

# **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 143**

**bast**

# **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

von

Gerhard Bräu  
Stefan Vogt

Technische Universität München Zentrum Geotechnik  
Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau,  
Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 143**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst Forschung kompakt berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung. <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 05.0187**  
s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

**Fachbetreuung**  
Christine Kellermann-Kinner

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-516-3

Bergisch Gladbach, Juni 2020

## Kurzfassung – Abstract

### s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

Dynamische Plattendruckversuche (Leichte (LFG) und mittelschwere (MFG) Fallgewichtsgeräte) dienen zur Prüfung der Tragfähigkeit ungebundener Böden und Tragschichten. Dabei wird die maximale Setzung  $s$ , die maximale Setzungsgeschwindigkeit  $v$  der Lastplatte, der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  und das Verhältnis  $s/v$  für eine standardisierte Stoßbelastung ermittelt.

In den ZTV E-StB ist die Aussagekraft des  $E_{vd}$ -Wertes gemessen mit dem LFG in Bezug auf die Tragfähigkeit durch entsprechende Anforderungswerte bereits anerkannt. Für Verformungsmoduln  $E_{vd,MFG}$  des MFG ist die Einführung von Prüfkriterien aufgrund wachsender Erfahrungen bald zu erwarten.

Der Quotient  $s/v$  wird in der Baupraxis boden- oder projektspezifisch herangezogen, um entweder direkt auf den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  oder um auf eine weitere mögliche Verdichtung zu schließen. Derartige Möglichkeiten zur Anwendung des Wertes  $s/v$  konnten jedoch in den durchgeführten umfangreichen Reihen von Feldversuchen nicht bestätigt werden.

Es zeigte sich vielmehr, dass Korrelationen zwischen dem  $s/v$ -Werten und  $E_{vd}$ -Werten oder  $E_{V2}$ -Werten bodenspezifisch gut möglich sind. Der  $E_{vd}$ - und der  $s/v$ -Wert sind aufgrund der vorliegenden Korrelationen als gegenseitige Alternative jedoch nicht als sich ergänzende Kriterien zu sehen. Letzteres wäre aus einer Zuordnung des  $s/v$ -Wertes zum  $E_{V2}/E_{V1}$ -Wert möglich. Eine derartige Korrelation zeigt jedoch für alle untersuchten Materialien nur sehr geringe Korrelationskoeffizienten. Weitere Untersuchungen hierzu sind erforderlich, da sowohl der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis  $E_{V2}/E_{V1}$  und dem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  als auch zu den Messwerten  $s$  und  $v$  bodenmechanisch schwierig zu interpretieren sind.

Es wurden gerätespezifische Unterschiede bei der Kalibrierung von LFG und MFG in verschiedenen anerkannten Kalibrierstellen festgestellt. Diese teilweise signifikanten gerätespezifischen Unterschiede sind jedoch offensichtlich für die Ergebnisse in Feldversuchen von untergeordneter Bedeutung.

### s/v-value in the dynamic plate load test

Dynamic plate load tests (light (LFG) and medium (MFG) drop-weight devices) are used to test the bearing capacity of unbound soils and base layers. The maximum settlement  $s$ , the maximum settlement velocity  $v$  of the load plate, the dynamic deformation modulus  $E_{vd}$  and the ratio  $s/v$  for a standardised impact load are determined.

In the ZTV E-StB, the meaningfulness of the  $E_{vd}$  value measured with the LFG in relation to the load-bearing capacity is already recognised by corresponding requirement values. For the deformation moduli  $E_{vd,MFG}$  of the MFG, the introduction of test criteria is to be expected soon due to growing experience.

In construction practice, the  $s/v$  quotient is used soil- or project-specifically in order either to directly deduce the degree of compaction  $D_{Pr}$  or to infer further possible compaction. Such possibilities for the application of the value  $s/v$ , however, could not be confirmed in the extensive series of field tests carried out.

Rather, it was found that correlations between the  $s/v$  values and  $E_{vd}$  values or  $E_{V2}$  values are well possible for specific soils. However, the  $E_{vd}$  and  $s/v$  values should not be seen as complementary criteria due to the existing correlations as mutual alternatives. The latter would be possible by assigning the  $s/v$  value to the  $E_{V2}/E_{V1}$  value. However, such a correlation shows only very low correlation coefficients for all investigated materials. Further investigations are necessary because the correlation between the ratio  $E_{V2}/E_{V1}$  and the degree of compaction  $D_{Pr}$  as well as to the measured values  $s$  and  $v$  is difficult to interpret from a soil mechanics point of view.

Device-specific differences were found in the calibration of LFG and MFG in various recognised calibration centres. However, these partly significant device-specific differences are obviously of minor importance for the results in field trials.

## Summary

### s/v-value in the dynamic plate load test

#### 1 Task

Dynamic plate loading tests, in which a falling mass transfers a shock-like impulse to a load plate, are used to check the bearing capacity of unbounded base courses and soils. The Light Drop-Weight Tester (LFG), regulated in TP BF-StB Part B 8.3 (2003), is the result of several decades of continuous development in equipment technology (WEINGART 1978, KUDLA and FLOSS 1990). It is an accepted test instrument in the quality control procedure in road construction and, due to its various advantages over other test methods, a widespread test instrument (KUDLA et al. 1991, BRANDL et al. 2003). The deflection or settlement  $s$  of the load plate is measured under a standardised impact load. The dynamic deformation modulus  $E_{vd}$  is calculated from the deflection.

The ZTV E-StB Section 4.5.2 formulates (since issue 2009) parallel to the required values of the deformation module from the static plate load test  $E_{v2}$  for frost-resistant soils of the substructure or subsoil on the subgrade, requirements related to the 10% minimum quantile of the  $E_{vd}$  value to be measured with the lightweight drop-weight device. Thus the test with the Light Drop-Weight Tester can be carried out in the same way as static plate load tests. The possibility of verifying the load-bearing capacity with the drop-weight tester is also aimed at for unbound base layers of the superstructure. Due to the higher stiffness of the layers to be produced in the superstructure, a medium-heavy drop-weight tester (MFG) was developed for more accurate recording of the dynamic deformation modulus (FE 05.138, BRÄU and VOGT 2008). By further data collection, the fixing of a requirement in the regulations is to be promoted also for this device type.

For indirect verification of the degree of compaction  $D_{Pr}$  in the dam body, the ZTV E-StB offer guide values for the assignment of the dynamic deformation module  $E_{vd}$  to the degree of compaction  $D_{Pr}$  in coarse-grained soils.

In addition to the maximum settlement  $s$  and the  $E_{vd}$  value calculated from this, the drop-weight equipment of various manufacturers also measure the maximum settlement velocity  $v$ . The  $s/v$  quotient can possibly be used as a parameter for soils and base course materials in order to determine the degree of compaction  $D_{Pr}$ . In connection with this, a decision basis can be defined in a work-integrated process, which results in further compaction or post-compaction. Furthermore, it is conceivable that the  $s/v$  value can be interpreted similarly to the ratio value  $E_{v2}/E_{v1}$  measured in the static plate load test.

#### 2 Research methodology

For the investigations, the following drop weight devices were used, which are maintained by the TU München Zentrum Geotechnik and for which the evaluation of the time-dependent settlement course, the  $E_{vd}$  value and the  $s/v$  value is possible:

- a) light Drop-Weight Tester Manufacturer HMP (H10),
- b) light Drop-Weight Tester Manufacturer Zorn (Z10),
- c) medium drop-weight machine Manufacturer HMP (H15),
- d) medium drop-weight machine Manufacturer Zorn (Z15).

The devices comply with the current regulations and were continuously checked with regard to the valid calibration regulations during the execution of the research work. At the calibration stand of the TU München Zentrum Geotechnik, the instruments were compared before each test series and, if necessary, the load device or the settlement measuring instrument were readjusted. The results of the calibrations at the calibration laboratory of the TU München Zentrum Geotechnik were compared with the results of the calibrations carried out at the calibration laboratories of the respective manufacturers. For technical reasons, it was not possible to include the reference calibration laboratory (BAST) at the time the research project was carried out.

In order to check the settlements determined with the instruments, an independently operating

measuring system based on high-precision optical lasers was used for direct settlement measurement in the calibration stand and in field tests. An evaluation of the vibration signal, which is independent of the signal processing in the settlement measuring device (double integration of the measured values for acceleration), was made possible by one manufacturer of a drop weight device. Supplementary theoretical considerations were carried out with the aid of FEM calculations after corresponding evaluation of the calculated dynamic vibration characteristics of the system load plate - soil or base layer.

The following test methods were used to describe the compacted test soil or base course material (punctual testing):

- a) static plate load test according to DIN 18134,
- b) density determination by isotope probe (Troxler),
- c) density determination using alternative methods (balloon) in accordance with DIN 18125.

The equipment used to carry out the tests complies with current regulations and was calibrated as necessary before use.

Extensive tests were carried out at the laboratory of the TU München Zentrum Geotechnik for the

necessary classifying tests of the soils and base course materials. The following tests were carried out for each test soil or base course material:

- a) sieve analysis after wet separation of the fine components according to DIN 18123,
- b) determination of grain density in capillary or gas pycnometer in accordance with DIN 18124,
- c) determination of the Proctor density and the most favourable water content according to DIN 18127,
- d) determination of the loosest and densest bearing arrangement according to DIN 18126.

Due to the participation of the TU München Zentrum Geotechnik in many, in particular larger earthworks and road construction measures and the intensive contacts to suppliers of aggregates, both field tests integrated into the construction site and tests in the test pit of the TU München Zentrum Geotechnik were possible, for which the soil or the base course material was delivered accordingly.

A total of 15 materials according to TL BuB E-StB and base course materials according to TL SoB-StB as well as soils relevant for earthworks according to the soil groups according to DIN 18196 and TL BuB E-StB were investigated (table 1).

Nr.	Soil type	Soil groupe	Designation
1	Gravel, slightly sandy	GI	delivery granulation 0/32
2	Sand, very fine-gravelly	SI	delivery granulation 0/8
3	Gravel, sandy, slightly silty	GU	RC-Mix 0/56
4	Gravel, sandy	GW	construction waste mixture
5	Fine medium sand, very gravelly, strongly silty	SU*	Tertiary sand from Munich
6	Clay, gravelly	GT* or TM	Sealing material Clay
7	Gravel, sandy, silty	GU*	Terrace crushed rock from the Würm glacial stage from Munich
8	Gravel, sandy	GW	Crushed rock 0/45
9	Gravel, sandy	GW	RC-B 0/56
10	Gravel, very sandy, weakly silty	GU	RC-M 0/8
11	Gravel, very sandy	GI	RC-M 0/45 I + II
12	Gravel, very sandy, weakly silty	GU	RC-M 0/56
13	Sand, very gravelly	SE	EOS 0/4
14	Gravel, weakly sandy	GW	EOS 0/32
15	Gravel, very sandy, weakly silty	GU	Pit gravel 0/22

Tab. 1: Soil groups according to DIN 18196 and TL BuB E-StB

The tests to determine the density achieved in the field (volume replacement method, tests with the isotope probe) and to determine the static or dynamic deformation moduli (static plate load test and tests with light and medium drop-weight equipment) as indirect test characteristics to determine the degree of compaction of coarse-grained materials in the field were carried out at different degrees of compaction of the respective base course materials or soils installed. In each of the test fields several tracks with different compaction levels were carried out. The different degrees of compaction were achieved by varying the number of passes with the available compaction equipment.

The tests were carried out on a freshly compacted surface. This means that either material that had not yet been installed was tested, or that material that was already installed first had to be loosened again and then compacted again before the tests were carried out. This is important for reasons of comparability of the results of the different test fields, since experience has shown that higher deformation moduli result with increasing service life of the installed material compared to freshly compacted material. However, special tests on the influence of the residence time were also carried out.

After compaction, static plate loading tests according to DIN 18134 and dynamic plate loading tests with the lightweight and medium-heavy drop-weight device according to TP BF-StB Part B 8.3 were carried out on the respective test field, followed by final tests to determine the degree of compaction achieved according to DIN 18125-2. Four dynamic plate load tests were carried out around each test point for the static plate load test in each compaction lane. All four of the drop weight devices mentioned above were used.

The density achieved in the close range of the static plate load tests was determined with the balloon (densitometer) and with the isotope probe (troxler). The compaction degree  $D_{Pr}$  of each of the four compaction tracks, calculated from the ratio of the dry density, which was determined by an isotope probe, to the Proctor density determined in the laboratory, is generally used for further evaluation.

In addition to the field tests, comparative tests were carried out in the test pit of the TUM Zentrum Geotechnik. The purpose of these test series was,

among other things, to investigate the depth effect of the drop-weight equipment and the effect on the  $E_{vd}$  and the  $s/v$  value. A defined soft layer of a geotextile material was installed at different depths. The compaction was carried out with a vibrating plate compactor.

The exact documentation of the test fields and the results are given in the final report of the research project. The basis for this was a recording of the results in a database which can be filtered according to all relevant criteria (test equipment, test soils, condition of the base course with values for the degree of compaction and deformation module). Corresponding correlations can be created from this. It is possible to update the database after the FE project.

### 3 Research results

The FEM calculations showed that the plastic settlements generated by the impact depend on the size of the preceding compaction of the soil or base course material. The greater the compaction, the lower the plastic or permanent settlement of the load plate. This relationship can be described equivalently with the ratio value  $E_{V2}/E_{V1}$ . The dependence of the value  $s/v$  on the size of the plastic settlements is less pronounced. The influence of other influencing variables on the value  $s/v$  that cannot be determined further in this research work is correspondingly clear. A correlation between  $s/v$  and  $E_{V2}/E_{V1}$  can be seen in principle, but individual calculated values vary considerably from the trend resulting from the sum of the calculation results. However, the mathematical dependence between the ratio value  $\Delta s/s_{max}$  (permanent plastic settlement in relation to maximum settlement) and the mathematical values  $E_{V2}/E_{V1}$  from the static plate loading test is clearly pronounced. However, a reliable and at the same time simple or cost-effective measurement of the value  $\Delta s$  does not appear to be achievable at least at present.

The field tests showed that in the case of the LFG (H10 and Z10) and MFG Z15 instruments, the results of the instruments can be used in construction practice in a significantly larger settlement range than required by the test specification. With these 3 devices, it was found that the velocity  $v$  also increases with increasing settlement. With the MFG H15 the results are always opposite, i.e. with

larger settlements the speed decreases. Since an explanation for this could not be found, this device was not considered in the evaluations for the report.

With regard to the bearing capacity, a newly defined dynamic deformation module  $E_{vd}$  – as also implemented in the ZTV E-StB – can generally be used to infer the static  $E_{V2}$  value with the generally applied factor „2“ from the newly defined dynamic deformation module  $E_{vd}$ . By differentiating the soils, significantly better to very good coefficients of determination are obtained. However, there are clearly different soil-dependent factors between  $E_{vd}$  and  $E_{V2}$ .

Also for the ratio value  $s/v$ , a useful assignment to the static deformation modulus  $E_{V2}$  is obtained, whereby for the achievement of  $E_{V2} = 100 \text{ MN/m}^2$  a value of  $s/v = 4$ , which has already been applied many times in practice, appears to be necessary, considered over all soils. Here, too, however, a soil-specific consideration seems to make sense.

With regard to the determination of parameters for compaction, an assignment of dynamic parameters ( $E_{vd}$ ,  $s/v$ ) to the degree of compaction  $D_{Pr}$ , for example, must be used to a very limited extent. In general, there are very large variations and only in the case of individual soils can meaningful statements be made in construction practice with regard to possible requirement values.

An additional gain of knowledge through the application of the  $s/v$  value compared to the  $E_{vd}$  value cannot be analysed from the results obtained. This would be given if the  $s/v$  value, similar to the  $E_{V2}/E_{V1}$  value in the static plate load test, would give an estimate of the achieved and still possible compaction, i.e. the compaction potential.

For individual soils, correlations between the  $E_{V2}/E_{V1}$  and the  $s/v$  value can be represented. For most soils, no correlations can be demonstrated. In some cases there are large scatters and only slight slopes of the regression line with resulting uncertain transmission. The extent to which this might be due to the often dubious significance of the ratio value  $E_{V2}/E_{V1}$  or the results of the dynamic test from practical construction experience could not be investigated in depth.

As an alternative to the  $s/v$  value, the ratio of successive impacts (or impact groups: mean value 1<sup>st</sup> to 3<sup>rd</sup> impact and mean value 4<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> impact) of the drop-weight equipment was considered in

analogy to the first / second load in the static plate load test. This approach, which is well justifiable at least from a theoretical soil mechanics point of view, had to be evaluated as not target-oriented after the results analysis.

## 4 Conclusions for practice

The ZTV E-StB Section 4.5.2 formulates requirements in relation to the 10% minimum quantile of the  $E_{vd}$  value to be measured with the light drop-weight tester as an alternative to requirement values in respect of the deformation modulus from the static plate load test  $E_{V2}$  for frost-resistant soils of the substructure or subgrade on the subgrade. A corresponding requirement can also be expected and formulated for the medium-duty drop-weight device from the available investigations, which can be supplemented further. Alternatively, it could be considered whether by improving or standardizing the measurement technology, a limitation to only one device type could be achieved, since it has been shown that the settlement measurements of different devices already provide useful results well beyond the intended range.

Even today, drop-weight devices from various manufacturers also record the maximum settlement velocity  $v$  of the load plate that occurs during impact loading. The quotient  $s/v$  from maximum settlement  $s$  and maximum settlement velocity  $v$  was used as the parameter for the analysis. It is intended to indicate the degree of compaction  $D_{Pr}$  for soils and base course materials. This could not be confirmed in the field tests carried out.

The field tests showed that correlations between the  $s/v$  values and  $E_{vd}$  values or  $E_{V2}$  values are well possible for specific soils. The acceptance values used in practice for sufficient compaction performance, which are not written down in the ZTVE, could be roughly confirmed. However, no new findings can be discerned from this with regard to the possibility of quantitative recording of post-compaction or of distinguishing between soil materials. Rather, the  $E_{vd}$  and  $s/v$  values are to be seen as alternatives to each other on the basis of the existing correlations. An additional acceptance criterion would be possible from a successful assignment of the  $s/v$  value to the  $E_{V2}/E_{V1}$  value, which, however, was not observed after the



evaluation of the field tests presented in this report. Since, however, the previous inclusion of the ratio value  $E_{V2}/E_{V1}$  in the acceptance criteria of the ZTV-E StB is also repeatedly the subject of discussions in expert circles and controversial, the missing allocation may well be due to an interpretation of the value  $E_{V2}/E_{V1}$  with regard to the degree of compaction  $D_{Pr}$  that is not conducive to soil mechanics.

In the course of the research work, differences and problems were found in the calibration of the light and medium-duty drop-weight device on different calibration stands. Device-specific differences, which were detected during tests at calibration points, exist. However, these differences are not immediately reflected in the results of the field tests after analysis of the available investigations. In the case of one instrument, metrological problems in determining the  $s/v$  value were found which require verification.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Veranlassung</b> .....	11	4.2.2	Versuchsdurchführung im Kalibrierstand .....	32
1.1	Ausgangssituation .....	11	4.2.3	Berechnung der Setzung aus Schwingungssignal. ....	32
1.2	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung. ....	12	4.2.4	Schwingungssignale H10. ....	36
1.3	Methodik des Vorgehens .....	13	4.3	Einflusstiefe, dämpfende Zwischenschicht. ....	39
<b>2</b>	<b>Theoretische Untersuchungen zum s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch</b> .....	15	<b>5</b>	<b>Beschreibung der Freifeldversuche/Probefelder.</b> .....	41
2.1	Allgemeines .....	15	5.1	Versuchsdurchführung .....	41
2.2	Modellbildung .....	16	5.2	Probefelder. ....	42
2.3	Statischer Plattendruckversuch .....	18	5.2.1	Probefeld TUM Freifläche .....	42
2.4	Dynamischer Plattendruckversuch. ....	18	5.2.2	Probefeld TUM Versuchsgrube .....	42
2.5	Zusammenfassung. ....	23	5.2.3	Probefeld TUM Freising .....	43
<b>3</b>	<b>Kalibrierung des dynamischen Plattendruckversuches</b> .....	23	5.2.4	Probefeld Kirchheim. ....	45
3.1	Kalibrierung der Belastungsvorrichtung (Kraftmessung). ....	23	5.2.5	Probefeld Westtangente Freising .....	46
3.2	Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung .....	24	5.2.6	Probefeld Deponie Pfraundorf .....	47
3.3	Verwendete Geräte .....	25	5.2.7	Probefeld Zeltigen .....	48
<b>4</b>	<b>Sonderversuche</b> .....	26	5.2.8	Probefeld Pfraundorf Schotterwerk .....	49
4.1	Laserwegaufnehmer als systemunabhängige Messgröße .....	26	5.2.9	Probefelder Schiltberg .....	50
4.1.1	Funktionsprinzip und technische Daten .....	26	5.3	Zusammenstellung der verwendeten Materialien .....	53
4.1.2	Aufbau und Messprinzip bei der Laser-Messeinrichtung .....	26	<b>6</b>	<b>Auswertungen zu den Freifeldversuchen/Probefeldern</b> .....	55
4.1.3	Vergleich Setzungen induktive Wegmessung – Lasermessung .....	28	6.1	Allgemeines .....	55
4.1.4	Kalibrierstand: Vergleich Setzungen Geräte - induktive Wegmessung – Lasermessung .....	28	6.1.1	Statischer Plattendruckversuch .....	55
4.1.5	Feldversuche: Vergleich Setzungen Geräte – Lasermessung .....	30	6.1.2	Dichtebestimmung .....	55
4.2	Schwingungssignal der dynamischen Lastplatte .....	32	6.1.3	Dynamischer Plattendruckversuch. ....	55
4.2.1	Allgemeines .....	32	6.1.4	Gruppenzuordnung der verwendeten Materialien .....	56
			6.1.5	Abkürzungen .....	56
			6.2	Setzung $s_{46}$ /Geschwindigkeit $v_{46}$ .....	56
			6.2.1	Alle Böden .....	57
			6.2.2	Grobkörnige Böden .....	58
			6.2.3	Fein- und gemischtkörnige Böden .....	60

6.2.4	Mineralische Ersatzbaustoffe . . . . .	61
6.2.5	Zusammenfassung . . . . .	61
6.3	Dynamischer Kennwert bezogen auf absoluten statischen Kennwert . . .	64
6.3.1	$E_{VD2}$ zu $E_{V2}$ . . . . .	64
6.3.2	$E_{VD2}$ zu $D_{pr}$ . . . . .	68
6.3.3	$s_{46}/v_{46}$ zu $E_{V2}$ . . . . .	72
6.3.4	$s_{46}/v_{46}$ zu $D_{pr}$ . . . . .	76
6.3.5	Zusammenfassung. . . . .	80
6.4	Dynamischer Verhältniswert $s_{46}/v_{46}$ bezogen auf absoluten dynamischen Kennwert $E_{vd2}$ . . . . .	80
6.5	Dynamische Verhältniswerte bezo- gen auf statischen Verhältniswert. . . . .	83
6.5.1	$s_{46}/v_{46}$ zu $E_{V2}/E_{V1}$ . . . . .	83
6.5.2	$E_{VDy}/E_{VDx}$ zu $E_{V2}/E_{V1}$ . . . . .	86
6.5.3	Zusammenfassung. . . . .	89
6.6	Verdichtungs-, Wasserhalts- und Liegezeiteinfluss. . . . .	89
6.6.1	Kies . . . . .	89
6.6.2	Sand. . . . .	93
6.6.3	Zusammenfassung. . . . .	96
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung. . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>Literatur. . . . .</b>	<b>98</b>
	<b>Bilder . . . . .</b>	<b>100</b>
	<b>Tabellen . . . . .</b>	<b>107</b>

# 1 Veranlassung

## 1.1 Ausgangssituation

Dynamische Plattendruckversuche, bei denen eine Fallmasse einen stoßartigen Impuls auf eine Lastplatte überträgt, dienen zur Tragfähigkeitsüberprüfung bei ungebundenen Tragschichten und Böden. Das Leichte Fallgewichtsgeschütz, geregelt in der TP BF-StB Teil B 8.3 (2003), stellt das Ergebnis einer kontinuierlichen gerätetechnischen Entwicklung über mehrere Jahrzehnte dar (WEINGART 1978, KUDLA und FLOSS 1990). Es ist im Anwendungsspektrum der Qualitätskontrolle im Straßenbau ein akzeptiertes und aufgrund von diversen Vorteilen gegenüber anderen Prüfmethoden ein verbreitetes Prüfinstrument (KUDLA et al. 1991, BRANDL et al. 2003). Dabei wird die Einsenkung  $s$  der Lastplatte unter einer standardisierten Stoßbelastung gemessen. Aus der Einsenkung wird der dynamische Verformungsmodul  $E_{Vd}$  berechnet.

Die ZTV E-StB Kapitel 4.5.2 formulieren parallel zu Anforderungswerten des Verformungsmoduls aus dem statischen Plattendruckversuch  $E_{V2}$  für frostsichere Böden des Unterbaus bzw. des Untergrundes auf dem Planum Anforderungen bezogen auf das 10 %-Mindestquantil des  $E_{Vd}$ -Wertes, der mit dem Leichten Fallgewichtsgeschütz zu messen ist. Damit kann gleichwertig zum statischen Plattendruckversuche die Prüfung mit dem Leichten Fallgewichtsgeschütz vorgenommen werden. Die Datenbasis zur Festlegung der Anforderungswerte gemäß dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{Vd}$  wurde mittels Reihenversuchen von HARTMANN und BRÄU (2003) gewonnen. Auch für ungebundene Tragschichten des Oberbaus wird die Möglichkeit des Nachweises der Tragfähigkeit mit dem Fallgewichtsgeschütz angestrebt. Aufgrund der höheren Steifigkeiten der im Oberbau herzustellenden Schichten wurde zur genaueren Erfassung des dynamischen Verformungsmoduls ein Mittelschweres Fallgewichtsgeschütz entwickelt (FE 05.138, BRÄU und VOGT 2008), das sich gegenüber dem Leichten Fallgewichtsgeschütz durch eine Verdoppelung der maximalen Stoßkraft auszeichnet. Die gerätetechnischen Spezifikationen und die Versuchsdurchführung sind in TP Gestein-StB Teil 8.2.1 (2012) geregelt. Versuche zur Schaffung eines Bewertungshintergrundes zur Ermittlung von Anforderungswerten hinsichtlich des dynamischen Verformungsmoduls gemessen mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgeschütz entsprechend den  $E_{V2}$ -Moduln gemäß ZTV SoB-

StB wurden im Forschungsvorhaben FE 06.0094 (BRÄU und VOGT 2013) durchgeführt.

Zum indirekten Nachweis des Verdichtungsgrades  $D_{Pr}$  im Dammkörper bieten die ZTV E-StB Richtwerte für die Zuordnung des dynamischen Verformungsmodul  $E_{Vd}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden an. Liegen Böden mit höherem Feinkornanteil vor, ist die eindeutige Zuordnung zwischen der mit dem Fallgewichtsgeschütz gemessenen dynamischen Steifigkeit durch den starken Einfluss des Wassergehaltes im Allgemeinen nicht mehr möglich. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.139 (BRÄU und VOGT 2009) zeigen hierzu, dass zumindest unter Beachtung möglichst homogener Randbedingungen folgend aus dem Wassergehalt und dem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  direkte Korrelationen zwischen dem statischen Verformungsmodul  $E_{V2}$  und dem dynamischen FDVK-Messwert geschaffen werden können. Die Eingrenzung auf die Prüfgröße Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  gelingt dann, wenn der Wassergehalt und die Struktur von bindigen Böden, über die zu prüfende Fläche nur in sehr engen Grenzen schwanken. Neben den im Forschungsvorhaben FE 05.139 durchgeführten Versuchen zeigen FLOSS et al. (1997), dass bei homogenen Prüfflächen auch für plastische Tone der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  gut durch den FDVK-Messwert indirekt nachgewiesen werden kann.

Im einfachsten Modell, das den Boden bzw. das in einer Tragschicht des Oberbaus zu untersuchende Material unter einer kreisrunden Lastplatte abbildet, werden eine Feder und ein Dämpfer parallel angeordnet. Im statischen Belastungsfall analog zum Plattendruckversuch nach DIN 18134 berechnet sich der Verformungsmodul ( $E_{V1}$  bzw.  $E_{V2}$ -Wert) allein aus der einwirkenden Kraft und der Federsteifigkeit  $k$ . Bei linearer Federsteifigkeit ist der Verformungsmodul proportional zur Setzung der Lastplatte  $s$ . Die Belastung im Plattendruckversuch mit dem Leichten bzw. Mittelschweren Fallgewichtsgeschütz erfolgt stoßartig innerhalb weniger Millisekunden. Dadurch wirken weitere Einflussgrößen auf den zeitabhängigen Setzungsverlauf  $s(t)$  der Lastplatte und damit dem registrierten  $E_{Vd}$ -Wert wie

- Massenträgheitskräfte aus den Massen  $m$  der Lastplatte und des unmittelbar unter der Lastplatte befindlichen Bodens entstehen proportional zur einwirkenden Beschleunigung  $a$ . Mit  $a = dv/dt = d^2s/dt^2$  als zweifache Ableitung des zeitabhängigen Setzungsverlaufes.

- Die Widerstandskraft im Dämpfer parallel zur Feder ist proportional zur Setzungsgeschwindigkeit  $v = ds/dt$  der Lastplatte und der Dämpfungskonstante  $d$ .

Der stoßartige Impuls der Lastplatte wird je nach Aufbau des Untergrundes bzw. der Tragschichten und der Beschaffenheit der Böden bzw. Tragschichtmaterialien unterschiedlich stark durch die dämpfenden Bodeneigenschaften dissipiert (entspricht Energieaustausch aus dem System Lastplatte – Boden bzw. Tragschicht, hysteretisches Verhalten im Kraft-Weg-Diagramm). Die Energiedissipation setzt sich zusammen aus der geometrischen Dämpfung und der Materialdämpfung. Die geometrische Dämpfung folgt allein aus der dreidimensionalen Wellenausbreitung im Untergrund (Kompressions- und Scherwelle) sowie an der Grenzfläche zwischen Luft und Boden bzw. Tragschicht (Rayleigh-Welle) und ist somit in erster Annäherung unabhängig von den Eigenschaften der verdichteten Böden. Im Gegensatz dazu ist die Materialdämpfung ausschließlich von den Eigenschaften der unter der Lastplatte liegenden Böden bzw. Tragschichtmaterialien abhängig. Hier sind Korngefüge bzw. Bodenstruktur und damit die Dichte entscheidende Einflussgrößen. Geringe Dichten und ein damit verbundenes hohes Potenzial plastischer Verformungen bedingen eine hohe Materialdämpfung (Energieumwandlung primär in Wärme). Dagegen wird ein gut verdichtetes Tragschichtmaterial eine geringe Materialdämpfung aufweisen. Die Änderung des Anteiles der geometrischen Dämpfung ist unter baupraktischen Randbedingungen von untergeordneter Bedeutung.

Bereits heute messen Fallgewichtsgeräte verschiedener Hersteller die maximale Setzungsgeschwindigkeit  $v$ . Eine einheitlich anerkannte Systematik zur Auswertung dieser Kenngröße der dynamischen Interaktion zwischen Lastplatte und Boden bzw. Tragschicht existiert jedoch noch nicht. Aus den oben genannten Zusammenhängen ist auf Basis einer theoretischen Modellbildung der Zusammenhang zwischen bodenspezifischen Einflussgrößen wie der Steifigkeit, dem Dichteniveau bzw. dem Potenzial plastischer Dichteänderungen, was dem Potenzial zur Nachverdichtung im erdbautechnischen Sinn entspricht, schlüssig erklärbar. Als Kenngröße kann der Quotient  $s/v$  aus maximaler Setzung  $s$  und maximaler Setzungsgeschwindigkeit  $v$  zur Analyse herangezogen werden. Er kann möglicherweise bei Böden und Tragschichtmaterialien herangezogen werden, um auf den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  zu schlie-

ßen. Damit verbunden kann etwa in einem arbeitsintegrierten Prozess eine Entscheidungsgrundlage definiert werden, die eine weitere Verdichtung bzw. Nachverdichtung zur Folge hat. Ferner ist es denkbar, dass der  $s/v$ -Wert ähnlich dem beim statischen Plattendruckversuch gemessenen Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  interpretiert werden kann. Dabei ist die bisherige Einbeziehung des Verhältniswertes  $E_{V2}/E_{V1}$  in die Abnahmekriterien der ZTV-E StB immer wieder Gegenstand von Diskussionen in Fachkreisen. Ähnliches ist für die Bewertung des  $s/v$ -Wertes zu erwarten, wobei das Hauptaugenmerk hier zusätzlich auf eine Differenzierung hinsichtlich der Bodenarten bzw. Tragschichtmaterialien aufgrund der zeitabhängigen Setzungsverläufe infolge des Stoßes erwartet wird.

Bei der Bearbeitung der Forschungsarbeiten 05.138/2004/CGB (BRÄU und VOGT 2008) und FE 06.0094/2011/AGB (BRÄU und VOGT 2013) sowie im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.161/2010/CGB „Ringversuch zur Kalibrierung des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgerätes“ (KUDLA und UHLIG 2014) zeigten sich unter bestimmten – jedoch in Bezug auf Baustellen realitätsnahen – Randbedingungen signifikante gerätespezifische Unterschiede. Diese Unterschiede waren mit den durchgeführten sehr umfangreichen Untersuchungen auf insgesamt 10 Kalibrierversuchsständen unter stark vereinfachten Randbedingungen (Stöße auf Gummipplatten) weitgehend nicht zu identifizieren. Die aus den genannten Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse lassen die Folgerung zu, dass noch nicht grundlegend untersuchte gerätespezifische Parameter den gemessenen Wert der maximalen Setzung  $s$  beeinflussen. Es ist anzunehmen, dass die in Bezug auf die Setzung festgestellten Unterschiede auch auf den neu zu analysierenden Wert der maximalen Setzungsgeschwindigkeit  $v$  zutreffen. Es ist daher für eine erfolgreiche Durchführung des Forschungsvorhabens erforderlich, dass die in den Versuchsreihen verwendeten Fallgewichtsgeräte kontinuierlichen Untersuchungen auf verschiedenen Kalibrierversuchsständen unterzogen werden.

## 1.2 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung folgt weitgehend aus der versuchstechnischen Durchführung von Messungen mit Fallgewichtsgeräten, die eine schnelle Beurteilung des Verdichtungs- und Tragfähigkeits-

zustandes von Böden und ungebundenen Tragschichtmaterialien erlauben. Wenn auch keine flächendeckende Aussage wie bei der FDVK möglich ist, so kann eine gegenüber der Prüfung mit dem statischen Plattendruckversuch eine deutlich höhere Versuchsanzahl erreicht werden, die eine höhere Sicherheit bei der Abnahme von Erdbauwerken ermöglicht (siehe auch ZTV-E StB).

Bezüglich der festgestellten gerätespezifischen Unterschiede, die unter gewissen Randbedingungen zum Tragen kommen, konnte bei dieser Forschungsarbeit die baupraktische Relevanz der Unterschiede mit Versuchsreihen im Feld untersucht werden. Parallel dazu wurden Vergleichsversuche auf den Kalibrierversuchsständen der Hersteller und dem Kalibrierversuchsstand der TU München Zentrum Geotechnik an den in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Fallgewichtsgeschichten durchgeführt. Diese Versuchsergebnisse zusammen mit den Ergebnissen der Feldversuche können weiterführende grundlagenbezogene Erkenntnisse zur Stoßmechanik und der messtechnischen Erfassung liefern.

Im Kontext der im Forschungsvorhaben zu untersuchenden Analysegröße  $s/v$ -Wert können folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Versuchstechnische Klärung des Zusammenhanges zwischen der Materialdämpfung eines Bodens bzw. Tragschichtmaterials und dem Potenzial der Nachverdichtung.
- Schaffung einer Datenbasis zur Bewertung des Einflusses bodenspezifischer Einflussgrößen (Kornverteilung, Feinkornanteil, Kornform, Korndichte).
- Prüfung der Zuverlässigkeit des Zusammenhanges zwischen dem  $s/v$ -Wert und dem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  und des Verhältnisses  $E_{V2}/E_{V1}$  für unterschiedliche Versuchsböden und Tragschichtmaterialien.
- Einfluss des Wassergehaltes auf den  $s/v$ -Wert bei konstantem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  für unterschiedliche gemischtkörnige Versuchsböden.
- Untersuchungen zur wirksamen Messtiefe bezogen auf die Analyse des  $s/v$ -Wertes.

Als Ziel dieser Untersuchungen steht die Erweiterung des Anwendungsspektrums des Leichten- bzw. Mittelschweren Fallgewichtes. Es sollte untersucht werden, ob es möglich ist, neben dem direk-

ten Nachweis des Verformungsmoduls  $E_{Vd}$  gemäß ZTV E-StB bzw. zukünftig auch im Rahmen der ZTV SoB-StB Aussagen zum Verdichtungszustand des Bodens bzw. Tragschichtmaterials zu gewinnen.

### 1.3 Methodik des Vorgehens

Zur Untersuchung wurden nach aktuellem Stand folgende Fallgewichtsgeschichten verwendet, die die TU München Zentrum Geotechnik vorhält:

- a) Leichtes Fallgewichtsgeschicht Herstellerfirma HMP,
- b) leichtes Fallgewichtsgeschicht Herstellerfirma Zorn,
- c) mittelschweres Fallgewichtsgeschicht Herstellerfirma HMP,
- d) mittelschweres Fallgewichtsgeschicht Herstellerfirma Zorn.

Die Geräte entsprechen den aktuellen Vorschriften und werden fortlaufend hinsichtlich der gültigen Kalibriervorschrift überprüft. Weitere Geräte wurden von Herstellern nicht zur Verfügung gestellt.

Auf dem Kalibrierstand der TU München Zentrum Geotechnik werden die Geräte vor jeder Versuchsserie vergleichend untersucht und ggf. die Belastungseinrichtung bzw. das Setzungsmessgerät neu justiert. Die Ergebnisse der Kalibrierungen wurden mit den Kalibrierständen der jeweiligen Hersteller abgeglichen. Die Einbeziehung des Referenzkalibrierstandes (BAST) war nicht möglich.

Zur Beschreibung des verdichteten Versuchsbodens bzw. Tragschichtmaterials kommen folgende Prüfmethoden zum Einsatz (punktuelle Prüfung):

- a) Statischer Plattendruckversuch gem. DIN 18134,
- b) Dichtebestimmung durch Isotopsonde (Troxler),
- c) Dichtebestimmung mittels Ersatzverfahren (Ballon) gem. DIN 18125,
- d) dynamischer CBR-Versuch im Feld in Anlehnung an TP Gestein-StB Teil 5.6.

Der ursprünglich vorgesehene statische CBR-Versuch im Feld in Anlehnung an TP BF-StB Teil B 7.1 konnte nicht umgesetzt werden.

Die Geräte entsprechen den aktuellen Vorschriften und werden soweit erforderlich vor dem Einsatz kalibriert.

Für die notwendigen klassifizierenden Versuche der Böden bzw. Tragschichtmaterialien steht das umfangreich ausgestattete Labor des Zentrum Geotechnik zur Verfügung. Für jeden Versuchsboden bzw. jedes Tragschichtmaterial werden folgende Versuche durchgeführt:

- a) Siebanalyse mit nassem Abtrennen der Feinbestandteile nach DIN 18123,
- b) Bestimmen der Korndichte im Kapillar- bzw. Gaspyknometer nach DIN 18124,
- c) Bestimmen der Proctordichte und des günstigsten Wassergehaltes nach DIN 18127,
- d) Bestimmen der lockersten und dichtesten Lagerung nach DIN 18126.

Durch die Beteiligung des Zentrum Geotechnik an vielen, insbesondere größeren Erdbau- bzw. Straßenbaumaßnahmen und die Beziehungen zu Lieferwerken von Gesteinskörnungen war die Versuchsdurchführung sowohl im Felde baustellenintegriert als auch in der Versuchsgrube des Institutes möglich und vorgesehen.

Bei den Feldversuchen sollten die Versuchstrecken und Versuchspunkte aufgrund der Ergebnisse von FDVK-Messfahrten festgelegt werden. Dies war aufgrund fehlender Gerätschaften auf den Baustellen und aufgrund der räumlichen Beschränkung auf dem Freigelände und der Versuchsgrube der TUM nicht möglich.

Es sollten 9 Böden, Materialien gem. TL BuBe-StB bzw. Tragschichtmaterialien gem. TL-SoB-StB untersucht. Die Bandbreite unterschiedlicher ungebundener Tragschichtmaterialien gem. TL-SoB-StB ergibt sich wie folgt:

- a) Rundkorngemisch 0/32 oder 0/45 (z. B. quartäre Kiese der fluvialen Niederterrassen),
- b) Brechkorngemisch 0/32 oder 0/45, Kalkstein,
- c) Brechkorngemisch 0/32 oder 0/45, Granit,
- d) RC-Beton 0/32 oder 0/45.

Ergänzt werden diese 4 Tragschichtmaterialien durch weitere erdbautechnisch relevante Böden gemäß den Bodengruppen nach DIN 18196 bzw. nach TL BuBe-StB:

- e) Sand SW oder entsprechendes Material „RC-Vorabsiebung“,
- f) Sand SI oder SE (z. B. Wattsand oder Tertiärsand),
- g) Schluff UL bzw. UM oder Ton TL bzw. TM,
- h) Gemischtkörniger Boden SU, ST, GU bzw. GT oder entsprechendes Material „RC-Vorabsiebung“,
- i) Gemischtkörniger Boden SU\*, ST\*, GU\* bzw. GT\* oder entsprechende Mischung aus „RC-Vorabsiebung“ mit feinkörnigem Boden.

Die Böden sind weitgehend mit den verwendeten Versuchsböden abgedeckt. Der Boden c) aus Granit konnte nicht mit einbezogen werden. Bei den RC-Materialien wurde eine größere Anzahl untersucht, ebenso Materialien aus Elektroofenschlack (EOS). Insgesamt kamen 15 Böden zum Einsatz (siehe Kapitel 5.3).

Ergänzend zu den Versuchen im Feld werden exemplarische Vergleichsuntersuchungen in der Versuchsgrube des Zentrum Geotechnik durchgeführt. In diesen Versuchsreihen sollte die Tiefenwirkung der Fallgewichtsgeschäfte und die Auswirkung auf den  $E_{vd}$  und den  $s/v$ -Wert untersucht werden. Hierbei wurde eine definierte Weichschicht aus einem Geovliesstoff in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Die Verdichtung erfolgt mit Plattenrüttlern.

Die Dokumentation der Versuchsfelder und der Ergebnisse erfolgt in einem Zwischen- und einem Schlussbericht. Grundlage hierfür wird eine Erfassung der Ergebnisse in einer Datenbank sein, die nach den allen relevanten Kriterien (Geräteparameter, Versuchsböden, Zustand der Tragsicht mit Werten zum Verdichtungsgrad und Verformungsmodul) filterbar ist und entsprechende Korrelationen erstellen lässt. Die Möglichkeit der Fortschreibung im Anschluss an das FE-Vorhaben ist gegeben.

## 2 Theoretische Untersuchungen zum s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

### 2.1 Allgemeines

Theoretische Untersuchungen zum dynamischen Plattendruckversuch ergänzen die in diesem Bericht dargestellten umfangreichen Reihen an Feldversuchen mit unterschiedlichen Böden und Tragschichtmaterialien. Das Ziel der theoretischen Untersuchungen ist die Analyse grundlegender Zusammenhänge zwischen den Boden bzw. das Tragschichtmaterial charakterisierenden bodenmechanischen Kenngrößen (z. B. Steifigkeit und Verdichtung) und dem während der Versuchsdurchführung messbaren Kenngrößen der dynamischen Interaktion zwischen Fallgewicht, Lastplatte und Boden bzw. Tragschichtmaterial (zeitabhängiger Verlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebung der Lastplatte). Zur Analyse können hinsichtlich ihrer Komplexität und Leistungsfähigkeit unterschiedliche Modelle herangezogen werden.

Im einfachsten Modell, das den Boden bzw. das in einer Tragschicht des Oberbaus zu untersuchende Material unter einer kreisrunden Lastplatte abbildet, werden eine Feder und ein Dämpfer parallel angeordnet (Ein-Massen-Schwinger). Die Masse gibt die kreisrunde Lastplatte wieder. An der Masse der Lastplatte greift eine zeitabhängige Kraft an, die den Stoß wiedergeben soll. Die Kraft in der Feder ist proportional zur Relativverschiebung zwischen zwei Massen bzw. zwischen einer Masse und dem festen Modellrand  $F_k = K \cdot s_{rel}$ . Die Kraft im Dämpfer ist proportional zur Relativverschiebungsgeschwindigkeit  $F_c = c \cdot v_{rel}$  mit  $v_{rel} = \partial s_{rel} / \partial t$ . Die Parameter  $K$  [N/m] und  $c$  [Ns/m] geben das Verhalten des Bodens bzw. des Tragschichtmaterials wieder. Dabei sind  $K$  und  $c$  nicht nur vom Bodenverhalten bzw. vom Tragschichtverhalten (Steifigkeit, Dichte, Reibungswinkel usw.) sondern auch vom Randwertproblem selbst abhängig (Durchmesser der Lastplatte, Schichtdicken im Boden bzw. der Tragschicht, Steifigkeitsunterschiede zwischen einzelnen Schichten). Die Parameter  $K$  und  $c$  sind somit keine objektiven Kennwerte, die das mechanische Verhalten des Bodens bzw. der Tragschicht repräsentieren und sind daher stets systemabhängig anzupassen. Das Modell hat jedoch den großen Vorteil, dass es im Vergleich zu umfassenderen Modellen vergleichsweise anschaulich ist, sowie dass nur

wenige Parameter und Randbedingungen für eine Berechnung aus geeigneten Experimenten zu bestimmen bzw. möglichst passend abzuschätzen sind.

Der stoßartige Impuls der Lastplatte wird je nach Aufbau des Untergrundes bzw. der Tragschichten und der Beschaffenheit der Böden bzw. Tragschichtmaterialien unterschiedlich stark durch die dämpfenden Bodeneigenschaften dissipiert, was durch den Parameter  $c$  wiedergegeben werden muss (entspricht Energieaustausch aus dem System Lastplatte – Boden bzw. Tragschicht, hysteretisches Verhalten im Kraft-Weg-Diagramm). Die Energiedissipation setzt sich zusammen aus der geometrischen Dämpfung und der Materialdämpfung. Die geometrische Dämpfung folgt allein aus der dreidimensionalen Wellenausbreitung im Untergrund (Kompressions- und Scherwelle) sowie an der Grenzfläche zwischen Luft und Boden bzw. Tragschicht (Rayleigh-Welle) und ist somit in erster Annäherung unabhängig von den Eigenschaften der verdichteten Böden. Im Gegensatz dazu ist die Materialdämpfung ausschließlich von den Eigenschaften der unter der Lastplatte liegenden Böden bzw. Tragschichtmaterialien abhängig. Hier sind Korngefüge bzw. Bodenstruktur und damit die Dichte entscheidende Einflussgrößen. Geringe Dichten und ein damit verbundenes hohes Potenzial plastischer Verformungen bedingen eine hohe Materialdämpfung (Energieumwandlung primär in Wärme). Dagegen wird ein gut verdichtetes Tragschichtmaterial eine geringe Materialdämpfung aufweisen. Die Änderung des Anteiles der geometrischen Dämpfung ist unter baupraktischen Randbedingungen von untergeordneter Bedeutung.

Das Modell des Ein-Massen-Schwingers kann erweitert werden, um den dynamischen Plattendruckversuch genauer abzubilden. Dabei wird neben der Masse der Lastplatte die fallende Masse wiedergegeben. Dieses Modell zum sog. Zwei-Massen-Schwinger wurde zur Analyse eines dynamischen Plattendruckversuches schon von WEINGART (1978) verwendet und auch in späteren Arbeiten immer wieder aufgegriffen (KUDLA et al. (1991), BRANDL et al. (2003), BRÄU und VOGT (2008)). Im statischen Belastungsfall analog zum Plattendruckversuch nach DIN 18134 berechnet sich der Verformungsmodul ( $E_{V1}$  bzw.  $E_{V2}$ -Wert) allein aus der einwirkenden Kraft und der Federsteifigkeit  $k$ . Bei linearer Federsteifigkeit ist der Verfor-



mungsmodul proportional zur Setzung der Lastplatte s. Bei der dynamischen Analyse des Zwei-Massen-Schwingers sind neben dem Parameter  $K$  auch die Dämpfungseigenschaften des Bodens bzw. des Tragschichtmaterials und den ggf. darunter liegenden Schichten zu berücksichtigen. Ferner müssen die vom Gerät zum dynamischen Plattendruckgerät abhängigen Werte der Steifigkeit und Dämpfung, welche sich primär aus den vorgespannten Tellerfedern ergeben, möglichst zutreffend in Ansatz gebracht werden. Die sich daraus ergebenden insbesondere gerätespezifischen Nichtlinearitäten wurden eingehend in einer das Forschungsvorhaben begleitenden Masterarbeit untersucht (FRANZLER 2017).

Neben der Analyse am Zwei-Massen-Schwinger und der Wiedergabe des Verhaltens von Boden bzw. Tragschichtmaterial mittels parallel geschalteter Feder und Dämpfer kann mithilfe der Finiten-Elemente-Methode das mechanische Verhalten durch ein objektives Stoffmodell wiedergegeben werden. Damit können die Eigenschaften des Bodens bzw. der Tragschicht weitaus zutreffender wiedergegeben werden und wichtige Aspekte wie beispielsweise das Auftreten plastischer Verformungen, die spannungsabhängige Steifigkeit sowie die Materialdämpfung untersucht werden, was durch die getroffenen Vereinfachungen im Modell des Zwei-Massen-Schwingers nicht möglich ist. Die in diesem Kapitel gezeigten Analysen konzentrieren sich auf die Anwendung der Finiten-Elemente-Methode. Ergebnisse auf Basis des Modelles eines Zwei-Massen-Schwingers werden bereits in den oben genannten Literaturquellen sehr umfassend beschrieben. So greift z. B. BRANDL et al. (2003) den Kennwert  $s/v$  auf und gibt Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Steifigkeiten  $K$  und Dämpfungsmaße  $c$  des Bodens an (siehe Bild 6-102).

Im Folgenden werden neue theoretische Ergebnisse vorgestellt, die mit der Finiten-Elemente-Methode berechnet werden. Der Boden bzw. das Tragschichtmaterial wird dabei als dreidimensionales Kontinuum abgebildet. Das mechanische Verhalten unter dynamischer Beanspruchung wird gegenüber den Annahmen im Modell des Ein- bzw. Zwei-Massen-Schwingers wesentlich realitätsnäher abgebildet (SCHANZ et al. 1999 und BENZ 2006):

- Die Steifigkeit ist spannungsabhängig. Unter isotroper oder ödometrischer Kompression nimmt die Steifigkeit mit sich vergrößernder Spannung zu. Wächst die Scherspannung, so

nimmt die Steifigkeit bis zum Grenzzustand, der nach Mohr-Coulomb abgebildet wird, ab.

- Die Steifigkeit ist abhängig von der Scherdehnung. Bei kleinen Scherdehnungen während einer dynamischen Beanspruchung berücksichtigt das Stoffmodell eine entsprechend dem realen Verhalten eines Bodens bzw. eines Tragschichtmaterials hohe Steifigkeit. In diesem Bereich treten kaum plastische Verformungen auf.
- Eine Verdichtung des Bodens bzw. des Tragschichtmaterials kann durch eine Vorkonsolidationsspannung berücksichtigt werden. Das Bodenverhalten bzw. Verhalten des Tragschichtmaterials ist abhängig von seiner Belastungsgeschichte und unterscheidet zwischen Erstbelastung (geringe Steifigkeit) sowie Ent- und Wiederbelastung (hohe Steifigkeit).

Daneben wird die geometrische Dämpfung, die aus der Wellenabstrahlung resultiert, ohne die Einführung einer gegenüber der Materialdämpfung zusätzlichen Dämpfung, wie es im Ein- bzw. Zwei-Massen-Schwinger notwendig ist, erfasst.

## 2.2 Modellbildung

Die dynamische Interaktion zwischen dem Gerät zum dynamischen Plattendruckversuch (Leichtes Fallgewichtsgerät gemäß TP BF-StB Teil B 8.3) und verschiedenen Böden bzw. Tragschichtmaterialien wurde im Forschungsvorhaben durch zahlreiche Versuche eingehend analysiert. Hauptziel der Auswertung der experimentell gewonnenen Daten lag auf der Schaffung einer Grundlage zur Bewertung des sog. Kennwertes  $s/v$ , der sich aus der maximalen Setzung der Lastplatte  $s$  und der maximalen Setzungsgeschwindigkeit  $v$  der Lastplatte berechnet. Es wurde die Aussagekraft des Kennwertes  $s/v$  zur Beschreibung eines Potentials, welches sich aus der nach bereits erfolgter Verdichtung durch ein bestimmtes Verdichtungswerkzeug (Plattenrüttler, Vibrationswalze o. ä.) weiteren Verdichtbarkeit eines bestimmten Bodens bzw. Tragschichtmaterials ergibt, analysiert.

Ergänzend wurde die Aussagekraft des Kennwertes  $s/v$  durch ein Finite-Elemente-Modell theoretisch untersucht, was in diesem Kapitel erläutert wird. Der Boden bzw. das Tragschichtmaterial wurde durch ein im Gegensatz zu den Modellen eines Ein- bzw. Zwei-Massen-Schwingers objektives

Stoffmodell wiedergegeben, das wesentliche Eigenschaften des mechanischen Verhaltens von Boden bzw. Tragschichtmaterial unter dynamischer Beanspruchung abbilden kann. Ein Ausschnitt der Modellbildung mit einem beispielhaften Berechnungsergebnis von Setzungen wird in Bild 2-1 links gezeigt.

Der Boden- bzw. das Tragschichtmaterial als Zwei- bzw. Drei-Phasen-Medium aus Feststoff, Porenfluid und ggf. Porengas wurde nicht berücksichtigt. Damit entfällt die Berechnung von Porenwasserdrücken, die bei relativ undurchlässigem Boden bzw. Tragschichtmaterial und der raschen dynamischen Beanspruchung auftreten können und das dynamische Interaktionsproblem maßgebend beeinflussen können.

Die stoßartige Belastung wurde entsprechend dem Leichten Fallgewichtgerät gemäß TP BF-StB Teil B 8.3 angepasst. Im Gegensatz zum im vorangehenden Kapitel kurz beschriebenen Modell des Zwei-Massen-Schwingers erfolgt keine gekoppelte Berechnung unter Berücksichtigung der Lastplatte (1. Masse) und des Fallgewichtes (2. Masse). Die Belastung im Plattendruckversuch mit dem Leichten bzw. Mittelschweren Fallgewichtgerät erfolgt stoßartig innerhalb weniger Millisekunden entsprechend den Werten  $\sigma/\sigma_{\max}(t)$ , die in Bild 2-1 rechts dargestellt sind. Die maximale mittlere Sohldruckspannung unter der Lastplatte wurde mit  $\sigma_{\max} =$

0,1 MN/m<sup>2</sup> angenommen. Diese Spannung kann je nach Steifigkeit des Bodens und der Tragschicht variieren, was mit dem Zwei-Massen-Schwinger bereits BRANDL et al. (2003) sowie BRÄU und VOGT (2008) berechnet haben, jedoch hier näherungsweise nicht berücksichtigt wird.

Zur Wiedergabe des mechanischen Verhaltens des Bodens wurde auf das Stoffmodell „Hardening Soil“ nach SCHANZ et al. (1999) in seiner Erweiterung nach BENZ (2006) zur Berücksichtigung der scherdehnungsabhängigen Steifigkeit insbesondere bei dynamischer Beanspruchung zurückgegriffen. Die Stoffmodellparameter gemäß SCHANZ et al. (1999) werden in Tabelle 2-1 angegeben. Die Parameter zur Erweiterung nach BENZ (2006) werden aus Korrelationen abgeleitet. Für die Bestimmung des Schubmoduls  $G_0$  bei sehr kleinen Dehnungen wird auf die empirischen Arbeiten nach ALPAN (1970) zurückgegriffen, die sich für viele Böden als passend erwiesen hat. Weitere Parameter wurden entsprechend den Empfehlungen des Handbuchs „Material Models“ zum Finite-Elemente Programm PLAXIS (2018) festgelegt.

Die Wirkung einer Verdichtung des Bodens bzw. Tragschichtmaterials wird, wie in Tabelle 2-1 gezeigt wird, durch unterschiedliche Werte des Parameters der Wichte  $\gamma$ , der Vorbelastungsspannung POP, des Erddruckbeiwertes  $K_0$ , und des Reibungswinkels  $\varphi$  sowie Dilatanzwinkels  $\psi$  abgebildet.

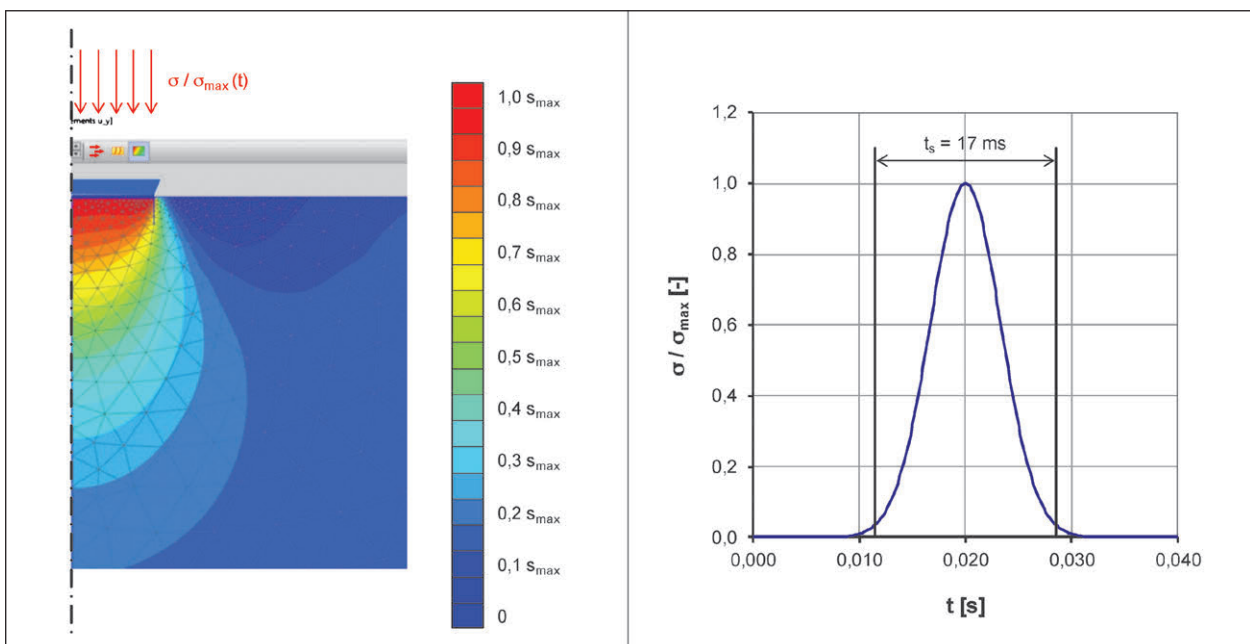


Bild 2-1: Ausschnitt des radialsymmetrischen Finite-Elemente-Modells mit beispielhafter Darstellung von berechneten Setzungen  $s$  (links); zeitabhängige dynamische Beanspruchung  $\sigma/\sigma_{\max}(t)$  der Lastplatte als Eingabe in das Finite-Elemente-Modell (rechts)

	ohne Verdichtung	sehr geringe Verdichtung	geringe Verdichtung	hohe Verdichtung	sehr hohe Verdichtung
Wichte $\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.800	1.900	2.000	2.100	2.200
Kohäsion $c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0				
Reibungswinkel $\phi$ [°]	30	35	40	45	50
Dilatanzwinkel $\psi$ [°]	0	5	10	15	20
Erddruckbeiwert $K_0$ [-]	0,4	0,5	0,6	0,7	0,
Querdehnzahl bei Ent- und Wiederbel. $v_{ur}$ [-]	0,286	0,333	0,375	0,412	0,444
Steifemodul bei Erstbelastung $E_{oed,ref}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Variante 1: 50 MN/m <sup>2</sup> Variante 2: 100 MN/m <sup>2</sup> Variante 3: 150 MN/m <sup>2</sup>				
Steifemodul bei Ent- und Wiederbel. $E_{ur}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$= 3 \cdot E_{oed,ref}$				
Steifigkeit im Triaxialversuch $E_{50}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$= E_{oed,ref}$				
Referenzspannung $\sigma_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	100				
Steifigkeitsexponent $m$ [-]	0,5				
Vorbelastungsspannung POP [kN/m <sup>2</sup> ]	0	62,5	125	250	500
Überkonsolidierungsverhältnis OCR [-]	1				

Tab. 2-1: Stoffmodellparameter des HS-Modells nach SCHANZ et al. (1999)

Um verschiedene Böden (feinkörniger Boden, gemischtkörniger Boden und grobkörniger Boden) bzw. Tragschichtmaterialien mit deutlich unterschiedlichen Steifigkeiten (z. B. sandiger RC-Mix und RC-Beton analog zu einem Kies) wiederzugeben, wurde der Parameter  $E_{oed,ref}$  in drei Varianten von 50 MN/m<sup>2</sup>, 100 MN/m<sup>2</sup> und 150 MN/m<sup>2</sup> rechnerisch untersucht. Insgesamt wurden somit jeweils 15 Berechnungen am Modell des statischen Plattendruckversuches und 15 Berechnungen am Modell des dynamischen Plattendruckversuchs durchgeführt und ausgewertet.

### 2.3 Statischer Plattendruckversuch

Zunächst wurde der statische Plattendruckversuch mit den in Tabelle 2-1 angegebenen Parametervarianten im Finite-Elemente-Modell nachgerechnet. Die Laststufen sowie die Auswertung erfolgten gemäß DIN 18134. So betrug die maximale Spannung bei der Erstbelastung 500 kN/m<sup>2</sup> und die maximale Spannung bei der Wiederbelastung 420 kN/m<sup>2</sup>. Die Moduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  wurden zwischen 150 kN/m<sup>2</sup> und 350 kN/m<sup>2</sup> als Sekantenmodul aus dem Simulationsergebnis berechnet. Die Berechnungsergebnisse für die in Tabelle 2-1 gezeigten Parametervarianten werden in den Diagrammen der Bilder 2-2, Bild 2-3 und Bild 2-4 gezeigt.

Die Moduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  sind zunächst proportional zur Steifigkeit  $E_{oed,ref}$  (Steifigkeit im Ödometer bei einer Spannung von 100 kN/m<sup>2</sup>). Die Größe der Vorbelastungsspannung POP beeinflusst vorwiegend den Verformungsmodul  $E_{V1}$ . Entsprechend dem Effekt, dass sich der Boden bzw. das Tragschichtmaterial seine Beanspruchung merken kann, ist die Beeinflussung der Größe von POP auf  $E_{V2}$  deutlich geringer. Damit zeigt sich gut, die Eignung des Parameters POP zur Wiedergabe unterschiedlich hoher Verdichtungsleistung.

Der Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  ist unabhängig von der Steifigkeit  $E_{oed,ref}$  des Bodens bzw. des Tragschichtmaterials. Der Verhältniswert nimmt jedoch mit zunehmender Größe von POP ab und strebt asymptotisch gegen einen Grenzwert, der bei ca. 1,5 liegt (Bild 2-4 rechts).

### 2.4 Dynamischer Plattendruckversuch

Analog zum statischen Plattendruckversuch wurden für die in Tabelle 2-1 angegebenen Parametervarianten rechnerische Analysen zum dynamischen Plattendruckversuch (Leichtes Fallgewichtsgesetz) durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse werden in den folgenden Diagrammen gezeigt.

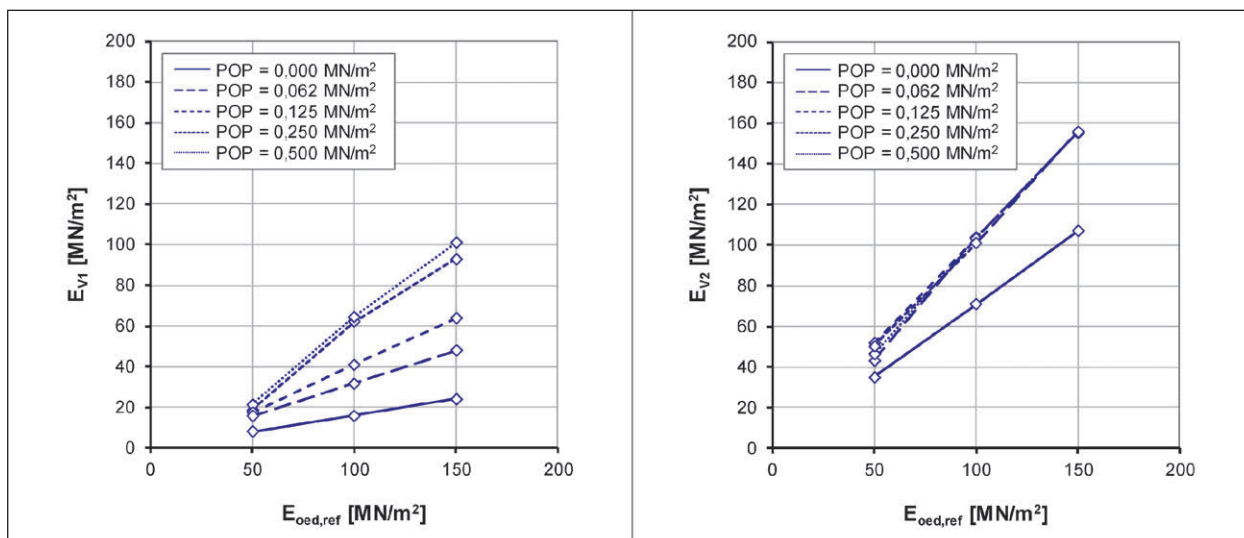


Bild 2-2: Rechnerische Ergebnisse zum statischen Plattendruckversuch; Erstbelastungsmodul  $E_{V1}$  (linkes Diagramm) und Wiederbelastungsmodul  $E_{V2}$  (rechtes Diagramm)

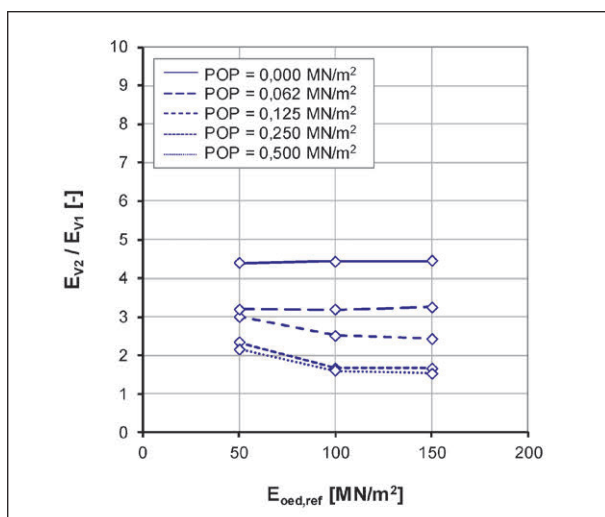


Bild 2-3: Rechnerisches Ergebnis zum Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$

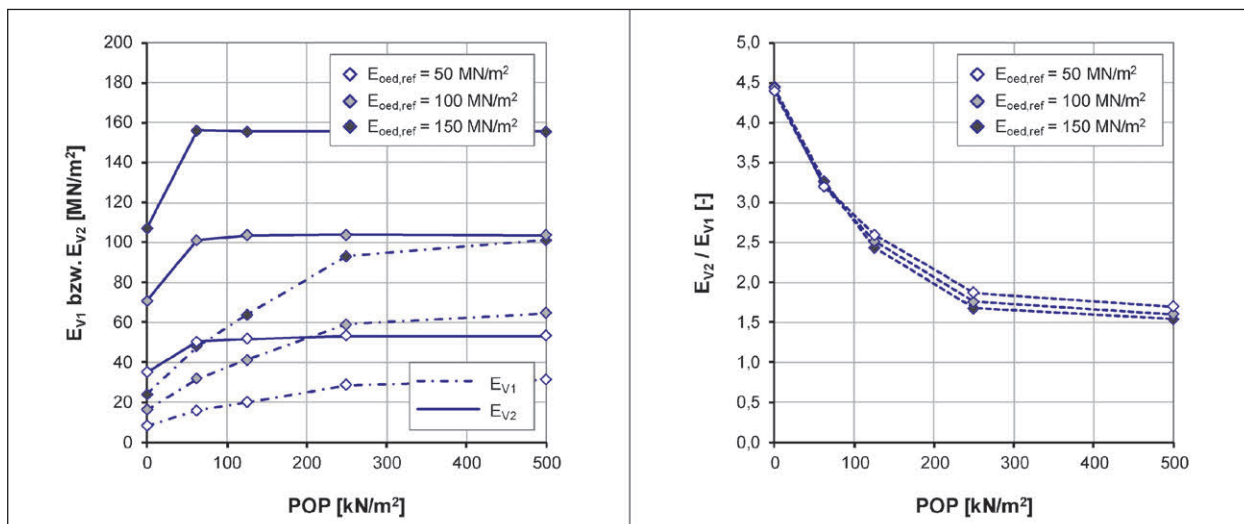


Bild 2-4: Rechnerisches Ergebnis zu den Moduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  (linkes Diagramm) und zum Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  (rechtes Diagramm) in Abhängigkeit von der Vorbelastung POP

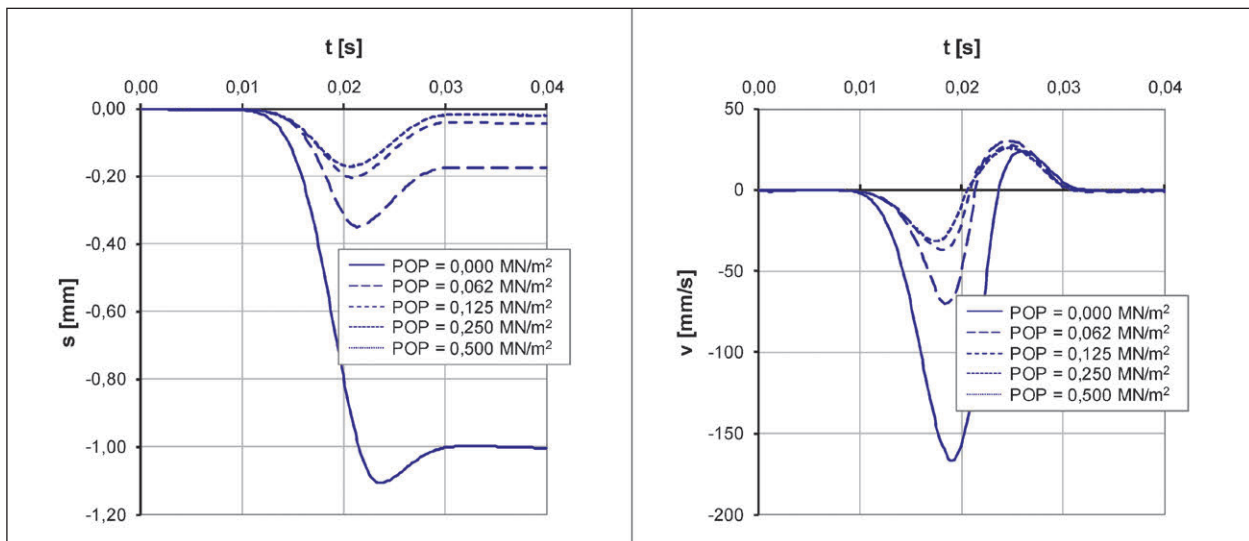


Bild 2-5: Rechnerisches Ergebnis zum zeitabhängigen Setzungsverlauf (linkes Diagramm) und zur zeitabhängigen Setzungsgeschwindigkeit (rechtes Diagramm) für  $E_{\text{oed,ref}} = 150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP

Zunächst gibt Bild 2-5 Ergebnisse zum zeitabhängigen Setzungsverlauf (linkes Diagramm) und zur zeitabhängigen Setzungsgeschwindigkeit (rechtes Diagramm) für  $E_{\text{oed,ref}} = 150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP. Sehr gut zu erkennen ist die Zunahme der bleibenden Setzung am Ende der Stoßbelastung mit abnehmender Vorbelastung POP. Höhere Setzungen werden durch entsprechend größere Setzungsgeschwindigkeiten erreicht, was das rechte Diagramm in Bild 2-5 veranschaulicht.

Trägt man die dynamisch wirkende zeitabhängige Spannung  $\sigma$  gegenüber der Setzung  $s$  auf, können die in Bild 2-6 eingetragenen Kurven ermittelt werden. Hohe Werte von POP ergeben analog zum statischen Plattendruckversuch (insb. Modul  $E_{V1}$ ) wiederum große Werte der Steifigkeit  $E_{Vd}$ . Mit abnehmender Vorbelastung POP vergrößert sich die innerhalb der Kurve liegende Fläche im Spannungs-Setzungs-Diagramm (Hysterese), was gut die bei geringer Verdichtung hohe Energiedissipation veranschaulicht. Die Energiedissipation muss z. B. im Modell eines Ein- oder Zwei-Massen-Schwingers durch einen vergleichsweise hohen Wert für den Parameter  $c$ , der den viskosen Dämpfer parallel zur Steifigkeit  $K$  charakterisiert, wiedergegeben werden, da der Dämpfer sowohl Material- als auch Abstrahlungsdämpfung abbilden muss. Dieses Berechnungsergebnis damit zeigt beispielhaft die Leistungsfähigkeit der Finiten-Elemente-Methode gegenüber den Modellen des Ein- oder Zwei-Massen-Schwingers. Der system- und materialabhängige Wert  $c$  wird nicht als grob abschätzba-

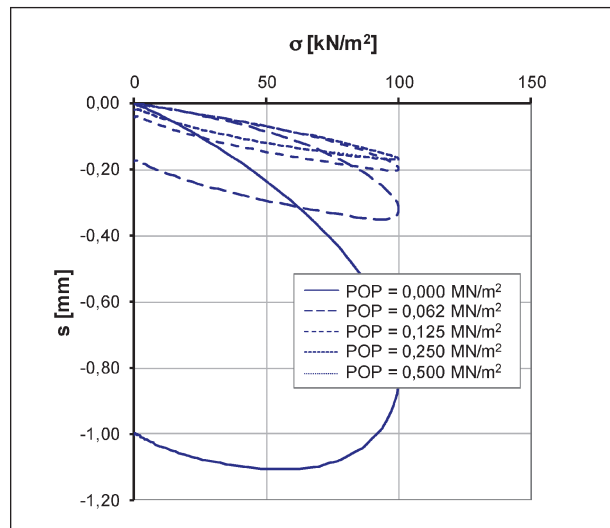


Bild 2-6: Spannungsabhängige Setzung für  $E_{\text{oed,ref}} = 150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP

rer Eingabeparameter benötigt. Die Materialdämpfung ergibt sich überwiegend aus den objektiv anhand von klar definierten Versuchen kalibrierbaren Stoffmodellparametern. Die geometrische Abstrahlungsdämpfung berechnet sich aus den geometrischen Abmessungen und Modellrandbedingungen an sich. Die im expliziten Zeitschrittverfahren notwendige numerische Dämpfung bleibt davon unberücksichtigt. Hierzu wurden die Berechnungsparameter entsprechend den Empfehlungen des Programms PLAXIS gewählt, welche durch ausführliche Validierungen des Finite-Elemente-Programms anhand analytischer Lösungen eingehend überprüft wurden und zu Berechnungsfehlern gegenüber

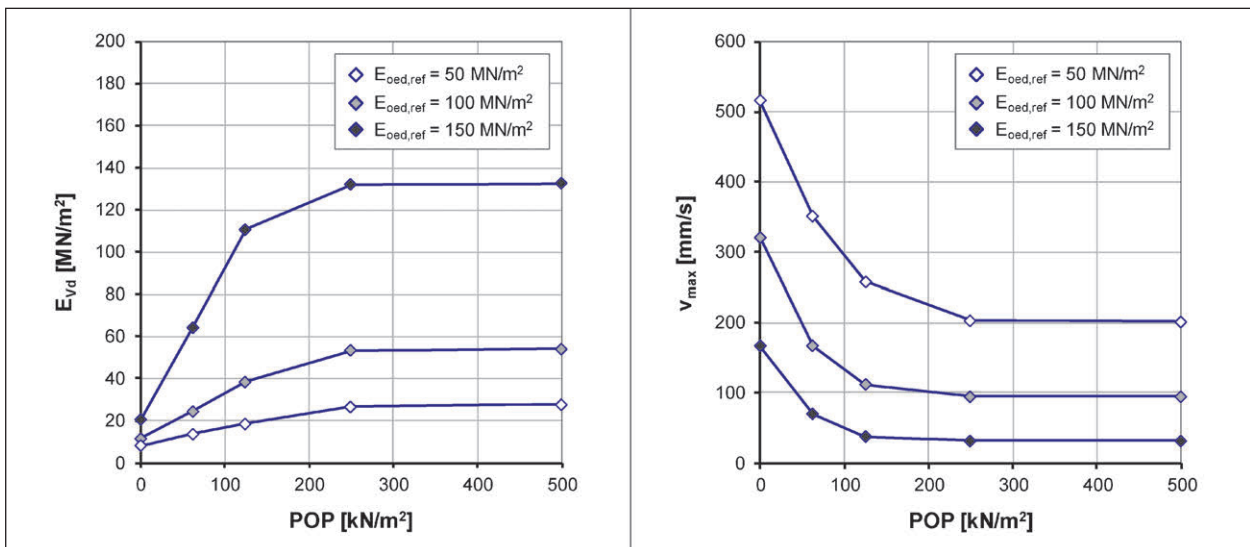


Bild 2-7: Rechnerisches Ergebnis zum dynamischen Verformungsmodul  $E_{Vd}$  (linkes Diagramm) und zur maximalen Setzungsgeschwindigkeit (rechtes Diagramm) für  $E_{oed,ref} = 50 \text{ MN/m}^2$ ,  $100 \text{ MN/m}^2$  und  $150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP

analytischen Lösungen im Bereich von unter 10 % führen.

In den Berechnungen wurden sowohl die Steifigkeit des Bodens beschrieben durch den Parameter  $E_{oed,ref}$  als auch die Verdichtung des Bodens, die unter anderem durch die Größe der Vorbelastung POP charakterisiert wird variiert. Die Abhängigkeit des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{Vd}$  von der Steifigkeit  $E_{oed,ref}$  und des Wertes POP wird in Bild 2-7 links gezeigt. Wie beim statischen Plattendruckversuch steigt für geringe Werte von POP bei konstanter Steifigkeit  $E_{oed,ref}$  der Verformungsmodul an. Erst bei einer Spannung POP, die über deutlich der im dynamischen Versuch erzielten maximalen Sohldruckspannung liegt, bleibt der Wert  $E_{Vd}$  unabhängig von POP nahezu konstant.

Die maximale Setzungsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Spannung POP asymptotisch ab. Das Diagramm in Bild 2-7 rechts zeigt einen Grenzwert von ca. 200 mm/s für  $E_{oed,ref} = 50 \text{ MN/m}^2$ , ca. 100 mm/s für  $E_{oed,ref} = 100 \text{ MN/m}^2$  und 30 mm/s für  $E_{oed,ref} = 150 \text{ MN/m}^2$ , der jeweils ab etwa POP = 200 kN/m<sup>2</sup> erreicht wird.

Trägt man das Rechenergebnis  $s/v$  gegenüber dem Wert der Vorbelastung POP an, so ergeben sich Kurven, wie sie das Diagramm Bild 2-8 links zeigt. Zu erkennen ist eine leichte Abnahme des Wertes  $s/v$  mit zunehmender Verdichtung des Bodens bzw. des Tragschichtmaterials, was durch den Wert POP wiedergegeben wird. Einzelne Rechenwerte im Bild 2-8 links zeigen Abweichungen vom Trend, die noch

nicht erklärbar sind und auf eine vergleichsweise hohe Sensitivität des Wertes  $s/v$  in Abhängigkeit

- von der gewählten Rechenmethode (dynamische Berechnung mit Finite-Elemente-Modell) und bzw. oder
- von einzelnen Stoffmodellparametern ggf. deren Kombination

zurückzuführen ist.

Ein ähnliches Bild zeigt das Ergebnis, welches das rechte Diagramm in Bild 2-8 zeigt. Der Trend der Kurven ergibt eine Zunahme des Wertes  $s/v$  aus dem dynamischen Plattendruckversuch mit sich vergrößerndem Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  ermittelt aus dem statischen Plattendruckversuch. Einzelne Werte der Kurve weichen jedoch von diesem Trend ab. Welche baupraktische Bedeutung und welche Ursachen diese Abweichungen haben, konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit, dessen Fokus primär auf der Auswertung von umfangreichen Reihen an Feldversuchen lag, nicht weiter analysiert werden. Gleiches gilt für den Umstand, dass die in den Versuchen bestimmten Werte  $s/v$  zumindest für verdichtete Böden bzw. Tragschichtmaterialien deutlich unter den hier rechnerisch ermittelten Werten lag.

In Ergänzung zu den gezeigten Analysen des Wertes  $s/v$  wurden die rechnerisch ermittelten bleibende Setzungen  $\Delta s$  ausgewertet. Die nach der dynamischen Beanspruchung des Bodens bzw. der Tragschichtmaterialien durch das Leichte Fallge-

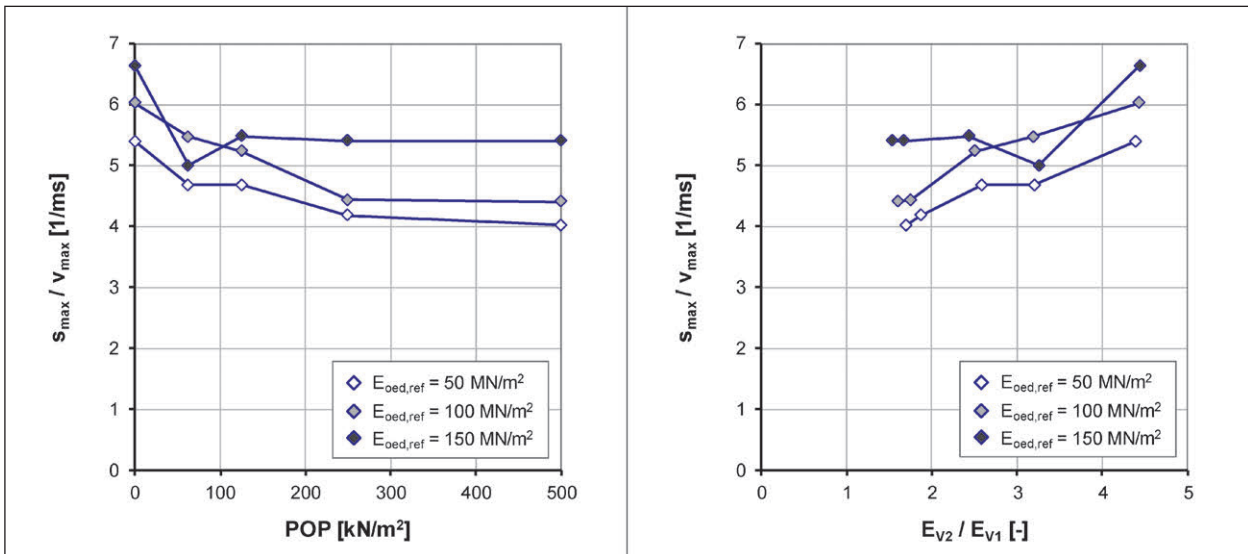


Bild 2-8: Rechnerisches Ergebnis zum Verhältniswert  $s/v$  aus dem dynamischen Plattendruckversuch in Abhängigkeit von POP (linkes Diagramm) und in Abhängigkeit vom Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  aus dem statischen Plattendruckversuch (rechtes Diagramm) für  $E_{oed,ref} = 50$  MN/m<sup>2</sup>, 100 MN/m<sup>2</sup> und 150 MN/m<sup>2</sup>

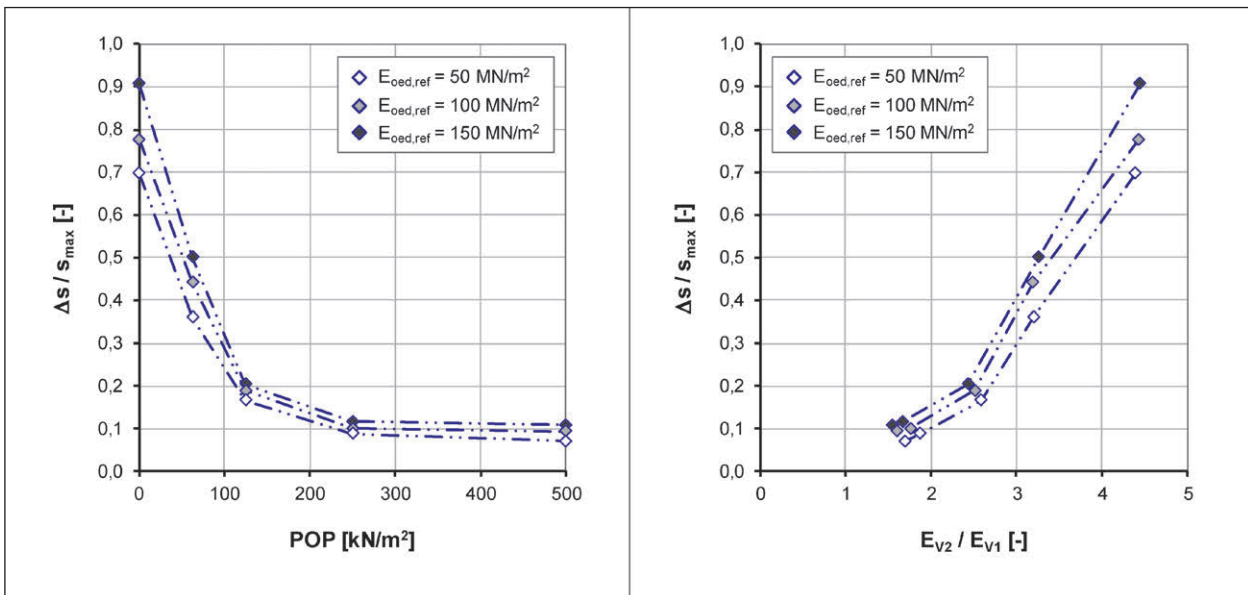


Bild 2-9: Rechnerisches Ergebnis zum Verhältniswert  $\Delta s/s$  aus dem dynamischen Plattendruckversuch in Abhängigkeit von POP (linkes Diagramm) und in Abhängigkeit vom Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  aus dem statischen Plattendruckversuch (rechtes Diagramm) für  $E_{oed,ref} = 50$  MN/m<sup>2</sup>, 100 MN/m<sup>2</sup> und 150 MN/m<sup>2</sup>

wichtiger bleibenden Setzungen  $\Delta s$  im Verhältnis zur maximalen Setzung  $s_{max}$  korrelieren sehr gut mit der Verdichtungsleistung bzw. dem Potenzial zur Nachverdichtung (siehe Bild 2-9 linkes Diagramm).

Eine gute und als sicher als hinreichend robust zu bewertende Korrelation zwischen dem Wert  $\Delta s/s_{max}$  und dem Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  gibt die Bild 2-9 im rechten Diagramm wieder.

## 2.5 Zusammenfassung

Es wurde auf Basis einer theoretischen Modellbildung der Zusammenhang zwischen bodenspezifischen Einflussgrößen und den beim dynamischen Plattendruckversuch messbaren Größen (Verschiebung bzw. Geschwindigkeit und Beschleunigung der Lastplatte) untersucht. Als bodenspezifische Einflussgrößen wurden die Steifigkeit und damit indirekt das Dichteniveau sowie das Potenzial plastischer Dichteänderungen, was dem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  im erdbautechnischen Sinn entspricht, betrachtet. Hierzu wurde die Finite-Elemente-Methode angewendet und das Verhalten einer im Erdbau verdichteten Schicht mit einem Stoffmodell abgebildet, wobei die entsprechend der Dehnung nichtlineare Steifigkeitsänderung sowie die zu erwartende geringe plastische Dehnung bei der vergleichsweise kleinen dynamischen Bodenbeanspruchung durch das Leichte Fallgewichtsgerät berücksichtigt wurde. Es wurde aus der dynamischen Interaktion zwischen der Lastplatte und dem Boden bzw. der Tragschicht die Kenngrößen des Verformungsmoduls  $E_{Vd}$  und der Wert  $s/v$  berechnet, und mit dem entsprechenden Werten  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  bzw. dem Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  verglichen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen zunächst, dass die durch den Stoß erzeugten plastischen Setzungen von der Größe der vorangehenden Verdichtung des Bodens bzw. Tragschichtmaterials abhängen. Je größer die Verdichtung desto geringer beträgt die plastische bzw. bleibende Setzung der Lastplatte. Dieser Zusammenhang lässt sich äquivalent mit dem Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  beschreiben. Weniger stark ausgeprägt ist die Abhängigkeit des Wertes  $s/v$  von der Größe der plastischen Setzungen. Entsprechend deutlich ist der Einfluss weiterer in dieser Arbeit nicht weiter bestimmbarer Einflussgrößen auf den Wert  $s/v$ . Eine Korrelation zwischen  $s/v$  und dem  $E_{V2}/E_{V1}$  ist prinzipiell erkennbar, jedoch schwanken einzelne Rechenwerte gegenüber dem Trend, der sich aus der Summe der Berechnungsergebnisse ergibt. Deutlich ausgeprägt ist dagegen die rechnerische Abhängigkeit zwischen dem Verhältniswert  $\Delta s/s_{max}$  (bleibende plastische Setzung im Verhältnis zur maximalen Setzung) und den rechnerischen Werten  $E_{V2}/E_{V1}$  aus dem statischen Plattendruckversuch. Eine zuverlässige und dabei einfache bzw. kostengünstige messtechnische Erfassung des Wertes  $\Delta s$  erscheint jedoch zumindest aktuell, wie im Forschungsbericht noch diskutiert wird, nicht erreichbar.

## 3 Kalibrierung des dynamischen Plattendruckversuches

Die Kalibrierung des dynamischen Plattendruckversuches (Leichtes bzw. Mittelschweres Fallgewichtsgerät) stellt sicher, dass die durch die Geräte von unterschiedlichen Herstellern gelieferten Versuchsergebnisse bei identischen Untergrundbedingungen gegenübergestellt werden können (HARTMANN & BRÄU 2003: 18). Sie muss vor der Auslieferung der Geräte, nach Reparaturen und mindestens einmal jährlich erfolgen. Die Durchführung ist in der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau Teil B 8.4 Ausgabe 2016 geregelt. Es wird die Belastungsvorrichtung hinsichtlich des zeitabhängigen stoßartigen Krafteintrages und die Setzungsmesseinrichtung kalibriert.

### 3.1 Kalibrierung der Belastungsvorrichtung (Kraftmessung)

In der TP BF-StB Teil B 8.4 (2016) sind die Sollwerte der Belastungsvorrichtung vorgegeben. Diese sind in Tabelle 3-1 für das Leichte Fallgewichtsgerät (LFG) und Mittelschwere Fallgewichtsgerät (MFG) zusammengefasst und sollen die Grundlage für vergleichbare Messwerte von Geräten unterschiedlicher Herstellern bilden. Um die Geräte auf die Sollwerte einzustellen, darf lediglich die Fallhöhe des Fallgewichts und die Vorspannung des Federpakets verändert werden. So wird einerseits bei Erhöhung der Vorspannung die maximale Stoßkraft  $F_{max}$  größer und die Stoßdauer  $t_{max}$  kleiner, andererseits nimmt bei Erhöhung der Fallhöhe  $h_0$  sowohl die maximale Stoßkraft als auch die Stoßdauer zu (BRANDL et al., 2007).

Um die Belastungsvorrichtung zu kalibrieren wird ein Kraftsensor (Kalibrierstand TU München: HBM

	LFG	MFG
Sollwert der maximalen Stoßkraft ( $F_{max}$ )	7,070 kN $\pm$ 1 %	14,140 kN $\pm$ 1 %
Maximale zulässige Standardabweichung der Stoßkraft	20 N	40 N
Sollwert der Stoßdauer ( $t_{max}$ )	17 ms $\pm$ 1,5 ms	13 ms $\pm$ 1,0 ms

Tab. 3-1: Vorgaben Stoßkraft und Stoßdauer gemäß TP BF-StB Teil B 8.4 2016: Tab. 1



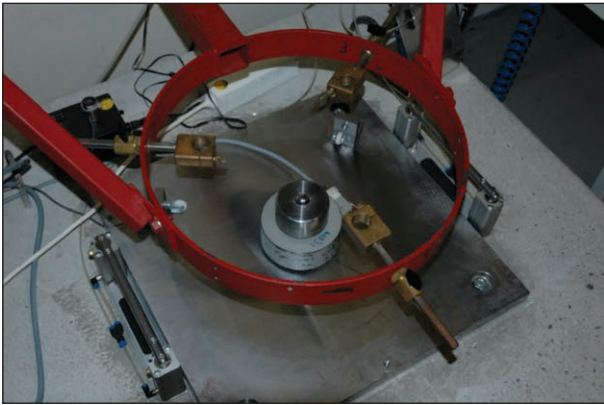


Bild 3-1: Montierte Kraftmessdose auf dem Kalibrierstand

Typ Z4) auf die Metallplatte geschraubt (siehe Bild 3-1) und an einen Messverstärker (Kalibrierstand TU München: HBM-KWS 3073 TF) angeschlossen. Die Belastungsvorrichtung wird auf die Zentrierkugel der Kraftmessdose gesetzt und mithilfe der Haltevorrichtung am Griff (siehe Bild 3-2) eingespannt. Diese bewirkt eine exakte axiale Ausrichtung der Führungsstange, sodass nur vertikale Verschiebungen der Fallmasse möglich sind.

Vor der Datenaufzeichnung werden drei Vorbelastungsstöße durchgeführt, die nicht in der Auswertung berücksichtigt werden. Anschließend beginnt die Aufzeichnung von drei Messreihen ( $i = 1, 2, 3$ ) zu jeweils 10 Schlägen ( $j = 1, 2, \dots, 10$ ). Hierbei wird für alle Stöße die maximale Stoßkraft  $F_{\max,ij}$  sowie die Stoßdauer  $t_{s,ij}$  separat aufgezeichnet. Die Stoßdauermessung startet, wenn die Kraft 210 N überschreitet und endet, wenn sie diesen Wert unterschreitet.

Die Messreihen werden anschließend einem sog. Ausreißertest unterzogen. Auf die Durchführung der Kalibrierung und den daraus folgenden Konsequenzen wird hier nicht näher eingegangen. Diese Informationen sind der TP BF-StB Teil B 8.4 (2016) zu entnehmen.

Wenn alle Auswertegrößen innerhalb der definierten zulässigen Fehlerbandbreiten den Sollwerten entsprechen, ist die Kalibrierung der Belastungseinrichtung abgeschlossen.

### 3.2 Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung

Nachdem die Belastungsvorrichtung auf die Sollwerte der Stoßkräfte aus der TP BF-StB Teil B 8.4 (2016) eingestellt wurde, kalibriert man die Set-

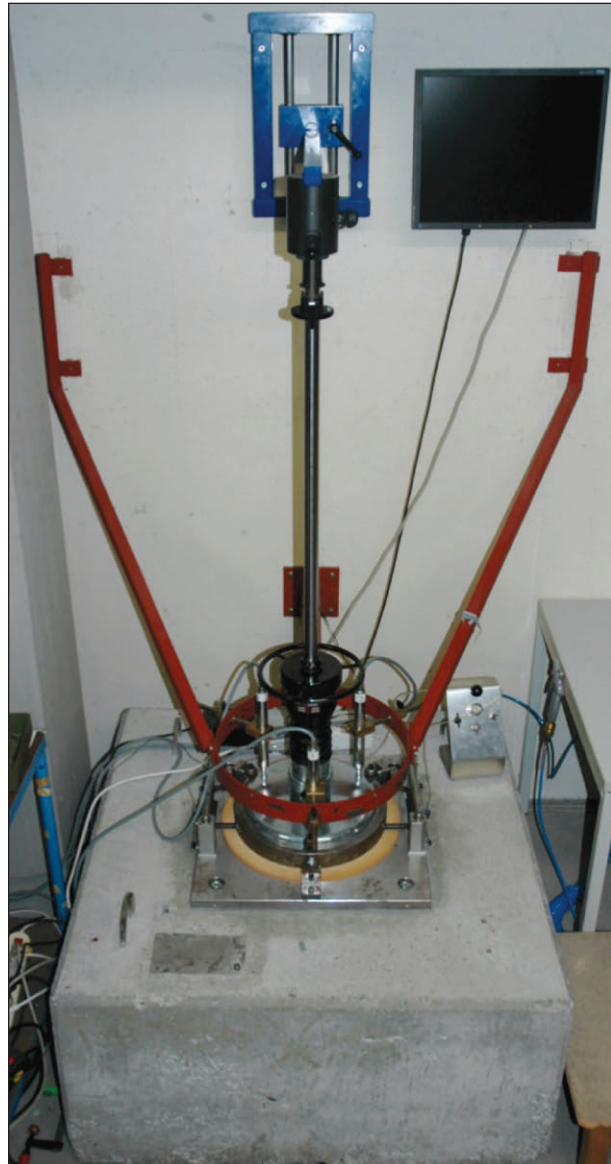


Bild 3-2: Messaufbau Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung

zungsmesseinrichtung. Der Aufbau ist Bild 3-2 zu entnehmen. Bei der Durchführung ist darauf zu achten, dass der gesamte Messbereich des LFG und MFG von 0,3 mm bis 1,5 mm abgedeckt wird. Hierfür werden Setzungsmatten des Typs Aclacell der Firma Acla-Werke GmbH mit unterschiedlicher Stärke auf die starre Unterlage (Betonblock mit aufgeschraubter Metallplatte, siehe Bild 3-2) des Kalibrierstandes aufgelegt, um drei Setzungsmessbereiche (siehe Tabelle 3-2) wiederzugeben.

Die Lastplatte des Fallgewichtsgerätes mit der Setzungsmesseinrichtung wird anschließend auf einer 30 kg schweren Metallplatte kraftschlüssig montiert und im Kalibrierstand auf die Setzungsmatten aufgelegt. Anschließend wird die Belastungsvorrichtung des Fallgewichtsgerätes aufgesetzt. Die Wand-

halterung dient hierbei wiederum der vertikalen Ausrichtung der Führungsstange.

Auf die Lastplatte werden nun drei induktive Wegaufnehmer (Kalibrierstand TU München: HBM-W10TS), die in einem Winkel von 120° zueinander angeordnet sind, aufgesetzt. Der Befestigungsrahmen der Wegsensoren überträgt bei der Messung keine Erschütterungen, die das aufgezeichnete Signal stören könnten. Bei der Versuchsdurchführung wird das Setzungssignal  $s^*_L$  bzw.  $s^*_M$  der Setzungsmesseinrichtung mit dem Mittelwert der drei Wegaufnehmersignale  $s_{IND}$  verglichen.  $s_{IND}$  wird bei der Kalibrierung als systemunabhängige Referenzgröße zu dem Messsignal des elektronischen Messgerätes des Plattenherstellers eingesetzt. Die induktiven Wegaufnehmer werden an Messverstärker angeschlossen (Kalibrierstand TU München: HBM-KWS 3073 TF), die das Signal intern filtern und an den Messcomputer weiterleiten. Die Filterrate ist der TP BF-StB Teil B 8.4 (2016) auf Seite 12 zu entnehmen. Die Tauchanker sind für einen Messbereich von ± 2 mm um die Nullpunktlage kalibriert und entsprechen darin der Genauigkeitsklasse 0,5 nach DIN EN ISO 9513. Die Kalibrierung der Wegmesskette des Referenzsystems ist ebenfalls der DIN EN ISO 9513 zu entnehmen und muss jährlich erfolgen.

Vor der Datenaufzeichnung werden drei Vorbela-stungsstöße ausgeführt. Anschließend beginnt die Messung. Aufgezeichnet werden für jeden Setzungsbereich 10 Messstöße ( $n = 10; j = 1, 2, 3, \dots, 10$ ). Die Bereiche für die jeweiligen Fallgewichtsgeräte sowie die dazugehörige Stärke der Setzungsmatten sind Tabelle 3-2 zu entnehmen.

Bei jedem Stoß werden die Setzung  $s^*_{L,ij}$  (LFG) bzw.  $s^*_{M,ij}$  (MFG) sowie die Setzungen der induktiven Wegaufnehmer  $s_{IND,ij}$  gemessen. Bei  $s_{IND,ij}$  handelt es sich um den Mittelwert der einzelnen Setzungssignale der Tauchanker. Die Ergebnisse werden in einem Kalibrierprotokoll vermerkt.

Anschließend werden die Daten des Setzungsmessgerätes denen der induktiven Wegaufnehmer gegenübergestellt. Hierbei errechnet man nach folgender Gleichung deren Differenz:

$$\Delta_{s,L/M,ij} = s^*_{L/M,ij} - s_{IND,ij} \tag{Gl. 1}$$

Analog zu Kapitel 3.1 wird mit den erhobenen Daten ( $s_{IND,ij}, s^*_{L/M,ij}, \Delta_{s,L/M,ij}$ ) jeder Messreihe ein Ausreißertest durchgeführt. Dessen Durchführung und die daraus folgenden Konsequenzen sind ebenfalls der TP BF-StB Teil B 8.4 (2016) zu entnehmen.

### 3.3 Verwendete Geräte

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit kamen die in Tabelle 3-3 aufgeführten Geräte zum Einsatz.

Alle Geräte wurden auf dem durch die BASt anerkannten Kalibrierstand der TUM Zentrum Geotechnik vor und auch im Laufe der Arbeiten Kalibrierungen unterzogen. Da teils die Vorgaben der Kalibrier-vorschriften bei den verschiedenen Setzungsbereichen nicht eingehalten wurden, wurden die Geräte zu den Herstellern gebracht und dort überprüft bzw. eingestellt. Anschließend erfolgte wieder eine Kalibrierung im eigenen Prüfstand. Es ergaben sich keine relevanten Änderungen aus den Herstellerüberprüfungen/-einstellung bei der eigenen Kalibrie-

Bezeichnung	Kurz-bezeichnung	Beschreibung
LFG HMP 6372	H10	Leichtes Fallgewichtsgerät der Firma HMP, Magdeburg
LFG ZORN 7731	Z10	Leichtes Fallgewichtsgerät der Firma Zorn, Stendal
MFG HMP MU001	H15	Mittelschweres Fallgewichtsgerät der Firma HMP, Magdeburg
MFG ZORN 4051	Z15	Mittelschweres Fallgewichtsgerät der Firma Zorn, Stendal

Tab. 3-3: Verwendete Fallgewichtsgeräte

Sollwerte			LFG		MFG	
Setzungs-bereich	von bis [mm]	Zielwert [mm]	$E_{vd,LFG}$ beim Zielwert [MN/m²]	Stärke der Setzungsmatten [mm]	$E_{vd,MFG}$ beim Zielwert [MN/m²]	Stärke der Setzungsmatten [mm]
3 (hart)	0,25 – 0,40	0,3	75	6	150	2
2 (mittel)	0,40 – 0,60	0,5	45	10	90	4
1 (weich)	> 0,90	1,4 (LFG) 1,2 (MFG)	16	23	37,5	10

Tab. 3-2: Wahl der zu verwendenden Setzungsmatten für unterschiedliche Setzungsbereiche (nach TP BF-StB Teil B 8.4 (2016))

rung. Die Klärung der Diskrepanzen zwischen den Kalibrierständen ist nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit. Hierzu liegen Arbeiten vor (z. B. KUDLA et al., 2014).

Da alle Versuchsreihen mit den gleichen Geräten durchgeführt wurden, sind die Auswertungen in sich durchgängig. Inwieweit die Abweichungen und Unterschiede in der Kalibrierung für die Feldversuche relevant sind und welche Werte richtig sind, konnte nicht geklärt werden. Aufgrund der Variation der Zustände im Felde und der Versuchsdurchführung erscheinen sie eher sehr untergeordnet.

## 4 Sonderversuche

### 4.1 Laserwegaufnehmer als systemunabhängige Messgröße

Um die Messwerte der Fallgewichtsgeräte sowohl im Gelände als auch im Kalibrierstand systemunabhängig überprüfen zu können, werden drei Laserwegaufnehmer opto NCDT 2300-10 der Firma Micro Epsilon eingesetzt. Grundlegende Vergleichsversuche wurden im Rahmen einer das Forschungsvorhaben begleitenden Masterarbeit untersucht (KRÖHN 2016).

Die folgende Erläuterung der Laser-Wegaufnehmer ist der Betriebsanleitung des Herstellers entnommen (MICRO EPSILON 2016).

#### 4.1.1 Funktionsprinzip und technische Daten

Die verwendeten Laser strahlen einen sichtbaren Lichtpunkt auf die zu beprobende Oberfläche und messen über die Reflexion und die dafür benötigte Zeit den Abstand zum Objekt. Dabei können die Laser zum einen diffuse und zum anderen direkte Reflexionen messen. Für den Versuchsaufbau wurde die Anordnung zur Messung der diffusen Reflexion gewählt (siehe Bild 4-1).

Eine Empfängeroptik fängt das reflektierte Streulicht auf und ein ortsabhängiges Element (CMOS) ermittelt die Intensität des einfallenden Lichtes. Eine sog. Advanced Real-Time-Surface-Compensation (A-RTSC) kompensiert schon während der Messung Helligkeitsschwankungen auf dem zu messenden Objekt in Echtzeit.

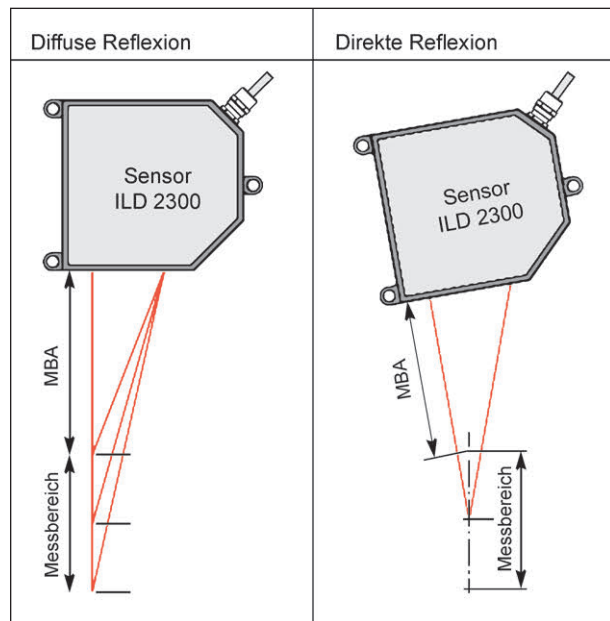


Bild 4-1: Montagemöglichkeiten der Laser

Die Laserdiode des opto NCDT 2300-10 sendet einen Laserstrahl der Wellenlänge 670 nm (rot) bei einer maximalen Leistung von 1 mW aus und entspricht somit der Laserklasse 2. Die Laser sind von  $-20\text{ °C}$  bis  $+50\text{ °C}$  bei einer Betriebstemperatur von  $0\text{ °C}$  bis  $+50\text{ °C}$  einsetzbar und erfüllen somit die Anforderung der TP BF-StB Teil B 8.3 und der TP Gestein-StB Teil 8.2.1. Der Messbereich der eingesetzten Lasersensoren beträgt  $\pm 5\text{ mm}$ .

#### 4.1.2 Aufbau und Messprinzip bei der Laser-Messeinrichtung

##### Kalibrierstand

Die Laser werden an einem Kranz aus Aluminium in einem Winkel von  $120\text{ °}$  zueinander montiert. Ein Schutzgehäuse sichert das empfindliche Mess-equipment vor Beschädigungen.

Diese Laser-Messtechnik wurde neben den induktiven Wegaufnehmern am Kalibrierstand montiert, um neben dem Referenzwegmesssystem nach der Kalibriervorschrift TP BF-StB Teil B 8.4 (2016) eine zweite systemunabhängige Messgröße bei der Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung zu erhalten. Der Aufbau ist Bild 4-2 zu entnehmen. Der Laserkranz wurde mithilfe von drei Schraubzwingen auf dem Befestigungsrahmen der induktiven Wegaufnehmer verspannt. Dieser Aufbau stellt sicher, dass die Messtechnik nicht von Schwingungen, die während des Stoßes auftreten können, beeinflusst wird.

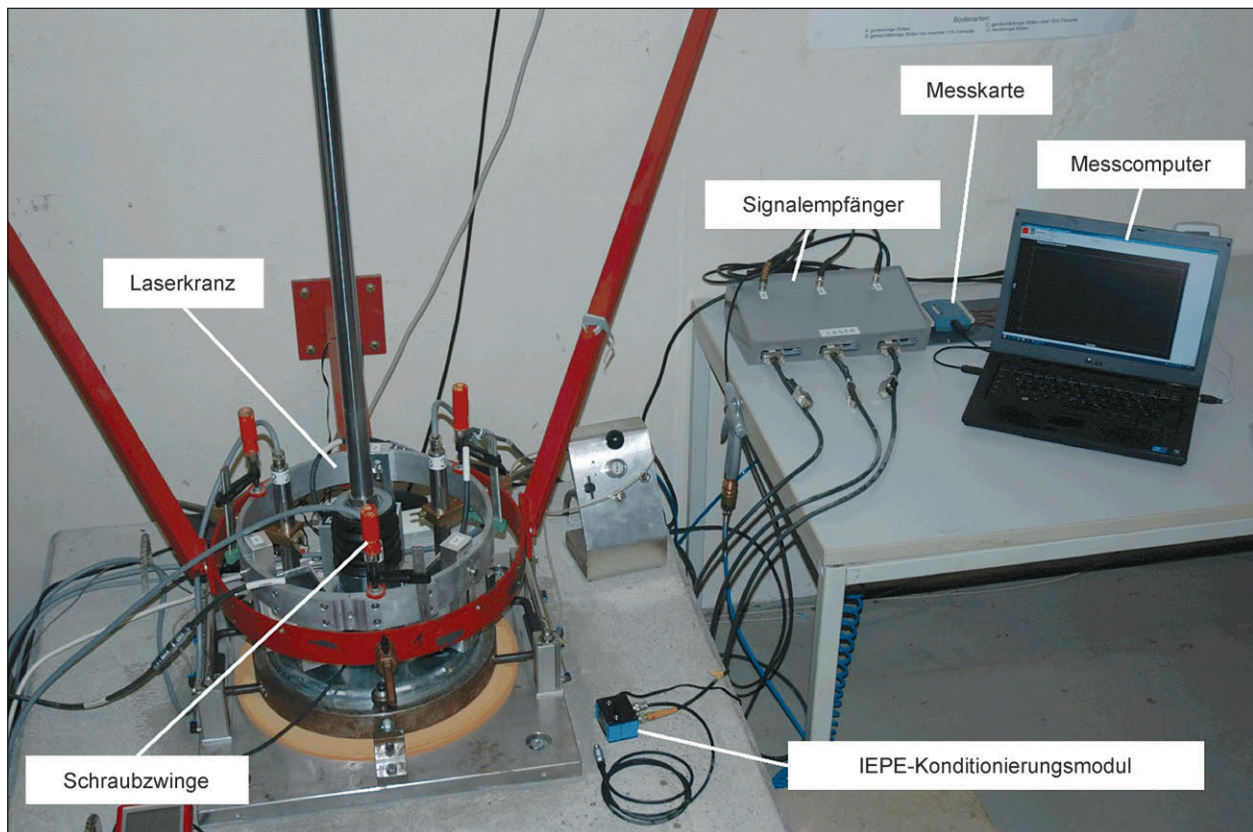


Bild 4-2: Messkette für die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung mit zusätzlichen Laserwegaufnehmern

Die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung erfolgte mit den zusätzlichen Laserwegaufnehmern analog zu der in Kapitel 3.2 beschriebenen Kalibrierung. Es wurden ebenfalls alle Setzungsbereiche aufgezeichnet. Die erhaltenen Daten der Laserwegaufnehmer dienen in der späteren Auswertung dazu einen Umrechnungsfaktor bestimmen zu können, der die Auswertung des Beschleunigungssignals des Lastplattensensors erlaubt.

### Feldversuche

Für Feldversuche kann an den Aluminiumkranz ein Adapter festgeschraubt werden, der die Montage des Kranzes statt des Tastarms an der Wegmessbrücke der statischen Lastplatte ermöglicht. Dies kommt bei der Feldarbeit zum Einsatz, da hierbei der Laserkranz freischwebend über der Setzungsmesseinrichtung des zu untersuchenden LFG bzw. MFG angebracht werden muss (siehe Bild 4-3).

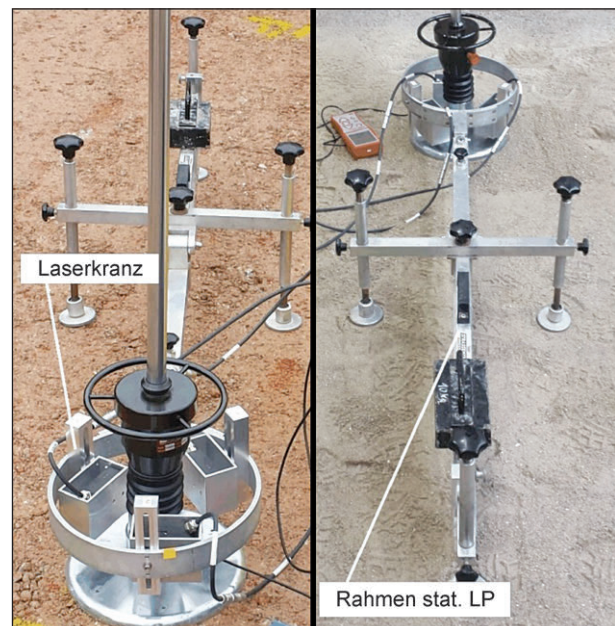


Bild 4-3: Messaufbau Laserwegaufnehmer im Gelände

Bei der Versuchsdurchführung zeichnen die drei Laser jeweils die Einsenkung der Lastplatte auf. Die ermittelten Größen werden anschließend über einen Kalibrierfaktor in eine Setzung

$s_{\text{LASER},1,2,3}$  [mm] umgerechnet. Aus den ermittelten Setzungswerten der drei Laser wird anschließend deren Mittelwert  $s_{\text{LASER}}$  gebildet, der für die weitere Auswertung verwendet wird.

### 4.1.3 Vergleich Setzungen induktive Wegmessung – Lasermessung

Um die Funktionstüchtigkeit der Lasermessungen darzustellen, wurden direkte Vergleiche zwischen beiden Messsystemen durch Auswertung von Stößen im Kalibrierstand bei unterschiedlichen Setzungsmatten (= Setzungsbereichen) durchgeführt.

In Bild 4-4 sind die Ergebnisse der Vergleichsmessung aufgetragen, wobei im linken Diagramm zunächst die Regression für alle Messpunkte, im rechten Diagramm die um Ausreißer bereinigte dargestellt ist.

Das Bestimmtheitsmaß liegt bei  $R^2 = 1,00$  und die Regressionsgerade stellt praktisch die Winkelhalbierende dar. Dies bedeutet, dass das Laser-Messsystem sehr gut für die Überprüfung der tatsächlichen Setzungen auch hinsichtlich der Auswertegeschwindigkeit geeignet ist.

### 4.1.4 Kalibrierstand: Vergleich Setzungen Geräte – induktive Wegmessung – Lasermessung

Um die Bestimmung der Setzung in den Fallgewichtsgeräten durch die Mehrfachintegration der Beschleunigungssignale zu überprüfen wurden zunächst auf dem Kalibrierstand für die verschiedenen Geräte in den zur Kalibrierung vorgesehenen Setzungsbereiche Vergleichsmessungen mit dem Standardmesssystem der induktiven Aufnehmer und zusätzlich mit dem Laser-Messsystem durchgeführt (siehe Kapitel 4.1.2). In folgenden Bildern (Bild 4-5 bis Bild 4-9) sind die Ergebnisse für die verwendeten Fallgewichtsgeräte aufgetragen, wobei jeweils im linken Diagramm die Regression für alle Messpunkte, im rechten Diagramm die um Ausreißer bereinigte dargestellt ist.

Die Auswertung zeigt, dass die Korrelationen mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 1,0$  (ohne Ausreißer) eindeutig ist und grundsätzlich beide externen

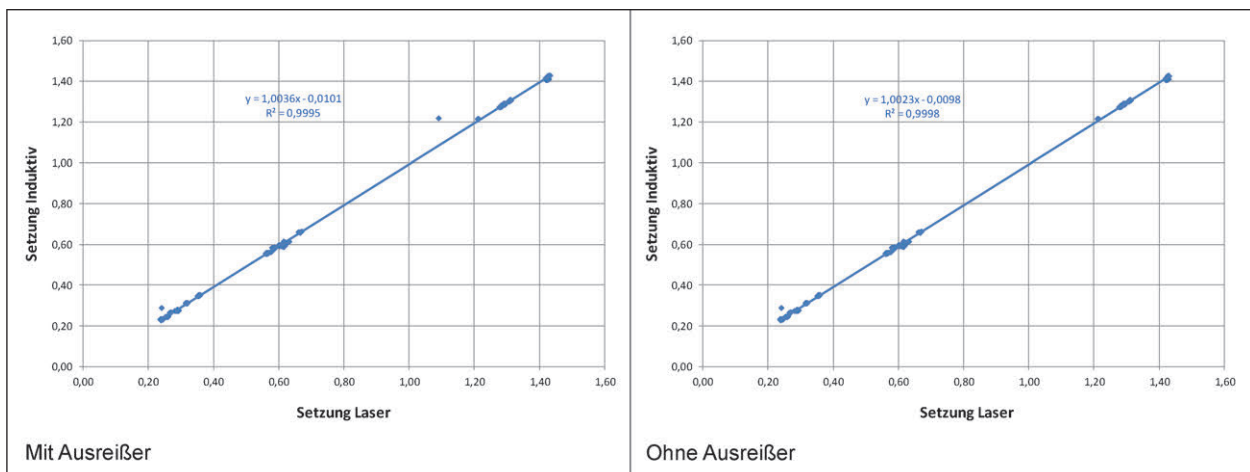


Bild 4-4: Vergleich induktive Wegmessung und Lasermessung

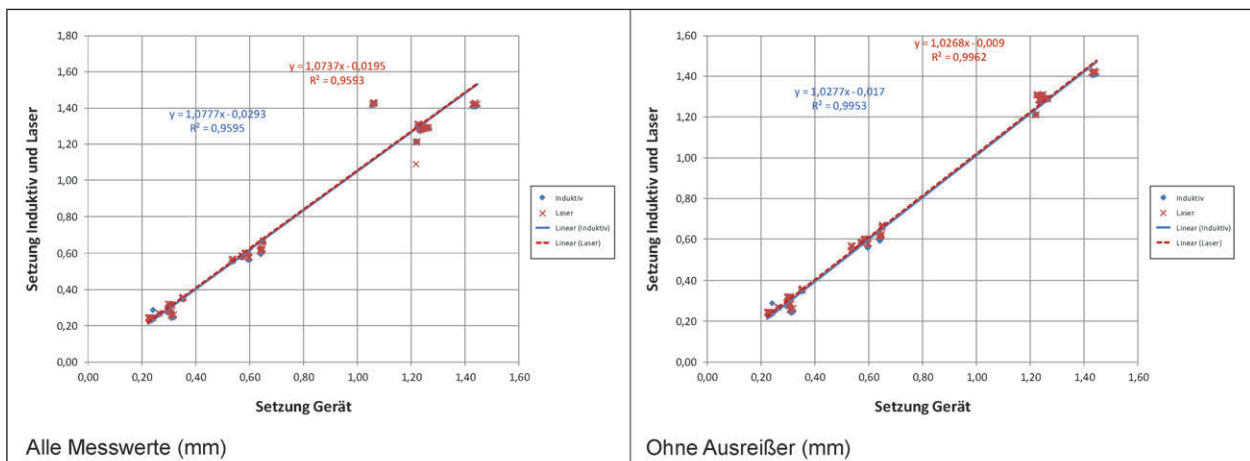


Bild 4-5: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, alle Geräte

Messsysteme für den Einsatz bei der Kalibrierung geeignet erscheinen. Allerdings wurde festgestellt, dass die Werte des Laser-Messsystem ca. 0,02 mm über den Werten des induktiven Systems liegt (allgemeiner Versatz), was sich auch in den Unter-

schieden bei den Ordinatenabschnitten der Regressionsgeraden widerspiegelt. Eine Übereinstimmung mit der aktuellen Kalibriervorschrift ist somit nicht erreicht.

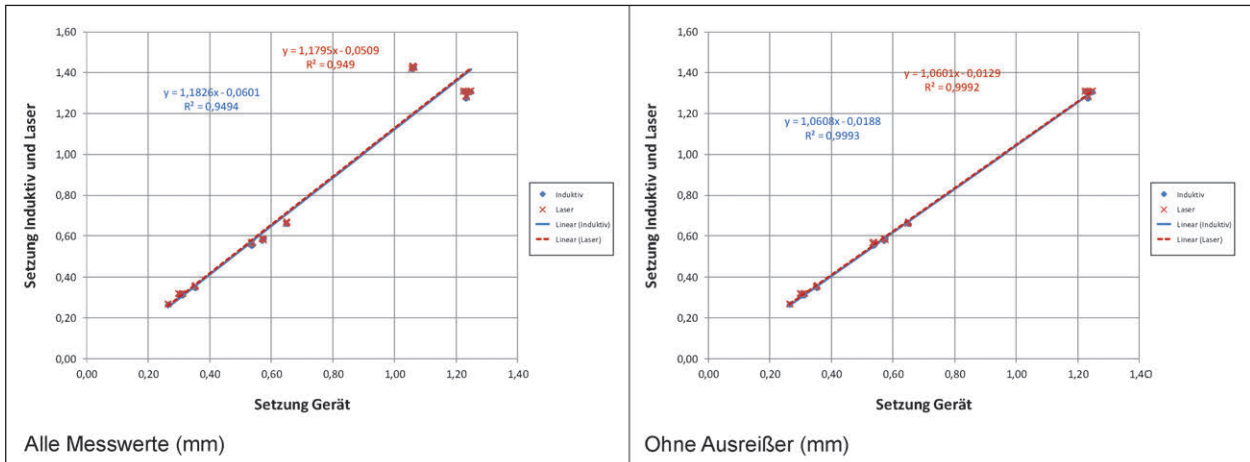


Bild 4-6: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, H10

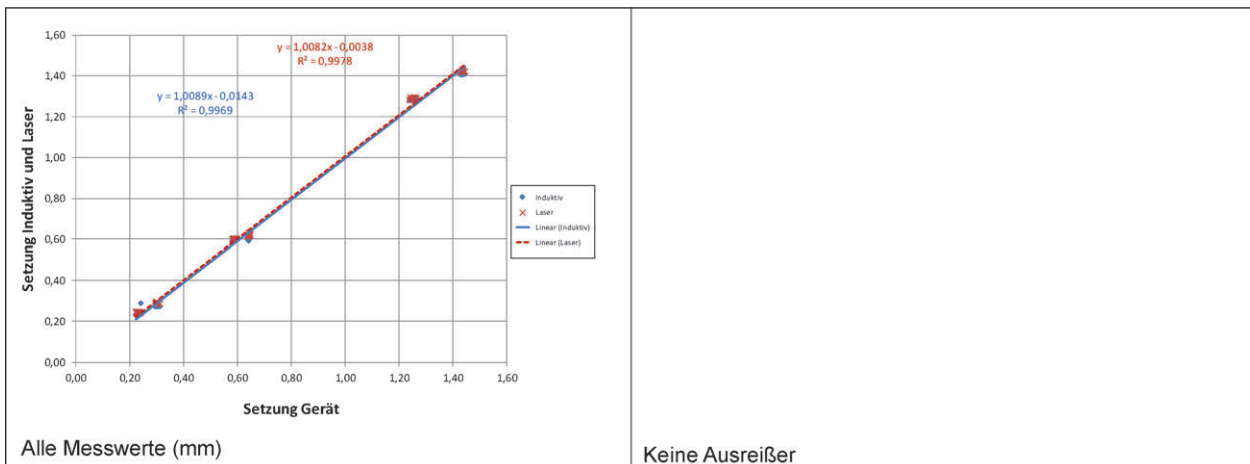


Bild 4-7: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, H15

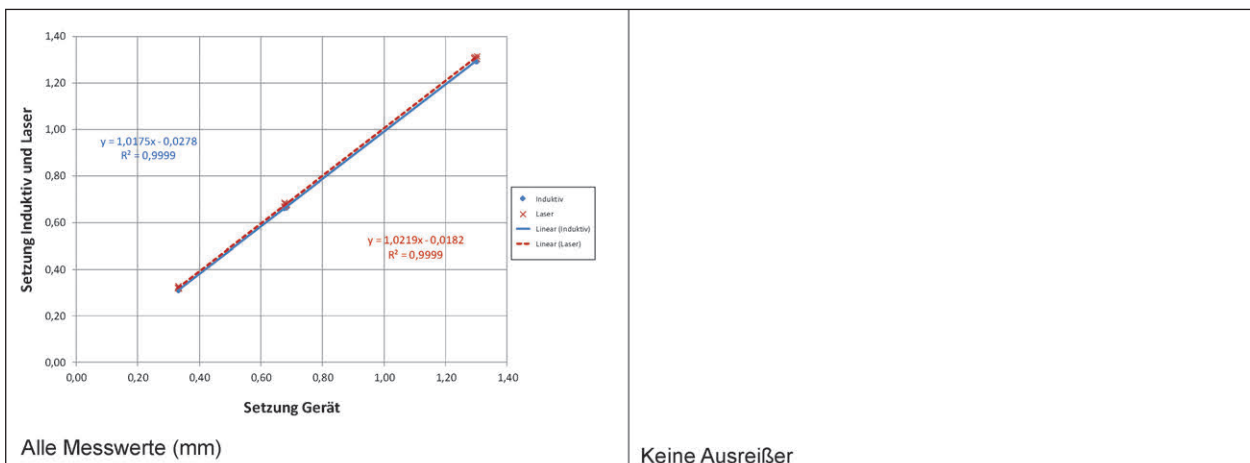


Bild 4-8: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, Z10

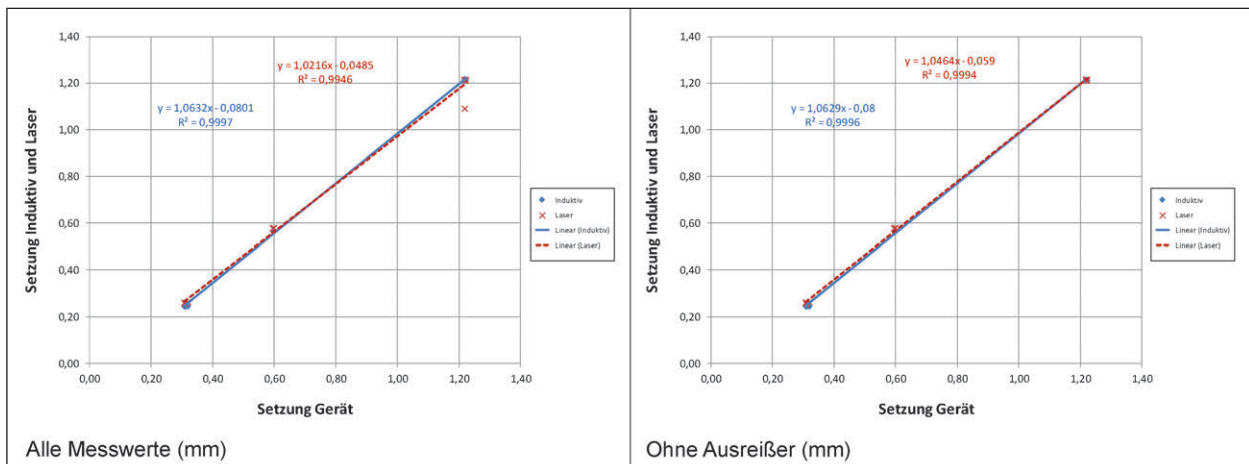


Bild 4-9: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, Z15

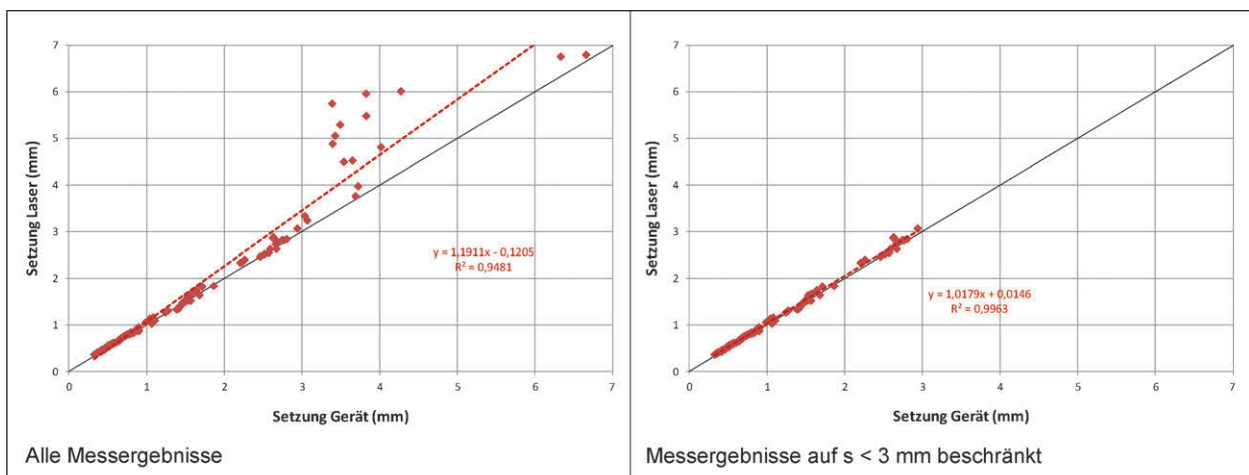


Bild 4-10: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/Laserwegmessung, Böden, alle Geräte

In den geringen Setzungsbereichen ist die Übereinstimmung mit den Werten der Fallgewichtogeräte H10 und H15 besser als im größeren Setzungsbe-  
reich, wobei hier beide externe Messsysteme zu große Unterschiede gegenüber den Werten der Fallgewichtogerät aufwiesen. Es ist also anzunehmen, dass im größeren Setzungsbe-  
reich durch den Stoßvorgang und das Springen der Last- und der Trägerplatte Ungenauigkeiten beim Schwingungs-  
signal zu den Abweichungen bei den integrierten Setzungswerten führen oder eine Überprüfung der Aufnehmer oder der Auswertesoftware sinnvoll  
wäre. Die Übereinstimmung bei den Geräten Z10 und Z15 ist über den untersuchten Bereich durchweg positiv zu bewerten.

#### 4.1.5 Feldversuche: Vergleich Setzungen Geräte – Lasermessung

Zusätzlich zu der in Kapitel 4.2 genannten Messmethode wurden die Messungen der LFG und MFG

auf verschiedenen Bodenmaterialien mit Laserweg-  
aufnehmern überprüft.

Der Laserkranz wurde an dem Rahmen des stati-  
schen Plattendruckgerätes montiert und freischwebend über den Setzungsmesseinrichtungen der LFG bzw. MFG angebracht (siehe Bild 4-3). Nach  
der Justierung der Laser wurden die Messungen mit allen Fallgewichtogeräten nacheinander auf denselben Messpunkten durchgeführt. Bei den Ge-  
rätschaften der Firma HMP wurde zusätzlich das IEPE-Konditionierungsmodul angeschlossen, um sowohl die Messwerte des elektronischen Messge-  
rätes, als auch das Beschleunigungssignal des LP-Sensors aufzeichnen zu können.

In den Bildern 4-10 bis 4-14 sind die Setzungen er-  
mittelt durch die Fallgewichtogeräte gegenüber den externen Laser-Messungen aufgetragen. In den linken Diagrammen sind alle ermittelten Werte mit zu-  
gehöriger Regression dargestellt. Für die rechten Diagrammen (soweit erforderlich) werden nur die

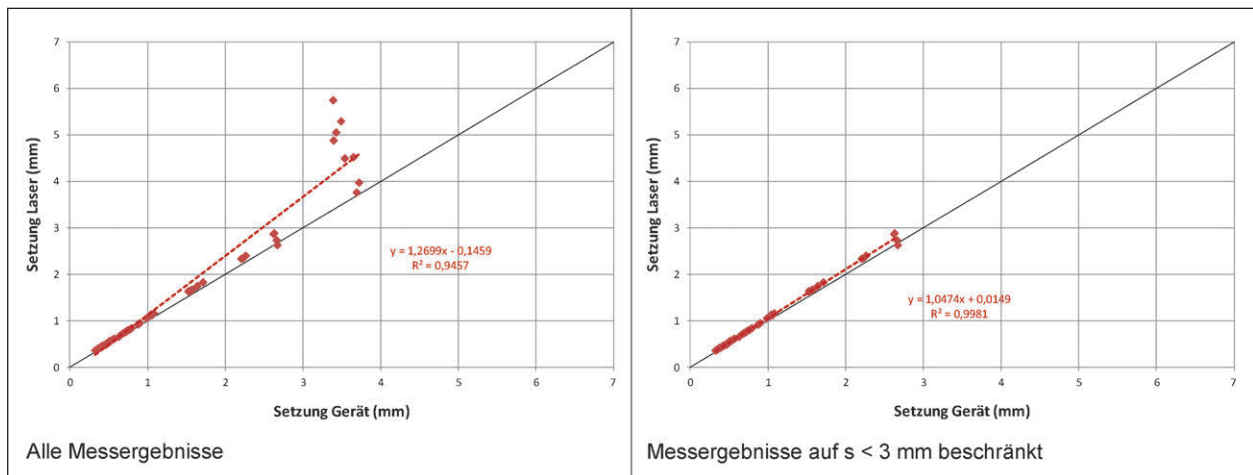


Bild 4-11: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/Laserwegmessung, Böden, H10

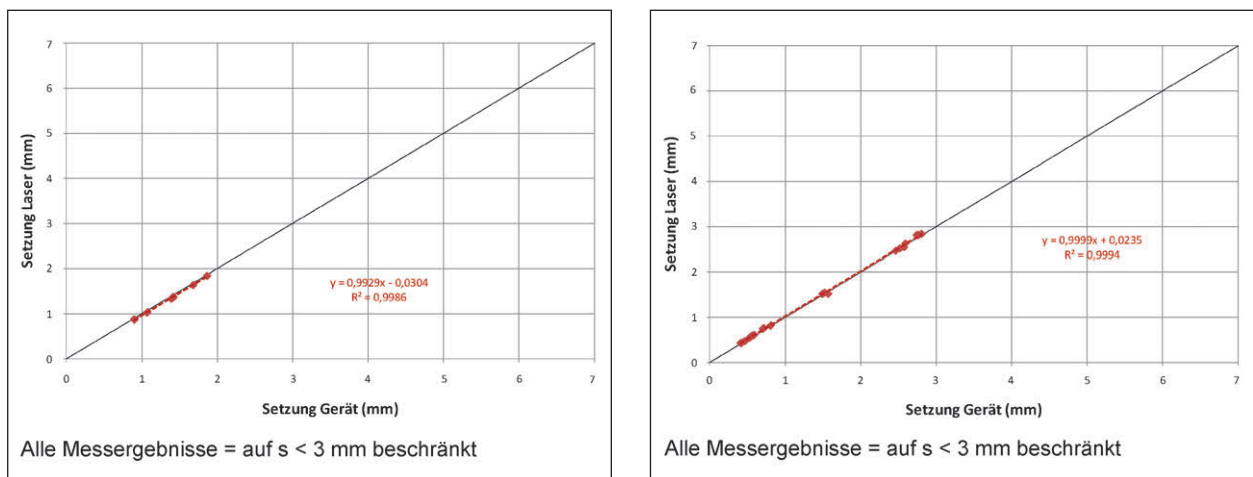


Bild 4-12: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/Laserwegmessung, Böden, H15 Geräte

Bild 4-13: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/Laserwegmessung, Böden, Z10

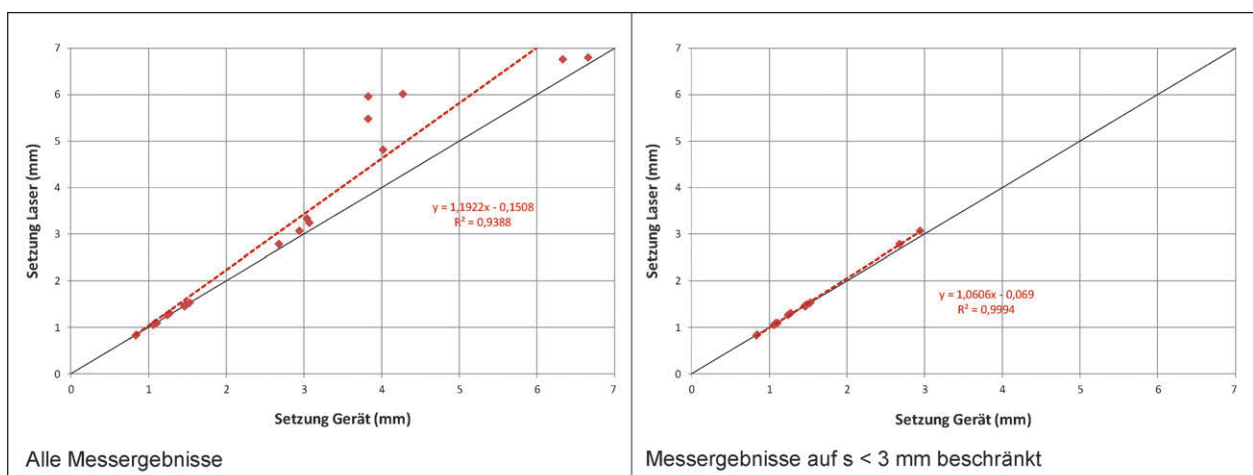


Bild 4-14: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/Laserwegmessung, Böden, Z15

Setzungswerte kleiner als 3 mm aus den Fallgewichtsgeschichten berücksichtigt. Die Regression wurde ebenfalls auf diesen Bereich eingeschränkt. Zur

besseren Vergleichbarkeit wurde der Achsenmaßstab gleichgehalten.



Für die Geräte H15, Z10 und Z15 ist im Bereich bis 3 mm eine gute Übereinstimmung der beiden Messsysteme festzustellen. Im Bereich über 3 mm, für den nur Ergebnisse für die Geräte H10 und Z15 vorliegen, weichen die Ergebnisse deutlich voneinander ab. Die tatsächlichen Werte, die mit dem Laser-Messsystem ermittelt wurden, werden von den beiden Fallgewichtsgeräten deutlich unterschritten.

## 4.2 Schwingungssignal der dynamischen Lastplatte

### 4.2.1 Allgemeines

Grundsätzlich erfolgt die Auswertung des Schwingungssignals der dynamischen Lastplatte in der Auswerteeinheit des Herstellers, der durch mehrfache Integration die Setzungen der Platte ermittelt. Die Firma HMP ermöglichte für diese Forschungsarbeit den Zugang zum originalen Schwingungssignal, das mit einem IEPE-Konditionierungsmodul der Firma Metra Mess- und Frequenztechnik (MMF) verarbeitet werden kann. Es handelt es sich um einen Messverstärker, der dank eines verbauten IEPE-Sensors Beschleunigungs-, Kraft- und Drucksignale bei dynamischen Messungen aufbereiten kann. Das Konditionierungsmodul wandelt das piezoelektrische Signal des Lastplattensensors in ein Spannungssignal um (Datenblatt MMF 2016). Der Verstärker kam bei der Beprobung der beiden Fallgewichtsgeräte (LFG und MFG) der Firma HMP zum Einsatz um das Beschleunigungssignal der Lastplatte aufzeichnen zu können.

Grundlegende Versuche und Auswertungen wurden im Rahmen einer das Forschungsvorhaben begleitenden Masterarbeit untersucht (KRÖHN 2016).

### 4.2.2 Versuchsdurchführung im Kalibrierstand

Neben der Kalibrierung wurden am Kalibrierstand mit dem leichten und mittelschweren Fallgewichtsgerät der Firma HMP zwei Versuchsreihen zur Betrachtung einer möglichen mitschwingenden Bodenmasse durchgeführt. Diese im Freifeld unmittelbar von der Krafteintragung durch die Fallgewichtsgeräte betroffene Bodenmasse wird im Kalibrierstand durch eine zusätzlich an der Lastplatte befestigte 30 kg schwere Stahlplatte simuliert, die über den Gummimatten liegt.

Für alle in der Kalibriervorschrift festgelegten Setzungsbereiche (siehe Tabelle 3-2) wurden die Untersuchungen entsprechend der Kalibriervorschrift mit der zusätzlichen Stahlplatte (mitschwingende Bodenmasse) und auch ohne diese durchgeführt. Der unterschiedliche Messaufbau ist Bild 4-15 zu entnehmen.

Es wurden pro Setzungsbereich 3 Messreihen zu jeweils 6 Stößen durchgeführt. Bei der ersten und dritten Messreihe wurden die Signale der Laser ( $s_{\text{LASER}}$ ), der induktiven Wegaufnehmer ( $s_{\text{IND}}$ ) und die Daten des elektronischen Messgerätes ( $s_{\text{L,M}}^*$ ) des Plattenherstellers aufgezeichnet. Für die zweite Messreihe wurde das elektronische Messgerät von der Platte abgesteckt und das IEPE-Konditionierungsmodul angeschlossen, welches das Beschleunigungssignal des Lastplattensensors ( $a_{\text{HMP}}$ ) aufzeichnete.

### 4.2.3 Berechnung der Setzung aus Schwingungssignal

Das IEPE-Konditionierungsmodul wandelt das piezoelektrische Beschleunigungssignal des Lastplattensensors in ein Spannungssignal um (WAGNER

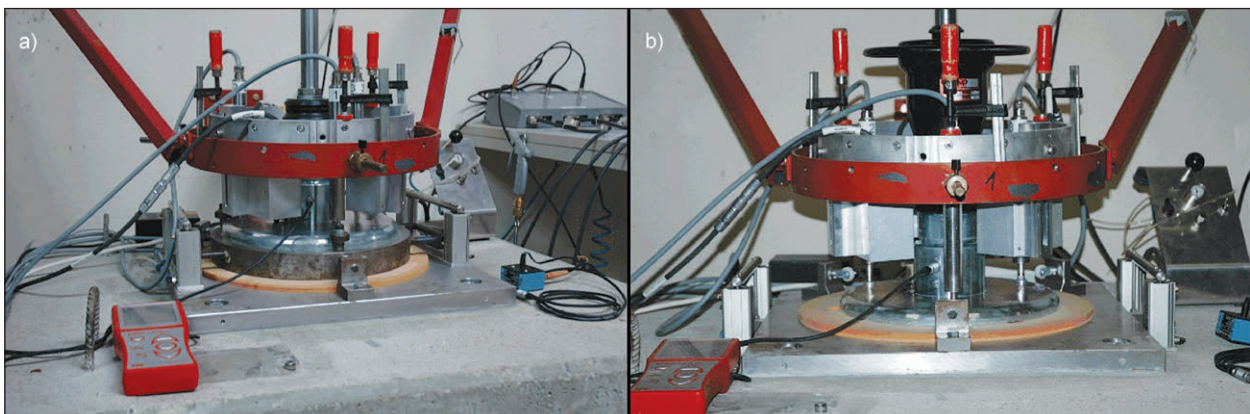


Bild 4-15: Versuchsaufbau Messungen auf Kalibrierstand mit mitschwingender Bodenmasse a); Versuchsaufbau auf Kalibrierstand ohne mitschwingende Bodenmasse b)

& BURGEMEISTER 2012). Hierbei wird bei jedem Stoß das Schwingungssignal alle 0,05 ms aufgezeichnet. Die Datenerfassung endete nach einer Sekunde Aufzeichnungszeit. Das Signal dient nun dazu, die Setzungsberechnung des elektronischen Setzungsmessgerätes des Lastplattenherstellers nachzuvollziehen und überprüfen zu können. Die Beschleunigungs- und Lasersignale wiesen anfänglich einen geringen Offset auf. Dieses wurde mithilfe des Programms „DLP-extract“ von TUM-ZG beseitigt. Da die Beschleunigungs- und Lasersignale neben dem zu erwartenden Peak des Stoßes eine Störung im Signal aufwiesen (vgl. Bild 4-16 a.1, b.1), wurde der zeitliche Ausschnitt des Signals so gewählt, dass es kurz nach dem ersten Peak ausgeschnitten wurde. Dieser Arbeitsschritt ist in Bild 4-16 exemplarisch an einem Stoß auf dem Sand-Kies-Gemisch in der Testgrube der TUM dargestellt.

Mithilfe des Statistikprogramms „Origin Pro 2016“ der Firma OriginLab wurden die Daten weiterverar-

beitet und grafisch dargestellt. Die Datenverarbeitung ist in Bild 4-16 grafisch aufgezeigt. Das Beschleunigungssignal wurde über den Programmpunkt „Analyse“, „Signalverarbeitung“ und „IIR Filter“ mittels eines Tiefpassfilters nach BUTTERWORTH gefiltert (siehe Bild 4-16 b). Die Einstellungen sind Tabelle 4-1 zu entnehmen. Ursprünglich übernimmt das zum Fallgewichtsgemisch gehörende SMG diese Aufgabe. Da es sich bei den aufgezeichneten Beschleunigungssignalen um Rohdaten han-

Eingabesignal	[V]	Beschleunigung
Antworttyp	[-]	Tiefpass
Methode	[-]	BUTTERWORTH
Filterordnung	[-]	4
Abtastfrequenz	[Hz]	20000
Grenzfrequenz	[Hz]	200
Dämpfung	[dB]	auf 3 festgelegt

Tab. 4-1: Einstellungen für IIR-Filter (nach TP BF-StB Teil B 8.4 (2016))

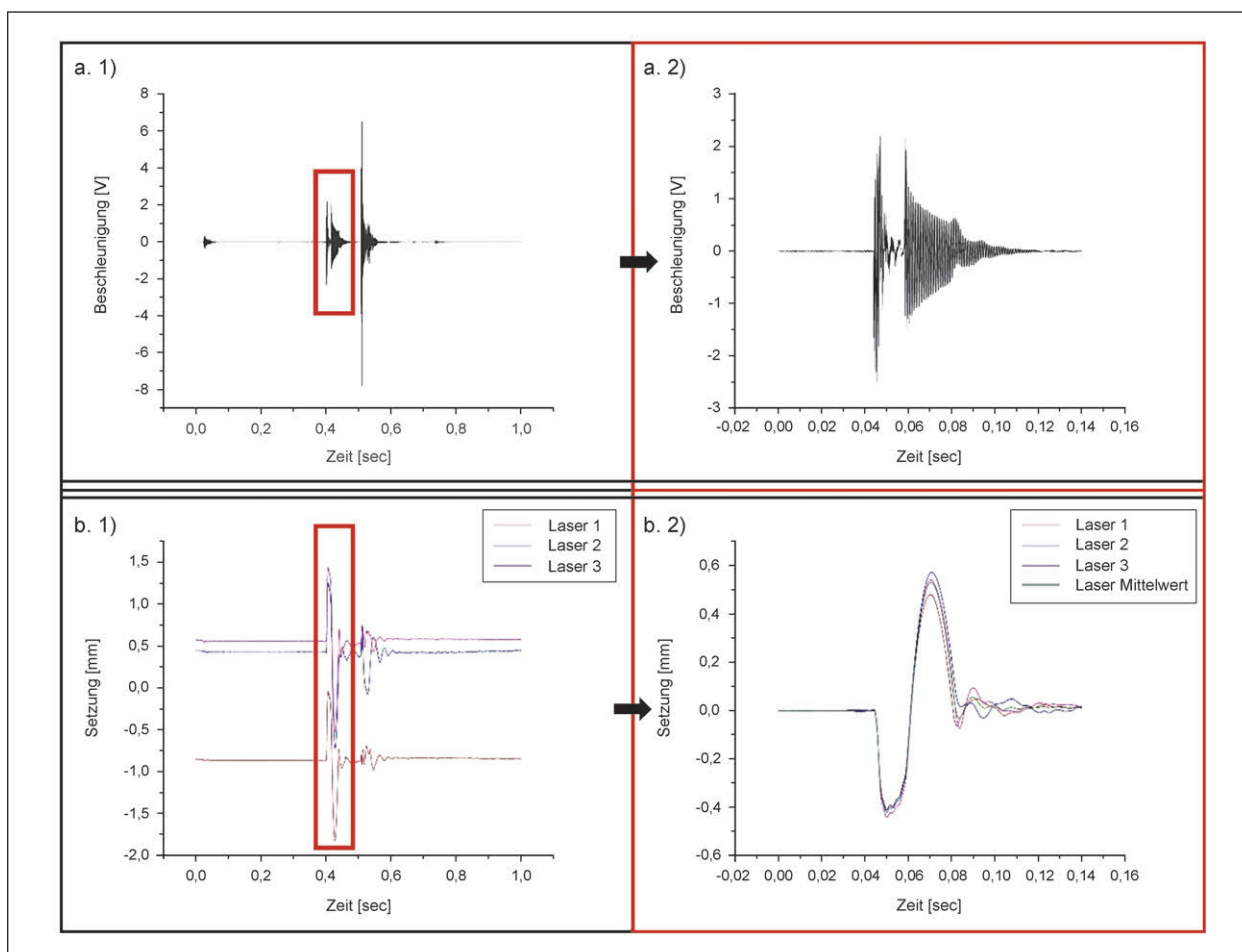


Bild 4-16: Offsetentfernung und Wahl des zu analysierenden Ausschnitts; a.1) Rohsignal des IEPE-Konditionierungsmoduls (roter Kasten: gewählter Ausschnitt); a.2) ungefiltertes Beschleunigungssignal ohne Offset; b.1) Rohsignale der Laser-Wegaufnehmer (roter Kasten: gewählter Ausschnitt); b.2) Setzungssignale der Laser ohne Offset

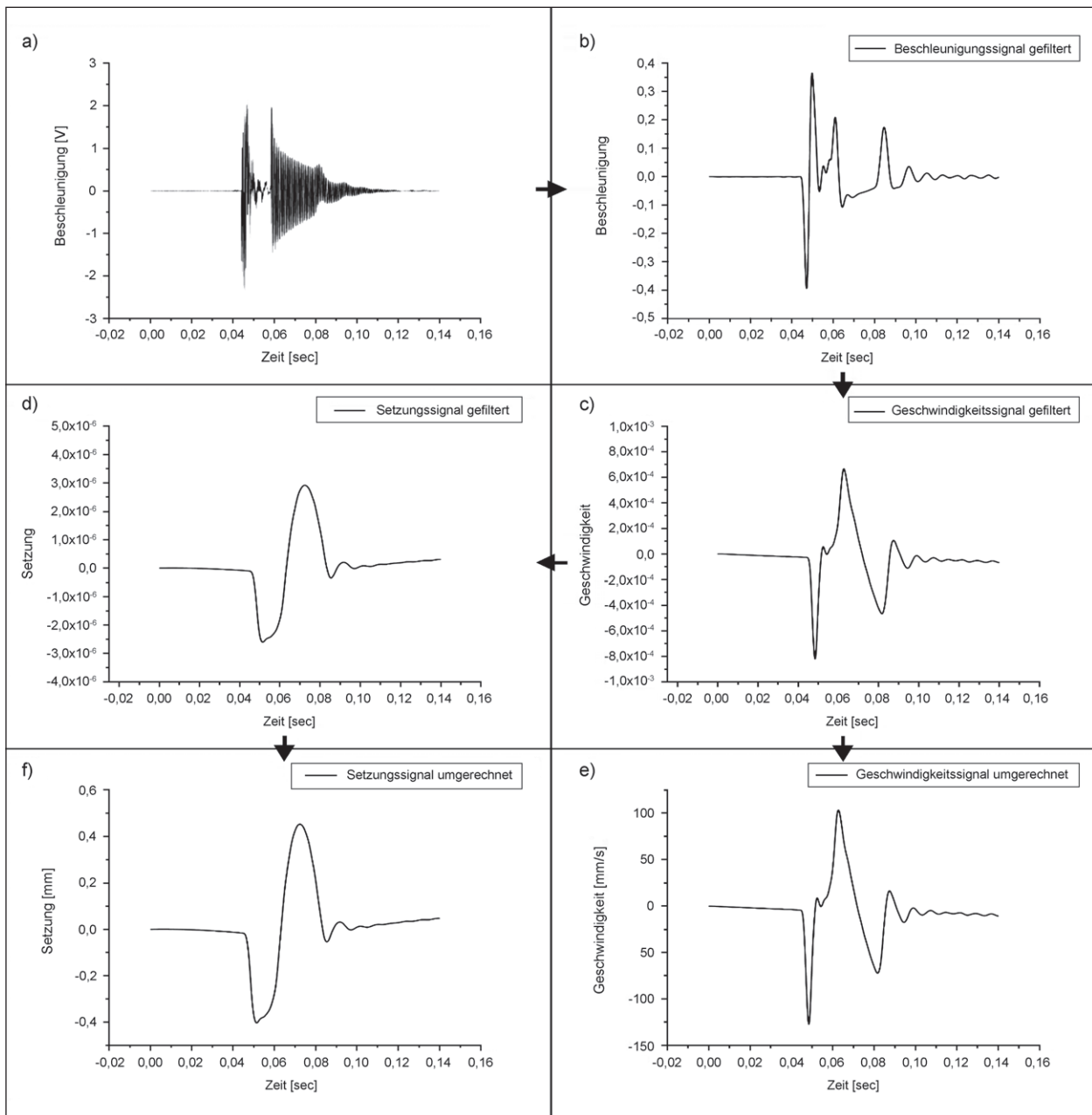


Bild 4-17: Beispielhafte Auswertung eines Signals des IEP-Moduls bei einem Stoß auf dem Sand-Kies-Gemisch in der Testgrube der TUM; a) Beschleunigungssignal ohne Offset; b) Beschleunigungssignal gefiltert nach BUTTERWORTH; c) Geschwindigkeitssignal aus einfacher Integration des Beschleunigungssignals über die Zeit; d) Setzungssignal aus zweifacher Integration des Beschleunigungssignals über die Zeit; e) Geschwindigkeitssignal mit angewandten Umrechnungsfaktor  $C^*_{Modul}$ ; Bestimmung der maximalen Setzungsgeschwindigkeit aus Minimum der Kurve; f) Setzungssignal mit angewandten Umrechnungsfaktor  $C^*_{Modul}$ ; Bestimmung der maximalen Setzung aus Minimum der Kurve

delt, musste dieser Schritt in Origin ausgeführt werden.

Der Umrechnungsfaktor wurde aus den Setzungswerten der Laser und den zweifach integrierten Beschleunigungssignalen bei der Kalibrierung ermittelt. Aus den Minima der einzelnen vorläufigen Setzungskurven des jeweiligen Setzungsbereichs und den Lasermesswerten wurde deren Mittelwerte sowie deren Standardabweichungen ermittelt. Die Be-

stimmung des Umrechnungsfaktors  $C^*_{MODUL}$  erfolgte über das Verhältnis aus Setzung der Lasermessung zu Setzung aus der Schwingungsmesssignal-auswertung.

Für das Gerät H10 sind in Bild 4-18 (links) und für H15 in Bild 4-19 diese Umrechnungsfaktoren über den Lasersetzungen für die einzelnen Setzungsbereiche aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Daten mit zunehmender Steifigkeit des Untergrundes, also

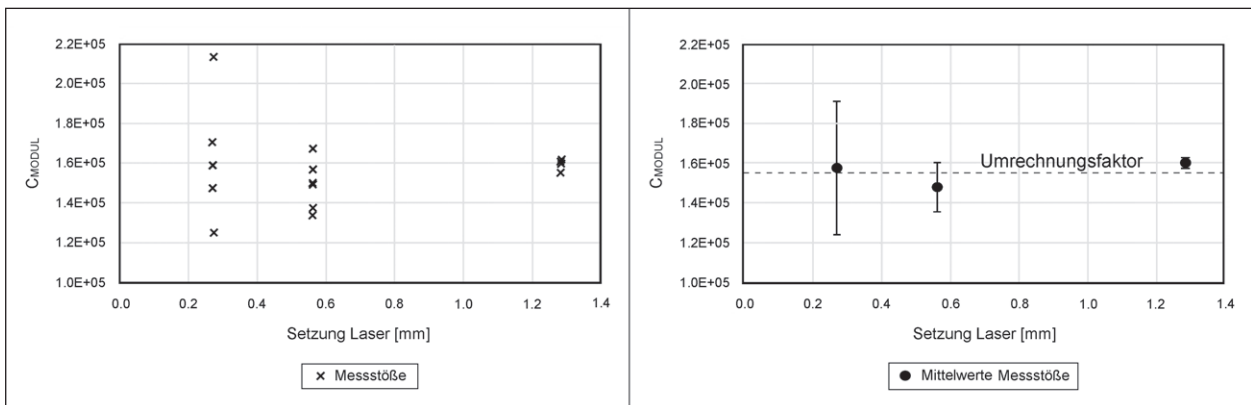


Bild 4-18: Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H10 in allen Setzungsbereichen (links); arithmetisches Mittel mit zugehöriger Standardabweichung für alle Setzungsbereiche (rechts)

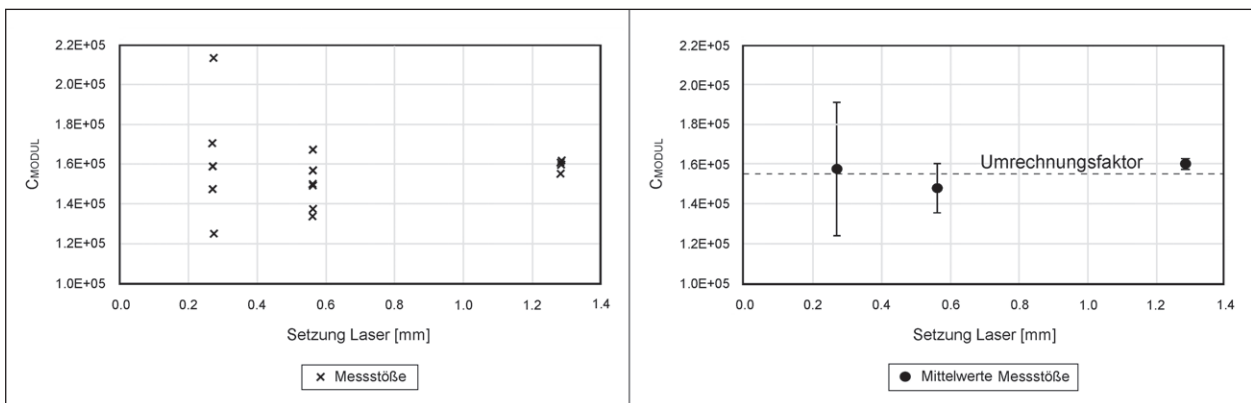


Bild 4-19: Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H15 in allen Setzungsbereichen (links); arithmetisches Mittel mit zugehöriger Standardabweichung für alle Setzungsbereiche (rechts)

im kleinen und mittleren Setzungsbereich, stark streuen. Je größer die Setzung wird, desto besser stimmen die berechneten Faktoren überein.

Die große Abweichung der einzelnen Werte hatte zur Folge, dass für die weitere Auswertung, der im Feld gemessenen Signale, jeweils der Mittelwert aus den Umrechnungsfaktoren für den jeweiligen Setzungsbereich herangezogen wurde. Diese sind im rechten Diagramm der vorstehenden Bildern (Bild 4-18, Bild 4-19) mit der berechneten Standardabweichung zum Mittelwert verzeichnet. Der letztendlich verwendete Faktor  $C_{MODUL}^*$  ist als Umrechnungsfaktor im rechten Diagramm markiert.

Nach den Untersuchungen im Kalibrierstand wurden entsprechende Versuche im Feld auf Sand, Kies und RC-Mix durchgeführt. In analoger Weise wurden auch hier für die festgestellten Setzungsbereiche die Umrechnungsfaktoren bestimmt.

Aus Bild 4-20 und Bild 4-21 kann wiederum ein Mittelwert des Umrechnungsfaktors  $C_{MODUL}^*$  ermittelt werden.

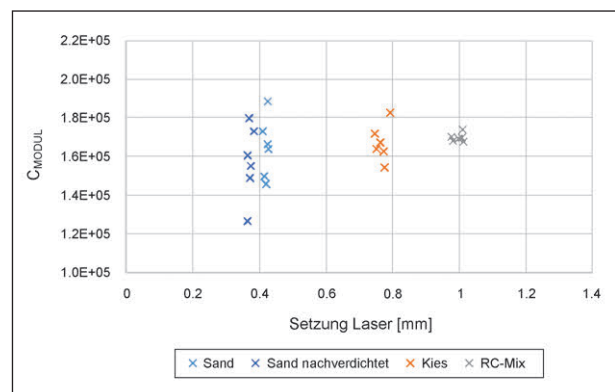


Bild 4-20: Über die Setzungen des Laserreferenzsystems berechnete Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H10 auf Bodenmaterialien

In Tabelle 4-2 sind für die beiden Geräte die Umrechnungsfaktoren und die Abweichungen zwischen Kalibrierstand und Feld aufgezeigt.

Die externe Berechnung der Setzung gestaltet sich schwierig und ist sicher auch bei der internen Berechnung in den Geräten problembehaftet. Neben der Sensortechnologie, dem Messumfeld sind Fest-

legungen u. a. zur Filterung des Messsignales kritisch zu sehen.

Inwieweit die moderaten Abweichungen von unter 10 % zwischen den Messungen auf dem Kalibrierstand und im Felde der geringen Datenbasis (nur 3 Böden) zu verdanken ist, wäre systematisch weiter zu untersuchen. Zu erwarten ist, dass die Abstimmung der Signalauswertung in den Fallgewichtsgeräten auf die Messungen im Kalibrierstand und das dortige Messumfeld (u. a. mitschwingende Bodenmasse) ausgerichtet ist und sich von tatsächlichen

Verhältnissen im Feld deutlich unterscheiden können.

Grundsätzlich wäre natürlich ein unabhängiges, direktes Wegmesssystem zu bevorzugen. Mit der vorgestellten Lasermesstechnik wäre dies zu realisieren, jedoch erscheint der Aufwand für die Praxis in der jetzigen Form zu groß. Überlegungen zu einer Umkonstruktion eines Fallgewichtsgerätes, die eine Setzungsmessung in der Achse mit einem Laser auf der Grundeinheit gegen eine ähnlich wie beim statischen Plattendruckgerät zugeführte externe Referenz ermöglichen würde, könnten zielführend sein und zu einer größeren Akzeptanz der Geräte in der Praxis beitragen.

	Kalibrierstand $C^*_{Modul}$	Feld $C^*_{Modul}$	Abweichung %
H10	155159	164000	+ 6
H15	203341	195000	- 4

Tab. 4-2: Zusammenstellung der Umrechnungsfaktoren  $C^*_{Modul}$  für Kalibrierstand und Feld

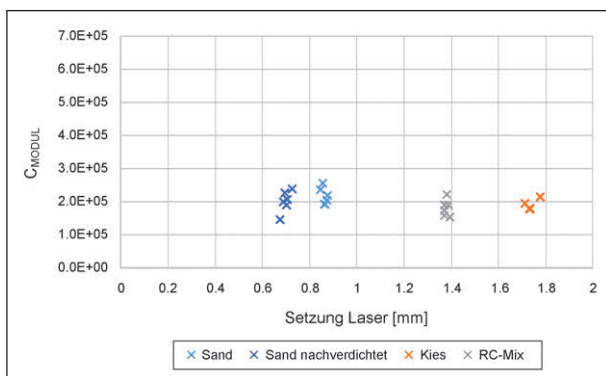


Bild 4-21: Über die Setzungen des Laserreferenzsystems berechnete Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H15 auf Bodenmaterialien

#### 4.2.4 Schwingungssignale H10

Abschließend zu den Darstellungen der Arbeiten mit den Schwingungssignalen werden in diesem Kapitel ohne weitere Interpretation Schwingungssignale des H10 in verschiedenen Situationen zur Information dargestellt.

Hierzu wurden im Kalibrierstand Versuche mit der laut Kalibriervorschrift zu verwendenden „mitschwingenden Bodenmasse“ (Stahlplatte 30 kg; Bilder 4-22 bis 4-24) sowie auch ohne diese (Bilder 4-25 bis 4-27) durchgeführt. Es werden jeweils die Signale mit und ohne die in Kalibriervorschrift vorgesehene Filterung dargestellt.

In den Bildern 4-28 und 4-29 werden die Signale auf Kies und Sand dargestellt.

#### Kalibrierstand: mit mitschwingender Bodenmasse

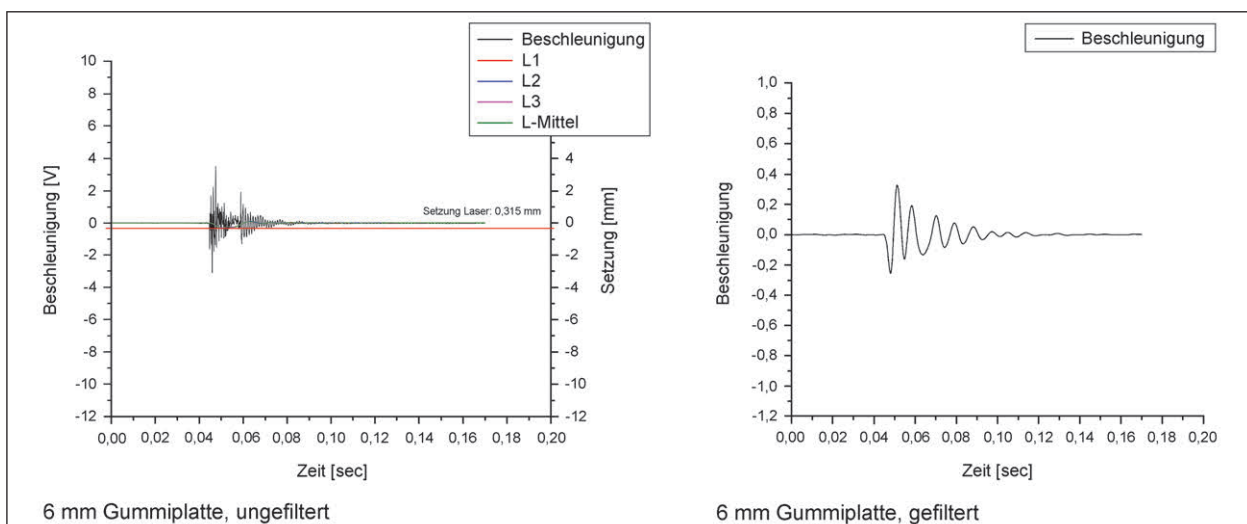


Bild 4-22: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 6 mm

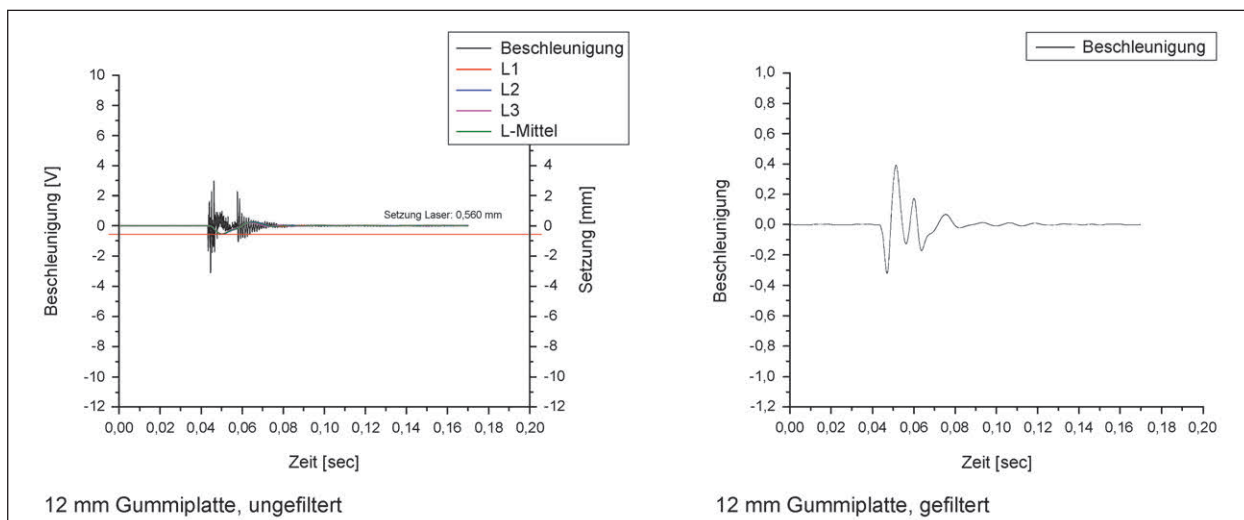


Bild 4-23: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 12 mm

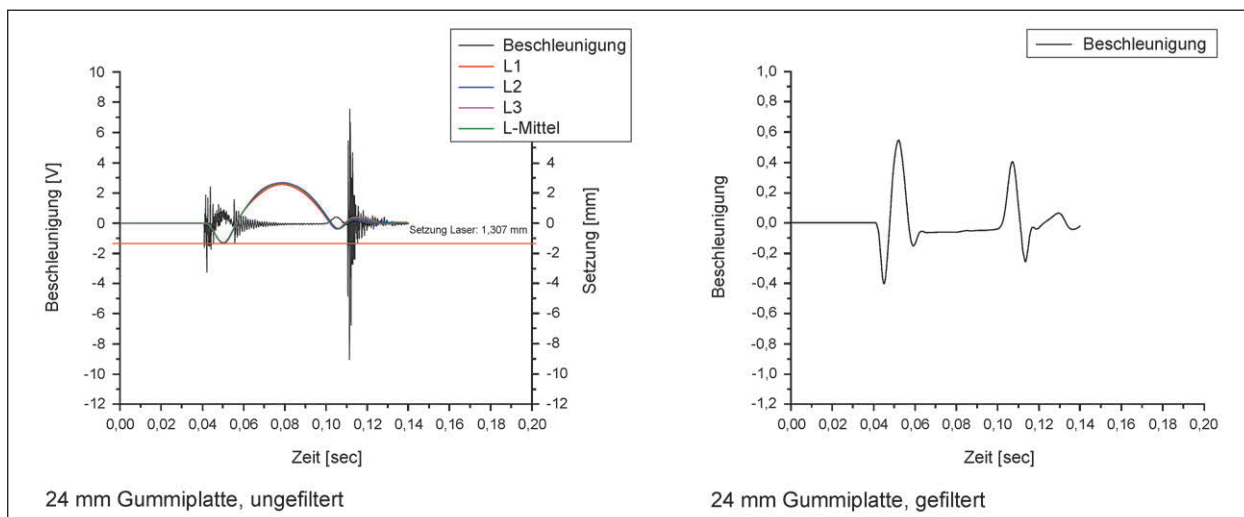


Bild 4-24: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 24 mm

### Kalibrierstand: ohne mitschwingende Bodenmasse

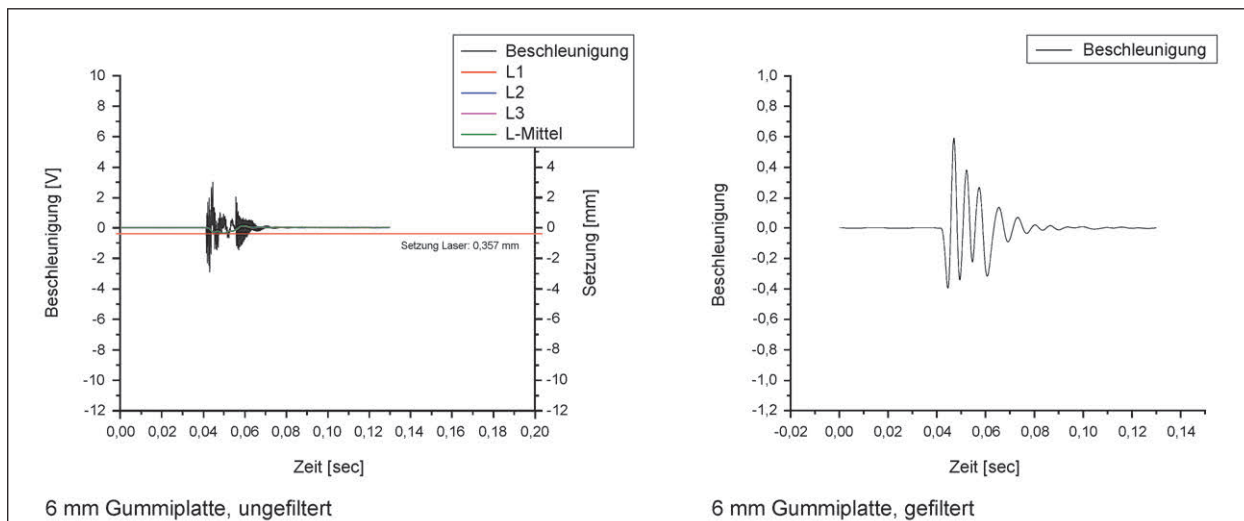


Bild 4-25: Schwingungssignale, Kalibrierstand, ohne mitschwingende Bodenmasse, 6 mm

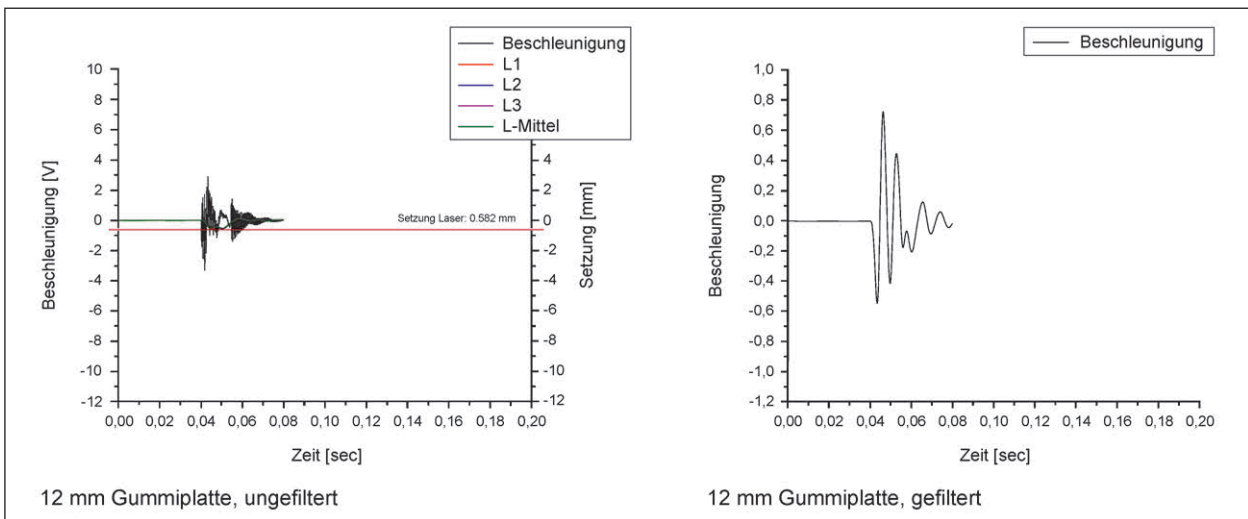


Bild 4-26: Schwingungssignale, Kalibrierstand, ohne mitschwingender Bodenmasse, 12 mm

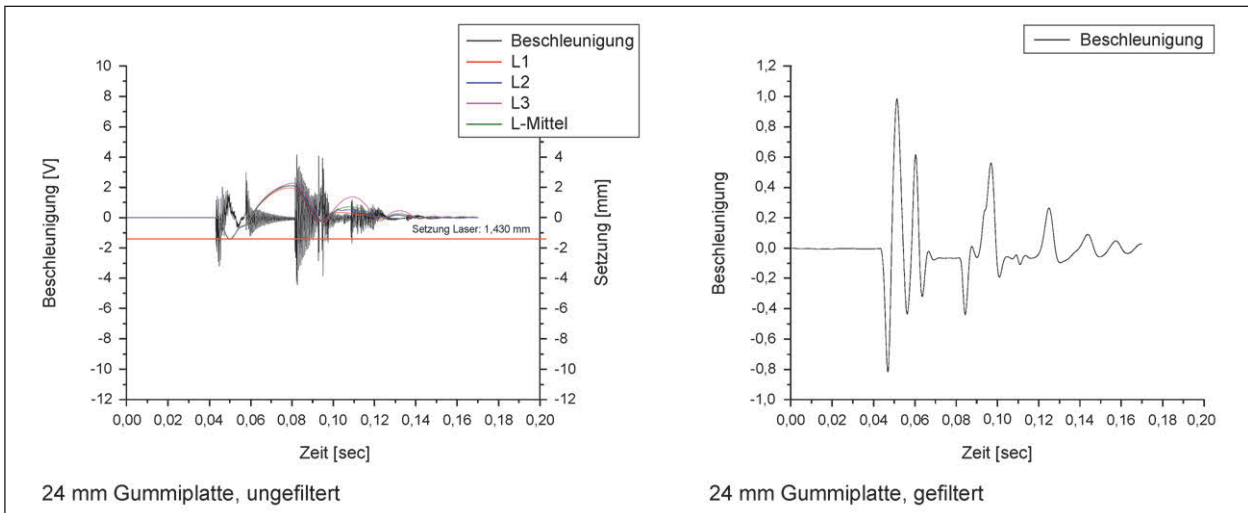


Bild 4-27: Schwingungssignale, Kalibrierstand, ohne mitschwingender Bodenmasse, 24 mm

**Feld: Kies, unverdichtet**

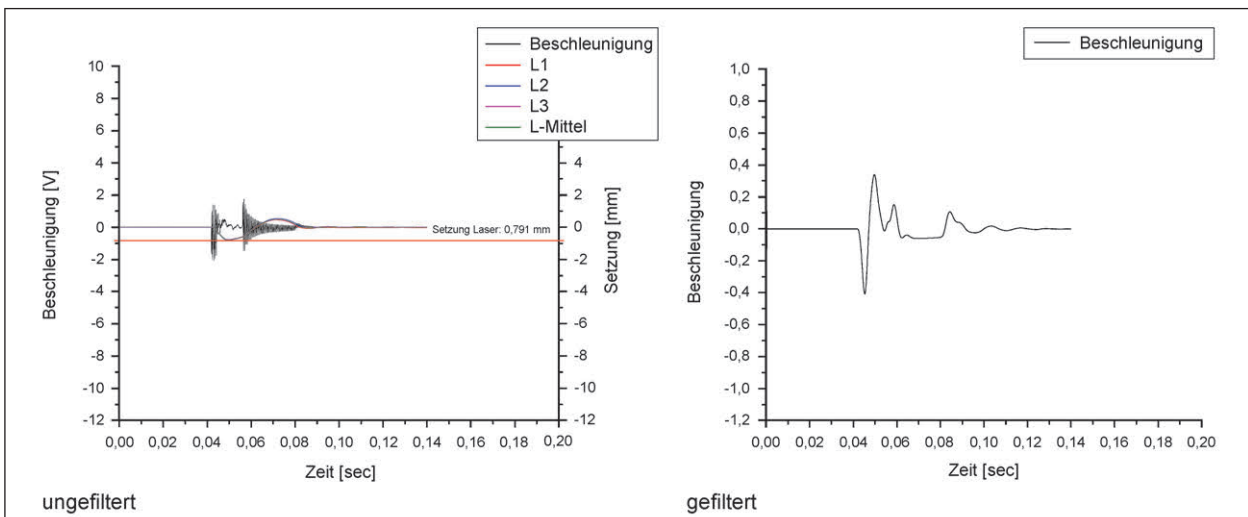


Bild 4-28: Schwingungssignale, Kies unverdichtet

### Feld: Sand, unverdichtet

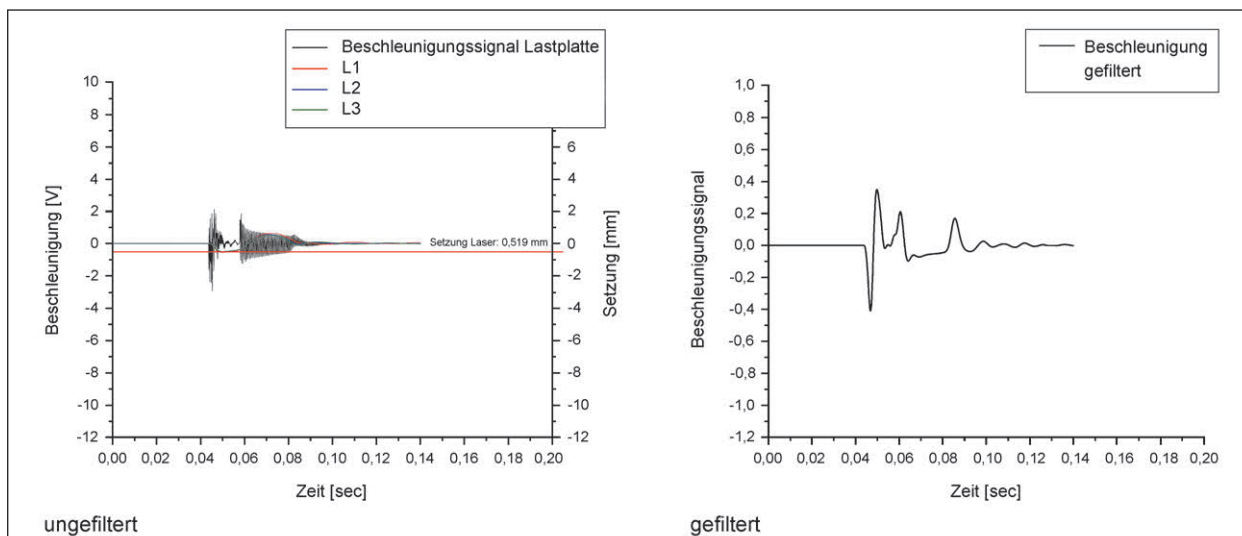


Bild 4-29: Schwingungssignale, Sand unverdichtet



Bild 4-30: Aushub auf 45 cm, 30 cm und 15 cm



Bild 4-31: Einbau dämpfende Zwischenlage in verschiedenen Tiefen

### 4.3 Einflusstiefe, dämpfende Zwischenschicht

In der Versuchsgrube wurde unter Verwendung des Sandes (siehe Kapitel 5.2.2) ein spezieller Aufbau des Untergrundes gewählt, mit dem die Einflusstiefe der Fallgewichtsgeräte untersucht werden sollte. Hierzu wurde der Sand in drei Versuchsabschnitten auf Tiefen von -15 cm, -30 cm und -45 cm ausgeho-

ben. Auf diesen Koten wurde als dämpfende Zwischenschicht ein mechanisch verfestigter Vliesstoff mit einer Dicke von ca. 1 cm eingelegt. Danach erfolgte der Wiedereinbau und die gleichmäßige Verdichtung des Sandes (Vibrationsplatte Typ „Wacker DPU 2550“, Betriebsgewicht 0,2 t) bis zur ursprünglichen Höhe des Versuchsfeldes (Bild 4-30 bis Bild 4-32).



Die Auswertungen zeigen, dass sowohl die statischen  $E_v$ -Werte, als auch die dynamischen  $E_{vd}$ -Werte der verschiedenen Geräte höhere Werte mit zunehmender Tiefe der Lage der Fehlstelle ausweisen (Tabelle 4-3, Bild 4-33, Bild 4-34). Aus Platzgründen waren keine weiteren Tiefenlagen möglich. Es scheint aber so zu sein, dass auch bei der großen Tiefe von 45 cm die Fehlstelle noch immer im Einflussbereich der Geräte liegt bzw. eine Verdichtung darauf nicht wie ohne eine Fehlstelleneinlage

möglich ist. Aus Vergleichsversuchen ohne Einlagen bei dem Sand wurden  $E_{v2}$ -Wert von ca. 70 MN/m<sup>2</sup> bis 100 MN/m<sup>2</sup> bzw.  $E_{vd2}$  von ca. 30 MN/m<sup>2</sup> bis 40 MN/m<sup>2</sup> gemessen.



Bild 4-32: Wiedereinbau Boden, Verdichtung

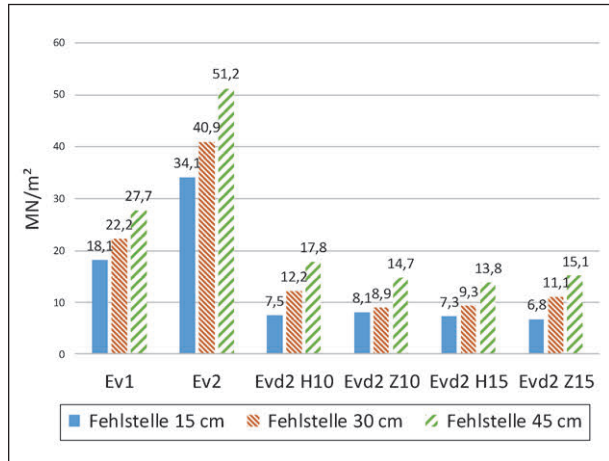


Bild 4-33: Fehlstelleneinbau,  $E_v$ - und  $E_{vd}$ -Werte

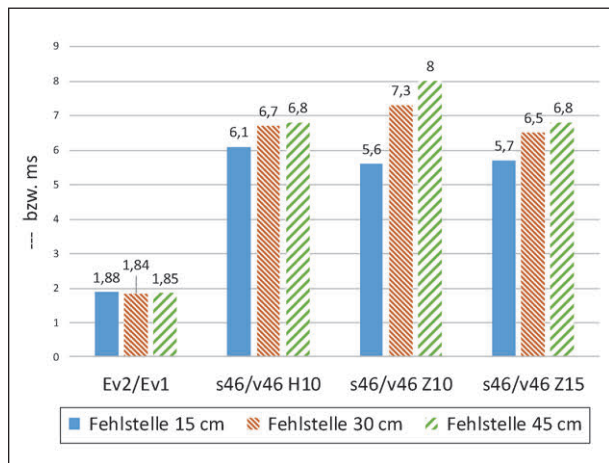


Bild 4-34: Fehlstelleneinbau,  $E_{v2}/E_{v1}$ - und  $s_{46}/v_{46}$ -Werte

		Fehlstelle 15 cm	Fehlstelle 30 cm	Fehlstelle 45 cm	Einheit
E <sub>v1</sub>		18,1	22,2	27,7	MN/m <sup>2</sup>
E <sub>v2</sub>		34,1	40,9	51,2	MN/m <sup>2</sup>
E <sub>v2</sub> /E <sub>v1</sub>		1,88	1,84	1,85	---
E <sub>vd2</sub>	H10	7,5	12,2	17,8	MN/m <sup>2</sup>
	Z10	8,1	8,9	14,7	MN/m <sup>2</sup>
	H15	7,3	9,3	13,8	MN/m <sup>2</sup>
	Z15	6,8	11,1	15,1	MN/m <sup>2</sup>
s <sub>46</sub> /v <sub>46</sub>	H10	6,1	6,7	6,8	ms
	Z10	5,6	7,3	8,0	ms
	H15	---	---	---	---
	Z15	5,7	6,5	6,8	ms

Tab. 4-3: Messwerte Fehlstelleneinbau

Die Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  liegen bei allen Tiefen der Fehlstelle unter 2, sodass aus der üblichen Erfahrung davon ausgegangen werden kann, dass keine weitere Verdichtung möglich ist. Die Werte  $s_{46}/V_{46}$  der Fallgewichtsgeräte zeigen allgemein eine steigende Tendenz mit tieferliegender Fehlstelle. Da eigentlich entweder ein gleichbleibender Wert analog  $E_{v2}/E_{v1}$  bzw. mit größerer Tiefe der Fehlstelle ein abnehmender Wert, weil eine (vielleicht) bessere Verdichtung möglich ist, erwartet wird, fällt eine bodenmechanische Interpretation schwer.

## 5 Beschreibung der Freifeldversuche/Probefelder

### 5.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche zur Bestimmung der im Feld erreichten Dichte (Volumenersatzverfahren, Versuche mit der Isotopsonde) sowie zur Ermittlung der statischen bzw. dynamischen Verformungsmoduln (statischer Plattendruckversuch und Versuche mit Leichtem und Mittelschweren Fallgewichtsgesät) als indirekte Prüfmerkmale zur Bestimmung des Verdichtungsgrades im Feld wurden bei verschiedenen Verdichtungsgraden der jeweils eingebauten Trag-schichtmaterialien bzw. Böden durchgeführt. In je-

dem der angelegten Probefelder wurden mehrere Verdichtungsspuren, die sich in ihrem Verdichtungsgrad unterschieden, hergestellt. Der unterschiedliche Verdichtungsgrad wurde durch eine variierende Anzahl an Überfahrten mit dem jeweils zur Verfügung stehenden Verdichtungsgerät erreicht. Eine komplette Überfahrt bestand dabei jeweils aus einer Vorwärts- und einer Rückwärtsbewegung über die Verdichtungsspur.

Wichtig war, dass die Versuche auf einer frisch verdichteten Fläche durchgeführt werden sollten. Dies bedeutet, dass entweder noch nicht eingebautes Material verwendet wurde, oder dass bereits eingebautes Material zunächst wieder aufgelockert und anschließend neu verdichtet werden musste. Dies ist aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Probefelder untereinander von Bedeutung, da aus Erfahrungen bekannt ist, dass sich mit zunehmender Liegezeit des eingebauten Materials im Vergleich zu frisch verdichteten Material höhere Verformungsmoduln ergeben.

Anschließend wurden auf dem Probefeld statische Plattendruckversuche nach DIN 18134 sowie dynamische Plattendruckversuche mit dem Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgesät nach TP BF-StB Teil B 8.3 und Versuche zur Bestimmung des tatsächlich erreichten Verdichtungsgrades nach DIN 18125-2 gemäß der Anordnung in Bild 5-1 durchge-

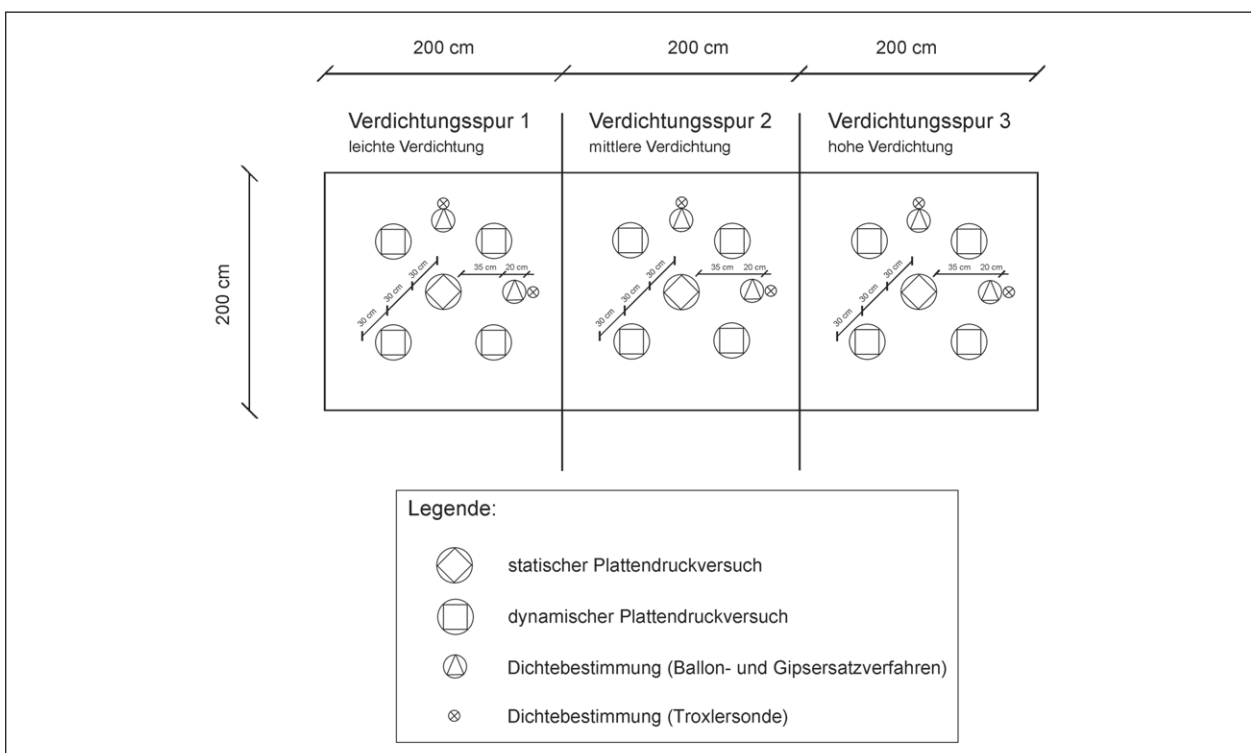


Bild 5-1: Schematische Darstellung der angelegten Probefelder

führt. Je Verdichtungsspur wurden um einen statischen Plattendruckversuch herum jeweils vier dynamische Plattendruckversuche angeordnet. Jeder der vier dynamischen Plattendruckversuche wurde dabei mit einem anderen Fallgewichtsgerät durchgeführt. Zum Einsatz kamen jeweils ein Leichtes (LFG, 10 kg Fallmasse) und Mittelschweres (MFG, 15 kg Fallmasse) Fallgewichtsgerät der beiden Hersteller Zorn (Kürzel „Z“) und HMP (Kürzel „H“) (Z10 bzw. Z15 und H10 bzw. H15).

Die erreichte Dichte im Bereich eines statischen Plattendruckversuches wurde mit dem Ballon (Densitometer) und teilweise dem Gipsersatzverfahren sowie mit der Isotopsonde (Troxler) ermittelt. Der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  der vier Verdichtungsspuren, berechnet aus dem Verhältnis der Trockendichte, die durch eine Isotopsonde bestimmt wurde, zur im Labor ermittelten Proctordichte, wird in der Regel in den Auswertungen verwendet.

## 5.2 Probefelder

### 5.2.1 Probefeld TUM Freifläche

Das Probefeld wurde auf dem Gelände des Zentrums für Geotechnik der TU München in Pasing erstellt (siehe Bild 5-2).

Bei dem eingebauten Material handelt es sich um einen schwach sandigen Kies mit einem Größtkorn von 27 mm. Das verwendete Material entstammt der Kiesgrube der Firma Glück in Planegg, die wärmezeitliche Schotter abbauen und aufbereiten. Die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-3 dargestellt. Nach DIN 18196 entspricht das verwen-

dete Bodenmaterial der Bodengruppe GI. Die Proctordichte des Materials wurde im Labor zu  $\rho_{Pr} = 2,22 \text{ g/cm}^3$  bei einem Proctorwassergehalt von  $w_{Pr} = 3,0 \%$  bestimmt.

Das Material wurde lagenweise in Stärken von 30 cm eingebaut. Im Anschluss wurde das Testfeld geviertelt und mit einer Vibrationsplatte Typ „Wacker DPU 2550“ (Betriebsgewicht ca. 0,2 t, siehe Bild 5-4) bei einer variierenden Anzahl an Überfahrten (1 bis 8 Übergänge) auf verschiedene Verdichtungsgrade verdichtet.

### 5.2.2 Probefeld TUM Versuchsrube

Das Probefeld wurde in der Versuchsrube des Zentrums für Geotechnik der TU München in Pasing erstellt (siehe Bild 5-5).

Bei dem untersuchten Material handelt es sich um einen stark feinkiesigen Sand mit einem Größtkorn von 6 mm. Das verwendete Material entstammt ebenfalls der Kiesgrube der Firma Glück in Planegg. Die Korngrößenverteilung nach DIN 18123



Bild 5-2: Probefeld TUM Freifläche

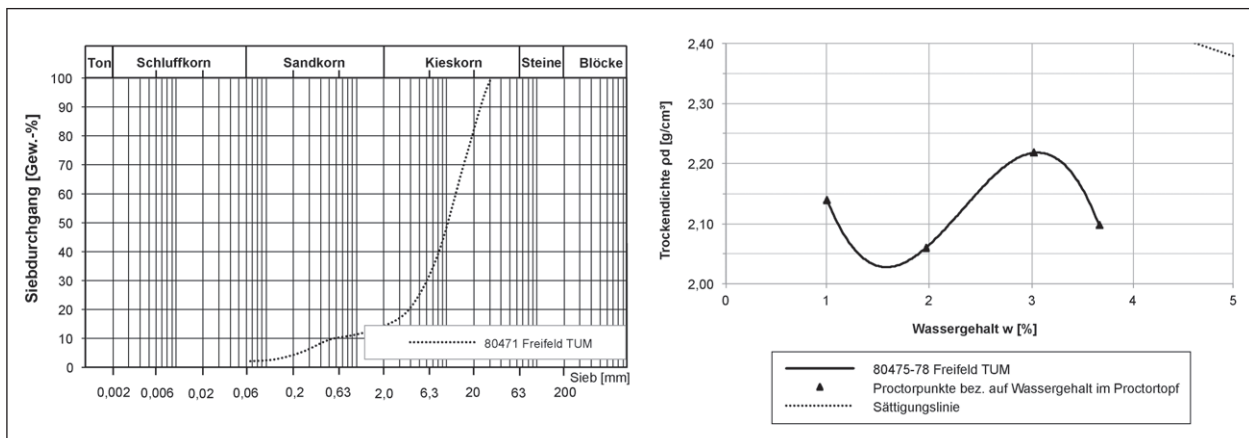


Bild 5-3: Kornungslinie und Proctorkurve des Materials TUM Freifläche



Bild 5-4: Vibrationsplatte Wacker DPU 2550



Bild 5-5: Versuchsdurchführung Probefeld TUM Versuchsgrube

sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-6 dargestellt. Das Bodenmaterial entspricht nach DIN 18196 der Bodengruppe SI. Die Proctordichte des Materials wurde im Labor zu  $\rho_{Pr} = 1,97 \text{ g/cm}^3$  bei einem optimalen Wassergehalt von  $w_{Pr} = 8,7 \%$  bestimmt.

Die Errichtung des Probefeldes erfolgte in der Versuchsgrube des Zentrums Geotechnik. Das Material wurde lagenweise eingebaut. Das Testfeld wurde anschließend gedrittelt und mit einer Vibrationsplatte Typ „Wacker DPU 2550“ (Betriebsgewicht ca. 0,2 t; siehe Bild 5-4) mittels einer variierenden Anzahl an Überfahrten (1 bis 8 Übergänge) auf verschiedene Verdichtungsgrade verdichtet.

### 5.2.3 Probefeld TUM Freising

Das Probefeld wurde auf dem Gelände der TU München in Freising erstellt. Dort wurde ein ehemaliges Universitätsgebäude rückgebaut und die mineralischen Restmassen aus dem Rückbau vor Ort aufbereitet und zur Auffüllung des ehemaligen Kellers bis auf Geländeoberkante verwendet. Da die vor Ort anfallenden und in mobilen Anlagen aufbereiteten Restmassen zur vollständigen Auffüllung nicht ausreichten, wurde zusätzlich in einer stationären Aufbereitungsanlage aufbereitetes Recyclingmaterial verwendet. Sowohl bei dem vor Ort aufbereiteten Material als auch bei dem aus extern zugeführtem Material handelte es sich um ein grobkörniges Recyclingmaterial aus aufbereitetem gemischtem Bauschutt, sogenannten RC-Mix. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden dabei ausschließlich an Material durchgeführt, welches aus stationären Anlagen zur Verfüllung zugeführt wurde.

Bei dem Material, welches zur Verfüllung des ehemaligen Kellers verwendet wurde und an welchem

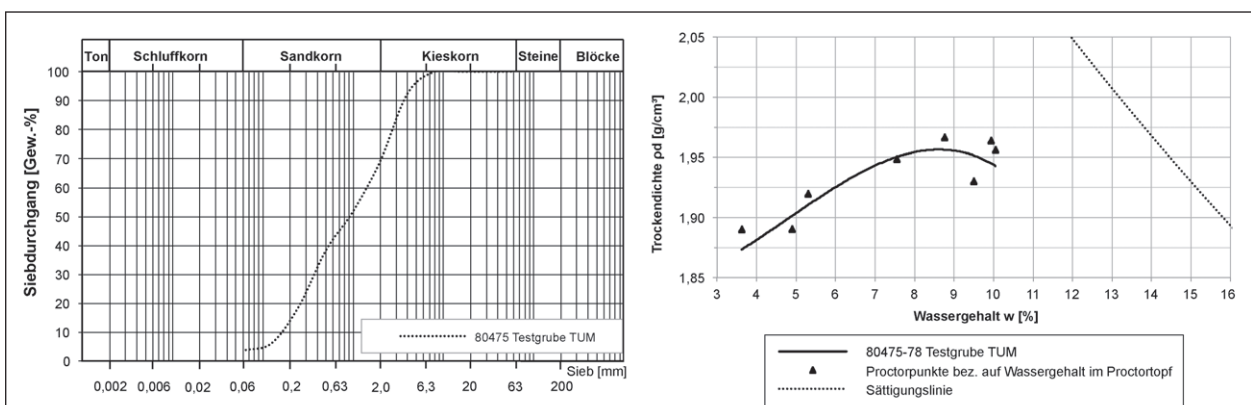


Bild 5-6: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials TUM Versuchsgrube

die Versuche durchgeführt wurden, handelt es sich um ein aufbereitetes Bauschuttgemisch in der Korngröße 0/56 (Kies, sandig, schwach schluffig). Die nach DIN 18123 ermittelte Körnungslinie sowie die Proctorkurve des Materials nach DIN 18127 sind in Bild 5-8 dargestellt. Der RC-Mix 0/56 entspricht der Bodengruppe GU nach DIN 18196. Die Proben zur Erstellung der Proctorkurve wurden aus einer Gesamtprobe mit dem Riffelteiler gemäß DIN EN 932-2 gewonnen. Hingewiesen wird darauf, dass die Proben für den Proctorversuch aus Versuchsgründen auf die Korngröße 0/32 abgesiebt wurden. Dies ist zulässig, soweit der Überkornanteil der Korngrößen  $d > 32 \text{ mm}$  35 M.-% nicht überschreitet. Das Überkorn darf dann in der Auswertung rechnerisch berücksichtigt werden. Die Proctorkurve des Materials zeigt einen für poröse RC-Materialien typischen Verlauf mit keiner klaren Abhängigkeit vom Wassergehalt. Die bei Verdichtung mit Proctorenergie erreichbare Trockendichte lag dabei im Bereich von etwa  $1,83 \text{ g/cm}^3$ , sodass als Proctordichte der Wert von  $1,83 \text{ g/cm}^3$  festgelegt wurde.

Die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung des Bauschuttgemisches erfolgte nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 an der Teilfraktion 4/63 (Tabelle 5-1).



Bild 5-7: Probefeld TUM Freising, Durchführung der Versuche

Die Verdichtung der drei Verdichtungsspuren auf jeweils unterschiedliche Verdichtungsgrade erfolgte mit einem Walzenzug vom Typ Bomag BW 219 DH mit etwa 20 t Betriebsgewicht (siehe Bild 5-9) durch die Steigerung der jeweiligen Anzahl an Überfahr-

Massenanteil Bestandteile im Korngemisch	Anteil [M.-%]
Betonbruch/Betonprodukte	40,37
Mörtel/Putz/Kalksandstein	10,76
Klinker/Ziegel/Steinzeug	10,73
natürliche/industriell hergestellte Gesteinskörnung	36,96
mineralische Leichtbau- und Dämmstoffe, Porenbeton	0,53
Asphaltgranulat	0,17
Fliesen/Keramik/Glas	0,17
Gipshaltige Baustoffe	0,01
Papier/Pappe/Textilien/Kunststoffe/Gummi	0,20
Eisen/nichteisenhaltige Metalle	0,05
Aufschwimmende Fremdbestandteile	0,05

Tab. 5-1: Stoffliche Zusammensetzung Bauschuttgemisch TUM Freising



Bild 5-9: Walzenzug Bomag BW 219 DH

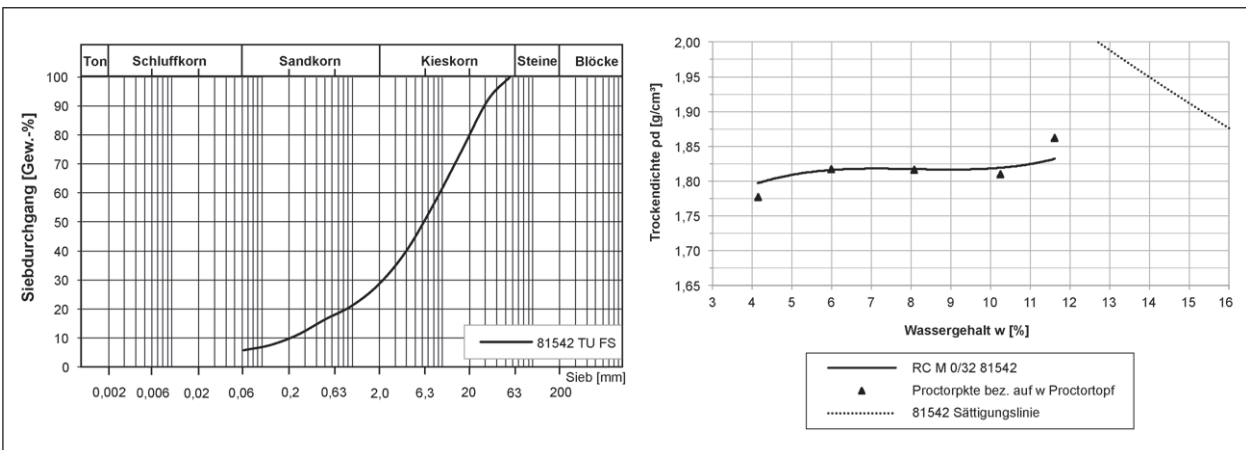


Bild 5-8: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials TUM Freising

ten. Jede Überfahrt erfolgte dabei dynamisch bei kleiner Amplitude der Bandage. Die Verdichtungsspuren 1 bis 3 wurden mit einer, drei bzw. fünf Überfahrten verdichtet. Die Dicke des einlagigen Probefeldes im verdichteten Zustand betrug etwa 0,5 m. Es befand sich auch unterhalb des angelegten Probefeldes dieselbe Materialart, die ebenfalls verdichtet war.

**5.2.4 Probefeld Kirchheim**

Das Probefeld wurde im Rahmen einer Baumaßnahme im Gewerbegebiet von Kirchheim östlich von München erstellt (Bild 5-10). Dort wurde ein Gewerbegebäude rückgebaut, vor Ort mobil aufbereitet und zur Erstellung des Planums für eine neu zu errichtende Lagerhalle verwendet. Das Material zur Herstellung des Probefeldes bestand zu großen Teilen aus gebrochenem Beton und natürlicher Gesteinskörnung, welches durch den Brechvorgang aus der Betonmatrix gelöst wurde, und beinhaltete relativ große Anteile an Fremdstoffen und Asphaltstücken, Ziegelanteile waren dagegen so gut wie nicht enthalten.

Bei dem Material zur Herstellung des Probefeldes Kirchheim handelte es sich um ein gebrochenes und mobil aufbereitetes Bauschuttgemisch in der Korngröße 0/63 (Kies, sandig, schwach schluffig) siehe Bild 5-11). Die an einer Probe nach DIN 18123 bestimmte Korngrößenverteilung sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-12 dargestellt. Nach DIN 18196 handelt es sich um einen Baustoff der Bodengruppe GW. Aus der Proctorkurve des Materials kann ein Proctroptimum im Bereich von  $w_{Pr} > 8 \%$  ermittelt werden. Anzumerken ist, dass die Gesamtprobe, aus der die Proben für den Proctorversuche gewonnen wurden, vor der Probenteilung aus Versuchsgründen auf die Körnung 0/32 abgesiebt wurde.

Die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung des Bauschuttgemisches erfolgte nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 an der Teilfraktion 4/63 (Tabelle 5-2).

Die Verdichtung der drei einlagig eingebauten Verdichtungsspuren erfolgte dynamisch mit einem Walzenzug des Typs Bomag BW 177 DH-3 mit einem Betriebsgewicht von etwa 7,5 t. Die Mächtigkeit des Probefeldes im verdichteten Zustand betrug ab-



Bild 5-10: Probefeld Kirchheim

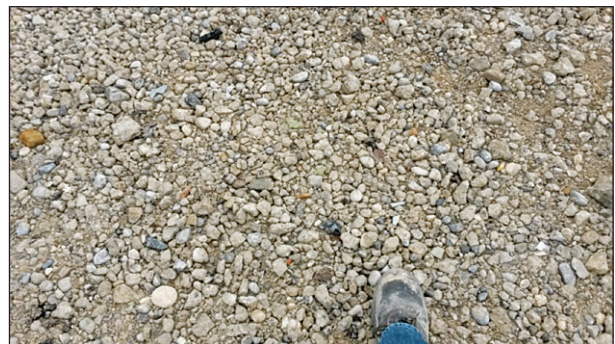


Bild 5-11: Material in Kirchheim zur Erstellung des Probefeldes

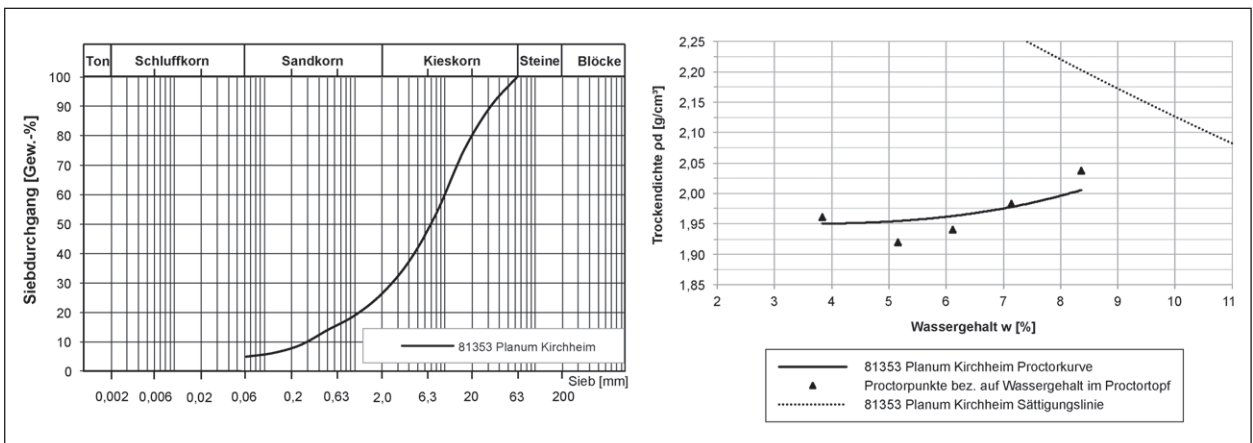


Bild 5-12: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Kirchheim

schließlich etwa 0,5 m, wobei sich auch unterhalb des Probefelds dasselbe Material im verdichteten Zustand befand. Auch bei diesem Probefeld wurde durch die Steigerung der Anzahl an Überfahrten je Verdichtungspur der Verdichtungsgrad der drei Verdichtungsspuren variiert (1 bis 5 Übergänge).

Massenanteil Bestandteile im Korngemisch	Anteil [M.-%]
Betonbruch/Betonprodukte	38,47
Mörtel/Putz/Kalksandstein	0,84
Klinker/Ziegel/Steinzeug	0,59
natürliche/industriell hergestellte Gesteinskörnung	45,69
mineralische Leichtbau- und Dämmstoffe, Porenbeton	0,02
Asphaltgranulat	14,25
Fliesen/Keramik/Glas	0,13
Gipshaltige Baustoffe	0,00
Papier/Pappe/Textilien/Kunststoffe/Gummi	0,00
Eisen/nichteisenhaltige Metalle	0,00
Aufschwimmende Fremdbestandteile	0,01

Tab. 5-2: Stoffliche Zusammensetzung Bauschuttgemisch Kirchheim



Bild 5-13: Im Rahmen der Westtangente Freising erstelltes Probefeld

### 5.2.5 Probefeld Westtangente Freising

Das Probefeld wurde im Rahmen der Westtangente Freising, den Bau einer Umgehungsstraße der Stadt Freising zur Verkehrsentslastung der Innenstadt, realisiert. Es wurde auf dem Planum eines bereits erstellten Damms zur Querung der nach Freising verlaufenden Bahnstrecke erstellt (siehe Bild 5-13).

Bei dem Material, aus dem der Damm erstellt wurde, handelte es sich um einen stark schluffigen Sand mit relativ hohen Kiesanteilen und einem Größtkorn von 40 mm (Fein-Mittelsand, stark kiesig, stark schluffig). Es handelt sich um Bodenaushub, der im Rahmen der Baumaßnahme „Westtangente Freising“ bei Aushubarbeiten angefallen ist. Die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-14 dargestellt. Nach DIN 18196 entspricht das verwendete Bodenmaterial der Bodengruppe SU\*. Die Proctordichte des Materials wurde im Labor zu  $\rho_{Pr} = 2,035 \text{ g/cm}^3$  bei einem Proctorwassergehalt von  $w_{Pr} = 8,5 \%$  bestimmt. Im Gegensatz zu den im Rahmen der vorgenannten Probefelder dargestellten Proctorkurven der rezyklierten Baustoffe stellt sich bei diesem Material der typische Verlauf einer Proctorkurve ein.

Das Probefeld wurde auf dem bereits hergestellten und gleichmäßig verdichteten Planum des Dammbauwerks zur Querung der Bahnlinie hergestellt. Zum Aufbau der drei Verdichtungsspuren mit jeweils unterschiedlichen Verdichtungsgrad wurde daher das bestehende Planum mit dem zur Verfügung stehenden Bagger nochmals bis in eine Tiefe von etwa 30 cm aufgelockert. Im Anschluss wurden an die Auflockerung wurden die drei Verdichtungsspuren mit einer Vibrationsplatte vom Typ „Wacker

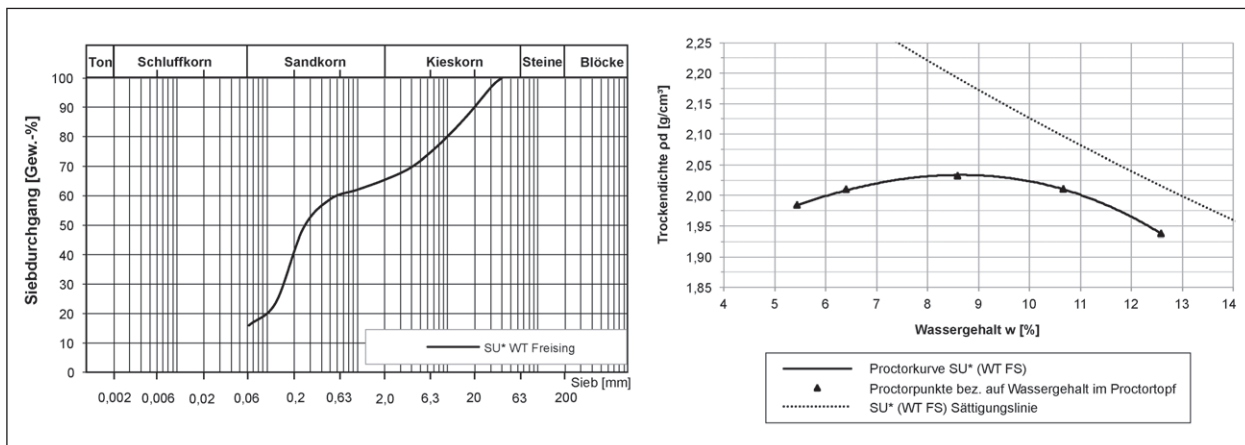


Bild 5-14: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Westtangente Freising



Bild 5-15: Einbau und Verdichtung des Probefeldes Westtangente Freising



Bild 5-16: Planum Probefeld Pfraundorf

DPU 6055“ (Betriebsgewicht etwa 0,5 t) mittels einer variierenden Anzahl an Überfahrten auf verschiedene Verdichtungsgrade verdichtet. Die Anzahl an Übergängen betrug für Verdichtungsspur 1 zwei Übergänge, für Verdichtungsspur 2 drei Übergänge und für Verdichtungsspur 3 fünf Übergänge. In Bild 5-15 ist die Auflockerung des Planums und die anschließende Verdichtung mit der Vibrationsplatte dargestellt.

### 5.2.6 Probefeld Deponie Pfraundorf

Das Probefeld in Pfraundorf wurde im Rahmen der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung für die in Bild 5-16 dargestellte Bauschuttdeponie der Depo-niekategorie 0 erstellt. Die Bauschuttdeponie befindet sich in einem noch im Betrieb befindlichen Steinbruch, der auf den bereits abgebauten Flächen wieder verfüllt wird. Als Material für die Oberflächenabdichtung und das Probefeld wurde ein vor Ort anstehender Lehm verwendet.

Bei dem Material handelte es sich um einen sandigen Ton (Ton, schluffig, sandig). Die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-17 dargestellt. Nach DIN 18196 entspricht das verwendete Bodenmate-

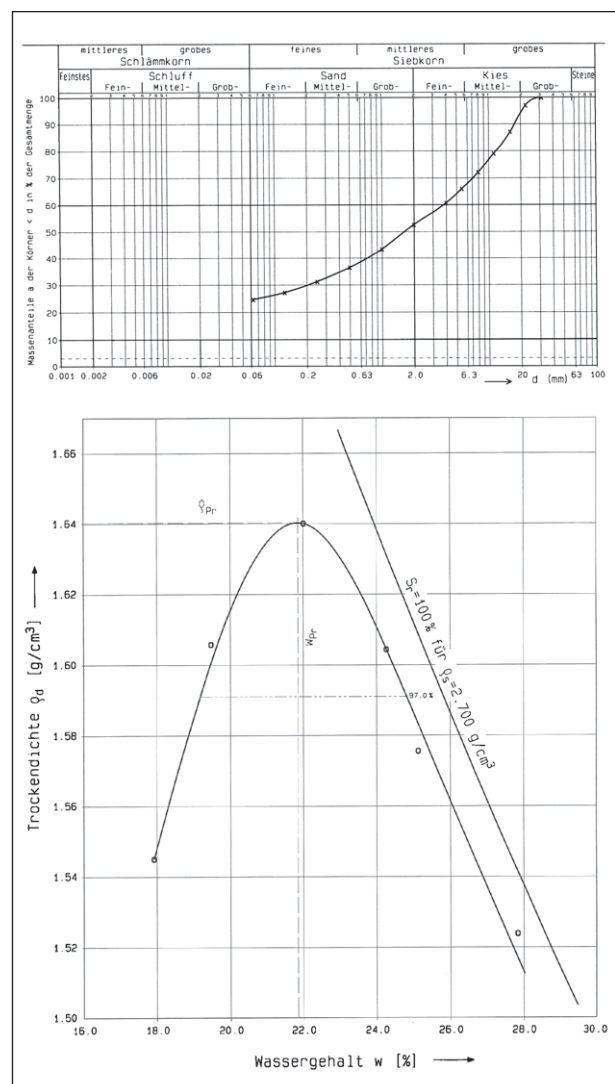


Bild 5-17: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Depo-nie Pfraundorf

rial der Bodengruppe TM. Die Proctordichte des Materials wurde im Labor zu  $\rho_{Pr} = 1,64 \text{ g/cm}^3$  bei einem Proctorwassergehalt von  $w_{Pr} = 21,9 \%$  bestimmt.





Bild 5-18: Verdichtung des Probefeldes Deponie Pfraundorf



Bild 5-19: Beprobung Probefeld Deponie Pfraundorf



Bild 5-20: Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung

Das Material wurde in zwei Lagen mit je 25 cm Dicke eingebaut. Die untere Lage wurde mit der Baggerschaufel angedrückt. Anschließend wurde die obere Lage aufgebracht. Aufgrund fehlender Verdichtungswalzen bzw. teils Unbefahrbarkeit der Planie wurden die Verdichtungsspuren mit einem Anbauverdichter des Typs „UAM proline HD 1500“, der an einem Bagger des Typs „Hitachi 350 LCN“ montiert war, verdichtet. Die Verdichtungsspuren wurden mit 10 Sekunden, 30 Sekunden und 60 Sekunden verdichtet. Bild 5-18 zeigt den Aufbau des Versuchsfeldes in der Bauschuttdeponie bei Pfraundorf.

Insgesamt ist anzumerken, dass aufgrund der Witterungsverhältnisse und teils nicht ausreichender Verdichtung nur wenige Versuchsergebnisse verwendet werden konnten (Bild 5-19 und Bild 5-20).

### 5.2.7 Probefeld Zeltingen

Das Probefeld wurde im Rahmen der Baumaßnahme B50n, 3. Bauabschnitt Zeltingen – Longkamp, zur Überprüfung der Einsatzmöglichkeit der FDVK auf diesem Material durchgeführt (Bild 5-21). Ergänzend konnten die für diese Forschung erforderlichen Versuche durchgeführt werden.

Als Schüttmaterial wurde entfestigter Ton-/Schluff-schiefer-Fels der Schicht 3a (örtliche Zuordnung) eingebaut (Bild 5-22). Der Feinkorngehalt der eingebauten Schüttstoffe wurde entsprechend der durchgeführten Kornverteilungsanalysen mit etwa 24 M.-% bis 29 M.-% ermittelt. Der Ton-/Schluff-schieferfels wurde grundsätzlich entsprechend der Regelungen des Bauvertrages mit 1 M.-% Mischbindemittel „GeoSol 50“ verbessert.



Bild 5-21: Probefeld Zeltingen

Bei dem Material handelte es sich um einen Kies, sandig, schluffig. Die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-23 dargestellt. Nach DIN 18196 entspricht das verwendete Bodenmaterial der Boden-gruppe GU\*. Die Proctordichte des Materials wurde im Labor zu  $\rho_{Pr} = 1,86 \text{ g/cm}^3$  bei einem Proctorwas-sergehalt von  $w_{Pr} = 14,3 \%$  bestimmt.

Nach Aufbau der Bodenschicht wurde die Verdichtung mit einer Vibrationswalze mit Stampffußband-age und abschließend mit einer Glattmantelband-age vorgenommen. Auf mehreren nebeneinander-liegenden Spuren wurde unterschiedliche Anzahlen von Verdichtungsüberfahrten durchgeführt. Zur Be-probung kamen neben den Fallgewichtsgeräten statische Plattendruckversuche und das Densito-metergerät zum Einsatz.



Bild 5-22: Material in Zeltingen zur Erstellung des Probefeldes

### 5.2.8 Probefeld Pfraundorf Schotterwerk

Das Probefeld wurde in der Entnahmegrube des Schotterwerkes Pfraundorf erstellt (Bild 5-24). Das Material zur Herstellung des Probefeldes war eine Lieferkörnung des Standard-Kalkschotters 0/45 (Bild 5-25).

Nach Aufbau der Schotterschicht mit einem Bagger wurde die Verdichtung mit einer Vibrationswalze Hamm H20i vorgenommen. Um unterschiedliche Verdichtungen zu erreichen wurde in einer Spur nur 2-mal statisch gefahren, in einer Spur 1-mal mit kleiner Amplitude und 1-mal statisch. In der 3. Spur wurde je 4-mal mit der großen und der kleinen Amplitude gefahren. Nach Beprobung dieser Fläche wurde gewässert und partiell nochmals be-probt, sowie eine Spur quer zu den anderen im ge-wässerten Zustand nachverdichtet und beprobt.



Bild 5-24: Probefeld Pfraundorf Schotterwerk

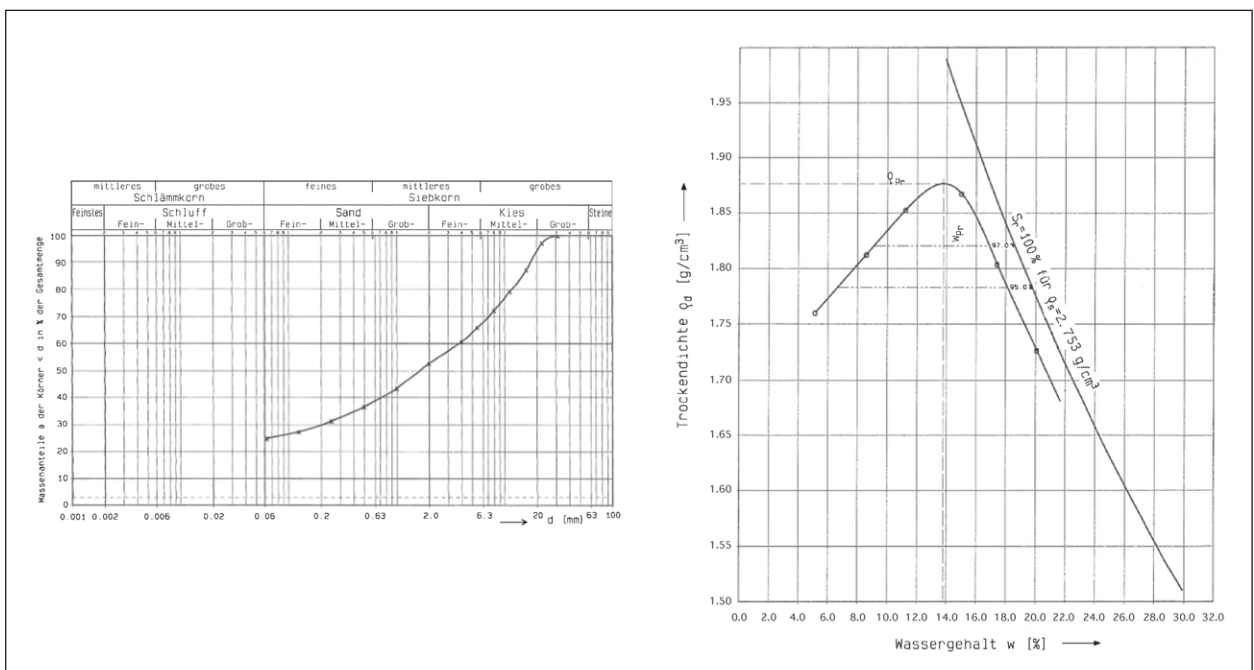


Bild 5-23: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Zeltingen (typische Probe)



Bild 5-25: Material Pfraundorf Schotterwerk

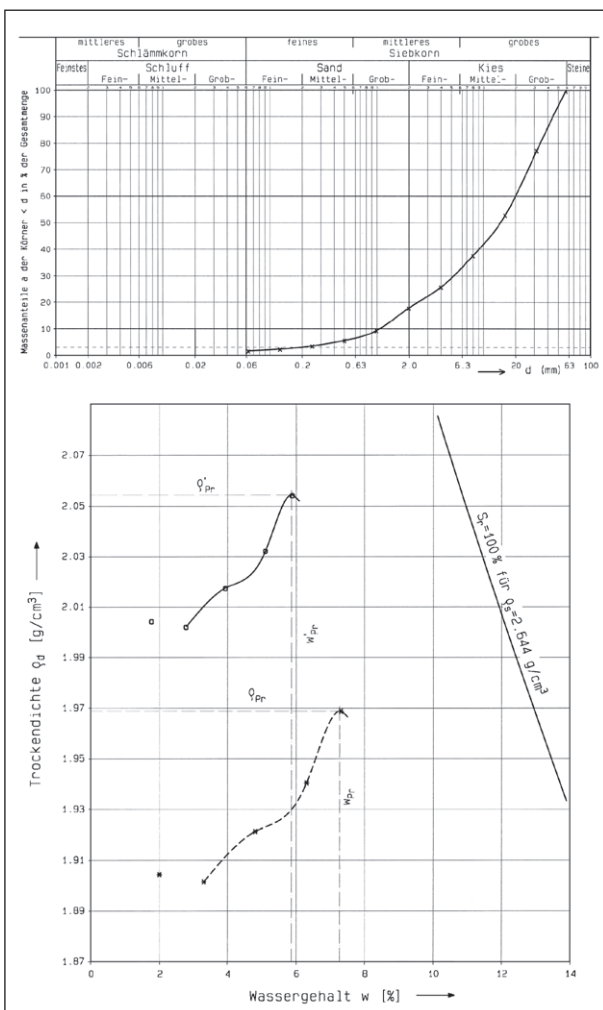


Bild 5-26: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Pfraundorf Schotterwerk

Die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-26 dargestellt. Nach DIN 18196 entspricht das verwendete Bodenmaterial der Bodengruppe GW. Die Proctordichte des Materials wurde im Labor zu  $\rho_{Pr} = 2,05$  g/cm<sup>3</sup> bei einem Proctorwassergehalt von  $w_{Pr} = 5,9\%$  bestimmt.

## 5.2.9 Probefelder Schiltberg

Auf dem Gelände der Grube Schiltberg der Fa. Ettengruber wurden Versuchsfelder aus einem natürlichem Material und mineralischen Ersatzbaustoffen (aufbereitete Baurestmassen (RC-Materialien, im speziellen: RC-B Betonbruch und RC-M Bauschuttgemische) und industriellen Nebenprodukten (hier: Elektroofenschlacke EOS)), erstellt (Bild 5-27).

Ziel der vorrangig für eine Forschung der Bayerischen Forschungsstiftung durchgeführten Untersuchungen war unter anderem, zu überprüfen, wie sich verschiedene Ersatzbaustoffe im Vergleich zu natürlichem Material verdichten lassen, ob Unterschiede im Verdichtungsverhalten der Materialien untereinander auftreten und inwiefern es möglich ist, den im Feld geforderten Verdichtungsgrad bei den untersuchten mineralischen Ersatzbaustoffen mittels der indirekten Prüfmethode „Statischer Plattendruckversuch“ und „Dynamischer Plattendruckversuch“ nachzuweisen. Einen großen Vorteil im Hinblick auf den Vergleich des Verdichtungsverhaltens der unterschiedlichen Materialien untereinander sowie zum Nachweis des geforderten Verdichtungsgrades stellte dabei die Tatsache dar, dass alle Versuchsfelder unter identischen und somit vergleichbaren Bedingungen auf derselben Fläche erstellt wurden und ihre Verdichtung mit dem identischen Verdichtungsgerät bei konstanten Prozessparametern erfolgte.

Die Erstellung der Versuchsfelder erfolgte in der Regel jeweils in drei Lagen (Lagendicke jeweils etwa 25 cm) mittels eines Straßenfertigers vom Typ „Vögele Super 1900-3“ auf einer Fläche von etwa 50 m x 7 m. Jede Lage wurde nach dem Aufbringen jeweils auf zwei Verdichtungsspuren bereichsweise unterschiedlich stark verdichtet (siehe Bild 5-27). Insgesamt wurden je Versuchsfeld vier unterschiedlich stark verdichtete Bereiche erstellt. Die unterschiedlichen Verdichtungsgrade der vier Bereiche wurden dabei zum einen durch die Variation der Art der dynamischen Anregung der Bandage – die Bandage des zur Verdichtung verwendeten Walzentyps „Hamm H13i VIO“ (Betriebsgewicht ca. 13 t) kann durch zwei in der Bandage verbaute Unwuchtschwinger sowohl vibrierend als auch oszillierend angeregt werden – und zum anderen durch die Variation der Anzahl an erfolgten Überfahrten erreicht. So erfolgte die Verdichtung der Verdichtungsspur I jeweils durch eine oszillierende Bandage (35 Hz, 3 km/h), während Verdichtungsspur II



Bild 5-27: Erstellung eines Probefeldes aus „Grubenkies“ – Einbau (links) und Verdichten (rechts) der zweiten Lage mittels Straßenfertiger „Vögele Super 1900-3“ und Verdichtungswalze „H13i VIO“

vibrierend (30 Hz, 3 km/h) verdichtet wurde. Die jeweils vordere Hälfte der beiden bei unterschiedlicher Anregung der Bandage verdichteten Verdichtungsspuren wurde durch jeweils vier Überfahrten, die jeweils hintere Hälfte der beiden Verdichtungsspuren durch jeweils zwei Überfahrten verdichtet. Eine Überfahrt bezeichnet dabei jeweils einen dynamischen Übergang mit angeregter Bandage in Vorwärtsrichtung und einen statischen Übergang in Rückwärtsrichtung. Zwischen der vorderen und hinteren Hälfte einer Verdichtungsspur befand sich ein etwa zwei Meter breiter Übergangsbereich, der die beiden Verdichtungsbereiche voneinander trennte. In der vorderen Hälfte der Verdichtungsspuren wurden jeweils die Versuchsfelder 1 und 2, in der hinteren Hälfte die Versuchsfelder 3 und 4 angeordnet, in denen nach der Verdichtung der dritten Lage je ein statischer Plattendruckversuch, je ein dynamischer Plattendruckversuch mit den leichten bzw. mittelschweren Fallgewichtsgeschossen der Firmen Zorn und HMP sowie Dichtebestimmungen mit der Isotopsonde durchgeführt wurden. Eine schematische Darstellung der erstellten Versuchsfelder sowie der Anordnung der Versuchspunkte kann Bild 5-28 entnommen werden.

Von dem dargelegten Standardvorgehen bei der Erstellung der Versuchsfelder wurde in einigen Fällen abgewichen. So wurde bei dem Material RC-M 0/8 zwar ein dreilagiges Probefeld mit zwei Verdichtungsspuren angelegt, allerdings erfolgte die Verdichtung der beiden Verdichtungsspuren ausschließlich mittels oszillierender Bandage (35 Hz, 3 km/h), eine Verdichtung mittels Vibration fand nicht statt. So wurde die gesamte Verdichtungsspur I mittels zwei Überfahrten und die gesamte Verdichtungsspur II mittels vier Überfahrten verdichtet. Eine Überfahrt bezeichnet dabei wiederum

einen Übergang mit dynamisch angeregter Bandage in Vorwärtsrichtung und einen statischen Übergang in Rückwärtsrichtung (diese Definition wird im Folgenden beibehalten). Die beiden Verdichtungsspuren wurden jeweils in vier Prüffelder unterteilt.

Eine Änderung im Aufbau des Versuchsfeldes erfolgte auch beim der zweiten Versuchsreihe mit dem Material RC-M 0/45. Da mit dem Material RC-M 0/45 zwei Versuchsfelder erstellt wurden und bei der Versuchsreihe RC-M 0/45\_1 die Erstellung, Verdichtung und Beprobung des Versuchsfeldes gemäß dem Standardvorgehen erfolgte, wurde die zweite Versuchsreihe RC-M 0/45\_2 dahingehend abgeändert, als dass das Versuchsfeld lediglich zweilagig erstellt wurde. Zudem wurde die Verdichtungsspur I zwar oszillierend verdichtet, aber lediglich mit einer Frequenz der Anregung der Bandage von 30 Hz. Die Verdichtung der Verdichtungsspur II erfolgte ebenfalls oszillierend, allerdings mit einer Frequenz der Anregung der Bandage von 35 Hz, was dem Standardvorgehen entspricht.

Die Erstellung der Versuchsfelder der beiden Körnungen aus Elektroofenschlacke (EOS 0/4 und EOS 0/32) erfolgte die Erstellung, Verdichtung und Beprobung zwar gemäß dem Standardvorgehen, allerdings wurden die Versuchsfelder jeweils innerhalb einer dichten Wanne, die mittels Bentonitmatten nach unten hin sowie zu den Seiten und zum Kopf des Versuchsfeldes abgedichtet wurden, erstellt. Dies war notwendig, da die Versuche innerhalb einer Z1.2-Grube durchgeführt wurden, das Material aufgrund eines Ministerialschreibens trotz Einhaltung der Z1.2-Werte allerdings als Z2-Material einzustufen ist und die zuständigen Behörden einem temporären Einbau des Materials nur unter der

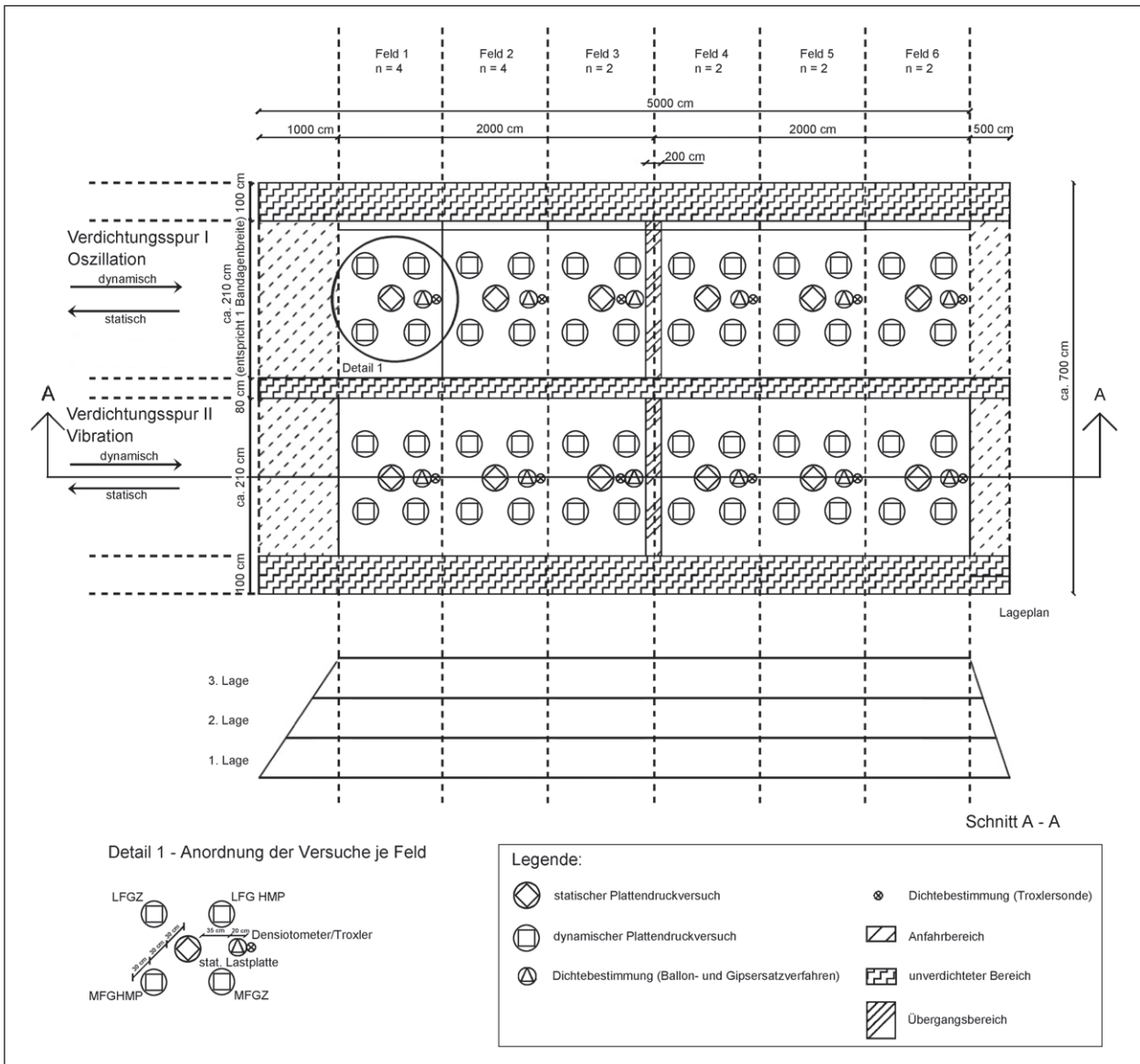


Bild 5-28: Schematische Darstellung der erstellten Versuchsfelder und der Anordnung der Beprobungspunkte – Regelaufbau (nichtmaßstäbliche Darstellung)



Bild 5-29: Herstellung der Wannenkonstruktion (links) und Erstellung des Versuchsfeldes aus EOS 0/4

Auflage der Erstellung der Versuchsfelder innerhalb einer dichten Wanne genehmigten. Eine Bild der Wannenkonstruktion sowie ein innerhalb dieser

Wannenkonstruktion erstelltes Versuchsfeld kann Bild 5-29 entnommen werden. Um die Bentonitmatte vor dem eingebauten Material zu schützen sowie

zur Reduktion des Einflusses der Bentonitmatte wurde direkt auf diese zunächst eine Lage aus RC-Mix 0/56 aufgebracht, bevor das eigentliche Versuchsfeld erstellt wurde. Gleichzeitig hatte diese Schutzschicht den Vorteil, dass die erste Elektroofenschlacke ausgebaut werden konnte, ohne die Bentonitmatte zu beschädigen und daraufhin innerhalb der unbeschädigten Wanne auch die zweite Körnung eingebaut werden konnte.

Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um mineralische Ersatzbaustoffe aus aufbereiteten Baurestmassen (RC-Materialien), um Elektroofenschlacke (industrielles Nebenprodukt) sowie um einen natürlichen vor Ort anstehenden Grubenkies. Konkret wurden Versuchsfelder aus einem reinem Betonbruch in der Korngröße 0/56 mm (RC-B 0/56), aus mehreren RC-Bauschuttgemischen in den Körnungen 0/8 mm (RC-M 0/8), 0/45 mm (RC-M 0/45) und 0/56 mm (RC-M 0/56), aus Elektroofenschlacke in den Körnungen 0/4 mm (EOS 0/4) und 0/32 mm (EOS 0/32) sowie aus einem natürlich anstehenden Grubenkies in der Korngröße 0/22 mm erstellt. Die Korngrößenverteilungen nach DIN 18123 sowie die Proctorkurve nach DIN 18127 sind in Bild 5-30 und Bild 5-31 dargestellt. Die jeweiligen Bodengruppen

der Materialien nach DIN 18196 sowie die in den Proctorversuchen bestimmten Proctordichten können Tabelle 5-5 entnommen werden.

Für die RC-Materialien RC-M 0/45 und RC-M 0/56 wurde die stoffliche Zusammensetzung ermittelt (Tabelle 5-3, Tabelle 5-4). Dies war bei den übrigen Materialien nicht erforderlich bzw. möglich, da die Materialien sortenrein vorlagen oder wie beim RC-M 0/8 mm zu kleine Korngrößen hatten.

### 5.3 Zusammenstellung der verwendeten Materialien

Die in den verschiedenen Probefeldern verwendeten Materialien sind in Kapitel 5.2 näher beschrieben. Eine Zusammenstellung der verwendeten Materialien findet sich in Tabelle 5-5.

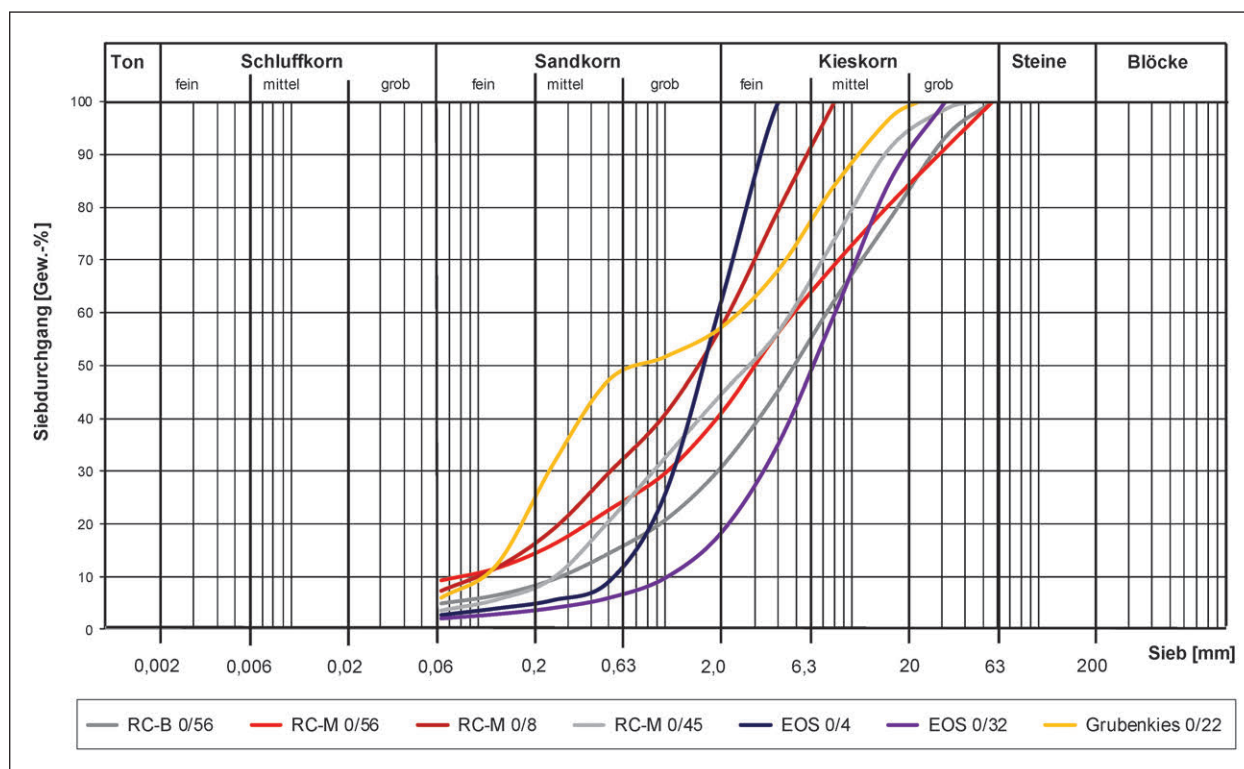


Bild 5-30: Körnungslinien der verwendeten Materialien Schiltberg

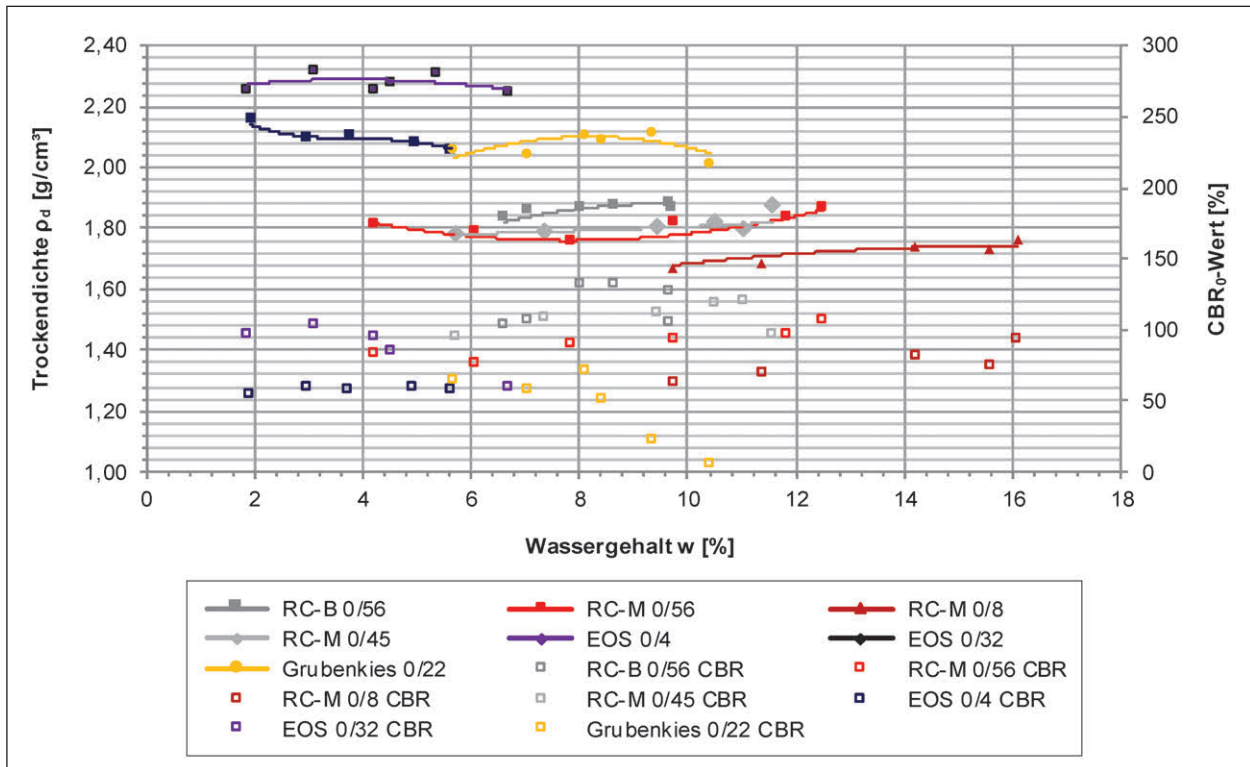


Bild 5-31: Proctorkurven der verwendeten Materialien Schiltberg

Massenanteil Bestandteile im Korngemisch	Anteil [M.-%]
Betonbruch/Betonprodukte	50,88
Mörtel/Putz/Kalksandstein	14,36
Klinker/Ziegel/Steinzeug	9,66
natürliche/industriell hergestellte Gesteinskörnung	22,99
mineralische Leichtbau- und Dämmstoffe, Porenbeton	0,02
Asphaltgranulat	0,00
Fliesen/Keramik/Glas	1,84
Gipshaltige Baustoffe	0,20
Papier/Pappe/Textilien/Kunststoffe/Gummi	0,00
Eisen/nichteisenhaltige Metalle	0,20
Aufschwimmende Fremdbestandteile	0,38

Tab. 5-3: Stoffliche Zusammensetzung RC-M 0/45

Massenanteil Bestandteile im Korngemisch	Anteil [M.-%]
Betonbruch/Betonprodukte	46,15
Mörtel/Putz/Kalksandstein	0,38
Klinker/Ziegel/Steinzeug	30,22
natürliche/industriell hergestellte Gesteinskörnung	22,51
mineralische Leichtbau- und Dämmstoffe, Porenbeton	0,00
Asphaltgranulat	0,00
Fliesen/Keramik/Glas	0,11
Gipshaltige Baustoffe	0,03
Papier/Pappe/Textilien/Kunststoffe/Gummi	0,00
Eisen/nichteisenhaltige Metalle	0,55
Aufschwimmende Fremdbestandteile	0,52

Tab. 5-4: Stoffliche Zusammensetzung RC-M 0/56

Probefeld	Nr	Bodenart	Bodengruppe	Proctordichte	bei w <sub>Pr</sub>	Bezeichnung
TUM Freifläche	1	Kies, schwach sandig	GI	2,22	3,0	Lieferkörnung 0/32
TUM Versuchsrube	2	Sand, stark feinkiesig	SI	1,89 1,97	7,0 8,7	Lieferkörnung 0/8
TUM Freising	3	Kies, sandig, schwach schluffig	GU	1,83	---	RC-Mix 0/56
Kirchheim	4	Kies, sandig (schwach schluffig)	GW	2,05	9,0	Bauschuttgemisch

Tab. 5-5: Zusammenstellung der Materialien für Probefelder

Probefeld	Nr	Bodenart	Bodengruppe	Proctordichte	bei $w_{Pr}$	Bezeichnung
Westtangente Freising	5	Fein-Mittelsand, stark kiesig, stark schluffig	SU*	2,04	8,5	
Pfraundorf Deponie	6	Ton, kiesig	GT* bzw. TM	1,64	21,9	Abdichtungsmaterial Lehm
Zeltingen	7	Kies, sandig, schluffig	GU*	1,86	14,3	
Pfraundorf Schotterwerk	8	Kies, sandig	GW	2,05	5,9	Schotter 0/45
Grube Schiltberg	9	Kies, sandig	GW	1,88	---	RC-B 0/56
Grube Schiltberg	10	Kies, stark sandig, schwach schluffig	GU	1,88	---	RC-M 0/8
Grube Schiltberg	11	Kies, stark sandig	GI	1,83	---	RC-M 0/45 I + II
Grube Schiltberg	12	Kies, stark sandig, schwach schluffig	GU	1,84	---	RC-M 0/56
Grube Schiltberg	13	Sand, stark kiesig	SE	2,12	---	EOS 0/4
Grube Schiltberg	14	Kies, schwach sandig	GW	2,30	---	EOS 0/32
Grube Schiltberg	15	Kies, stark sandig, schwach schluffig	GU	2,10	---	Grubenkies 0/22

Tab. 5-5: Fortsetzung

## 6 Auswertungen zu den Freifeldversuchen/Probefeldern

### 6.1 Allgemeines

Bei den verschiedenen Probefeldern wurden vergleichend dynamische und statische Plattendruckversuche, Dichtebestimmungen mit dem Densitometer und der Isotopsonde Troxler durchgeführt. Für die Auswertungen wurden im Weiteren folgende Festlegungen und Abkürzungen eingeführt.

#### 6.1.1 Statischer Plattendruckversuch

Beim statischen Plattendruckversuch erfolgt standardmäßig die Angabe der Ergebnisse mittels Verformungsmodul der Erstbelastung  $E_{v1}$  (MN/m<sup>2</sup>), der Zweitbelastung  $E_{v2}$  (MN/m<sup>2</sup>) und dem Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$ .

#### 6.1.2 Dichtebestimmung

Bei der Dichtebestimmung kamen hauptsächlich Densitometer- und Troxler-Messungen zum Einsatz. Bei der Troxler-Messung wurden meist die Einstichtiefen 0 cm bzw. 5 cm, 15 cm und 30 cm durchgeführt und aufgezeichnet. Als zielführend hat sich die 30 cm – Messung aufgrund des größeren Bodenvolumens gezeigt und wird hier ausschließlich dargestellt.

In diesem Bericht werden beide Dichteprüfverfahren – allerdings in separaten Auswertungen - dargestellt. Die Zweigleisigkeit der Auswertung ist zum einen dem Einsatz und der Einsatzhäufigkeit der Geräte in der Praxis, zum anderen aber auch der Tatsache geschuldet, dass bei den Troxler-Messungen im Einsatz bei Elektroofenschlacken (EOS) aufgrund der stoffliche Zusammensetzung erhebliche Verfälschungen auftreten.

#### 6.1.3 Dynamischer Plattendruckversuch

Beim dynamischen Plattendruckversuch werden gemäß Prüfvorschrift zunächst 3 Vorbelastungsstöße (1 bis 3) durchgeführt, die nicht aufgezeichnet werden, bevor die eigentlichen Messstöße (4 bis 6) ausgeführt werden. Aus dem Mittelwert der Stöße 4 bis 6 wird der  $E_{vD}$  – Wert ermittelt.

Im Rahmen dieser Forschung werden abweichend davon alle Schläge aufgezeichnet und auch weitere Schläge am gleichen Versuchspunkt durchgeführt. Die Schlagzahlen werden den jeweiligen Bezeichnungen zugeordnet. Die Setzungen werden folglich mit  $s_1$  bis  $s_{12}$  bezeichnet, die Geschwindigkeiten mit  $v_1$  bis  $v_{12}$ . Für die Auswertungen werden die Mittelwerte von jeweils 3 Stößen gebildet.

Für die Setzungen ergeben sich so die Mittelwerte  $s_{13}$ ,  $s_{46}$ , usw. (analog die Geschwindigkeiten  $v_{13}$ ,  $v_{46}$ , usw.). Aus diesen Mittelwerten werden dann die



$E_{VD}$  – Werte berechnet und mit  $E_{VD1}$ ,  $E_{vd2}$  (für  $s_{46}$ ),  $E_{VD3}$ , usw. bezeichnet. Der  $E_{VD}$ -Wert nach Prüfvorschrift ist somit der Wert  $E_{vd2}$ .

Da sich bei verschiedenen Auswertungen gezeigt hat, dass der erste Stoß ( $s_1$ ,  $v_1$ ) nur bedingt verwendbar ist, da hierdurch oft erst ein vollständiges Anliegen der Lastplatte erreicht wird, wird zusätzlich ein  $E_{VD1a}$  ermittelt, bei dem der 1. Stoß nicht berücksichtigt wird. Er wird also aus dem Mittelwert der Setzungen  $s_2$  und  $s_3$ , d. h.  $s_{23}$  bestimmt.

In Kapitel 6.2 wird zunächst für die standardmäßig zur Auswertung verwendeten Stöße 4 bis 6 die Zusammenhänge zwischen der Setzung  $s_{46}$  und der Geschwindigkeit  $v_{46}$  aufgezeigt. Die Auswertungen werden nach Bodenarten und den verwendeten Fallgewichtsgeräten unterschieden und dienen dazu die Verwendbarkeit dieser Kennwerte für die einzelnen Geräte zu überprüfen.

In den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.2 werden Zusammenhänge zwischen dem  $E_{vd2}$ -Werten und den standardmäßigen, statischen Kenngrößen für die Tragfähigkeit  $E_{V2}$  und die Verdichtung  $D_{Pr}$  betrachtet. Diese Auswertungen waren natürlich an anderer Stelle bereits Gegenstand von Forschung und Praxis. Es macht zur Einschätzung der weiteren Ergebnisse allerdings Sinn, dies hier erneut für die untersuchten Böden zu beleuchten.

Der eigentliche Gegenstand dieser Forschungsarbeit das Verhältnis der Setzung und der Geschwindigkeit  $s_{46}/v_{46}$  (ms) ist Inhalt der Kapitel 6.3.3 bis 6.5.1.

#### 6.1.4 Gruppenzuordnung der verwendeten Materialien

Um eine zielgerichtete Auswertung nach Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften vornehmen zu können, wurden die Materialien in folgenden Auswertegruppen zusammengefasst (Tabelle 6.1). Bei den mineralischen Ersatzbaustoffen werden teils alle gemeinsam, teils unterschieden nach Materialien aus Elektroofenschlacke (bezeichnet als „nur EOS“) und RC-Materialien (bezeichnet als „ohne EOS“).

#### 6.1.5 Abkürzungen

In den folgenden Auswertungen werden die in Tabelle 6-2 aufgelisteten Abkürzungen verwendet.

## 6.2 Setzung $s_{46}$ /Geschwindigkeit $v_{46}$

Beim dynamische Plattendruckversuch wird für jeden Stoß der zugehörige Beschleunigungsverlauf über der Zeit ermittelt. Durch einfache Integration dieses Verlaufs erhält man den Geschwindigkeitsverlauf, durch zweifache Integration den Setzungsverlauf. Hauptgegenstand dieser Forschungsarbeit ist die Betrachtung des Quotienten/Verhältnisses aus der maximalen Setzung und der maximalen

Bezeichnung in den Auswertungen	Zugeordnete Materialien
Alle Böden	1 – 15
Kiese	1, 15
Schotter	8
Sande	2
Grobkörnige Böden	1, 2, 8, 15
Fein- und gemischtkörnige Böden	5, 6, 7
Mineralische Ersatzbaustoffe	3, 4, 9 – 14
RC-Materialien	3, 4, 9 – 12
Elektroofenschlacke	13, 14

Tab. 6.1: Gruppenzuordnung der verwendeten Materialien

Abkürzung	Bedeutung
$s_{46}$	Mittelwert der Setzung $s$ der Schläge 4 bis 6 (mm)
$v_{46}$	Mittelwert der Geschwindigkeit $v$ der Schläge 4 bis 6 (mm/s)
$s_{46}/v_{46}$	Verhältnis von Setzung und Geschwindigkeit der Schläge 4 bis 6 (ms)
$E_{VD2}$	Mittelwert der EVD-Werte der Schläge 4 bis 6 (MN/m <sup>2</sup> )
$E_{VD1}$	Mittelwert der EVD-Werte der Schläge 1 bis 3 (MN/m <sup>2</sup> )
$E_{V2}$	Verformungsmodul statischer Plattendruckversuch, Zweitbelastung (MN/m <sup>2</sup> )
$E_{V1}$	Verformungsmodul statischer Plattendruckversuch, Erstbelastung (MN/m <sup>2</sup> )
$D_{Pr}$	Verdichtungsgrad ( % )
LFG	Leichtes Fallgewichtsgerät (10 kg Fallmasse)
MFG	Mittelschweres Fallgewichtsgerät (15 kg Fallmasse)
H10	LFG der Firma HMP
Z10	LFG der Firma Zorn
H15	MFG der Firma HMP
Z15	MFG der Firma Zorn

Tab. 6.2: Verwendete Abkürzungen bei Probefeldern

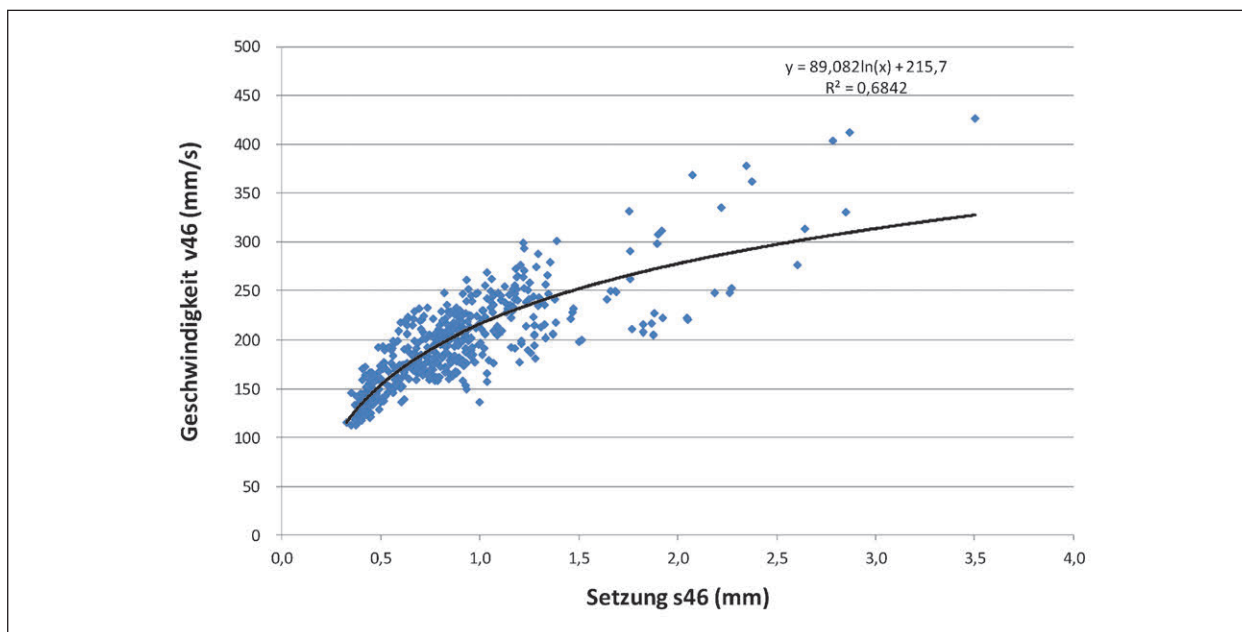


Bild 6-1: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, alle untersuchten Böden

Geschwindigkeit ermittelt aus dem jeweiligen Verlauf.

In diesem Kapitel wird für die standardmäßig zur Auswertung verwendeten Stöße 4 bis 6 die Zusammenhänge zwischen der Setzung  $s_{46}$  und der Geschwindigkeit  $v_{46}$  aufgetragen. Die Auswertungen werden nach Bodenarten und den verwendeten Fallgewichtsgeräten unterschieden und dienen dazu die Verwendbarkeit dieser Kennwerte für die einzelnen Geräte zu überprüfen.

### 6.2.1 Alle Böden

Für alle untersuchten Böden ergeben sich für die leichten Fallgewichtsgeräte H10 und Z10 folgende Zusammenhänge, die mit logarithmischen Trendlinien dargestellt sind (Bilder 6-1 bis 6-3).

Die Zusammenhänge werden durch die logarithmische Trendlinie gut abgebildet. Zwischen den Geräten sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

Für alle untersuchten Böden ergeben sich für die mittelschweren Fallgewichtsgeräte H15 und Z15 folgenden Zusammenhänge, die mit logarithmischen Trendlinien dargestellt sind (Bilder 6-4 bis 6-6).

Es zeigt sich bei Z15 eine mit den Verläufen der beiden LFG sehr gute Übereinstimmung. Die Zusammenhänge werden durch die logarithmische Trend-

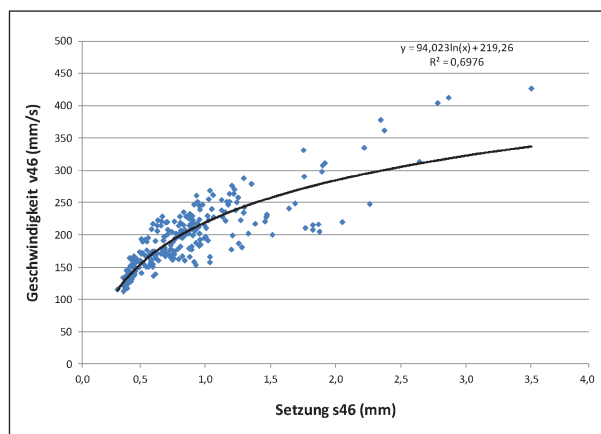


Bild 6-2: H10, alle Böden

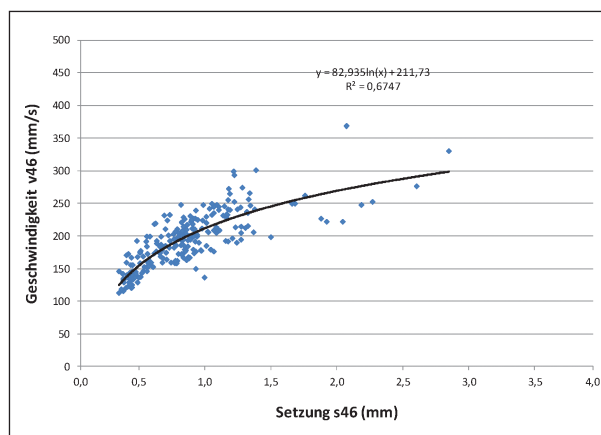


Bild 6-3: Z10, alle Böden

linie gut abgebildet. Das Bestimmtheitsmaß ist vergleichsweise hoch und im Bereich der LFG.

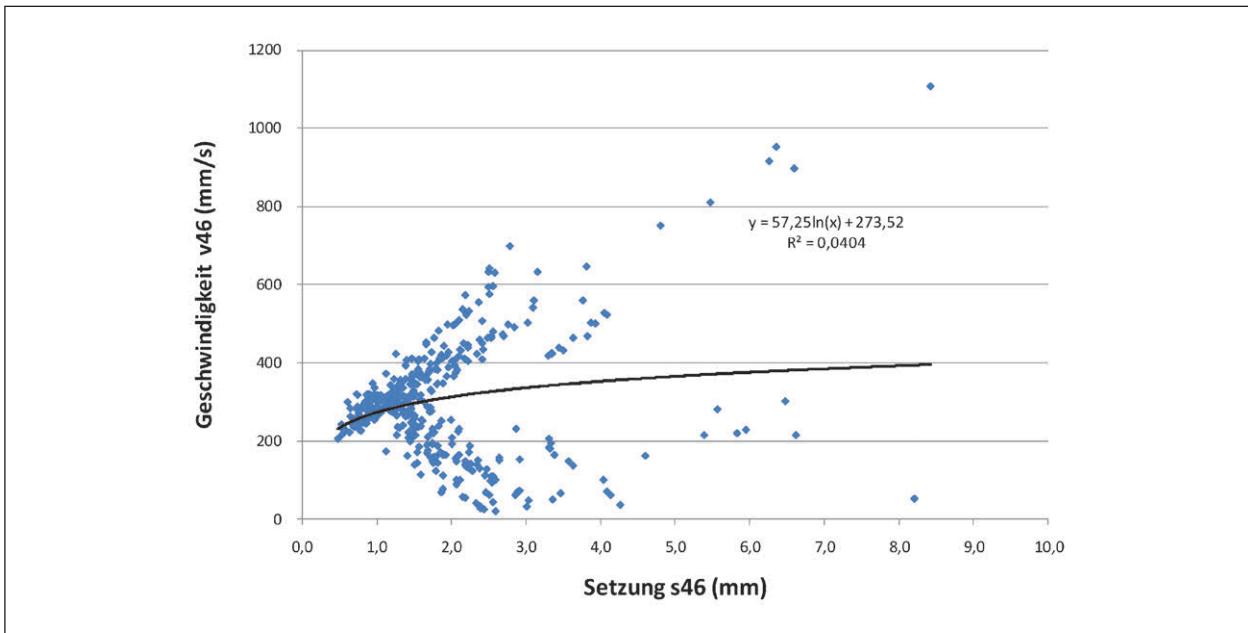


Bild 6-4: Mittelschwere Fallgewichtsgeräte H15 und Z15, alle untersuchten Böden

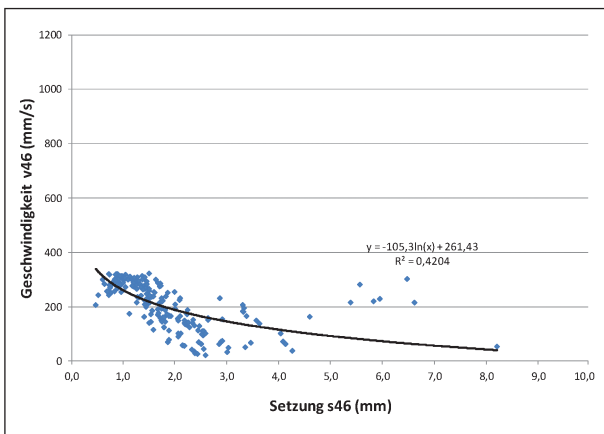


Bild 6-5: H15, alle Böden

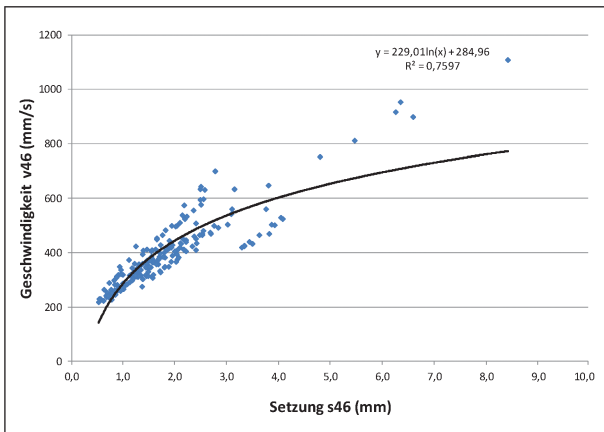


Bild 6-6: Z15, alle Böden

Demgegenüber stellt sich H15 ein völlig anderes Bild dar. Die Geschwindigkeiten nehmen im Gegensatz zu den anderen Geräten mit zunehmender Setzung ab, was physikalisch nicht plausibel ist.

### 6.2.2 Grobkörnige Böden

Für die der Gruppe „grobkörnige Böden“ zugeordneten Böden (siehe Tabelle 6-1) ergeben sich für die leichten Fallgewichtsgeräte H10 und Z10 folgenden Zusammenhänge, die mit logarithmischen Trendlinien dargestellt sind (Bilder 6-7 bis 6-9).

Die Zusammenhänge werden durch die logarithmische Trendlinie gut abgebildet. Zwischen den Geräten sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar. Das Bestimmtheitsmaß ist hoch.

Für die grobkörnigen Böden ergeben sich für die mittelschweren Fallgewichtsgeräte H15 und Z15 folgenden Zusammenhänge (Bilder 6-10 bis 6-12).

Der gegenläufige Verlauf der Trendlinie bei H15 bestätigt sich auch für den eingeschränkten Bodenbereich (grobkörnige Böden). Das Bestimmtheitsmaß ist geringer als bei Z15. Es scheint ein systematisches Problem vorzuliegen.

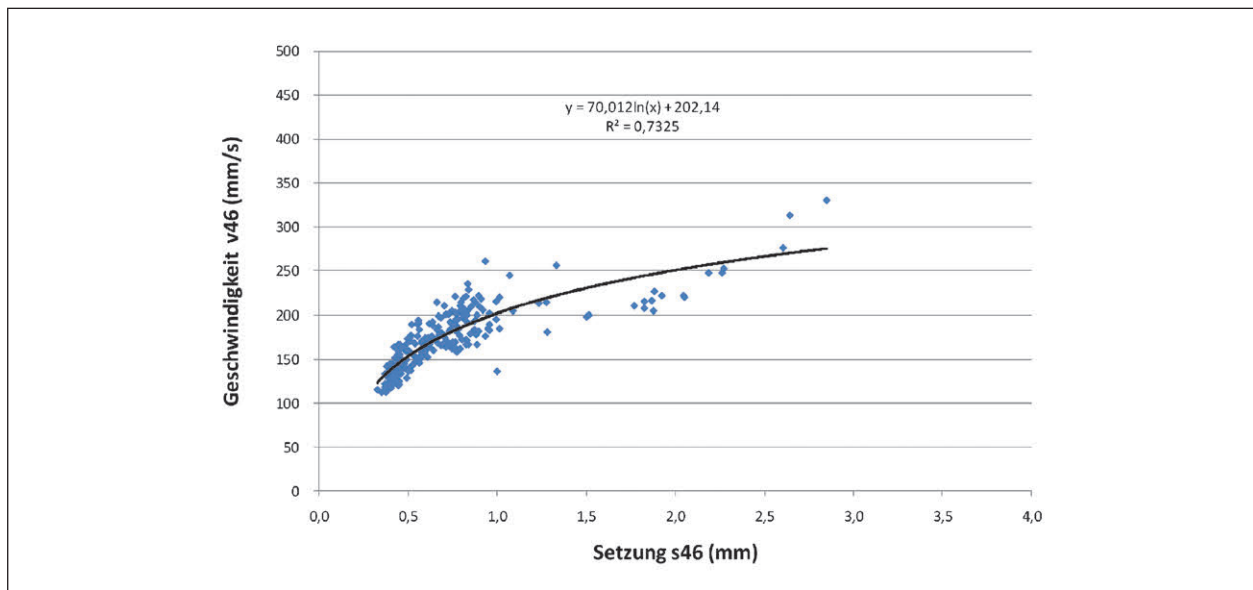


Bild 6-7: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, grobkörnige Böden

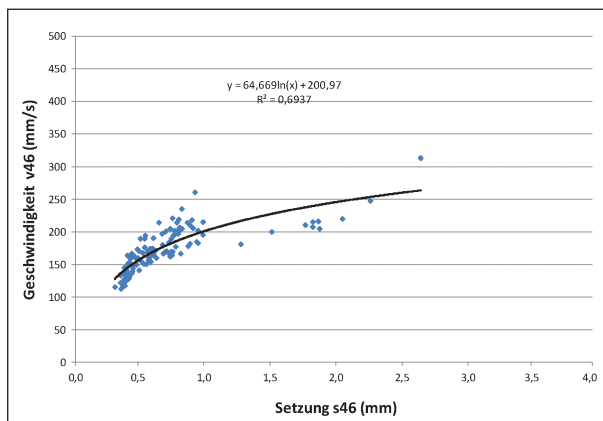


Bild 6-8: H10, grobkörnige Böden

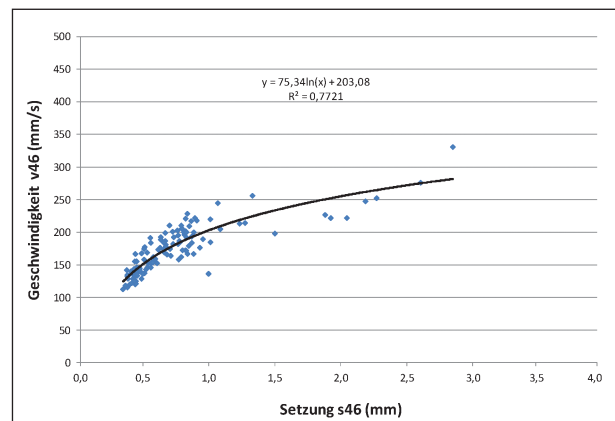


Bild 6-9: Z10, grobkörnige Böden

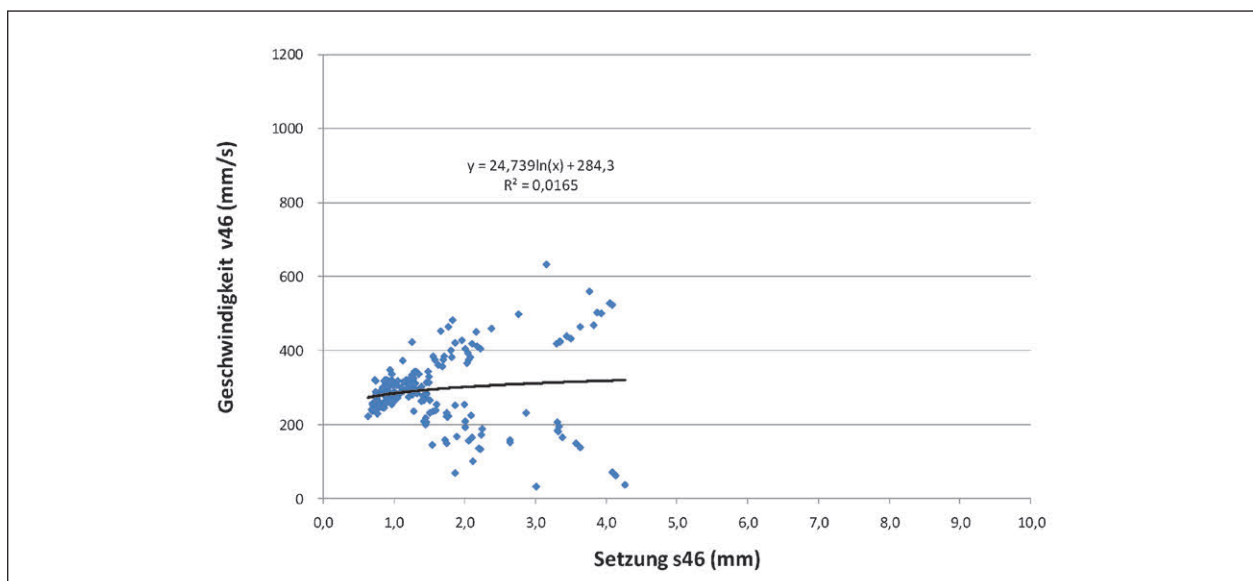


Bild 6-10: Mittelschwere Fallgewichtsgeräte H15 und Z15, grobkörnige Böden

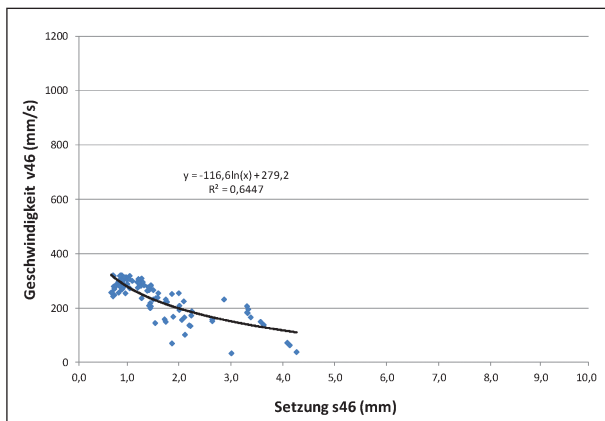


Bild 6-11: H15, grobkörnige Böden

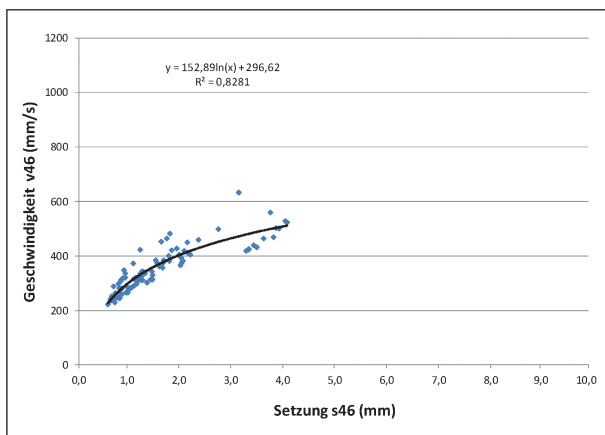


Bild 6-12: Z15, grobkörnige Böden

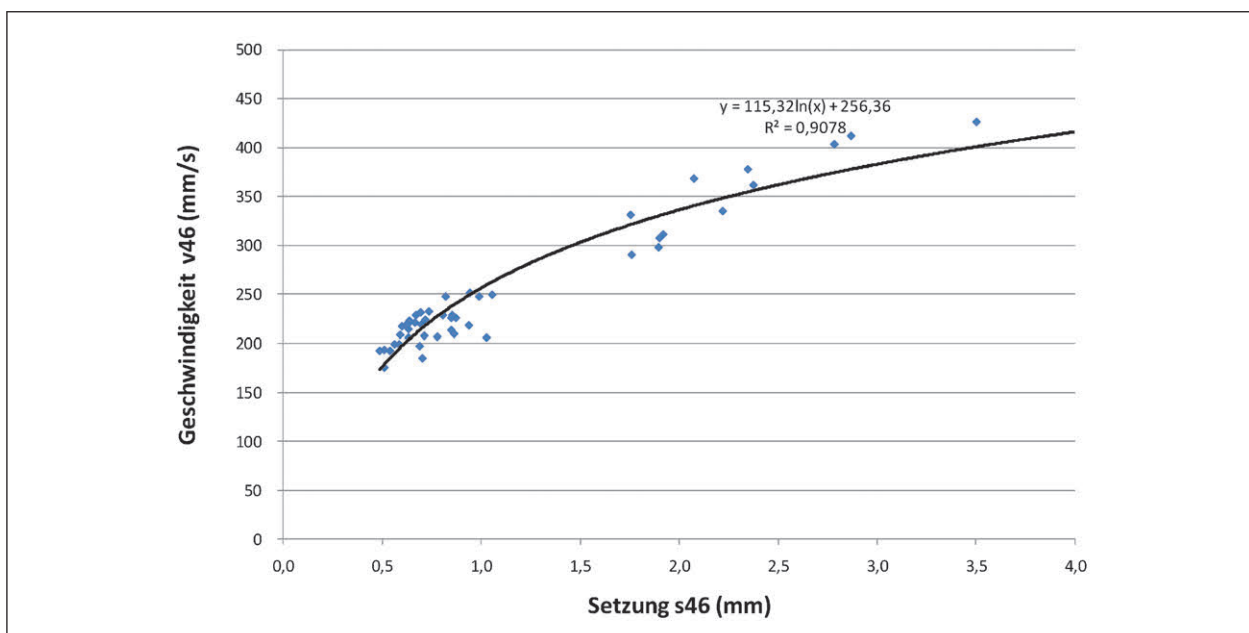


Bild 6-13: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden

### 6.2.3 Fein- und gemischtkörnige Böden

Für die der Gruppe „fein- und gemischtkörnige Böden“ zugeordneten Böden (siehe Tabelle 6-1) ergeben sich für die leichten Fallgewichtsgeräte H10 und Z10 folgenden Zusammenhänge, die mit logarithmischen Trendlinien dargestellt sind (Bilder 6-13 bis 6-15).

Die Zusammenhänge werden durch die logarithmische Trendlinie gut abgebildet. Zwischen den Geräten sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar. Das Bestimmtheitsmaß ist hoch, bei H10 signifikant höher als bei Z10, wobei dies dem eingeschränkten Datenbereich bei Z0 geschuldet ist.

Für die mittelschweren Fallgewichtsgeräte H15 und Z15 liegen bei den fein- und gemischtkörnigen Böden nur Ergebnisse für SU und Lehm vor, für die sich folgende Zusammenhänge ergeben (Bilder 6-16 und 6-17).

Die Datenbasis ist zwar gering, aber der Zusammenhang bei Z15 ist wie bei den LFG. Demgegenüber ist bei H15 nur eine große Streuung der Werte bei sehr geringem Bestimmtheitsmaß erkennbar.

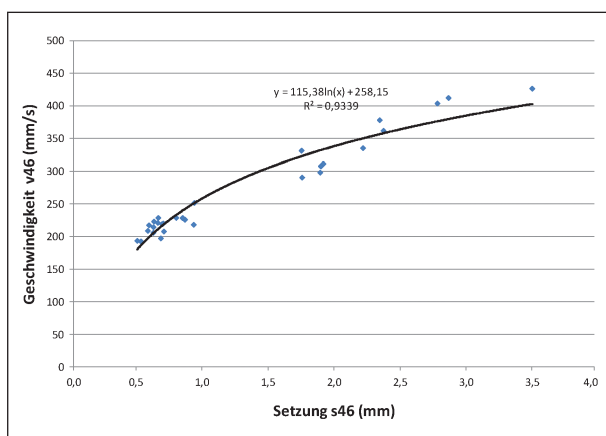


Bild 6-14: H10, fein- und gemischtkörnige Böden

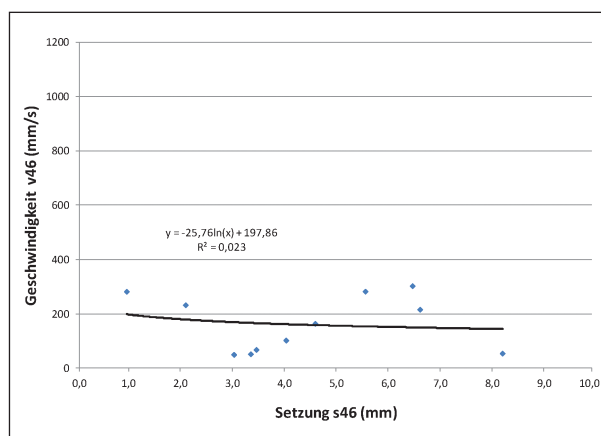


Bild 6-16: H15, fein- und gemischtkörnige Böden

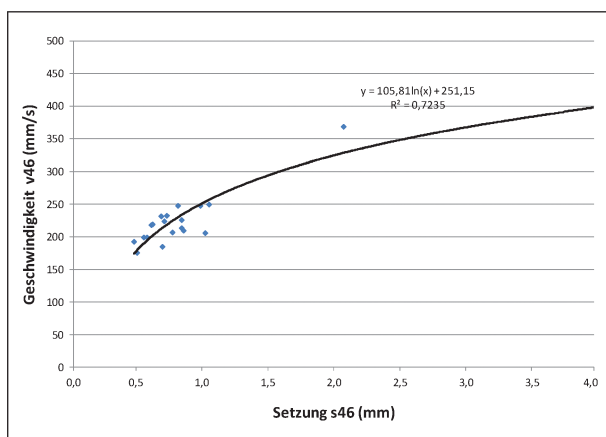


Bild 6-15: Z10, fein- und gemischtkörnige Böden

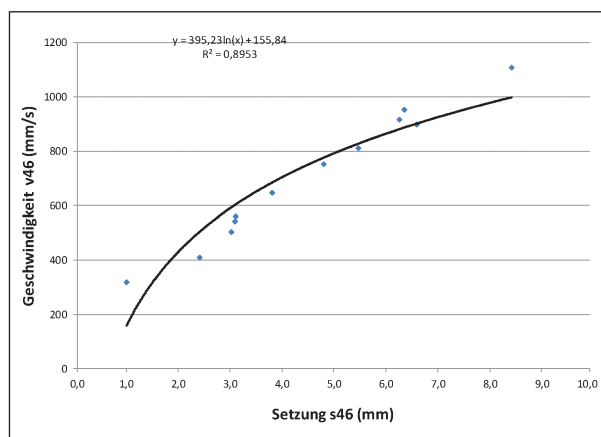


Bild 6-17: Z15, fein- und gemischtkörnige Böden

## 6.2.4 Mineralische Ersatzbaustoffe

Für die der Gruppe „Mineralische Ersatzbaustoffe“ zugeordneten Böden (siehe Tabelle 6-1) ergeben sich für die leichten Fallgewichtsgewichte H10 und Z10 folgenden Zusammenhänge, die mit logarithmischen Trendlinien dargestellt sind (Bilder 6-18 bis 6-20).

Die Zusammenhänge werden durch die logarithmische Trendlinie gut abgebildet. Die Auswertung mit einer linearen Trendlinie führt zu nahezu gleichem Bestimmtheitsmaß. Zwischen den Geräten sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

Für die Mineralische Ersatzbaustoffe ergeben sich für die mittelschweren Fallgewichtsgewichte H15 und Z15 folgenden Zusammenhänge (Bilder 6-21 und 6-22).

Der gegenläufige Verlauf mit der (hier am besten geeigneten) linearen Trendlinie bei H15 bestätigt sich auch in diesem Anwendungsfall.

## 6.2.5 Zusammenfassung

Gemäß den Prüfvorschriften für LFG und MFG müssen die Geräte in einem Bereich von 0,3 mm bis 1,5 mm die Setzungen messen können. Die vorliegenden Ergebnisse weisen Versuche in einem deutlich größeren Setzungsbereich aus, was bei den LFG (H10 und Z10) und bei Z15 offensichtlich keine Probleme erkennen lässt.

Bei H15 sind die Ergebnisse im großen Setzungsbereich stets gegenläufig, d. h. bei größeren Setzungen nimmt die Geschwindigkeit ab. Dies ist physikalisch nicht erklärbar. Auch eine Einschränkung auf Versuche, bei denen nur Setzungen im zulässigen bzw. geforderten Bereich ermittelt wurden, lassen keine plausible Ermittlung der Geschwindigkeit bei H15 erkennen (siehe Bild 6-23).

Wie aus dem sehr geringen Bestimmtheitsmaß erkennbar ist, streuen die Werte auch in diesem eingeschränkten Bereich sehr stark. Unklar ist, ob nur die Geschwindigkeitswerte oder auch die Setzungs-

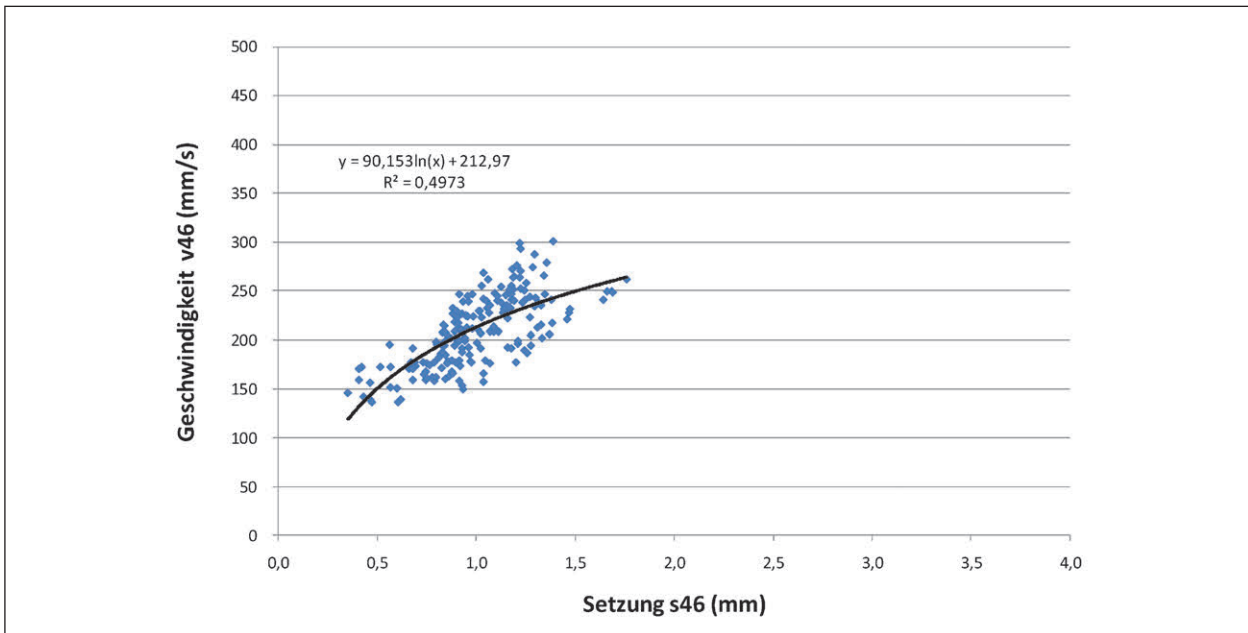


Bild 6-18: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, Mineralische Ersatzbaustoffe

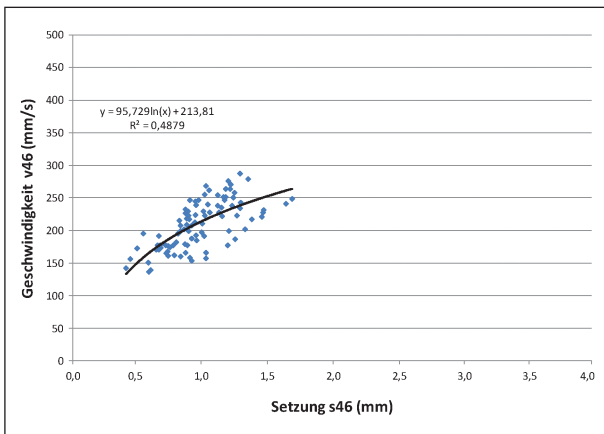


Bild 6-19: H10, Mineralische Ersatzbaustoffe

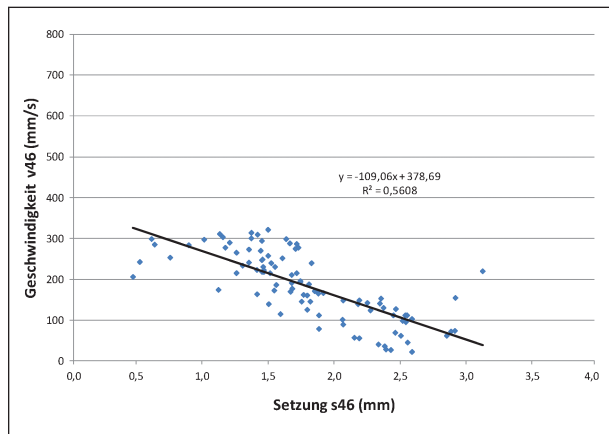


Bild 6-21: H15, Mineralische Ersatzbaustoffe

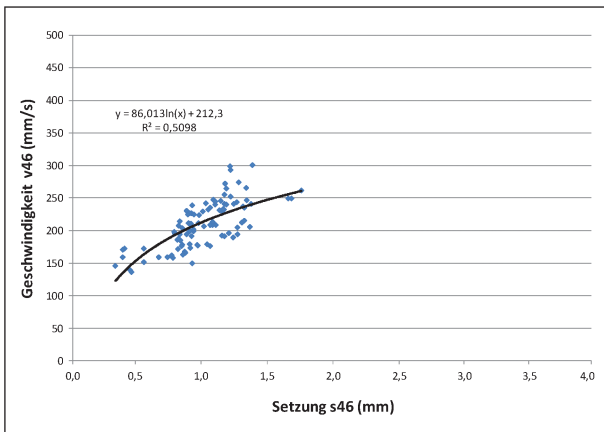


Bild 6-20: Z10, Mineralische Ersatzbaustoffe

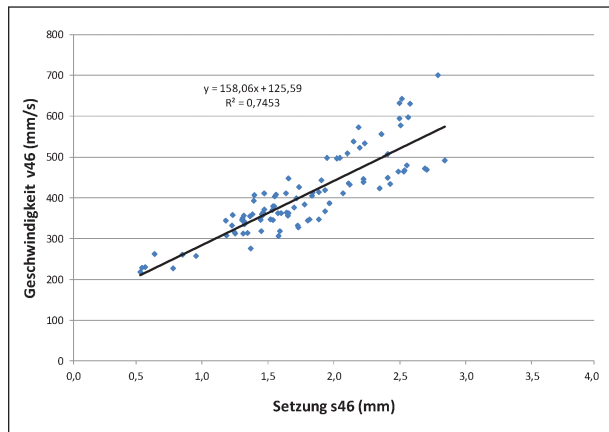


Bild 6-22: Z15, Mineralische Ersatzbaustoffe

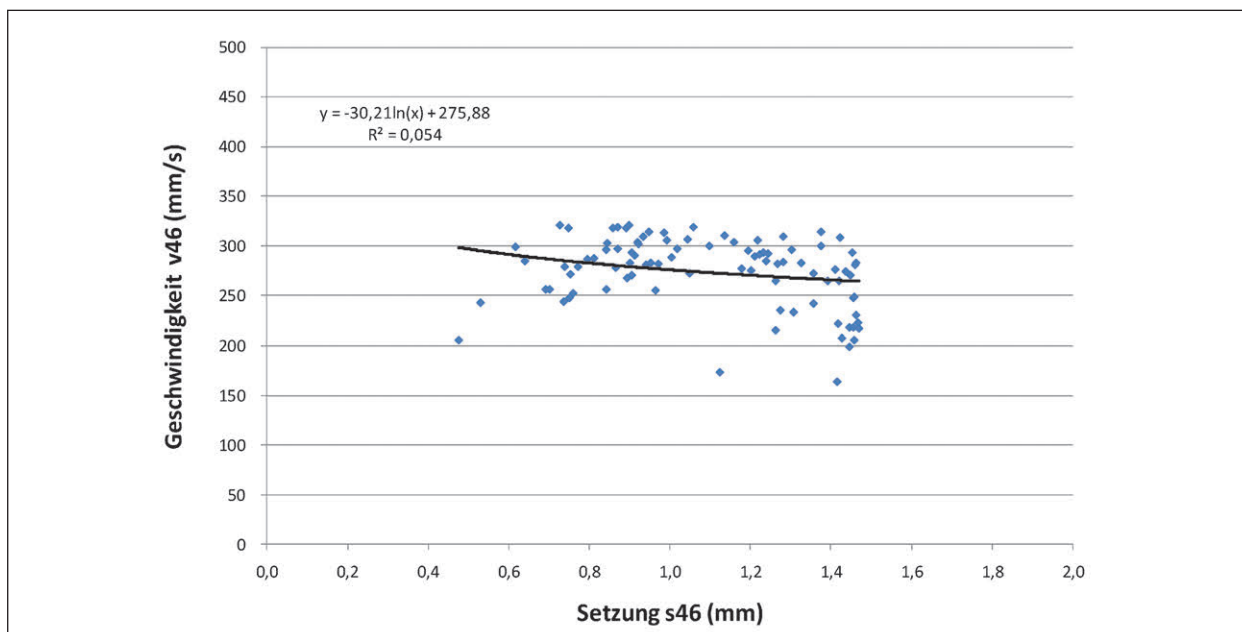
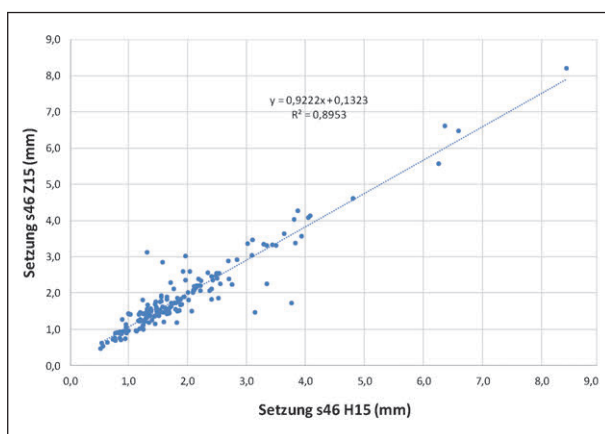
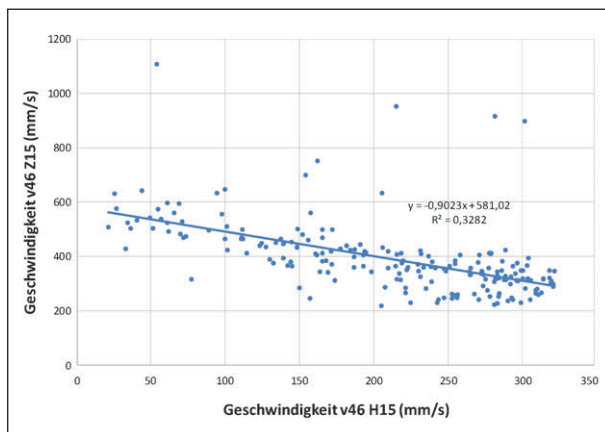


Bild 6-23: H15, alle Böden, Setzungsbereich 0,3 mm bis 1,5 mm

Bild 6-24: Setzung  $s_{46}$  H15/Z15Bild 6-25: Geschwindigkeit  $v_{46}$  H15/Z15

wert nicht plausibel sind. Um dies zu überprüfen werden in den Bildern 6-24 und 6-25 die Setzungs- und Geschwindigkeitswerte von Z15 und H15 gegenübergestellt.

Das hohe Bestimmtheitsmaß und die Gleichläufigkeit der Werte bei der Gegenüberstellung der Setzungen lässt vermuten, dass die Setzungen von H15 zu verwenden sind. Die Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten zeigt, dass die Geschwindigkeiten von H15 steigen und demgegenüber die von Z15 fallen. Es bestätigt somit die in den vorigen Abschnitten beschriebenen Auffälligkeiten. Allerdings besteht doch ein systematischer Zusammenhang, wenn auch bei geringerem Bestimmtheitsmaß. Eine Erklärung kann wohl nur vom Hersteller erwartet werden.

Im weiteren Verlauf der Auswertungen wird das Gerät H15 in Bezug auf die Geschwindigkeiten nicht mehr mit einbezogen.



### 6.3 Dynamischer Kennwert bezogen auf absoluten statischen Kennwert

#### 6.3.1 $E_{VD2}$ zu $E_{V2}$

Beginnend mit der Ausgabe 2009 werden in der ZTV E-StB zusätzlich zu den bislang bestehenden Abnahmewerten für die Tragfähigkeit bezogen auf den Verformungsmodul  $E_{V2}$  auch Vorgaben für den Verformungsmodul  $E_{Vd}$  aus dem dynamischen Plattendruckversuch festgelegt.

Im Rahmen dieser Forschung wurden bei verschiedenen Böden statische und dynamische Plattendruckversuche an gleichen Bereichen durchgeführt, sodass aus den Gegenüberstellungen eine Überprüfung der Kennwerte möglich ist.

In den Bildern 6-26 bis 6-41 werden jeweils die LFG- und die MFG-Werte den statischen Verformungsmodul gegenübergestellt.

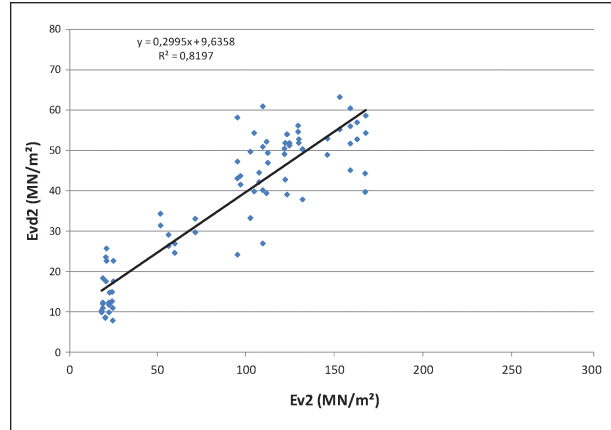


Bild 6-28: Statische/dynamische Verformungsmodul, LFG H10 und Z10, Kiese

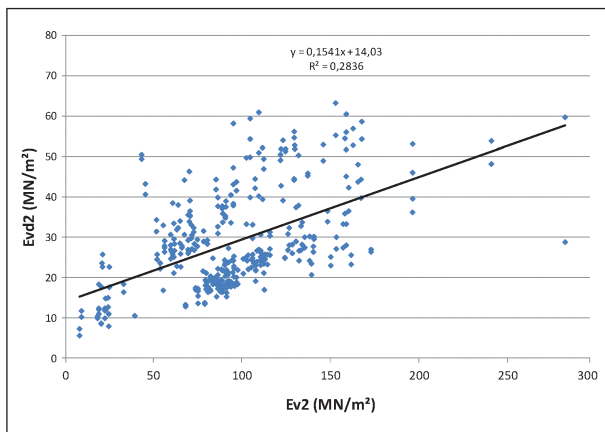


Bild 6-26: Statische/dynamische Verformungsmodul, LFG H10 und Z10, alle Böden

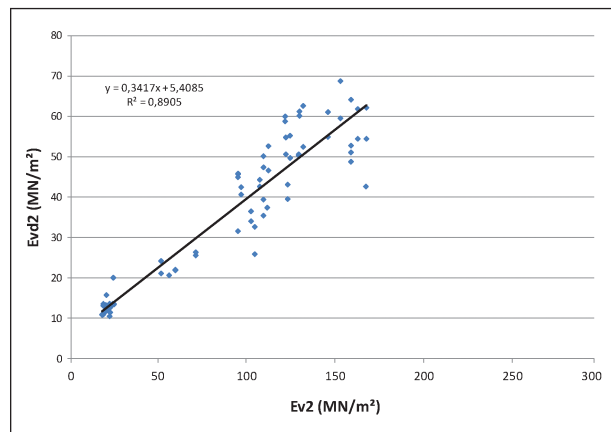


Bild 6-29: Statische/dynamische Verformungsmodul, MFG H15 und Z15, Kiese

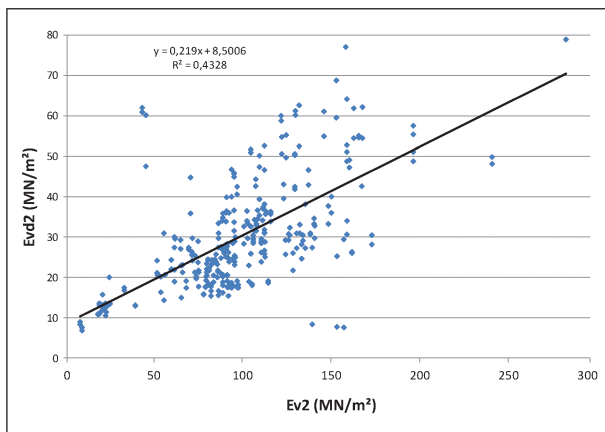


Bild 6-27: Statische/dynamische Verformungsmodul, MFG H15 und Z15, alle Böden

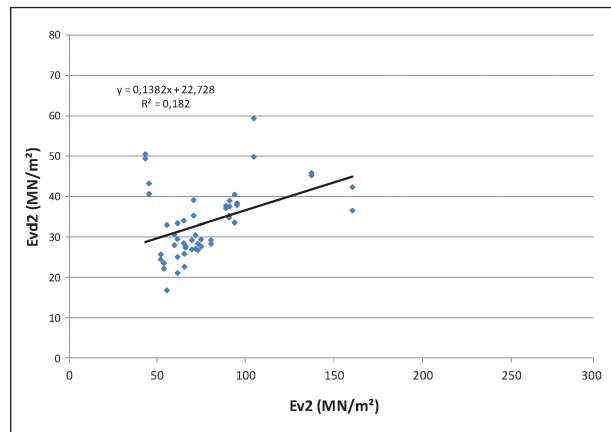


Bild 6-30: Statische/dynamische Verformungsmodul, LFG H10 und Z10, Sande

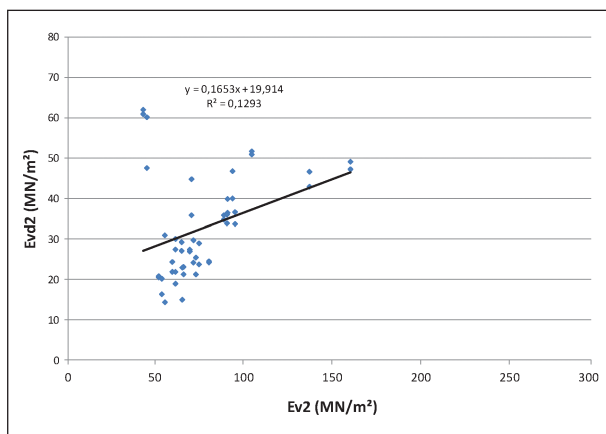


Bild 6-31: Statische/dynamische Verformungsmodul, MFG H15 und Z15, Sande

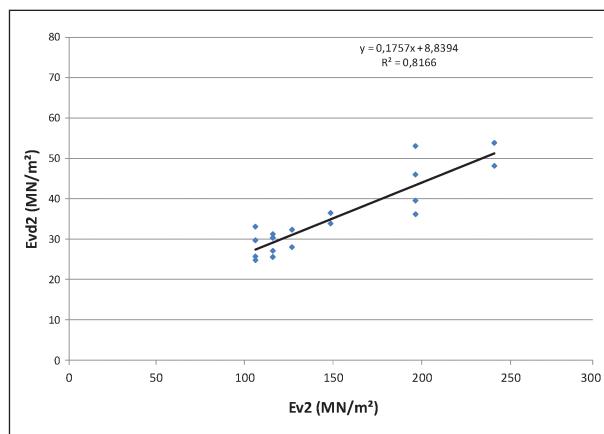


Bild 6-34: Statische/dynamische Verformungsmodul, LFG H10 und Z10, Schotter 0/45

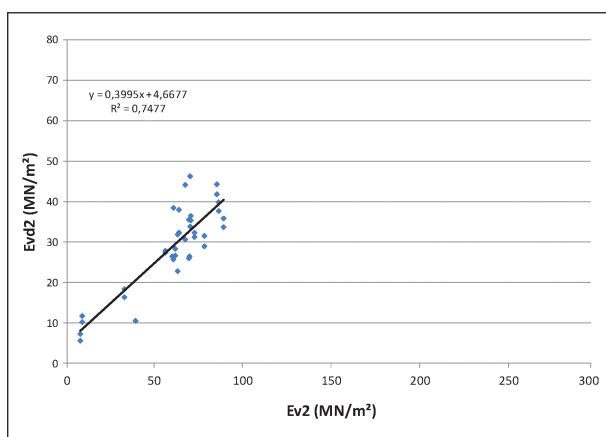


Bild 6-32: Statische/dynamische Verformungsmodul, LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, GU\*, SU)

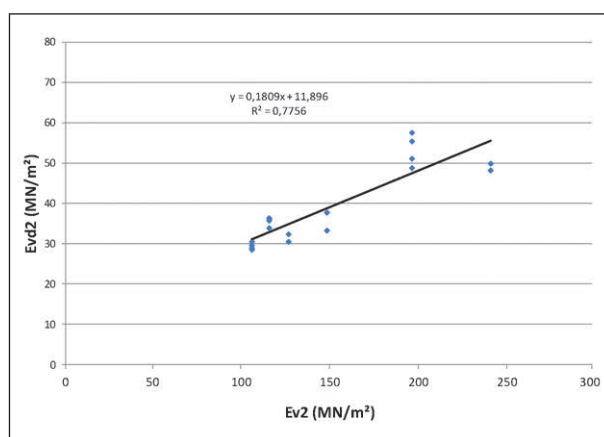


Bild 6-35: Statische/dynamische Verformungsmodul, MFG H15 und Z15, Schotter 0/45

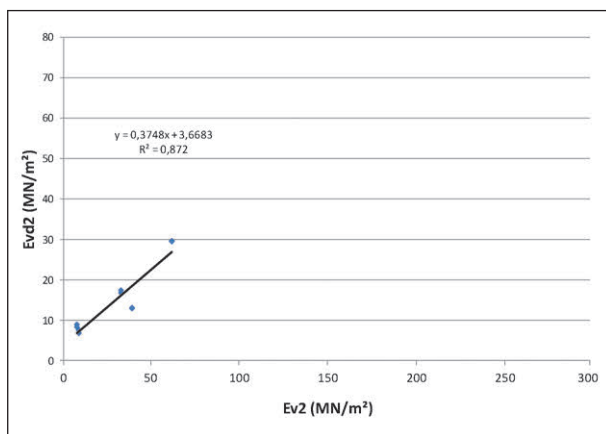


Bild 6-33: Statische/dynamische Verformungsmodul, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, GU\*, SU)

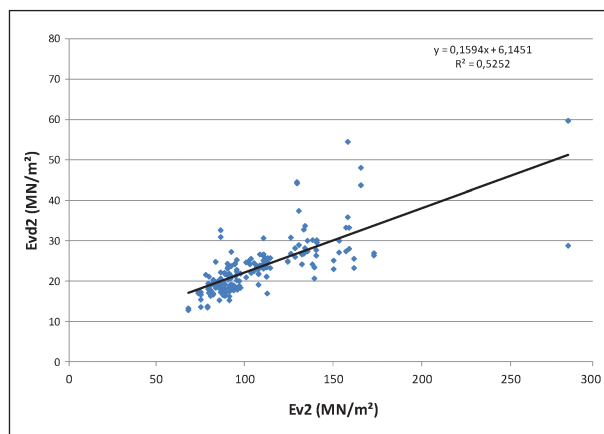


Bild 6-36: Statische/dynamische Verformungsmodul, LFG H10 und Z10, mineralische Ersatzbaustoffe

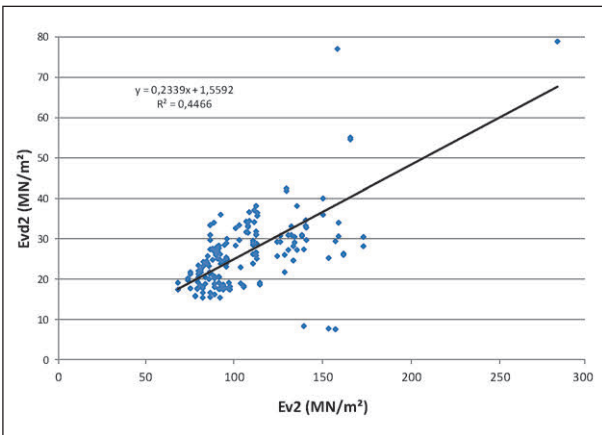


Bild 6-37: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, mineralische Ersatzbaustoffe

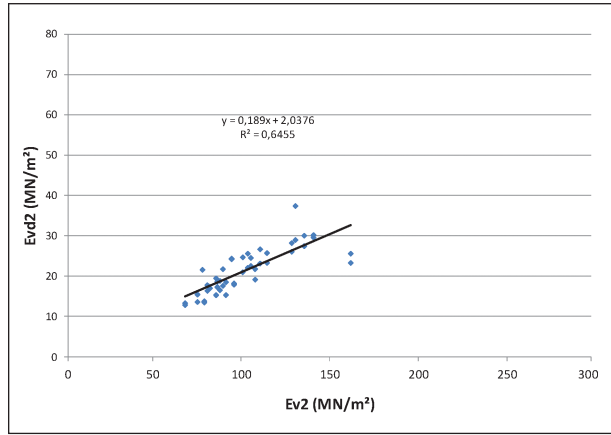


Bild 6-40: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, Elektroenschlacke

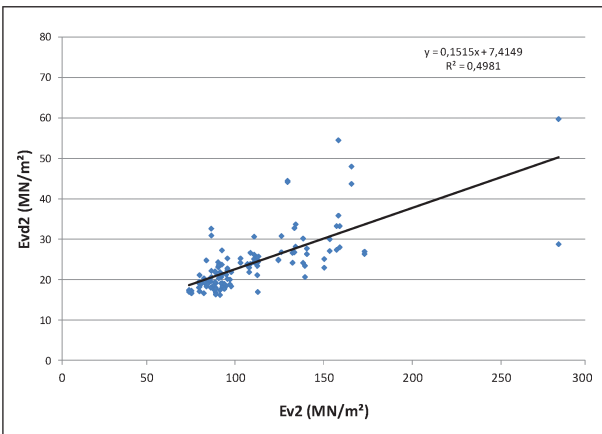


Bild 6-38: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, RC-Materialien

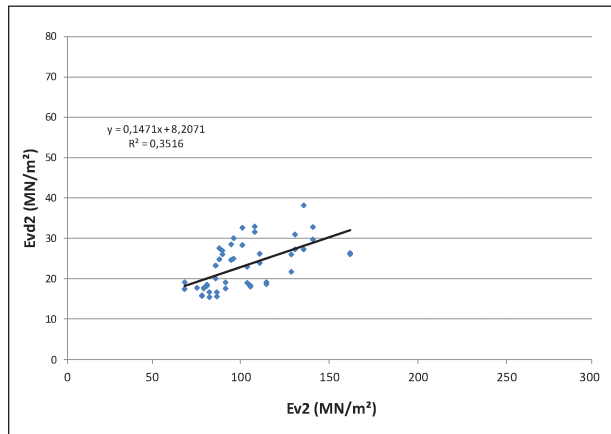


Bild 6-41: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, Elektroenschlacke

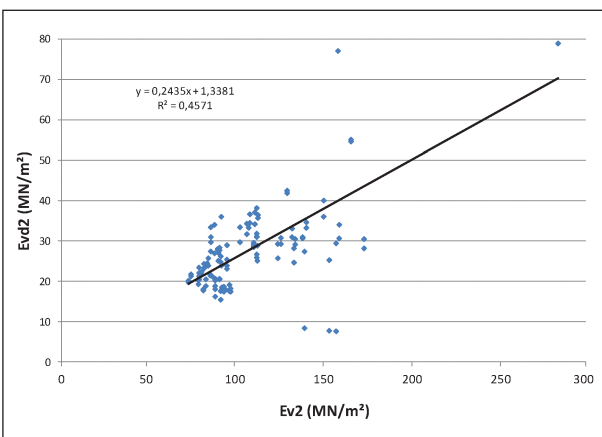


Bild 6-39: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, RC-Materialien

Boden	LFG H10 und Z10	MFG H15 und Z15
	Steigung	Steigung
Alle Böden	1,8	2,0
Kiese	2,7	2,6
Sande	1,3	0,8
Fein- und gemischt-körnige Böden	1,9	2,3
Schotter 0/45	4,6	4,3
Mineralische Ersatzbaustoffe	3,3	1,9
RC-Materialien	3,3	1,9
Elektroenschlacke	3,4	2,4

Tab. 6-3: Steigungen  $E_{vd2}/E_{v2}$

In Tabelle 6-4 sind die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse der vorstehenden Diagramme zusammengestellt.

Da bei der oben gewählten Darstellung mit herkömmlichen Kennwerten auf der x-Achse hier in der Praxis eher ungebräuchliche Steigungswerte ermittelt werden, werden in Tabelle 6-3 die Werte bei Betrachtung der umgekehrten Schlussrichtung angegeben. Es ergeben sich folgende Steigungen, aus denen die bauseits gebräuchlichen Faktoren für die Einschätzung der  $E_{vd}$ -Werte besser erkannt werden können.

Für die Angaben der ZTV E-StB ist für die LFG Anforderungswerte in etwa ein Faktor 2 zugrunde gelegt worden. Dies kann aufgrund der hier vorliegenden Ergebnisse nur bedingt, speziell nur für „alle Böden“, bestätigt werden. Auch wenn das Bestimmtheitsmaß bei der Auswertung für „alle Böden“ eher gering ist, sind die ermittelten Faktoren für beide Gerätegruppen doch sehr nahe bei 2.

Bei Unterteilung in die verschiedenen Bodengruppen stellen sich deutliche Abweichung bei den Versuchen mit Sanden (deutlich unter 2) und bei Schotter (Werte über 4 sind auch im Rahmen anderer eigener Forschungsarbeiten bestätigt) dar, wobei die Abweichungen bei LFG und MFG die gleichen Tendenzen aufweisen. Bei den RC-Materialien passt für MFG der Faktor 2 sehr gut, während bei den LFG mit einem Faktor von über 3 doch eine deutliche Abweichung festzustellen ist.

Für die weiteren Auswertungen sollten auf der Basis verschiedener statischer Verformungsmodule  $E_{v2}$  hieraus Anforderungswerte an die dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  aus den obigen Diagrammen (mit Verwendung der Regressionsgleichung) abgeleitet (z. T. deutlich extrapoliert) werden (siehe Tabelle 6-5). Aufgrund des z. T. deutlichen Anfangswertes (Offsets) der Regressionsgeraden auf der  $E_{vd2}$ -Achse sind für die Umrechnung nicht unmittelbar die Faktoren der Steigung alleine anzuwenden.

Boden	LFG H10 und Z10		MFG H15 und Z15	
	Steigung	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Bestimmtheitsmaß
Alle Böden	0,15	0,28	0,22	0,43
Kiese	0,30	0,81	0,34	0,89
Sande	0,14	0,18	0,17	0,13
Fein- und gemischtkörnige Böden	0,40	0,75	0,36	0,87
Schotter 0/45	0,18	0,82	0,18	0,78
Mineralische Ersatzbaustoffe	0,16	0,53	0,23	0,45
RC-Materialien	0,15	0,50	0,24	0,46
Elektroofenschacke	0,19	0,65	0,15	0,35

Tab. 6-4: Regressionswerte  $E_{v2}/E_{vd2}$

Boden	LFG H10 und Z10					MFG Z15 und Z15				
	$E_{vd2}$ bei $E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )					$E_{vd2}$ bei $E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )				
	45	80	100	120	150	45	80	100	120	150
Alle Böden	21	26	29	33	37	18	26	30	35	41
Kiese	23	34	40	46	55	21	33	40	46	57
Sande	29	34	37	39	43	27	33	36	40	45
Fein- und gemischtkörnige Böden	23	37	45	53	65	20	33	40	47	58
Schotter 0/45	17	23	26	30	35	20	26	30	34	39
Mineralische Ersatzbaustoffe	13	19	22	25	30	12	20	25	30	37
RC-Materialien	14	20	23	26	30	12	21	26	31	38
Elektroofenschlacke	11	17	21	25	30	15	20	23	26	30

Tab. 6-5:  $E_{vd2}$ -Wert für verschiedene  $E_{v2}$ -Anforderungswerte

### 6.3.2 $E_{VD2}$ zu $D_{Pr}$

Gemäß ZTV E-StB sind für die Verdichtung bei Dämmen Anforderungen an den Verdichtungsgrad von 97 %, 98 % und 100 % je nach Höhenlage bezogen auf das Planum gefordert.

Bei den Versuchen kamen Densitometer, Ausstechzylinder und eine radiometrische Sonde (Troxler) zum Einsatz. Die Versuche haben unterschiedliche Charakteristiken und weichen in der Handhabung, der erfassten Messvolumina und der erzielbaren Genauigkeit voneinander ab.

Vereinbarungsgemäß sollten die mit der Troxler-sonde bei einer Einstichtiefe von 30 cm ermittelten Dichtewerte verwendet werden. Da hierdurch jedoch bestimmte Versuchsfelder nicht in die Auswertung einbezogen würden und die Unterschiede bei der großen Datenmenge eher nicht maßgebend sind, wird im Folgenden jeweils ein Diagramm mit

allen Bestimmungsmethoden und eines nur mit Troxler dargestellt.

In den Bildern 6-42 bis 6-66 werden jeweils die LFG und die MFG – Werte den Verdichtungsgraden  $D_{Pr}$  gegenübergestellt.

Aus den Gegenüberstellungen ist ohne Unterscheidung der Böden zunächst keine Tendenz zu erkennen.

Nach Unterscheidung in die verschiedenen Gruppierungen zeigt sich für Kiese eine brauchbare Korrelation. Auch wenn das Bestimmtheitsmaß unter  $R^2 = 0,2$  recht gering ist und somit eine erhebliche Streuung vorliegt, weisen die Diagramme eine deutliche Steigung der Regressionsgeraden aus. Bei Betrachtung nur der Messungen mit der Troxler-Sonde ist das Bestimmtheitsmaß deutlich größer (ca. 0,4), sodass eine grundsätzliche Zuordnung vom dynamischem Verformungsmodul  $E_{vd}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  für Kiese zu erwarten ist.

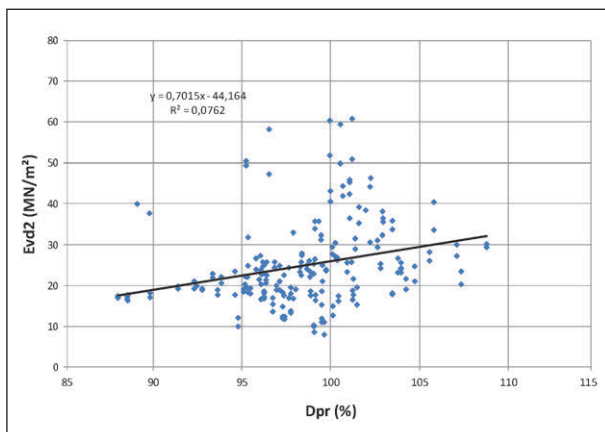


Bild 6-42:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Densitometer

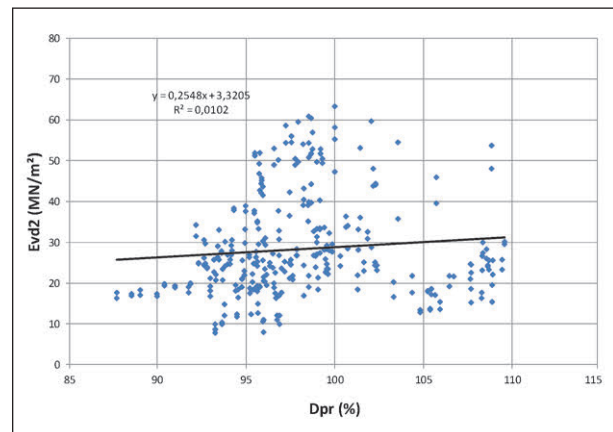


Bild 6-44:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Troxler  $t = 30$  cm

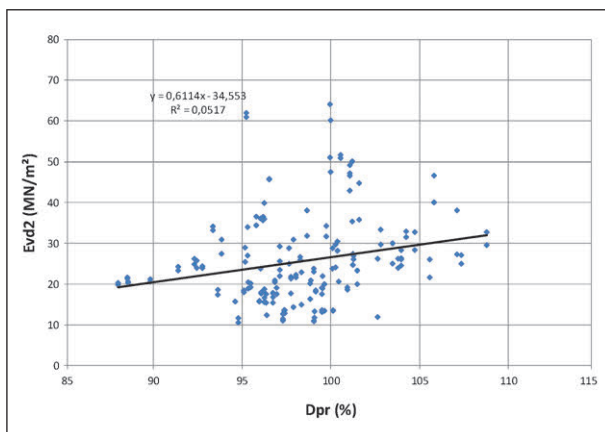


Bild 6-43:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden, Densitometer

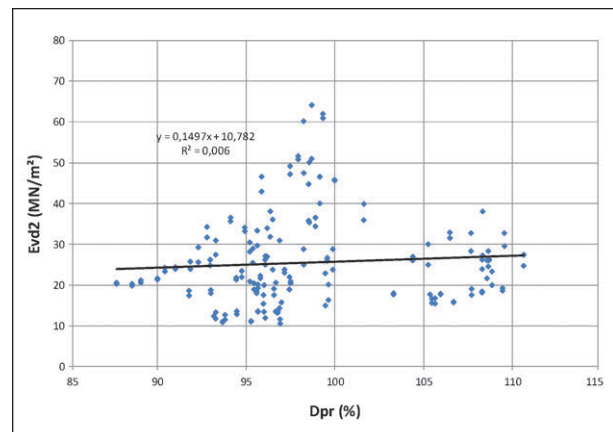


Bild 6-45:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden, Troxler  $t = 30$  cm

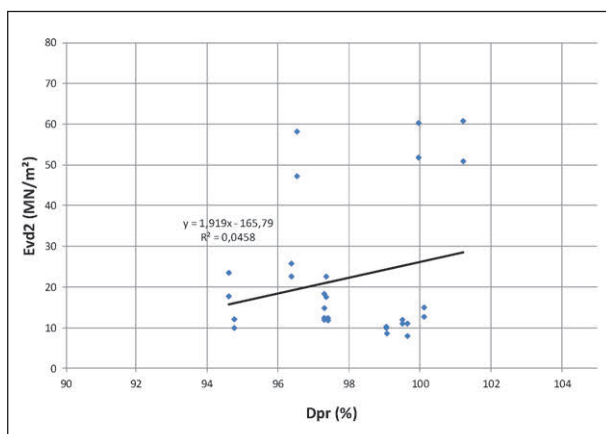


Bild 6-46:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Densitometer

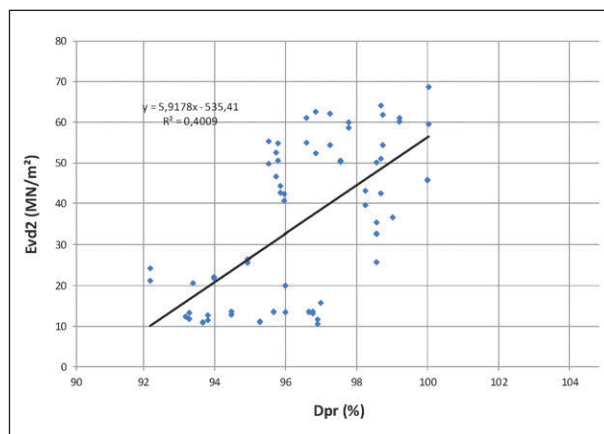


Bild 6-49:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm

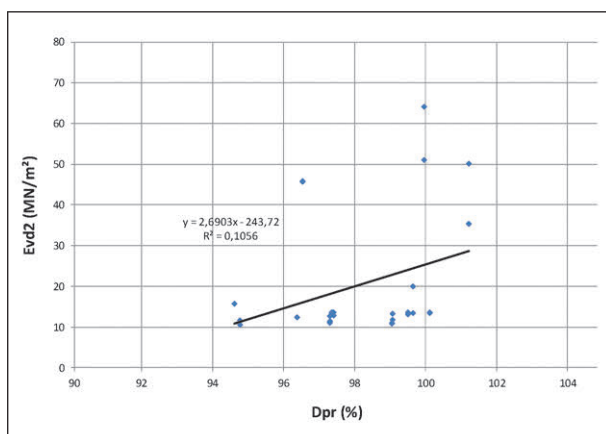


Bild 6-47:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Kiese, Densitometer

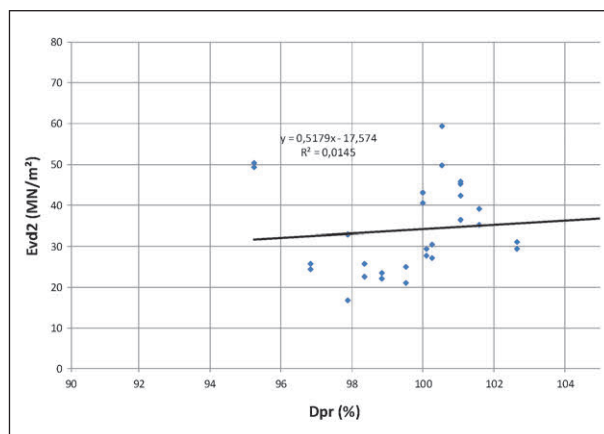


Bild 6-50:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Sande, Densitometer

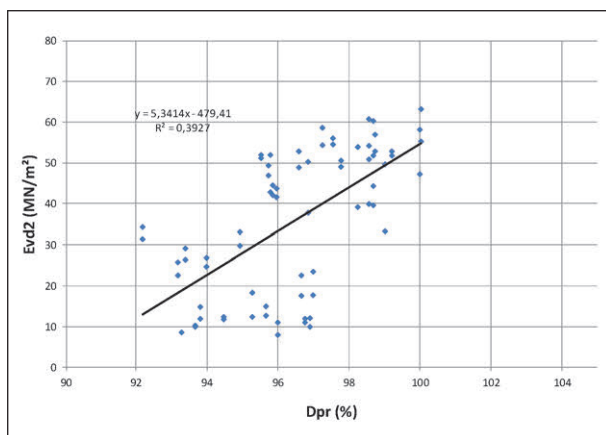


Bild 6-48:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm

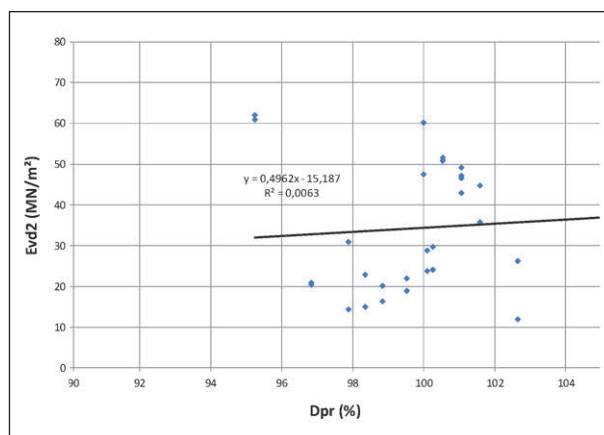


Bild 6-51:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Sande, Densitometer

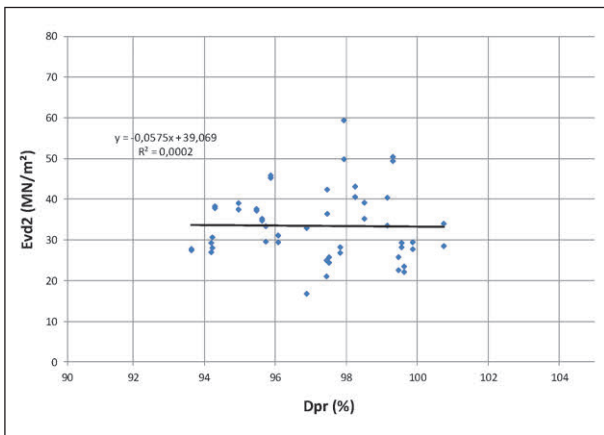


Bild 6-52:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Sande, Troxler  $t = 30$  cm

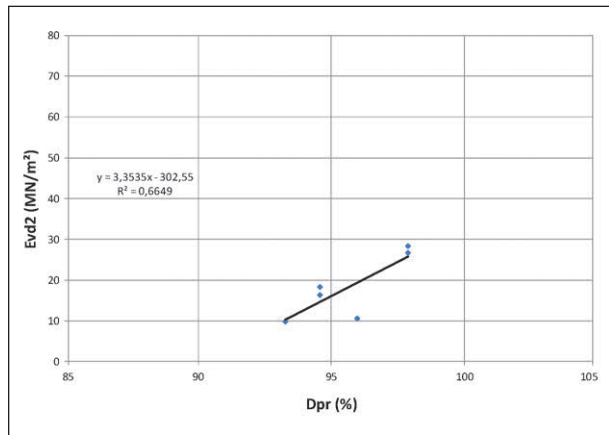


Bild 6-55:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischt-körnige Böden (Lehm, SU, GU\*), Troxler  $t = 30$  cm

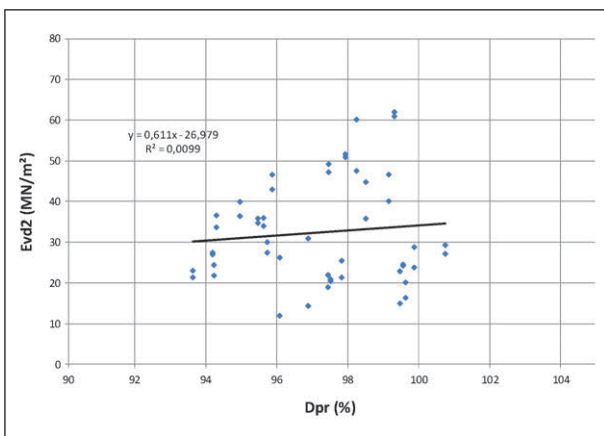


Bild 6-53:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Sande, Troxler  $t = 30$  cm

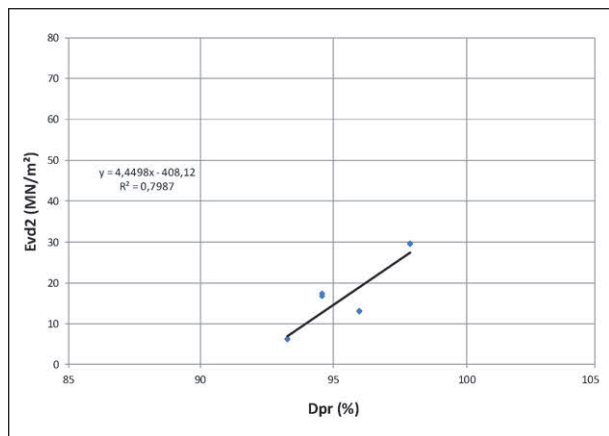


Bild 6-56:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, SU, GU\*), Troxler  $t = 30$  cm

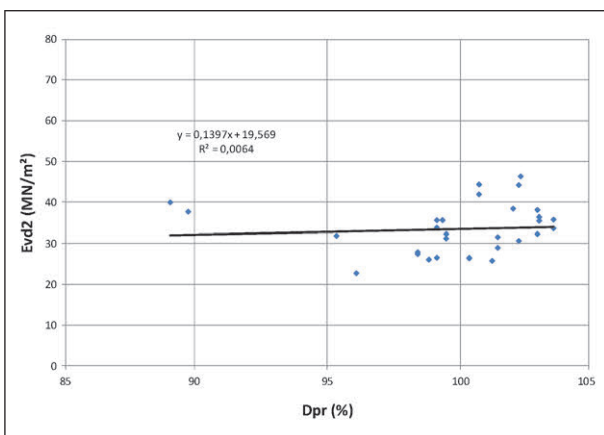


Bild 6-54:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, GU\*, SU), Densitometer

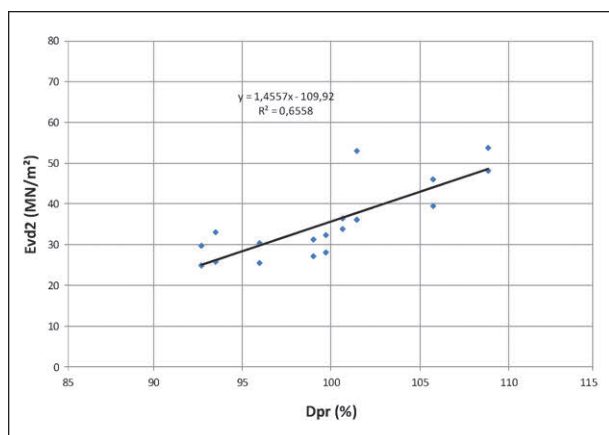


Bild 6-57:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Schotter 0/45, Troxler  $t = 30$  cm

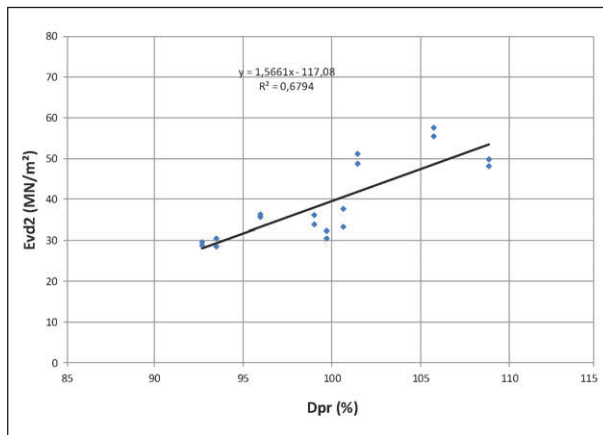


Bild 6-58: E<sub>vd2</sub> über D<sub>Pr</sub>, MFG H15 und Z15, Schotter 0/45, Troxler t = 30 cm

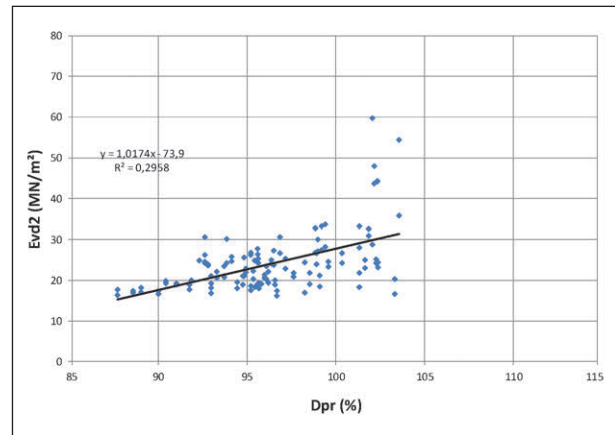


Bild 6-61: E<sub>vd2</sub> über D<sub>Pr</sub>, LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Troxler t = 30 cm

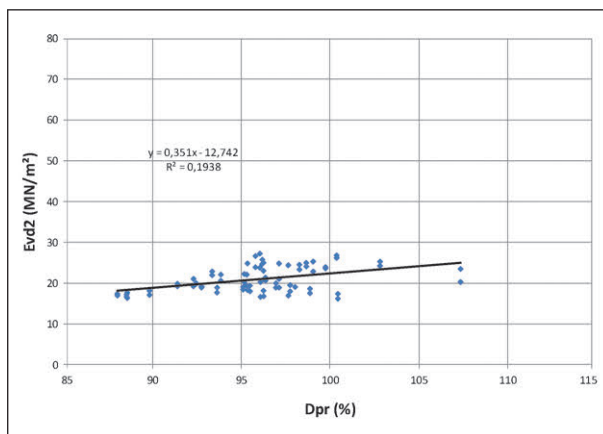


Bild 6-59: E<sub>vd2</sub> über D<sub>Pr</sub>, LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Densitometer

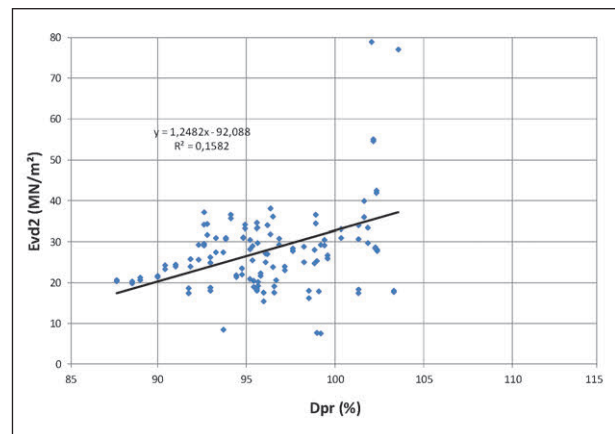


Bild 6-62: E<sub>vd2</sub> über D<sub>Pr</sub>, MFG H15 und Z15, RC-Materialien, Troxler t = 30 cm

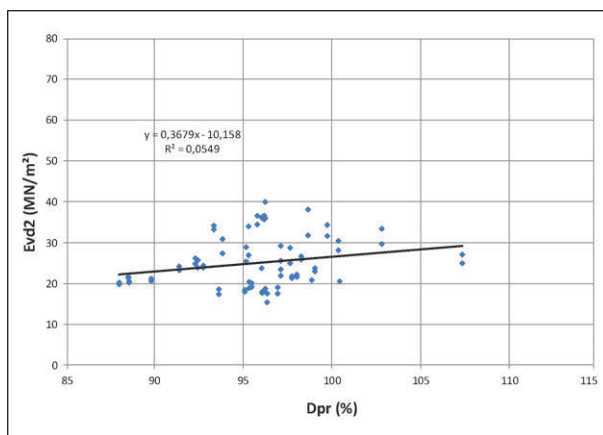


Bild 6-60: E<sub>vd2</sub> über D<sub>Pr</sub>, MFG H15 und Z15, RC-Materialien, Densitometer

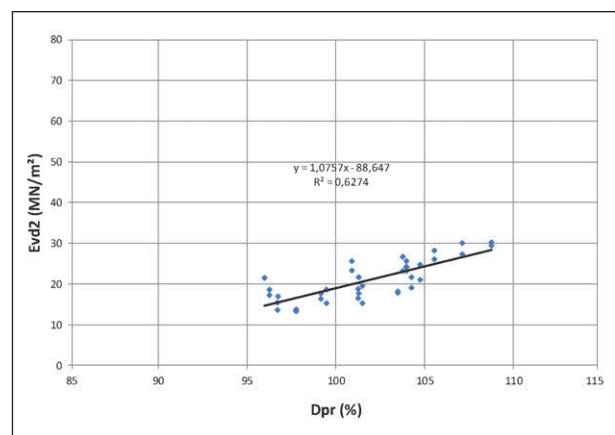


Bild 6-63: E<sub>vd2</sub> über D<sub>Pr</sub>, LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Densitometer



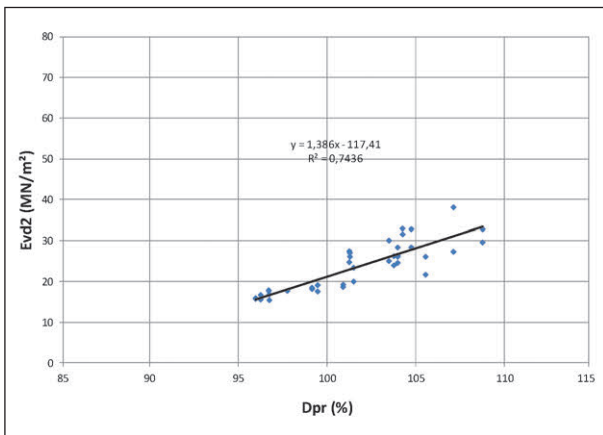


Bild 6-64:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Elektroofenschlacke, Densitometer

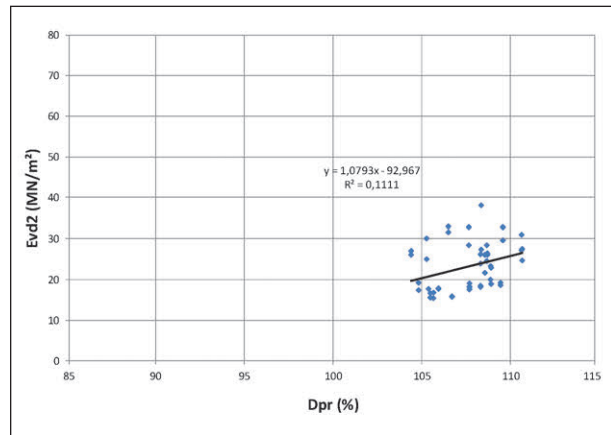


Bild 6-66:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Elektroofenschlacke, Troxler t = 30 cm

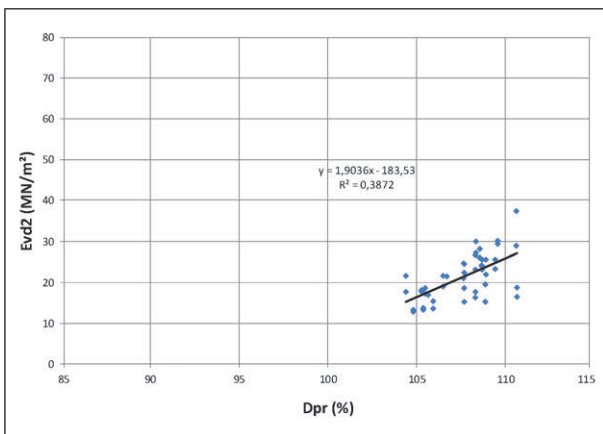


Bild 6-65:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Troxler t = 30 cm

Beim Schotter zeigen sich sogar noch größere Bestimmtheitsmaße (wenn gleich auch geringere Steigungen der Regressionsgeraden) für beide Gerätegruppen mit Werten über  $R^2 > 0,6$ , die auf eine gute Korrelation und einen guten Zusammenhang bei diesem sehr gleichmäßigen Material (Lieferkörnung) hinweisen.

Bei der Gruppe der fein- und gemischtkörnigen Böden liegt sowohl eine Steigung als auch ein hohes Bestimmtheitsmaß bei der Verwendung der Werte der Troxler-Sonde vor, jedoch ist die Datenbasis sehr eingeschränkt, sodass die Ergebnisse nicht belastbar sind. Bei Einbeziehung aller Dichtebestimmungen ist die Beziehung  $E_{vd}$  zu  $D_{pr}$  wie bei den übrigen Auswertungen deutlich schlechter.

Für die Sande sind kaum Steigungen der Regressionsgeraden zu erkennen (meist 0,5 und kleiner) bei einem ebenfalls sehr geringen Bestimmtheitsmaß.

Bei den Elektroofenschlacken (EOS) werden für die Densitometerwerte sehr gute Korrelationen erhalten, während die Bestimmtheitsmaße für die Troxler-Messungen dagegen abfallen. Für die RC-Materialien sind Zusammenhänge bei den Troxler-Messungen und den LFG vorhanden, sonst eher vernachlässigbar.

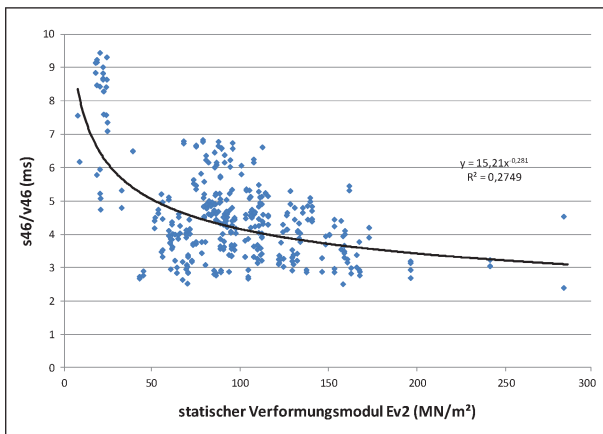
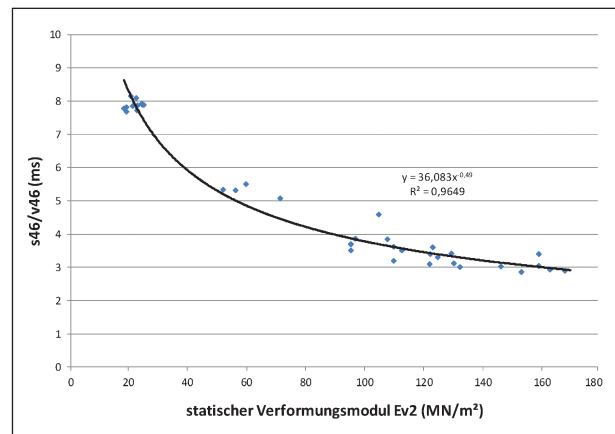
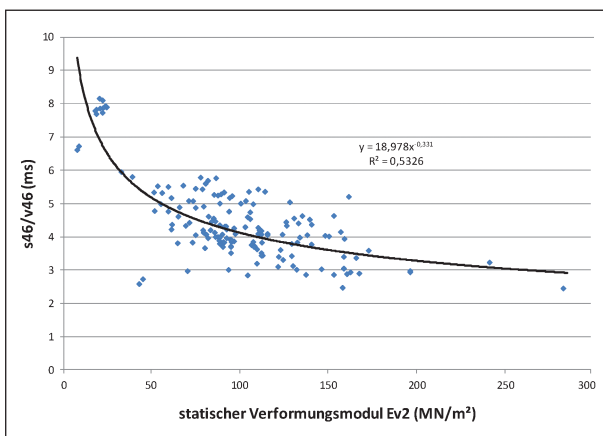
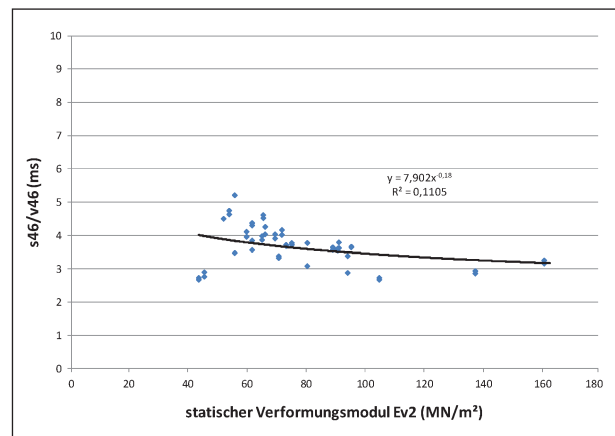
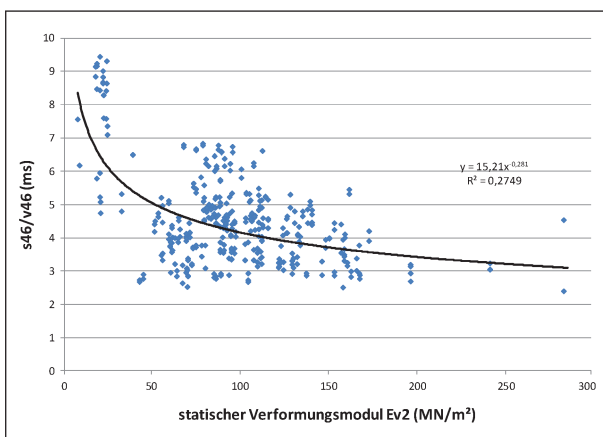
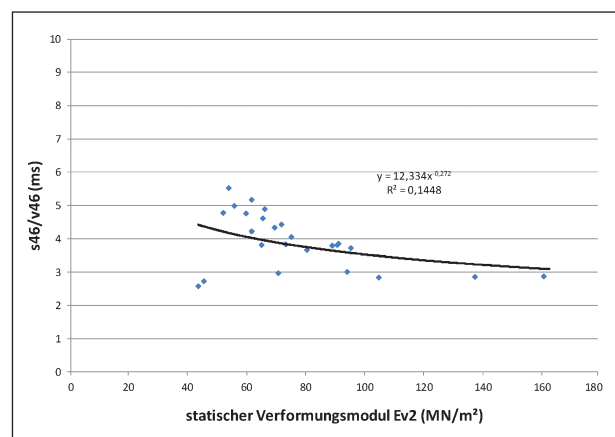
Insgesamt bedeutet dies, dass über den erdbautechnisch relevanten Bereich des Verdichtungsgrades aus dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  nur eingeschränkt und sehr materialspezifisch auf den Verdichtungsgrad geschlossen werden kann.

### 6.3.3 $s_{46}/v_{46}$ zu $E_{v2}$

Aus den Auswertungen in Kapitel 6.3.1 hat sich gezeigt, dass die Beziehungen zwischen dem  $E_{vd}$  und dem  $E_{v2}$  bodenspezifisch einen brauchbaren Zusammenhang bei Anwendung einer linearen Regression ausweisen. Insbesondere bei den untersuchten Kiesen, den Schottern und den fein- und gemischtkörnigen Böden.

In den Bildern 6-67 bis 6-82 werden die Zusammenhänge zwischen dem Setzungs-/Geschwindigkeitsverhältnis  $s_{46}/v_{46}$  und dem Verformungsmodul  $E_{v2}$  dargestellt. Als beste Anpassung hat sich eine Potenzfunktion gezeigt, die dem Abfall des  $s_{46}/v_{46}$ -Wertes bei zunehmendem Verformungsmodul am besten gerecht wird.

Die Auswertungen werden wieder für die LFG und die MFG getrennt vorgenommen, wobei bei den MFG nur das Z15 verwendet wird, da die Geschwindigkeitsanomalie beim H15 (siehe Kapitel 6.1) zu Fehlinterpretationen führen würde.

Bild 6-67:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, alle BödenBild 6-70:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, KiesBild 6-68:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, alle BödenBild 6-71:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, SandeBild 6-69:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, KiesBild 6-72:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Sande

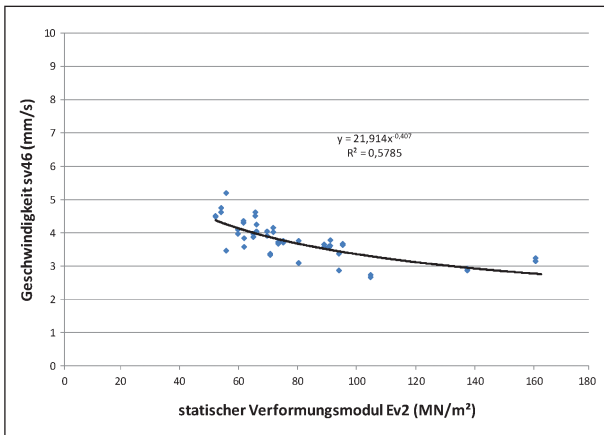


Bild 6-73:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Sande (ohne  $E_{v2}$ -Werte < 45 MN/m<sup>2</sup>)

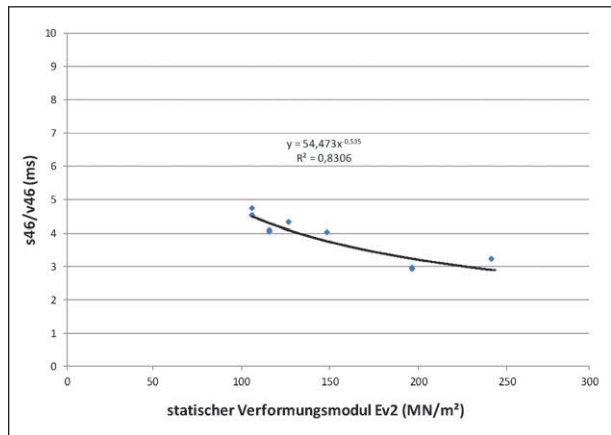


Bild 6-76:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Schotter

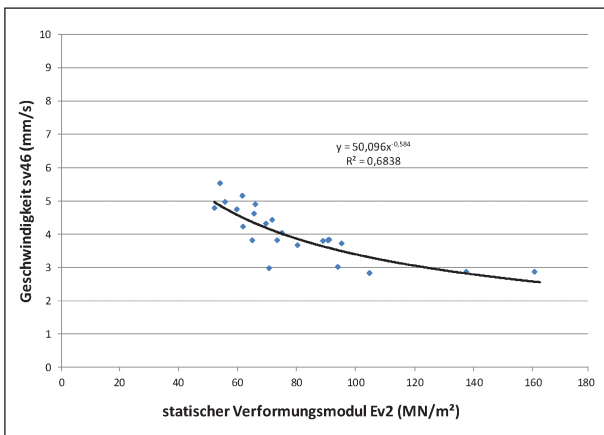


Bild 6-74:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Sande (ohne  $E_{v2}$ -Werte < 45 MN/m<sup>2</sup>)

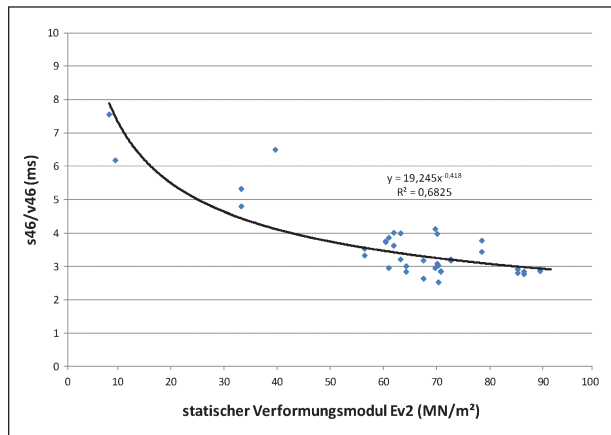


Bild 6-77:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden

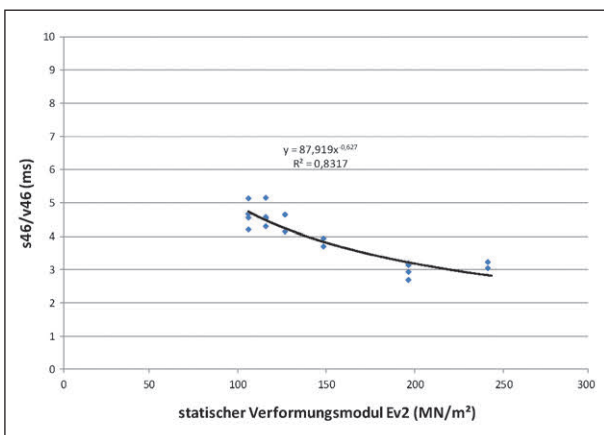


Bild 6-75:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Schotter

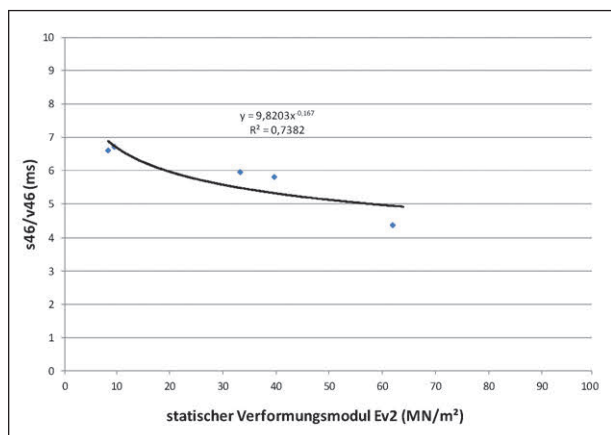


Bild 6-78:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, fein- und gemischtkörnige Böden

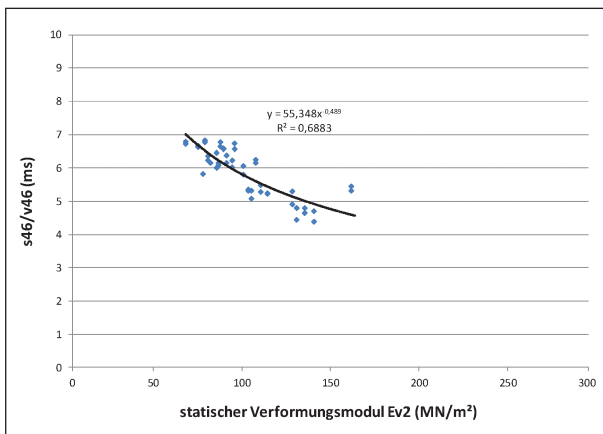


Bild 6-79:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke (EOS)

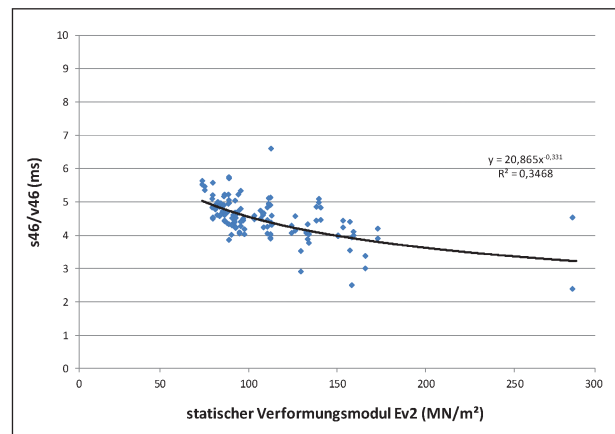


Bild 6-81:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien

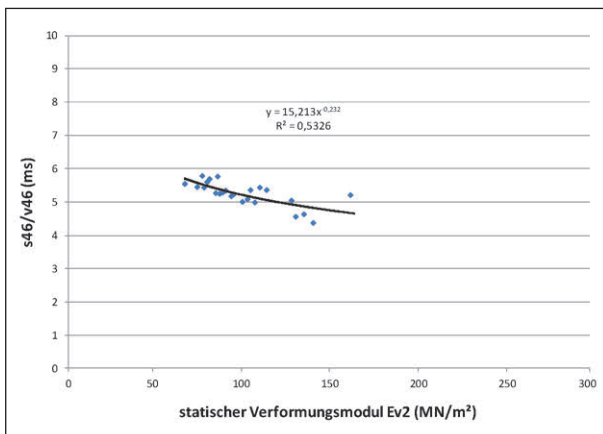


Bild 6-80:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke (EOS)

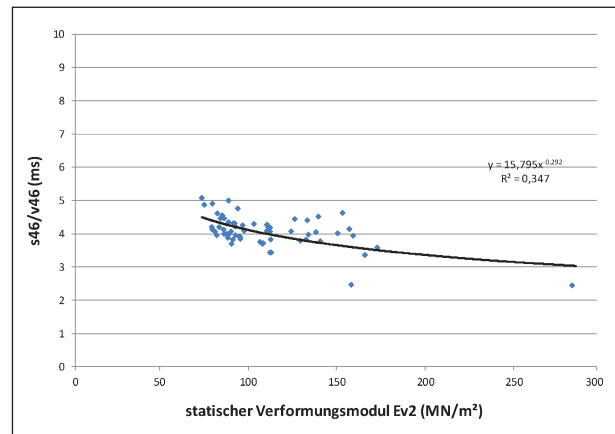


Bild 6-82:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, RC-Materialien

Auch bei diesen Auswertungen zeigt sich zunächst, dass eine Betrachtung über alle Böden nicht zielführend ist. Demgegenüber sind die Beziehungen bei Kiesen mit Bestimmtheitsmaßen  $R^2$  von ca. 0,9 und höher für LFG und MFG sehr deutlich ausgeprägt. Ähnliches gilt für die Schotter ( $R^2 \approx 0,8$ ) und die fein- und gemischtkörnigen Böden ( $R^2 \approx 0,7$ ) wobei hier eine geringere Datenbasis zugrunde liegt.

Bei den mineralischen Ersatzbaustoffen weisen die EOS-Materialien noch gute Bestimmtheitsmaße ( $R^2 > 0,5$ ) auf, während die Zusammenhänge bei den restlichen Materialien mit  $R^2 \approx 0,35$  doch eher niedrig sind.

Bei Sanden ist eine Zuordnung mit  $R^2 \approx 0,1$  bei Berücksichtigung aller Messergebnisse kaum darstell-

bar. Bei Eliminierung von Wertepaaren mit  $E_{v2} \approx 45$   $\text{MN/m}^2$  liegen jedoch auch hier die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  bei etwa 0,6 bzw. 0,7. Inwiefern hier eine Systematik für niedrige  $E_{v2}$ -Werte und eine Nichtberücksichtigung vorliegt, konnte nicht eruiert werden.

Darauf aufbauend werden in Tabelle 6-6 verschiedenen Anforderungswerten für den  $E_{v2}$ -Wert gemäß ZTV E-StB Werte für  $s_{46}/v_{46}$  aus den Regressionen (Anwendung der Regressionsgleichung) abgeleitet (z. T. deutlich extrapoliert).

Die ermittelten Werte  $s_{46}/v_{46}$  sind für die LFG und MFG meist recht ähnlich, variieren allerdings zwischen den verschiedenen Böden doch in einem Bereich z. B. von 2,8 bis 5,8 (für  $E_{v2} = 100$   $\text{MN/m}^2$ ) bei den LFG, sodass eine allgemeine Festlegung aufgrund der vorliegenden Daten schwierig erscheint.

Boden	LFG H10 und Z10					MFG Z15				
	$s_{46}/v_{46}$ bei $E_{V2}$ (MN/m <sup>2</sup> )					$s_{46}/v_{46}$ bei $E_{V2}$ (MN/m <sup>2</sup> )				
	45	80	100	120	150	45	80	100	120	150
Alle Böden	5,2	4,4	4,2	4,0	3,7	5,3	4,4	4,1	3,9	3,6
Kiese	5,4	4,1	3,7	3,4	3,0	5,6	4,2	3,8	3,5	3,1
Sande	4,0	3,6	3,4	3,3	3,2	4,4	3,7	3,5	3,4	3,2
Sande (ohne $E_{V2}$ -Werte < 45 MN/m <sup>2</sup> )	4,7	3,7	3,4	3,1	2,9	5,4	3,9	3,4	3,1	2,7
Schotter	8,1	5,6	4,9	4,4	3,8	7,1	5,2	4,6	4,2	3,7
Fein- und gemischtkörnige Böden	3,9	3,1	2,8	2,6	2,4	5,2	4,7	4,6	4,4	4,3
Elektroofenschlacke	8,6	6,5	5,8	5,3	4,8	6,3	5,5	5,2	5,0	4,8
RC-Materialien	5,9	4,9	4,5	4,3	4,0	5,2	4,4	4,1	3,9	3,7

Tab. 6-6: Setzungs-/Geschwindigkeitsverhältnis  $s_{46}/v_{46}$  für verschiedene  $E_{V2}$ -Anforderungswerte

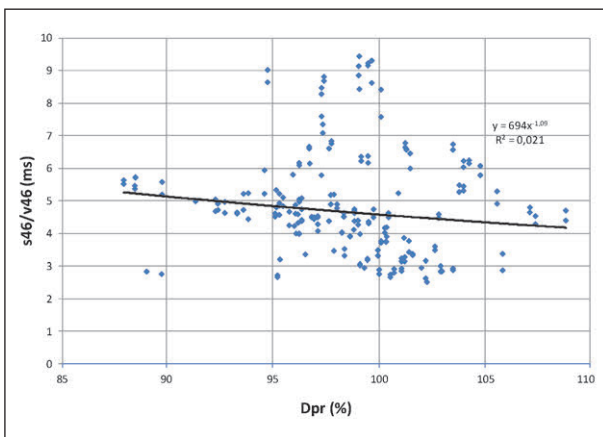


Bild 6-83:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Densitometer

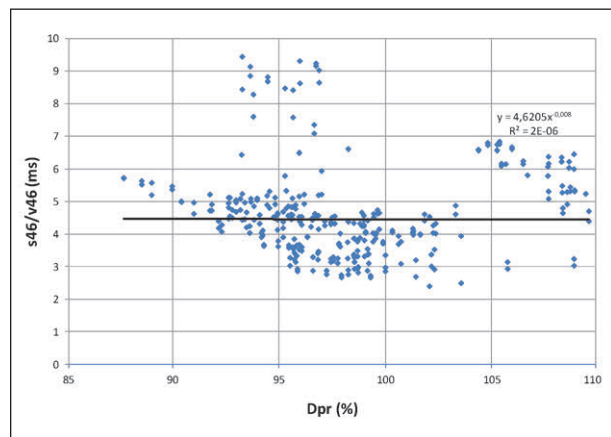


Bild 6-85:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Troxler t = 30 cm

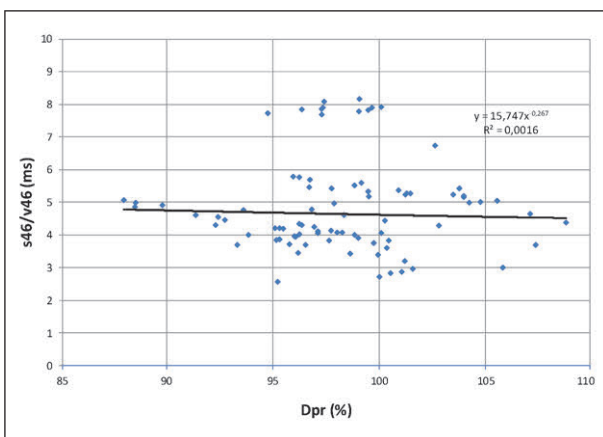


Bild 6-84:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, alle Böden, Densitometer

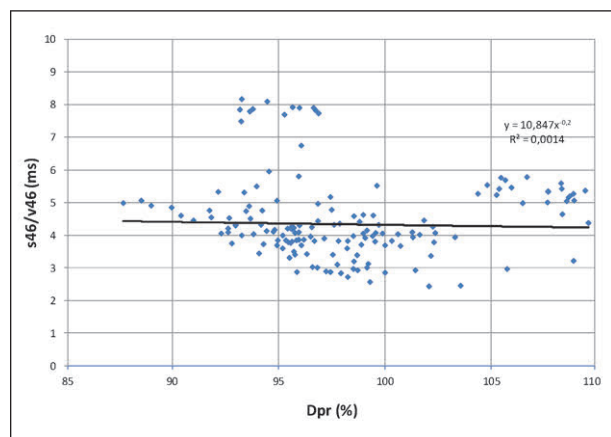


Bild 6-86:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, alle Böden, Troxler t = 30 cm

### 6.3.4 $s_{46}/v_{46}$ zu $D_{pr}$

In Anlehnung an Kapitel 6.3.2 werden in den Bildern 6-83 bis Bild 6-92 die Zusammenhänge zwischen dem Setzungs-/Geschwindigkeitsverhältnis  $s_{46}/v_{46}$  und dem Verdichtungsgrad  $D_{pr}$  dargestellt. Auch

hier wird eine Potenzfunktion zur Regressionsbetrachtung verwendet.

Die Auswertungen zeigen für alle Böden keine signifikanten Zusammenhänge, deshalb wird zunächst für Kiese und Schotter eine Auswertung vorgenommen.

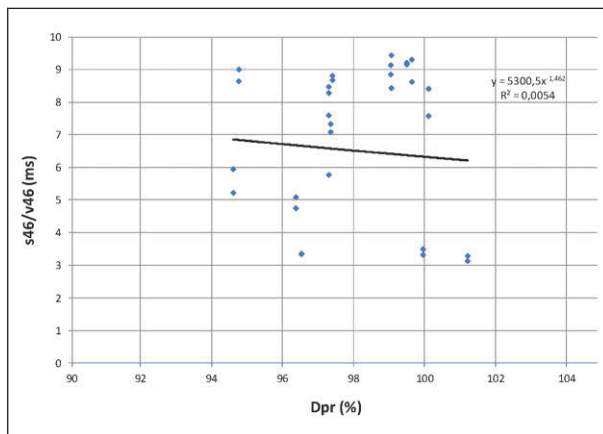


Bild 6-87:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Densitometer

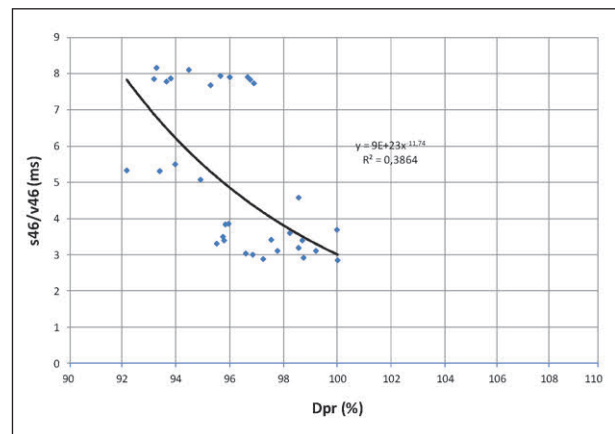


Bild 6-90:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm

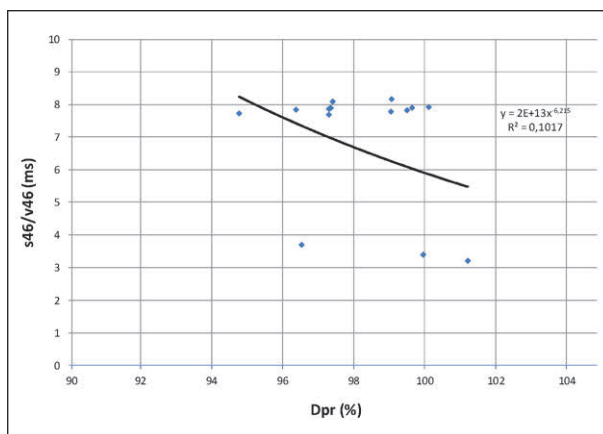


Bild 6-88:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Kiese, Densitometer

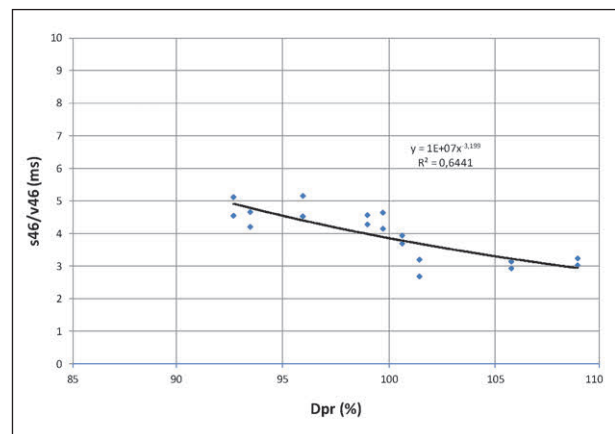


Bild 6-91:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Schotter, Troxler  $t = 30$  cm

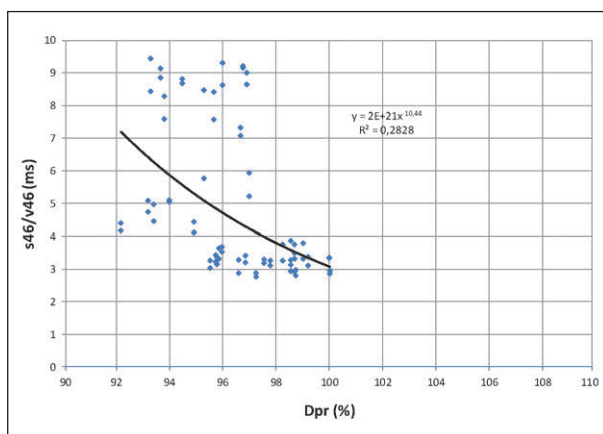


Bild 6-89:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm

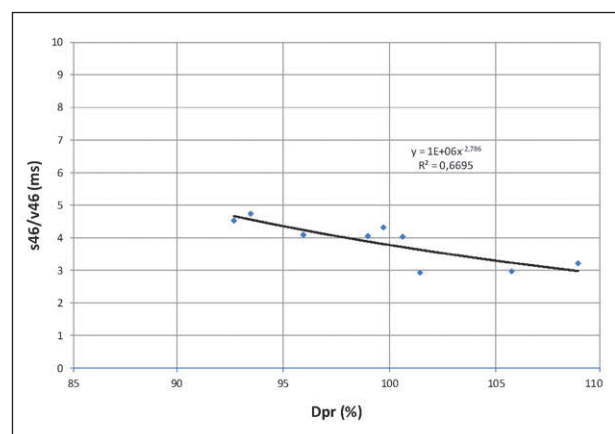


Bild 6-92:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Schotter, Troxler  $t = 30$  cm

Bei Beschränkung auf nur Kiese und nur Dichtemessungen mit der Troxlersonde werden deutlich bessere, wenn auch nicht ausreichende Bestimmtheitsmaße ausgewiesen. Auch zeigt sich bei Verdichtungsgraden von  $D_{pr} \leq 97\%$  eine erhebliche Streuung der  $s_{46}/v_{46}$ -Werte in einem Bereich von 3 bis fast 10 mm/s. Beim Schotter liegen hohe Bestimmtheitsmaße  $R^2 > 0,6$  vor, die eine gute Korrelation ausweisen, auch wenn die Steigungen der Kurven recht gering ist.

Für die Sande und fein- und gemischtkörnigen Böden sind keine signifikanten Zusammenhänge zu erkennen, sodass auf eine Darstellung verzichtet wird.

In den Bildern 6-93 bis Bild 6-100 werden die Zusammenhänge für die RC-Materialien aufgezeigt, wobei abweichend von den vorigen Diagrammen lineare Regressionen angewendet werden, da kaum Unterschiede zur Potenz-Funktion zu erkennen sind.

Bei den mineralischen Ersatzbaustoffen ist zwischen den Materialien Elektroofenschlacke EOS und RC-Materialien zu unterscheiden. Bei anderen Forschungsarbeiten hat sich gezeigt, dass bei den Troxler-Messungen offensichtlich wegen des hohen Metallgehaltes bei EOS-Materialien deutlich höhere Dichte-Werte im Vergleich zu Messungen mit dem Densitometer angezeigt werden. Wie in Bild 6-101 zu erkennen ist, beträgt der Faktor ca. 1,08, sodass die in vorstehenden EOS-Bildern dargestellten  $D_{pr}$ -Bereiche bei Troxler (ca. 105 % bis 110 %) und bei Densitometer (ca. 96 % bis 108 %) erklärbar werden.

Ansonsten zeigen die Bestimmtheitsmaße der Korrelationen ein wechselndes Bild. Sowohl sehr hohe  $R^2$ -Werte ( $> 0,8$ ) aber auch niedrige (ca. 0,25) werden ohne klaren Trend ermittelt. Die meisten Auswertungen liegen um  $R^2 \approx 0,4$  und somit in einem vertretbaren Bereich, wobei allerdings die Steigung der Regressionsgeraden meist sehr flach ist.

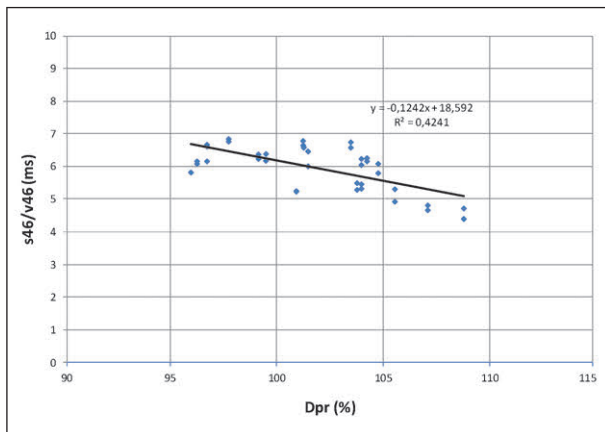


Bild 6-93:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Densitometer

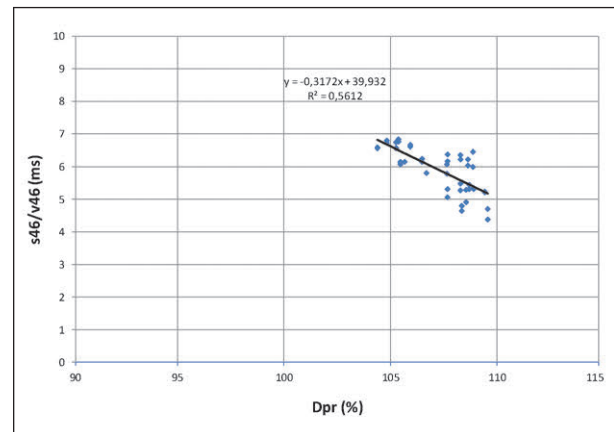


Bild 6-95:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Troxler  $t = 30$  cm

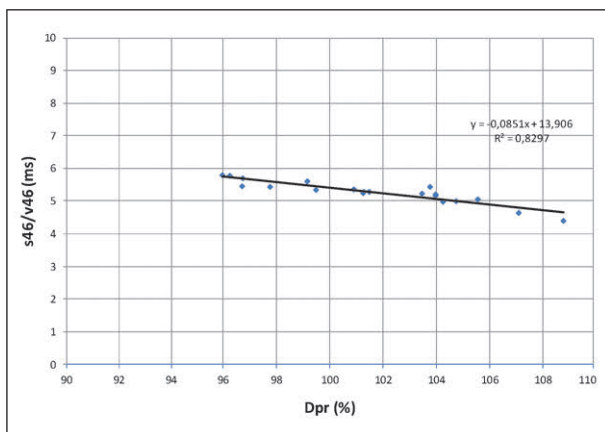


Bild 6-94:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke, Densitometer

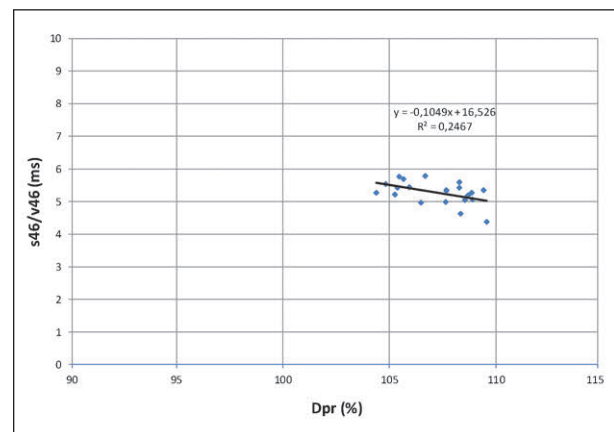


Bild 6-96:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke, Troxler  $t = 30$  cm

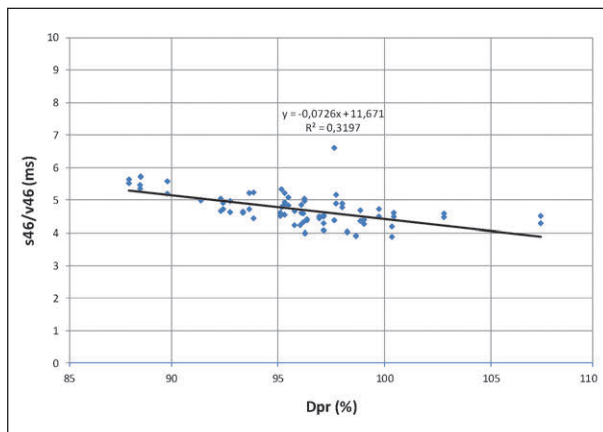


Bild 6-97:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Densitometer

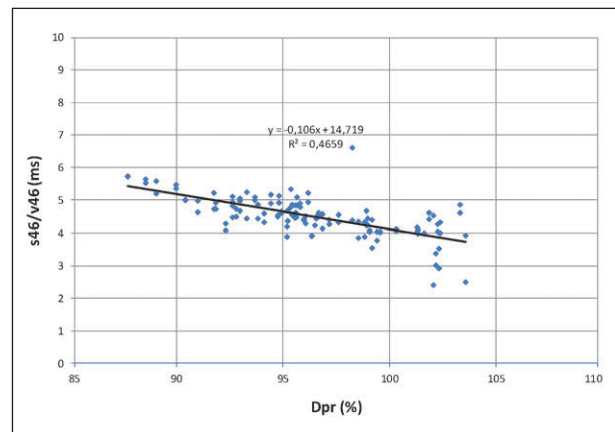


Bild 6-99:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Troxler  $t = 30$  cm

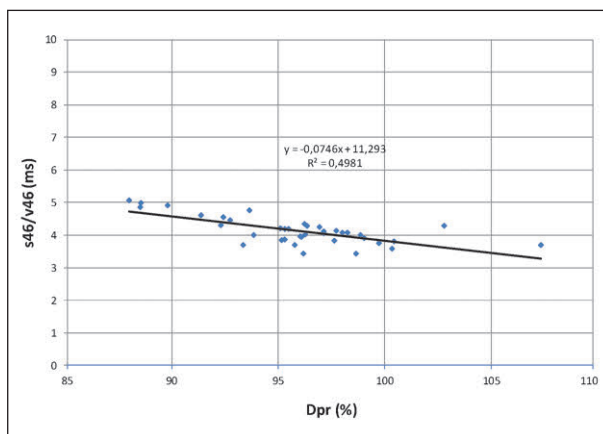


Bild 6-98:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, RC-Materialien, Densitometer

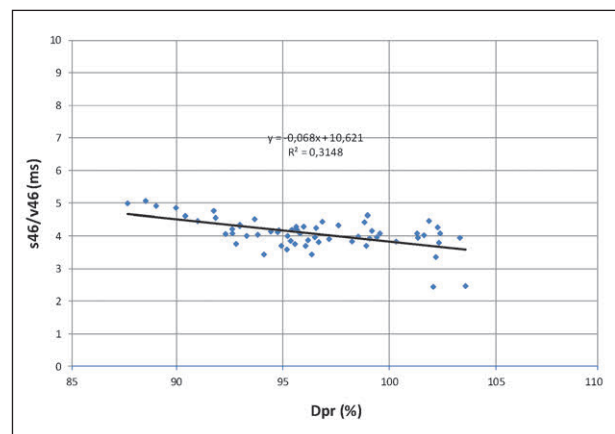


Bild 6-100:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, RC-Materialien, Troxler  $t = 30$  cm

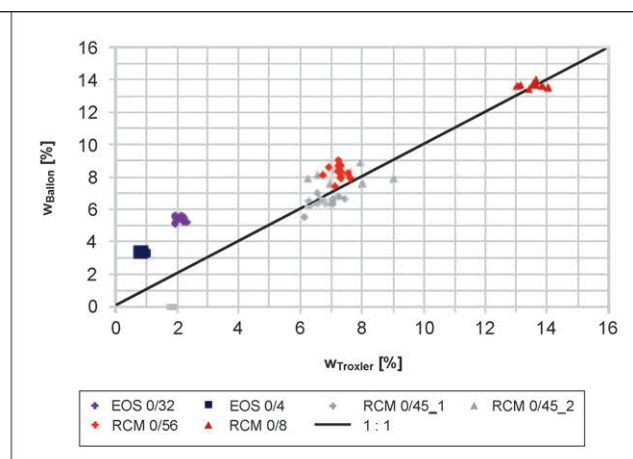
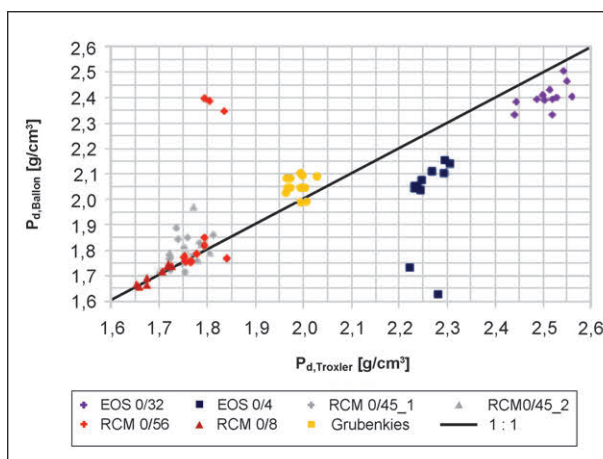


Bild 6-101: Unterschiede Dichtemessungen Troxler/Densitometer bei mineralischen Ersatzbaustoffen



### 6.3.5 Zusammenfassung

Hinsichtlich der Tragfähigkeit kann vom dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd2}$  – wie in der ZTV E-StB auch umgesetzt – im Allgemeinen brauchbar auf den statischen  $E_{v2}$ -Wert mit dem allgemein angewandten Faktor „2“ geschlossen werden. Bei Differenzierung der Böden werden deutlich bessere bis sehr gute Bestimmtheitsmaße erhalten, allerdings mit deutlich unterschiedlichen, bodenabhängigen Faktoren zwischen  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ .

Auch für den Verhältniswert  $s_{46}/v_{46}$  wird eine brauchbare Zuordnung zum statischen Verformungsmodul  $E_{v2}$  erhalten, wobei für die Erreichung von  $E_{v2} = 100 \text{ MN/m}^2$  ein wohl in der Praxis schon vielfach angewandter Wert von  $s_{46}/v_{46} = 4$ , über alle Böden betrachtet, erforderlich erscheint. Auch hier wäre allerdings eine bodenspezifische Betrachtung anzuraten.

Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn durch Anwendung des  $s_{46}/v_{46}$ -Wertes gegenüber dem  $E_{vd2}$ -Wert ist aus diesen Ergebnissen nicht zu erkennen.

Hinsichtlich der Verdichtung ist die Zuordnung der dynamischen Kennwerte zum Verdichtungsgrad  $D_{pr}$  eher sehr eingeschränkt zu verwenden. Im Allgemeinen liegen sehr große Streuungen vor und nur bei einzelnen Böden sind gezieltere Aussagen möglich.

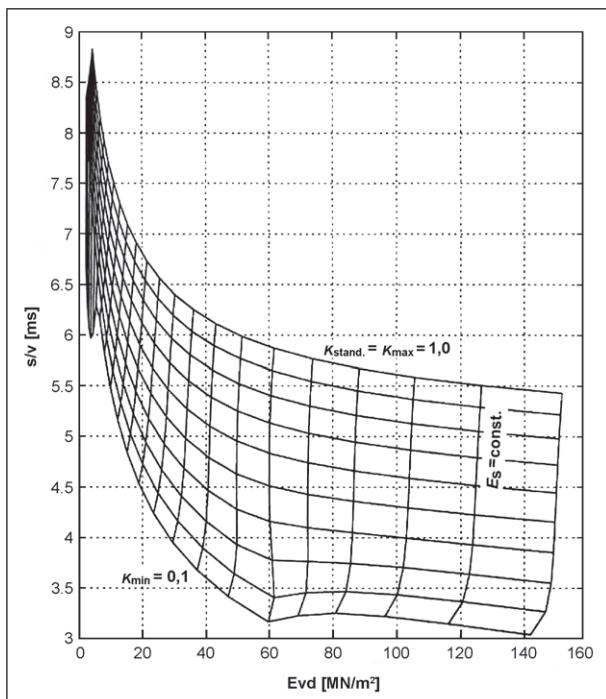


Bild 6-102: Beschleunigungszeit  $s/v$  in Abhängigkeit vom Verformungsmodul  $E_{vd}$  und dem Dämpfungsbeiwert  $K$  des Bodens (Abb. II. 74 aus ADAM)

### 6.4 Dynamischer Verhältniswert $s_{46}/v_{46}$ bezogen auf absoluten dynamischen Kennwert $E_{vd2}$

Während in den vorigen Kapiteln jeweils dynamische Kennwerte über absoluten statischen Kennwerten betrachtet wurden, wird hier der dynamische Verhältniswert  $s_{46}/v_{46}$  in Zusammenschau mit dem  $E_{vd2}$ -Wert betrachtet. Ähnliche Darstellungen finden sich in BRANDL, ADAM et al. (2003) als Ergebnis von Computersimulationen (siehe Bild 6-102).

Der Verhältniswert  $s/v$  nimmt deutlich, vermutlich logarithmisch deutlich mit zunehmendem  $E_{vd}$ -Wert ab. Aus den Simulationen wird hier noch nach Dämpfungsbeiwerten  $K$  unterschieden, die in den hier berichteten Versuchen nicht bestimmt wurde, sich aber aus den verwendeten Böden unterschiedlich darstellen.

In den Bildern 6-103 bis 6-117 werden die beiden Werte für die verschiedenen dynamischen Fallgewichtegeräte und Böden unterschieden aufgezeigt. Bei den MFG wird weiterhin nur das Z15 betrachtet (siehe auch Kapitel 6.2).

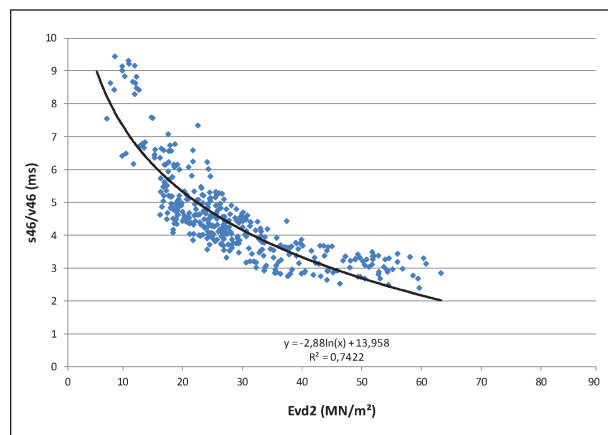


Bild 6-103:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden

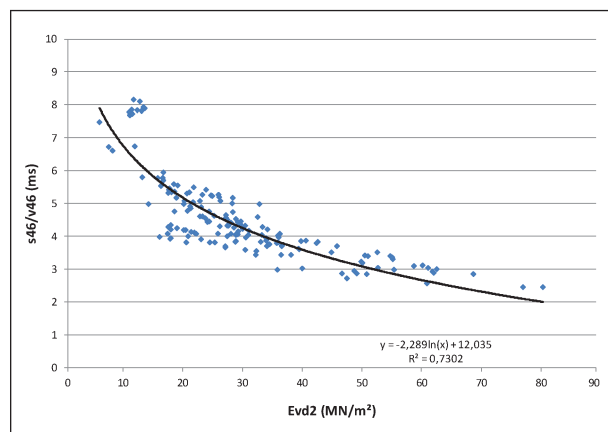
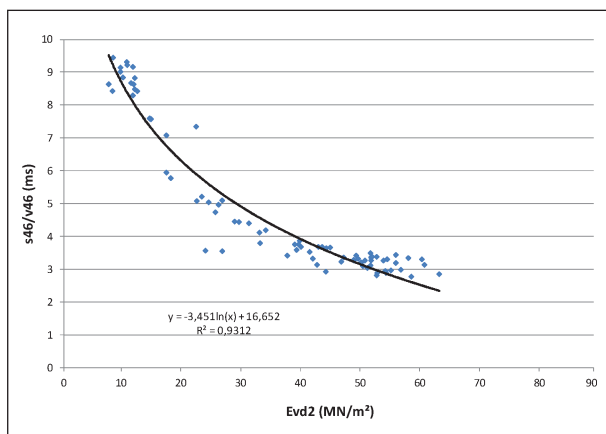
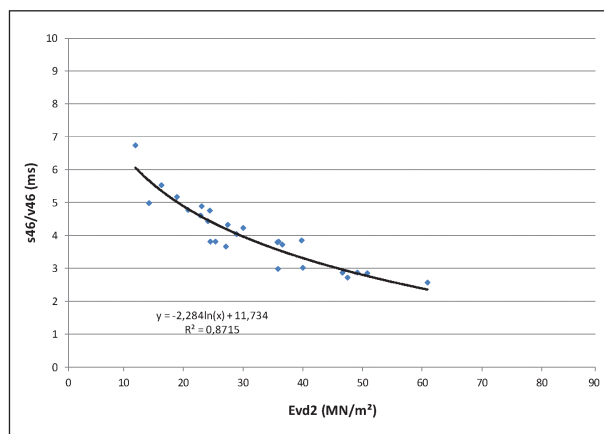
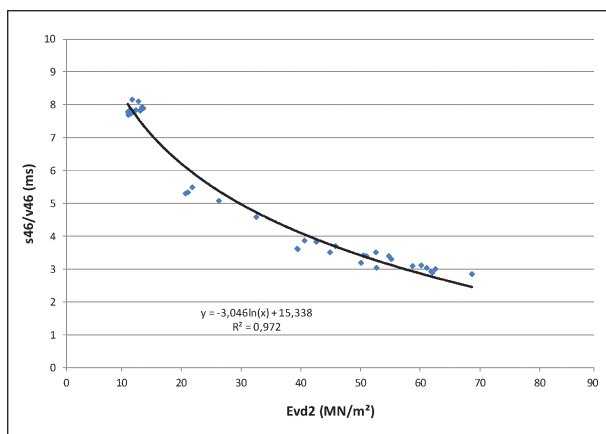
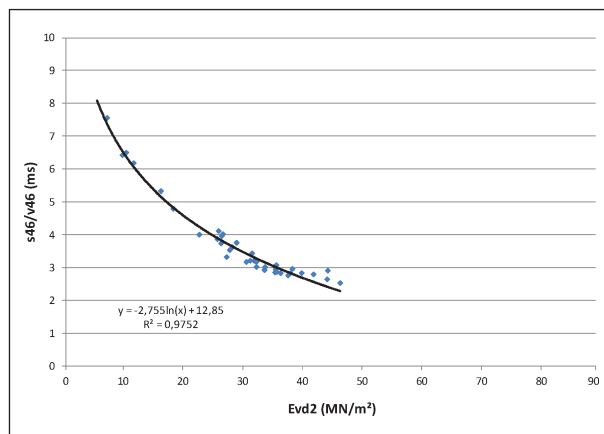
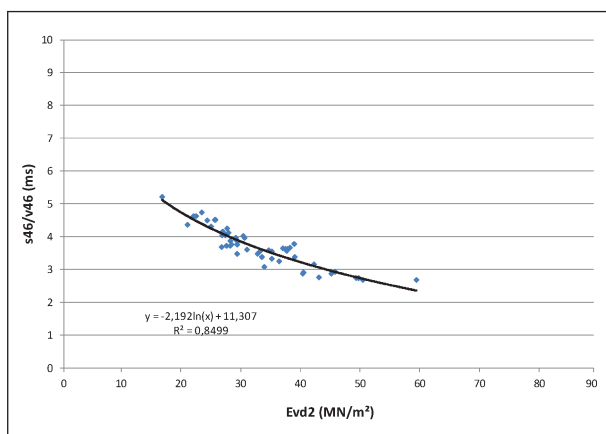
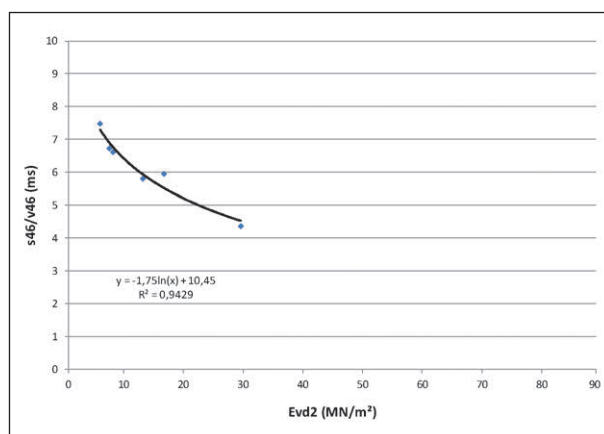


Bild 6-104:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, alle Böden

Bild 6-105:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, KieseBild 6-108:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, SandeBild 6-106:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, KieseBild 6-109:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige BödenBild 6-107:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, SandeBild 6-110:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, fein- und gemischtkörnige Böden

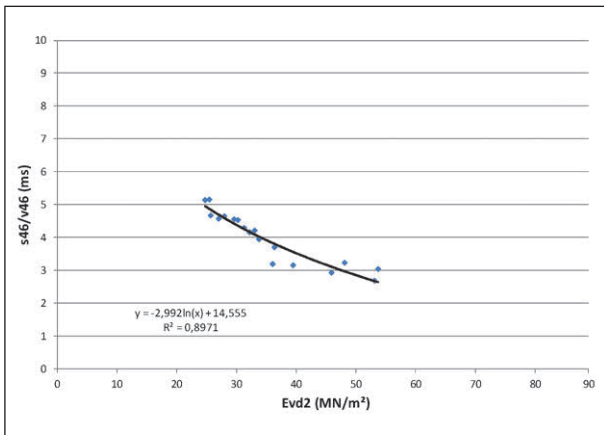


Bild 6-111:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Schotter 0/45

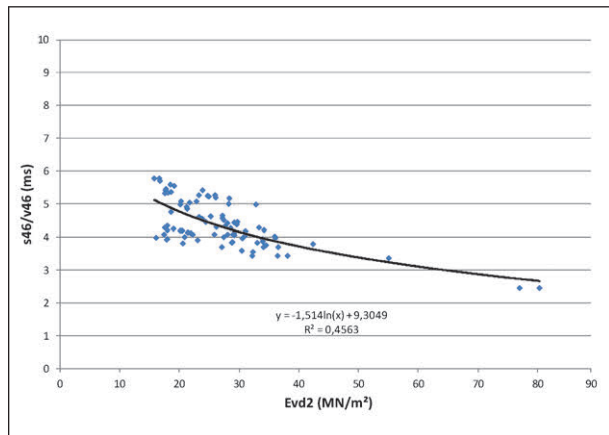


Bild 6-114:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Mineralische Ersatzbaustoffe

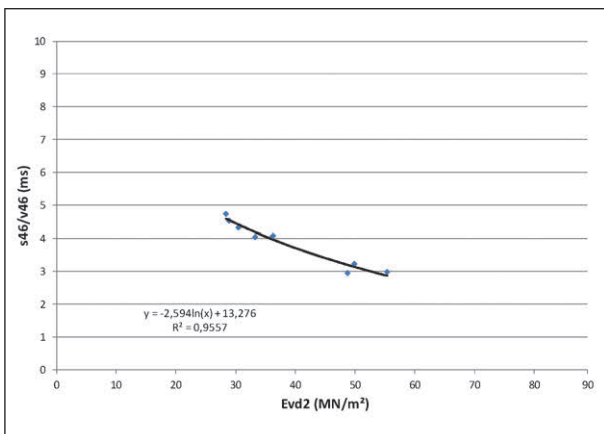


Bild 6-112:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Schotter 0/45

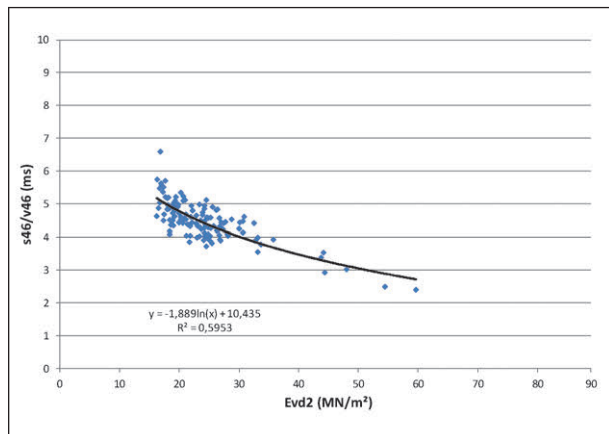


Bild 6-115:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien

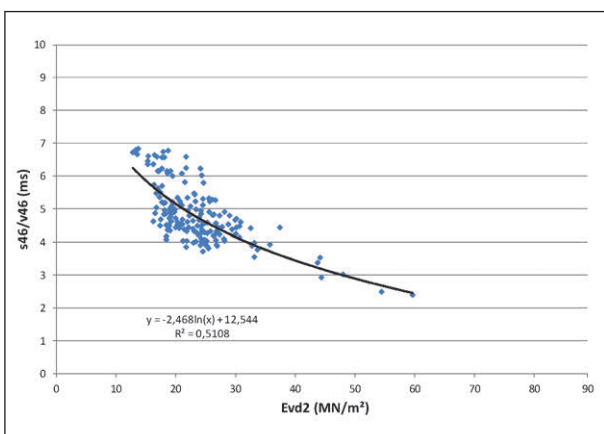


Bild 6-113:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Mineralische Ersatzbaustoffe

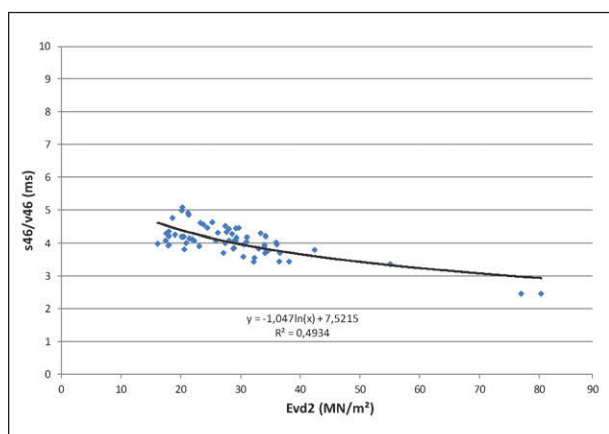


Bild 6-116:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, RC-Materialien

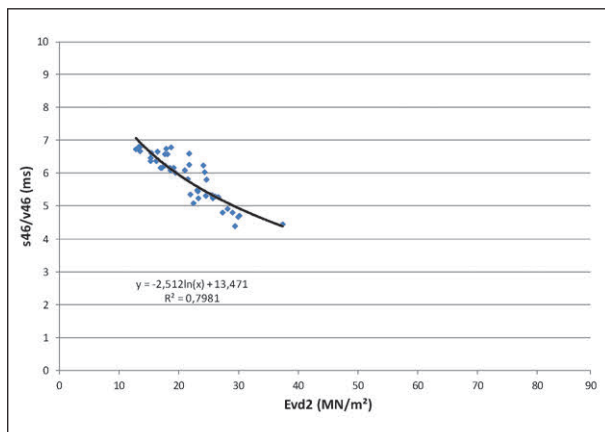


Bild 6-117:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke

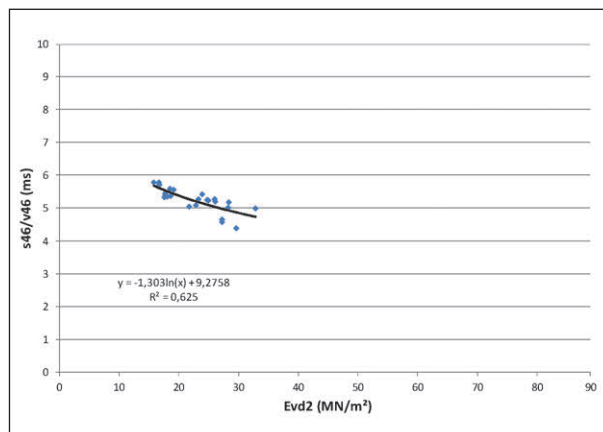


Bild 6-118:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke

Auch bei den hier berichteten Versuchen nimmt der  $s_{46}/v_{46}$ -Wert deutlich mit ansteigendem  $E_{vd2}$ -Wert ab. Es wurde eine logarithmische Regression verwendet, die allerdings die Annäherung an eine horizontale Asymptote bei  $s_{46}/v_{46} \approx 3$  nicht deutlich wiedergibt. Bei Vergleich mit Bild 6-102 ist diese „untere Grenze“ auch dargestellt. Die Versuchsergebnisse bewegen sich bei Betrachtung der Bild 6-103 (LFG H10 und Z10, alle Böden) am unteren Rand des in Bild 6-102 dargestellten Bereiches, also etwa bei  $K = 0,1$ . Die Simulation und die Versuchsergebnisse passen tendenziell gut zusammen. Die Unterscheidung in die verschiedenen Böden ergibt hier nur eine geringe Aussagekraft (ca.  $K$  zwischen  $< 0,1$  und  $0,3$ ). Einzig für EOS-Materialien liegt die Kurve aus den Versuchsergebnissen deutlich höher bei ca.  $K = 0,5$ .

Es erscheint in eingeschränktem Maße möglich, mit der gewählten Auftragung eine Unterscheidung nach Bodenart erreichen zu können. Bei Unterscheidung nach Bodenart könnte sich somit eine direkte Zuordnung zwischen  $s_{46}/v_{46}$  und  $E_{vd2}$  ergeben. Eine zusätzliche, von  $E_{vd2}$  unabhängige Anforderung an eine Verdichtungsleistung ist jedoch nicht möglich. Dies ist in Analogie zu den Aussagen in Kapitel 6.3.5 zu sehen.

## 6.5 Dynamische Verhältniswerte bezogen auf statischen Verhältniswert

### 6.5.1 $s_{46}/v_{46}$ zu $E_{v2}/E_{v1}$

Während in Kapitel 6.3 dynamische Kenngrößen aus dem Fallgewichtsgerät den herkömmlichen Tragfähigkeits- und Verdichtungskenngrößen als Absolutgrößen gegenübergestellt wurden, werden

in diesem Kapitel Verhältniswerte gegeneinander aufgetragen. Während die Absolutgrößen normalerweise als Abnahmewerte für eine tatsächlich zu erreichende Tragfähigkeit oder Verdichtung (z. B. für vertragliche Belange) verwendet werden, sind die Verhältniswerte eher ein Maß für eine noch mögliche Steigerung oder eine Hilfe zur Beurteilung des bislang betriebenen Aufwandes bei der Verdichtung. So deutet ein hoher Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  darauf hin, dass durch die Zweitbelastung im Versuch noch eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit erreicht werden konnte, die offensichtlich durch die Verdichtung im Felde (angezeigt durch den  $E_{v1}$ -Wert) noch nicht hinreichend erreicht wurde. So gibt die ZTV E-StB Anhaltswerte für das Verhältnis vor, um u. a. nachträglichen Setzungen vorzubeugen. Der Versuch, die historische Entstehung dieser Werte und deren baupraktischen Hintergrund bzw. Datenbasis zu ergründen, ist leider gescheitert. Weder in der Literatur noch bei beteiligten Personen konnten Auskünfte hierzu erlangt werden.

In gleichem Sinne wie der  $E_{v2}/E_{v1}$ -Wert wird der  $s/v$ -Wert aus dem dynamischen Plattendruckversuch in der Praxis diskutiert.

In den Bildern 6-119 bis 6-132 werden die beiden Werte für die verschiedenen dynamischen Fallgewichtsgeräte und Böden unterschieden aufgezeigt. Bei den MFG wird weiterhin nur das Z15 betrachtet (siehe auch Kapitel 6.2).

Bei Kies, Schotter und EOS scheinen die Zusammenhänge eine brauchbare Korrelation mit Bestimmtheitsmaßen  $R^2 \geq 0,4$ , wenn auch bei sehr unterschiedlich großer Datenbasis, zu ergeben. Für Sande, fein- und gemischtkörnige Böden sowie RC-Materialien liegen bei Bestimmtheitsmaßen  $R^2 < 0,07$  keine belastbaren Zusammenhänge vor.

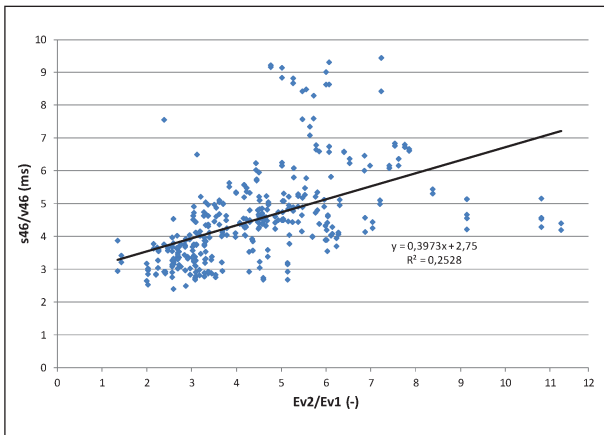


Bild 6-119:  $s_{46}/v_{46}$  über  $Ev_2/Ev_1$ , LFG H10 und Z10, alle Böden

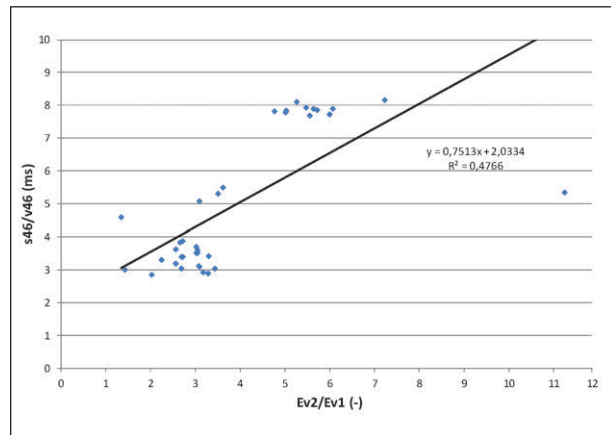


Bild 6-122:  $s_{46}/v_{46}$  über  $Ev_2/Ev_1$ , MFG Z15, Kiese

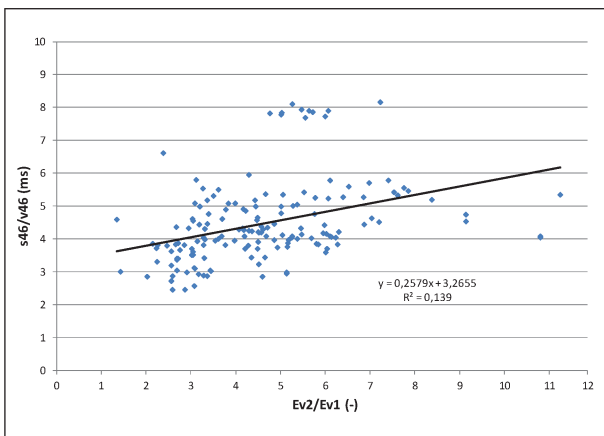


Bild 6-120:  $s_{46}/v_{46}$  über  $Ev_2/Ev_1$ , MFG Z15, alle Böden

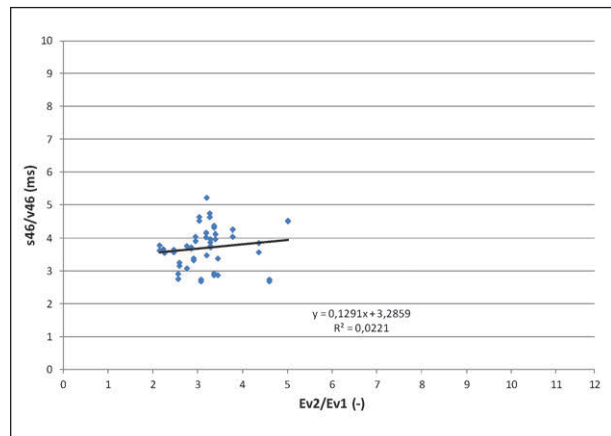


Bild 6-123:  $s_{46}/v_{46}$  über  $Ev_2/Ev_1$ , LFG H10 und Z10, Sande

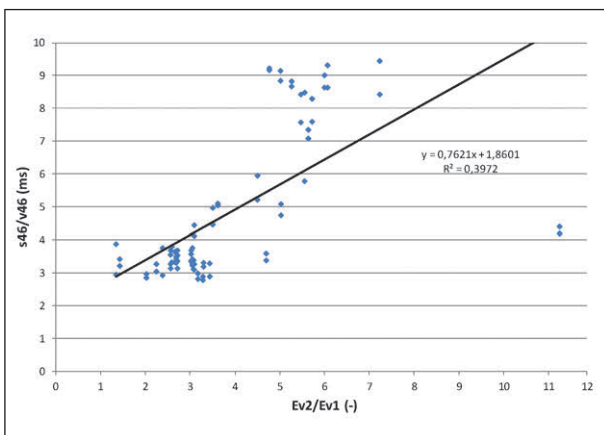


Bild 6-121:  $s_{46}/v_{46}$  über  $Ev_2/Ev_1$ , LFG H10 und Z10, Kiese

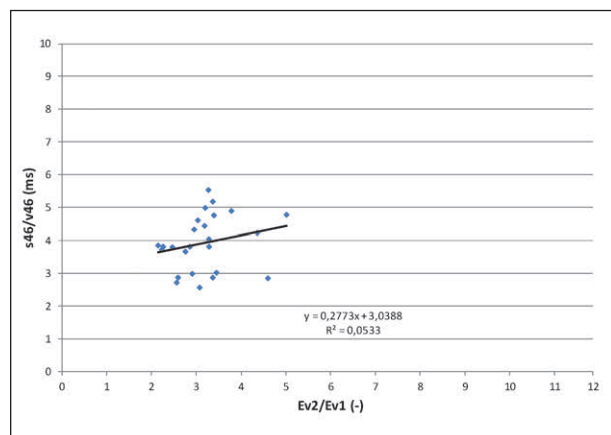
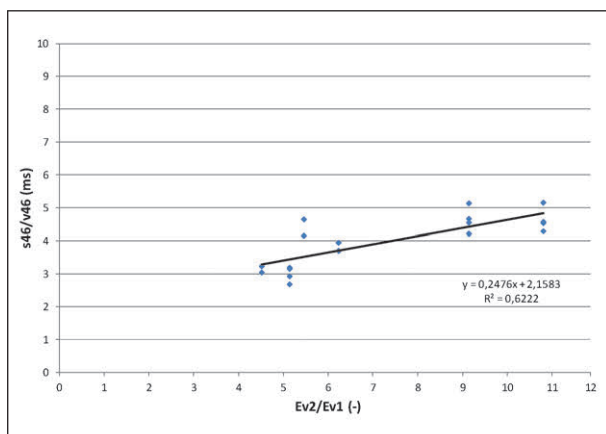
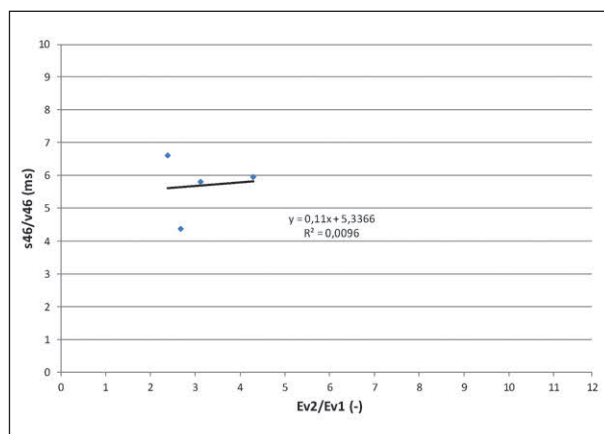
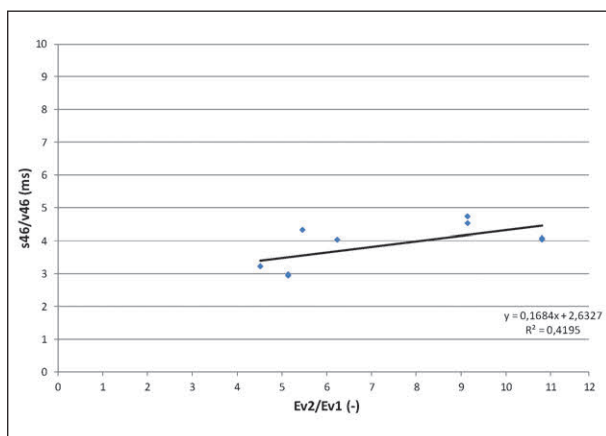
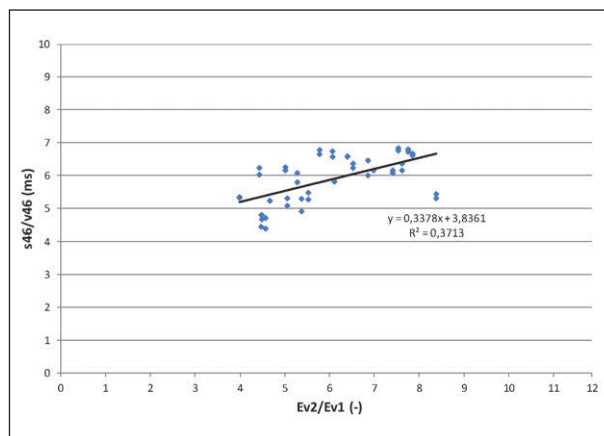
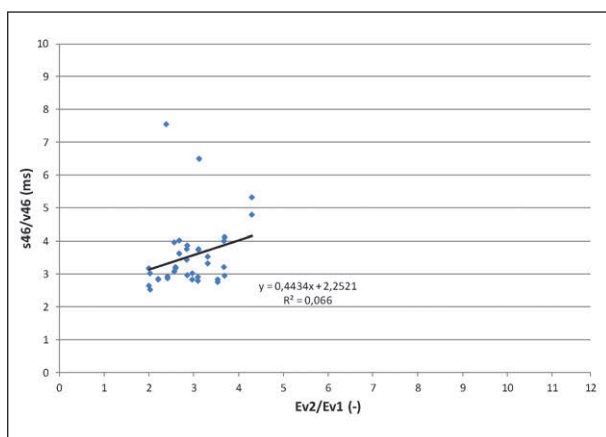
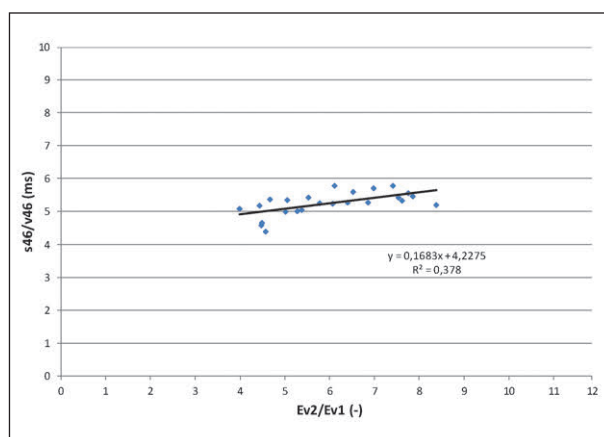


Bild 6-124:  $s_{46}/v_{46}$  über  $Ev_2/Ev_1$ , MFG Z15, Sande

Bild 6-125:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, SchotterBild 6-128:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, fein- und gemischt-körnige BödenBild 6-126:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, SchotterBild 6-129:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, ElektrofenschlackeBild 6-127:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischt-körnige BödenBild 6-130:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, Elektrofenschlacke

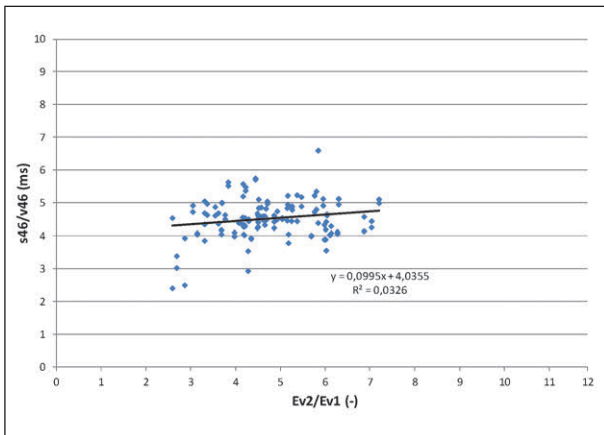


Bild 6-131:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien

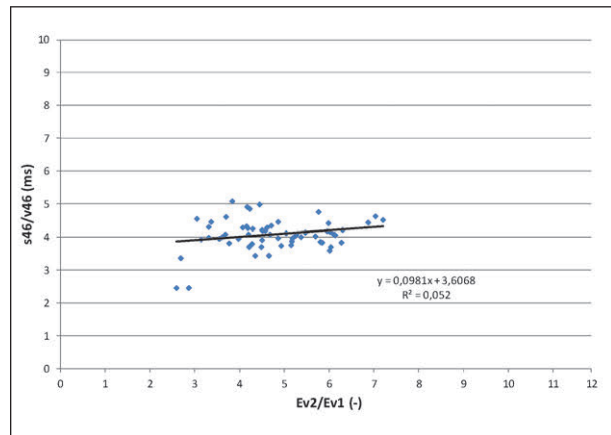


Bild 6-132:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, RC-Materialien

Boden	LFG H10 und Z10	MFG Z15
	$E_{v2}/E_{v1} = 2,5$	$E_{v2}/E_{v1} = 2,5$
Alle Böden	3,5 – 4	4
Kiese	3,5	4
Sande	(3,5)	(4)
Fein- und gemischt-körnige Böden	(3,5)	(5,5)
Schotter 0/45	3	3
RC-Materialien	(4,5)	(4)
Elektroofenschlacke	5	4,5

Tab. 6-7: Setzungs-/Geschwindigkeitsverhältnis  $s_{46}/v_{46}$  für Anforderungswert  $E_{v2}/E_{v1} = 2,5 \text{ MN/m}^2$

Für den aus der ZTV E-StB bekannten Anhaltswert  $E_{v2}/E_{v1} = 2,5$  ergeben sich aus den Bildern (6-119 bis Bild 6-132) folgende  $s/v$ -Werte durch Ablesen bzw. extrapolierte Abschätzung (siehe Tabelle 6-7).

### 6.5.2 $E_{VDy}/E_{VDx}$ zu $E_{v2}/E_{v1}$

Aus den vorigen Auftragungen des  $s_{46}/v_{46}$  über dem  $E_{v2}/E_{v1}$ -Verhältnis hat sich gezeigt, dass nur brauchbare Korrelationen bei grobkörnigen Böden zu erwarten sind. Deshalb beschränkt sich dieses Kapitel auf die Darstellung der Auswertung für Kies.

Ähnlich wie das Verhältnis  $E_{v2}/E_{v1}$  kann auch das Verhältnis der nacheinander an einer Stelle ermittelten  $E_{VD}$ -Werte als Erst-, Wieder- bzw. Mehrfachwiederbelastung interpretiert werden.

Im Folgenden werden die verschiedenen aufeinanderfolgenden  $E_{VD}$ -Werte ins Verhältnis gesetzt. Hierbei wird der  $E_{vd1}$  aus den Stößen 1 bis 3,  $E_{vd2}$  aus 4 bis 6,  $E_{vd3}$  aus 7 bis 9, usw. bestimmt. Aufge-

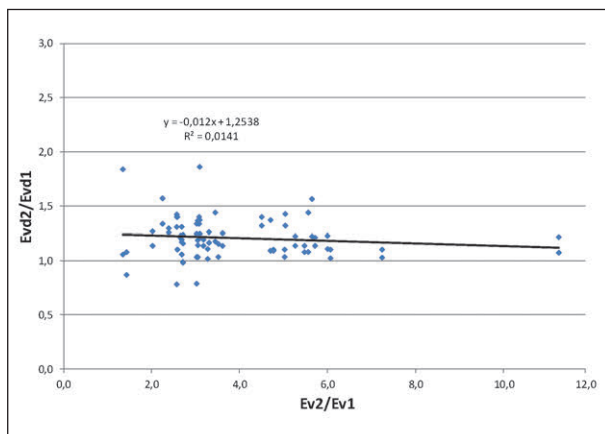
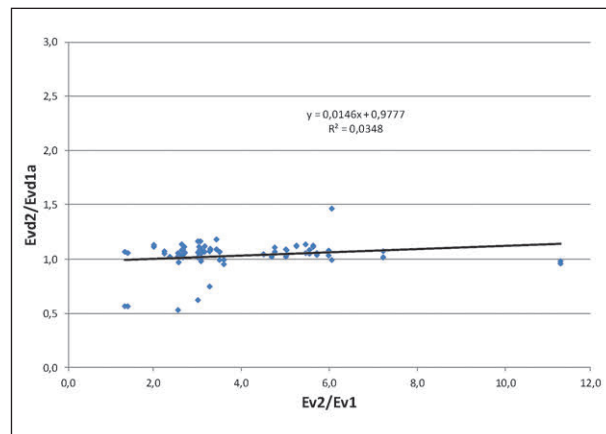
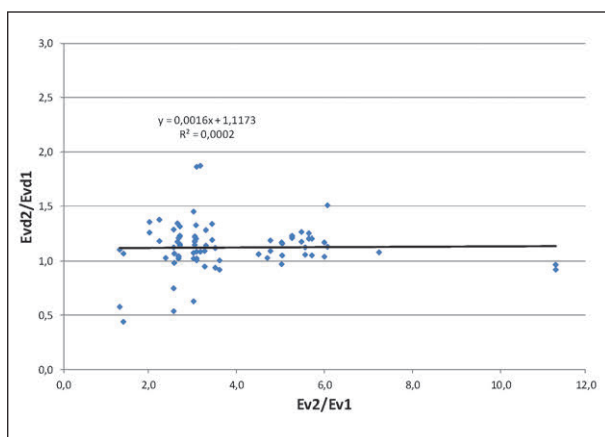
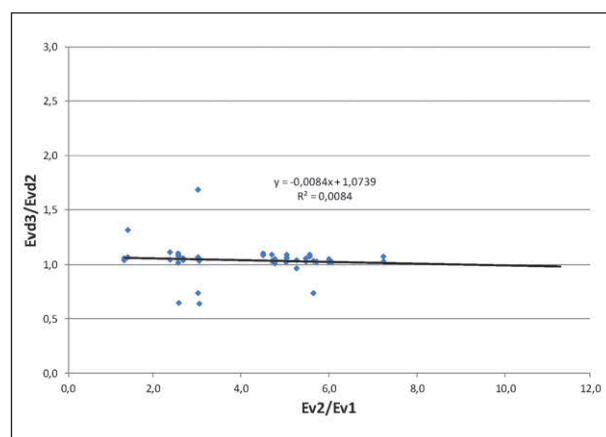
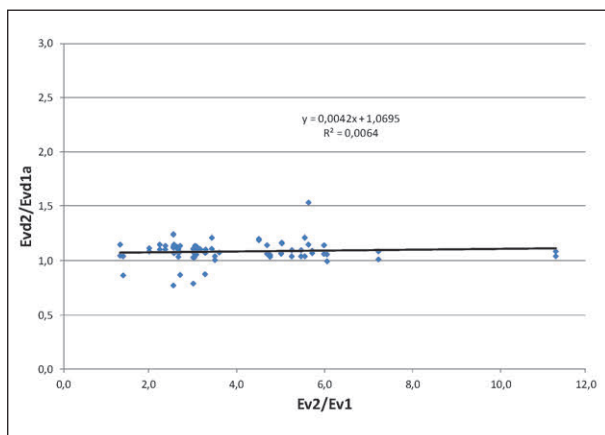
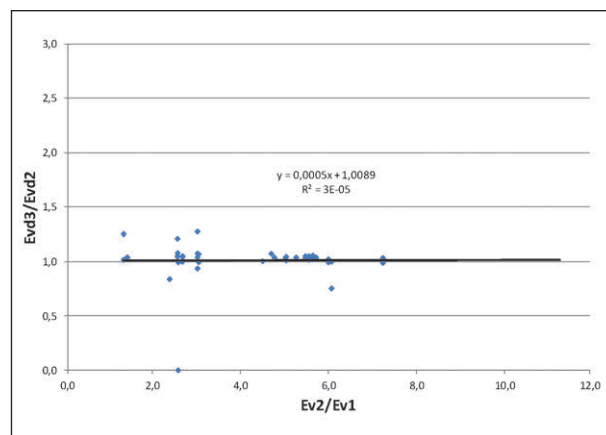
tragen werden dann die Verhältnisse  $E_{VD2}/E_{VD1}$ ,  $E_{VD3}/E_{VD2}$ , usw. Als Besonderheit ist noch die Auswertung mit  $E_{VD1a}$  zu sehen, bei dem der 1. Stoß vernachlässigt wird (siehe Kapitel 6.1.3)

Aus den Bildern 6-133 bis 6-140 kann für keine der untersuchten  $E_{VD}$ -Verhältniswerte eine sinnvolle Korrelation zum  $E_{v2}/E_{v1}$  –Wert abgelesen werden. Die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  sind meist kleiner als 0,01, sodass für diese Versuchsreihe ein Zusammenhang ausgeschlossen werden kann. Die weiteren Bodenarten wurden betrachtet, wobei sich aber auch hier keine zielführenderen Ergebnisse einstellten.

Die einleitend aufgezeigte Einschränkung bei der Auswertung des  $E_{VD1}$ -Wertes durch Nichtberücksichtigung des 1. Stoßes ist in den Bildern 6-141 bis 6-144 nochmals für alle Böden dargestellt. Es zeigt sich wie in Bild 6-133 bis Bild 6-140 für Kies zwar auch kein sinnvolles Bestimmtheitsmaß, jedoch ist erkennbar, dass die Streuung der  $E_{VD}$ -Verhältniswerte deutlich geringer wird, was für künftige Auswertungen u. U. hilfreich sein kann.

Neben den Auswertungen der jeweils aufeinanderfolgenden  $E_{VD}$ -Verhältnisse wird in den Bildern 6-145 und 6-146 noch das Verhältnis aus  $E_{vd3}$  zu  $E_{vd1a}$  betrachtet. Es liegen hauptsächlich Werte für grobkörnige Böden (Kies, Sand, Schotter, Mineralische Ersatzbaustoffe) vor.

Die Bestimmtheitsmaße für diese Auswertung sind die besten, die in diesem Auswertabschnitt dargestellt wurden, jedoch nicht in einer Größenordnung, die eine weitere Verfolgung bei dem in der Praxis zu betreibenden Mehraufwand (zusätzliche Stöße) rechtfertigen würde.

Bild 6-133:  $E_{VD2}/E_{VD1}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, KiesBild 6-136:  $E_{VD2}/E_{VD1a}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG Z15, KiesBild 6-134:  $E_{VD2}/E_{VD1}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG H15 und Z15, KiesBild 6-137:  $E_{VD3}/E_{VD2}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, KiesBild 6-135:  $E_{VD2}/E_{VD1a}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, KiesBild 6-138:  $E_{VD3}/E_{VD2}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG H15 und Z15, Kies



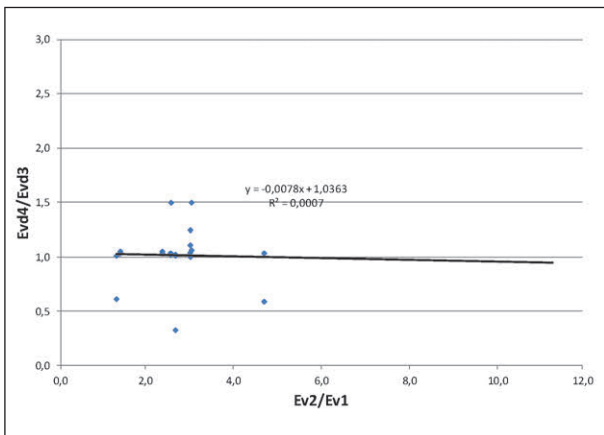


Bild 6-139:  $E_{VD4}/E_{VD3}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, Kies

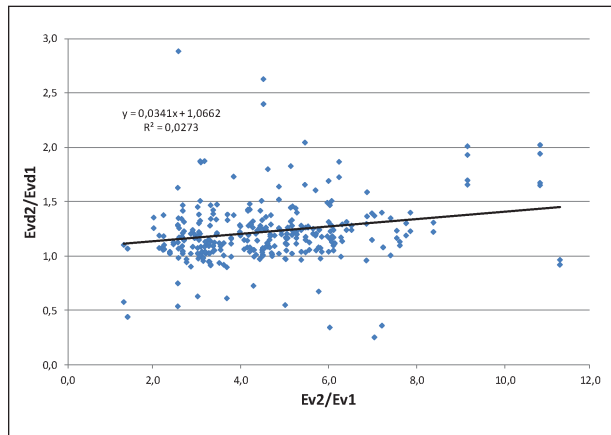


Bild 6-142:  $E_{VD2}/E_{VD1}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden

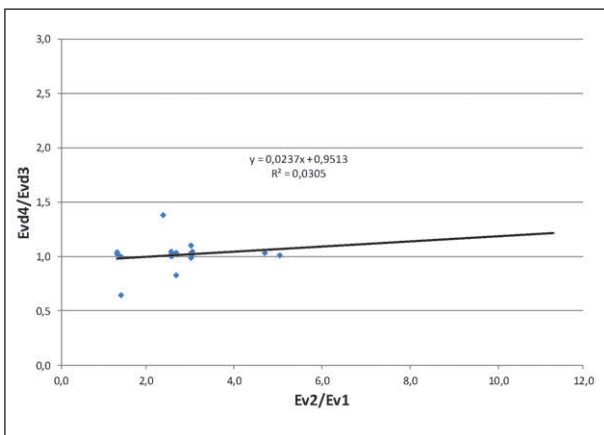


Bild 6-140:  $E_{VD4}/E_{VD3}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG H15 und Z15, Kies

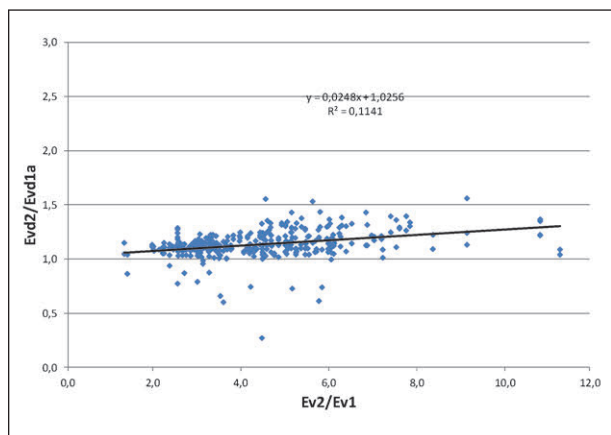


Bild 6-143:  $E_{VD2}/E_{VD1a}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden

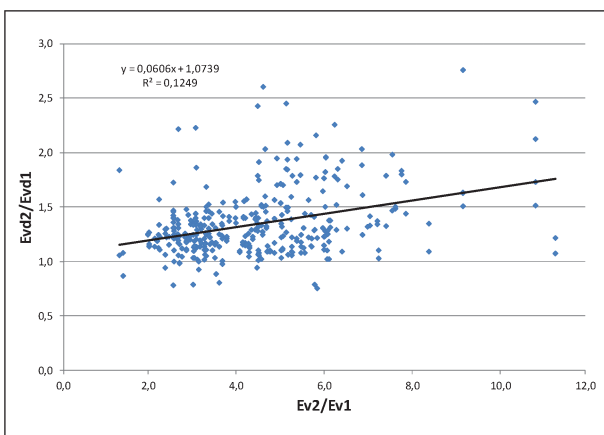


Bild 6-141:  $E_{VD2}/E_{VD1}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden

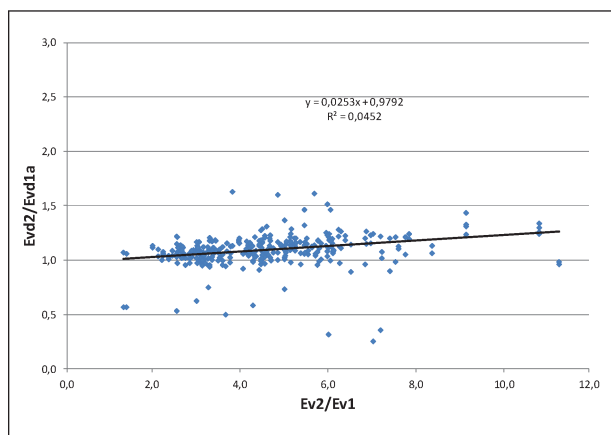


Bild 6-144:  $E_{VD2}/E_{VD1a}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden

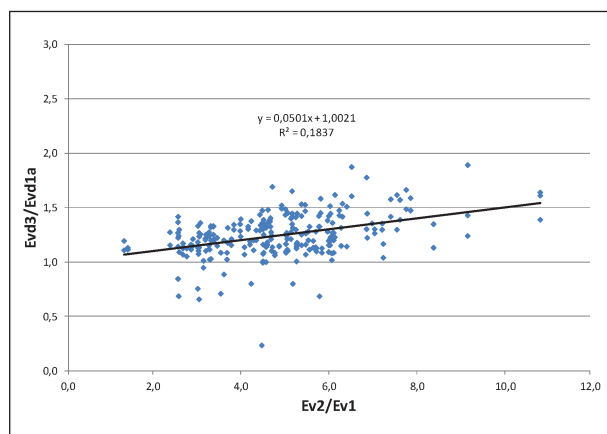


Bild 6-145:  $E_{VD3}/E_{VD1a}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , LFG H10 und Z10, grobkörnige Böden

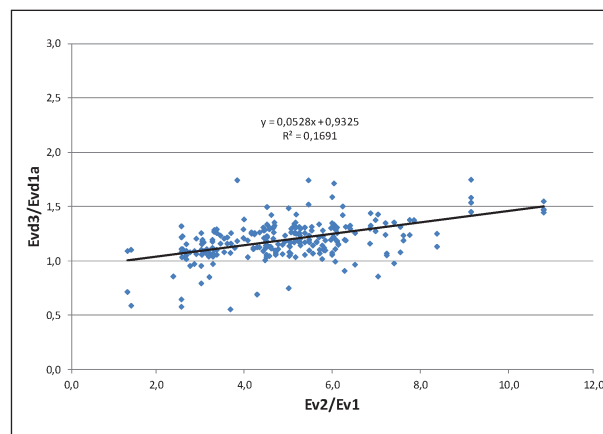


Bild 6-146:  $E_{VD3}/E_{VD1a}$  über  $E_{V2}/E_{V1}$ , MFG H15 und Z15, grobkörnige Böden

Inwieweit die offensichtlich nicht zielführende Auswertung unter Zugrundelegung des  $E_{V2}/E_{V1}$ -Wertes die Ursache in den dynamischen Kennwerten oder doch in den historisch gewachsen, aktuell nicht belegbaren  $E_{V2}/E_{V1}$ -Werten, hat ist an dieser Stelle nicht zu klären. Aus bodenmechanischer Sicht wären deutlich bessere Zusammenhänge zu erwarten.

### 6.5.3 Zusammenfassung

Für einzelne Böden sind Korrelationen zwischen dem  $E_{V2}/E_{V1}$ - und dem  $s_{46}/v_{46}$ -Wert darstellbar. Bei verschiedenen Böden sind keine Zusammenhänge belegbar. Teilweise liegen große Streuungen und nur geringe Neigungen der Regressionsgeraden mit resultierend unsicherer Übertragung vor. Inwieweit dies der oft recht zweifelhaften Aussagekraft des statischen Verhältniswertes oder den Ergebnissen des dynamischen Versuches geschuldet ist, konnte nicht eruiert werden.

Die Betrachtung des Verhältnisses von aufeinanderfolgenden Stößen (Stoßgruppen) der Fallgewichtsgesetze in Analogie zur Erst-/Zweitbelastung beim LPV erscheint bodenmechanisch sinnvoll, konnte aber durch die Versuche nicht als zielführend erkannt werden.

## 6.6 Verdichtungs-, Wasserhalts- und Liegezeiteinfluss

### 6.6.1 Kies

Auf dem Freigelände wurde eine Kiesfläche eingebaut und eingeebnet. Es wurden zunächst 3 Bereiche mit 2x-, 4x- und 6x-Verdichtung hergestellt

(Kies-2-Kies A, Kies-4-Kies A, Kies-6-Kies A). Danach wurden diese Bereiche jeweils halbiert und der 2x-Bereich wieder aufgelockert (Kies-2+A-Kies B) und der 6x-Bereich soweit möglich endverdichtet (Kies-6+N-Kies B). Der Bereich mit 4x-Verdichtung wurde belassen (Kies-4+K-Kies B). Aufgrund der beengten Verhältnisse konnten nur Einzelversuche durchgeführt werden. Die im Folgenden dargestellten Werte stellen somit (soweit nicht anders angegeben) keine Mittelwerte sondern Einzelergebnisse dar.

In den Bildern 6-147 bis 6-153 werden, getrennt für die 4 Fallgewichtsgesetze, die Ergebnisse der 6 Teilbereiche jeweils links die Verformungsmoduln (statisch/dynamisch) und rechts die Verhältniswerte  $s_{46}/v_{46}$  und  $E_{V2}/E_{V1}$  dargestellt.

Bei den statischen Kenngrößen spiegelt der  $E_{V2}$ -Wert die zunehmende Verdichtung der Teilflächen gut wieder. Von etwa 100 MN/m<sup>2</sup> bei 2x-Verdichtung steigen die Werte auf ca. 110 MN/m<sup>2</sup> bei 4x- und ca. 160 MN/m<sup>2</sup> bei 6x-Verdichtung an. Die Auflockerung der 2x-Fläche und die Nachverdichtung der 6x-Fläche brachten keinen nennenswerten Erfolg.

Die  $E_{V2}/E_{V1}$ -Werte hingegen weisen keinen nachvollziehbaren Trend aus. Die Werte bewegen sich meist alternierend zwischen 2,4 und 2,7.

Bei den Ergebnissen der Fallgewichtsgesetze ist zu meist keine erklärende Abfolge der Werte in Bezug zur Verdichtung zu erkennen. Z. B. bewegen sich die  $E_{VD2}$ -Werte des Z10 zwischen 50 und 60 MN/m<sup>2</sup> sowohl 2x-Verdichtung als auch bei der 6x-Verdichtung die hohen Werte und bei der endverdichteten Teilfläche sogar ein Wert von 40 MN/m<sup>2</sup> ermittelt wurde. Die  $s_{46}/v_{46}$ -Werte des Z10 liegen überwie-

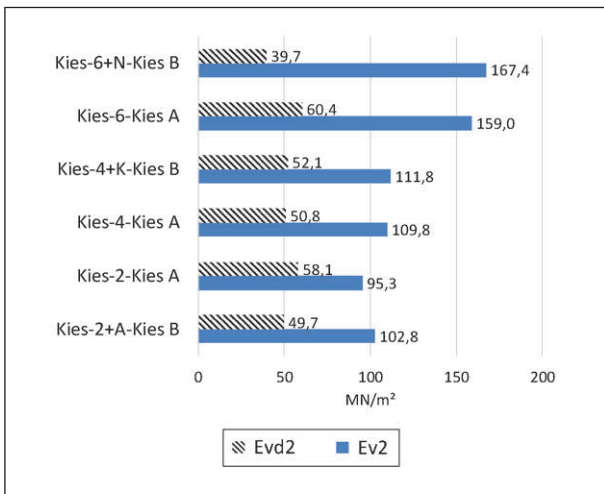


Bild 6-147: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG H10

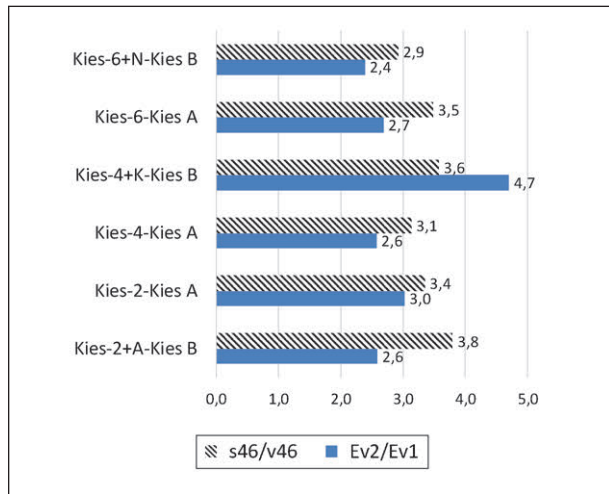


Bild 6-150: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10

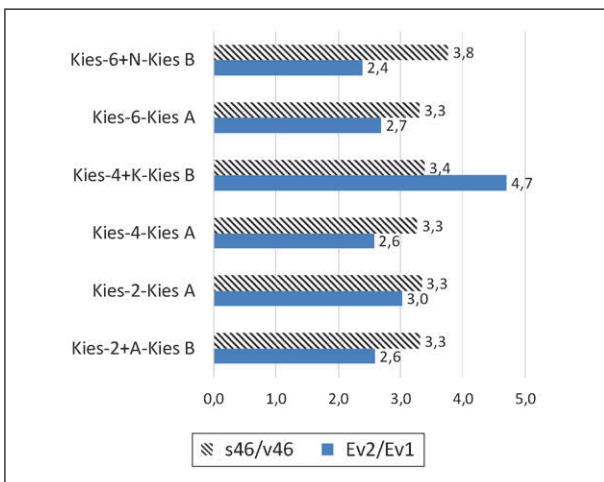


Bild 6-148: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10

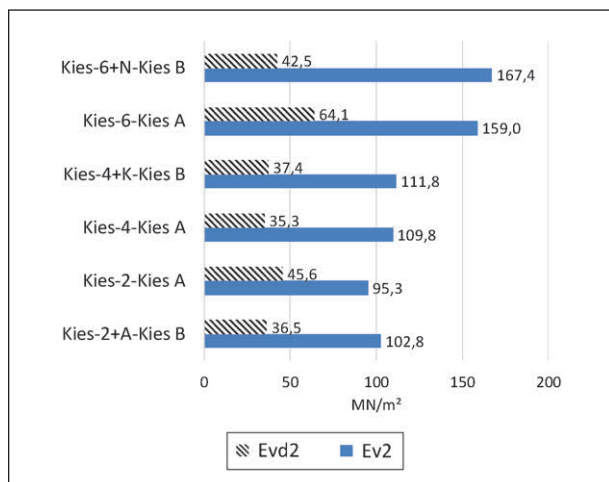


Bild 6-151: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG H15

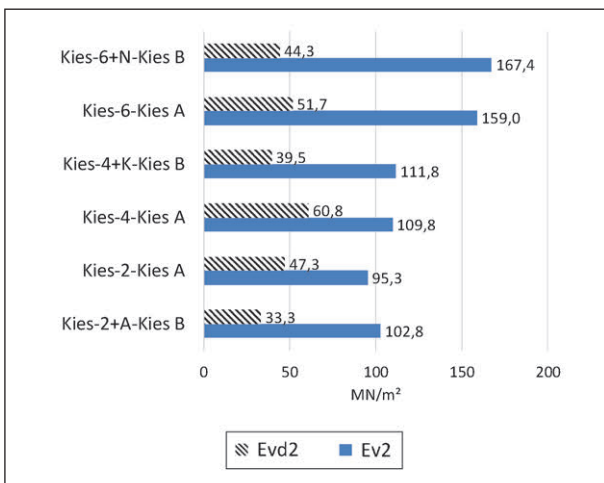


Bild 6-149: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG Z10

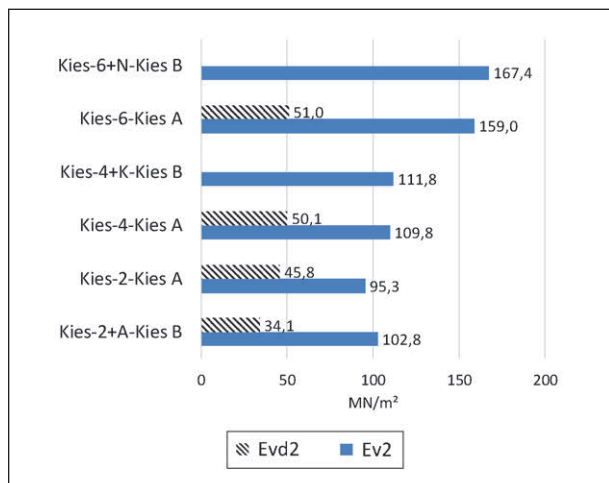
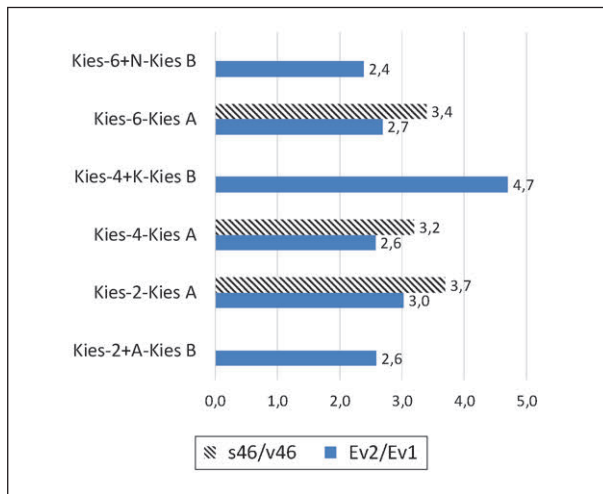
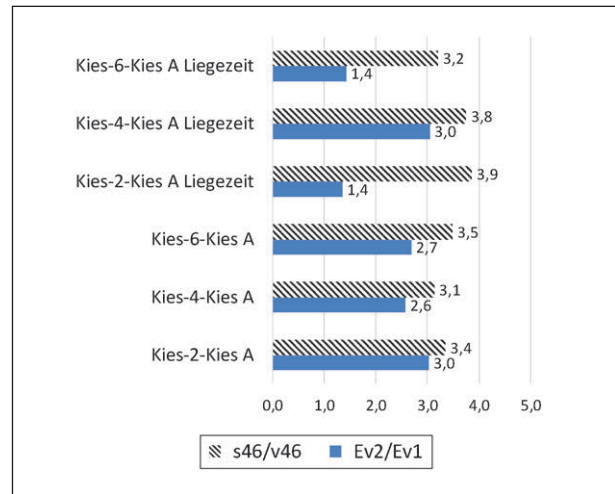
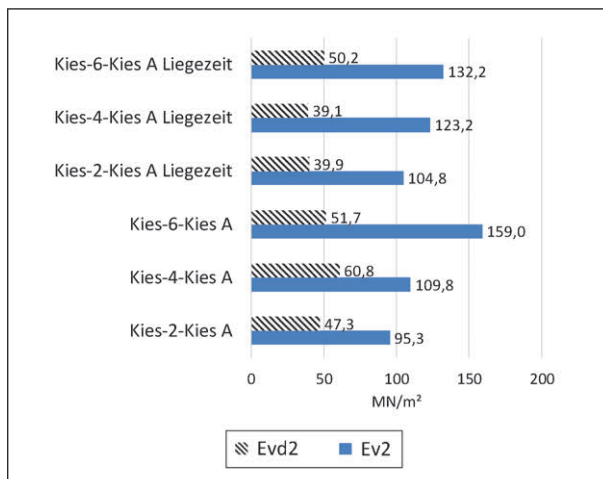


Bild 6-152: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG Z15

Bild 6-153: Verhältniszerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15Bild 6-155: Liegezeiteinfluss Kies, Verhältniszerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10Bild 6-154: Liegezeiteinfluss Kies, Verformungsmodul  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG Z10

gend bei 3,3 unabhängig vom Verdichtungs- bzw. möglichen Nachverdichtungszustand. Die einzig bodenmechanisch plausible Zuordnung ist beim  $E_{vd2}$  des Z15 mit einem Anstieg von 34 MN/m<sup>2</sup> auf 51 MN/m<sup>2</sup> bei zunehmender Verdichtung zu beobachten, wobei auch hier der Anstieg im Vergleich zum statischen Versuch unterproportional ist.

Auf den gleichen Teilflächen wurden Versuche zur Untersuchung des Liegezeiteinflusses (ca. 4 Wochen) und des Wassergehaltes ohne Veränderung des Verdichtungszustandes durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den Bildern 6-154 und 6-155 exemplarisch für das Z10 dargestellt.

Wie bei den vorigen Auswertungen auch zeigt sich bei zunehmender Verdichtung eine Zunahme der  $E_{v2}$ -Werte, wobei der Wert bei 6x-Verdichtung et-

was zu hoch ausgefallen sein dürfte. Der Trend bestätigt sich auch nach der Liegezeit. Die Werte nach der Liegezeit sind ca. 10 % höher als unmittelbar nach der Verdichtung. Bei den  $E_{vd2}$ -Werten kein wirklicher Trend zu erkennen und es sind auch die Werte nach der Liegezeit niedriger als ohne.

Die  $s_{46}/v_{46}$ -Werte schwanken zwischen 3,0 und 3,9 und werden im Mittel nach der Liegezeit eher größer, während die  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werte eher kleiner werden, allerdings bei großen Schwankungen. Eine Wertung der Ergebnisse ist nicht zielführend.

Für die Untersuchung des Einflusses einer nachträglichen Wassergehaltserhöhung wurden die vorstehend beschriebenen Teilflächen mit statischen und dynamischen Plattendruckversuchen beprobt, dann in 2 Durchgängen gewässert ohne an dem Verdichtungszustand etwas zu ändern. Am folgenden Tag wurden dann erneut dynamische Plattendruckversuche durchgeführt. In den Bildern 6-156 bis 6-162 sind die statischen Versuche auch diesen Versuchen nach dem Wässern zugeordnet. Die Wassergehaltserhöhung war von etwa 1,7 % auf 2,4 % eher gering, trotz deutlicher Wasserzufuhr. Dies ist vermutlich der hohen Durchlässigkeit des Kieses geschuldet.

Zur Vollständigkeit der Dokumentation werden hier wieder alle 4 Fallgewichtsgeräte dargestellt.

Die  $s_{46}/v_{46}$ -Werte liegen zwischen 3,0 und 3,7 und werden nach der Wässerung etwa um 0,2 bis 0,4 (5 – 10 %) größer. Die  $E_{vd2}$ -Werte liegen im Niveau etwa um 10 MN/m<sup>2</sup> (20 %) bei Z10 und bei H10 sogar um 20 MN/m<sup>2</sup> (35 %) niedriger als vor dem

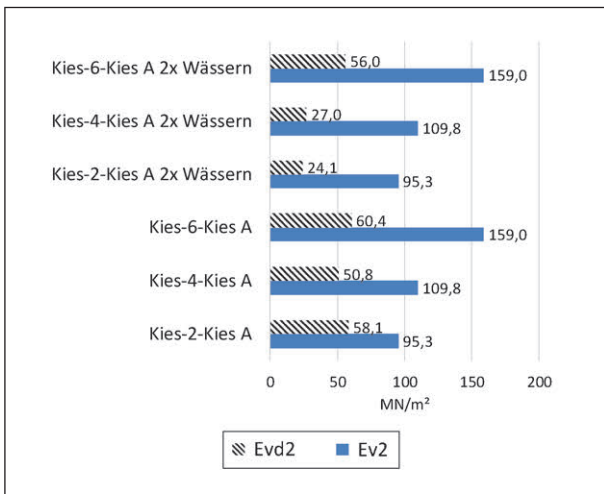


Bild 6-156: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG H10

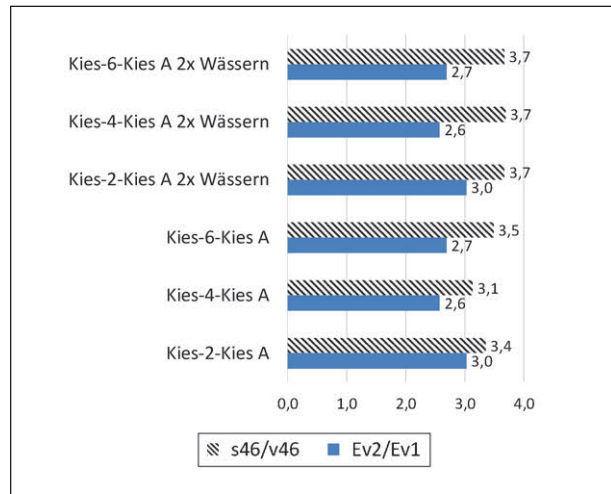


Bild 6-159: Wassergehaltsänderung Kies, Verhältniszwerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10

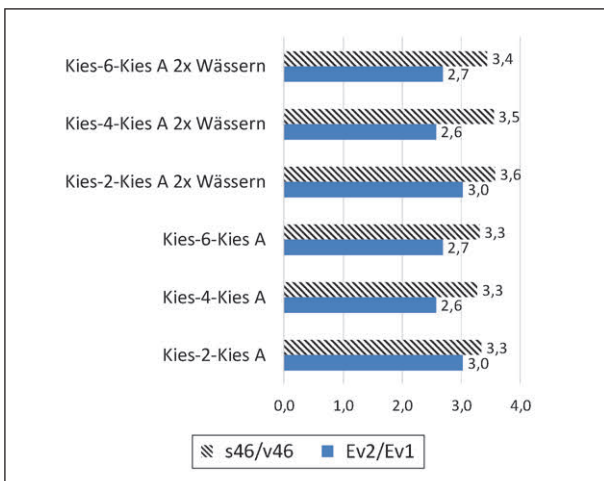


Bild 6-157: Wassergehaltsänderung Kies, Verhältniszwerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10

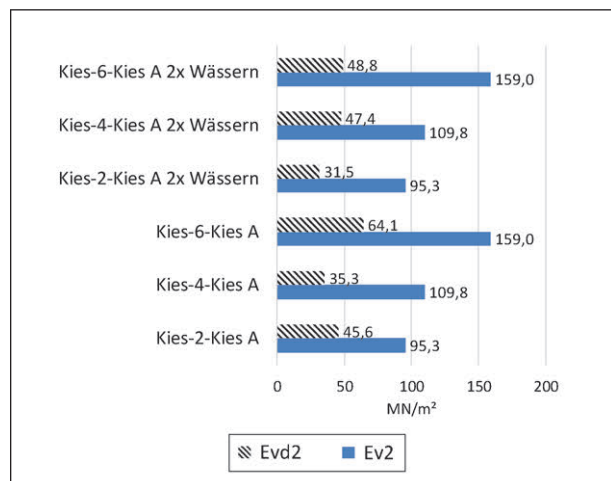


Bild 6-160: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG H15

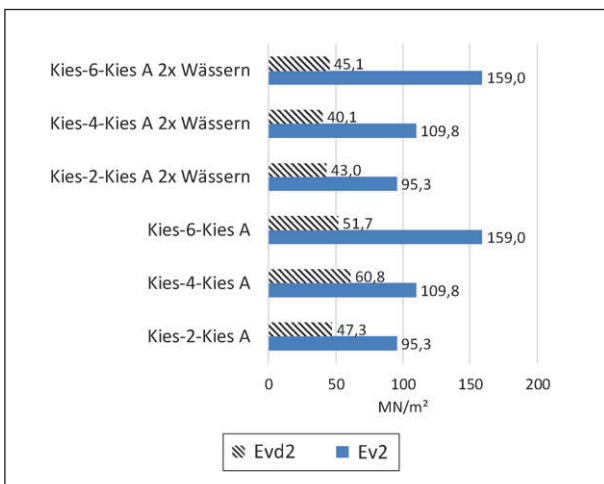


Bild 6-158: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG Z10

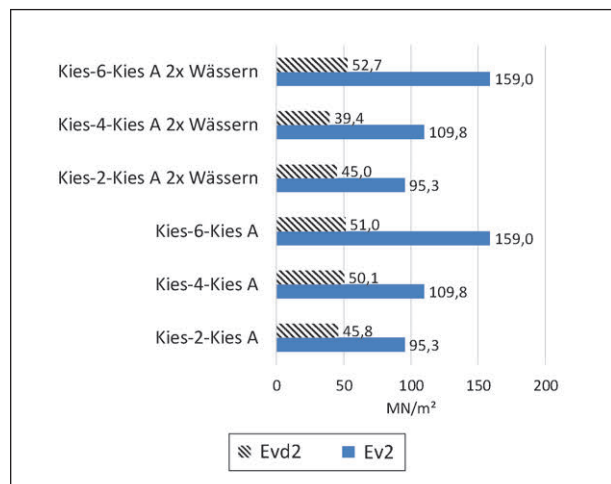


Bild 6-161: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG Z15

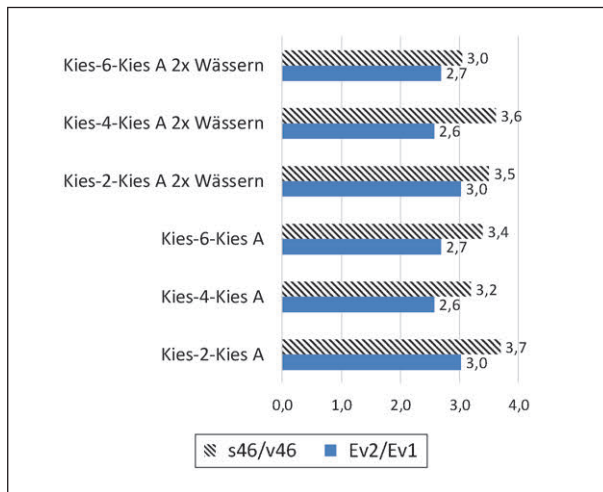


Bild 6-162: Wassergehaltsänderung Kies, Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15

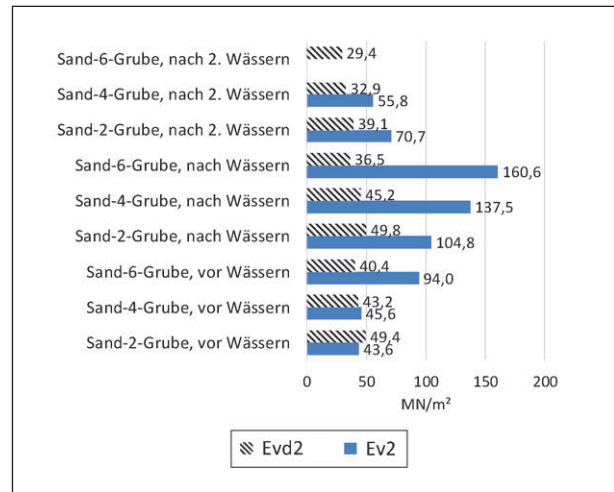


Bild 6-163: Verformungsmoduln  $E_{vD2}$  und  $E_{v2}$ , LFG H10

Wässern. Die MFG zeigen ähnliche, wenn auch geringer ausgeprägte Tendenzen.

Eine bodenmechanische Interpretation erscheint schwierig.

### 6.6.2 Sand

In der Versuchsgrube des Prüfamtes wurde eine Sandfläche in zwei Versuchsreihen untersucht. Ziel der Untersuchungen war die Überprüfung des Einflusses des Wassergehaltes ohne Änderung des Verdichtungszustandes sowie der Einfluss einer Liegezeit.

Bei Versuchsreihe 1 wurde der Sand zunächst bei dem vorliegenden, sehr geringen Wassergehalt (ca.  $w = 2,3\%$ ) in 3 Teilflächen mit einem Plattenrüttler 2-, 4- und 6-fach verdichtet (Sand-2-Grube, vor Wässern, Sand-4-Grube, vor Wässern, Sand-6-Grube, vor Wässern). Nach der Beprobung wurde die gesamte Fläche gewässert und bei einem Wassergehalt von ca.  $w = 5,3\%$  nochmals in den 3 Teilflächen gering, mittel und stark verdichtet (Sand-2-Grube, nach Wässern, usw.). Nach ca. 1 Woche, in der der Sand austrocknen konnte, wurde erneut gewässert (ca.  $w = 5,9\%$ ) und ohne weitere Verdichtung wieder beprobt (Sand-2-Grube, nach 2. Wässern, usw.).

In den Bildern 6-163 bis 6-169 werden, getrennt für die 4 Fallgewichtsgeräte, die Ergebnisse der 3 Teilbereiche jeweils links die Verformungsmoduln (statisch/dynamisch) und rechts die Verhältniswerte  $s_{46}/v_{46}$  und  $E_{v2}/E_{v1}$  dargestellt.

Bei der Verdichtung des Sandes im relativ trockenen Zustand zeigt sich bei den statischen Plattendruckergebnissen kein Zusammenhang zur eingebrachten Verdichtungsenergie, weder bei den  $E_{v2}$ -Werten (der Wert von  $94 \text{ MN/m}^2$  ist als Ausreißer zu betrachten und nicht nachvollziehbar) noch beim Verhältnis  $E_{v2}/E_{v1}$ . Demgegenüber passen beide Kenngrößen nach der 1. Wässerung sehr gut zur Verdichtung. Von 2 Übergängen über 4 bis zu 6 Übergängen steigen die  $E_{v2}$ -Wert von ca. 105 über 140 auf  $160 \text{ MN/m}^2$ . Gleichzeitig fallen die  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werte  $4,6$  über  $3,4$  auf  $2,6$ . Dies entspricht dem bodenmechanisch erwarteten Verhalten.

Bei den MFG ist demgegenüber keine klare Tendenz erkennbar, vielmehr liegen die Werte zwischen ca.  $43$  und  $52 \text{ MN/m}^2$  ohne Zuordenbarkeit zur eingebrachten Verdichtung. Bei den LFG ist sogar eine stetige Abnahme der  $E_{vd}$ -Werte bei zunehmender Verdichtung zu beobachten. Eine bodenmechanische Erklärung ist nicht zu erkennen, ein Zusammenhang mit eventuell ungleichmäßigem Wassergehalt ist nicht darstellbar.

Die  $s_{46}/v_{46}$ -Werte des Z10 liegen im Mittel der 3 Teilflächen bei  $3,0$  im Trockenen (vor Wässern) und bei  $2,9$  nach Wässern. Wassergehaltsänderung von  $w = 2,3\%$  auf  $5,3\%$  und Neuverdichtung änderten den Wert also kaum. Nach einer Liegezeit und nochmaligem Wässern, bei dem allerdings ein nur unmerklich höherer Wassergehalt von  $5,9\%$  erreicht wurde, steigt der Mittelwert des  $s_{46}/v_{46}$ -Wertes auf ca.  $4,0$ . Inwieweit dies signifikant ist bei einer typischen Schwankungsbreite in dieser Versuchsreihe zwischen  $2,7$  und  $3,6$  (vermutlich Ausreißer  $5,2$ ) ist zu bezweifeln.

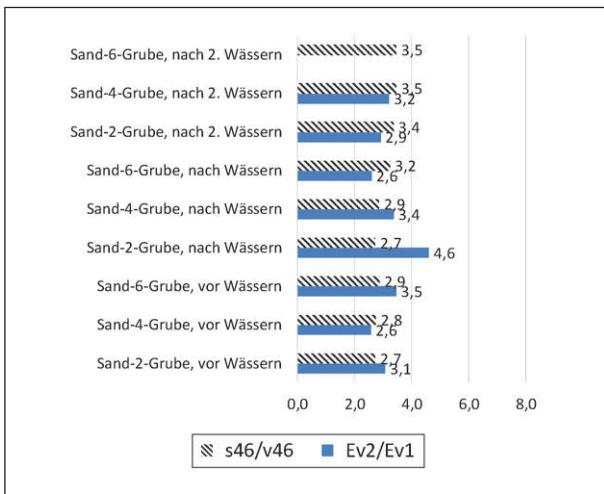


Bild 6-164: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10

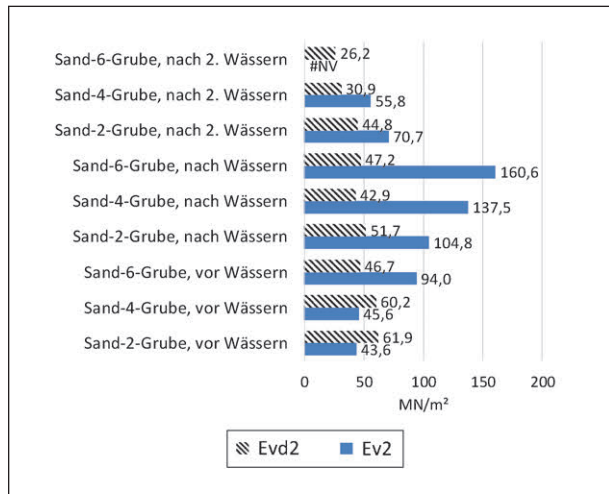


Bild 6-167: Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG H15

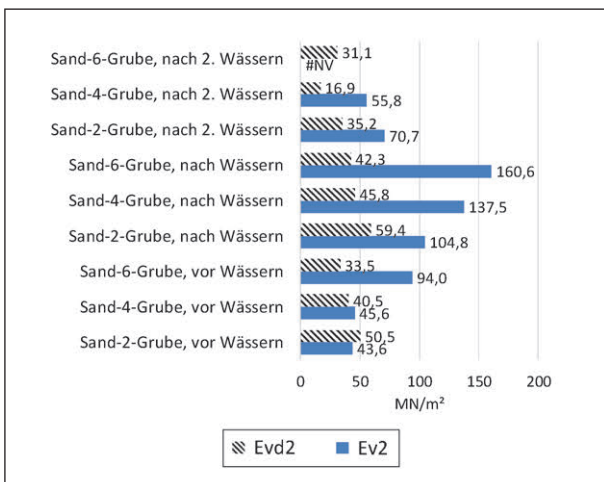


Bild 6-165: Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG Z10

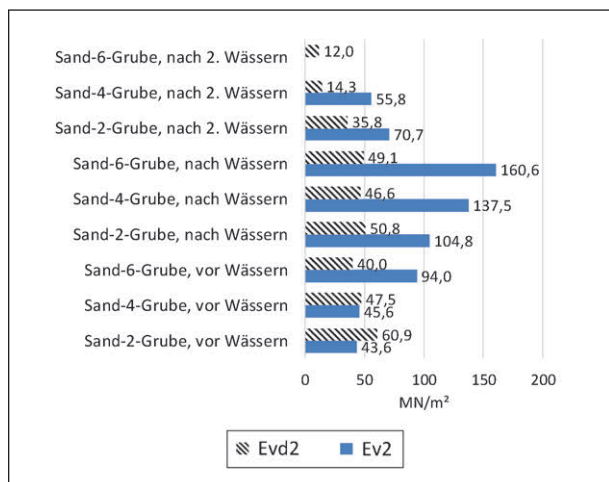


Bild 6-168: Verformungsmodul  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG Z15

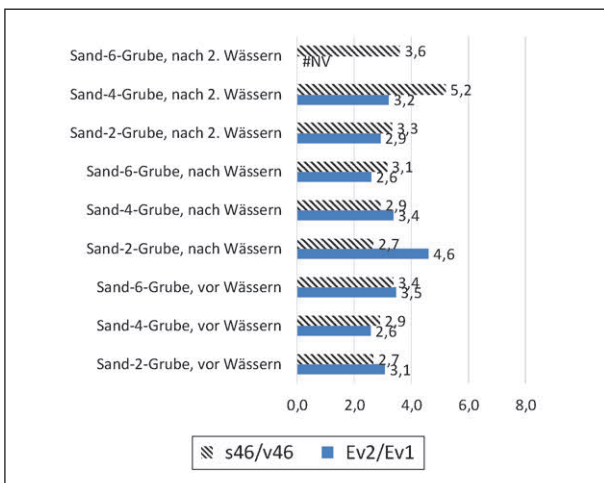


Bild 6-166: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10

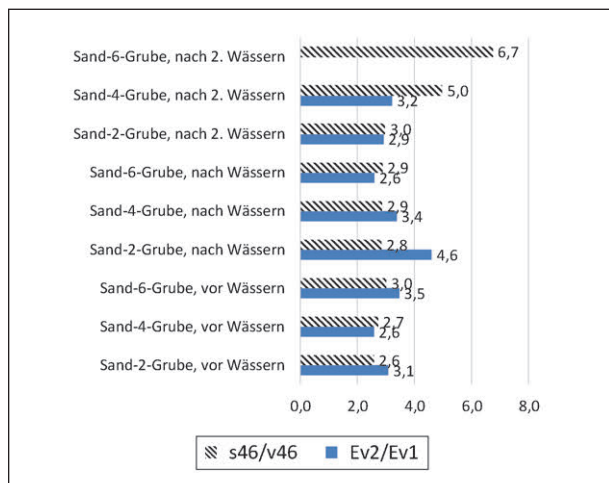


Bild 6-169: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15

Bei Versuchsreihe 2 wurde der Sand der Versuchsgrube ausgebaut und in 2 Lagen mit Dicken von je 30 cm wieder eingebaut. Der Wassergehalt beim Einbau betrug im Mittel  $w = 5,3\%$ . Es wurden wieder 3 Teilflächen mit einem Plattenrüttler 2-, 4- und 8-fach verdichtet (Sand-2-Grube, nE, gewässert, usw.). Nach der Beprobung wurde die gesamte Fläche zweimal gewässert und bei einem Wassergehalt von ca.  $w = 7,4\%$  am nächsten Tag ohne weitere Verdichtung wieder beprob (Sand-2-Grube, nE, 2x gewässert, usw.). Nach 5 Tagen, in denen der Sand austrocknen konnte auf ca.  $w = 2,8\%$  wurde erneut ohne weitere Verdichtung beprob (Sand-2-Grube, nE, Liegezeit, usw.).

In den Bildern 6-170 bis 6-176 werden, getrennt für die 4 Fallgewichtsgeräte, die Ergebnisse der 3 Teilbereiche jeweils links die Verformungsmoduln (statisch/dynamisch) und rechts die Verhältniszerte  $s_{46}/v_{46}$  und  $E_{V2}/E_{V1}$  dargestellt.

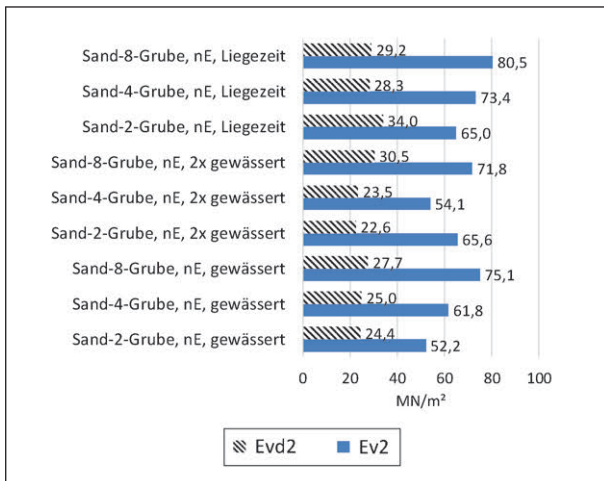


Bild 6-170: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG H10

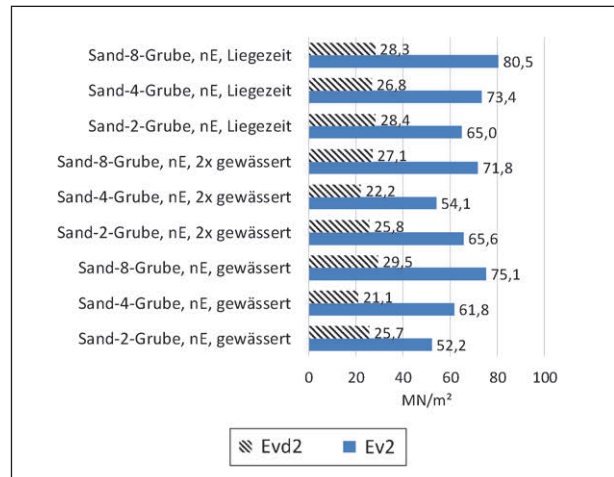


Bild 6-172: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , LFG Z10

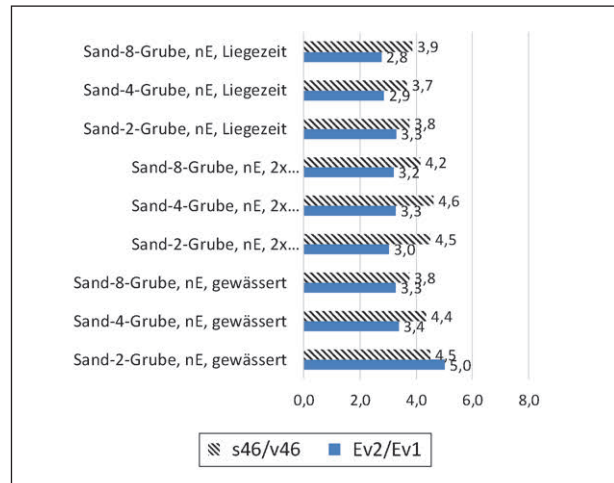


Bild 6-173: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10

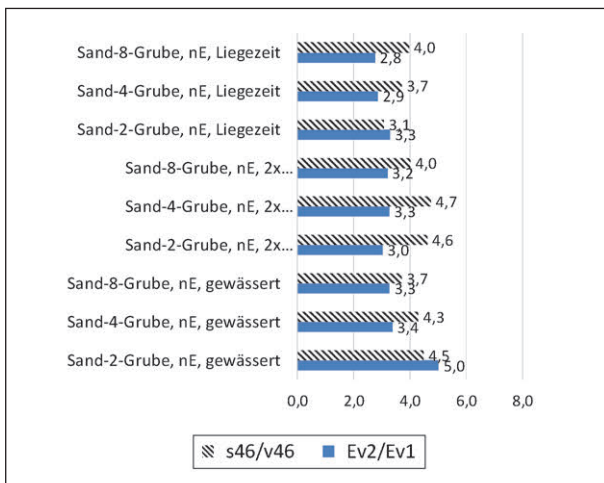


Bild 6-171: Verhältniszerte  $E_{V2}/E_{V1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10

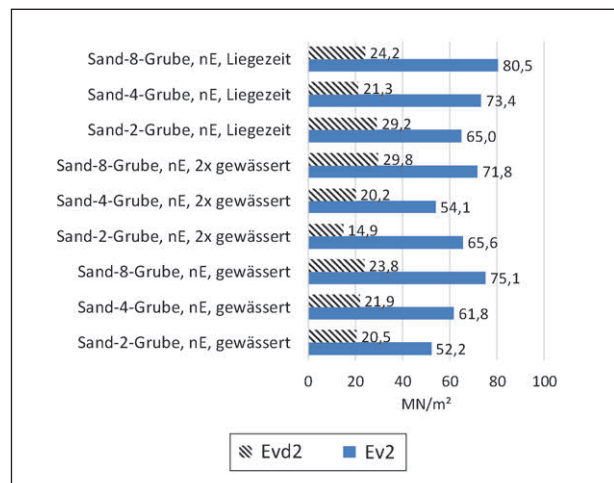


Bild 6-174: Verformungsmoduln  $E_{VD2}$  und  $E_{V2}$ , MFG H15



Die Verdichtung bei einem Wassergehalt von ca.  $w = 5,3\%$  führt bei den  $E_{v2}$ -Werten zu einem signifikanten, zuordenbaren Anstieg mit der Verdichtungsleistung. Diese Zuordnung ist weniger ausgeprägt bei den  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werten.

Die Erhöhung des Wassergehaltes auf ca.  $w = 7,4\%$  führt zu Veränderungen der  $E_{v2}$ -Werte, wobei der Mittelwert über die 3 Teilflächen gleichbleibt.

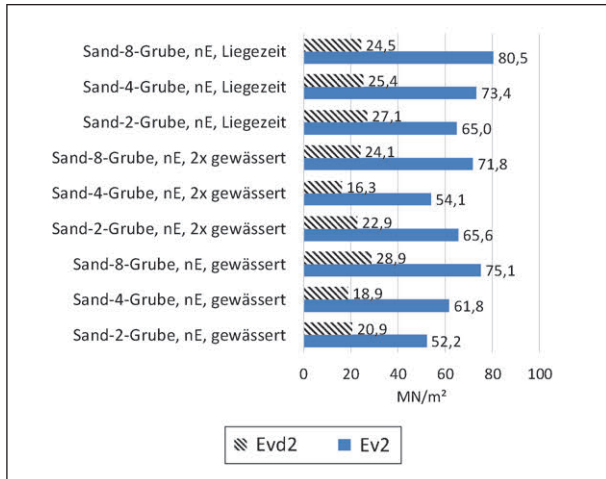


Bild 6-175: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG Z15

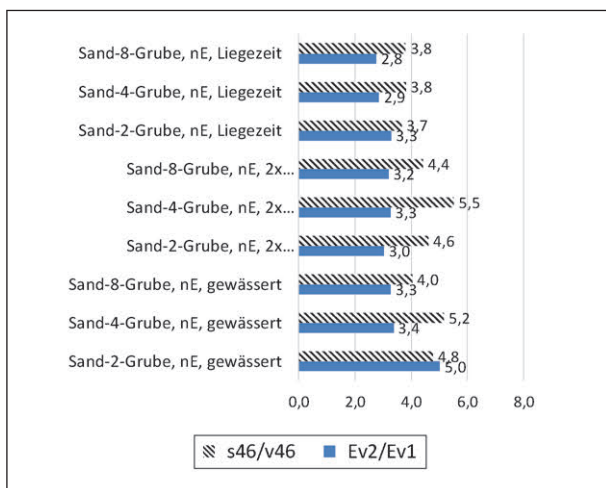


Bild 6-176: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15

Die  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werte liegen zwischen 3 und 3,3 ohne zielführenden Zuordnung zur ursprünglich eingebrachten Verdichtung.

Die 5 Tage Liegezeit bei einer Reduzierung des Wassergehaltes auf ca.  $w = 2,8\%$  zeigt bei den  $E_{v2}$ -Werten wieder eine Erhöhung im Mittel auch mit Zuordenbarkeit zu ursprünglichen Verdichtung.

Exemplarisch sind in Tabelle 6-8 die Veränderungen der Werte für das Z10 und den statischen Plattendruckversuch jeweils als Mittel über die 3 Teilflächen aufgezeigt.

Bei Betrachtung der Mittelwerte der Kennwerte zeigt sich bei der Wassergehaltsänderung von  $w = 5,3\%$  auf  $w = 7,4\%$  keine signifikante Auswirkung weder bei  $E_{v2}$ ,  $E_{vd2}$  noch  $s_{46}/v_{46}$ . Einzig das Verhältnis  $E_{v2}/E_{v1}$  reagiert mit einer deutlichen Abnahme. Der Liegezeiteinfluss wird von allen Kennwerten in vergleichbarer prozentualer Weise dargestellt. Inwieweit allerdings eine Änderung der Absolutwerte  $\Delta E_{vd2} = 3 \text{ MN/m}^2$  und  $\Delta E_{v2} = 10 \text{ MN/m}^2$  baupraktisch relevant ist und insbesondere bei LFG im Streubereich liegt, ist zu hinterfragen.

### 6.6.3 Zusammenfassung

Bei den Versuchen mit verschiedenen Verdichtungszuständen ist sowohl bei Sand als auch Kies erkennbar, dass der  $E_{v2}$ -Wert des LPV die Unterschiede deutlich darstellt, während bei LFG und MFG die Zuordnung beim  $E_{vd2}$ -Wert nicht immer eindeutig ist und teilweise sich nur in kleinen Werteänderungen äußert. Eine Interpretation der  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werte bzw. der  $s_{46}/v_{46}$ -Werte ist bei Kies kaum möglich. Bei Sand treten die Veränderungen in der erwarteten Weise auf, wenn auch z. T. nicht in signifikanter Größenordnung.

Der Liegezeiteinfluss dokumentiert sich bei den  $E_{v2}$ - und  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werten bei Kies und Sand in der erwarteten Weise ( $E_{v2}$  wird größer,  $E_{v2}/E_{v1}$  kleiner). Bei

	neu Einbau, gewässert	Veränderung	neu Einbau, 2x gewässert	Veränderung	neu Einbau, Liegezeit
$E_{vd2}$	25,4	- 2 %	25,0	+ 11 %	27,8
$s_{46}/v_{46}$	4,2	+ 5 %	4,4	- 14 %	3,8
$E_{v2}$	63	0 %	63	+ 16 %	73
$E_{v2}/E_{v1}$	3,9	- 18 %	3,2	- 6 %	3,0

Tab. 6-8: Sand II, Mittelwerte der Veränderungen Z10 und LPV

den dynamischen Kennwerten  $E_{vd2}$  und  $s_{46}/v_{46}$  wurden bei Kies gegenläufige Werte bei Sand jedoch erwartungsgemäße Werte festgestellt.

In Bezug auf die Änderung des Wassergehaltes liegen für Kies nur die Werte der Fallgewichtsgeräte vor, wobei hier niedrigere  $E_{vd2}$  und höhere  $s_{46}/v_{46}$  bei erhöhtem Wassergehalt festgestellt wurden. Bei Sand ändern sich  $E_{v2}$ ,  $E_{vd2}$  und  $s_{46}/v_{46}$  praktisch nicht,  $E_{v2}/E_{v1}$  wird deutlich geringer bei insgesamt deutlich erhöhtem Wassergehalt.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass eine gemeinsame, bodenmechanisch plausible Deutung der Ergebnisse der Fallgewichtsgeräte für die beiden untersuchten grobkörnigen Böden nicht möglich erscheint. Die Werteverläufe des LPV entsprechen der praktischen Erfahrung. Da es sich um Einzelergebnisse handelt, ist dies als Tendenz zu verstehen. Durch einen deutlich größeren Versuchsumfang könnte dies weiter untersucht werden.

## 7 Zusammenfassung

Dynamische Plattendruckversuche, bei denen eine Fallmasse einen stoßartigen Impuls auf eine Lastplatte überträgt, dienen zur Tragfähigkeitsüberprüfung bei ungebundenen Tragschichten und Böden. Das Leichte Fallgewichtsgerät, geregelt in der TP BF-StB Teil B 8.3 (2003), stellt das Ergebnis einer kontinuierlichen gerätetechnischen Entwicklung über mehrere Jahrzehnte dar. Es ist im Anwendungsspektrum der Qualitätskontrolle im Straßenbau ein akzeptiertes und aufgrund von diversen Vorteilen gegenüber anderen Prüfmethode verbreitetes Prüfinstrument. Dabei wird die maximale Setzung  $s$  der Lastplatte mit einem Durchmesser von 300 mm infolge einer standardisierten Stoßbelastung gemessen. Aus der maximalen Setzung wird bei Annahme einer mittleren Sohldruckspannung unter der Lastplatte von  $0,1 \text{ MN/m}^2$  der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  berechnet.

Die ZTV E-StB Kapitel 4.5.2 formuliert alternativ zu Anforderungswerten hinsichtlich des Verformungsmoduls aus dem statischen Plattendruckversuch  $E_{v2}$  für frostsichere Böden des Unterbaus bzw. des Untergrundes auf dem Planum Anforderungen bezogen auf das 10%-Mindestquantil des  $E_{vd}$ -Wertes, der mit dem Leichten Fallgewichtsgerät zu messen ist.

Bereits heute erfassen Fallgewichtsgeräte verschiedener Hersteller auch die maximale Setzungsgeschwindigkeit  $v$  der Lastplatte, die während der stoßartigen Beanspruchung auftritt, wie dies in der TP BF-StB Teil B 8.3 zum Leichten Fallgewichtsgerät und in der TP Gestein-StB Teil 8.2.1 zum Mittelschweren Fallgewichtsgerät bereits als Anmerkung verankert ist. Eine einheitlich anerkannte Systematik zur Auswertung der Setzungsgeschwindigkeit, welche von der dynamischen Interaktion zwischen Lastplatte und Boden bzw. Tragschicht abhängt, existiert jedoch noch nicht. Als Kenngröße wurde der Quotient  $s/v$  aus maximaler Setzung  $s$  und maximaler Setzungsgeschwindigkeit  $v$  zur Analyse herangezogen. Er ist gedacht, um bei Böden und Tragschichtmaterialien auf den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  zu schließen. Damit verbunden sollte in einem arbeitsintegrierten Prozess eine Entscheidungsgrundlage definiert werden, die eine weitere Verdichtung bzw. Nachverdichtung zur Folge hat. Ferner ist es denkbar, dass der  $s/v$ -Wert ähnlich dem beim statischen Plattendruckversuch gemessenen Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  interpretiert werden kann. Auf Basis einer theoretischen Modellbildung ist der Zusammenhang zwischen bodenspezifischen Einflussgrößen wie der Steifigkeit, dem Dichteniveau bzw. dem Potenzial plastischer Dichteänderungen, was dem Potenzial zur Nachverdichtung im erdbau-technischen Sinn entspricht, und dem Verhältniswert  $s/v$  jedoch zunächst nicht ohne weiteres erklärbar.

Aus den Feldversuchen zeigte sich, dass Korrelationen zwischen dem  $s/v$ -Werten und  $E_{vd}$ -Werten oder  $E_{v2}$ -Werten bodenspezifisch gut möglich sind. In der Praxis verwendete Abnahmewerte für eine genügende Verdichtungsleistung, die nicht in der ZTV-E StB niedergeschrieben sind, konnten in etwa bestätigt werden. Es sind hieraus aber keine neuen Erkenntnisse hinsichtlich einer Möglichkeit zur quantitativen Erfassung einer Nachverdichtung oder zur Unterscheidung von Bodenmaterialien zu erkennen. Vielmehr sind der  $E_{vd}$ - und der  $s/v$ -Wert aufgrund der vorliegenden Korrelationen eher als gegenseitig Alternative zu sehen. Ein zusätzliches Abnahmekriterium wäre aus einer erfolgreichen Zuordnung des  $s/v$ -Wertes zum  $E_{v2}/E_{v1}$ -Wert möglich, die nach der Auswertung der in diesem Bericht vorgestellten Feldversuchen jedoch nicht beobachtet wurde. Da die bisherige Einbeziehung des Verhältniswertes  $E_{v2}/E_{v1}$  in die Abnahmekriterien der ZTV-E StB aber auch immer wieder Gegenstand

von Diskussionen in Fachkreisen und umstritten ist, kann die fehlende Zuordnung durchaus auch an einer bodenmechanisch nicht zielführenden Interpretation des Wertes  $E_{V2}/E_{V1}$  hinsichtlich des Verdichtungsgrades  $D_{Pr}$  liegen. Eine unmittelbare Möglichkeit vom  $s/v$ -Wert auf den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  oder auf das Verhältnis  $E_{V2}/E_{V1}$  zu schließen, konnte in dieser Forschungsarbeit nicht erkannt werden und ist - falls überhaupt - nur in engen materialspezifischen Grenzen zu erwarten.

Bei der Bearbeitung der Forschungsarbeit wurden Unterschiede und Probleme bei der Kalibrierung des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgerätes auf verschiedenen Kalibrierständen festgestellt. Signifikante gerätespezifische Unterschiede bestehen. Jedoch spiegeln sich die Unterschiede nach Analyse der vorliegenden Untersuchungen nicht unmittelbar in den Ergebnissen der Feldversuche wieder. Bei einem Gerät wurden messtechnische Probleme bei der Ermittlung des  $s/v$ -Wertes festgestellt, die einer Überprüfung bedürfen. Bei den anderen verwendeten Geräten wurden stimmige und nachvollziehbare Werte erhalten. Soweit die Betrachtung des  $s/v$ -Wertes künftig weiterverfolgt werden soll, ist zu empfehlen, dass auch die Geschwindigkeit in der Vorschrift für die Kalibrierung der Geräte berücksichtigt werden sollte.

## Literatur

- ALPAN, I. (1970): The geotechnical properties of soils; Earth Science Reviews, Jahrgang 6, Heft 1, pp. 5 – 49
- BENZ, T. (2006): Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences; Ph.D. Thesis, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart
- BRANDL, H.; ADAM, D.; KOPF, F. & NIEDERBRUCKER, R. (2003): Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Straßenforschungsauftrag Nr. 3.558, 278 S., Straßenforschung, Band. 533, Wien
- BRANDL, H.; ADAM, D. & KOPF, F. (2007): Die Kalibrierung der dynamischen Lastplatte. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Straßenforschungsauftrag Nr. 3.289, 125 S., Straßenforschung, Band. 561, Wien
- BRÄU, G.; VOGT, S. (2008): Dynamischer Plattendruckversuch mit einem mittelschweren Fallgewichtsgerät; Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen BMVBW, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn, Forschungsbericht FE 05.138, Serie: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft Nr. 1005
- BRÄU, G.; VOGT, S. (2008): Dynamische Prüfverfahren im Erdbau, Erd- und Grundbautagung 2007, FGSV, 7./8. März 2007, Gießen und Ankündigung In: Tagungsband (CD-ROM) „Erd- und Grundbautagung“ (FGSV)
- BRÄU, G.; VOGT, S.; VOGT, N. (2009): Ermittlung der bodenspezifischen Anwendungsgrenzen der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK). In: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen BMVBW, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn, Forschungsbericht FE 05.138, Serie: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft Nr. 1015
- BRÄU, G.; VOGT, S. (2013): Schaffung eines Bewertungshintergrundes für den Nachweis der Tragfähigkeit mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgerät; Schlussbericht zum Forschungsvorhaben BAST FE 06.0094/2011/AGB
- Datenblatt MMF (2016): IEPE-Konditionierungsmodule, Messverstärker M28– 2 S, <http://www.mmf.de/pdf/4-2.pdf>, abgerufen am 19.07.2016
- DIN 18134 (2012): Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN 18125-2 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- FLOSS, R.; WINTER K.; BRÄU G. (1997): Qualitätssicherung von Tonabdichtungen mit der Flächendeckenden Verdichtungskontrolle (FDVK); In: Abfallwirtschafts Journal, Nr. 10
- Handbuch „Material Models“ zum Finite-Elemente Programm PLAXIS; [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl), 2018
- HARTMANN, K.; BRÄU, G. (2003): Aufstellung von Anforderungswerten an den dynamischen Verformungsmodul, Teil 1: Datensammlung und Auswertung. In: Bundesministerium für Verkehr,

- Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 05.114/1998/CGB, 13-68, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Band. 863, Bonn
- HEYER, D. (2012): Die Verdichtungsanforderungen und der Proctorversuch im Erd- und Deponiebau. In: Tagungsband Deponieseminar 2012 – Aktuelles zu Recht und Vollzug, Fachtagung, Augsburg, 25. September 2012
- HEYER, D.; FESTAG, G.; KAYSER, J. (2013): Boden- und Felsklassen oder Homogenbereiche, Erkenntnisse aus den Pilotprojekten, Erd- und Grundbautagung der FGSV, 5.-6. März 2013, Bamberg, S. 84 – 91
- KUDLA, W.; FLOSS, R. (1990): Erprobung des dynamischen Fallplattenversuchs als Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung im Erdbau und für ungebundene Tragschichten; Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen BMVBW, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn, Forschungsbericht FE 05.087
- KUDLA, W.; FLOSS, R.; TRAUTMANN, C. (1991): Dynamischer Lastplattenversuch – Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten; Sonderdruck aus Straße und Autobahn, Heft 42, Bonn
- KUDLA, W.; UHLIG, M. (2014): Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.161/2010/CGB „Ringversuch zur Kalibrierung des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgerätes“
- KRÖHN, T. (2016): Vergleich verschiedener Fallgewichtsgeräte bei der Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls und des s/v-Wertes bei Tragschichtmaterialien, Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (M.Sc.) im Studiengang Ingenieur- und Hydrogeologie, TU München, unveröffentlicht
- Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißern, Köln
- Micro Epsilon: Betriebsanleitung, opto NCDT 2300 – 198 S, <http://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--optoNCDT-2300--de.pdf>, aufgerufen am 28.06.16
- SCHANZ, T.; VERMEER, P., A.; BONNIER P., G. (1999): The hardening soil model: Formulation and verification; Proceedings of the International Symposium „Beyond 2000 in Computational Geotechnics“, Amsterdam, pp. 281 – 296
- TL Gestein-StB 04/07 (2007): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2007; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- TL BuB E-StB 09 (2009): Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe für den Erdbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 2009
- TP Gestein-StB Teil 5.6 (2008): Bestimmung der Festigkeit – Dynamischer CBR-Versuch; Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP BF-StB Teil B 7.1 (2012): Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes; Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- TP Gestein-StB Teil 8.2.1 (2012): Technische Prüfvorschrift für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Dynamischer Plattendruckversuch mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgerät. 10 S., Köln (FGSV)
- TP BF-StB Teil B 8.3 (2012): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Dynamischer Plattendruckversuch mit dem Leichtem Fallgewichtsgerät, Ausgabe 2012; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- TP BF-StB Teil B 8.4 (2016): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Kalibriervorschrift für das Leichte und das Mittelschwere Fallgewichtsgerät. 30 S., Köln (FGSV)
- WEINGART, W. (1978): Theoretische Grundlagen der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung mit Fallgeräten; Die Strasse, Jhg. 18 Heft 9

- WEINGART, W. (2001): Weiterentwicklung der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung mithilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes; Forschungsvorhaben an der Hochschule Anhalt (FH), Veröffentlicht: Mineralstofftagung Köln 2003
- ZTV E-StB 09 (2009): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Ausgabe 2009; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- ZTV E-StB 17 (2017): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Ausgabe 2017; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- ZTV SoB-StB 04 (2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2007; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln

## Bilder

- Bild 2-1: Ausschnitt des radialsymmetrischen Finite-Elemente-Modells mit beispielhafter Darstellung von berechneten Setzungen  $s$  (linker Teil); zeitabhängige dynamische Beanspruchung  $\sigma/\sigma_{\max}$  (t) der Lastplatte als Eingabe in das Finite-Elemente-Modell (rechter Teil)
- Bild 2-2: Rechnerische Ergebnisse zum statischen Plattendruckversuch; Erstbelastungsmodul  $E_{V1}$  (linkes Diagramm) und Wiederbelastungsmodul  $E_{V2}$  (rechtes Diagramm)
- Bild 2-3: Rechnerisches Ergebnis zum Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$
- Bild 2-4: Rechnerisches Ergebnis zu den Moduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  (linkes Diagramm) und zum Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  (rechtes Diagramm) in Abhängigkeit von der Vorbelastung POP
- Bild 2-5: Rechnerisches Ergebnis zum zeitabhängigen Setzungsverlauf (linkes Diagramm) und zur zeitabhängigen Setzungsgeschwindigkeit (rechtes Diagramm) für  $E_{\text{oed,ref}} = 150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP
- Bild 2-6: Spannungsabhängige Setzung für  $E_{\text{oed,ref}} = 150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP
- Bild 2-7: Rechnerisches Ergebnis zum dynamischen Verformungsmodul  $E_{Vd}$  (linkes Diagramm) und zur maximalen Setzungsgeschwindigkeit (rechtes Diagramm) für  $E_{\text{oed,ref}} = 50 \text{ MN/m}^2$ ,  $100 \text{ MN/m}^2$  und  $150 \text{ MN/m}^2$  in Abhängigkeit von verschiedenen Werten der Vorbelastung POP
- Bild 2-8: Rechnerisches Ergebnis zum Verhältniswert  $s/v$  aus dem dynamischen Plattendruckversuch in Abhängigkeit von POP (linkes Diagramm) und in Abhängigkeit vom Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  aus dem statischen Plattendruckversuch (rechtes Diagramm) für  $E_{\text{oed,ref}} = 50 \text{ MN/m}^2$ ,  $100 \text{ MN/m}^2$  und  $150 \text{ MN/m}^2$
- Bild 2-9: Rechnerisches Ergebnis zum Verhältniswert  $\Delta s/s$  aus dem dynamischen Plattendruckversuch in Abhängigkeit von POP (linkes Diagramm) und in Abhängigkeit vom Verhältniswert  $E_{V2}/E_{V1}$  aus dem statischen Plattendruckversuch (rechtes Diagramm) für  $E_{\text{oed,ref}} = 50 \text{ MN/m}^2$ ,  $100 \text{ MN/m}^2$  und  $150 \text{ MN/m}^2$
- Bild 3-1: Montierte Kraftmessdose auf dem Kalibrierstand
- Bild 3-2: Messaufbau Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung
- Bild 4-1: Montagemöglichkeiten der Laser
- Bild 4-2: Messkette für die Kalibrierung der Setzungsmesseinrichtung mit zusätzlichen Laserwegaufnehmern
- Bild 4-3: Messaufbau Laserwegaufnehmer im Gelände
- Bild 4-4: Vergleich induktive Wegmessung und Lasermessung
- Bild 4-5: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, alle Geräte

- Bild 4-6: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, H10
- Bild 4-7: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, H15
- Bild 4-8: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, Z10
- Bild 4-9: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ induktive Wegmessung/Laserwegmessung, Kalibrierstand, Z15
- Bild 4-10: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ Laserwegmessung, Böden, alle Geräte
- Bild 4-11: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ Laserwegmessung, Böden, H10
- Bild 4-12: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ Laserwegmessung, Böden, H15 Geräte
- Bild 4-13: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/ Laserwegmessung, Böden, Z10
- Bild 4-14: Vergleich Wegmessung Fallgewicht/Laserwegmessung, Böden, Z15
- Bild 4-15: Versuchsaufbau Messungen auf Kalibrierstand mit mitschwingender Bodenmasse a); Versuchsaufbau auf Kalibrierstand ohne mitschwingende Bodenmasse b)
- Bild 4-16: Offsetentfernung und Wahl des zu analysierenden Ausschnitts; a.1) Rohsignal des IEPE-Konditionierungsmoduls (roter Kasten: gewählter Ausschnitt); a.2) ungefiltertes Beschleunigungssignal ohne Offset; b.1) Rohsignale der Laser-Wegaufnehmer (roter Kasten: gewählter Ausschnitt); b.2) Setzungssignale der Laser ohne Offset
- Bild 4-17: Beispielhafte Auswertung eines Signals des IEPE-Konditionierungsmoduls bei einem Stoß auf dem Sand-Kies-Gemisch in der Testgrube der TUM; a) Beschleunigungssignal ohne Offset; b) Beschleunigungssignal gefiltert nach BUTTERWORTH; c) Geschwindigkeitssignal aus einfacher Integration des Beschleunigungssignals über die Zeit; d) Setzungssignal aus zweifacher Integration des Beschleunigungssignals über die Zeit; e) Geschwindigkeitssignal mit angewandten Umrechnungsfaktor  $C^*_{Modul}$ ; Bestimmung der maximalen Setzungsgeschwindigkeit aus Minimum der Kurve; f) Setzungssignal mit angewandten Umrechnungsfaktor  $C^*_{Modul}$ ; Bestimmung der maximalen Setzung aus Minimum der Kurve
- Bild 4-18: Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H10 in allen Setzungsbereichen (links); arithmetisches Mittel mit zugehöriger Standardabweichung für alle Setzungsbereiche (rechts)
- Bild 4-19: Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H15 in allen Setzungsbereichen (links); arithmetisches Mittel mit zugehöriger Standardabweichung für alle Setzungsbereiche (rechts)
- Bild 4-20: Über die Setzungen des Laserreferenzsystems berechnete Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H10 auf Bodenmaterialien
- Bild 4-21: Über die Setzungen des Laserreferenzsystems berechnete Kalibrierfaktoren für die Einzelstöße des H15 auf Bodenmaterialien
- Bild 4-22: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 6 mm
- Bild 4-23: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 12 mm
- Bild 4-24: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 24 mm
- Bild 4-25: Schwingungssignale, Kalibrierstand, ohne mitschwingende Bodenmasse, 6 mm
- Bild 4-26: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 12 mm
- Bild 4-27: Schwingungssignale, Kalibrierstand, mit mitschwingender Bodenmasse, 24 mm
- Bild 4-28: Schwingungssignale, Kies unverdichtet
- Bild 4-29: Schwingungssignale, Sand unverdichtet
- Bild 4-30: Aushub auf 45 cm, 30 cm und 15 cm

- Bild 4-31: Einbau dämpfende Zwischenlage in verschiedenen Tiefen
- Bild 4-32: Wiedereinbau Boden, Verdichtung
- Bild 4-33: Fehlstelleneinbau,  $E_v$ - und  $E_{vd}$ -Werte
- Bild 4-34: Fehlstelleneinbau,  $E_{v2}/E_{v1}$ - und  $s_{46}/v_{46}$ -Werte
- Bild 5-1: Schematische Darstellung der angelegten Probefelder
- Bild 5-2: Probefeld TUM Freifläche
- Bild 5-3: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials TUM Freifläche
- Bild 5-4: Vibrationsplatte Wacker DPU 2550
- Bild 5-5: Versuchsdurchführung Probefeld TUM Versuchsrube
- Bild 5-6: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials TUM Versuchsrube
- Bild 5-7: Probefeld TUM Freising, Durchführung der Versuche
- Bild 5-8: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials TUM Freising
- Bild 5-9: Walzenzug Bomag BW 219 DH
- Bild 5-10: Probefeld Kirchheim
- Bild 5-11: Material in Kirchheim zur Erstellung des Probefeldes
- Bild 5-12: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Kirchheim
- Bild 5-13: Im Rahmen der Westtangente Freising erstelltes Probefeld
- Bild 5-14: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Westtangente Freising
- Bild 5-15: Einbau und Verdichtung des Probefeldes Westtangente Freising
- Bild 5-16: Planum Probefeld Pfraundorf
- Bild 5-17: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Deponie Pfraundorf
- Bild 5-18: Verdichtung des Probefeldes Deponie Pfraundorf
- Bild 5-19: Beprobung Probefeld Deponie Pfraundorf
- Bild 5-20: Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung
- Bild 5-21: Probefeld Zeltingen
- Bild 5-22: Material in Zeltingen zur Erstellung des Probefeldes
- Bild 5-23: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Zeltingen (typische Probe)
- Bild 5-24: Probefeld Pfraundorf Schotterwerk
- Bild 5-25: Material Pfraundorf Schotterwerk
- Bild 5-26: Körnungslinie und Proctorkurve des Materials Pfraundorf Schotterwerk
- Bild 5-27: Erstellung eines Probefeldes aus „Grubenkies“ – Einbau (links) und Verdichten (rechts) der zweiten Lage mittels Straßenfertiger „Vögele Super 1900-3“ und Verdichtungswalze „H13i VIO“
- Bild 5-28: Schematische Darstellung der erstellten Versuchsfelder und der Anordnung der Beprobungspunkte – Regelaufbau (nichtmaßstäbliche Darstellung)
- Bild 5-29: Herstellung der Wannenkonstruktion (links) und Erstellung des Versuchsfeldes aus EOS 0/4
- Bild 5-30: Körnungslinien der verwendeten Materialien Schiltberg
- Bild 5-31: Proctorkurven der verwendeten Materialien Schiltberg
- Bild 6-1: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, alle untersuchten Böden
- Bild 6-2: H10, alle Böden
- Bild 6-3: Z10, alle Böden
- Bild 6-4: Mittelschwere Fallgewichtsgeräte H15 und Z15, alle untersuchten Böden
- Bild 6-5: H15, alle Böden
- Bild 6-6: Z15, alle Böden
- Bild 6-7: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, grobkörnige Böden
- Bild 6-8: H10, grobkörnige Böden
- Bild 6-9: Z10, grobkörnige Böden

- Bild 6-10: Mittelschwere Fallgewichtsgeräte H15 und Z15, grobkörnige Böden
- Bild 6-11: H15, grobkörnige Böden
- Bild 6-12: Z15, grobkörnige Böden
- Bild 6-13: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-14: H10, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-15: Z10, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-16: H15, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-17: Z15, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-18: Leichte Fallgewichtsgeräte H10 und Z10, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-19: H10, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-20: Z10, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-21: H15, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-22: Z15, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-23: H15, alle Böden, Setzungsbereich 0,3 mm bis 1,5 mm
- Bild 6-24: Setzung  $s_{46}$  H15/Z15
- Bild 6-25: Geschwindigkeit  $v_{46}$  H15/Z15
- Bild 6-26: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, alle Böden
- Bild 6-27: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, alle Böden
- Bild 6-28: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, Kiese
- Bild 6-29: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, Kiese
- Bild 6-30: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, Sande
- Bild 6-31: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, Sande
- Bild 6-32: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, GU\*, SU)
- Bild 6-33: Statische/dynamische Verformungsmoduln, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, GU\*, SU)
- Bild 6-34: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, Schotter 0/45
- Bild 6-35: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, Schotter 0/45
- Bild 6-36: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-37: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-38: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, RC-Materialien
- Bild 6-39: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, RC-Materialien
- Bild 6-40: Statische/dynamische Verformungsmoduln, LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke
- Bild 6-41: Statische/dynamische Verformungsmoduln, MFG H15 und Z15, Elektroofenschlacke
- Bild 6-42:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Densitometer
- Bild 6-43:  $d E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden, Densitometer
- Bild 6-44:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-45:  $d E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-46:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Densitometer
- Bild 6-47:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Kiese, Densitometer
- Bild 6-48:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-49:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-50:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Sande, Densitometer
- Bild 6-51:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Sande, Densitometer



- Bild 6-52:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Sande, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-53:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Sande, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-54:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, GU\*, SU), Densitometer
- Bild 6-55:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, SU, GU\*), Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-56:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , fein- und gemischtkörnige Böden (Lehm, SU, GU\*), Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-57:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Schotter 0/45, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-58:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Schotter 0/45, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-59:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Densitometer
- Bild 6-60:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, RC-Materialien, Densitometer
- Bild 6-61:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-62:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, RC-Materialien, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-63:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Densitometer
- Bild 6-64:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Elektroofenschlacke, Densitometer
- Bild 6-65:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-66:  $E_{vd2}$  über  $D_{Pr}$ , MFG H15 und Z15, Elektroofenschlacke, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-67:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden
- Bild 6-68:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, alle Böden
- Bild 6-69:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Kies
- Bild 6-70:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Kies
- Bild 6-71:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Sande
- Bild 6-72:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Sande
- Bild 6-73:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Sande (ohne  $E_{v2}$ -Werte  $< 45$  MN/m<sup>2</sup>)
- Bild 6-74:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Sande (ohne  $E_{v2}$ -Werte  $< 45$  MN/m<sup>2</sup>)
- Bild 6-75:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Schotter
- Bild 6-76:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Schotter
- Bild 6-77:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-78:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-79:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke (EOS)
- Bild 6-80:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke (EOS)
- Bild 6-81:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien
- Bild 6-82:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{v2}$ , MFG Z15, RC-Materialien
- Bild 6-83:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Densitometer
- Bild 6-84:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, alle Böden, Densitometer
- Bild 6-85:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-86:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, alle Böden, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-87:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Densitometer
- Bild 6-88:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Kiese, Densitometer
- Bild 6-89:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-90:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Kiese, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-91:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Schotter, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-92:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Schotter, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-93:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Densitometer

- Bild 6-94:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke, Densitometer
- Bild 6-95:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-96:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-97:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Densitometer
- Bild 6-98:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, RC-Materialien, Densitometer
- Bild 6-99:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-100:  $s_{46}/v_{46}$  über  $D_{Pr}$ , MFG Z15, RC-Materialien, Troxler  $t = 30$  cm
- Bild 6-101: Unterschiede Dichtemessungen Troxler/Densitometer bei mineralischen Ersatzbaustoffen
- Bild 6-102: Beschleunigungszeit  $s/v$  in Abhängigkeit vom Verformungsmodul  $E_{vd}$  und dem Dämpfungsbeiwert  $K$  des Bodens (Abb. II. 74 aus ADAM)
- Bild 6-103:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden
- Bild 6-104:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, alle Böden
- Bild 6-105:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Kiese
- Bild 6-106:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Kiese
- Bild 6-107:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Sande
- Bild 6-108:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Sande
- Bild 6-109:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-110:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-111:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Schotter 0/45
- Bild 6-112:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Schotter 0/45
- Bild 6-113:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-114:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Mineralische Ersatzbaustoffe
- Bild 6-115:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien
- Bild 6-116:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, RC-Materialien
- Bild 6-117:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke
- Bild 6-118:  $s_{46}/v_{46}$  zu  $E_{vd2}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke
- Bild 6-119:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden
- Bild 6-120:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, alle Böden
- Bild 6-121:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Kiese
- Bild 6-122:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, Kiese
- Bild 6-123:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Sande
- Bild 6-124:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, Sande
- Bild 6-125:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Schotter
- Bild 6-126:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, Schotter
- Bild 6-127:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-128:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, fein- und gemischtkörnige Böden
- Bild 6-129:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Elektroofenschlacke
- Bild 6-130:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, Elektroofenschlacke
- Bild 6-131:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, RC-Materialien
- Bild 6-132:  $s_{46}/v_{46}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, RC-Materialien
- Bild 6-133:  $E_{vd2}/E_{vd1}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Kies
- Bild 6-134:  $E_{vd2}/E_{vd1}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG H15 und Z15, Kies

- Bild 6-135:  $E_{vd2}/E_{VD1a}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Kies
- Bild 6-136:  $E_{vd2}/E_{VD1a}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG Z15, Kies
- Bild 6-137:  $E_{VD3}/E_{vd2}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Kies
- Bild 6-138:  $E_{VD3}/E_{vd2}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG H15 und Z15, Kies
- Bild 6-139:  $E_{VD4}/E_{VD3}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, Kies
- Bild 6-140:  $E_{VD4}/E_{VD3}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG H15 und Z15, Kies
- Bild 6-141:  $E_{vd2}/E_{VD1}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden
- Bild 6-142:  $E_{vd2}/E_{VD1}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden
- Bild 6-143:  $E_{vd2}/E_{VD1a}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, alle Böden
- Bild 6-144:  $E_{vd2}/E_{VD1a}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG H15 und Z15, alle Böden
- Bild 6-145:  $E_{VD3}/E_{VD1a}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , LFG H10 und Z10, grobkörnige Böden
- Bild 6-146:  $E_{VD3}/E_{VD1a}$  über  $E_{v2}/E_{v1}$ , MFG H15 und Z15, grobkörnige Böden
- Bild 6-147: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG H10
- Bild 6-148: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10
- Bild 6-149: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG Z10
- Bild 6-150: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10
- Bild 6-151: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG H15
- Bild 6-152: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG Z15
- Bild 6-153: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15
- Bild 6-154: Liegezeiteinfluss Kies, Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG Z10
- Bild 6-155: Liegezeiteinfluss Kies, Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10
- Bild 6-156: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG H10
- Bild 6-157: Wassergehaltsänderung Kies, Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10
- Bild 6-158: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG Z10
- Bild 6-159: Wassergehaltsänderung Kies, Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10
- Bild 6-160: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG H15
- Bild 6-161: Wassergehaltsänderung Kies, Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG Z15
- Bild 6-162: Wassergehaltsänderung Kies, Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15
- Bild 6-163: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG H10
- Bild 6-164: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10
- Bild 6-165: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG Z10
- Bild 6-166: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10
- Bild 6-167: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG H15
- Bild 6-168: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG Z15
- Bild 6-169: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15
- Bild 6-170: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG H10
- Bild 6-171: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG H10
- Bild 6-172: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , LFG Z10
- Bild 6-173: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , LFG Z10
- Bild 6-174: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG H15

Bild 6-175: Verformungsmoduln  $E_{vd2}$  und  $E_{v2}$ , MFG Z15

Bild 6-176: Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  und  $s_{46}/v_{46}$ , MFG Z15

## Tabellen

Tab. 2-1: Stoffmodellparameter des HS-Modells nach SCHANZ et al. (1999)

Tab. 3-1: Vorgaben Stoßkraft und Stoßdauer gemäß TP BF-StB Teil B 8.4 2016: Tab. 1

Tab. 3-2: Wahl der zu verwendenden Setzungsmatten für unterschiedliche Setzungsbereiche (nach TP BF-StB Teil B 8.4 (2016))

Tab. 3-3: Verwendete Fallgewichtsgeräte

Tab. 4-1: Einstellungen für IIR-Filter (nach TP BF-StB Teil B 8.4 (2016)).

Tab. 4-2: Zusammenstellung der Umrechnungsfaktoren  $C^*MODUL$  für Kalibrierstand und Feld

Tab. 4-3: Messwerte Fehlstelleneinbau

Tab. 5-1: Stoffliche Zusammensetzung Bauschuttgemisch Kirchheim

Tab. 5-2: Stoffliche Zusammensetzung Bauschuttgemisch Kirchheim

Tab. 5-3: Stoffliche Zusammensetzung RC-M 0/45

Tab. 5-4: Stoffliche Zusammensetzung RC-M 0/56

Tab. 5-5: Zusammenstellung der Materialien für Probefelder

Tab. 6-1: Gruppenzuordnung der verwendeten Materialien

Tab. 6-2: Verwendete Abkürzungen bei Probefeldern

Tab. 6-3: Steigungen  $E_{vd2}/E_{v2}$

Tab. 6-4: Regressionswerte  $E_{v2}/E_{vd2}$

Tab. 6-5:  $E_{vd2}$ -Wert für verschiedene  $E_{v2}$ -Anforderungswerte

Tab. 6-6: Setzungs-/Geschwindigkeitsverhältnis  $s_{46}/v_{46}$  für verschiedene  $E_{v2}$  - Anforderungswerte

Tab. 6-7: Setzungs-/Geschwindigkeitsverhältnis  $s_{46}/v_{46}$  für Anforderungswert  $E_{v2}/E_{v1} = 2,5 \text{ MN/m}^2$

Tab. 6-8: Sand II, Mittelwerte der Veränderungen Z10 und LPV

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2017

#### S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

#### S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

#### S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

#### S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

#### S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)

Alisov, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

#### S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

#### S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

#### S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**  
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost € 15,50

S 136: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**

Augter, Kayser € 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.