



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Leichtes Fallgewichtsgerät für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten**

**Applicabilité du déflectomètre léger LFG pour le contrôle  
du compactage des couches de fondation non liées**

**Use of a light weight deflectometer LFG for compaction control  
of unbound subbase layers**

**ViaTec AG  
Peter Bodmer  
Hansjörg Byland**

**Tiefbauamt Kanton Uri  
Hans de Witte**

**Forschungsprojekt VSS 2002/501 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundationsschichten

**Applicabilité du déflectomètre léger LFG pour le contrôle  
du compactage des couches de fondation non liées**

**Use of a light weight deflector LFG for compaction  
control of unbound subbase layers**

**ViaTec AG**  
**Peter Bodmer**  
**Hansjörg Byland**

**Tiefbauamt Kanton Uri**  
**Hans de Witte**

**Forschungsprojekt VSS 2002/501 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Peter Bodmer

### Mitglieder

Hansjörg Byland

Hans de Witte

## Federführende Fachkommission

Fachkommission 5: Bau- und Geotechnik

## Begleitkommission

### Präsident

Walter Steiner

### Mitglieder

Yves Brechbühler

Daniel Flum

Hansjürg Gysi

Reto Hollenweger

Jean-Philippe Rey

Hanspeter Ris

Gilbert Steinmann

Christian Taruffi

Martin Wittlinger

## Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzungen</b> .....	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>15</b>
3.1	Entwicklung der dynamischen Bodenuntersuchungen .....	15
3.2	Entwicklungen in Deutschland .....	17
3.3	Erfahrungen im Kanton Uri.....	19
<b>4</b>	<b>Plattendruckversuch</b> .....	<b>21</b>
4.1	Anwendungsbereich.....	21
4.2	Messprinzip .....	21
<b>5</b>	<b>Leichtes Fallgewichtsgesetz (LFG)</b> .....	<b>23</b>
5.1	Messprinzip .....	23
5.2	Messeinrichtung .....	23
5.3	Durchführung und Auswertung der Messung .....	25
5.4	Anwendungsbereich.....	26
<b>6</b>	<b>Anforderungen und Umrechnungsfaktoren</b> .....	<b>27</b>
6.1	Allgemeines.....	27
6.2	Anforderungen.....	27
6.3	Korrelationen und Umrechnungsfaktoren .....	28
<b>7</b>	<b>Vergleichsmessungen</b> .....	<b>29</b>
7.1	Vorgehen.....	29
7.2	Auswertung der Vergleichsmessungen .....	30
7.3	Ergebnis der Vergleichsmessungen .....	32
<b>8</b>	<b>Versuchsdurchführung und -Auswertung</b> .....	<b>33</b>
8.1	Versuchsbedingungen .....	33
8.2	Versuchsanordnung .....	33
8.3	Messwerte .....	34
8.4	Auswertung der Messergebnisse.....	35
8.4.1	Allgemeine Überlegungen.....	35
8.4.2	Korrelationen und Trendlinien .....	36
8.4.3	Umrechnungsfaktoren.....	39
8.4.4	Anforderungswerte $E_{vd \min}$ .....	40
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>42</b>
9.1	Anwendung des Leichtes Fallgewichtsgesetzes in der Praxis.....	42
9.2	Vergleichbarkeit verschiedener Messgeräte .....	42
9.3	Auswertung der Messergebnisse.....	42

<b>10</b>	<b>Hinweise für die Anwendung des LFG .....</b>	<b>44</b>
10.1	Handhabung .....	44
10.2	Versuchsbedingungen .....	44
10.3	Versuchsdurchführung.....	45
10.4	Wartung.....	46
10.5	Kalibrierung .....	47
10.5.1	Kalibrierung des Messgerätes .....	47
10.5.2	Kalibrierung der Messungen.....	47
10.6	Empfehlungen für die Normierung.....	47
	<b>Anhänge.....</b>	<b>49</b>
	<b>Abkürzungen .....</b>	<b>56</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>57</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>58</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....</b>	<b>61</b>

## Zusammenfassung

Beim Leichten Fallgewichtsgesetz handelt es sich wie beim Plattendruckversuch um ein Prüfverfahren zur punktuellen Messung der Tragfähigkeit ungebundener Schichten. Mit dem einfach zu bedienenden Leichten Fallgewichtsgesetz kann die Tragfähigkeit einer ungebundenen Fundationsschicht oder eines Planums mit geringem zeitlichem Aufwand ermittelt werden. Die Messergebnisse sind sofort verfügbar. Dadurch eignet sich das Gesetz als Alternative zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle oder für die Eigenüberwachung des Unternehmers. Da das Gesetz für den Plattendruckversuch erforderliche Gegengewicht entfällt kann das LFG dank seinem geringen Gewicht sowie der einfachen Handhabung durch eine Person auch an schwer zugänglichen Stellen eingesetzt werden. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, die kostengünstige Anwendung und die direkte Verfügbarkeit der Ergebnisse machen das Leichte Fallgewichtsgesetz zu einem für den Baustellenalltag sehr geeigneten Prüfmittel.

Um die Vergleichbarkeit der beiden für das Forschungsvorhaben verwendeten Leichten Fallgewichtsgesetzen nachzuweisen, wurden durch drei Labors Vergleichsmessungen durchgeführt. Gestützt auf die Auswertung dieser Vergleichsmessungen konnte die Vergleichbarkeit der Messwerte für die von ViaTec AG und TBA Uri verwendeten Geräten eindeutig nachgewiesen werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens standen 290 Datensätze von Messungen auf Fundationsschichten aus den Jahren 1996 bis 2007 zur Verfügung. Aus verschiedenen Gründen wurden 49 Messstellen für die Auswertung nicht berücksichtigt. Insgesamt wurden also Werte von 241 Messstellen ausgewertet.

Das Forschungsvorhaben beschränkte sich auf die Prüfung von ungebundenen Fundationsschichten, den weitaus häufigsten Anwendungsfall des Plattendruckversuches. Die Versuchsanordnung wurde so gewählt, dass eine gute Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erwarten war. Wie vermutet konnte für die Beziehung zwischen  $M_{E2}$  und  $E_{vd}$  keine verwertbaren Korrelationen gefunden werden. Auf eine weitere Untersuchung von Beziehungen zu  $M_{E2}$  wurde deshalb verzichtet.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass für die praktische Nutzung des Leichten Fallgewichtsgesetzes verschiedene Beurteilungsmöglichkeiten möglich sind:

- aufgrund der Regressionsgleichung  $M_{E1} = 1,75 \cdot E_{vd} - 20,0$  [MN/m<sup>2</sup>]
- mit der Beziehung  $M_{E1} = k \cdot E_{vd} = 1,25 \cdot E_{vd}$  [MN/m<sup>2</sup>]
- mit Anforderungswerten  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$  (für T1)  
resp.  $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$  (für T2...T6)

In den ersten beiden Fällen muss die Übereinstimmung der rechnerisch ermittelten  $M_{E1}$ -Werte bei jeder Baumassnahme mit denjenigen der Plattendruckversuche nachgewiesen werden. Wenn nötig muss die benutzte Formel angepasst werden. Mit den vorgeschlagenen Anforderungswerten wird sichergestellt, dass in rund 90% der Fälle der entsprechende  $M_{E1}$ -Anforderungswert ebenfalls erreicht wird.

In jedem Fall muss bei der Interpretation der Messresultate berücksichtigt werden, dass die geprüften Fundationsschichten bezüglich Zusammensetzung, Grösstkorn, Wassergehalt und Verdichtungsgrad recht grosse Inhomogenitäten aufweisen. Die gefundenen Übereinstimmungen und Korrelationen können deshalb als gut bezeichnet werden.

Für eine einheitliche Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes in der Schweiz drängt sich die Aufnahme von Anforderungswerten für den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  in der Norm SN 640 585 [5] auf. Zudem sollte eine Schweizer Norm für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes geschaffen werden.

Für die Bestimmung der Tragfähigkeit ungebundener Fundationsschichten ergänzt das Leichte Fallgewichtsgesät den Plattendruckversuch in idealer Weise:

- Im Gegensatz zum zeitlich und bezüglich der Prüfeinrichtungen aufwendigen Plattendruckversuch kann mit dem Leichten Fallgewichtsgesät eine grosse Anzahl Messungen mit einer tragbaren und von Hand anzuwendenden Einrichtung kostengünstig durchgeführt werden. Die Aussagekraft über die Homogenität der erreichten Verdichtung und der vorhandenen Tragfähigkeit kann so erheblich verbessert werden.
- Mit der vorgeschlagenen Ermittlung des Mittelwertes aus fünf Einzelmessungen pro Messpunkt kann eine Aussage über eine Fläche von etwa 2 m<sup>2</sup> gemacht werden.
- Für die Verwendung des Leichten Fallgewichtsgesätes als Alternative oder auch als Ergänzung zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle sowie im Rahmen der Eigenüberwachung durch den Unternehmer auf der Baustelle sind die rasch verfügbaren Messergebnisse genügend genau.
- Das Leichte Fallgewichtsgesät kann auch unter schwierigen Bedingungen eingesetzt werden, insbesondere an Orten, wo das für den Plattendruckversuch erforderliche Gegengewicht nur mit grossem Aufwand bereitgestellt werden kann oder wenn die Platzverhältnisse für das korrekte Aufstellen des Stativs ungenügend sind.
- Für den Einsatz des Leichten Fallgewichtsgesätes für Kontrollprüfungen auf kleineren Baustellen können Anforderungswerte für den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  in der SN 640 585 [5] aufgenommen werden.

## Résumé

Le déflectomètre léger sert à effectuer des contrôles ponctuels de la capacité portante de couches non liées tout comme dans le cas de l'essai de plaque classique. L'appareil léger est d'un emploi facile et il permet une évaluation rapide de la portance d'une couche non liée ou de la couche de forme avec présentation immédiate des résultats. Cet appareil se prête donc pour un contrôle à tapis du compactage où pour le contrôle interne de la part de l'entreprise. Le poids réduit de l'appareil, sa facilité d'emploi et son indépendance d'un contrepoids en permettent une utilisation aussi dans des endroits difficilement accessibles. Les différentes possibilités d'utilisation, une application peu coûteuse et la disponibilité directe des résultats en font un appareil très approprié pour la pratique journalière des chantiers.

Des mesures comparatives entre trois laboratoires ont été conduites pour vérifier la comparabilité des deux appareils utilisés dans le cadre de ce projet de recherche. L'exploitation des résultats a confirmé de façon très claire la comparabilité des appareils utilisés par ViaTec AG et le laboratoire cantonal d'Uri.

Dans le cadre de ce projet de recherche ont été analysés les résultats obtenus pour 290 mesures sur couches de fondation entre 1996 et 2007. Les résultats de 49 sites de mesure n'ont pas été considérés pour différentes raisons. L'exploitation des résultats a donc porté sur l'analyse de 241 cas de mesure. La recherche a été limitée aux mesures sur couches de fondation non liées, le cas d'application le plus fréquent pour l'essai de plaque. Le choix de la disposition des points de mesure à été faite dans le souci d'obtenir une bonne comparabilité des résultats. Comme il était prévisible, il n'a pas été possible de trouver des corrélations valables entre  $M_{E2}$  et  $E_{vd}$ , ce qui a porté à l'abandon d'ultérieures recherches dans cette direction.

L'exploitation des résultats des mesures indique trois possibilités d'évaluation dans le cadre de l'emploi pratique de l'appareil léger à masse tombante:

- sur la base d'une équation de régression  $M_{E1} = 1,75 \cdot E_{vd} - 20,0$  [MN/m<sup>2</sup>]
- sur la base de la relation  $M_{E1} = k \cdot E_{vd} = 1,25 \cdot E_{vd}$  [MN/m<sup>2</sup>]
- avec les exigences  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$  (pour T1)  
 $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$  (pour T2...T6)

Dans les deux premiers cas il est nécessaire de prouver sur chaque chantier la correspondance des valeurs  $M_{E1}$  calculées avec les résultats de l'essai de plaque et d'adapter éventuellement la formule de calcul choisie. Les valeurs d'exigences proposées assurent un respect des exigences pour  $M_{E1}$  dans au moins le 90% des cas.

Les grandes inhomogénéités de composition, grain maximum, teneur en eau et degré de compactage des couches de fondation contrôlées seront à considérer lors de l'interprétation des résultats de mesure. Dans ces conditions, les corrélations trouvées peuvent donc être considérées bonnes.

Pour permettre une application uniforme du déflectomètre léger en Suisse il faut prévoir l'introduction de valeurs d'exigences pour le module de déformation  $E_{vd}$  dans la norme SN 640 585 [5] et la création d'une norme suisse pour l'application de cet appareil.

Le déflectomètre léger complète de façon idéale l'essai de plaque pour la détermination de la portance des couches de fondation non liées:

- À différence de l'application onéreuse en temps et matériel de l'essai de plaque traditionnel, le déflectomètre léger permet l'exécution d'un très grand nombre de mesures avec un appareil portable et opérable par une seule personne à un coût très contenu.

La fiabilité de l'appréciation de l'homogénéité du compactage obtenu peut ainsi être augmentée de façon considérable.

- La procédure proposée avec la détermination d'une valeur moyenne à partir de cinq résultats individuels par point de mesure permet d'évaluer une surface d'environ 2 m<sup>2</sup>.
- L'utilisation du déflectomètre léger en alternative ou en complément de l'essai de plaque pour une densification des points de mesure et pour les contrôles internes de l'entreprise fournit rapidement des résultats suffisamment précis.
- Le déflectomètre léger est utilisable dans des conditions difficiles, en particulier à tous les endroits critiques pour la mise à disposition d'un contrepoids pour l'essai de plaque et dans des situations où l'espace disponible ne permet pas un placement correct du bâti de référence.
- Pour l'emploi de le déflectomètre léger sur des petits chantiers il est possible d'introduire des valeurs d'exigences pour le module de déformation  $E_{vd}$  dans la norme SN 640 585 [5].

## Summary

The light weight deflectometer allows the determination of the bearing capacity of untreated layers at single points similarly to the plate loading test. The ease of use of the device allows the control of the bearing capacity of sub-base layers or of the formation level in very time. The results of the measurement are immediately available. Therefore, the device is particularly suitable as an alternative for compaction controls with intense coverage or for the internal testing by the contractor. The light falling weight tester can be used in all places with difficulty of access, as it is light, can be operated by a single person and does not need a counter-weight as for the plate loading test. Different possibilities of application, low cost characteristics and the direct availability of results make this device particularly suitable for everyday construction site controls.

Comparative measurements between three laboratories have been conducted in order to verify the comparability of the two devices used for the research project. The analysis of the results of these measurements has clearly demonstrated the comparability of the devices used by ViaTec AG and by the laboratory of the Construction Department of the Canton Uri.

A total of 290 sets of measurement data on sub-base layers from the years 1966 until 2007 have been available for the research project. Of these data, the results of 49 measurement sites have been discarded for various reasons, leaving a total of 241 data sets for the analysis. The research project was limited to the testing of unbound sub-base layers, which represents the most common application of the plate loading test. The layout of the measurement points was chosen in order to obtain a good comparability of results. As anticipated, a useful relationship between  $M_{E2}$  and  $E_{vd}$  could not be found. Therefore, further investigations on the relationship to  $M_{E2}$  were abandoned.

The analysis of the measurement results shows different possibilities of evaluation within the practical application of the light weight deflectometer:

- based upon the regression equation  $M_{E1} = 1,75 \cdot E_{vd} - 20,0$  [MN/m<sup>2</sup>]
- with the relationship  $M_{E1} = k \cdot E_{vd} = 1,25 \cdot E_{vd}$  [MN/m<sup>2</sup>]
- with the requirement values  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$  (for T1)  
 $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$  (for T2...T6)

$M_{E1}$ -values obtained through calculation must be verified against the values obtained by the plate loading test for the first two cases for each construction site. If necessary, the chosen formula must be adapted. When applying the proposed requirement values there is a certainty that the corresponding requirements for the  $M_{E1}$ -values will be fulfilled in 90% of the cases.

The interpretation of the measurement results will have to consider in each and every case the possible great inhomogeneity of the tested sub-bases with respect to composition, maximum grain size, water content and degree of compaction. The correlations found in the study can be considered as good under these circumstances.

For the unified use of the light weight deflectometer in Switzerland it will be necessary to introduce requirement values for the dynamic deformation modulus  $E_{vd}$  in the standard specification SN 640 585 [5] and to create a Swiss specification for the application conditions of the device.

The light weight deflectometer is an ideal complement to the plate loading test for the determination of the bearing capacity of unbound sub-base layers:

- As opposite to the costly and time consuming plate loading test, the light weight deflectometer allows to carry out a large number of measurements with an easily transportable apparatus which can be operated by a single person alone at low cost. This also contributes to increase the meaningfulness of the statement about the homogeneity of the achieved compaction and the bearing capacity.
- The proposed procedure of determining the mean value of five different individual measurements allows assessing the bearing capacity of a surface of about 2 m<sup>2</sup>.
- The results obtained in very timely manner are sufficiently precise for the use of the light weight deflectometer as an alternate or complementary solution for compaction controls with intense coverage or for the internal testing by the contractor.
- The light weight deflectometer can also be used under difficult circumstances, in particular in places where a counter-weight needed for plate loading tests can only be provided with great effort or where the space conditions are inadequate for a correct placement of the reference beams.
- Requirement values for the dynamic deformation modulus  $E_{vd}$  can be introduced in the standard specification SN 640 585 [5] for the use of the light weight deflectometer for quality control on smaller construction sites.

# 1 Einleitung

Mit der 1998 erfolgten Revision der Norm SN 670 317b «Böden; Plattendruckversuch EV und ME» [7] wurden bestimmte Unzulänglichkeiten der früheren Versuchsdurchführung eliminiert, gleichzeitig wurde aber der zeitliche Aufwand für die Durchführung der Prüfung, und damit auch deren Kosten, wesentlich erhöht. Zudem bedingt die systematische Überprüfung der Tragfähigkeit ungebundener Fundationsschichten als Teil des heute üblichen Qualitätsmanagements einen entsprechenden Prüfaufwand.

Zusammen bewirken diese beiden Faktoren erheblich höhere Kosten für die Kontrollprüfungen. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wird eine Möglichkeit untersucht, um eine wesentliche Reduktion der Prüfkosten ohne Abstriche an der Qualität der Kontrolltätigkeit zu erreichen. Es soll untersucht werden, ob mit dem Leichten Fallgewichtsgesät LFG, das eine offensichtliche Reduktion des zeitlichen und kostenmässigen Aufwandes bringt, auch bezüglich der Messergebnisse die Anforderungen der Praxis erfüllt werden können.

Das Leichte Fallgewichtsgesät, wie es von einigen Herstellern in Deutschland und Dänemark mit zum Teil geringfügigen Konstruktions- oder Zubehörvarianten angeboten wird, erlaubt eine rasche Versuchsdurchführung und benötigt kein Gegengewicht. Mit dem LFG kann auf Grossbaustellen die Messung eines dichten Netzes von Kontrollpunkten mit geringem Aufwand durchgeführt werden. Für Kleinbaustellen wie Grabenauffüllungen, Hinterfüllungen von Fundamenten, usw. stellt das Gesät eine ideale, auch bei beengten Platzverhältnissen einfach anzuwendende Prüfmöglichkeit dar.

Im Kanton Uri wird das Leichte Fallgewichtsgesät bereits seit 1996 eingesetzt. Die unterschiedlichen Arten der Baustellen und auch die oft langen Anfahrtswege haben einen grossen Aufwand für die  $M_E$ -Messungen zur Folge. Das handliche LFG benötigt kein Gegengewicht (Lastwagen, Bagger, Kran) und lässt sich problemlos von einer Einsatzstelle zur nächsten transportieren. Dadurch reduzieren sich sowohl die Personal- als auch die Inventarkosten. In der ersten Erprobungsphase wurden für jede Kontrollprüfung sowohl der  $M_E$ -Wert mit dem Plattendruckversuch nach SN 670 312b [6] als auch ein mittlerer Wert des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  mit dem LFG bestimmt. Der durch vergleichende Betrachtungen errechnete Umrechnungsfaktor wurde zur Interpretation der flächendeckend ausgeführten  $E_{vd}$ -Messungen benützt.

## 2 Zielsetzungen

Ziel des Forschungsprojektes war aufzuzeigen, wie das im Baustelleneinsatz offensichtlich kostengünstigere Leichte Fallgewichtsgesetz LFG für die Überprüfung von Tragfähigkeit und Verdichtung ungebundener Fundationsschichten verwendet werden kann und insbesondere zu untersuchen,

- unter welchen Randbedingungen
- mit welcher Aussagekraft
- mit welchen Einschränkungen

das Leichte Fallgewichtsgesetz für die Eigenüberwachung des Unternehmers und die Kontrollprüfungen des Bauherrn den Plattendruckversuch nach SN 670 317b [7] ersetzen kann.

Als Grundlage dienten ausländische Forschungsberichte [1], [3], Prüfvorschriften [2], [5], [6], [7], [9], [10] und Bedienungsanleitungen.

Im Vordergrund stand die Untersuchung der Korrelation zwischen den mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz ermittelten  $E_{vd}$ -Werten und den mit dem Plattenversuch gemessenen  $M_E$ -Werten. Dabei wurden in der Regel für jede  $M_E$ -Messstelle sechs sternförmig um diese angeordnete Messungen mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz durchgeführt. Ergänzend zu den  $M_{E1}$ -Werten aufgrund der Erstbelastung wurden bei mehr als einem Drittel der Messstellen auch die  $M_{E2}$ -Werte nach Zweitbelastung ermittelt.

Von der Auswertung der Versuchsreihe erhoffte man sich Aussagen über die Verwendbarkeit der Korrelationsfaktoren für die praktische Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes. Die Ergebnisse des Plattendruckversuches als Referenzgrösse für die Beurteilung der Tragfähigkeit sollte aber nicht in Frage gestellt werden.

Die im Rahmen der Versuchsdurchführung gewonnenen Erfahrungen sollen als Anwendungshilfe für zukünftige Einsätze des LFG aufbereitet werden und die Grundlage für eine neue VSS-Norm bilden.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Entwicklung der dynamischen Bodenuntersuchungen

Bis Mitte des letzten Jahrhunderts wurde die Tragfähigkeit von Böden auf Grund der Bodenkennwerte abgeschätzt oder – da für dynamische Untersuchungen sowohl die Einrichtungen wie auch die theoretischen Grundlagen fehlten – aufgrund statischer Messungen abgeleitet. Um 1950 wurden erste Versuchsmethoden entwickelt, um den Einfluss dynamischer Einwirkungen auf die Tragfähigkeit der Böden zu simulieren. Bereits 1957 wurde in Japan von Asai ein Gerät entwickelt, um den Einfluss einer fallenden Last auf den Untergrund zu ermitteln [1].

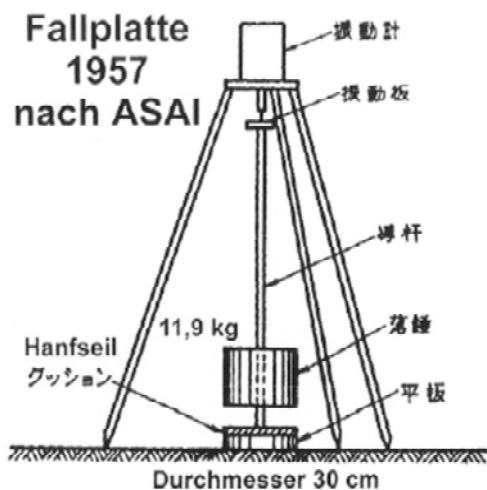


Abb. 3.1 Fallplatte nach Asai 1957

Ivanov baute 1961 ein Messgerät zur Bestimmung der Einsenkung einer Grundplatte von 250 mm Durchmesser, die über eine Spiralfeder von einer 19,6 kg schweren Fallmasse belastet wurde. Durch Variation der Fallhöhe (0,10...1,40 m) betrug die rechnerische Kraft 7...25 kN). Die dabei auftretende Belastungszeit von 12 ms sollte dem Einfluss eines mit 80 km/h rollenden Rades entsprechen. Die Setzung der Lastplatte wurde durch einen von Ivanov entwickelten Vibrographen aufgezeichnet [1].

Während des Vietnamkrieges setzten die Amerikanischen Streitkräfte mit Beschleunigungsaufnehmern ausgerüstete Geschosse ein, um die Befahrbarkeit eines Bodens schnell beurteilen zu können. Die Geschosse wurden mit Flugzeugen oder Helikoptern ins Untersuchungsgebiet gebracht und die bei der Explosion auftretende Beschleunigung wurde gemessen und ausgewertet. Der Einsatz war mit hohen Kosten für den Transport verbunden und die Messgeräte waren nach dem Versuch verloren, so dass dieses Verfahren für eine zivile Anwendung zu teuer war [1].

In den 1960er Jahren wurde in der ehemaligen DDR mit einem einfachen dynamischen Versuch experimentiert. Eine Masse bekannter Größe wurde durch einen Hammer angeschlagen und die dadurch erzeugte Erschütterung des Bodens durch einen auf den Stahlplatten angeordneten Sensor erfasst. Die beobachteten Schwingungsamplituden waren jedoch zu schwach, um hinreichend genaue Angaben über die Tragfähigkeit des Bodens machen zu können. Zudem war die Versuchsanordnung ein Mehrmassenschwingungssystem, was zu enormen mathematischen Schwierigkeiten führte [1].

Ebenfalls in den 60er Jahren wurde der "Darmstädter Hammer", ein mit einem Sensor versehener Hammer entwickelt, um die Steifigkeit der Böden abzuschätzen. Bei dieser Methode wurde das Versuchsergebnis jedoch wesentlich von der durch den Anwender gewählten Versuchsanordnung beeinflusst, was einen Vergleich zwischen Messergebnissen unterschiedlicher Anwender praktisch unmöglich machte [1].

Weitere Ideen wurden in den 60er Jahren ebenfalls entwickelt. So wurden auf Strassen Deformationsmessungen mit induktiven Weggebern durchgeführt, um die Auswirkungen vorbeifahrender Fahrzeuge zu ermitteln.

Der nun folgenden Entwicklung von Fallgewichtsgeräten lag die Überlegung zu Grunde, die Belastung eines fahrenden Lastwagens zu simulieren. Bei einer angenommenen Aufstandsfläche mit 25 cm Durchmesser entspricht die Belastungsdauer bei Geschwindigkeiten von 60 km/h bis 100 km/h auf der Fahrbahnoberfläche etwa 9 ms bis 15 ms, auf der Foundationsschicht bzw. auf dem Planum 25 ms bis 60 ms. Gleichzeitig wurde eine maximale Belastung von 50 kN angestrebt. Prüftechnische Probleme führten dazu, die Spiralfeder durch eine Kombination von Feder- und Dämpferelementen zu ersetzen (Brettoniere, Dossi und Martin [1]).

An der Technischen Hochschule in Kopenhagen wurde daraufhin ein Fallgerät entwickelt. Die Fallmasse von 150 kg wurde aus einer Höhe von 40 cm an einem Führungsrohr auf ein Feder-Dämpfer-System fallen gelassen. Die Stossdauer betrug 26 ms, die Maximalkraft 49,6 kN. Die mit einem Vibrographen gemessenen Einsenkungen wurden zur Berechnung eines Oberflächenmoduls verwendet.

Seit 1968 wurden an der technischen Hochschule in Stockholm (KTH) verschiedene Studien mit einem leichten Fallgewichtsgerät auf unterschiedlichen Böden durchgeführt. In der Studie von Orrje [3] wurden Fallmassen von 5,35, 7,36 und 12,71 kg bei Fallhöhen von 5, 10 und 15 cm untersucht. Die Fallmassen waren an der Unterseite mit einer 4 mm dicken Gummischicht versehen. Die mit Beschleunigungs- und Kraftmessern ausgestattete Lastplatte erlaubte die Bestimmung der Senkungsmulde sowie der Spannungen im Boden und somit die Berechnung des Elastizitätsmoduls. Der kleine Durchmesser der Lastplatte (4,2 cm für in-situ-Messungen, 4,2 cm, 10 cm und 15 cm für Laborprüfungen) führten jedoch zu erheblichen Streuungen der Messergebnisse. Um eine genügende Reproduzierbarkeit zu erreichen, mussten hohe Anforderungen an die Versuchsdurchführung und an die Handhabung des Gerätes gestellt werden. Ein Vergleich der dynamischen Messergebnissen mit statisch ermittelten Werten zeigte keine eindeutige Beziehung.

1972 schlug Weingart zur Bestimmung der Steifigkeit ungebundener Böden als Alternative zum Proctor-Versuch ein Gerät vor, das mit einer relativ kleinen Fallmasse sowie einer Messsonde ausgerüstet war. Bei diesem Versuch wurde ein Gewicht von 600 g aus einer Höhe von 30 cm entlang einer Führungsstange auf einen Amboss mit einer Masse von 1200 g fallengelassen. Durch den Amboss wurde eine Proctor-Nadel in den Untergrund eingedrückt. Als Mass für die Bewertung der Bodeneigenschaften wurde die Anzahl Schläge verwendet, die für ein Eindringen der Proctor-Nadel um 75 mm erforderlich war [1].

1976 stellte Clegg den Impact Tester vor, ein tragbares Gerät zur dynamischen Bestimmung der Tragfähigkeit von Böden. Dabei wurde eine Fallmasse von 4,5 kg an einem Führungsrohr aus einer Höhe von 45 cm ohne Dämpfung auf den Boden fallen gelassen. Anhand der Verzögerung der Fallmasse wurden Tragfähigkeit und Verdichtung beurteilt. Die so ermittelten Werte korrelierten gut mit den CBR-Werten [1].

Dem Leichten Fallgewichtsgerät vom Prinzip her ähnlich ist das Fallgewichts-Deflektometer FWD (Falling Weight Deflectometer) das ausgehend vor allem von Skandinavien inzwischen weltweit im Einsatz steht. Dieses Gerät mit einer Fallmasse von 50 bis 350 kg bewirkt durch Variation der Fallhöhe eine Kraft von 12 bis 50 kN auf die Lastplatte mit einem Durchmesser von 300 bzw. 450 mm. Mit Federn oberhalb der Lastplatte wurden die Stosszeiten an die Belastungen durch den rollenden Verkehr angepasst.

Die dänische Dynatest-Gruppe baut zusätzlich zum FWD auch ein HWD (Havy Weight Deflectometer) für schwer beanspruchte Böden z.B. auf Flugplätzen. Mit diesem Gerät (siehe Abb. 3.2) wird die Einsenkmulde unter einer kontrollierten Belastung von 30 bis 240 kN bestimmt und daraus die Eigenschaften des geprüften Bodens berechnet. Mit dem HWD kann eine Person bis zu 60 Messungen pro Stunde durchführen.



Abb. 3.2 Falling Weight Deflectometer (Dynatest)

In Frankreich entwickelte das Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC (heute: IFSTTAR: Institut Français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) ein dynamisches System, um die Verformbarkeit der Böden zu messen, ihre Homogenität zu bestimmen und die Tragfähigkeit sowie das Ermüdungsverhalten für verschiedene Nutzungen wie Parkplätze, Baustellenzufahrten oder landwirtschaftliche Wege abzuschätzen. Das als "Dynaplaque" bezeichnete Gerät erzeugt Impulse, die dynamisch auf den Boden einwirken. Die Einwirkung ist bezüglich Intensität und Dauer jener ähnlich, die durch den Übergang einer Achslast von 13 t mit 60 km/h erzeugt wird. Mit der Fallmasse von 120 kg und einer Fallhöhe von 0,5 m wird auf den auf einer Lastplatte aufgesetzten Feder-Stossdämpfer eine Höchstkraft von 100 kN erzeugt. Die Einsenkung des Bodens und die Wirkungskraft werden durch in die Lastplatte integrierte Empfänger gemessen. Die Kombination dieser beiden Parameter erlaubt, den dynamischen Verformungsmodul des Bodens direkt zu berechnen. Durch Aufbringen einer grossen Zahl von Belastungen auf einem einzelnen Messpunkt kann auch das Ermüdungsverhalten des geprüften Bodens abgeschätzt werden. Zudem kann der Prüfbereich auch auf Böden mit erhöhter Steifigkeit ausgedehnt werden. Das Dynaplaque-Gerät kann durch eine Person bedient werden und erlaubt pro Stunde die Durchführung von 20 bis 30 Versuchen mit je drei Impulsen. Im Gegensatz zu anderen Einrichtungen entfällt bei der Dynaplaque die Kalibrierung der Federn sowie der gesamten Prüfeinrichtung [1], [12].

### 3.2 Entwicklungen in Deutschland

Das Zentrallaboratorium des Strassenwesens der DDR entwickelte 1977 eine Kleinschlagsonde mit Aufzeichnung der Messergebnisse zur raschen Bestimmung viskoelastischer Eigenschaften von Baustoffen. Durch austauschbare Elemente (Fallgewicht, Feder, Sondierstempel) konnte das Gerät den Baustoffen angepasst werden. Dieses Gerät wurde 1979 durch die Anordnung von Federelementen so verbessert, dass die Belastungsgeschwindigkeit jener durch fahrende Fahrzeuge angepasst werden konnte. Die registrierende Kleinschlagsonde wurde zur raschen Prüfung von Strassenbefestigungen mit Asphalt, von kalk- oder zementgebundenen Schichten, sowie bei Erdbaumassnahmen verwendet [1].

Bereits 1978 wurde ebenfalls in der DDR ein Leichtes Fallgewichtsgerät in der TGL 11 461/10 standardisiert. Massgeblich an der Entwicklung war Weingart beteiligt [1].

Gestützt auf die Entwicklungen im Ausland, insbesondere aber in der DDR wurde in der Bundesrepublik Deutschland Mitte der 80er Jahre ein Gerät für die Durchführung dynamischer Lastplattenversuche von der Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST) in Köln entwickelt.

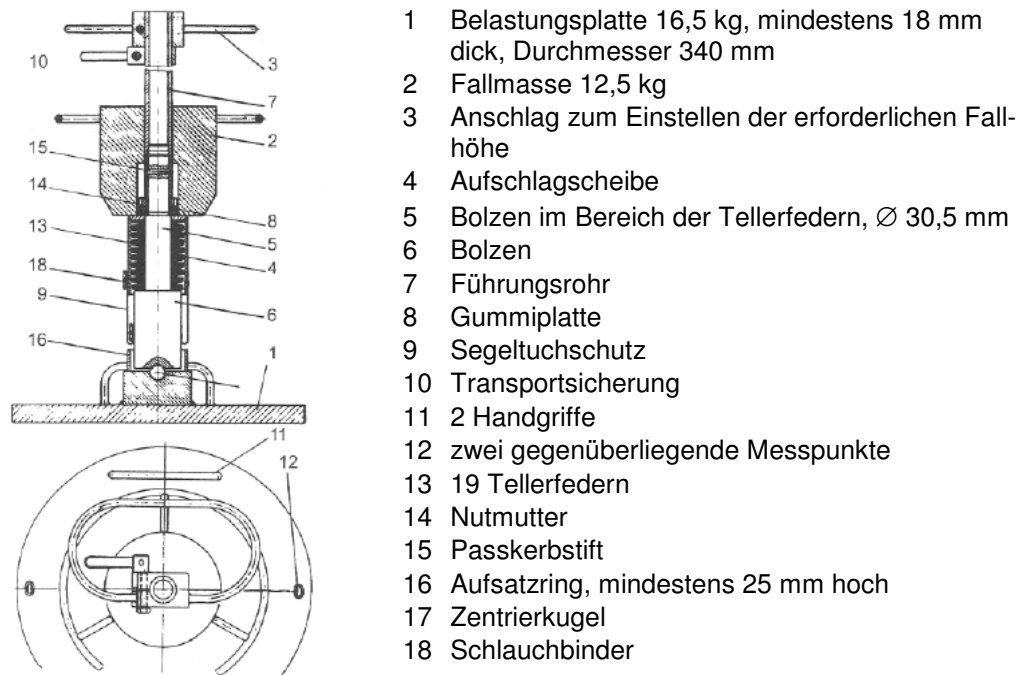


Abb. 3.3 Leichtes Fallgewichtsgerät nach TGL 11 461/10 (DDR)

In den zehn Jahren von 1980 bis zur Wiedervereinigung wurden in der DDR etwa 400 Leichte Fallgewichtsgeräte nach TGL 11 461/10 mit Tellerfedern hergestellt. Sie wurden vor allem durch Prüfstellen, Strassenbauverwaltungen, die Deutsche Reichsbahn und Energieversorgungsbetriebe angewendet. Das Verfahren bewährte sich für Böden mit einem Grösstkorn von 63 mm und dynamische Verformungsmoduli von  $10 \text{ MN/m}^2$  bis  $125 \text{ MN/m}^2$ . Die Erfahrungen zeigten bald, dass das Prüfgerät vor allem auch für die Eigenüberwachung eingesetzt werden kann, da mit dem LFG eine grosse Zahl von Versuchen durchgeführt werden kann und Schwachstellen der untersuchten Schicht aufgefunden werden können.

Es lag also auf der Hand, dass auch im vereinigten Deutschland das Leichte Fallgewichtsgerät zunehmend an Bedeutung gewann. Als erstes wurde das LFG 1994 in den ZTVE-StB 94/97 «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau» [10] als indirektes Verfahren für die Bestimmung des Verdichtungszustandes zugelassen. 1997 wurde die DR-A 2015 der Deutschen Reichsbahn (DDR) durch die NGT 39: «Richtlinie für die Anwendung des Leichtes Fallgewichtsgerätes im Eisenbahnbau» der Deutschen Bahn DB [2] ersetzt. Zudem wurde die erste Fassung der «Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Strassenbau, Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgerät», TP BF-StB, Teil B 8.3: FGSV veröffentlicht, die 2003 und 2012 in einer überarbeiteten Fassung [8] herausgegeben wurde.

Das Leichte Fallgewichtsgerät wird in unseren deutschsprachigen Nachbarländern Deutschland und Österreich schon länger eingesetzt, da die Vorteile dieses Messverfahrens frühzeitig erkannt wurden. Dabei stellt sich – wie auch bei der vorliegenden Forschungsarbeit – die Frage der Abhängigkeiten zwischen Messungen mit dem LFG und dem Plattendruckversuch.

In Österreich haben Brandl, Adam, Kopf und Niederbrucker 2003 unter dem Titel «Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichtem Fallgewichtsgerät – Grundlageforschung und praktische Anwendung» eine umfassende Arbeit veröffentlicht [1]. Im Jahr 2008 wurde durch die Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse - Schiene - Verkehr (FSV) RVS 08.03.04 «Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches» [4] herausgegeben.

In Deutschland wird das Leichte Fallgewichtsgesetz als Prüfmittel recht häufig eingesetzt. Für die Anwendung des LFG wurden auch verschiedene Regelungen geschaffen:

- NGT 39: «Richtlinie für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes im Eisenbahnbau», Deutsche Bahn DB, 1997 [2]
- TP BF-StB, Teil B 8.3: «Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Strassenbau, Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetz», FGSV Köln, 2012 [7]
- ZTVA-StB 89: «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen», FGSV Köln 1989 [9]:
- ZTV E-StB 09: «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau», FGSV Köln 2009 [10]

Der Anwendungsbereich des Leichten Fallgewichtsgesetzes ist in den verschiedenen Regelwerken unterschiedlich geregelt (Abb. 3.4).

Abb. 3.4 Anwendungsbereich des LFG gemäss den deutschen Regelwerken

Regelwerk	$E_{vd}$	Bemerkungen
NGT 39	10...125 MN/m <sup>2</sup>	max. 30% Brechkorn, max. 15% Kornanteil $d < 63$ mm
TP BF-StB, Teil B 8.3	15...70 MN/m <sup>2</sup>	grob- und gemischtkörnige Böden mit $d_{max} = 63$ mm
ZTV E-StB 09	-	Prüfumfang ist gegenüber demjenigen bei direkten Prüfverfahren zu verdoppeln
ZTVA-StB 89	10...125 MN/m <sup>2</sup>	max. 15% Kornanteil $d < 63$ mm, Rückgriff auf regional vorliegende Korrelationswerte

Die in der TP BF-StB, Teil B 8.3 [8] aufgeführte obere Grenze für  $E_{vd}$  von 70 MN/m<sup>2</sup> wird damit begründet, dass das LFG für  $E_{vd}$ -Werte  $> 70$  MN/m<sup>2</sup> nicht genügend genau kalibriert werden kann. Demgegenüber wird in der Bedienungsanleitung für das Leichte Fallgewichtsgesetz [11] ein Messbereich für den dynamischen Verformungsmodul von  $E_{vd} \leq 125$  MN/m<sup>2</sup> angegeben.

Die Abhängigkeiten zwischen  $E_{vd}$  und  $E_{v1}$  bzw.  $E_{v2}$  – also zwischen dynamischen und statischen Verformungsmoduli – waren immer wieder Gegenstand von Untersuchungen. Die gefundenen Beziehungen konnten aber nie vollständig befriedigen. Das erstaunt angesichts der Tatsache nicht, dass sowohl bezüglich maximaler Spannung unter der Lastplatte als auch bezüglich Belastungsdauer die Einwirkungen auf den Boden bei der statischen gegenüber der dynamischen Lastplatte gänzlich verschieden sind.

In der NGT 39 [2] sind Anforderungen an die Tragfähigkeit des Erdplanums (CH: *Planum*) bzw. dem Planum (CH: *Planie*) sowie für kalkstabilisierte Tragschichten aufgeführt (siehe Abb. 6.12, Kap. 6.2).

### 3.3 Erfahrungen im Kanton Uri

Im Kanton Uri wurde das Leichte Fallgewichtsgesetz bereits seit 1996 vom Labor des Tiefbauamtes eingesetzt. In der ersten Erprobungsphase wurden für jede Kontrollprüfung sowohl der  $M_E$ -Wert mit dem Plattendruckversuch nach SN 670 317a als auch ein mittlerer  $E_{vd}$ -Wert mit dem LFG bestimmt. Die Resultate der Messungen sind in Abb. 3.5 dargestellt. Der durch vergleichende Betrachtungen bestimmte Umrechnungsfaktor  $k = M_{E1} / E_{vd}$  von 1,3 bis über 2,0 wurde zur Interpretation der flächendeckend ausgeführten  $E_{vd}$ -Messungen benützt.

In den ersten beiden Jahren wurden die Messungen auf Schichten ausgeführt, die mit Ausbruchmaterial aus dem Gotthard-Basistunnel hergestellt wurden. Die Schicht bestand also aus reinem Brechkorn, was nach NGT 39 [2] grundsätzlich nicht zulässig ist.

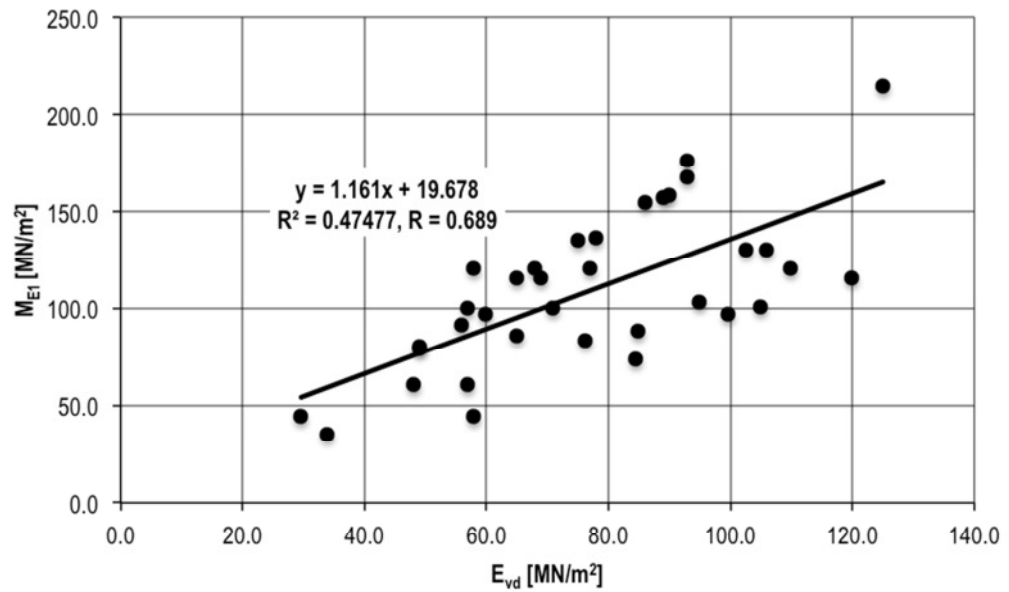


Abb. 3.5 Vergleich  $M_{E1}$  -  $E_{vd}$  der Messungen im Kanton Uri in den Jahren 1996-1997

Vorerst wurden nur die Mittelwerte der einzelnen Belastungsstösse dokumentiert. Seit Ende April 1998 liegen auch die Ergebnisse der einzelnen Belastungsstösse vor. Ab Oktober 2001 bis Ende 2004 wurden ausserdem in der Regel auch die  $M_{E2}$ -Werte bestimmt.

## 4 Plattendruckversuch

### 4.1 Anwendungsbereich

Der Plattendruckversuch mit dem VSS-Gerät [6] wird im Erd- und Grundbau angewendet. Er dient zur Kontrolle der Verdichtung von Böden sowie zur Ermittlung von Grundlagen zur Bemessung bezüglich Tragfähigkeit von Strassen, Bahnen, Flugplätzen und weiteren Bauwerken [6].

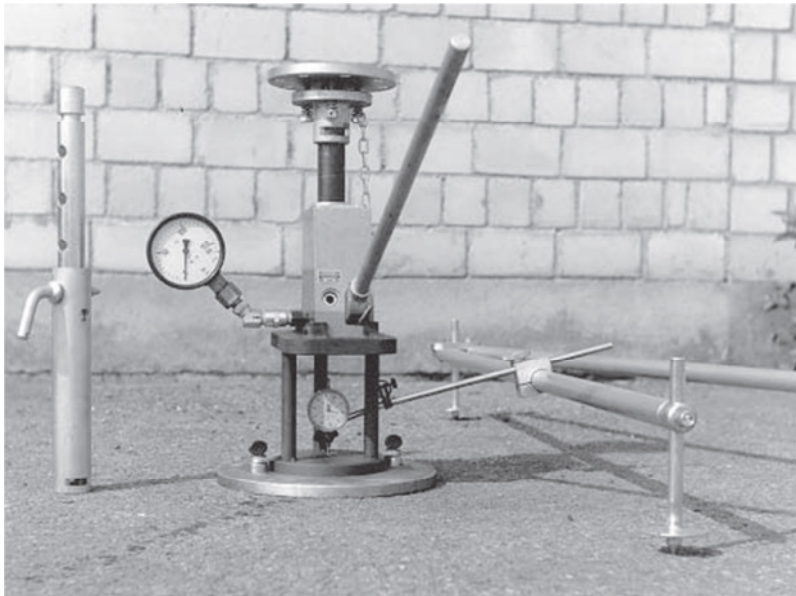


Abb. 4.6 VSS Gerät für den Plattendruckversuch [5]

In der Praxis wird der Plattendruckversuch vor allem für die Bestimmung der  $M_E$ -Werte eingesetzt

- auf dem Planum des Untergrundes oder Unterbaus zur Festlegung der Tragfähigkeitsklassen für die Dimensionierung,
- auf der Planie ungebundener Fundationsschichten zur Bewertung der erreichten Verdichtung und insbesondere der Tragfähigkeit.

Die auf ungebundenen Fundationsschichten zu erreichenden Anforderungen sind in der Norm [5] aufgeführt.

### 4.2 Messprinzip

Beim Plattendruckversuch werden die Setzungen einer kreisförmigen Platte mit einem Durchmesser von 298,5 mm und einer Fläche von 700 cm<sup>2</sup> gemessen. Die stufenweise Be- und Entlastung erfolgt mit Hilfe einer Druckvorrichtung und wird wiederholt. Die mittleren Normalspannungen unter der Platte und die zugehörigen Setzungen der einzelnen Laststufen werden in einem Drucksetzungsdiagramm dargestellt (Abb. 4.7). Anhand der ermittelten Drucksetzungslinien wird die Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Bodens beurteilt.

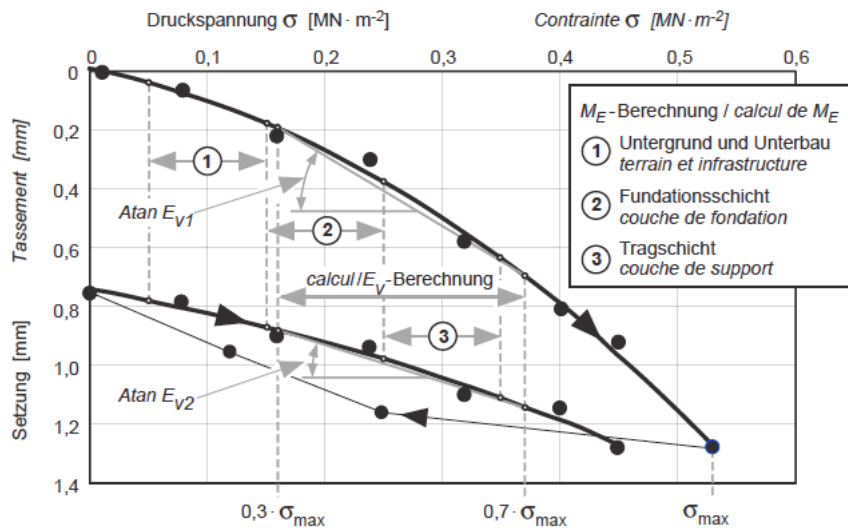


Abb. 4.7 Drucksetzungskurve [6]

Die Verformungsmoduli  $E_{V1}$  und  $M_{E1}$  sowie  $E_V$  und  $M_{E2}$  sind Kenngrößen für die Verformbarkeit des Bodens. Die Werte von  $E_V$  und  $M_E$  werden anhand der Drucksetzungskurve der Erst- und Wiederbelastung aus der Neigung der Sekanten zwischen normierten Spannungen wie folgt berechnet:

$$E_V = 0,75 \cdot \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta s_i} \cdot D \quad [\text{MN/m}^2] \quad (1)$$

$$M_E = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta s_i} \cdot D \quad [\text{MN/m}^2] \quad (2)$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_i$  Differenz der von der Platte auf den Boden übertragenen Normalspannung zwischen den zwei Laststufen  $[\text{MN/m}^2]$

$D$  Plattendurchmesser (298,5 mm)

$\Delta s_i$  Differenz der Setzungen der Platte bei Änderung der Normalspannung um  $\Delta\sigma_i$  [mm]

Für die Bestimmung der  $M_E$ -Werte werden definierte Beanspruchungsstufen betrachtet

- Planum Druckspannung  $\sigma = 0,05 \dots 0,15 \text{ MN/m}^2$
- Planie auf ungebundener Fundationsschicht Druckspannung  $\sigma = 0,15 \dots 0,25 \text{ MN/m}^2$
- auf Tragschichten Druckspannung  $\sigma = 0,25 \dots 0,35 \text{ MN/m}^2$

Für die Bestimmung des  $E_V$ -wertes wird die Neigung der Sekante der Drucksetzungskurve zwischen den Punkten  $0,3 \cdot s_{\text{max}}$  und  $0,7 \cdot s_{\text{max}}$  herangezogen.

Nach [7] dient die Verhältniszahl  $f_E$  der  $M_E$ -Werte der Wieder- und Erstbelastung des Plattendruckversuchs zur zusätzlichen Beurteilung des Verdichtungsstands:

$$f_E = \frac{M_{E2}}{M_{E1}} \quad [-] \quad (3)$$

Anforderungen an  $f_E$  sind ebenfalls in der SN 640 585b [5] festgelegt.

## 5 Leichtes Fallgewichtsgerät (LFG)

### 5.1 Messprinzip

Der dynamische Plattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät ist ein Prüfverfahren, bei dem der Boden über eine kreisförmige, als starr angenommene Lastplatte mit dem Radius  $r$  durch ein Fallgewicht stossartig mit der maximalen Kraft  $F_{\max}$  belastet wird [7]. Diese wird bei der Kalibrierung so eingerichtet, dass die Normalspannung  $\sigma_{\max}$  unter der Lastplatte beim Versuch  $0,1 \text{ MN/m}^2$  beträgt. Die Wirktiefe bei der Prüfung mit dem Leichten Fallgewichtsgerät entspricht etwa dem Plattendurchmesser.

Der dynamische Verformungsmodul  $E_{\text{vd}}$  ist eine Kenngrösse für die Verformbarkeit des Bodens unter einer definierten, vertikalen Stossbelastung mit der Stossdauer  $t_{\max}$  (Abb. 5.8). Sein Wert wird anhand der maximalen Setzung  $s_{\max}$  der Lastplatte mit folgender Gleichung berechnet:

$$E_{\text{vd}} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{\max}}{s_{\max}} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (4)$$

Dabei ist

$s_{\max}$  Mittelwert der Setzungen  $s_{4\max}$ ,  $s_{5\max}$ ,  $s_{6\max}$  aus 3 Messstössen (nach 3 Vorbelastungsstössen)

$r$  Radius der Lastplatte

$\sigma_{\max}$  Normalspannung unter der Lastplatte ( $0,1 \text{ MN/m}^2$ )

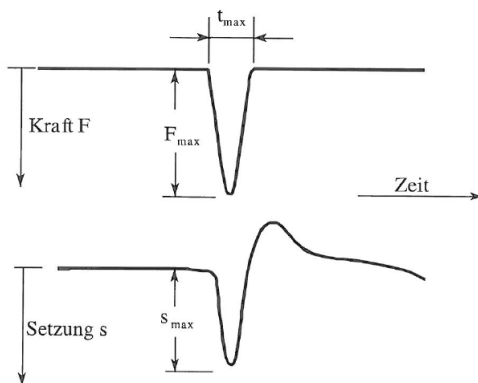


Abb. 5.8 Prinzipskizze zum zeitlichen Verlauf der Kraft und Setzung bei Stossbelastung mit dem Leichten Fallgewichtsgerät [7]

### 5.2 Messeinrichtung

Für die Durchführung dynamischer Plattendruckversuche wird ein Leichtes Fallgewichtsgerät LFG gemäss TP BF-StB, Teil B 8.3 [8] eingesetzt. Die wesentlichen Teile gehen aus der Prinzipskizze des LFG in Abb. 5.9 hervor.

Die Lastplatte hat einen Durchmesser von  $300 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  sowie eine Dicke von  $20 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . Die Masse der Lastplatte beträgt einschliesslich der zwei Traggriffe, dem Gehäuse mit Sensor und allen auf der Lastplatte befestigten Teilen der Setzungsmessvorrichtung  $15 \text{ kg} \pm 0,25 \text{ kg}$ .

Die Belastungsvorrichtung besteht aus Fallgewicht, Federelement, Führungsstange und Ausklinkvorrichtung am oberen Anschlag der Führungsstange. Als Federelement dient ein vorgespanntes Tellerfederpaket. Zur Gesamtmasse der Führungsstange gehören die Massen des Federelementes, der Kippschutzvorrichtung und der Ausklinkvorrichtung.

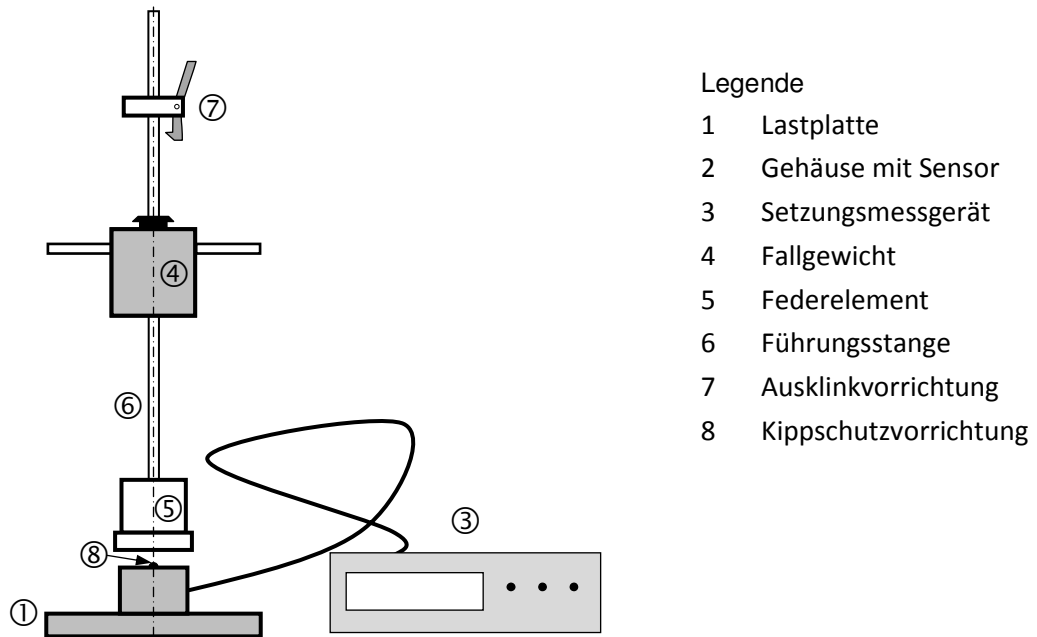


Abb. 5.9 Prinzipskizze des Leichtes Fallgewichtsgerätes [7]

Das Feder-Dämpfungselement bestand bei den ersten Geräten entweder aus einem Satz Tellerfedern aus Stahl oder einem Kunststoffelement ("Gummifeder"). Während Stahlfedern im Temperaturbereich für den praktischen Einsatz zwischen 0 °C und 40 °C gleichbleibende Eigenschaften aufweisen, verändern sich die Eigenschaften von Kunststoffelementen schon bei geringen Temperaturschwankungen. Die TP BF-StB, Teil B 8.3 [8] verlangt deshalb auch die Verwendung eines Pakets mit 17 Tellerfedern aus Stahl.



Abb. 5.10 Leichtes Fallgewichtsgerät: Lastplatte, Federelement, Fallgewicht, Setzungsmessgerät

Beim Gerät sind folgende Daten einzuhalten:

- |   |                    |
|---|--------------------|
| • Masse des Fallgewichtes                         | 10 kg ± 0,1 kg     |
| • Gesamtmasse der Führungsstange mit Federelement | 5 kg ± 0,1 kg      |
| • Maximale Stosskraft $F_{\max}$                  | 7,07 kN (Sollwert) |
| • Stossdauer $t_{\max}$                           | 17 ms ± 1,5 ms     |

Bei der Kalibrierung sind die Fallhöhe des Fallgewichtes sowie die Vorspannung des Federelementes so einzustellen, dass die maximale Stosskraft im Mittel 7,07 kN beträgt. Die Einhaltung der geforderten Stossdauer  $t_{\max}$  ist ebenfalls zu überprüfen.

### 5.3 Durchführung und Auswertung der Messung

Nach der Vorbereitung des Prüfpunktes und dem Auflegen der Lastplatte auf den Boden wird die Belastungsvorrichtung mittig auf die Lastplatte gestellt und Messvorrichtung bereit gemacht. Die Auflagefläche darf nicht stärker als 6 % geneigt sein.

Der Boden ist durch drei Stösse vorzubelasten. Dazu wird das Fallgewicht mit der Ausklinkvorrichtung ausgelöst und nach jedem Stoss mit der freien Hand aufgefangen (Abb. 5.11).

Anschliessend sind nach Einschalten des Setzungsmessgerätes drei Messstösse durchzuführen. Dabei wird das Fallgewicht wiederum mit der Ausklinkvorrichtung ausgelöst und nach jedem Stoss mit der freien Hand aufgefangen.

Der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ] wird nach Gleichung (5) berechnet. Unter Berücksichtigung der maximalen Normalspannung unter der Lastplatte  $\sigma_{\max} = 0,1 \text{ MN}/\text{m}^2$ , des Durchmessers der Lastplatte  $2 \cdot r = 300 \text{ mm}$  und des Mittelwertes der drei gemessenen Setzungen  $s_{\max}$  in mm wird

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{\max}}{s_{\max}} = 1,5 \cdot 0,15 \frac{0,1 \text{ MN}/\text{m}^2}{s_{\max}} = \frac{22,5}{s_{\max}} \quad [\text{MN}/\text{m}^2] \quad (5)$$



Auslösen des Fallgewichtes



Fallen des Fallgewichtes



Auffangen des Fallgewichtes

Abb. 5.11 Handhabung des Leichten Fallgewichtsgerätes

## 5.4 Anwendungsbereich

Der dynamische Plattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät eignet sich zur Überprüfung der Verdichtung und der Tragfähigkeit von Böden im Untergrund, bei Erdbaumassnahmen sowie im Verkehrswegbau. Das LFG kann insbesondere für Messungen unter erschwerten Bedingungen eingesetzt werden, z.B. wenn die Platzverhältnisse für die Einrichtungen des Plattendruckversuches nicht ausreichen oder wenn kein Gegengewicht zur Verfügung steht:

- Fundamentvertiefungen im Hoch- und Tiefbau
- Grabenauffüllungen
- Bauwerkshinterfüllungen
- usw.

Das Prüfverfahren eignet sich gemäss den Angaben in den deutschen Richtlinien insbesondere für nichtbindige und gemischtkörnige Böden mit einem Grösstkorn bis 63 mm. Das Leichte Fallgewichtsgerät kann gemäss den TP BF-StB, Teil B 8.3 [8] für den Bereich des dynamischen Verformungsmoduls zwischen 15 MN/m<sup>2</sup> und 70 MN/m<sup>2</sup> angewendet werden.  $E_{vd}$ -Werte über 70 MN/m<sup>2</sup> dürfen nicht ausgewertet werden, da das LFG in diesem Bereich nicht genügend genau kalibriert werden kann. Andererseits wird in der Bedienungsanleitung für das Leichte Fallgewichtsgerät [11] der Messbereich für den dynamischen Verformungsmodul von  $E_{vd} \leq 125 \text{ MN/m}^2$  angegeben.

In der Richtlinie NGT 39 der Deutschen Bahn [2] wird für das Leichte Fallgewichtsgerät als Messbereich eine Spanne von  $E_{vd} = 10 \dots 125 \text{ MN/m}^2$  genannt. Das LFG darf auf Böden mit rundem, kubischem, nicht gebrochenem Korn und ebenfalls auf Böden mit bis zu 30% gebrochenem Material gemessen werden. Die Böden dürfen einen Anteil von maximal 15% an Körnern > 63 mm aufweisen. In den ZTV der FGSV [9] und [10] wird das Leichte Fallgewichtsgerät für die Verdichtungskontrolle von Erdschüttungen und Grabenauffüllungen sowie auf dem Planum genannt.

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Anwendung auf ungebundenen Fundationsschichten, bei denen die  $E_{vd}$ -Werte in der Regel zwischen 60 und 100 MN/m<sup>2</sup> liegen. Damit überschreitet der angestrebte Anwendungsbereich zum Teil den in der TP BF-StB, Teil B 8.3 [8] festgelegten oberen Grenzwert, liegt aber noch innerhalb des Anwendungsbereiches nach der Richtlinie NGT 39 der Deutschen Bahn [2].

## 6 Anforderungen und Umrechnungsfaktoren

### 6.1 Allgemeines

Seit den ersten Anwendungen von Fallmassengeräten stand immer der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungsmethoden, insbesondere mit dem statischen Lastplattenversuch im Zentrum der Bemühungen. Bereits Orrje [3] stellte in der zweiten Hälfte der 60er Jahre die Ergebnisse der dynamischen Versuche denjenigen der statischen Vergleichsversuche gegenüber, konnte allerdings keine signifikante Beziehung feststellen.

Bei niedrigen Verformungsmoduli liegt der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  zwischen  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$ . Nimmt der Verdichtungsmodul zu, so nähert sich  $E_{vd}$  dem Wert  $E_{v2}$ . Bei gut verdichteten Schichten auf weichem Untergrund kann  $E_{vd}$  als Folge der Massenträgheit der geprüften Schicht und den damit verbundenen geringen Setzungen unter der nur kurzzeitig belasteten dynamischen Lastplatte sogar grösser als  $E_{v2}$  werden.

In Deutschland ist bei der statischen Lastplatte der Wert der Zweitmessung massgebend. Dabei werden die Messergebnisse durch die Nachverdichtung beim Messvorgang und damit durch den Verdichtungsgrad des Bodens stark beeinflusst. Beim Leichten Fallgewichtsgesetz findet jedoch praktisch keine Nachverdichtung statt, so dass der Vergleich mit den Werten der Erstbelastung bessere Übereinstimmungen erwarten lässt. Es überrascht nicht, dass in verschiedenen Untersuchungen für die Korrelation zwischen  $E_{vd}$  und  $E_{v1}$  erheblich bessere Korrelationskoeffizienten gefunden wurden als für die Beziehung zwischen  $E_{vd}$  und  $E_{v2}$ .

### 6.2 Anforderungen

In der NGT 39 [2] sind Anforderungen an die Tragfähigkeit des Planums ("Erdplanum") bzw. der Planie ("Planum") sowie für kalkstabilisierte Tragschichten aufgeführt.

Abb. 6.12 Anforderungen an die Tragfähigkeit nach NGT 39 (Auszug)

	Streckenart	Planum (CH: Planie)			Erdplanum (CH: Planum)				
		$D_{Pr}$	$E_{v2}$	Abh.	$E_{vd}$	$D_{Pr}$	$E_{v2}$	Abhängigkeit	$E_{vd}$
		[-]	[MN/m <sup>2</sup> ]		[MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[MN/m <sup>2</sup> ]		[MN/m <sup>2</sup> ]
Neubau	durchgehende Hauptgleise von Hauptbahnen (ausser S-Bahn)	1,00	120	U>15	50	1,00	80	GE, GI, GW, GU, SI, SW alle anderen Bodengruppen	40 35
	durchgehende Hauptgleise von S-Bahnen und Nebenbahnen	1,00	100	U>15	45	0,97	60	GE, GI, GW, GU, SI, SW alle anderen Bodengruppen	35 30
	übrige Gleise	0,97	80	U>15	40	0,95	45	GE, GI, GW, GU, SI, SW alle anderen Bodengruppen	30 25
besteh. Strecken	v >160 km/h	0,97	80	U>15	40	0,95	45	GE, GI, GW, GU, SI, SW alle anderen Bodengruppen	25 20
	v ≤160 km/h	0,95	50	U>15	35	0,93	20	GE, GI, GW, GU, SI, SW alle anderen Bodengruppen	25 20

In den ZTV E-StB 09 werden für das Planum auf frostsicherem Untergrund/Unterbau die folgenden Anforderungen angegeben:

Abb. 6.13 Anforderungen gemäss ZTV E-StB 09

	Baulastklasse	$E_{v2}$	$E_{vd}$
Regelfall	SV, I bis IV	120 MN/m <sup>2</sup>	65 MN/m <sup>2</sup>
Regelfall	V und VI	100 MN/m <sup>2</sup>	50 MN/m <sup>2</sup>
Wenn Anforderung erst durch Verdichten der Tragschicht erfüllt werden kann	SV, I bis IV	100 MN/m <sup>2</sup>	50 MN/m <sup>2</sup>
	V und VI/80	80 MN/m <sup>2</sup>	40 MN/m <sup>2</sup>

### 6.3 Korrelationen und Umrechnungsfaktoren

In der Österreichischen Norm RVS 08.03.04 [4] werden für die Umrechnung auf den Erstbelastungsmodul  $E_{v1}$  des statischen Lastplattenversuchs die folgenden Formeln angegeben:

$$\text{für } E_{v1} \geq 25 \text{ MN/m}^2 \quad E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} E_{v1} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (6a)$$

$$\text{für } E_{v1} < 25 \text{ MN/m}^2 \quad E_{vd} = 10 + \frac{6}{5} E_{v1} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (6b)$$

für die Beurteilung der Verdichtung aufgeführt.

Im Rahmen des österreichischen Forschungsvorhabens von Brandl et al. [1] wurden Versuche auf speziell hergestellten Versuchsfeldern sowie auf Baustellen durchgeführt. Neben anderen Geräten wurde als Leitgerät derselbe Gerätetyp verwendet, der auch von der ViaTec AG sowie vom Labor TBA des Kantons Uri eingesetzt wurde. Unter anderem wurde auch die Korrelation für das Verhältnis  $E_{vd}/E_{v1}$  der durchgeführten Versuche aufgezeigt. Für die ausgewerteten 56 Wertepaare ergab sich die Beziehung

$$E_{v1} = 1.751 \cdot E_{vd} - 23.45 \quad [\text{MN/m}^2] \quad (7)$$

die mit  $R = 0,89$  und  $R^2 = 0,7921$  eine gute Korrelation aufweist.

Im Kanton Uri wurden die Messungen mit dem Leichten Fallgewichtsgeschäft von Anfang an mit dem Plattendruckversuch verglichen. Dabei ergaben sich bei Messungen auf ungebundenen Fundationsschichten in der Regel Umrechnungsfaktoren für das Verhältnis  $M_{E1}/E_{vd}$  zwischen 1,3 und 2,0 (vergl. Kap. 3.3).

## 7 Vergleichsmessungen

### 7.1 Vorgehen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens interessierte natürlich auch die Vergleichbarkeit der Resultate von in der Schweiz vorhandenen Leichten Fallgewichtsgeräten. Insbesondere ging es darum, die Vergleichbarkeit der beiden für das Projekt eingesetzten Geräten zu verifizieren.

Am 22.11.2004 wurde auf der Tunnel-Umfahrung Flüelen eine Reihe mit 11 Vergleichsmessungen unter Beteiligung der folgenden Labors durchgeführt:

- Labor ViaTec AG, Winterthur (ViaTec AG)
- Labor TBA des Kantons Uri (TBA Uri)
- Labor der Walo Bertschinger AG, Schlieren (Labor Walo)

Das Labor TBA Uri und die ViaTec AG verwendeten den gleichen Gerätetyp ZFG 02 der Firma Zorn, Stendal, das Labor Walo arbeitete mit einem Leichten Fallgewichtsgerät Typ ZFG 2000 der Firma Zorn.

Die 11 Messstellen befanden sich auf einer ungebundenen Fundationsschicht aus Tunnelausbruchmaterial. Auf jeder Messstelle wurden die  $M_{E1}$ -Werte mittels Plattendruckversuch nach SN 670 317b ermittelt. Anschliessend wurde von jedem Labor mit dem eigenen Leichten Fallgewichtsgerät und mit eigenem Personal die  $E_{vd}$ -Werte bestimmt.

Die ermittelten Werte sind in Abb. 7.14 zusammengestellt.

Abb. 7.14 Vergleichsmessungen von 3 Labors

Mess- stelle	$M_{E1}$	Mittelwert $E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]				Umrechnungsfaktor $k = M_{E1}/E_{vd}$			
	[MN/m <sup>2</sup> ]	ViaTec	TBA Uri	Walo	Mittel	ViaTec	TBA Uri	Walo	Mittel
1	130	64,2	68,0	64,3	65,5	2,02	2,92	2,02	1,99
2	92	68,1	63,0	70,8	67,3	1,35	1,46	1,30	1,37
3	98	66,9	79,3	86,2	77,5	1,46	1,23	1,13	1,27
4	124	77,4	84,0	85,7	82,4	1,60	1,48	1,45	1,51
5	107	70,1	73,5	71,6	71,7	1,53	1,47	1,49	1,49
6	102	74,6	78,2	86,8	79,8	1,37	1,31	1,18	1,28
7	106	73,9	78,3	82,4	78,2	1,43	1,36	1,29	1,36
8	124	81,2	96,3	82,7	86,7	1,53	1,29	1,50	1,44
9	123	72,9	86,0	79,7	79,5	1,69	1,43	1,54	1,55
10	109	66,6	77,3	78,4	74,2	1,64	1,42	1,39	1,48
11	116	73,5	75,7	76,1	75,1	1,58	1,53	1,52	1,55

## 7.2 Auswertung der Vergleichsmessungen

Abb. 7.15 zeigt eine zusammenfassende Auswertung der Vergleichsmessungen. Auffallend sind bei der Messstelle 1 die von der tendenziellen Abhängigkeit zwischen  $E_{vd}$  und  $M_{E1}$  klar abweichenden Resultate. Da die Ergebnisse der  $E_{vd}$ -Messungen bei dieser Messstelle gut übereinstimmen, muss der gemessene  $M_{E1}$ -Wert in Zweifel gezogen werden. Für die weiteren Betrachtungen wurden deshalb nur die Messstellen 2 bis 11 berücksichtigt.

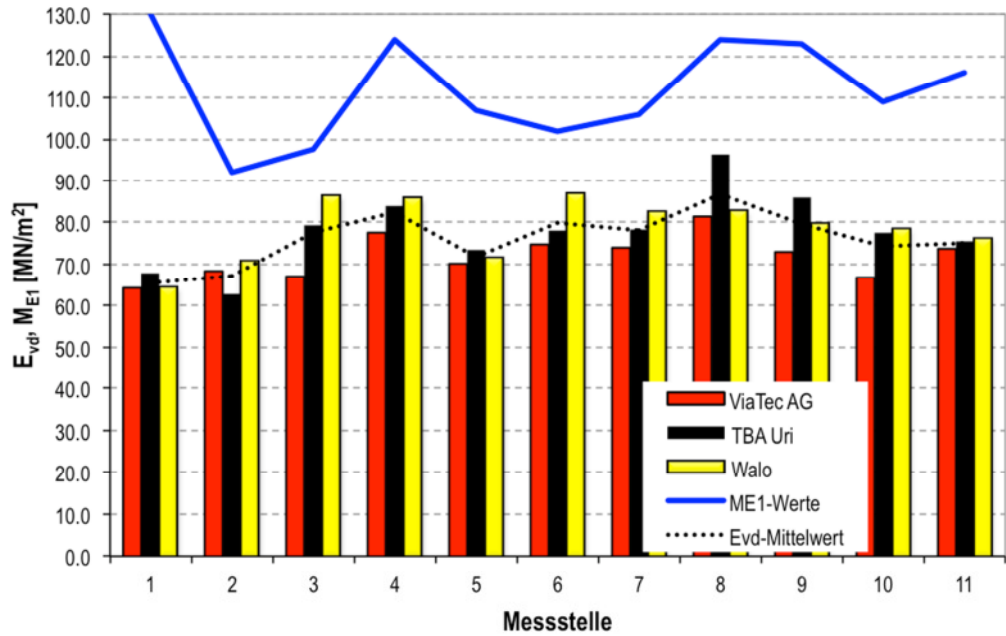


Abb. 7.15 Auswertung der Vergleichsmessungen von 3 Labors

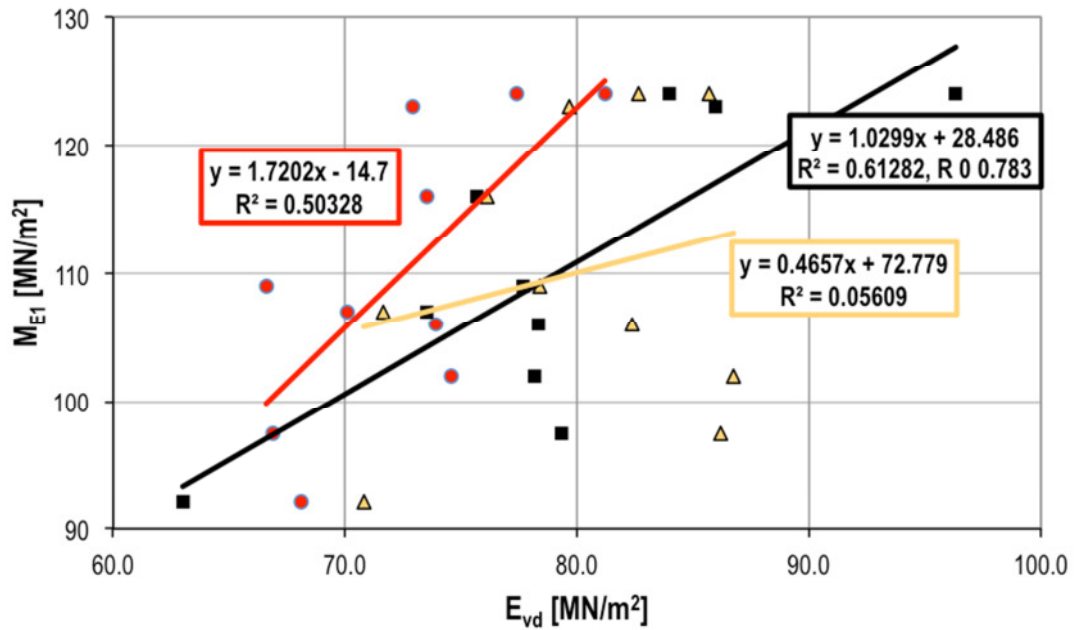


Abb. 7.16 Abhängigkeit  $M_{E1}/E_{vd}$  für die drei Prüfgeräte (ohne Messstelle 1)

Wie aus Abb. 7.16 ersichtlich wird, können aus den Beziehungen  $M_{E1}$  zu  $E_{vd}$  der drei Leichten Fallgewichtsgesetze keine für die praktische Anwendung brauchbaren Gesetzmässigkeiten hergeleitet werden. Diese Tatsache ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die gemessenen  $M_{E1}$ -Werte in einem recht engen Bereich zwischen 92 und 124  $MN/m^2$  liegen und bei der gewählten Versuchsanordnung geringfügige Inhomogenitäten des Untergrundes bereits wesentliche Auswirkungen auf die Messungen mit den drei LFG haben können.

Abb. 7.17 zeigt, dass ohne Berücksichtigung der Messstelle 1 sowohl für die Mittelwerte der Korrekturfaktoren  $k = M_{E1}/E_{vd}$  als auch für die maximalen Abweichungen der einzelnen Ergebnisse der 3 Prüfgeräte eine gute Übereinstimmung festgestellt wurde.

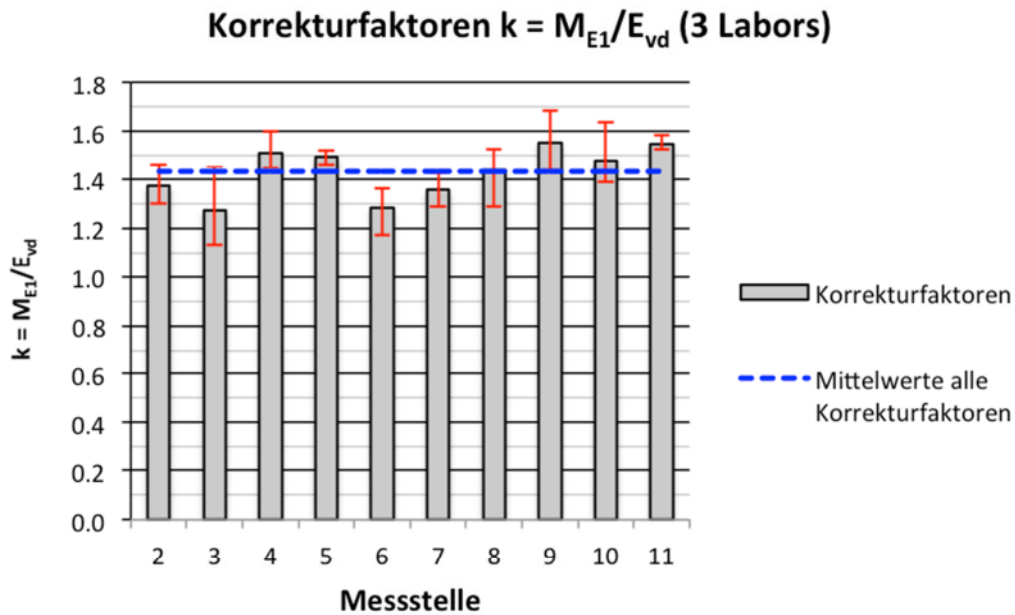


Abb. 7.17 Mittelwert  $k = M_{E1}/E_{vd}$  für die drei Prüfgeräte (ohne Messstelle 1)

Die tabellarische Auswertung der Korrekturfaktoren  $k = M_{E1}/E_{vd}$  für die drei Prüfgeräte (Abb. 7.18) bestätigt die Interpretation der grafischen Darstellung.

Abb. 7.18  $k = ME1/Evd$  für die Vergleichsmessungen von 3 Labors (ohne Messstelle 1)

Messstelle	$M_{E1}$ [ $MN/m^2$ ]	Umrechnungsfaktor $k = M_{E1}/E_{vd}$				Abweichung zum Mittelwert					
		ViaTec	TBA Uri	Walo	Mittel	$\Delta$ ViaTec		$\Delta$ TBA Uri		$\Delta$ Walo	
		[-]	[-]	[-]	[-]	abs.	%	abs.	%	abs.	%
2	92	1,35	1,46	1,30	1,37	-0,02	-1,4	0,09	6,6	-0,07	-5,2
3	98	1,46	1,23	1,13	1,27	0,18	14,4	-0,04	-3,1	-0,14	-11,2
4	124	1,60	1,48	1,45	1,51	0,09	6,2	-0,03	-2,1	-0,06	-4,1
5	107	1,53	1,47	1,49	1,49	0,03	2,1	-0,03	-2,0	0,00	-0,1
6	102	1,37	1,31	1,18	1,28	0,08	6,5	0,02	1,9	-0,11	-8,4
7	106	1,43	1,36	1,29	1,36	0,07	5,5	0,00	-0,1	-0,07	-5,4
8	124	1,53	1,29	1,50	1,44	0,09	6,1	-0,15	-10,3	0,06	4,2
9	123	1,69	1,43	1,54	1,55	0,13	8,6	-0,12	-7,9	-0,01	-0,6
10	109	1,64	1,42	1,39	1,48	0,16	10,5	-0,07	-4,4	-0,09	-6,1
11	116	1,58	1,53	1,52	1,55	0,04	2,3	-0,02	-1,1	-0,02	-1,2
<b>MW</b>	<b>110</b>	<b>1,52</b>	<b>1,39</b>	<b>1,38</b>	<b>1,43</b>	<b>0,09</b>	<b>6,1</b>	<b>-0,03</b>	<b>-2,3</b>	<b>-0,05</b>	<b>-3,8</b>

### 7.3 Ergebnis der Vergleichsmessungen

Da für das eigentliche Forschungsvorhaben nur die beiden Geräte der ViaTec AG und des TBA Uri eingesetzt wurden, interessiert vor allem die Vergleichbarkeit dieser beiden Geräte. Die entsprechenden Werte sind in Abb. 7.19 zusammengestellt.

Abb. 7.19 Vergleich der Messergebnisse von ViaTec AG und TBA Uri

Messstelle	$E_{vd}$ MW	$\Delta E_{vd}$ vom MW		k ViaTec	k TBA Uri	k MW	$\Delta k$ vom MW	
	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
2	65,6	±2,6	±3,9	1,35	1,46	1,41	±0,05	±3,9
3	73,0	±6,1	±8,5	1,46	1,23	1,34	±0,11	±8,5
4	80,7	±3,3	±4,1	1,60	1,48	1,54	±0,06	±4,1
5	71,6	±1,5	±2,4	1,53	1,46	1,49	±0,04	±2,4
6	76,3	±1,7	±2,3	1,37	1,30	1,34	±0,03	±2,3
7	76,0	±2,1	±2,9	1,43	1,35	1,39	±0,04	±2,9
8	88,6	±7,4	±8,5	1,53	1,29	1,41	±0,12	±8,5
9	79,5	±6,6	±8,2	1,69	1,43	1,56	±0,13	±8,2
10	71,8	±5,2	±7,7	1,64	1,40	1,52	±0,12	±7,7
11	74,8	±1,3	±1,5	1,58	1,53	1,56	±0,02	±1,4
<b>MW</b>	<b>75,8</b>	<b>±3,2</b>	<b>±4,4</b>	<b>1,52</b>	<b>1,39</b>	<b>1,46</b>	<b>±0,06</b>	<b>±4,2</b>
Standardabw.	6,23	-	-	0,11	0,10	0,09	-	-
in % vom MW	8,23	-	-	7,45	6,93	6,00	-	-

In Abb. 7.19 sind die entsprechenden Werte für die beiden Prüfgeräte für Messstellen 2 bis 11 aufgelistet und statistisch ausgewertet.

Bei den Vergleichsmessungen variiert der Umrechnungsfaktor  $k$  für die Messungen mit dem Gerät der ViaTec AG bei einem Mittelwert von 1,52 zwischen 1,35 und 1,69 ( $\pm 11,2\%$ ) und bei demjenigen des TBA Uri bei einem Mittelwert von 1,39 zwischen 1,23 und 1,53 ( $-11,5\%$ ,  $+10,1\%$ ).

In [1] sind statistische Auswertungen von mit dem gleichen Gerätetyp durchgeführten Messungen aufgeführt:

- Versuchsfeld mit Rundkorn 0/32:  $E_{vd}$ -Mittelwert von 27,83 MN/m<sup>2</sup>, Standardabweichung 3,31 MN/m<sup>2</sup> oder 11,9%;
- Grabenauffüllung mit Brechkorn 0/32:  $E_{vd}$ -Mittelwert von 87,67 MN/m<sup>2</sup>, Standardabweichung von 27,05 MN/m<sup>2</sup> oder 30,9%.

Im Vergleich dazu können die Messergebnisse der Vergleichsmessungen mit den beiden Geräten sowohl bezüglich Wiederholbarkeit als auch Vergleichbarkeit als sehr gut bewertet werden.

## 8 Versuchsdurchführung und -Auswertung

### 8.1 Versuchsbedingungen

Der übliche Anwendungsbereich des Plattendruckversuches nach SN 670 317b [7] umfasst sowohl die Prüfung von Untergrund/Unterbau (bei Messung auf dem Planum) als auch die Kontrolle ungebundener Fundationsschichten (bei Messung auf der Planie). Demgegenüber beschränkte sich das Forschungsvorhaben auf den in der Schweiz häufigsten Anwendungsfall des Leichtes Fallgewichtsgesetzes, nämlich auf die Prüfung auf der Planie ungebundenen Fundationsschichten.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens standen 290 Datensätze zur Verfügung. Diese stammen von Messungen, die zwischen 1996 und 2007 durch das TBA Uri und durch die ViaTec AG auf Fundationsschichten durchgeführt wurden. Neben dem Leichtes Fallgewichtsgesetz wurde bei allen Messstellen auch der  $M_{E1}$ -Wert mit dem VSS-Plattendruckgerät bestimmt. Im Jahr 2004 wurden zusätzlich Vergleichsmessungen zwischen den Prüfgeräten von drei Labors angestellt.

Ab 2002 wurden für die Versuchsdurchführung mit dem Leichtes Fallgewichtsgesetz die folgenden Randbedingungen eingehalten:

- Neigung der zu prüfenden Unterlage  $\leq 6\%$
- maximaler Durchmesser von Einzelkörnern unter der Lastplatte von 63 mm
- keine Anhäufung von groben Körnern unter der Lastplatte
- Entfernen loser Bodenteile mit einem Besen
- Auftragen einer wenige Millimeter dicken Schicht aus trockenem Sand zum Ausgleich von Unebenheiten und um das satte Aufliegen der Lastplatte sicherzustellen
- Vermeiden von Messstellen im Bereich von unregelmässiger Oberflächenbeschaffenheit
- Anwendung der Messgeräte durch geübte Laboranten

Die vom TBA Uri bis Ende 2001 durchgeführten Messungen entsprachen nicht in jedem Fall diesen Randbedingungen.

### 8.2 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung (Abb. 8.20) wurde so gewählt, dass eine gute Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erwarten war.

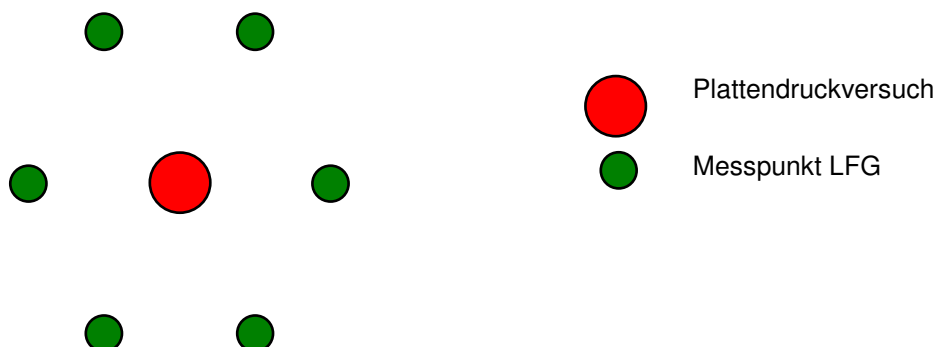


Abb. 8.20 Anordnung der Messpunkte

Auf den Messpunkten des Plattendruckversuches wurden keine Messungen mit dem LFG durchgeführt, da beim Messvorgang mit der statischen Lastplatte Nachverdichtungen und Veränderungen im Bodengefüge zu erwarten sind.

### 8.3 Messwerte

Insgesamt standen 290 Datensätze (Anhang I.1 und I.2) zur Verfügung. Die durch das TBA Uri zwischen dem 19.02.1996 und 21.01.1998 durchgeführten 35 Messungen, bei denen keine Einzelwerte für die Messpunkte und keine Angaben zur Versuchsdurchführung zur Verfügung standen, wurden nicht in die weiteren Betrachtungen einbezogen. Ebenfalls wurden 14 Messstellen nicht berücksichtigt, deren Ergebnisse beim Umrechnungsfaktor  $k = M_{E_1} / E_{vd}$  relativ grosse Unterschiede aufweisen ( $k < 1,0$  resp.  $k > 2,0$ ). Die nicht verwendeten Messstellen sind in den Anhängen 1 und 2 grau gekennzeichnet.

In Abb. 8.21 (ViaTec AG) und Abb. 8.22 (TBA Uri) werden die Mittelwerte sowie Streuungen der  $E_{vd}$ -Werte für die einzelnen Messstellen aufgezeigt.

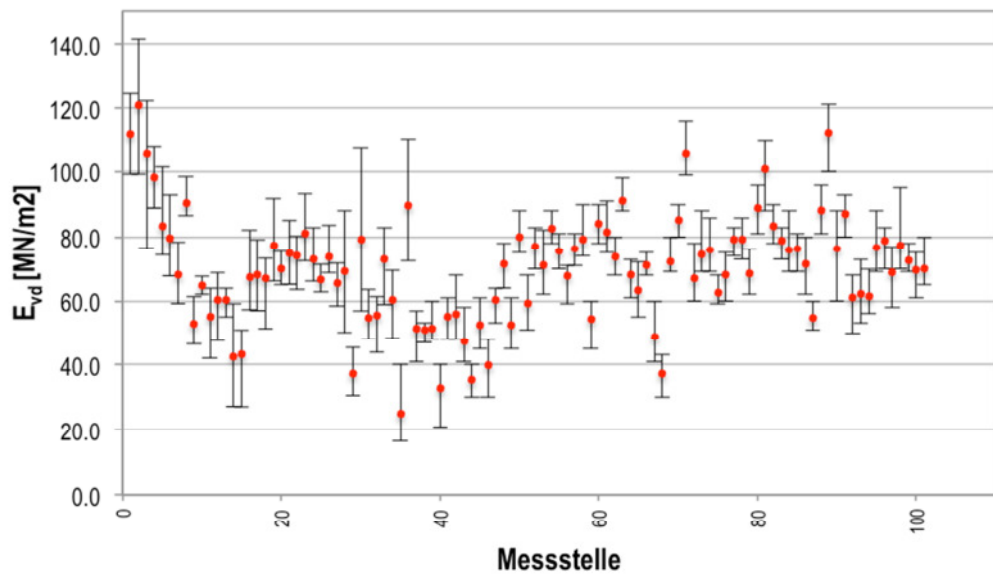


Abb. 8.21  $E_{vd}$ -Mittelwerte mit Streuungen (ViaTec AG)

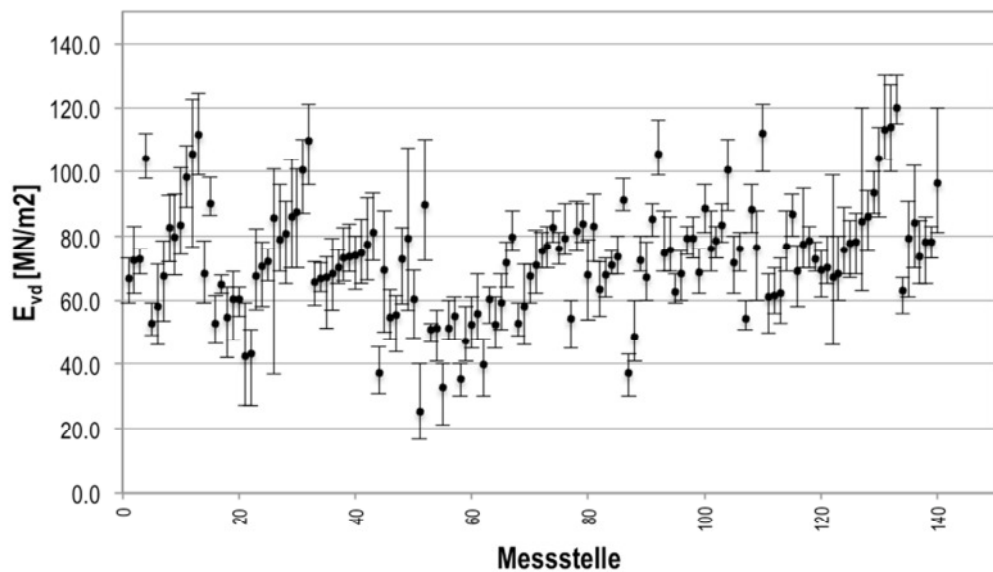


Abb. 8.22  $E_{vd}$ -Mittelwerte mit Streuungen (TBA Uri)

Im Folgenden werden Messwerte von 241 Messstellen ausgewertet:

- 140 Messstellen des Labors TBA des Kantons Uri, gemessen vom 30.04.1998 bis 22.11.2004
- 101 Messstellen der ViaTec AG, gemessen vom 09.03.2003 bis 10.12.2007

Im November 2004 wurden zusätzlich Vergleichsmessungen durch drei verschiedene Labors durchgeführt. Dabei wurden an 11 verschiedenen Messstellen sowohl Plattendruckversuch als auch Messungen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät gemacht (vergl. Kapitel 7).

## 8.4 Auswertung der Messergebnisse

### 8.4.1 Allgemeine Überlegungen

Wie bereits in Kapitel 6.1 ausgeführt wurde, sind für  $M_{E2}$  und  $E_{vd}$  keine verwertbaren Korrelationen zu erwarten. Die Darstellung der ermittelten Werte in Abb. 8.23 bestätigt diese Vermutung.

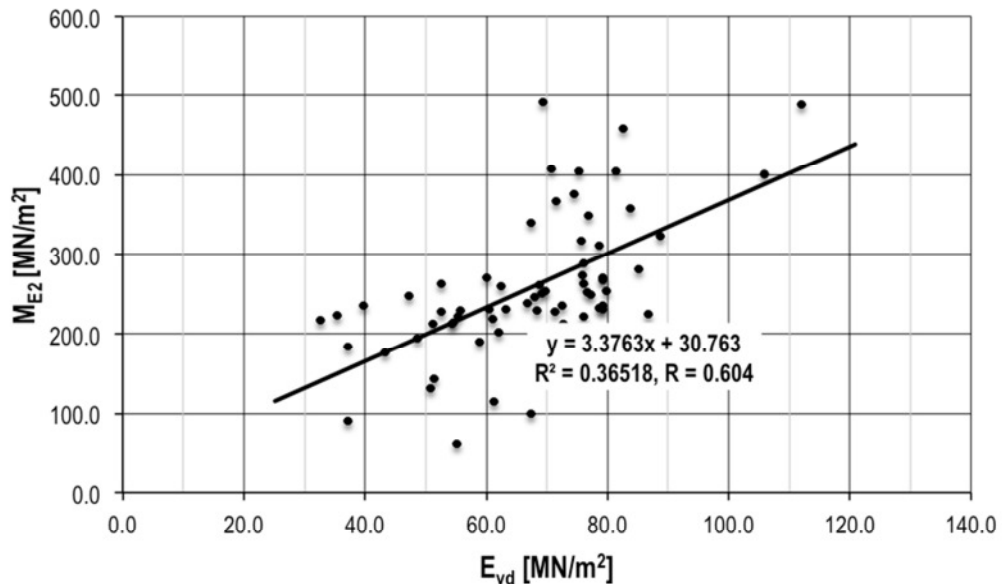


Abb. 8.23 Korrelation von  $M_{E2}$  mit  $E_{vd}$ , alle Werte

Die Beziehung  $f_E = M_{E2} / M_{E1}$  zu  $E_{vd}$  (Abb. 8.24) zeigt klar, dass keine brauchbare Beziehung zwischen  $E_{vd}$  und  $M_{E2}$  abgeleitet werden kann. Bei den in ungebundenen Fundationsschichten eingesetzten Baustoffen lässt sich diese Feststellung auf unterschiedliche Einflüsse wie Materialzusammensetzung, Verdichtungsgrad, Unterlage, Schichtdicke usw. zurückführen.

Aus diesem Grund wurde auf weitere Untersuchungen von Beziehungen zwischen dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  und  $M_{E2}$  verzichtet. Da in der Schweiz für die Beurteilung der Verdichtung sowie der Tragfähigkeit dieser Schichten der  $M_{E1}$ -Wert massgebend ist, sind damit keine wesentlichen Nachteile verbunden.

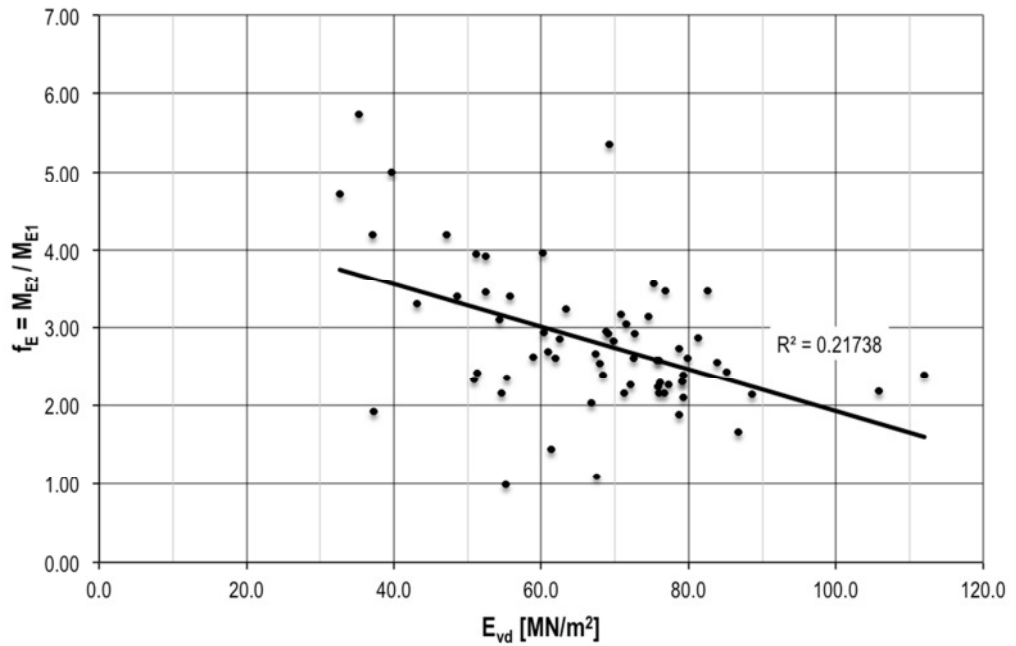


Abb. 8.24 Korrelation von  $f_E = M_{E2} / M_{E1}$  mit  $E_{vd}$ , alle Werte

### 8.4.2 Korrelationen und Trendlinien

In einem ersten Schritt wurden die Korrelationen von  $M_{E1}$  und  $E_{vd}$  der Messergebnisse untersucht. Die Resultate sind in den Abb. 8.25 für alle Werte und Abb. 8.26 aufgeteilt dargestellt.

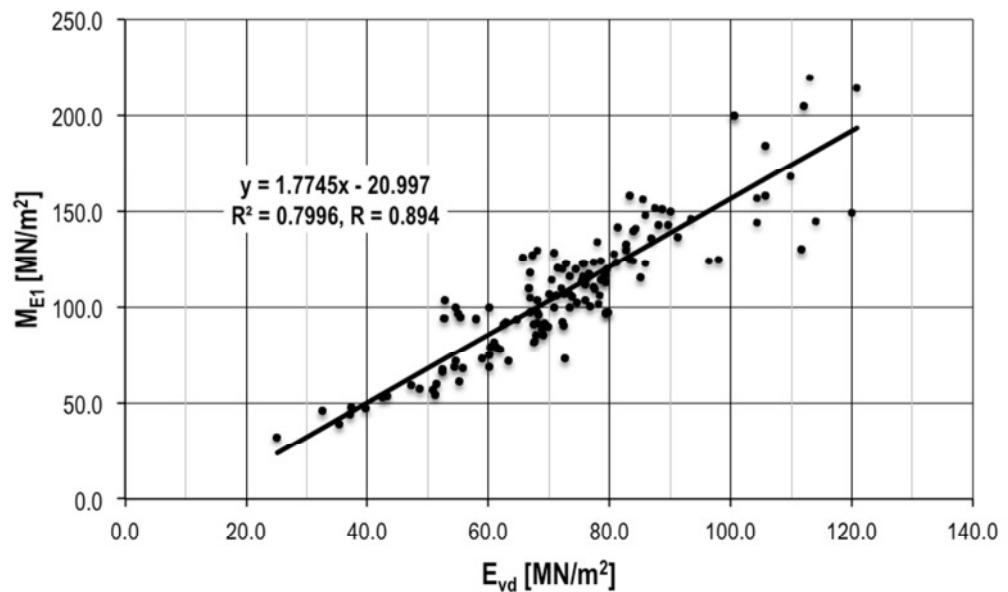


Abb. 8.25 Korrelation von  $M_{E1}$  mit  $E_{vd}$ , alle Werte

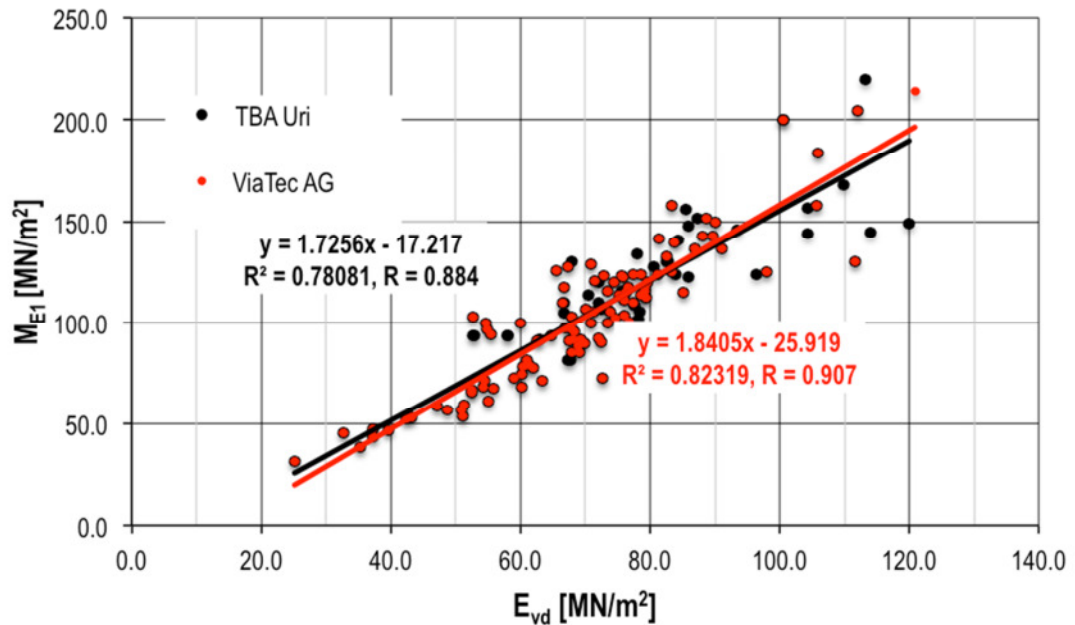


Abb. 8.26 Korrelation von  $M_{E1}$  mit  $E_{vd}$ , unterteilt nach ViaTec AG und TBA Uri

Die statistische Auswertung der in den Abb. 8.25 und 8.26 dargestellten Daten geht aus der Tabelle in Abb. 8.27 hervor.

Abb. 8.27 Vergleich der Messergebnisse von ViaTec AG und TBA Uri

Werte	Anzahl Datenpaare	Trendlinie	Korrelationskoeffizient	
			$R^2$	R
alle	241	$M_{E1} = 1.7745 \cdot E_{vd} - 21.00$	0.7996	0.894
ViaTec AG	101	$M_{E1} = 1.8405 \cdot E_{vd} - 25.92$	0.8232	0.907
ATB Uri	140	$M_{E1} = 1.7256 \cdot E_{vd} - 17.22$	0.7808	0.884

Die gefundenen Korrelationen können grundsätzlich als gut bewertet werden. Zudem kann aus der statistischen Auswertung für die praktische Anwendung die nachstehende Regressionsgleichung hergeleitet werden:

$$M_{E1} = a \cdot E_{vd} + b = 1,75 \cdot E_{vd} - 20,0 \quad [\text{MN/m}^2] \quad (8)$$

Wie aus Abb. 8.28 hervorgeht, stimmen die so errechneten  $M_{E1}$ -Werte für den in der Praxis vor allem interessierenden Bereich  $55 \text{ MN/m}^2 \leq E_{vd} \leq 80 \text{ MN/m}^2$  (entsprechend  $80 \text{ MN/m}^2 \leq M_{E1} \leq 120 \text{ MN/m}^2$ ) sehr gut mit den drei Trendlinien überein.

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, wurde im österreichischen Forschungsprojekt [1] eine vergleichbare Regressionsformel, allerdings für den statischen Verformungsmodul  $E_{v1}$ , hergeleitet:

$$E_{v1} = 1.751 \cdot E_{vd} - 23,45 \quad [\text{MN/m}^2] \quad (9)$$

Abb. 8.28 Vergleich der Messergebnisse von ViaTec AG und TBA Uri

E <sub>vd</sub>	Regressionsgleichung			
	Formel (8)	alle Werte	ViaTec AG	TBA Uri
	$M_{E1} = 1.75 \cdot E_{vd} - 20.0$	$M_{E1} = 1.7610 \cdot E_{vd} - 20.20$	$M_{E1} = 1.8405 \cdot E_{vd} - 25.92$	$M_{E1} = 1.7053 \cdot E_{vd} - 16.02$
[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
55	76,6	75,3	77,7	76,3
60	85,5	84,5	86,3	85,0
65	94,3	93,7	94,9	93,8
70	103,2	102,9	103,6	102,5
75	112,1	112,1	112,2	111,3
80	121,0	121,3	120,8	120,0

Für die Überprüfung ungebundener Fundationsschichten interessiert vor allem der Bereich mit  $60 \text{ MN/m}^2 \leq M_{E1} \leq 120 \text{ MN/m}^2$ . Die Werte der entsprechenden Messstellen wurden deshalb einer zusätzlichen Auswertung unterzogen.

Die Korrelationen zwischen  $M_{E1}$  und  $E_{vd}$  sind für diese Werte in Abb. 8.29 für ViaTec AG und TBA Uri aufgezeichnet.

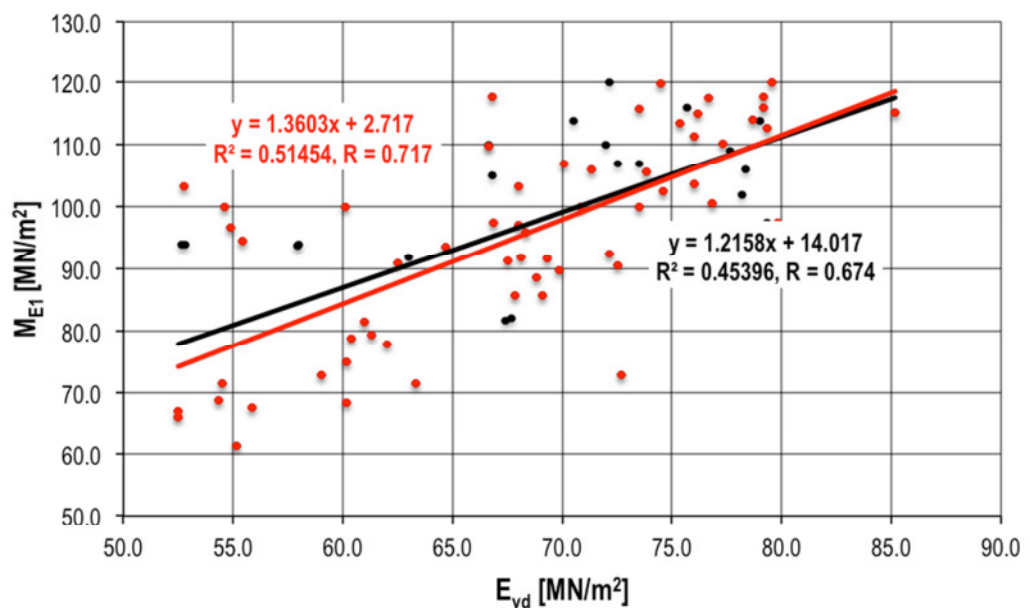
Abb. 8.29 Korrelation von  $M_{E1}$  mit  $E_{vd}$  für Messstellen mit  $60 \text{ MN/m}^2 \leq M_{E1} \leq 120 \text{ MN/m}^2$ 

Abb. 8.29 zeigt, dass für diese Werte eine bescheidene Korrelation zwischen  $M_{E1}$  und  $E_{vd}$  vorhanden ist. Das erstaunt nicht, werden doch nur Werte in einem beschränkten Bereich betrachtet, und geringfügige Inhomogenitäten im geprüften Boden können sich stark auswirken.

Im Gegensatz zu Abb. 7.16 im Kapitel 7.2 stimmen jedoch die Trendlinien für die beiden Prüfgeräte der ViaTec AG sowie des TBA Uri recht gut überein. Das bestätigt die Annahme, dass bei einer genügend grossen Datenmenge die Vergleichbarkeit der beiden Messgeräte sehr gut ist.

### 8.4.3 Umrechnungsfaktoren

Für die praktische Anwendung des Leichten Fallgewichtsgerätes interessiert unter anderem der Umrechnungsfaktor

$$k = \frac{M_{E1}}{E_{vd}} \quad [-] \quad (10)$$

Der mittlere Wert des Umrechnungsfaktors  $k$  liegt bei 1,5 wie aus Abb. 8.30 ersichtlich ist. Es gilt jedoch anzumerken, dass sehr grosse Streuungen vorhanden sind und auch die Korrelation kein verwertbares Ergebnis zeigt.

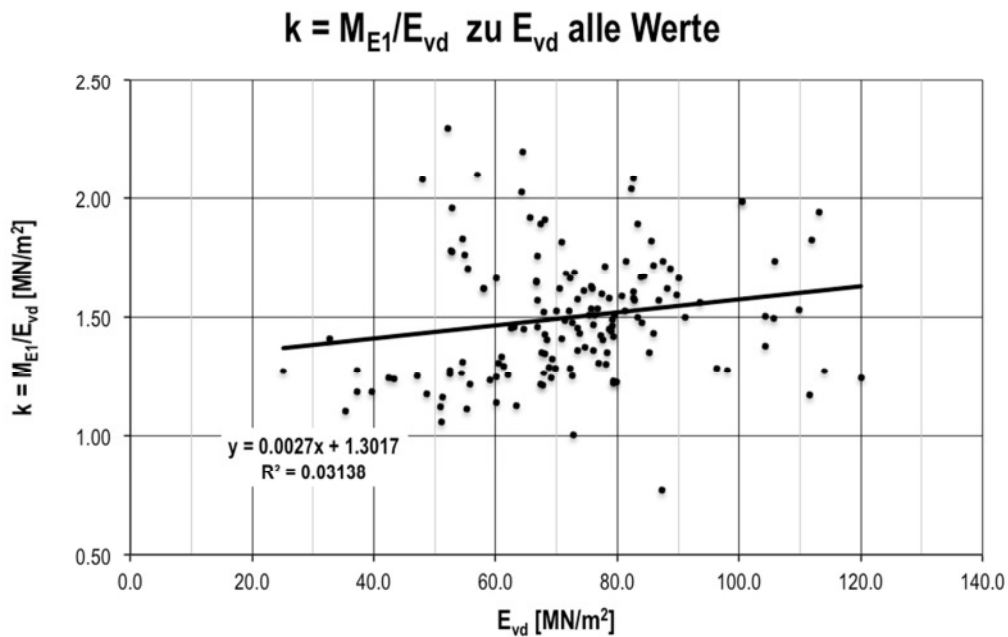


Abb. 8.30 Korrelation von  $k = M_{E1}/E_{vd}$  mit  $E_{vd}$ , für alle Werte

Abb. 8.31 Statistische Auswertung der Umrechnungsfaktoren  $k = M_{E1}/E_{vd}$

	alle Werte	ViaTec AG	TBA Uri
Mittelwert	1.46	1.45	1.47
Minimum	1.00	1.00	1.00
Maximum	1.99	1.99	1.99
Standardabweichung	0.22	0.22	0.22

Aus der statistische Auswertung der Umrechnungsfaktoren  $k_i$  für die Gesamtheit der Werte (Abb. 8.31) kann für die Praxis der Umrechnungsfaktor  $k = 1,25$  mit genügender Genauigkeit abgeleitet werden. Damit wird

$$M_{E1} = k \cdot E_{vd} = 1,25 \cdot E_{vd} \quad [-] \quad (11)$$

Abb. 8.32 zeigt, dass für den interessierenden Bereich ( $80 \text{ MN/m}^2 \leq M_{E1} \leq 100 \text{ MN/m}^2$ ) mit dieser Beziehung mit einer Ausnahme alle gemessenen  $M_{E1}$ -Werte mindestens 90% des errechneten Wertes erreichen. Tendenziell sind die berechneten  $M_{E1}$ -Werte jedoch zu tief. Für die praktische Anwendung drängt sich deshalb ein auf die objektspezifischen Bedingungen abgestimmter Umrechnungsfaktor  $k$  auf. In Kapitel 10.5.2 wird ein entsprechender Vorschlag gemacht.

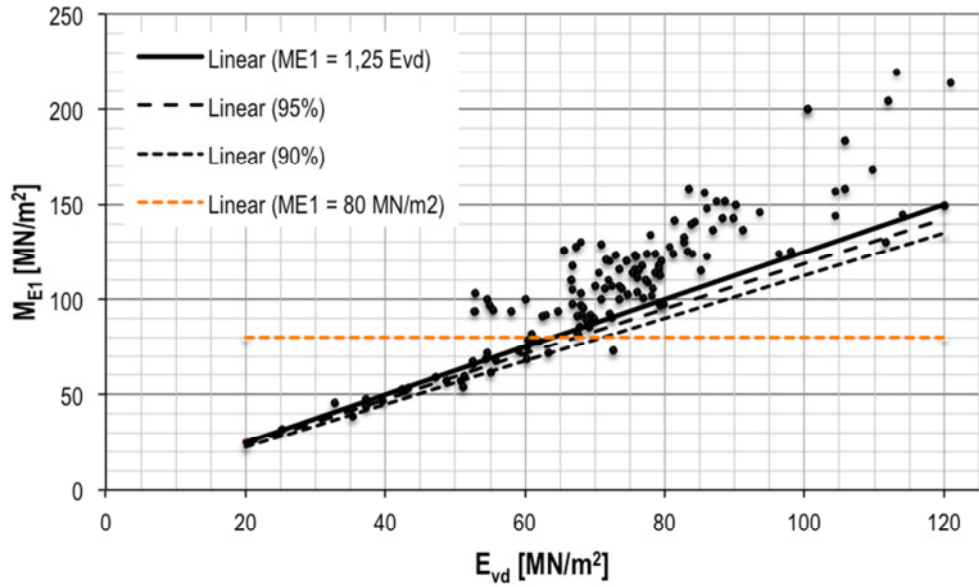


Abb. 8.32 Vergleich aller Messwerte mit  $M_{E1} = k \cdot E_{vd}$  ( $k = 1,25$ ), alle Werte

#### 8.4.4 Anforderungswerte $E_{vd \text{ min}}$

Alternativ zu einem Umrechnungsfaktor ist auch die Festlegung von Anforderungswerten  $E_{vd \text{ min}}$  wie bei den Anforderungen an die  $M_{E1}$ -Werte resp.  $E_{v1}$ -Werte gemäss SN 640 585b [5] möglich.

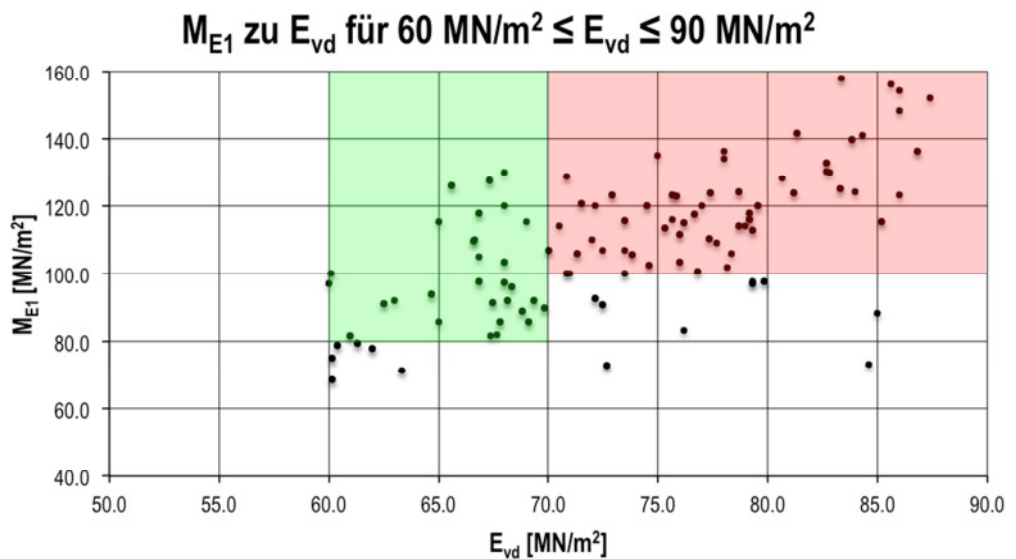


Abb. 8.33 Vorschlag Anforderungswerte  $E_{vd \text{ min}}$ , alle Werte

Aus den in Abb. 8.33 dargestellten Messergebnissen können die folgenden Anforderungswerte abgeleitet werden:

- Verkehrslastklasse T1 *grüner Bereich*  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$
- Verkehrslastklassen T2...T6 *roter Bereich*  $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$

Abb. 8.34 zeigt die zu Abb. 8.33 gehörende statistische Auswertung der Messergebnisse mit  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ .

Abb. 8.34 Statistische Auswertung bezüglich Anforderungswerten  $E_{vd} \min$

Anforderung	n	$M_{E1}$					vom erforderlichen $M_{E1}$ -Wert		
		nach [5]	Mittelw.	Maxi.	Mini.	St.abw.	$\geq 100\%$	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$
		[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
$E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$	61	$\geq 80$	94,6	130,0	68,4	15,7	88,4	93,0	96,1
$E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$	129	$\geq 100$	120,0	176,0	72,9	19,6	80,3	90,2	93,4

Aus Abb. 8.34 geht hervor, dass bei einem Anforderungswert von  $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$

- über 88% der zugehörigen  $M_{E1}$ -Werte den Anforderungswert nach [5] für die Verkehrslastklassen T2...T6 von  $100 \text{ MN/m}^2$  überschreiten
- 93% der zugehörigen  $M_{E1}$ -Werte 95% des Anforderungswertes nach [5] überschreiten
- gut 96% der zugehörigen  $M_{E1}$ -Werte 90% des Anforderungswertes nach [5] überschreiten

Bei einem Anforderungswert von  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$  (entsprechend der)

- rund 80% der zugehörigen  $M_{E1}$ -Werte den Anforderungswert nach [5] für die Verkehrslastklasse T1 von  $80 \text{ MN/m}^2$  überschreiten
- etwa 90% der zugehörigen  $M_{E1}$ -Werte 95% des Anforderungswertes nach [5] überschreiten
- gut 93% der zugehörigen  $M_{E1}$ -Werte 90% des Anforderungswertes nach [5] überschreiten

Das relativ ungünstige Bild für den T1 entsprechenden Anforderungswert  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$  wird durch sechs Messergebnisse, die zufällig knapp über  $60 \text{ MN/m}^2$  liegen, stark beeinflusst. Werden diese Resultate ausgeklammert, so zeigt sich ein Ergebnis, das mit demjenigen für den Anforderungswert  $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$  vergleichbar ist. Bei einer Erhöhung des Anforderungswertes für die Verkehrslastklasse T1 auf  $E_{vd} \geq 65 \text{ MN/m}^2$  würden 100% aller  $M_{E1}$ -Werte über dem Anforderungswert  $M_{E1} \geq \text{MN/m}^2$  liegen. Zudem würde die Spanne von  $5 \text{ MN/m}^2$  zwischen den beiden Anforderungswerten für die Baustellenpraxis kaum mehr eine taugliche Unterscheidung erlauben.

Für die praktische Anwendung werden die folgenden Anforderungswerte vorgeschlagen:

- Verkehrslastklasse T1 (sehr leicht)  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$
- Verkehrslastklassen T2...T6 (leicht bis extrem schwer)  $E_{vd} 70 \text{ MN/m}^2$

## 9 Schlussfolgerungen

### 9.1 Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesätes in der Praxis

Die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesätes in der Praxis ist sehr einfach, effizient und praktisch ohne baustellenspezifische Einschränkungen wie Grösse der Baustelle, Platzverhältnisse, Gegengewicht usw. durchführbar. Das Einrichten des LFG und die Durchführung der Versuche sind mit einem wesentlich geringeren Aufwand als beim Plattendruckversuch verbunden. Dank der kurzen Messdauer (ca. 10 Minuten pro Messstelle) können im Vergleich zur  $M_E$ -Messung in einem bestimmten Zeitraum viel mehr Messstellen geprüft werden.

Das Leichte Fallgewichtsgesät kann somit als Alternative oder auch als Ergänzung zu der in Walzen eingebauten Ausrüstung für die flächendeckenden Verdichtungskontrolle FDVK gemäss [5] benützt werden.

Für die praktische Anwendung kann die Anordnung der Messpunkte einer Messstelle gegenüber derjenigen für den Forschungsauftrag so abgeändert werden, dass nur noch fünf Punkte gemessen werden, die nach Abb. 10.36 anzuordnen sind.

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sowie die kostengünstige Anwendung machen das Leichte Fallgewichtsgesät zu einem geeigneten Prüfmittel für den Baustellenalltag.

### 9.2 Vergleichbarkeit verschiedener Messgesäte

Um die Vergleichbarkeit der beiden für das Forschungsvorhaben verwendeten Leichten Fallgewichtsgesäte nachzuweisen, wurden im November 2004 Vergleichsmessungen durchgeführt, bei denen neben den beiden Gesäten der ViaTec AG und des TBA Uri auch das LFG der Walo Bertschinger AG eingesetzt wurden. Gestützt auf die Auswertung dieser Vergleichsmessungen konnte die Vergleichbarkeit der Messwerte für den von ViaTec AG und TBA Uri verwendeten Gesätetyp ZFG 02 der Firma Zorn, Stendal, eindeutig nachgewiesen werden.

### 9.3 Auswertung der Messergebnisse

Bei der Interpretation der Messresultate muss berücksichtigt werden, dass die geprüften Fundationsschichten bezüglich Zusammensetzung, Grösstkorn, Wassergehalt und Verdichtungsgrad recht grosse Inhomogenitäten aufweisen können. Deshalb sind die gefundenen Übereinstimmungen und Korrelationen als gut zu bezeichnen.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass für die praktische Nutzung des Leichten Fallgewichtsgesätes verschiedene Beurteilungsmöglichkeiten für den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  gegeben sind:

- aufgrund der Regressionsgleichung  $M_{E1} = 1,75 \cdot E_{vd} - 20,0$  [MN/m<sup>2</sup>]
- mit der Beziehung  $M_{E1} = k \cdot E_{vd} = 1,25 \cdot E_{vd}$  [MN/m<sup>2</sup>]
- mit Anforderungswerten  $E_{vd} \geq 60 \text{ MN/m}^2$  (für T1)  
resp.  $E_{vd} \geq 70 \text{ MN/m}^2$  (für T2...T6)

Die Berechnung der  $M_{E1}$ -Werte kommt vor allem bei einer grösseren Anzahl Messungen auf homogenen Schichten in Frage. In diesem Fall kann die Übereinstimmung der rechnerisch ermittelten  $M_{E1}$ -Werte bei jeder Baumassnahme mit denjenigen der Plattendruckversuche gemäss [7] nachgewiesen werden. Wenn nötig müssen die Formeln (8) resp. (10) angepasst werden.

Soll das Leichte Fallgewichtsgesät im Rahmen von Kontrollprüfungen eingesetzt werden, können in die SN 640 585 [5] Anforderungswerte für den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  aufgenommen werden.

Es wird empfohlen, für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesätes eine neue Norm zu erarbeiten. Darin können die Anforderungen an das Prüfgesät, die Vorgehensweise beim Kalibrieren sowie die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messungen geregelt werden.

## 10 Hinweise für die Anwendung des LFG

### 10.1 Handhabung

Die Handhabung des Leichten Fallgewichtgerätes ist sehr einfach. Es kann von einer Person transportiert, aufgestellt und bedient werden. Für den Transport der ca. 30 kg schweren Prüfeinrichtung (Lastplatte, Belastungsvorrichtung und Setzungsmessgerät) sind auf dem Markt entsprechende Transportwagen erhältlich (Abb. 10.35).



Abb. 10.35 Leichtes Fallgewichtgerät in Transportstellung

Das Leichte Fallgewichtgerät eignet sich zur Überprüfung der Verdichtung und der Tragfähigkeit von Böden und Foundationsschichten. Es kann insbesondere für Messungen unter erschwerten Bedingungen eingesetzt werden, z.B. wenn die Platzverhältnisse für die Einrichtungen des Plattendruckversuches nicht ausreichen oder wenn kein Gegengewicht zur Verfügung steht.

Wegen des geringen Gewichtes des Gerätes und der einfachen Vorgehensweise kann eine Person mit dem Leichten Fallgewichtgerät pro Stunde 5 bis 8 Messstellen mit 5 bis 6 Messpunkten überprüfen. Die Auswertung erfolgt direkt mit dem Setzungsmessgerät. Die ermittelten Werte (Setzung  $s$  und dynamischer Verformungsmodul  $E_{vd}$ ) können auf dem Display des Auswertgerätes abgelesen, auf einem Papierstreifen ausgedruckt und auf einen Datenträger oder Datenspeicher übertragen werden.

### 10.2 Versuchsbedingungen

Für das Leichte Fallgewichtgerät gelten die gleichen Versuchsbedingungen wie für den Plattendruckversuch:

- Der Versuch kann auf grobkörnigen Böden, steifen bis harten feinkörnigen Böden sowie auf gemischtkörnigen Böden ausgeführt werden. Der Kornanteil des Bodens grösser als etwa 90 mm muss vernachlässigbar sein.
- Einzelne Körner grösser 63 mm dürfen nicht unmittelbar unter der Lastplatte vorhanden sein.

- Der Versuch darf nicht auf einer aufgeweichten oder auf einer verkrusteten Oberfläche durchgeführt werden.
- Gegebenenfalls ist der Versuch unterhalb der gestörten Zone anzusetzen. Die Dichte des zu untersuchenden Bodens darf hierbei nicht verändert werden.
- Der Wassergehalt des Bodens beeinflusst das Versuchsergebnis bei feinkörnigen Böden entscheidend. Deshalb soll bei bindigen Böden der Boden unter der Messstelle bis in eine Tiefe  $d$  ( $d$  = Durchmesser der Lastplatte) gleichmässig erdfeucht sein, d.h. etwa beim optimalen Wassergehalt liegen.
- Die Prüffläche darf nicht stärker als 6% geneigt sein.
- Der dynamische Plattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät ist bei Lufttemperaturen zwischen 0 °C und 40 °C durchzuführen. Auf gefrorenem Boden darf nicht gemessen werden.

### 10.3 Versuchsdurchführung

Es wird vorgeschlagen, den Versuch mit fünf Messpunkten pro Messstelle nach dem in Abb. 10.36 aufgezeigten Schema durchzuführen.

Für die Lastplatte ist je eine entsprechend grosse Prüffläche vorzubereiten. Die Bodenoberfläche wird mit einem geeigneten Hilfsmittel wie z.B. Stahllineal oder Kelle möglichst eben vorbereitet und mit dem Besen von losen Bodenteilen befreit. Grosse Steine sind zu entfernen und grössere Unebenheiten müssen vorgängig ausgeglichen werden.

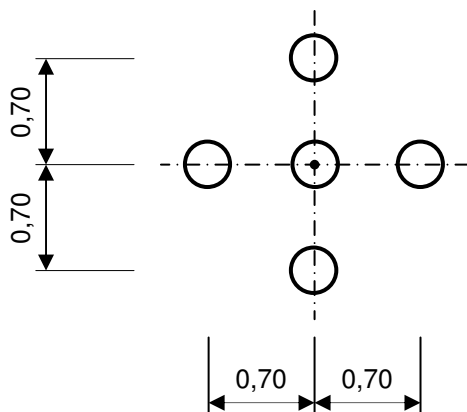


Abb. 10.36 Vorschlag für die Anordnung der Messpunkte für eine Messstelle

Für die Messung ist der Boden entsprechend dem Plattendruckversuch [7] vorzubereiten. Die Lastplatte muss satt und ohne verbleibende Hohlräume auf dem Boden aufliegen. Wenn nötig werden Unebenheiten mit einer wenige Millimeter dicken Schicht aus trockenem Sand ausgeglichen. Darauf wird die Lastplatte parallel zur Oberfläche eingerichtet. Es ist darauf zu achten, dass die Sandschicht nicht zu dick aufgetragen wird, da sonst das Messergebnis beeinflusst werden kann.

Auf die Lastplatte wird die Belastungsvorrichtung aufgesetzt und die Messeinrichtung mit dem Verbindungskabel angeschlossen. Die Messeinrichtung ist einzuschalten und für die weitere Versuchsdurchführung sind die Angaben des Herstellers zu befolgen.

Vor der ersten Messung ist die Transportarretierung beim Fallgewicht zu lösen. Das Fallgewicht ist nach oben in die Haltevorrichtung zu heben. Als erstes sind drei Vorbereitungsstösse durchzuführen. Bei jedem Stoss ist darauf zu achten, dass die Führungsstange möglichst senkrecht gehalten wird.

Das Fallgewicht wird nach jedem Stoss beim Rückspringen mit der freien Hand aufgefangen und wieder in die Haltevorrichtung eingeklinkt. Falls das Fallgewicht nicht aufgefangen werden kann, wird ein unerwünschter zweiter Stoss auf die Lastplatte ausgeführt.

Nach Ausführung der drei Vorbereitungsstösse wird die Messeinrichtung für die Messung vorbereitet, dabei sind die gerätespezifischen Unterschiede zu beachten. Die drei Messstösse werden gestartet. Dabei muss das Fallgewicht mit der freien Hand nach dem erfolgten Stoss aufgefangen werden. Scheitert der Auffangversuch, wird der zweite Stoss in der Regel von der Messelektronik nicht berücksichtigt. Durch Vergleich der drei Messwerte sind allfällige Messfehler erkennbar. Gegebenenfalls ist die gesamte Messung zu verwerfen.

Folgende Resultate können vom Setzungsmessgerät direkt auf dem Display angezeigt und auf einen Papierstreifen ausgedruckt werden:

- Setzungen mit Setzungskurven
- Setzungsgeschwindigkeiten der drei Stösse sowie deren Mittelwert
- $s/v$ -Wert als Hinweis über den Verdichtungsgrad
- $E_{vd}$ -Wert als Verformungsmodul

Die Messdaten werden elektronisch vom Gerät gespeichert und können zur weiteren Bearbeitung heruntergeladen und in einen Prüfbericht überführt werden.

Als massgebender Wert für die Messstelle gemäss Abb. 10.36 gilt grundsätzlich der Mittelwert aus den Messungen der fünf Messpunkte. Weicht ein Messwert um mehr als 20% vom Mittelwert aller Messungen ab, so wird dieser als Ausreisser nicht in die Berechnung des massgebenden Mittelwertes für die Messstelle einbezogen.

## 10.4 Wartung

Beim Einsatz des Leichten Fallgewichtsgesetzes auf der Baustelle kann es zu Verschmutzungen und Beschädigungen des Gerätes kommen. Besondere Vorsicht ist beim Transport des Gerätes, sowohl im Fahrzeug als auch auf der Einsatzstelle geboten. Das Leichte Fallgewichtsgesetz muss deshalb nach jedem Einsatz durch den Anwender kontrolliert werden, wobei folgenden Punkte zu überprüfen sind:

- Arretierung des Fallgewichtes vor jedem Transport
- Sauberkeit der Führungsstange des Fallgewichtes
- visuelle Kontrolle der Führungsstange auf Beschädigung
- Kontrolle der Lage der Auslösvorrichtung (ev. neu Kalibrieren)
- visuelle Kontrolle des Gummipuffers auf Beschädigung und Sauberkeit
- Sauberkeit der Verbindungsstelle zwischen Belastungsvorrichtung und Lastplatte
- visuelle Kontrolle der Lastplatte auf Beschädigung und Sauberkeit
- visuelle Kontrolle des Verbindungskabels zur Messvorrichtung auf Beschädigung

Gegebenenfalls ist das Gerät zu reinigen und Beschädigungen sind zu beheben. Die Führungsstange soll wenn möglich nur mit einem sauberen Tuch abgewischt werden. Bei starker Verschmutzung ist sie nass zu reinigen und anschliessend gut zu trocknen. Die Verwendung eines Schmiermittels an der Führungsstange kann zu Verschmutzungen und dadurch zu Beeinflussungen der Messergebnisse führen.

## 10.5 Kalibrierung

Die Kalibrierung unterteilt sich beim Leichten Fallgewicht in

- Kalibrierung des Messgerätes
- objektspezifische Kalibrierung der Messergebnisse

### 10.5.1 Kalibrierung des Messgerätes

Das Leichte Fallgewichtsgesetz wird vom Hersteller kalibriert. Das entsprechende Prüfzeugnis ist dem Käufer des Messgerätes mitzuliefern. Nach Inbetriebnahme des Gerätes ist das Leichte Fallgewichtsgesetz jährlich mindestens einmal zu kalibrieren.

In der Schweiz bestehen zurzeit keine Prüfvorschriften für die Kalibrierung und es ist auch keine Kalibrierungsstelle akkreditiert. In Deutschland erfolgt die Kalibrierung nach der Prüfvorschrift TP BF-StB, Teil B 8.3 [7]. Die von der Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST) anerkannten Kalibrierstellen für das Leichte Fallgewichtsgesetz in den Nachbarländern Deutschland und Österreich sind im Anhang I.3 aufgelistet.

### 10.5.2 Kalibrierung der Messungen

Wird das Leichte Fallgewichtsgesetz für eine grössere Zahl von Messungen auf einer einheitlichen Schicht, z.B. einer ungebundenen Fundationsschicht eingesetzt, so werden die  $M_{E1}$ -Werte entweder mit der Regressionsgleichung (9) oder mittels eines Korrekturfaktors gemäss Formel (11) berechnet. In diesem Fall sollten die Messergebnisse täglich mit vergleichenden Messungen mit dem statischen Plattendruckversuch nach [7] kalibriert werden. Falls erforderlich ist die Regressionsgleichung bzw. der Umrechnungsfaktor den objektspezifischen Gegebenheiten anzupassen. Bei genügender Korrelation kann die Häufigkeit der Kalibrierungen reduziert werden.

## 10.6 Empfehlungen für die Normierung

Für eine einheitliche Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes in der Schweiz drängen sich zwei Massnahmen auf:

- Ergänzung der Norm SN 640 585 [5] mit den Anforderungswerten für den dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$
- Schaffung einer Schweizer Norm für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes

Für die neue Norm wird die folgende Gliederung vorgeschlagen:

### Böden

#### Leichtes Fallgewichtsgesetz LFG

#### A Allgemeines

1. Anwendungsbereich
2. Gegenstand
3. Zweck
4. Begriffe
5. Gerät

#### B Kalibrierung

6. Kalibrierung des Gerätes
7. Kalibrierung der Messergebnisse

### Sols

#### Défectomètre léger LFG

#### A Généralités

1. *Domaine d'application*
2. *Objet*
3. *But*
4. *Définitions*
5. *Appareillage*

#### B Etalonnage

6. *Etalonnage de l'appareillage*
7. *Etalonnage des résultats de mesure*

**C Durchführung**

8. Versuchsbedingungen
9. Vorbereitung der Messstelle
10. Versuchsdurchführung

**D Auswertung**

11. Massgebender  $E_{vd}$ -Wert
12. Auswertung und Darstellung

**E Literaturverzeichnis**

**C Mode opératoire**

8. *Conditions d'essai*
9. *Préparation du site de mesure*
10. *Exécution de l'essai*

**D Mode opératoire**

11. *Valeur déterminante du coefficient  $E_{vd}$*
12. *Interprétation et représentation*

**E Bibliographie**

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Messergebnisse TBA Kanton Uri.....</b>	<b>50</b>
<b>II</b>	<b>Messergebnisse ViaTec AG .....</b>	<b>53</b>
<b>III</b>	<b>Kalibrierstellen in Deutschland und Österreich .....</b>	<b>55</b>

# I Messergebnisse TBA Kanton Uri

Datum	Nr.	M <sub>E1</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	M <sub>E2</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	E <sub>vd</sub>						
				Mittelwert	Messpt. 1	Messpt. 2	Messpt. 3	Messpt. 4	Messpt. 5	Messpt. 6
				[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
19.03.96	U1	100.0	-	57.0						
19.03.96	U2	120.0	-	58.0						
19.03.96	U3	157.9	-	90.0						
10.04.96	U4	34.9	-	34.0						
10.04.96	U5	78.9	-	49.0						
10.04.96	U6	90.9	-	56.0						
18.05.96	U7	60.0	-	57.0						
18.05.96	U8	85.7	-	65.0						
21.05.96	U9	120.0	-	68.0						
21.05.96	U10	120.0	-	77.0						
24.05.96	U11	115.4	-	65.0						
24.05.96	U12	115.4	-	69.0						
24.05.96	U13	136.4	-	78.0						
05.07.96	U14	44.0	-	29.6						
05.07.96	U15	73.2	-	84.6						
05.07.96	U16	96.8	-	99.6						
26.09.96	U17	103.0	-	95.0						
28.09.96	U18	214.0	-	125.0						
22.11.96	U19	135.0	-	75.0						
22.11.96	U20	154.0	-	86.0						
22.11.96	U21	167.0	-	93.0						
02.04.97	U22	80.0	-	49.0						
13.05.97	U23	44.0	-	58.0						
13.05.97	U24	97.0	-	60.0						
20.06.97	U25	100.0	-	71.0						
20.06.97	U26	88.2	-	85.0						
20.06.97	U27	115.4	-	120.0						
03.07.97	U28	60.0	-	48.0						
03.07.97	U29	120.0	-	110.0						
22.07.97	U30	83.3	-	76.2						
22.07.97	U31	130.4	-	102.6						
21.01.98	U32	157.0	-	89.0						
21.01.98	U33	176.0	-	93.0						
21.01.98	U34	100.3	-	105.0						
21.01.98	U35	130.4	-	106.0						
30.04.98	U36	110.0	-	66.7	64.0	63.0	59.0	73.0	71.0	70.0
30.04.98	U37	120.0	-	72.2	74.0	80.0	62.0	83.0	62.0	72.0
30.04.98	U38	107.0	-	72.5	68.0	76.0	68.0	74.0	74.0	75.0
04.05.98	U39	144.0	-	104.3	107.0	98.0	112.0	101.0	104.0	104.0
10.06.98	U40	94.0	-	52.8	53.0	49.3	51.6	50.4	59.3	53.2
10.06.98	U41	93.8	-	58.0	53.2	58.7	71.2	46.0	53.6	65.0
05.09.98	U42	81.7	-	67.4	62.5	63.7	53.6	77.6	78.7	68.2
05.09.98	U43	130.4	-	82.7	92.6	77.6	88.9	80.4	84.6	71.9
08.03.99	U44	120.0	-	79.6	93.0	76.0	82.8	77.9	67.8	79.8
08.03.99	U45	157.9	-	83.4	74.2	101.4	77.1	82.7	81.5	
08.03.99	U46	125.0	-	98.1	108.2	99.6	88.9	99.6	100.0	92.2
08.03.99	U47	157.9	-	105.7	111.4	108.2	107.7	108.2	76.5	122.3
08.03.99	U48	130.4	-	111.6	120.3	109.8	109.2	124.3	107.1	99.1
25.03.99	U49	103.4	-	68.0	66.0	70.3	65.2	59.2	78.4	68.8
11.05.99	U50	150.0	-	90.1	98.3	87.2	87.5	89.5	86.5	91.8
14.12.99	U51	103.4	-	52.8	61.3	52.7	46.5	51.6	50.2	54.3
14.12.99	U52	93.7	-	64.7	62.0	64.1	66.2	67.8	63.9	64.1
21.03.00	U53	96.8	-	54.9	61.1	50.9	56.4	42.1	63.9	
21.03.00	U54	100.0	-	60.1	68.8	60.6	47.6	57.1	66.4	
21.03.00	U55	75.0	-	60.2	60.6	54.9	57.8	64.1	63.4	
22.04.00	U56	52.6	-	42.4	27.3	41.4	41.0	43.3	59.1	
22.04.00	U57	53.5	176.4	43.2	51.1	37.9	27.2	50.9	49.0	
27.04.00	U58	127.6	339.4	67.3	57.1	59.2	61.6	82.1	72.6	71.4
27.04.00	U59	172.2	428.1	82.6	108.2	61.0	74.5	85.2	86.5	80.1

Datum	Nr.	M <sub>E1</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	M <sub>E2</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	E <sub>vd</sub>						
				Mittelwert	Messpt. 1	Messpt. 2	Messpt. 3	Messpt. 4	Messpt. 5	Messpt. 6
				[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
11.11.00	U60	142.0	-	64.5	63.0	59.0	75.0	61.0	72.0	57.0
11.11.00	U61	114.0	-	70.5	66.0	77.0	78.0	69.0	58.0	75.0
11.11.00	U62	110.0	-	72.0	74.0	76.0	66.0	68.0	72.0	76.0
11.11.00	U63	156.0	-	77.5	74.0	88.0	98.0	101.0	37.0	67.0
11.11.00	U64	114.0	-	79.0	96.0	74.0	88.0	69.0	70.0	77.0
11.11.00	U65	128.0	-	80.7	72.0	86.0	91.0	81.0	89.0	65.0
11.11.00	U66	168.0	-	82.3	66.0	84.0	72.0	64.0	90.0	118.0
11.11.00	U67	148.0	-	86.0	80.0	70.0	78.0	104.0	96.0	88.0
11.11.00	U68	152.0	-	87.4	77.5	96.0	95.0	85.0	101.0	70.0
11.11.00	U69	200.0	-	100.5	107.0	110.0	98.0	87.0	100.0	101.0
11.11.00	U70	168.0	-	109.8	96.0	112.0	121.0	116.0	104.0	
30.11.00	U71	130.3	-	64.2	69.4	72.3	71.2	64.5	51.5	56.3
30.11.00	U72	126.0	-	65.6	58.4	61.3	67.6	71.7	68.8	65.8
30.11.00	U73	109.8	-	66.6	62.7	66.2	65.6	64.7	71.4	69.2
30.11.00	U74	97.5	-	66.9	67.6	73.3	72.8	51.4	66.6	69.4
30.11.00	U75	91.9	-	68.1	73.3	68.4	72.8	79.2	58.1	57.0
30.11.00	U76	107.0	-	70.1	67.0	75.5	65.0	69.0	71.0	72.8
30.11.00	U77	123.2	-	72.9	70.3	67.2	82.7	66.0	69.2	82.1
30.11.00	U78	115.8	-	73.5	72.3	72.1	83.6	68.7	69.4	74.8
30.11.00	U79	105.7	-	73.9	75.5	67.8	80.1	78.7	63.4	77.6
30.11.00	U80	102.5	-	74.6	71.2	80.9	72.1	73.1	65.2	85.2
30.11.00	U81	123.7	-	77.4	69.7	80.1	91.8	83.0	73.5	66.2
30.11.00	U82	123.9	-	81.2	84.0	93.4	79.8	83.6	72.3	74.0
24.10.01	U83	47.6	90.9	37.3	37.3	45.5	38.4	38.9	30.7	32.9
24.10.01	U84	85.7	250.0	69.1	71.9	87.9	78.4	68.6	50.1	57.7
26.10.01	U85	100.0	230.8	48.0	49.7	39.5	49.1	44.8	52.9	52.1
26.10.01	U86	120.0	-	52.2	30.7	42.8	63.4	65.8	69.9	40.3
26.10.01	U87	100.0	214.3	54.6	48.9	53.3	57.8	56.0	48.1	63.4
26.10.01	U88	94.6	222.2	55.4	43.9	53.7	54.9	61.0	57.5	61.5
26.10.01	U89	72.9	212.9	72.7	80.4	70.5	70.1	82.7	58.9	73.5
26.10.01	U90	96.8	230.8	79.3	70.5	56.8	78.1	85.9	107.7	76.8
08.11.01	U91	120.0	-	57.1	54.1	58.1	54.2	56.0	60.0	60.0
08.11.01	U92	78.9	230.8	60.4	65.6	68.2	48.4	57.7	53.1	69.4
10.11.01	U93	32.0	-	25.1	23.0	40.0	16.5	27.2	19.0	
17.11.01	U94	142.9	-	89.7	106.6	72.3	81.5	91.1	110.3	76.5
17.04.02	U95	56.9	132.0	50.8	47.0	49.0	51.0	53.0	52.0	53.0
17.04.02	U96	59.6	144.0	51.3	57.0	51.0	48.0	41.0	55.0	56.0
03.05.02	U97	46.1	216.6	32.7	32.0	28.0	40.0	36.0	21.0	39.0
03.05.02	U98	54.1	213.3	51.2	60.0	50.0	51.0	48.0	49.0	49.0
03.05.02	U99	61.3	60.0	55.2	61.0	48.0	55.0	59.0	57.0	51.0
11.05.02	U100	38.9	222.9	35.3	37.0	30.0	40.0	31.0	38.0	36.0
11.05.02	U101	59.0	247.2	47.2	47.0	51.0	41.0	44.0	42.0	58.0
11.05.02	U102	66.0	227.5	52.5	45.0	48.0	61.0	55.0	54.0	52.0
11.05.02	U103	67.7	229.0	55.8	57.0	55.0	48.0	68.0	53.0	54.0
18.05.02	U104	47.0	235.1	39.7	41.0	30.0	35.0	41.0	43.0	48.0
18.05.02	U105	68.4	270.6	60.2	61.0	59.0	53.0	61.0	63.0	64.0
05.06.02	U106	67.0	262.1	52.5	51.0	53.0	45.0	61.0		
05.06.02	U107	72.8	190.1	59.0	68.0	51.0	53.0	59.0	61.0	62.0
05.06.02	U108	106.0	228.0	71.3	71.0	75.0	64.0	69.0	71.0	78.0
05.06.02	U109	97.5	253.5	79.8	75.0	88.0	81.0	80.0	77.0	78.0
11.06.02	U110	94.0	-	52.7	53.0	49.0	52.0	50.0	59.0	53.0
11.06.02	U111	94.0	-	58.0	53.0	59.0	71.0	46.0	54.0	65.0
02.07.02	U112	91.3	100.0	67.5	69.0	71.0	68.0	70.0	59.0	68.0
02.07.02	U113	128.8	407.0	70.8	82.0	74.0	70.0	69.0	62.0	68.0
02.07.02	U114	113.6	404.0	75.3	75.0	81.0	71.0	70.0	80.0	75.0
02.07.02	U115	100.6	347.6	76.8	75.0	78.0	81.0	83.0	74.0	70.0
02.07.02	U116	132.8	458.7	82.7	81.0	88.0	81.0	78.0	82.0	86.0
23.07.02	U117	103.6	221.9	76.0	73.0	80.0	75.0	76.0	81.0	71.0
23.07.02	U118	117.8	269.4	79.2	78.0	75.0	90.0	82.0	74.0	76.0
30.08.02	U119	68.7	212.4	54.3	60.0	51.0	53.0	45.0	59.0	58.0
31.08.02	U120	141.6	404.6	81.3	80.0	75.0	76.0	91.0	85.0	81.0
31.08.02	U121	139.7	356.8	83.8	78.0	80.0	89.0	88.0	78.0	90.0
06.09.02	U122	82.0	-	67.7	63.0	64.0	54.0	78.0	79.0	68.0
06.09.02	U123	130.0	-	82.8	93.0	78.0	89.0	80.0	85.0	72.0
06.09.02	U124	67.0	-	87.3	85.0	87.0	89.0	73.0	93.0	97.0

Datum	Nr.	M <sub>E1</sub>	M <sub>E2</sub>	E <sub>vd</sub>						
				Mittelwert	Messpt. 1	Messpt. 2	Messpt. 3	Messpt. 4	Messpt. 5	Messpt. 6
		[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
19.09.02	U125	71.4	230.8	63.3	55.0	61.0	66.0	71.0	55.0	72.0
19.09.02	U126	85.7	-	67.8	61.0	69.0	73.0	70.0	69.0	65.0
19.09.02	U127	100.0	-	70.8	68.0	71.0	75.0	73.0	69.0	69.0
19.09.02	U128	100.0	-	73.5	77.0	71.0	69.0	76.0	80.0	68.0
19.09.02	U129	136.8	-	91.2	90.0	88.0	98.0	90.0	93.0	88.0
08.10.02	U130	43.9	184.0	37.2	43.0	30.0	39.0	38.0	41.0	32.0
08.10.02	U131	57.2	193.9	48.7	44.0	41.0	45.0	50.0	52.0	60.0
08.10.02	U132	92.6	208.8	72.2	69.0	80.0	71.0	69.0	70.0	74.0
10.10.02	U133	117.8	238.1	66.8	78.0	66.0	60.0	61.0	71.0	65.0
10.10.02	U134	115.2	280.2	85.2	80.0	88.0	86.0	90.0	81.0	86.0
10.10.02	U135	184.1	400.0	105.8	105.0	116.0	103.0	99.0	111.0	101.0
26.10.02	U136	119.9	375.0	74.5	88.0	71.0	76.0	72.0	69.0	71.0
26.10.02	U137	123.1	317.1	75.7	71.0	86.0	81.0	69.0	73.0	74.0
06.06.03	U138	90.9	258.8	62.5	66.0	59.0	68.0	59.0	63.0	60.0
06.06.03	U139	97.1	246.4	68.0	71.0	60.0	64.0	68.0	70.0	75.0
06.06.03	U140	116.0	266.2	79.2	74.0	80.0	82.0	76.0	83.0	80.0
06.06.03	U141	112.7	235.9	79.3	82.0	86.0	73.0	76.0	80.0	79.0
13.06.03	U142	95.9	228.9	68.3	66.0	72.0	76.0	71.0	62.0	63.0
13.06.03	U143	151.4	322.7	88.7	81.0	88.0	96.0	90.0	86.0	91.0
12.07.03	U144	122.8	272.9	75.8	88.0	75.0	70.0	69.0	81.0	72.0
12.07.03	U145	124.1	232.1	78.7	79.0	77.0	81.0	83.0	73.0	79.0
12.07.03	U146	125.0	-	83.3	85.0	78.0	79.0	90.0	88.0	80.0
12.07.03	U147	200.0	-	100.5	88.0	101.0	110.0	103.0	106.0	95.0
17.07.03	U148	120.6	366.9	71.5	69.0	80.0	75.0	62.0	73.0	70.0
17.07.03	U149	111.5	287.7	76.0	69.0	75.0	80.0	81.0	75.0	76.0
03.09.03	U150	71.4	-	54.5	56.0	60.0	51.0	55.0	53.0	52.0
03.09.03	U151	142.9	-	88.2	88.0	90.0	96.0	88.0	81.0	86.0
13.09.03	U152	115.0	262.1	76.2	60.0	80.0	75.0	71.0	88.0	83.0
13.09.03	U153	204.9	488.3	112.0	110.0	121.0	100.0	109.0	115.0	117.0
26.09.03	U154	81.5	218.5	61.0	65.0	56.0	50.0	61.0	66.0	68.0
26.09.03	U155	79.4	114.3	61.3	70.0	61.0	58.0	56.0	63.0	60.0
26.09.03	U156	77.8	202.2	62.0	63.0	58.0	73.0	61.0	53.0	64.0
26.09.03	U157	117.5	252.2	76.7	88.0	71.0	69.0	73.0	78.0	81.0
26.09.03	U158	136.4	225.4	86.8	86.0	91.0	81.0	80.0	90.0	93.0
11.10.03	U159	88.7	260.6	68.8	69.0	71.0	58.0	77.0	70.0	68.0
11.10.03	U160	110.2	248.3	77.3	95.0	70.0	76.0	80.0	73.0	70.0
11.10.03	U161	114.2	311.2	78.7	79.0	83.0	77.0	70.0	80.0	83.0
06.11.03	U162	90.6	235.5	72.5	69.0	74.0	69.0	78.0	75.0	70.0
09.12.03	U163	91.8	491.8	69.3	61.0	66.0	71.0	75.0	70.0	73.0
09.12.03	U164	89.8	253.5	69.8	73.0	80.0	69.0	65.0	66.0	66.0
22.11.04	U165	105.0	-	66.8	65.0	63.0	82.0	99.0	46.0	46.0
22.11.04	U166	130.0	-	68.0	69.0	65.0	60.0	65.0	80.0	69.0
22.11.04	U167	116.0	-	75.7	89.0	72.0	68.0	79.0	77.0	69.0
22.11.04	U168	109.0	-	77.7	82.0	82.0	79.0	85.0	71.0	67.0
22.11.04	U169	134.0	-	78.0	81.0	87.0	83.0	68.0	69.0	80.0
22.11.04	U170	141.0	-	84.3	74.0	88.0	84.0	77.0	120.0	63.0
22.11.04	U171	123.0	-	86.0	80.0	94.0	75.0	93.0	94.0	80.0
22.11.04	U172	146.0	-	93.5	95.0	88.0	96.0	87.0	100.0	95.0
22.11.04	U173	157.0	-	104.3	104.0	114.0	86.0	102.0	110.0	110.0
22.11.04	U174	220.0	-	113.2	105.0	125.0	130.0	104.0	105.0	110.0
22.11.04	U175	145.0	-	114.0	109.0	127.0	100.0	116.0	122.0	110.0
22.11.04	U176	149.0	-	120.0	122.0	130.0	116.0	120.0	117.0	115.0
22.11.04	U177	92.0	-	63.0	67.0	56.0	67.0	57.0	66.0	65.0
22.11.04	U178	97.5	-	79.3	85.0	77.0	77.0	91.0	85.0	61.0
22.11.04	U179	124.0	-	84.0	89.0	92.0	70.0	102.0	78.0	73.0
22.11.04	U180	107.0	-	73.5	78.0	70.0	85.0	65.0	73.0	70.0
22.11.04	U181	102.0	-	78.2	75.0	80.0	78.0	86.0	65.0	85.0
22.11.04	U182	106.0	-	78.3	78.0	73.0	80.0	83.0	82.0	74.0
22.11.04	U183	124.0	-	96.3	120.0	96.0	102.0	90.0	81.0	89.0

## II Messergebnisse ViaTec AG

Datum	Nr.	M <sub>E1</sub>	M <sub>E2</sub>	E <sub>vd</sub>						
				Mittelwert	Messpt. 1	Messpt. 2	Messpt. 3	Messpt. 4	Messpt. 5	Messpt. 6
		[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
09.03.03	V1	130.4	-	111.6	120.3	109.8	109.2	124.3	107.1	99.1
09.03.03	V2	214.2	-	120.9	138.0	99.1	106.1	133.9	141.5	106.6
09.03.03	V3	157.9	-	105.7	111.4	108.2	107.7	108.2	76.5	122.3
09.03.03	V4	125.0	-	98.1	108.2	99.6	88.9	99.6	100.0	92.2
09.03.03	V5	157.9	-	83.4	74.2	101.4	77.1	82.7	81.5	
09.03.03	V6	120.0	-	79.6	93.0	76.0	82.8	77.9	67.8	79.8
26.03.03	V7	103.4	-	68.0	66.0	70.3	65.2	59.2	78.4	68.8
12.05.03	V8	150.0	-	90.1	98.3	87.2	87.5	89.5	86.5	91.8
15.12.03	V9	103.4	-	52.8	61.3	52.7	46.5	51.6	50.2	54.3
15.12.03	V10	93.7	-	64.7	62.0	64.1	66.2	67.8	63.9	64.1
22.03.04	V11	96.8	-	54.9	61.1	50.9	56.4	42.1	63.9	
22.03.04	V12	100.0	-	60.1	68.8	60.6	47.6	57.1	66.4	
22.03.04	V13	75.0	-	60.2	60.6	54.9	57.8	64.1	63.4	
23.04.04	V14	52.6	-	42.4	27.3	41.4	41.0	43.3	59.1	
23.04.04	V15	53.5	176.4	43.2	51.1	37.9	27.2	50.9	49.0	
28.04.04	V16	127.6	339.4	67.3	57.1	59.2	61.6	82.1	72.6	71.4
28.04.04	V17	172.2	428.1	82.6	108.2	61.0	74.5	85.2	86.5	80.1
01.12.04	V18	130.3	-	64.2	69.4	72.3	71.2	64.5	51.5	56.3
01.12.04	V19	91.9	-	68.1	73.3	68.4	72.8	79.2	58.1	57.0
01.12.04	V20	97.5	-	66.9	67.6	73.3	72.8	51.4	66.6	69.4
01.12.04	V21	123.7	-	77.4	69.7	80.1	91.8	83.0	73.5	66.2
01.12.04	V22	107.0	-	70.1	67.0	75.5	65.0	69.0	71.0	72.8
01.12.04	V23	102.5	-	74.6	71.2	80.9	72.1	73.1	65.2	85.2
01.12.04	V24	105.7	-	73.9	75.5	67.8	80.1	78.7	63.4	77.6
01.12.04	V25	123.9	-	81.2	84.0	93.4	79.8	83.6	72.3	74.0
01.12.04	V26	123.2	-	72.9	70.3	67.2	82.7	66.0	69.2	82.1
01.12.04	V27	109.8	-	66.6	62.7	66.2	65.6	64.7	71.4	69.2
01.12.04	V28	115.8	-	73.5	72.3	72.1	83.6	68.7	69.4	74.8
01.12.04	V29	126.0	-	65.6	58.4	61.3	67.6	71.7	68.8	65.8
25.10.05	V30	85.7	250.0	69.1	71.9	87.9	78.4	68.6	50.1	57.7
25.10.05	V31	47.6	90.9	37.3	37.3	45.5	38.4	38.9	30.7	32.9
27.10.05	V32	120.0	-	52.2	30.7	42.8	63.4	65.8	69.9	40.3
27.10.05	V33	96.8	230.8	79.3	70.5	56.8	78.1	85.9	107.7	76.8
27.10.05	V34	100.0	230.8	48.0	49.7	39.5	49.1	44.8	52.9	52.1
27.10.05	V35	100.0	214.3	54.6	48.9	53.3	57.8	56.0	48.1	63.4
27.10.05	V36	94.6	222.2	55.4	43.9	53.7	54.9	61.0	57.5	61.5
27.10.05	V37	72.9	212.9	72.7	80.4	70.5	70.1	82.7	58.9	73.5
09.11.05	V38	78.9	230.8	60.4	65.6	68.2	48.4	57.7	53.1	69.4
09.11.05	V39	120.0	-	57.1	54.1	58.1	54.2	56.0	60.0	60.0
11.11.05	V40	32.0	-	25.1	23.0	40.0	16.5	27.2	19.0	
18.11.05	V41	142.9	-	89.7	106.6	72.3	81.5	91.1	110.3	76.5
18.04.06	V42	59.6	144.0	51.3	57.0	51.0	48.0	41.0	55.0	56.0
18.04.06	V43	56.9	132.0	50.8	47.0	49.0	51.0	53.0	52.0	53.0
04.05.06	V44	54.1	213.3	51.2	60.0	50.0	51.0	48.0	49.0	49.0
04.05.06	V45	46.1	216.6	32.7	32.0	28.0	40.0	36.0	21.0	39.0
04.05.06	V46	61.3	60.0	55.2	61.0	48.0	55.0	59.0	57.0	51.0
12.05.06	V47	67.7	229.0	55.8	57.0	55.0	48.0	68.0	53.0	54.0
12.05.06	V48	59.0	247.2	47.2	47.0	51.0	41.0	44.0	42.0	58.0
12.05.06	V49	38.9	222.9	35.3	37.0	30.0	40.0	31.0	38.0	36.0
12.05.06	V50	66.0	227.5	52.5	45.0	48.0	61.0	55.0	54.0	52.0
19.05.06	V51	47.0	235.1	39.7	41.0	30.0	35.0	41.0	43.0	48.0
19.05.06	V52	68.4	270.6	60.2	61.0	59.0	53.0	61.0	63.0	64.0
06.06.06	V53	106.0	228.0	71.3	71.0	75.0	64.0	69.0	71.0	78.0
06.06.06	V54	67.0	262.1	52.5	51.0	53.0	45.0	61.0		
06.06.06	V55	97.5	253.5	79.8	75.0	88.0	81.0	80.0	77.0	78.0
06.06.06	V56	72.8	190.1	59.0	68.0	51.0	53.0	59.0	61.0	62.0
03.07.06	V57	100.6	347.6	76.8	75.0	78.0	81.0	83.0	74.0	70.0
03.07.06	V58	128.8	407.0	70.8	82.0	74.0	70.0	69.0	62.0	68.0
03.07.06	V59	132.8	458.7	82.7	81.0	88.0	81.0	78.0	82.0	86.0
03.07.06	V60	113.6	404.0	75.3	75.0	81.0	71.0	70.0	80.0	75.0
03.07.06	V61	91.3	100.0	67.5	69.0	71.0	68.0	70.0	59.0	68.0

Datum	Nr.	M <sub>E1</sub>	M <sub>E2</sub>	E <sub>vd</sub>						
				Mittelwert	Messpt. 1	Messpt. 2	Messpt. 3	Messpt. 4	Messpt. 5	Messpt. 6
		[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
24.07.06	V62	<b>103.6</b>	221.9	<b>76.0</b>	73.0	80.0	75.0	76.0	81.0	71.0
24.07.06	V63	<b>117.8</b>	269.4	<b>79.2</b>	78.0	75.0	90.0	82.0	74.0	76.0
31.08.06	V64	<b>68.7</b>	212.4	<b>54.3</b>	60.0	51.0	53.0	45.0	59.0	58.0
01.09.06	V65	<b>139.7</b>	356.8	<b>83.8</b>	78.0	80.0	89.0	88.0	78.0	90.0
01.09.06	V66	<b>141.6</b>	404.6	<b>81.3</b>	80.0	75.0	76.0	91.0	85.0	81.0
20.09.06	V67	<b>100.0</b>	-	<b>73.5</b>	77.0	71.0	69.0	76.0	80.0	68.0
20.09.06	V68	<b>136.8</b>	-	<b>91.2</b>	90.0	88.0	98.0	90.0	93.0	88.0
20.09.06	V69	<b>85.7</b>	-	<b>67.8</b>	61.0	69.0	73.0	70.0	69.0	65.0
20.09.06	V70	<b>71.4</b>	230.8	<b>63.3</b>	55.0	61.0	66.0	71.0	55.0	72.0
20.09.06	V71	<b>100.0</b>	-	<b>70.8</b>	68.0	71.0	75.0	73.0	69.0	69.0
09.10.06	V72	<b>57.2</b>	193.9	<b>48.7</b>	44.0	41.0	45.0	50.0	52.0	60.0
09.10.06	V73	<b>43.9</b>	184.0	<b>37.2</b>	43.0	30.0	39.0	38.0	41.0	32.0
09.10.06	V74	<b>92.6</b>	208.8	<b>72.2</b>	69.0	80.0	71.0	69.0	70.0	74.0
11.10.06	V75	<b>115.2</b>	280.2	<b>85.2</b>	80.0	88.0	86.0	90.0	81.0	86.0
11.10.06	V76	<b>184.1</b>	400.4	<b>105.8</b>	105.0	116.0	103.0	99.0	111.0	101.0
11.10.06	V77	<b>117.8</b>	238.1	<b>66.8</b>	78.0	66.0	60.0	61.0	71.0	65.0
27.10.06	V78	<b>119.9</b>	375.0	<b>74.5</b>	88.0	71.0	76.0	72.0	69.0	71.0
27.10.06	V79	<b>123.1</b>	317.1	<b>75.7</b>	71.0	86.0	81.0	69.0	73.0	74.0
07.06.07	V80	<b>90.9</b>	258.8	<b>62.5</b>	66.0	59.0	68.0	59.0	63.0	60.0
07.06.07	V81	<b>97.1</b>	246.4	<b>68.0</b>	71.0	60.0	64.0	68.0	70.0	75.0
07.06.07	V82	<b>116.0</b>	266.2	<b>79.2</b>	74.0	80.0	82.0	76.0	83.0	80.0
07.06.07	V83	<b>112.7</b>	235.9	<b>79.3</b>	82.0	86.0	73.0	76.0	80.0	79.0
14.06.07	V84	<b>95.9</b>	228.9	<b>68.3</b>	66.0	72.0	76.0	71.0	62.0	63.0
14.06.07	V85	<b>151.4</b>	322.7	<b>88.7</b>	81.0	88.0	96.0	90.0	86.0	91.0
13.07.07	V86	<b>200.0</b>	-	<b>100.5</b>	88.0	101.0	110.0	103.0	106.0	95.0
13.07.07	V87	<b>125.0</b>	-	<b>83.3</b>	85.0	78.0	79.0	90.0	88.0	80.0
13.07.07	V88	<b>124.1</b>	232.1	<b>78.7</b>	79.0	77.0	81.0	83.0	73.0	79.0
13.07.07	V89	<b>122.8</b>	272.9	<b>75.8</b>	88.0	75.0	70.0	69.0	81.0	72.0
18.07.07	V90	<b>111.5</b>	287.7	<b>76.0</b>	69.0	75.0	80.0	81.0	75.0	76.0
18.07.07	V91	<b>120.6</b>	366.9	<b>71.5</b>	69.0	80.0	75.0	62.0	73.0	70.0
04.09.07	V92	<b>71.4</b>	-	<b>54.5</b>	56.0	60.0	51.0	55.0	53.0	52.0
04.09.07	V93	<b>142.9</b>	-	<b>88.2</b>	88.0	90.0	96.0	88.0	81.0	86.0
14.09.07	V94	<b>204.9</b>	488.3	<b>112.0</b>	110.0	121.0	100.0	109.0	115.0	117.0
14.09.07	V95	<b>115.0</b>	262.1	<b>76.2</b>	60.0	80.0	75.0	71.0	88.0	83.0
27.09.07	V96	<b>136.4</b>	225.4	<b>86.8</b>	86.0	91.0	81.0	80.0	90.0	93.0
27.09.07	V97	<b>81.5</b>	218.5	<b>61.0</b>	65.0	56.0	50.0	61.0	66.0	68.0
27.09.07	V98	<b>77.8</b>	202.2	<b>62.0</b>	63.0	58.0	73.0	61.0	53.0	64.0
27.09.07	V99	<b>79.4</b>	114.3	<b>61.3</b>	70.0	61.0	58.0	56.0	63.0	60.0
27.09.07	V100	<b>117.5</b>	252.2	<b>76.7</b>	88.0	71.0	69.0	73.0	78.0	81.0
12.10.07	V101	<b>114.2</b>	311.2	<b>78.7</b>	79.0	83.0	77.0	70.0	80.0	83.0
12.10.07	V102	<b>88.7</b>	260.6	<b>68.8</b>	69.0	71.0	58.0	77.0	70.0	68.0
12.10.07	V103	<b>110.2</b>	248.3	<b>77.3</b>	95.0	70.0	76.0	80.0	73.0	70.0
07.11.07	V104	<b>90.6</b>	235.5	<b>72.5</b>	69.0	74.0	69.0	78.0	75.0	70.0
10.12.07	V105	<b>91.8</b>	491.8	<b>69.3</b>	61.0	66.0	71.0	75.0	70.0	73.0
10.12.07	V106	<b>89.8</b>	253.5	<b>69.8</b>	73.0	80.0	69.0	65.0	66.0	66.0

### III Kalibrierstellen in Deutschland und Österreich

Technische Universität Freiberg  
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau  
Gustav-Zeuner-Straße 1a, 09596 Freiberg  
Tel.: 03731-39 43 19  
E-Mail: Gassner@mabb.tu-freiberg.de

MPA Kalibrierdienst GmbH  
Luxemburger Straße 21, 13353 Berlin  
Telefon: 030 4579 8580  
E-Mail: info@mpa-Kalibrierdienst.de

HMP Magdeburger Prüfgerätebau GmbH  
Bülstringer Straße 6, 39126 Magdeburg  
Telefon: 0391 25146-66  
E-Mail: info@hmp-online.de

Landesstrassenbaubehörde Sachsen-Anhalt  
FG Bautechnik/Prüf- und Kalibrierstelle  
Rabahne 4, 38820 Halberstadt  
Telefon 03941 661-2125  
E-Mail: Reinhardt.Nickol@lsbb.sachsen-anhalt.de

Zorn Instruments  
Benzstraße 1, 39576 Stendal  
Telefon: 03931 2527-318  
E-Mail: roenne@zorn-instruments.de

Technische Universität München - Zentrum Geotechnik  
Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik  
Baumbachstraße 7, 81245 München  
Telefon: 089 289271-33  
E-Mail: grundbau@bv.tum.de

TERRATEST GmbH  
Dianastrasse 4, 16565 Lehnitz/Berlin  
Telefon: 03301 700 700  
E-Mail: b.korsch@terratest.de

Technische Universität Wien  
Institut für Geotechnik  
Karlsplatz 13, A-1040 Wien  
Telefon: + 43 158801 221-01  
E-Mail: kalibrierung@tuwien.ac.at

## Abkürzungen

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
LFG	Leichtes Fallgewichtsgerät
SN	Schweizer Norm
TP	Technische Prüfvorschriften
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
FGSV	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln
BAST	Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch Gladbach
FSV	Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse - Schiene - Verkehr, Wien
$M_E$	Verformungsmodul des Bodens
$M_{E1}$	Verformungsmodul des Bodens bei Erstbelastung
$M_{E2}$	Verformungsmodul des Bodens bei Zweitbelastung
$f_E$	Verhältniszahl der $M_E$ -Werte
$E_{v1}$	statischer Verformungsmodul des Bodens bei Erstbelastung
$E_{v2}$	statischer Verformungsmodul des Bodens bei Zweitbelastung
$E_{vd}$	elastischer Verformungsmodul des Bodens

## Literaturverzeichnis

- 
- [1] Brandl H. et al.; Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät, Grundlagenforschung und praktische Anwendung; Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie Strassenforschung, Heft 533, Wien 2003
- 
- [2] Deutsche Bahn DB; NGT 39, Richtlinie für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgerätes im Eisenbahnbau, 1997
- 
- [3] Orrje O; The use of dynamic plate load tests in determining deformation properties of soil; PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1996
- 
- [4] RVS 08.03.04 Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches; FSV Wien 2008
- 
- [5] SN 640 585b Verdichtung und Tragfähigkeit; Anforderungen, VSS 2006
- 
- [6] SN 670 312b VSS-Gerät für den Plattendruckversuch  $E_v$  und  $M_E$ , VSS 1998
- 
- [7] SN 670 317b Böden; Plattendruckversuch  $E_v$  und  $M_E$ , VSS 1998
- 
- [8] TP BF-StB, Teil B 8.3: Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Strassenbau, Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgerät; FGSV Köln 2003
- 
- [9] ZTV A-StB 12: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen; FGSV Köln 2012
- 
- [10] ZTV E-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau; FGSV Köln 2009
- 
- [11] Zorn; Bedienungsanleitung Leichtes Fallgewichtsgerät ZFG 01 nach Technischer Prüfvorschrift für Boden und Fels im Strassenbau, TP BF – StB Teil B 8.3; Stendal 1999
- 
- [12] Dériaz P., Scazziga I.; Das Messgerät Dynaplaque; Schlussbericht zu Forschungsauftrag 27/77, ISETH Zürich 1979
-

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 08.05.2013/25.06.2013

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2002/501  
 Projekttitel: Anwendbarkeit des Leichten Fallgewichtsgesetzes LFG für die Verdichtungskontrolle von ungebundenen Fundationsschichten  
 Enddatum: 08.05.2013

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Beim Leichten Fallgewichtsgesetz handelt es sich wie beim Plattendruckversuch um ein Prüfverfahren zur punktuellen Messung der Tragfähigkeit ungebundener Schichten. Das Gerät eignet sich insbesondere als Alternative zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle oder für die Eigenüberwachung des Unternehmers. Da das für den Plattendruckversuch erforderliche Gegengewicht entfällt kann das LFG dank seinem geringen Gewicht sowie der einfachen Handhabung durch eine Person auch an schwer zugänglichen Stellen eingesetzt werden. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, die kostengünstige Anwendung und die direkte Verfügbarkeit der Ergebnisse machen das Leichte Fallgewichtsgesetz zu einem für den Baustellenalltag sehr geeigneten Prüfmittel. Das Forschungsvorhaben beschränkte sich auf die Prüfung von ungebundenen Fundationsschichten, den weitaus häufigsten Anwendungsfall des Plattendruckversuches. Insgesamt wurden die Werte von 241 Messstellen ausgewertet, bei denen sowohl der statische ME1-Wert als auch der dynamische Verformungsmodul E<sub>vd</sub> ermittelt wurden. Die Versuchsanordnung wurde so gewählt, dass eine gute Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erwarten war.

Die Auswertung des Forschungsprojektes zeigt auf, wie das Leichte Fallgewichtsgesetz für die Eigenüberwachung des Unternehmers und die Kontrollprüfungen des Bauherrn den Plattendruckversuch nach SN 670 317b [6] ersetzen kann. Dabei werden auch Aussagen gemacht,

- unter welchen Randbedingungen
- mit welcher Aussagekraft
- mit welchen Einschränkungen

das im Baustelleneinsatz kostengünstigere Leichte Fallgewichtsgesetz LFG für die Überprüfung von Tragfähigkeit und Verdichtung ungebundener Fundationsschichten verwendet werden kann.

Bei der praktischen Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesetzes werden verschiedene Beurteilungsmöglichkeiten aufgezeigt:

- mittels der Regressionsgleichung
- mittels Korrekturfaktor
- mit Anforderungswerten



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Forschungsziel wurde erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesätes im Rahmen von Kontrollprüfungen können Anforderungswerte für den dynamischen Verformungsmodul E<sub>vd</sub> in die SN 640 585 aufgenommen werden.

Eine neue Norm für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgesätes soll die Anforderungen an das Prüfgerät, die Vorgehensweise beim Kalibrieren sowie Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messungen regeln.

Publikationen:

keine

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Bodmer

Vorname: Peter

Amt, Firma, Institut: Viatec AG Winterthur

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die Forschung zeigt auf, dass das Leichte Fallgewichts Gerät (LFG) oder englisch LFWD (Light Falling Weight Deflectometer) für die Prüfung von ungebundenen Fundationsschichten ein zweckmässiges und praktisches Gerät ist. Das Gerät kann auch an schlecht zugänglichen Stellen eingesetzt werden. Das Gerät eignet sich sehr gut zur Eigenüberwachung. Für Kontrollprüfungen des Bauherrn sind für jede Baustelle die Korrelationen mit dem Plattenversuch zu überprüfen, bzw. es sind parallel Plattendruckversuche durchzuführen.  
Das Gerät wurde für ungebundene Gemische der Fundationsschicht untersucht. Bei bindigen Böden (Unterbau) mit Feinanteilen können bei dynamischer Belastung undrainierte Effekte auftreten, die keine zuverlässige Aussage mehr erlauben.

##### Umsetzung:

Die Norm SN 640 585 ist anzupassen und es sind die Anforderungswerte des dynamischen Verformungsmoduls einzuführen. Die Grenzen des Verfahrens als Kontrollmethode sind anzugeben.  
Es ist eine Gerätenorm zu verfassen.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

keiner.

##### Einfluss auf Normenwerk:

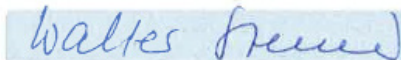
Ergänzung der SN 640 585.  
Neue Norm für Leichtes Fallgewichtgerät, inkl. Norm über Kalibrierung.

##### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Steiner Vorname: Walter

Amt, Firma, Institut: B+S AG, Muristrasse 60, 3000 Bern 31 (Präsident EK 5.07, Mitglied FK5)

##### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 31.10.2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektiertungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Viellissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologietransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011