

## Ringversuch zur Kalibrierung des Leichten und des Mittelschweren Fallgewichtsgerätes

FA 5.161

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

### 1 Aufgabenstellung

Der dynamische Plattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (LFG) ist ein seit vielen Jahren etabliertes Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit in ungebundenen Schüttmaterialien des Straßenunterbaus. Das Messverfahren ist in den TP BF-StB, Teil B 8.3 geregelt. Demnach soll mit dem LFG ein gedämpfter Stoß mit einer Maximalkraft von 7,07 kN und einer Dauer von 17 ms erzeugt werden. Der Anwendungsbereich hinsichtlich des Verformungsmoduls  $E_{vd}$  ist zwischen 15 und 70 MN/m<sup>2</sup> festgelegt. Das LFG muss jährlich kalibriert werden. Durch die Kalibrierung wird sichergestellt, dass zum einen der Stoß den in den TP BF-StB, Teil B 8.3 gestellten Anforderungen entspricht, und zum anderen die Setzungsmesseinrichtung mit ausreichender Genauigkeit misst.

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von ungebundenen Tragschichten des Straßenoberbaus wurde in den letzten Jahren das Mittelschwere Fallgewichtsgerät (MFG) entwickelt. Die bautechnischen Unterschiede sind im Vergleich zum LFG eine höhere Fallmasse (15 kg) und ein härteres Tellerfederpaket. Mit diesen veränderten Vorgaben soll ein Stoßimpuls der Amplitude von  $F_m = 14,14$  kN und einer Stoßdauer von  $t_s = 13$  ms erzeugt werden. Im Vergleich zum LFG führt dies zu einem Anstieg der maximalen Sohlspannung von 0,1 MN/m<sup>2</sup> auf 0,2 MN/m<sup>2</sup>. Das MFG kann zwischen  $E_{vd} = 30$  MN/m<sup>2</sup> und  $E_{vd} = 150$  MN/m<sup>2</sup> angewendet werden. Der Dynamische Plattendruckversuch mit dem MFG ist in der TP Gestein-StB, Teil 8.2.1 standardisiert. Wie das LFG muss auch das MFG einmal im Jahr kalibriert werden.

Für die Kalibrierung des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgerätes sind vom FGSV-Arbeitsausschuss 5.7 "Prüftechnik" die TP BF-StB, Teil B 8.4 als Kalibriervorschrift verfasst worden. Die Durchführung der Kalibrierung erfordert umfassende technische und fachliche Voraussetzungen und ist auf einen engen Anwenderkreis beschränkt. Die BAST prüft den Kalibrierprozess und erkennt als wissenschaftlich-technische Bundesanstalt Kalibrierstellen privatrechtlich an.

Derzeit besitzen in Deutschland acht Kalibrierstellen eine gültige Anerkennung der BAST für die Kalibrierung des LFG.

Mithilfe des Ringversuchs soll überprüft werden,

- (1) ob alle teilnehmenden Kalibrierstellen das Leichte und das Mittelschwere Fallgewichtsgerät
- (2) nach der korrekten Verfahrensweise gemäß TP BF-StB, Teil B 8.4
- (3) mit der erforderlichen Genauigkeit

kalibrieren.

Für den Fall, dass die Zielsetzungen nicht oder nur teilweise erfüllt werden, sollen rückkoppelnd Empfehlungen für die Kalibrierstellen und für die Überarbeitung der Kalibriervorschrift abgeleitet werden.

Als übergeordnetes Ziel sollen ausreichend gleiche Kalibrierergebnisse zwischen den Kalibrierstellen erzielt werden. Dabei müssen die Kalibrierstellen mit hinreichender Genauigkeit messen. Die Voraussetzung hierfür ist ein qualitativ hochwertiges Kalibrierverfahren. Um Genauigkeitsverluste bei der Umsetzung zu vermeiden, muss das Kalibrierverfahren eindeutig sowie ausreichend detailliert dargestellt werden. Je besser dies in einer Kalibriervorschrift realisiert wird, umso eher setzt der Anwender die Kalibrierung fehlerfrei um.

Die bautechnischen Anforderungen an den Kalibrierstand basieren im Wesentlichen auf den Eigenschaften des LFG und wurden für das MFG übernommen.

### 2 Theoretische Grundlagen

Unter einem Ringversuch im weiteren Sinne versteht man Untersuchungen, bei denen in mehreren Laboratorien mit einem oder mehreren Prüfverfahren Prüfergebnisse unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen ermittelt werden.

Auf den speziellen Anwendungsfall bezogen werden unter dem Ringversuch im engeren Sinne Untersuchungen verstanden, bei denen

- mit dem Verfahren zur Kalibrierung der Stoßkraft und zur Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgerätes
- in sämtlichen von der BAST zugelassenen Kalibrierstellen
- Messergebnisse unter Wiederholbedingungen ermittelt werden.

Aus den Messergebnissen werden die Messgenauigkeiten im Sinne von Richtigkeit (Maß für den systematischen Fehler, wobei gilt: je größer der systematische Fehler, umso geringer die Richtigkeit) einer und Präzision (Maß für den zufälligen Fehler, wobei gilt: je höher der zufällige Fehler, umso geringer die Präzision) für jeden Kalibrierstand bestimmt und miteinander verglichen.

### 3 Messobjekte

Für den Ringversuch wurde jeweils ein Leichtes Fallgewichtsgerät (LFG) und ein Mittelschweres Fallgewichtsgerät (MFG) der drei Hersteller HMP, Terratest und Zorn Instruments eingesetzt (siehe Bild 1).

Bei den Prüfgeräten der Firmen HMP und Zorn handelte es sich jeweils um Kombigeräte. Bei diesen Prüfgeräten wird für beide Belastungsvorrichtungen (LFG und MFG) die gleiche Lastplatte und die gleiche elektronische Messeinheit verwendet. Je nachdem, welches Prüfgerät zum Einsatz kommt, muss zwischen

der entsprechenden Einstellung einschließlich des hinterlegten Kalibrierfaktors gewählt werden.

Alle sechs Prüfgeräte wurden vor Beginn des Ringversuchs einmalig auf dem Kalibrierstand der TU Freiberg kalibriert. Für den weiteren Versuchsverlauf durften keine Veränderungen an den Prüfgeräten vorgenommen werden. Um dies zu überprüfen, wurde bei jeder Kalibrierstelle vor sowie nach Durchführung der Versuchsreihe die Fallhöhe und der Kalibrierfaktor bei den Prüfgeräten überprüft. Messrelevante Veränderungen der Prüfgeräte waren während des Versuchsdurchlaufs infolge von Materialermüdung nicht zu erwarten.



Prüfgeräte der Firma Terratest



Prüfgeräte der Firma HMP



Prüfgeräte der Firma Zorn

Bild 1: verwendete LFG und MFG der drei Hersteller HMP, Terratest und Zorn

#### 4 Setzungsmatten

Die zur Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung eingesetzten Gummimatten mussten gewährleisten, dass (1) Verformungen entsprechend den Vorgaben der Prüfvorschrift (2) dauerhaft und (3) mit hoher Reproduzierbarkeit erreicht werden. Im Rahmen eines vorangegangenen Forschungsprojekts (FE 89.0248/2009/CGB "Erprobung von Gummimatten zur Kalibrierung des LFG und MFG") konnte die Eignung des Mattentyps hinsichtlich aller drei Punkte auf dem Kalibrierstand der TU Freiberg nachgewiesen werden.

In den TP BF-StB, Teil B 8.4 ist der Mattentyp Aclacell 2435 der Firma Acla-Werke GmbH für die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung festgelegt. Die Mattenstärken werden hingegen aktuell nur empfohlen, sind also nicht zwingend. Hintergrund hierbei sind bautechnische Unterschiede zwischen den Kalibrierständen, die trotz gleicher Mattenstärke unter identischer Belastung zu unterschiedlichen Setzungen führen können.

Die Setzungsmatten bestehen aus geschäumtem Polyurethan-Elastomer. Für den Ringversuch werden Matten der gleichen Charge verwendet. Die Matten erhalten einen für jede Kalibrierstelle individuellen Zuschnitt.

Aufgrund der angesprochenen bautechnischen Unterschiede, speziell in den Mattenaufgabeflächen der verschiedenen Kalibrierstände, ist eine einheitliche Mattenform nicht realisierbar: Folglich haben die Matten zwar die gleiche Grundform (Kreisfläche mit Radius  $r = 340 \text{ mm}$ ) und die identische Fläche, unterscheiden sich jedoch in der Anzahl und Anordnung der für die Zentrierbolzen erforderlichen runden Aussparungen. Unter Verwendung von Matten der gleichen Querschnittsfläche, der gleichen Charge sowie der gleichen Dicke sollte die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung in den geforderten Setzungsmessbereichen auf allen Kalibrierständen realisiert werden.

Für die Setzungsmessungen des LFG wurden Matten der Dicken 2 mm (SMB 3: Setzung  $< 0,4 \text{ mm}$ ), 4 mm (SMB 2: Setzung  $0,4 \text{ bis } 0,6 \text{ mm}$ ) und 10 mm (SMB 1: Setzung  $> 0,9 \text{ mm}$ ) verwendet. Beim MFG kamen Matten von 6 mm (SMB 3: Setzung  $< 0,4 \text{ mm}$ ), 10 mm (SMB 2: Setzung  $0,4 \text{ bis } 0,6 \text{ mm}$ ) und 23 mm (SMB 1: Setzung  $> 0,9 \text{ mm}$ ) Dicke zum Einsatz.

#### 5 Messwertkennzeichnung

Die Messgrößen  $x$  werden sowohl mit einem hochgestellten Index  $b$  als auch mit einem tiefgestellten Index  $a$  gekennzeichnet:

$$x_a^b$$

##### Messwertparameter x:

##### Art der Messung

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| Stoßkraftmessungen ...   | <b>K</b>   |
| Setzungsmessungen ...    | <b>S</b>   |
| im Setzungsmessbereich 1 | <b>SB1</b> |
| im Setzungsmessbereich 2 | <b>SB2</b> |
| im Setzungsmessbereich 3 | <b>SB3</b> |

Messung der Unterbauverformung bei der Kalibrierung der Stoßkraft **U**  
 bei der Kalibrierung der Stoßkraft **UK**  
 bei der Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung **US**

6.1 Kraftmessung [K]:  
 2 x 3 x 10 Messstöße  
 (10 Messstöße sind eine Messreihe, 3 x 10 Messstöße sind eine Messserie)

### Laufvariablen für Messwertparameter a:

Kalibrierstelle g:  $g = 1 \dots k ; k = 9$   
 Messserie h:  $h = 1 \dots l ; l = 2$   
 Für **SB1, SB2, SB3** gilt:  
 Messreihe:  $i = 1 \dots m ; m = 3$   
 (SMB 1 ... i = 1; SMB 2 ... i = 2; SMB 3 ... i = 3)  
 Messwert:  $j = 1 \dots n ; n = 10$   
 Für **K** gilt:  
 Messreihe:  $i = 1 \dots m ; m = 3$   
 Messwert:  $j = 1 \dots n ; n = 10$   
 Für **UK, US** gilt:  
 Messreihe:  $i = 1 \dots m ; m = 1$   
 Messwert:  $j = 1 \dots n ; n = 10$

6.2 Setzungsmessung [S]:

Setzungsmessbereich 1  
 (Setzung > 0,9 mm):

[2 x 10 Messstöße] mit der Matte 1 (großer Setzungsmessbereich)

Setzungsmessbereich 2  
 (Setzung 0,4 bis 0,6 mm):

[2 x 10 Messstöße] mit der Matte 2 (mittlerer Setzungsmessbereich)

Setzungsmessbereich 3  
 (Setzung < 0,4 mm):

[2 x 10 Messstöße] mit der Matte 3 (kleiner Setzungsmessbereich)

(10 Messstöße mit einer Matte sind eine Messreihe, 10 Messstöße mit drei verschiedenen Matten sind eine Messserie)

### Messwertparameter b – (R,B):

#### Art des Messgeräts – R:

Messungen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät **L**  
 Messungen mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgerät **M**

6.3 [UK] Unterbauverformung bei der Kalibrierung der Stoßkraft

1 x 10 Messstöße (1 Messreihe)

Für diese Messreihe wurde der Versuchsaufbau, der für die Kalibrierung der Stoßkraft notwendig ist (unter anderem Kraftmessdose), um die induktiven Wegaufnehmer erweitert. Die induktiven Wegaufnehmer wurden auf die Ankopplungsplatte direkt neben der Kraftmessdose gesetzt. Gemessen wurde nur die Setzung über die drei induktiven Wegaufnehmer.

#### Herstellerfirma für LFG beziehungsweise MFG – B:

Firma HMP Magdeburger Prüfgerätebau **H**  
 Firma Terratest **T**  
 Firma Zorn Instruments **Z**

6.4 [US] Unterbauverformung bei der Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung

1 x 10 Messstöße (1 Messreihe)

Für diese Messreihe wurde der gleiche Versuchsaufbau verwendet wie bei der Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung. Jedoch wurde dabei keine Setzungsmatte verwendet. Die Setzung wurde über die drei induktiven Setzungsaufnehmer direkt auf der Lastplatte gemessen.

Der Messumfang betrug damit 140 Messungen pro Gerät und Kalibrierstand und insgesamt  $6 \times 140 = 840$  Messungen pro Kalibrierstand.

## 6 Versuchsprogramm

Bei jeder Kalibrierstelle wurden die in der Kalibriervorschrift TP BF-StB, Teil B 8.4 beschriebenen Messungen zur Kalibrierung der Stoßkraft und zur Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung im doppelten Umfang durchgeführt. Zusätzlich dazu sollten die Unterbauverformungen gemessen und der Einfluss der Unterbauverformung auf die Kalibrierung der Stoßkraft und auf die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung bestimmt werden. Für diesen Zweck wurde ein neuartiger Versuchsaufbau und -ablauf aufgestellt, der nicht in den TP BF-StB, Teil B 8.4 beschrieben ist.

Das Versuchsprogramm setzte sich aus den folgenden Teilen zusammen:

## 7 Versuchsergebnisse

7.1 Kraftmessung [K]:

*Wie stark unterschieden sich die auf den verschiedenen Kalibrierständen im Mittel bestimmten Stoßkräfte voneinander?*

Für jede Kalibrierstelle wurden die Mittelwerte  $F_{m,gh..}$  zweier Messserien mit je 30 Messungen (drei Messreihen mit jeweils 10 Messstößen) betrachtet und die prozentualen Abweichungen zum Bezugswert, dem Mittelwert  $F_{m,....}$  über alle Kalibrierstellen, bestimmt.

Bei den Stoßkraftmessungen mit den LFG wichen die mittleren Stoßkräfte  $F_{m,gh..}^{L,B}$  (Mittelwert aus 30 Messungen) um maximal 1,3 % (LFG-Terratest) und 2,8 % (LFG-Zorn) vom jeweiligen Bezugswert ab. Im Mittel über alle Kalibrierstellen lagen die Abweichungen von Bezugswerten bei allen Prüfgeräten unter 0,5 % (LFG-HMP: 0,35 %, LFG-Terratest 0,46 %, LFG-Zorn 0,37 %). Zwei Kalibrierstellen besitzen einen zu hohen systematischen Fehler (die dort im Mittel bestimmten Stoßkräfte  $F_{m,gh..}^{L,B}$  unterschieden sich um bis zu 3,5 % des Bezugswerts voneinander) und müssen ihre Kraftmesskette justieren. Alle übrigen Kalibrierstellen besitzen eine ausreichend hohe Richtigkeit.

Bei den MFG wichen die mittleren Stoßkräfte  $F_{m,gh..}^{M,B}$  (Mittelwert aus 30 Messungen) um maximal 0,5 % (MFG-HMP) und 1 % (MFG-Terratest) vom jeweiligen Bezugswert ab. Im Mittel über alle Kalibrierstellen lagen die Abweichungen vom Bezugswert, wie schon beim LFG, unter 0,5 % (MFG-HMP: 0,48 %, MFG-Terratest 0,42 %, MFG-Zorn 0,48 %). Die im Mittel (über eine Messserie) bestimmten Stoßkräfte ( $F_{m,gh..}^{M,B}$ ) unterschieden sich zwischen den Kalibrierstellen um maximal 1 % (MFG-HMP), 1,4 % (MFG-Zorn) beziehungsweise 1,6 % (MFG-Terratest) der jeweiligen Bezugswerte. Alle Kalibrierstellen besitzen einen systematischen Fehler, der unter 1 % des Bezugswerts liegt. Damit besitzen alle Kalibrierstellen eine ausreichend hohe Richtigkeit.

## 7.2 Setzungsmessung [S]:

In der Auswertung der Setzungsmessergebnisse wird unterschieden in die *erzielten Setzungen*, gemeint sind die mit den induktiven Wegaufnehmern gemessenen Setzungen, und die *gemessenen Setzungen*, wobei die mit den Prüfgeräten gemessenen Setzungen gemeint sind.

## 7.3 Setzungsmessbereiche

*Wurden mit den Ringversuchsmatten die Setzungsmessbereiche und die Zielwerte der Setzung gemäß TP BF-StB, Teil B 8.4 erreicht?*

### 7.3.1 LFG

Bis auf eine Ausnahme wurden von allen Kalibrierstellen mit der 6 mm dicken Matte Setzungen entsprechend dem SMB 3 (< 0,4 mm) erreicht.

Mit der 10 mm dicken Matte und der 23 mm dicken Matte wurden ausnahmslos die Setzungen entsprechend dem SMB 2 (0,4-0,6 mm) beziehungsweise dem SMB 1 (> 0,9 mm) erreicht.

Im SMB 2 und SMB 3 wurden Setzungen nahe den Zielwerten erreicht.

Im SMB 1 wurde der angestrebte Zielwert von 1,4 mm verfehlt. Dies war jedoch unkritisch, da die im Mittel erzielten Setzungen größer 1,1 mm ausreichend waren.

### 7.3.2 MFG

Bis auf eine Ausnahme wurden von allen Kalibrierstellen mit der 2 mm dicken Matte Setzungen entsprechend dem SMB 3 (< 0,4 mm) und mit der 4 mm dicken Matte Setzungen entsprechend dem SMB 2 (0,4-0,6 mm) erzielt.

Mit der 10 mm dicken Matte wurden hingegen ausnahmslos die Setzungen entsprechend des SMB 1 (> 0,9 mm) erreicht.

Die Zielwerte wurden nicht in allen drei Setzungsmessbereichen durchgehend erreicht:

In dem SMB 1 und dem SMB 2 war dies unkritisch, da die Zielwerte unterschritten wurden und infolge der Mattenalterung mit einer Setzungszunahme und einer Annäherung an den Zielwert zu rechnen ist. Zudem wurde mit den im Mittel erzielten Setzungen der prüftechnisch relevante Messbereich des Prüfgeräts ausreichend abgedeckt.

Im SMB 3 wird die Festlegung einer Mindestsetzung von 0,25 mm empfohlen.

## 7.4 Vergleich zwischen den Kalibrierständen

*Wie groß waren Unterschiede zwischen den mit Matten gleicher Fläche und Dicke erzielten Setzungen?*

Trotz der gleichen Mattenquerschnittsfläche wurden mit den Leichten Fallgewichtsgeschäften zwischen den Kalibrierständen Setzungsunterschiede von bis zu 22 % im Setzungsmessbereich 1 (SMB 1: größer 0,9 mm) und bis zu 48 % im Setzungsmessbereich 3 (SMB 3: kleiner 0,4 mm) *erzielt*.

Bei den Mittelschweren Fallgewichtsgeschäften betrugen die *erzielten* Setzungsunterschiede bis zu 23 % im Setzungsmessbereich 1 (SMB 1: größer 0,9 mm) und bis zu 92 % im Setzungsmessbereich 3 (SMB 3: kleiner 0,4 mm).

Diese teilweise großen Unterschiede werden durch die unterschiedliche Steifigkeit der Kalibrierstandsgründungen sowie die Heterogenität der Matteneigenschaften (Dicke und Steifigkeit) verursacht.

## 7.5 Vergleich zwischen den Prüfgeräten

*Wie groß waren die Unterschiede zwischen den mit Prüfgeräten des gleichen Typs (LFG oder MFG) erzielten und gemessenen Setzungen?*

Im Mittel wurden mit den Prüfgeräten (LFG und MFG) der Firma HMP kleinere Setzungen erzielt als mit den Prüfgeräten (LFG und MFG) der Firmen Zorn und Terratest. Die Setzungen wurden sowohl mit den induktiven Wegaufnehmern als auch den Prüfgeräten gemessen und gegenübergestellt (siehe nachstehende Auflistung).

- Mit dem LFG der Firma HMP wurden im Mittel um 2 % (SMB 1) bis 6 % (SMB 3) niedrigere Setzungen

( $S_{IND,hi}$ ) erzielt als mit dem Prüfgerät der Firma Zorn. Im SMB 2 lag die Abweichung bei 4 %.

- Mit dem LFG der Firma HMP wurden im Mittel um 1,5 % (SMB 1) bis 7 % (SMB 3) niedrigere Setzungen ( $S_{LFG,hi}$ ) gemessen als mit dem Prüfgerät der Firma Zorn. Im SMB 2 lag die Abweichung bei 5 %.
- Mit dem MFG der Firma HMP wurden im Mittel um 5 % (SMB 1) bis 12 % (SMB 3) niedrigere Setzungen ( $S_{IND,hi}$ ) erzielt als mit dem Prüfgerät der Firma Terratest. Im SMB 2 lag die Abweichung bei 10 %.
- Mit dem MFG der Firma HMP wurden im Mittel um 7 % (SMB 1) bis 20 % (SMB 3) niedrigere Setzungen ( $S_{MFG,hi}$ ) gemessen als mit dem Prüfgerät der Firma Terratest. Im SMB 2 lag die Abweichung bei 14 %.

Was waren die Ursachen dieser Beobachtung?

Die Stoßkraftamplitude war nicht die Hauptursache der im Mittel erzeugten Setzungsunterschiede. Denn:

- für das LFG gilt: Obwohl die Belastungsvorrichtung vom LFG-HMP im Mittel (Bezugswert) eine um 0,7 % niedrigere Stoßkraft erzeugte als die Belastungsvorrichtung des LFG-Terratest, wurde auf der identischen Lastplatte mit der Belastungsvorrichtung vom HMP-Prüfgerät eine um 2,4 % (Matte 2) höhere Setzung erzeugt.
- für das MFG gilt: Mit der Belastungsvorrichtung vom MFG-Zorn wurde im Mittel (Bezugswert) eine um 0,2 % höhere Stoßkraft erzeugt als mit der Belastungsvorrichtung des MFG-Terratest. Gleichwohl wurde auf der identischen Lastplatte mit der Belastungsvorrichtung vom MFG-Zorn eine um 5,8 % (Matte 2) niedrigere Setzung erzeugt.

Der Hauptgrund für die festgestellten Setzungsunterschiede war das unterschiedliche Schwingungs- beziehungsweise Verformungsverhalten der Lastplatten. Dies zeigten Messungen bei denen auf den Lastplatten der Prüfgeräte Zorn und HMP die Belastungsvorrichtungen aller Prüfgeräte eingesetzt wurden. Mit der Lastplatte HMP wurden bei den LFG im Mittel um 2,8 bis 10,6 % niedrigere Setzungen erzeugt als mit der Lastplatte Zorn. Unter Verwendung der Belastungsvorrichtungen der MFG wurden zwischen den identischen Lastplatten sogar Setzungsunterschiede von 5 bis 19 % erzeugt.

Die Belastungsvorrichtung hat im Vergleich zur Lastplatte einen geringeren Einfluss auf die ermittelten Setzungsunterschiede. Bei den LFG wurden mit der identischen Lastplatte sowie Setzungsmesseinrichtung durch unterschiedliche Belastungsvorrichtungen Setzungsunterschiede von maximal 2,4 % erzeugt. Bei den MFG betragen die Setzungsunterschiede maximal 5,8 %.

### 7.6 Kalibrierfaktoren

Wie stark unterschieden sich die auf den verschiedenen Kalibrierständen bestimmten Kalibrierfaktoren beziehungsweise Prüfgerätefehler voneinander?

Aus den Ergebnissen der Setzungsmessungen wurden für jeden Kalibrierstand die mittleren Abweichungen zwischen dem Prüfgerätewert und dem Referenzwert (Messwert der ind. Wegaufnehmer) über den Kalibrierfaktor  $c_M$  (Ermittlung von  $c_M$  ergibt sich aus der Verfahrensweise gemäß TP BF-StB, Teil B 8.4) bestimmt. Für die weitere Analyse wurden nun die von den verschiedenen Kalibrierstellen bestimmten Kalibrierfaktoren für jedes Prüfgerät gegenübergestellt. Die absoluten Differenzen zwischen den Kalibrierfaktoren eines Prüfgeräts waren dabei teils sehr hoch (die absolute Differenz der Kalibrierfaktoren wird nachfolgend in Prozent angegeben. Beispiel: Eine Differenz zweier Kalibrierfaktoren von 0,03 entspricht einer Differenz von 3 %):

- Beim LFG lagen die Differenzen häufig bei weniger als 2 % und bei maximal 5 % (LFG-HMP), 7 % (LFG-TERRATEST) beziehungsweise 6 % (LFG-ZORN).
- Beim MFG lagen die Differenzen häufig bei 5 % und maximal bei 12 % (MFG-HMP), 16 % (MFG-TERRATEST) beziehungsweise 14 % (MFG-ZORN).

Die Unterschiede der auf den verschiedenen Kalibrierstellen bestimmten Kalibrierfaktoren waren damit sehr hoch.

## 8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

1. Die Kalibrierung der Stoßkraftmessung erfolgt bis auf drei Ausnahmen mit ausreichend hoher Richtigkeit. Der systematische Fehler lag im Mittel über alle Kalibrierstellen unter 0,5 % des Bezugswertes (Mittelwert über alle Kalibrierstellen).
2. Hinsichtlich der bautechnischen Ausführung der Kalibrierstände konnten zum Teil Abweichungen von den Anforderungen der Kalibriervorschrift festgestellt werden. Daher wird empfohlen, den Einfluss dieser Abweichungen auf das Messergebnis zu bestimmen. Zudem gibt es in den TP BF-StB, Teil B 8.4 keine Vorgaben zur Masse des Aufnahmezapfens, obwohl diese das Messergebnis nachweislich beeinflusst.
3. Obwohl auf den Kalibrierständen Matten der gleichen Dicke und der gleichen Querschnittsfläche eingesetzt wurden, unterschieden sich die erzielten sowie gemessenen Setzungen teils deutlich voneinander. Bei allen Kalibrierständen waren jedoch reproduzierbare Messungen möglich, das heißt, die mittleren Setzungen aufeinanderfolgender Messreihen schwankten nur geringfügig.
4. Mit den Ringversuchsmatten wurden nahezu ausnahmslos Setzungen entsprechend der drei Setzungsmessbereiche erzielt. Die Zielwerte der Setzungsmessbereiche wurden dabei sowohl bei den LFG als auch bei den MFG im Mittel im hinreichenden Maße erreicht. Einzige Ausnahme waren Messungen mit den MFG, bei denen im Mittel Setzungen von weniger als 0,25 mm erzielt wurden. In diesen Fällen wird empfohlen, eine dickere Matte zu verwenden oder die Querschnittsfläche der bestehenden Matte zu verringern, um eine Annäherung an den Zielwert zu erreichen und die Kalibrierfähigkeit der Prüfgeräte zu gewährleisten. Es wird empfohlen, den SMB 3 auf Set-

zungen größer als 0,25 mm zu begrenzen. Der Zielwert beträgt im SMB 3 0,3 mm. Die Grenzwerte betragen 0,4 mm und 0,25 mm.

5. Mit welchen Mattendicken und Querschnittsflächen die Setzungen erzeugt werden, ist für die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung nachrangig. Das hochelastische Verformungsverhalten der Gummimatten gewährleistet dauerhaft reproduzierbare Messungen. Damit sind die Gummimatten für die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung geeignet.
6. Prüfgeräte mit nahezu identischen Stoßkräften erzeugten stark unterschiedliche Setzungen. Die Ursachen liegen hauptsächlich im Schwingungs- und Verformungsverhalten der Lastplatten begründet und müssen weiter untersucht werden. Nach den Ergebnissen des Ringversuchs ist das MFG derzeit nicht mit ausreichender Genauigkeit kalibrierbar. Es soll deshalb nicht weiter vertrieben werden, solange die Ursachen für das unterschiedliche Setzungsverhalten der HMP-Lastplatte und der Zorn-Lastplatte beziehungsweise der Terratest-Lastplatte nicht geklärt sind.
7. Die Kalibrierfaktoren beziehungsweise die Prüfgerätefehler unterschieden sich zwischen den Kalibrierstellen teils stark voneinander. Die Ursachen müssen in weiteren Untersuchungen festgestellt werden.