

Verfahrens- und Tauglichkeitsprüfung von drei neuen Schnellprüfverfahren zur Verdichtungskontrolle

FA 5.156

Forschungsstelle: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (Prof. Dr.-Ing. W. Kudla)
 Bearbeiter: Kudla, W. / Uhlig, M. / Glaubach, U.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
 Abschluss: Juli 2014

1 Einführung

Die anforderungsgemäße Verdichtung von ungebundenen Schüttmaterialien ist ein zentrales und zudem weitreichendes Qualitätskriterium im Straßenbau. Der Überprüfung der Tragfähigkeit und des Verdichtungsgrads 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 zahlreichen 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 wurden die Messprinzipien der drei Schnellprüfverfahren analysiert und die Messtiefe und Messgenauigkeit der Geräte bestimmt. Des Weiteren wurden Versuchsreihen auf verschiedenen Böden und bei unterschiedlichen 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

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.

Der Aufbau der Rammsonde gliedert sich gemäß Bild 1 in die nachfolgend beschriebenen Systemkomponenten. Die Sonde besteht aus einem verschraubten Rohrgestänge an dessen Ende die Sondierspitze befestigt wird.

Auf das obere Ende des Sondiergestänges wird ein Amboss aufgesetzt, an dem über Dehnungsmessstreifen 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 Versuchs einhändig gewährleistet werden kann.



Bild 1: Schematischer Aufbau der Panda-Sonde (Benz Navarrete 2009), (R 2), (Reichenbach, Schmidt 2008)

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 Dehnungsmessstreifen 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 Rammweg erfasst. Hierfür wird ein Tiefenmessband unterhalb des Ambosses befestigt und die Verschiebung bei jedem Schlag elektronisch gemessen.

Über das Handterminal (Dialog Terminal – DT) kann der Bediener die Messung konfigurieren, überwachen, speichern und das Messergebnis grafisch darstellen. Das dafür integrierte Anwendungsprogramm lässt sich mithilfe eines Taststifts über den Touchscreen steuern. Aus der Stoßenergie und dem Penetrations- beziehungsweise 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 mithilfe eines Softwareprogramms bearbeitet, ausgewertet sowie gedruckt werden.

Für die Gültigkeit des Rechenprinzips werden ausschließlich plastische Verformungsverhalten, eine vernachlässigbare Mantelreibung und die vollständige Übertragung der eingebrachten Rammenergie auf die Sondierspitze vorausgesetzt.

Die Panda-Sonde kann zur Schichtdickenbestimmung und zur Verdichtungskontrolle eingesetzt werden.

Der Verdichtungsgrad kann zum einen mithilfe eines Referenzfelds und zum anderen über einen Katalog abgespeicherter Korrelationsbeziehungen ermittelt werden.

Für die Bestimmung der Schichtdicke wird die Gradienten des geglätteten Spitzenwiderstandsgraphen in Abhängigkeit der Streubreite des uneglätteten Spitzenwiderstandsgraphen abschnittsweise analysiert.

Für die Beurteilung des Verdichtungsgrads anhand des Spitzenwiderstandsgraphen wurden im Laborversuch für verschiedene Böden und Konsistenzbereiche Korrelationen zwischen dem Spitzenwiderstand und dem Verdichtungsgrad aufgestellt. Mithilfe dieser Korrelationen lassen sich im Auswertungsprogramm sogenannte Grenz- und Referenzkurven in Abhängigkeit verschiedener Parameter (Verdichtungsgrad, Bodenart etc.) auswählen. Die Grenz- und Referenzkurven geben den Spitzenwiderstand einer Schicht an, der mindestens beziehungsweise im Mittel erreicht werden muss, um einen definierten Verdichtungsgrad unter definierten Bedingungen (Bodenart und Konsistenzbereich) zu erreichen.

3 Kleinscheibengerät mit Leichtem Fallgewicht

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 in Bild 2 dargestellt, dem des Leichteren beziehungsweise Mittelschweren Fallgewichtsgärts. Mit dem Kleinscheibengerät lassen sich jedoch Bodenpressungen von 0,3 bis 0,35 MN/m² erzeugen, die somit größer als beim Mittelschweren Fallgewichtsgärts (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. Eine Gummifeder überträgt die Belastung innerhalb von 18 ms auf die Lastplatte.

Mit dem B&C-Kleinscheibengerät kann neben der Tragfähigkeit auch der Verdichtungsgrad des Prüfuntergrunds ermittelt werden. Das Verfahren ist in der ungarischen Norm UT 2-2.124 sowie im CWA 15846 umfassend beschrieben (R3, R4).

Der Ablauf zur Messung des Verformungsmoduls gleicht dem Messablauf bei der Prüfung mit dem Leichten oder Mittelschweren Fallgewichtsgärts. 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.

Mithilfe 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.

Die angewendete Berechnungsmethodik des Small Plate Light Falling Weight Deflectometers beruht auf der Annahme einer linearen Korrelation zwischen der Änderung des Verdichtungsgrads und der dabei eintretenden plastischen Verformung. Vom Erfinder des Kleinscheibengeräts wurde der Zusammenhang am modifizierten Proctor-Laborversuch nach DIN EN 13286-2, der dafür abgewandelt worden ist, untersucht. In Bild 3 ist das

Modell grafisch dargestellt. 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 Verdichtungsgrads $\Delta T_{rd} = \Delta D_{Pr,mod}$.

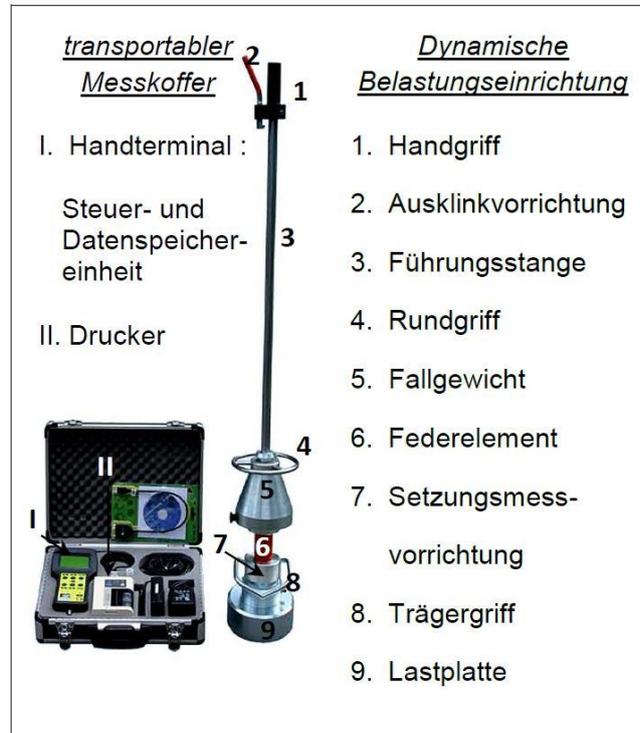


Bild 2: Aufbau des Kleinscheibengeräts mit Leichtem Fallgewicht (Tompai 2008, [2]), (Subert 2007)

Die Verdichtungsstände des modifizierten Proctorversuchs liegen demnach alle auf der modifizierten Proctorkurve. Die im Labor bestimmte Korrelation wird nun auf den Feldversuch abgewandelt, indem der relative Verdichtungsgrad T_{rE} anstelle des modifizierten Verdichtungsgrads $\Delta T_{rd} = \Delta D_{Pr,mod}$ verwendet wird. T_{rE} entspricht der Felddichte ρ_d dividiert durch die im Feld (bei gegebenem Wassergehalt $w_{i,Feld}$) maximal erreichbare Dichte ρ_{di} . Der Erfinder der Theorie geht nun davon aus, dass über insgesamt 18 Messstöße im Feld ein Verdichtungsgrad erreicht wird, der auf der modifizierten Proctorkurve liegt, das heißt dem unter gegebenem Wassergehalt maximal erreichbaren Verdichtungsgrad (relativen Verdichtungsgrad $T_{rE} = 100\%$) entspricht. Beim Feldversuch liegt die Ausgangsbeziehungsweise Felddichte (vor den 18 Messstößen) unter der modifizierten Proctorkurve. Durch den Feldversuch (18 Messstöße) wird gemäß der Theorie eine Dichte ρ_{di} erreicht, die auf der modifizierten Proctorkurve liegt. Über die infolge der 18 Messstöße erzielten plastische Verformung kann der Ausgangsverdichtungsgrad anschließend mithilfe der im Laborversuch bestimmten Korrelationsbeziehung zurückgerechnet werden. Anschließend wird der relative Verdichtungsgrad T_{rE} in den modifizierten Verdichtungsgrad $T_{rd} = D_{Pr,mod}$ umgerechnet. Hierfür wird der Einfluss des Wassergehalts auf die Verdichtung berücksichtigt. Aus der im Labor bestimmten modifizierten Proctorkurve wird der Quotient aus der im Feldversuch unter gegebenem Wasser-

gehalt maximal erreichbaren Dichte ρ_{di} (Punkt auf der modifizierten Proctorkurve) und der modifizierten Proctordichte ρ_{dmax}

mit dem relativen Verdichtungsgrad T_{rE} des Feldversuchs multipliziert.

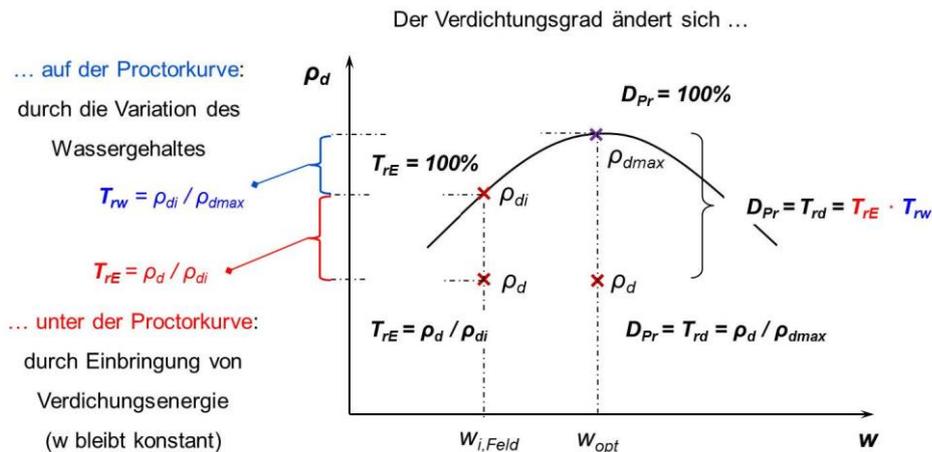


Bild 3: Zusammenhang von Verdichtungsgrad und Feuchtigkeitskorrelationsfaktor

4 Geogauge

Das US-amerikanische Geogauge der Humboldt Manufacturing Company misst die Bodensteifigkeit und den Verformungsmodul mithilfe von Geschwindigkeitsaufnehmern.

Das Geogauge-Gerät (GG) hat ein Gewicht von 10 kg, einen Durchmesser von 28 cm und ist 25,4 cm hoch. In Bild 4 ist der prinzipielle Aufbau des Messgeräts skizziert.

Ein elektromagnetischer Vibrator erzeugt eine Schwingung mit ansteigender 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. zweiminütigen Messprozedur werden der Mittelwert sowie die Standardabweichung über alle Amplituden gebildet (Humboldt Mfg. Co. 2002).

Ein elektromagnetischer Vibrator leitet eine zyklische Kraft über den Ringfuß in den Untergrund. Die resultierende Bodenschwingung wird gemessen und die Bodenkennwerte Steifigkeit sowie der Verformungsmodul berechnet. Die durch den Vibrator erzeugte Kraft wird über eine direkt angekoppelte, flexible Membran mit bekannter Steifigkeit ermittelt (Edil, Benson 2004).

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 Ringabdrucks die Anbindung des Ringfußes beurteilt werden. Eine visuelle Kontrolle des Ringabdrucks 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 bis 10 mm verdichtet werden. Für eine optimale Anbindung soll die Apparatur ohne zusätzlichen Druck um eine Vierteldrehung eingedreht werden. Ohne Ausgleichsschicht ist der Drehwinkel auf 180 Grad zu erhöhen (Seyman 2003).

5 Durchgeführtes Messprogramm

Durch mehrere Messreihen wurden die Messtiefe sowie die Wiederholgenauigkeit der Prüfgeräte bestimmt. Zudem wurden Korrelationen zwischen den Verformungsmoduli der neuen Schnellprüfverfahren und den Verformungsmoduli weiterer Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit abgeleitet.

5.1 Messtiefe

Die Messtiefen des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgeräts (LFG und MFG), des Geogauges und des Kleinscheibengeräts wurden experimentell über ein Zweischichtensystem 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 beziehungsweise 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 Geräts.

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 Kleinscheibengeräts

mit $\bar{t}_{min,KSG} = 23$ cm bis $\bar{t}_{max,KSG} = 26$ cm liegen 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 (0,3 bis 0,35 MPa) erzeugt. Die Messtiefe des KSG liegt hingegen deutlich unter der vom LFG und MFG.

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 Modulen miteinander verglichen werden.

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

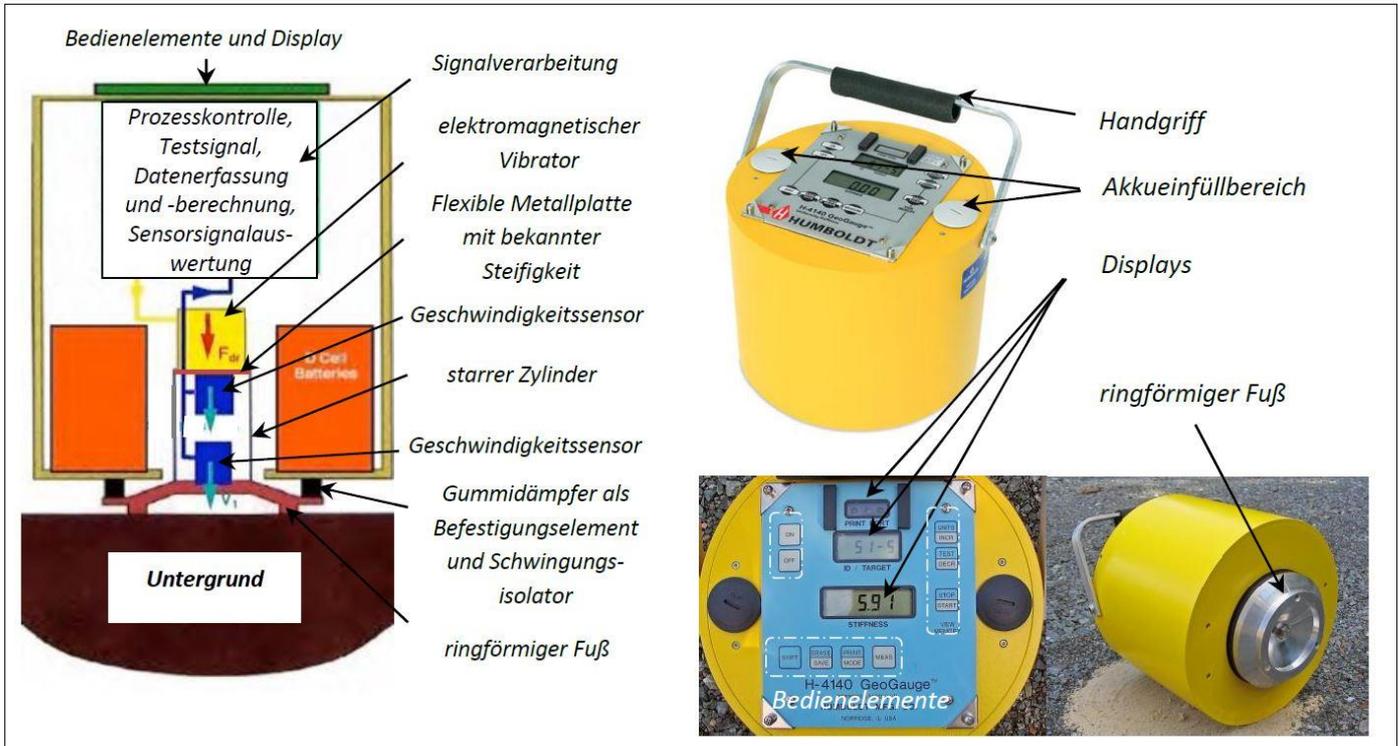


Bild 4: systematischer Aufbau des Geogauge (Humboldt Mfg. Co. 2002)

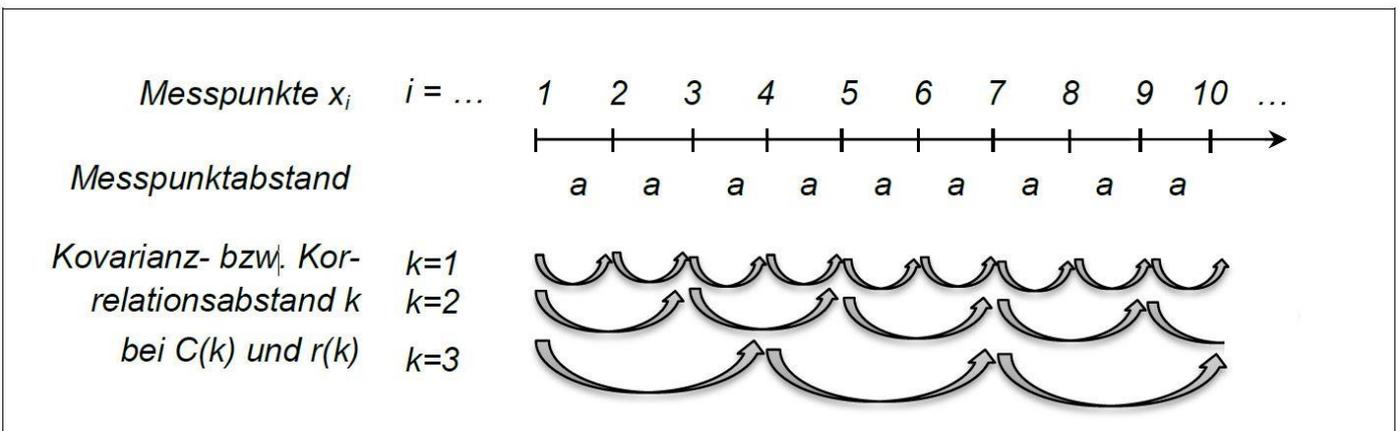


Bild 5: Grundprinzip der Korrelations- und Kovarianzbeziehung

6 Verfahren zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit

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 Impakts, zur Veränderung beziehungsweise Verdichtung des Prüfgrunds. 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, wurde der Prüffehler mithilfe der Zeitreihenanalyse über Autokorrelationsfunktionen bestimmt.

Im Bild 5 ist das Versuchsprinzip dargestellt. Mit dem jeweiligen Prüfgerät wurden N-Messungen im konstanten Abstand a nacheinander in Reihe ausgeführt. Anschließend wurden die Messergebnisse jeder k -ten Messung, das heißt im Abstand $k \cdot a$, miteinander korreliert und der Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit von k dargestellt. Da für einen Messpunkt nur jeweils ein Messwert existiert, wurde $r(k = 0)$ nicht über die herkömmliche Weise berechnet, sondern aus dem Verlauf des Korrelationskoeffizientengraphen $r(k)$ extrapoliert. Der auf diese Weise bestimmte Korrelationskoeffizient für $k = 0$ gibt den Anteil des Prüffehlers an der Gesamtvarianz an.

Beim Geogauge hängt die Wiederholgenauigkeit besonders von der Ankoppelung an die Prüffläche ab. Auf grobkörnigen und abgebundenen Oberflächen ist eine vollflächige Anbindung des Ringfußes besonders schwierig.

Beim Kleinscheibengerät können zwei primäre Ursachen der Messwertstreuung festgehalten werden. Zum einen ist die Gefahr des Verkippens der Lastplatte aufgrund des geringen Lastplattendurchmessers deutlich höher als beim LFG und MFG. Zum anderen ist auf Basis einschlägiger Untersuchungen die Temperaturempfindlichkeit einer Gummifeder im Vergleich zu Tellerfederpaket deutlich höher einzuschätzen.

7 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 Elastizitätsmoduln wurde dabei über eine lineare Funktion beschrieben. Die Regressionsgeraden sowie deren Bestimmtheitsmaß hängen ganz wesentlich vom Material (Kornverteilung, Konsistenz etc.), der Schichtstärke und der Prüfoberfläche ab.

Das GG und das KSG besaßen wie zuvor festgestellt eine annähernd gleiche Messtiefe von 20 bis 26 cm. Dies hat den Vorteil, dass die mit beiden Geräten bestimmten Verformungsmoduli gut verglichen werden können.

Das LFG besaß 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 Verformungsmoduli 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 oberflächen-

nahe 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 Kleinscheibengeräts bewegt sich zwischen dem 1- bis 2-fachen Wert $E_{vd,LFG}$ des LFG.

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