286-2 der Verdichtungsgrad im Feld bestimmt werden (Tompai 2008 [1]).

Die angewendete Berechnungsmethodik des Small Plate Light Falling Weight Deflectometers beruht auf der Annahme einer linearen Korrelation zwischen der Änderung des Verdichtungsgrades und der dabei eintretenden plastischen Verformung. Vom B&C wurde der Zusammenhang am modifizierten Proctor-Laborversuch nach DIN EN 13286-2, der dafür abgewandelt worden ist, untersucht. Der Einbau gleicher Trockenmassen unter verschiedenen Wassergehalten führt bei identischer Verdichtungsarbeit (der modifizierten Proctorarbeit) zu unterschiedlichen Dichten und folglich verschiedenen Probenhöhen. Die Differenz der Probenhöhen Δh_{mm} bei 100 % modifizierter Proctordichte (bei w_{opt}) und jeder anderen Dichte (bei w_i) korreliert direkt mit der Änderung des Verdichtungsgrades $\Delta T_{rd} = \Delta D_{Pr,mod}$. Es ergibt sich somit die Beziehung:

$$\Delta T_{rd} = \Phi \cdot \Delta h_{mm}$$

Φ Anstieg der linearen Regressionsfunktion zwischen Δh_{mm} und ΔT_{rd}: 0,376 ± 0,02

Δh_{mm} Differenz der Probenhöhe bei 100 % modifizierter Proctordichte (bei w_{opt}) und der Probenhöhe bei einem beliebig anderen Dichte (bei w_i).

Der Referenzzustand entspricht dem Zustand der unter den Bedingungen des modifizierten Proctorversuchs dichtest möglichen Lagerung $D_{Pr,mod}$ = 100 % bei w_{opt}. Somit gilt:

$$\Delta T_{rd} = 100 - T_{rd} = \Phi \cdot \Delta h_{mm}$$

$$T_{rd} = 100 - \Phi \cdot \Delta h_{mm}$$

Der Anstieg der linearen Regressionsfunktion wurde in mehreren Versuchsreihen an unterschiedlichen Böden bestimmt und liegt demnach im Mittel bei Φ = 0,376 ± 0,02 (R3). Der aus dem Laborversuch bestimmte Zusammenhang zwischen plastischer Verformung und Verdichtungsgradänderung wird auf den Feldversuch übertragen. Dabei weichen die Bedingungen im Feld teils erheblich von denen im Labor ab.

Durch die Ausführung von 18 Schlägen mit dem KSG wird gemäß Hersteller die Verdichtungsarbeit des modifizierten Proctorversuches in den Untergrund eingebracht. Entsprechend dem Laborversuch ist die dabei eingetretene plastische Verformung linear mit der Änderung des Verdichtungsgrades verknüpft. Im Unterschied zum abgewandelten modifizierten Proctorversuch tritt im Feld die Höhenänderung (plastische Verformung) nicht aufgrund der Änderung des Wassergehaltes, sondern allein durch die eingebrachte Verdichtungsarbeit (18 Schläge) ein. Der Wassergehalt wi im Feldversuch ist konstant und entspricht nicht zwangsläufig dem Proctorwassergehalt. Folglich ist die Referenzdichte im Feld auch nicht zwingend die Proctordichte. Die Referenzdichte im Feld ist bei gegebenem Wassergehalt w_i, die unter der Verdichtungsarbeit des modifizierten Procotversuchs maximal erreichbare Dichte ρ_{di}, die einem Punkt auf der modifizierten Proctorkurve entspricht (Bild 5). Wird der Felddichte ρ_d die Referenzdichte ρ_{di} zugrunde gelegt, so erhält man den relativen Verdichtungsgrad T_{rE} über

$$T_{rE} = \frac{\rho_d}{\rho_{di}}.$$

T_{rE} ist somit das Verhältnis der Felddichte ρ_d (vor Versuchsausführung) zur im Feld maximal, erreichbaren Dichte ρ_{di}, die nach Einbringung der modifizierten Proctorarbeit (18 Schläge) erreicht wird. Die aus dem Laborversuch bestimmte Beziehung wird nun auf den Feldversuch angewendet, wobei der relative Verdichtungsgrad T_{rE} und nicht der dynamische Verdichtungsgrad T_{rd} bestimmt wird. Damit ergibt sich

$$T_{rE} = 100 - \Phi \cdot D_m$$

Die plastische Verformung im Feld wird als Deformationsindex D_m bezeichnet und als gewichtetes Mittel aus den Differenzen benachbarter, korrigierter Setzungsamplituden infolge der 18 Stöße berechnet:

$$D_m = II\ \Sigma D_{kn} \cdot (3 \cdot i + j)\ II\ /\ 17$$

$$D_{kn} = h_{n+1} - h_n$$

D_{kn} Differenz aufeinanderfolgender, korrigierter Setzungsamplituden h_n
[$D_{kn} = (h_{n+1} - h_n)$, n … Stoßnummer 1 bis 17]

D_m Deformationszahl = plastische Verformung im Feld

j = 1 – 3 Laufvariable für Messstoß pro Messreihe

i = 0 – 5 Laufvariable für Messreihe.

Aus dem relativen Verdichtungsgrad T_{rE} können unter anderem Rückschlüsse über die Wirksamkeit des Verdichtungsprozesses (im Zuge des Einbaus, nicht infolge der Messung (18 Schläge)) gezogen werden. Ist $T_{rE} \leq 1$ (100 %), so kann weitere Verdichtungsarbeit eingebracht werden, um den Verdichtungsgrad zu erhöhen.

Um den relativen Verdichtungsgrad T_{rE} in den modifizierten Verdichtungsgrad T_{rd} umzurechnen, wird der Feuchtigkeitskorrelationsfaktor $T_{rw,i}$ aus der modifizierten Proctorkurve bestimmt (R3).

Der Feuchtigkeitskorrelationsfaktor T_{rw} handelt es sich um eine dimensionslose Kennzahl ≤ 1,00. T_{rw} ist der Quotient aus der unter dem Wassergehalt w_i (und unter modi-fizierten Proctorbedingungen) maximal erreichbaren Dichte ρ_{di} und der modifizierten Proctordichte ρ_{dmax} (siehe Bild 5). Aus dem modifizierten Proctorversuch werden für die eingestellten Wassergehalte w_i somit nicht nur die Dichten ρ_{di}, sondern auch die Feuchtigkeitskorrelationsfaktoren T_{rw} bestimmt. Entsprechend kann aus der Proctorkurve die Feuchtigkeitskorrelationskurve bestimmt werden. Mit Hilfe des modifizierten Proctorversuchs und des im Feld bestimmten Wassergehaltes w_i können somit die unter w_i (und der mod. Proctorarbeit (18 Schläge)) maximal erreichbare Felddichte ρ_{di} aus der modifizierten Proctorkurve und T_{rw} aus der Feuchtigkeitskorrelationskurve abgelesen werden. Ist $T_{rw} < 1$, so können durch die Veränderung des Wassergehaltes w_i im Feld in Richtung w_{opt} höhere Verdichtungsgrade erzielt werden (Subert 2005).

$$T_{rw} = \rho_{di} / \rho_{dmax}$$

Die Krümmung der Feuchtigkeitskorrelationskurve ist ein Maß die Wassergehaltsempfindlichkeit des Materials. Je größer die Krümmung desto größer der Einfluss des Wassergehaltes auf die Verdichtbarkeit des Materials.

Aus T_{rE} und T_{rd} kann der dynamische, modifizierte Verdichtungsgrad nun wie folgt bestimmt werden:

$$T_d = T_{rE} \cdot T_{rw} = \frac{\rho_d}{\rho_{di}} \cdot \frac{\rho_{di}}{\rho_{dmax}} = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}}$$

Bei der Berechnung des dynamischen Verdichtungsgrades aus T_{rE} und T_{rw} kürzt sich die maximale Felddichte ρ_{di} (unter gegebenen Wassergehalt) heraus. Wie bereits abschnittsweise dargestellt, ermöglicht das T_{rd} – Berechnungsmodell die getrennte Betrachtung der kausalen Verdichtungsparameter Verdichtungsarbeit und Wassergehalt (Subert 2007) (R3). Im Bild 5 sind die Zusammenhänge grafisch dargestellt.

Eine notwendige Voraussetzung des ungarischen Verfahrens ist die Übereinstimmung der Verdichtungsarbeit mit derjenigen des modifizierten Proctorversuchs. Laut Erfinder des Verfahrens zur Tragfähigkeits- und Verdichtungsgradbestimmung mit dem KSG ist diese Bedingung nach 18 Schlägen erfüllt (Subert, Phong 2007).

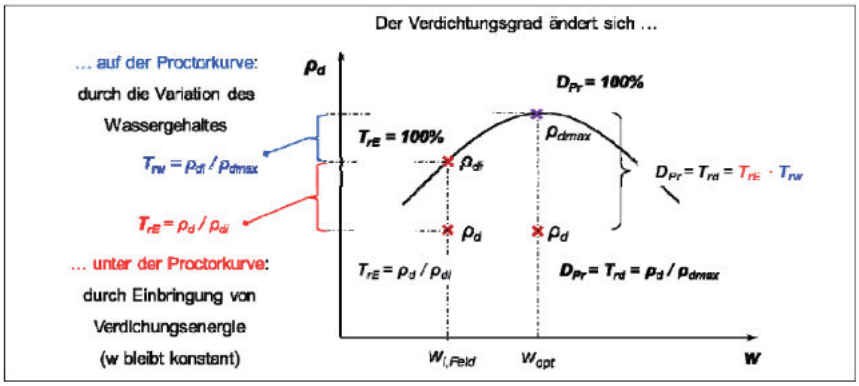

Bild 5: Zusammenhang von Verdichtungsgrad und Feuchtigkeitskorrelationsfaktor

Die Berechnungen der Proctorarbeit stehen jedoch im Widerspruch zur DIN EN 13286-2. Unterschiedliche Ansichten herrschen diesbezüglich hinsichtlich der Einbauhöhe und des verdichteten Volumens pro Schlag mit dem Fallgewicht des Proctorgerätes.

4 Geogauge

Das US-Amerikanische Geogauge der Humbolt Manufactoring Company misst die Bodensteifigkeit und den Verformungsmodul mit Hilfe von Geschwindigkeitsaufnehmern (Glaubach 2004).

4.1 Aufbau

Das Geogauge Gerät hat ein Gewicht von 10 kg, einen Durchmesser von 28 cm und ist 25,4 cm hoch. Im Bild 6 ist der prinzipielle Aufbau des Messgerätes skizziert.

Ein elektromagnetischer Vibrator erzeugt eine Schwingung mit steigender Frequenz. Angefangen bei 100 Hz wird die Frequenz in 4 Hz Schritten auf 196 Hz erhöht. Die Schwingungen werden über einen ringförmigen Fuß auf den Untergrund übertragen. Die Schwingungsamplitude beträgt ca. 1,3 µm. Diese Amplitude wird für jeden der 25 Frequenzbereiche mittels Geschwindigkeitssensor über Einfachintegration ermittelt. Nach Ablauf der ca. 2-minütigen Messprozedur werden der Mittelwert sowie die Standardabweichung über alle Amplituden gebildet (Humboldt Mfg. Co. 2002).

4.2 Messprinzip

Ein elektromagnetischer Vibrator leitet eine zyklische Kraft über mehrere feste Bauteile in den Untergrund. Die resultierende Bodenschwingung wird gemessen und die Bodenkennwerte Steifigkeit (Young's Modulus) sowie der Verformungsmodul berechnet. Die durch den Vibrator erzeugte Kraft wird über eine direkt angekoppelte, flexible Membran mit bekannter Steifigkeit ermittelt (Edil, Benson 2004). Über einen Geschwindigkeitsaufnehmer wird die Auslenkung der Membran ermittelt und anschließend die zyklische Kraft für jeden Frequenzbereich aus berechnet.

$$F_{Vib,i} = k_{flex} \cdot (x_{2,i} - x_{1,i})$$

$F_{Vib,i}$ erzeugte Kraft durch Vibrator

$x_{1,i}$ Auslenkung der Membran

i Frequenzbereich Nr.: 1 … 25

k_{flex} bekannte Membransteifigkeit ;

$x_{2,i}$ Auslenkung des Fußes.

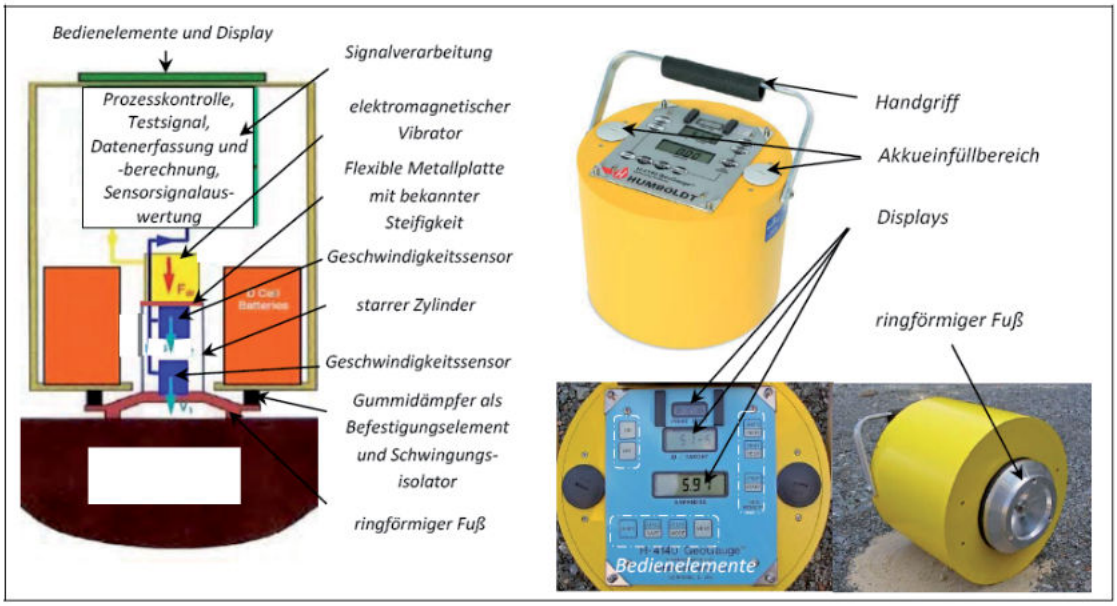

Bild 6: Systematischer Aufbau des Geogauge (Humboldt Mfg. Co. 2002)

Die Steifigkeit des Bodens im Frequenzbereich i ergibt sich nach:

$$k_{Boden,i} = \frac{F_{Vib,i}}{x_{1,i}}$$

Aus dem Mittelwert der 25 Frequenzbereiche ermittelt sich die Bodensteifigkeit somit wie folgt:

$$k_{Boden} = k_{flex}\left[\left(\sum_{i=1}^{n=25} \frac{x_{2,i}-x_{1,i}}{x_{1,i}}\right)/25\right]$$

Der dynamische Verformungsmodul wird auf Grundlage der Theorie des elastischen Halbraumes wie folgt berechnet:

$$E_{vd,GG} = k_{Boden} \cdot (1-\mu^2) \cdot \frac{\omega(n)}{R}$$

μ Querdehnzahl

R Radius (= 0,05715 m)

$E_{vd,GG}$ Verformungsmodul

ω(n) Funktion des Verhältnisses von Innen- und Außendurchmesser des kreisförmigen Ringfußes (= 0,565 für das Geogauge)

Um zu vermeiden, dass Fremdsignale wie beispielsweise Schwingungen des Baustellenverkehrs ausgewertet werden, wurden zwei Maßnahmen ergriffen. Zum einen wurde die Startfrequenz mit 100 Hz deutlich über den in aller Regel vorkommenden Störfrequenzen gewählt. Zum anderen wird vor der mehrstufigen Messreihe in einem 15 s Scanablauf der Grundschwingungspegel gemessen und in der Auswertung berücksichtigt. Zudem wird das Verhältnis von Signal- und Grundschwingungspegel angezeigt (Nazzal 2003).

4.3 Messausführung

Für eine präzise Messung ist eine möglichst vollständige Anbindung des Ringfußes an den Untergrund notwendig. Als Beurteilungskriterium hierfür gilt der Variationskoeffizient einer Messreihe aus drei Messungen an einer Stelle. Liegt dieser unter 10 %, so wird die Ankopplung als ausreichend angenommen. Des Weiteren kann sofort nach der Messung anhand des Ringabdruckes die Anbindung des Ringfußes beurteilt werden. Eine visuelle Kontrolle des Ringabdruckes kann hingegen lediglich auf lockerem, nachgiebigem sowie feinkörnigem Material mit geringer Festigkeit durchgeführt werden.

Auf hartem, unebenem oder grobkörnigem Untergrund hinterlässt der Ringfuß nahezu keinen Abdruck. In diesen Fällen kann die Anbindung über eine dünne Schicht feuchten Sandes erfolgen. Dieser soll laut Herstellerangaben mit der Hand fest auf eine Stärke von 5 mm bis 10 mm verdichtet werden. Für eine optimale Anbindung soll die Apparatur ohne zusätzlichen Druck um eine Viertel Drehung eingedreht werden. Ohne Ausgleichsschicht ist der Drehwinkel auf 180 Grad zu erhöhen (Seyman 2003).

Die Einsenkung des Ringfußes nach Einrichten des Gerätes darf maximal 5 mm betragen. Zudem ist für eine reproduzierbare Messung der Bodenkontakt ausschließlich auf den beschriebenen Bereich des Standringes zu begrenzen. Fremdeinwirkungen auf das Geogauge sind während der Messungen auszuschließen. Schließlich darf die Untergrundneigung maximal 5 Grad betragen. In den Herstellerangaben wird immer wieder darauf verwiesen, dass der Anwender ausreichend Übung mit dem Gerät benötigt, um die Messung exakt und reproduzierbar durchzuführen. Für Testzwecke werden stark verdichtete Böden empfohlen (Humboldt Mfg. Co. 2002).

5 Messtiefen

Eine wichtige und für die Qualitätskontrolle entscheidende Eigenschaft der Schnellprüfverfahren ist deren Messtiefe. „Die Messtiefe einer Prüfmethode ist als jene Tiefe definiert, unterhalb der Änderungen des Untergrundverhaltens keinen wesentlichen Einfluss auf die Prüfergebnisse haben“ (Brandl, Adam et al. 2005). Das Ziel der Untersuchungen war es, die Messtiefe der verschiedenen Prüfgeräte und die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Messtiefe experimentell zu bestimmen. Diese wurde an einem Zwei-Schichten-System bestimmt. Als notwendige Voraussetzung müssen sich die beiden Schichten deutlich hinsichtlich der Steifigkeit unterscheiden. Bei dem Versuch wurde auf die untere Schicht (= Untergrund) ein Boden bzw. Baustoffgemisch (= zweite Schicht) in mehreren Lagen aufgebracht und gleichmäßig verdichtet. Auf jeder Lage wurde mit Messgeräten der Verformungsmodul bestimmt. Wird anschließend der Verformungsmodul über die Dicke der Schicht aufgetragen, so nähert sich dieser asymptotisch dem Verformungsmodul der oberen Schicht an. Die Schichtdicke, bei der keine Änderung des Verformungsmoduls mehr eintritt, bildet die Messtiefe des Gerätes.

In mehreren Messreihen wurde ein Quarzsand (SE) auf einem relativ steifen Betonfußboden (= Untergrund) lagenweise aufgebracht. Als seitliche Begrenzung wurden Stahlrahmen (1 m x 1 m) verwendet. Zur Bestimmung der Messtiefe wurden mehrere Messreihen durchgeführt, wobei die Anzahl, Anordnung und Reihenfolge der eingesetzten Messgeräte (LFG, MFG, Geogauge, Kleinscheibengerät), die Verdichtung und Dicke der Einbaulagen sowie die Anzahl der Versuche variiert.

Um die Messtiefe aus dem Graphenverlauf (y-Achse: E_{vd} [MPa]; x-Achse: Schichtdicke s [cm]) anhand einer Kennzahl objektiv und vergleichbar bestimmen zu können, wurde zunächst der Messwertverlauf mit Hilfe einer linearen Trendfunktion approximiert. Die Messtiefe t entspricht der Schichtdicke, bei der der Anstieg der Funktion $E_{vd} = f(s)$ zwischen $-0{,}8$ MPa/cm $\leq f'(s) \leq -0{,}5$MPa/cm liegt. Entsprechend diesem Wertebereich wurde ein unterer t_{min} ($f'(s) = -0{,}8$MPa/cm) sowie ein oberer t_{max} ($f'(s) = -0{,}5$ MPa/cm) Grenzwert der Messtiefe gebildet.

Aus den Grenzwerten aller Messreihen wurden die Minima ($MINt_{min}$), Maxima ($MAXt_{max}$), Mittelwerte $(\bar{t}_{min}; \bar{t}_{max}; \bar{t}_{max-min} = ((\bar{t}_{max} + \bar{t}_{min})/2)$ und relativen Spannweiten $r_{rel} = ((\bar{t}_{max} - \bar{t}_{min})/((\bar{t}_{max} + \bar{t}_{min})/2)$ gebildet und bewertet.

Die Ergebnisse sind im Bild 7 dargestellt. Die mittlere Messtiefe $\bar{t}$ des MFG liegt zwischen $\bar{t}_{min,MFG}$ = 35 cm und $\bar{t}_{max,MFG}$ = 44 cm und ist damit vergleichsweise am größten. Beim LFG liegt die Spanne der Messtiefe im Mittel zwischen $\bar{t}_{min,LFG}$ = 29 cm und $\bar{t}_{max,LFG}$ = 39 cm und ist somit um etwa 5 cm kleiner. Die Messtiefen des Geogauge mit $\bar{t}_{min,GG}$ = 20 cm bis $\bar{t}_{max,GG}$ = 26 cm und Kleinscheibengerätes mit $\bar{t}_{min,KSG}$ = 23 cm bis $\bar{t}_{max,KSG}$ = 26 cm liegen ebenso nah beieinander.

Der Vergleich von LFG, MFG und KSG macht deutlich, dass die Messtiefe vor allem von der Größe der Kontaktfläche abhängt. Mit dem KSG wird im Vergleich zu den anderen Fallgewichtsgeräten unter der kleinsten Lastplatte, die größte Flächenpressung (0,3MPa – 0,35MPa) erzeugt. Die Messtiefe des KSG liegt hingegen deutlich unter der vom LFG und MFG.

	Messtiefenbereiche Anhand von m=-0,8 und m=-0,5			
Mess-reihe	***LFG***	***MFG***	***KSG***	***GG***
	cm	*cm*	*cm*	*cm*
1.1	*30 – 40*	*37 – 49*		*22 – 26*
1.2	*30 – 41*	*39 – 50*		*24 – 28*
1.3	*27 – 36*	*32 – 41*		*23 – 25*
1.4		*31 – 36*	*18 – 24*	*22*
1.5			*21 – 27*	*23 – 27*
t_{mittel}	***34***	***40***	***23***	***25***
$\bar{t}_{min}$ - $\bar{t}_{max}$	***29 - 39***	***35 - 44***	***20 - 26***	***23 - 26***
$MINt_{min}$ - $MAXt_{max}$	***27 - 41***	***31 - 50***	***18 - 27***	***22 - 28***
r_{rel} *[-]*	**0,29**	**0,23**	**0,26**	**0,12**
Kontakt-fläche cm²	**706,86**	**706,86**	**208,67**	**39,86**

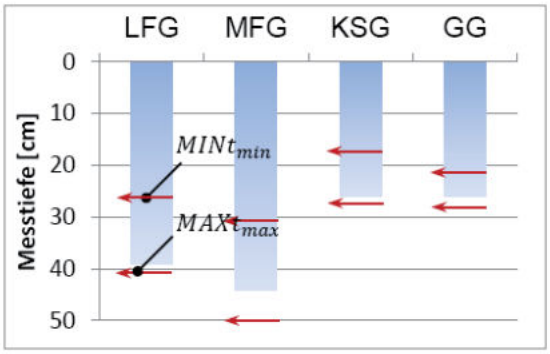

Bild 7: Übersicht Messtiefen

Die Messtiefe der Prüfgeräte ist zudem von den Eigenschaften des Bodens abhängig und schwankt deshalb. Dies sollte berücksichtigt werden, wenn die Prüfgeräte im Feld eingesetzt und die gemessenen Moduli miteinander verglichen werden.

Aufgrund von unterschiedlichen Messtiefen der Prüfgeräte können angrenzende Schichten die Messergebnisse unterschiedlich beeinflussen und somit das Verhältnis gerätespezifischer Verformungsmoduli zueinander verändern.

6 Verfahren zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit

6.1 Theoretische Grundlagen

Im Rahmen der Erprobung und Tauglichkeitsprüfung der neuen Schnellprüfverfahren wurden gerätespezifische, zufällig bedingte Prüffehler experimentell unter verschiedenen Bedingungen festgestellt.

Außer beim Geogauge kommt es durch den Einsatz der Prüfgeräte, speziell infolge des Impaktes zur Veränderung bzw. Verdichtung des Prüfgrundes. Eine Mehrfachmessung an gleicher Stelle zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit ist somit nicht möglich. Aus diesem Grund muss das Prüfgerät zwischen jeder Messung versetzt werden. Dies führt dazu, dass in der Messwertstreuung auch die Streuung der Bodenverhältnisse enthalten ist. Um den Untergrundeinfluss zu extrahieren, wird der Prüffehler mit Hilfe der Zeitreihenanalyse über Autokorrelationsfunktionen bestimmt.

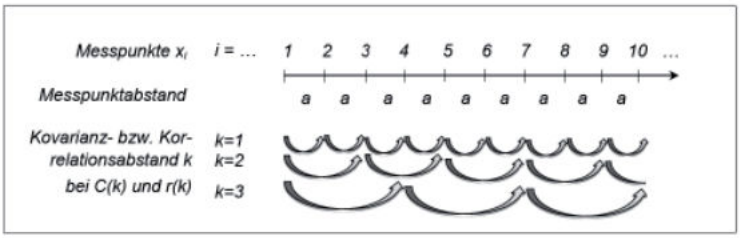

Bild 8: Grundprinzip der Korrelations- und Kovarianzbeziehung

Ausgangspunkt der Prüffehleranalyse ist eine Messreihe, bei der im Abstand a mit den Prüfgeräten N-Messungen in Reihe ausgeführt werden. Um den zufälligen Prüffehler zu bestimmen werden die Messwerte in den Abständen k*a ($1 < k < N/2$) miteinander korreliert (Bild 8) und die Korrelationskoeffizienten r(k) über k grafisch dargestellt. Der Messwert einer Tragfähigkeitsmessung wird mit Z(xi) bezeichnet.

Der Korrelationskoeffzient r(k=0) für den Abstand 0a, bei dem nur je ein Messwert existiert, kann somit extrapoliert werden. Die Differenz R_e zwischen 1, dem Korrelationskoeffizienten bei einem Messverfahren ohne Prüffehler und r(k=0) entspricht dem Anteil des Prüffehlers σ^2 an der Gesamtvarianz also:

$$R_e = 1 - r(k = 0) \qquad \text{(Bild 9).}$$

Die Varianz des Prüffehlers wird anschließend über $\sigma^2 = R_e \cdot \mathrm{Var}\, Z(x)$ bestimmt (Alber, Reitmeier 1986).

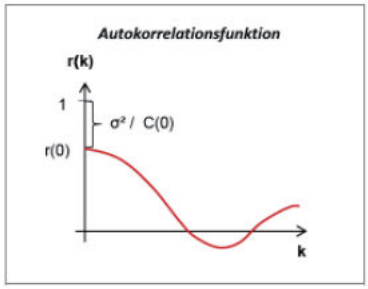

Bild 9: Autokorrelations- und Kovarianzfunktion

6.2 Messreihen

In Anlehnung an das oben beschriebene Berechnungsmodell wurden 4 Messreihen (1.TIR, 2.FG, 3.B174, 4.A72) auf verschiedenen Böden (1.SU (verbessert), 2.GU, 3.GU, 4.GW-STS) durchgeführt. Die Testflächen unterschieden sich dabei hinsichtlich Material, Tragfähigkeit sowie Homogenität.

Im Diagramm von Bild 10 ist der Anteil R_e der Varianz des Prüffehlers an der Gesamtvarianz dargestellt.

Aus dem Vergleich zwischen KSG und GG fällt auf, dass bis auf eine Ausnahme der Anteil R_e beim KSG stets größer ist als beim GG. Lediglich bei der Messreihe TIR verhält es sich umgekehrt. Die höchsten Werte wurden fast ausschließlich bei der Messreihe A72 erreicht. Dabei wurden für den Anteil der Varianz des Prüffehlers an der Gesamtvarianz beim KSG 88 %, beim MFG 71 % und beim GG 58 % bestimmt. In dieser Messreihe war die Varianz des zufälligen Fehlers größer als die Varianz der wahren Werte (inklusiver systematischer Fehler). Mit dem LFG lag das Maximum in der Messreihe FG mit R_e = 43 %. Die Schwankungsbreite von R_e zwischen den verschiedenen Messreihen ist beim MFG und KSG am größten.

Aus der Darstellung der Variationskoeffizienten (rechtes Diagramm im Bild 10) wird ersichtlich, dass mit dem KSG bei sämtlichen Messreihen größere Variationskoeffizienten erzielt wurden als mit dem GG. Der größte Variationskoeffizient für das KSG wurde bei der Messreihe B174 mit 24 % der niedrigste bei der Messreihe A72 mit 10 % bestimmt. Beim Geogauge liegt der Variationskoeffizient zwischen 10 % (Messreihen A72 und FG) und 16 % (Messreihe TIR). Bei beiden Messgeräten waren die Variationskoeffizienten bei den Messreihen TIR und B174 deutlich größer als bei den übrigen. Bei den Messreihen, in denen das LFG und das MFG zum Einsatz kam, wurden im Vergleich zu den anderen Prüfgeräten die vergleichsweise höchsten (LFG bei Messreihe FG; MFG bei Messreihe A72) sowie die niedrigsten (LFG bei Messreihe B174; MFG bei Messreihe TIR) Variationskoeffizienten bestimmt. Die Variationskoeffizienten lagen dabei beim MFG zwischen 12 % (A72) und 13 % (TIR) sowie beim LFG zwischen 13 % (B174) und 16 % (FG).

Die Auswertung der Messergebnisse hat gezeigt, dass der Anteil R_e des Prüffehlers an der Gesamtvarianz bei KSG und MFG am stärksten schwankt, gefolgt vom Geogauge und dem LFG. Die Schwankungsbreite vom Variationskoeffizienten des Prüffehlers (zwischen den Messreihen) ist hingegen beim KSG und GG am größten. Bei LFG und MFG sind die Schwankungen zwischen den gleichen Messreihen geringer.

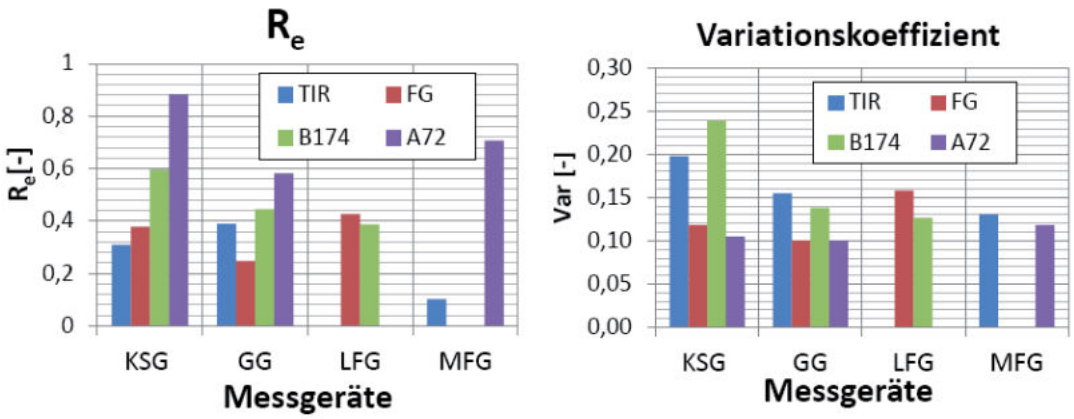

Bild 10: Auswertung der Messreihen hinsichtlich R_e (Anteil des Prüffehlers an der Gesamtvarianz) und dem Variationskoeffizient des Prüffehlers

6.3 Korrelationsbeziehungen zwischen verschiedenen Prüfmerkmalen

Die Prüfgeräte wurden auf verschiedenen Böden sowie Baustoffgemischen bei verschiedenen Verdichtungszuständen erprobt. Als Referenzverfahren wurde unter anderem der dynamische Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgerät verwendet.

Das Verhältnis zwischen den gerätespezifischen Verformungs- und Elastizitätsmodulen kann über lineare Funktionen beschrieben werden. Die Regressionsgeraden sowie deren Bestimmtheitsmaß hängen ganz wesentlich vom Material (Kornverteilung, Konsistenz, etc.), der Schichtstärke und der Prüfoberfläche ab.

Das GG und das KSG besitzen eine annähernd gleiche Messtiefe von 20 cm bis 25 cm. Dies hat zunächst den Vorteil, dass die mit beiden Geräten bestimmten Verformungsmodule gut verglichen werden können. Die abgeleiteten, linearen Funktionen $E_{vd,GG} = m \cdot E_{vd,LFG} + n$ und $E_{vd,KSG} = m \cdot E_{vd,LFG} + n$ besaßen häufig einen annähernd gleichen Anstieg m.

Das LFG besitzt im Vergleich zum KSG und GG die nahezu zweifache Messtiefe. Dies hat zur Folge, dass sich die Korrelationsbeziehung in Abhängigkeit vom Schichtaufbau sowie der Homogenität entsprechend stark ändern kann.

Mit dem Geogauge werden die vergleichsweise größten Verformungsmodule gemessen. Der $E_{vd,GG}$ kann dabei dem 2- bis 4-fachen Wert des $E_{vd,LFG}$ entsprechen.

Bei dem Einsatz der Prüfgeräte im weitgestuften Schottermaterial betrug der Modul des GG hingegen nur den 1,3- bis 1,4- fachen Wert des Moduls vom LFG. Die Gründe hierfür sind eine schwierige Ankoppelung des Ringfußes auf grobkörnigem Material und die oberflächennahe Auflockerung. Die oberflächennahe Auflockerung ist im grobkörnigen Material vergleichsweise hoch und hat auf das Messergebnis des Geogauge einen deutlich größeren Einfluss als auf die Prüfgeräte mit Fallgewicht.

Der Verformungsmodul $E_{vd,KSG}$ des Kleinscheibengerätes bewegt sich zwischen dem 1- bis 2-fachen Wert $E_{vd,LFG}$ des LFG. Im Gegensatz zum Geogauge steigt das Verhältnis $E_{vd,KSG}$/ $E_{vd,LFG}$ im Schotter und verbesserten Boden wieder an.

Der mittlere Verformungsmodul des MFG ist größer als der des LFG. Nach der Ordnung der Verformungsmodule entsprechend ihrer Größe lässt sich verallgemeinernd die Reihenfolge $E_{vd,GG} > E_{vd,KSG} > E_{vd,MFG} > E_{vd,LFG}$ ableiten.

7 Zusammenfassung

Mit den getesteten drei Schnellprüfverfahren (Geogauge, Panda-Sonde, Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht) lässt sich die Tragfähigkeit im Feld schnell und einfach bestimmen. Die Messprinzipien der drei Prüfverfahren unterscheiden sich dabei beispielsweise hinsichtlich der induzierten Bodenverformung wesentlich voneinander.

Mit dem Geogauge werden Verformungen mit sehr geringen Dehnungsamplituden erzeugt, wodurch es sich bei dem Prüfmerkmal um einen dynamischen Elastizitätsmodul im eigentlichen Sinne handelt. Das Prüfgerät wird über einen schmalen Ringfuß auf die Prüfoberfläche angekoppelt. Der Grad der Anbindung ist von der Prüfoberfläche sowie den Fähigkeiten des Bedieners abhängig und hat großen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Prüfgerätes. Die Anwendung des Prüfgerätes erfordert somit viel Erfahrung. Zudem sind Vor- und Mehrfachversuche im Rahmen der Qualitätskontrolle empfehlenswert.

Das ungarische Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht ist vom Messaufbau und Messprinzip an das Leichte Fallgewichtsgerät angelehnt, entspricht jedoch nicht den Qualitätsstandards des deutschen Pendants. Die Bestimmung des Verdichtungsgrades über die Deformation des Bodens infolge von 18 Messstößen ist ein neuer Ansatz, der jedoch auf zahlreiche, teils zweifelhafte Annahmen beruht. Zwar besteht zwischen der Änderung des Verdichtungsgrades und der dabei eintretenden plastischen Verformung eine aussagekräftige Beziehung, jedoch sind die Labor- und Feldbedingungen des Versuches nicht ausreichend konsistent. Aus diesem Grund ist weitere Forschung bezüglich der zugrunde gelegten Theorie beim KSG erforderlich.

Die Panda-Sonde ist durch die automatische Messwerterfassung (Stoßenergie und Rammweg) und den verfügbaren Anwendungsfunktionen flexibel und vielfach einsetzbar und bietet Vorteile, wie beispielsweise die Möglichkeit einer geneigten Sondierung gegenüber den klassischen Rammsonden. Im Rahmen der Qualitätskontrolle im Straßenbau lassen sich auf einfach Weise die Homogenität, die Dicke der Einbaulagen und die Tragfähigkeit beur-

teilen. Der Verdichtungsgrad kann über Referenz- bzw. Korrelationskurven abgeschätzt, jedoch nicht genau bestimmt werden, da der Einfluss des Materials auf die Korrelation groß ist. Das Korrelationsverhältnis zwischen den Spitzenwiderstand q_d und dem Verdichtungsgrad D_{Pr} wird im Wesentlichen für die Bodengruppen nach DIN 18196 angegeben. Zusätzlich erfolgt für feinkörnige und gemischtkörnige Böden mit hohem Feinkornanteil eine Einteilung in drei Konstistenzbereiche.

Literaturverzeichnis

Alber, D.; Reitmeier, W. (1986): Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse, Prof. Dr.-Ing. R. Floss ,Eigenverlag: Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TU München, Heft 7, München

Benz Navarrete, M.A. (2009): Mesures dynamiques lors du battage du penetrometer Panda 2., These, Université Blaise Pascal – Cleremont II

Blume, U.; Reichenbach, H. (2008): Leichte Rammsonde mit variabler Rammenergie zur Baugrunderkundung und zur Verdichtungskontrolle, Straße und Autobahn, 59, Heft 1, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 5-11

Brandl, H.; Adam, D.; Kopf, F. (2005): Untersuchung des statischen Lastplattenversuches mit der Randelementemethode, Österreichische Ingenieurs- und Architekten-Zeitschrift, Heft 4-5, Wien

Edil, T.B.; Benson C. H. (2004): Investigation of soil stiffness gauge and dynamic cone penetrometer for earthwork property evaluation, final report WHRP project „Investigation of the DCP and SSG as alternative methods to determine subgrade stability“, department of civil and environmental engineering, University of Wisconsin-Madison

Glaubach, U. (2004): Untersuchungen zu einem neuentwickelten Messgerät des dynamischen E-Moduls, Vorbericht, TU Freiberg

Humboldt Mfg. Co. (2002): GeoGauge User Guide Version 4.5, Hersteller-Paper, Illinois

Nazzal, M. (2003): Field evaluation of in-situ test technology for Qc/Qa during construction of pavement layers and embankments, Dissertation, Louisiana State University

Reichenbach, H.; Schmidt, H. (2008): Forschungsvorhaben „Minimal Trenching“ Schmale Leitungsgräben – Minimierung des Eingriffs in Verkehrsflächen zur Qualitätsoptimierung und Kosteneinsparung, Fa. Smoltczyk & Partner, Schlussbericht Forschungsvorhaben GDF/DVGW, Stuttgart

Seyman, E. (2003): Laboratory evaluation of in-Situ tests as potential quality control/quality assurance tool, Dissertation, Louisiana State University

Subert, I. (2005): Neue Methode für die Dichtemessung mit dynamischem Gerät mit leichtem Fallgewicht, Hersteller Paper zur Geotechnic Conference (V4), Budapest

Subert, I.; Phong, T. (2007): Neue Möglichkeiten der Auslegung von Proctor-Prüfungen, Paper, Budapest

Subert, I. (2007): Vorteile der dynamischen Verdichtungs- und Tragfähigkeitsmessanlage, Andreas Ltd., Hersteller-Paper, Budapest

Tompai Z. (2008), [1]: Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values, Paper, Budapest

Tompai Z. (2008), [2]: Laboratory evaluation of B & C small-plate light falling weight deflectometer, Paper, Budapest

Villavicencio Arancibia, G. (2009): Methodologie pour evaluer la stabilite des barrages de residus miniers, These, Université Blaise Pascal Cleremont II

Zhou, S. (1997): Caracterisation des sols de surface a l´aide du Penetrometre Dynamique leger a energie variable Type „Panda", These, Université Blaise Pascal

Normen und Richtlinien

(R1) DIN Deutsches Institut für Normung (2006): Erd- und Grundbau: Bodenklassifizierung für bautechnische Zwecke (DIN 18196), Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Berlin, Beuth Verlag, Berlin

(R2) XP P 94-105 (2005): normalization francaise – Contrôle de la qualité du compactage, Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris

(R3) ÚT 2-2.124 (2005):Technische Vorschrift im Straßenwesen, Dynamische Dichtungs- und Tragfähigkeitsmessung mittels Kleinscheibengerät mit leichtem Fallgewicht, Department of Road Transport oft he Ministry of Economy and Transport, Magyar Útügyi Társaság, Budapest