

**Fachbereich 13 Bauingenieurwesen und Geodäsie**

Bachelor of Science: Bauingenieurwesen und Geodäsie

von Sirko Lehmann

**Thema:**

**UNTERSUCHUNG ZUR KORRELATION  
ZWISCHEN STATISCHEN UND  
DYNAMISCHEN  
PLATTENDRUCKVERSUCHEN**

*Investigation of the correlation between static and dynamic plate load tests*

**Abgabe:** 16.12.2011

**Betreuer:** Professor Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Dipl.-Ing. Steffen Leppla

**Verfasser:** Sirko Lehmann (Matrikel Nummer 1460199)

## Inhaltsverzeichnis

1.	Problemstellung und Einleitung .....	4
2.	Arten von Verdichtungskontrollen .....	5
3.	Statischer Plattendruckversuch.....	7
3.1	Aufbau des Versuchsgerätes .....	8
3.2	Durchführung des statischen Versuches .....	9
3.3	Anforderungen an das Gegengewicht.....	12
3.4	Auswertung des statischen Versuches.....	14
4.	Dynamischer Plattendruckversuch.....	16
4.1	Aufbau des Versuchsgerätes .....	17
4.2	Durchführung des dynamischen Versuches .....	19
4.3	Auswertung des dynamischen Versuches .....	20
5.	Vergleich zwischen den Geräten .....	21
6.	Bekannte Korrelationen aus der Fachliteratur.....	25
6.1	Korrelationen für alle Baumaterialien.....	26
6.2	Mögliche Korrelationen von rolligen Materialien .....	28
6.2.1	Korrelationen von Sand .....	28
6.2.2	Korrelationen von Kies .....	30
6.2.3	Korrelationen von rolligen Materialien (aus Österreich) .....	31
6.3	Korrelation von bindigen und gemischtkörnigen Materialien .....	32
6.4	Korrelation von verbessertem Planum.....	33
6.5	In der Literatur festgehaltene Versuchsdaten .....	35
7.	Versuche.....	36
7.1	Verwendete Geräte .....	37
7.2	Eigene Versuche an der TU Darmstadt .....	38
7.3	Eigene Versuche .....	41
7.4	Zur Verfügung gestellte Versuche .....	43
8.	Auswertung der Literatur und Versuchsergebnisse .....	45
8.1	Auswertung der Literaturdaten.....	45
8.1.1	Auswertung der Literaturdaten für rollige Materialien .....	45
8.1.2	Korrelation für bindiges und gemischtkörniges Material.....	47
8.1.3	Auswertung der Literaturdaten für verbessertes/verfestigtes Material .....	48
8.1.4	Auswertung der Literaturdaten aus Österreich .....	49
8.2	Auswertung der Versuchsdaten .....	51

8.2.1	Versuchsauswertung für Sand.....	52
8.2.2	Versuchsauswertung für Kies .....	54
8.2.3	Versuchsauswertung für bindige Materialien .....	57
8.2.4	Versuchsauswertung für verbesserte Materialien .....	58
8.2.5	Versuchsauswertung für geschichtete Materialien .....	60
8.2.6	Verdichtungsverhältnis.....	63
9.	Schlussfolgerung und Zusammenfassung .....	66
10.	Danksagung .....	71
11.	Verzeichnisse .....	72
11.1	Abkürzungsverzeichnis .....	72
11.2	Literaturverzeichnis .....	73
11.3	Abbildungsverzeichnis .....	76
11.4	Tabellenverzeichnis .....	78
12.	Anhang.....	79
13.	Eidesstattliche Erklärung .....	80

## 1. Problemstellung und Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem statischen und dem dynamischen Lastplattendruckversuch und der Frage, ob es zwischen beiden eine Korrelation gibt. Die beiden genannten Versuche sind in-situ Versuche, welche als Ergebnis einen Verformungsmodul ( $E_v$ ) der oberen Bodenschicht(en) liefern. Mit dessen Hilfe wird die Tragfähigkeit für verschiedenste Aufgabenstellung (z.B. Verkehrsanlagen, Gründungspolster, Dämme und Verfüllungen) beurteilt. Sie dienen also zur Prüfung der Tragfähigkeit natürlicher Böden (z.B. Planum) hauptsächlich aber zur Kontrolle von Verdichtungsarbeiten.

Der statische Lastplattendruckversuch ist der ältere der Beiden und daher bereits seit langem normiert und anerkannt. „In jüngster Zeit finden auch Varianten des Plattendruckversuchs [...] in der Praxis Anwendung, die sog. dynamischen Plattendruckversuche.“<sup>1</sup> Mit der Aussagekraft des dynamischen Plattendruckversuches, insbesondere im Verhältnis zum statischen Plattendruckversuch, befasst sich diese Arbeit.

Es gibt bereits viele Überlegungen, wie man die Ergebnisse ( $E_{vd}$ -Wert) des wesentlich kompakteren, schnelleren und billigeren dynamischen Versuches in den/die  $E_v$ -Wert(e) des statischen Versuchs überführen kann<sup>2</sup>.

In dieser Arbeit werden verschiedene Korrelations- und Vergleichsansätze aus der Literatur gesammelt, bewertet und mit eigenen Versuchen verglichen. Wenn möglich, sollen hieraus neue oder verbesserte Korrelationen aufgestellt werden.

Als Basis dieser Arbeit dienen neben den normativen Grundlagen<sup>3,4</sup> und einer umfangreichen Literaturrecherche, ältere, bereits erfasste und eigene Versuche.

Derzeit gilt für den statischen Plattendruckversuch in Deutschland die DIN 18134-01, wobei der Entwurf einer Neufassung bereits 2010 erschienen ist, auf welche daher auch eingegangen wird.

Die neuste Regel für die dynamischen Plattendruckversuche in Deutschland bildet die TP BF-StB Teil B 8.3 (1992).

Im Folgenden werden die beiden Versuche nacheinander beschrieben und ein Überblick über die der Arbeit zugrunde liegende Literatur gegeben. Danach werden die vorliegenden und eigenen Versuche systematisch erfasst und geordnet. Letztendlich wird ein Fazit gezogen, welches die Ergebnisse der Analyse kompakt und übersichtlich zusammenträgt.

---

<sup>1</sup>Grundbau Taschenbuch, Teil 2, S.40 Kapitel 8.2 Absatz 2 (Witt, 2009)

<sup>2</sup>Grundbau Taschenbuch, Teil 2, Abschnitt 8.3.3 (Witt, 2009)

<sup>3</sup>DIN 18134:2001-09 (e.V. D. I., 2001) und E DIN 18134:2010-04 (e.V. D. I., 2010)

<sup>4</sup>ZTV E-StB 09 (Straßenbau, 2009)

## 2. Arten von Verdichtungskontrollen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit folgenden Versuchsverfahren:

- Statischer Lastplattendruckversuch (*nach DIN 18134*)
  - Plattengröße 300mm Durchmesser
- Dynamischer Lastplattendruckversuch (*nach TP BF-StB Teil B 8.3*)
  - Leichtes Fallgewicht (10 kg), Plattengröße 300mm Durchmesser

Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe von weiteren Möglichkeiten für Verdichtungskontrollen. Diese sind in Labor- und Feldversuche unterteilbar, wobei die oben genannten in die letztere Kategorie gehören. Eine Auswahl der am häufigsten angewandten, weiteren Verfahren folgt:

### Feldversuche

- Statischer Lastplattendruckversuch (*ebenso nach DIN 18134*)
  - Plattengröße 600 mm Durchmesser
  - Plattengröße 762 mm Durchmesser
- Dynamischer Lastplattendruckversuch (*aus Weingart, 2003 und 2000*)
  - Leichtes Fallgewicht (10 kg), Plattengröße 150mm Durchmesser
  - Mittelschweres Fallgewicht (15 kg), Plattengröße 300mm Durchmesser
  - Mittelschweres Fallgewicht (15 kg), Plattengröße 150mm Durchmesser
  - Schweres Fallgewichtsgerät
- California Bearing Ratio-Versuch (CBR) (*aus Grundbau Taschenbuch*)
  - Statischer CBR-Versuch
  - Dynamischer CBR-Versuch
- Flächenverdichtungskontrolle (in der Walze integrierte Kontrolle) (*nach BF-StB, Teil E2*)
- Rammsondierungen (*nach DIN 4094 und DIN EN ISO 22476-2*)
  - Leichte Rammsonde
  - Mittelschwere Rammsonde
  - Schwere Rammsonde
- Drucksondierungen (*nach DIN 4094-1*)

### Laborversuche

- Dichtebestimmung
  - an ungestörten Proben
  - mit Ersatzverfahren (Sand/Wasser)
  - mit Densitometer
- Proctorversuch, als Vergleichsverfahren (*nach DIN 18127*)
- California Bearing Ratio-Versuch (CBR) (*nach DIN EN 13286-47*)
  - CBR-Versuch

Wie bereits erklärt, beschränkt sich diese Arbeit auf die Korrelation zwischen dem statischen und dem dynamischen Lastplattendruckversuch. Im Rahmen dieser Arbeit bietet es sich an, einen Lastplattendurchmesser von 300mm für die Korrelation zu wählen. Gründe hierfür sind zum einen, dass die Versuche mit diesem Plattendurchmesser am häufigsten im Einsatz sind und dass es beide Geräte mit diesem Lastplattendurchmesser gibt. Dadurch ist außerdem die maximale Messtiefe  $t_{\max}$  identisch, was für eine Korrelation ohne unnötige zusätzliche Einflussfaktoren unabdingbar ist. Die Messtiefe des Lastplattendruckversuches kann mit dem doppelten Plattendurchmesser angenommen werden. Dies ist der bekannte Bereich der möglichen Einflusstiefe von herkömmlichen Setzungsberechnungen. Außerdem wurde diese auch experimentell bestimmt<sup>5</sup>.

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die Ähnlichkeit der Lastplatten der beiden Versuche.



Abbildung 1: statische Lastplatte



Abbildung 2: dynamische Lastplatte

Außerdem beschränkt sich diese Arbeit auf das am häufigsten eingesetzte leichte Fallgewicht. Die Grundaussage zur Korrelation kann auf die anderen Plattendurchmesser grundsätzlich angewandt werden, es müssen nur zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden<sup>6</sup>, z.B. unterschiedliche Messtiefen.

---

<sup>5</sup> OIAZ Heft 4-5 (Dipl.-Ing. Dr.techn. Kopf, Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Adam, & Dipl.-Ing. Pulmichi, 2005)

<sup>6</sup> (Dipl.-Ing. Weingart, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Elastizität, Viskosität und Festigkeit von Erdstabilisierungen mit Hilfe einer registrierten Kleinschlagsonde, 1977)

### 3. Statischer Plattendruckversuch

Erfunden wurde der statische Plattendruckversuch (static plate load test) in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. Er dient zur Bestimmung des sogenannten Verformungsmoduls  $E_v$  sowie des Bettungsmoduls  $k_s$ .

Anwendbar ist der Versuch auf allen ebenen Flächen. Einzelne Bauteile des Versuchsgerätes sind auf den Temperaturbereich von  $0^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$  geeicht, weswegen eine Verwendung bei anderen Temperaturen nicht zulässig ist. Eine Anwendung in anderen Temperaturbereichen sollte daher mit einem zuständigen Eichamt abgestimmt und das Gerät dann auf diese Temperatur kalibriert werden. Außerdem ist zu beachten, dass der Versuch auf bindigem, breiigem, weichem oder flüssigem Boden nicht angewandt werden darf, da der Einfluss der flüssigen Phase auf die Versuchsergebnisse hier zu groß ist. Direkt unter der Platte dürfen auch keine Körner  $> \frac{1}{4} d$  ( $d$  = Lastplattendurchmesser) sein. Gestörte Zonen sind vor der Durchführung zu entfernen (verkrusteter Sand oder ähnliche, zum Beispiel spröde Materialien)<sup>7</sup>. Des Weiteren muss das Versuchsgelände für das Gegengewicht zugänglich sein. Wird zum Beispiel ein Bagger als Gegengewicht verwendet, so muss dieser die zu prüfende Stelle erreichen können.

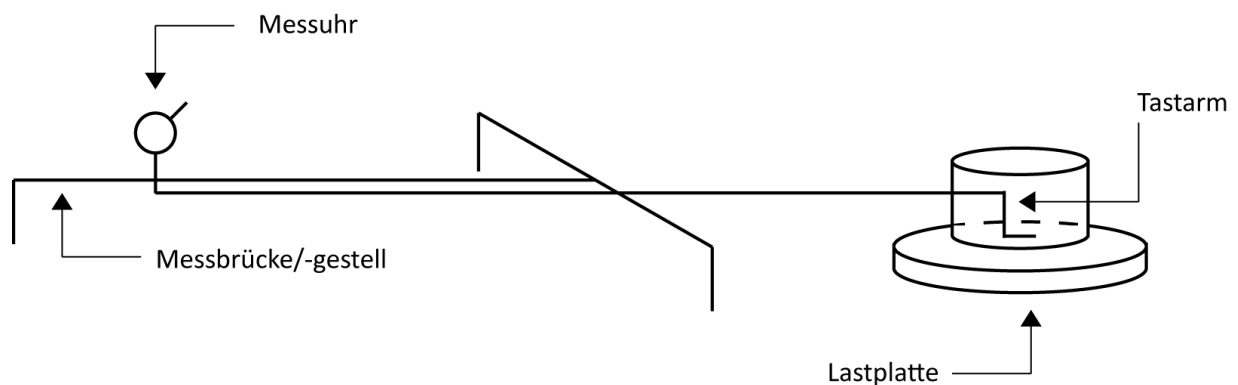


Abbildung 3: Prinzipskizze des statischen Lastplattendruckversuchs

In Abbildung 3 sind die maßgebenden Bestandteile des statischen Prüfgerätes abgebildet. Das Gegengewicht steht während des Versuches über der Platte und wird mittels hydraulischen Hubzylinders mit der Platte und damit dem Versuchsgerät kraftschlüssig verbunden, siehe dazu auch Abbildung 4.

<sup>7</sup> DIN 18134, :2001-09 Seite 7 (e.V. D. I., 2001), E DIN 18134, Seite 11 (e.V. D. I., 2010)

<sup>6.1</sup> DIN 18134:2001-09, Kapitel 7.2 (e.V. D. I., 2001)

### 3.1 Aufbau des Versuchsgerätes

Das statische Plattendruckversuchsgerät besteht aus folgenden Teilen<sup>8</sup>:

- festes Widerlager/Gegengewicht (die Nutzlast muss mind. 10kN größer als die größte Prüflast sein. Das Gegengewicht gehört nicht zum Gerät, ist für den Versuchsaufbau aber notwendig, siehe hierzu Kapitel 3.3)
- Stahlplatte (mit dem Durchmesser  $300 \pm 0,5$  mm und einer Dicke von  $25 \pm 0,2$  mm aus S355J0)
- Kraftmessdose oder Manometer (Fehlergrenze höchstens 1% der Maximallast)
- Hydraulikzylinder mit hydraulischer Pumpe (der Hydraulikschlauch muss mind. 2m Länge haben, die Zylinderausfahrhöhe darf 150mm nicht unterschreiten)
- Verlängerungselemente/-stücke (mit unterschiedlicher Höhe, Gesamthöhe 1m)
- Messbrücke/Messgestell (Dreipunktauflager, mit Libelle)
- Setzungsmesseinrichtung, Messuhr(en) (im Messbereich von  $10 \pm 0,04$ mm)
- Computer mit Drucker (ist bei neueren Geräten Standard, jedoch nicht notwendig für den Versuch)
- Weitere Hilfsmittel, die nicht zum Versuchsgerät gehören, sind unter anderem Spaten, Maurerkelle und trockener Mittelsand

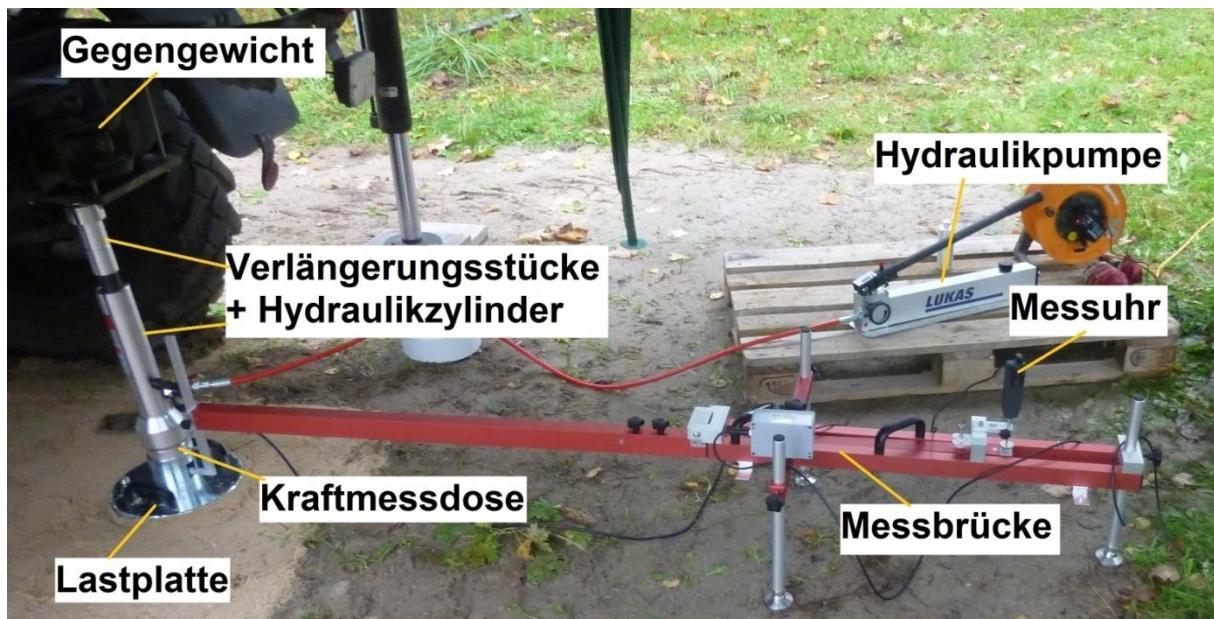


Abbildung 4: Versuchsaufbau des statischen Plattendruckversuchsgerätes

Es gibt zwei unterschiedliche Bauarten des Versuchsgerätes. Beim Ersten wird die Setzung direkt gemessen und bei dem Zweiten wird sie über ein Hebelarmverhältnis rückgerechnet (in Abbildung 4 ist Letzteres zu sehen). Das Hebelarmverhältnis darf nicht größer als 2m sein und ist im Protokoll zu vermerken, des Weiteren muss es fest und formschlüssig einstellbar sein.

<sup>8</sup> DIN 18134:2001-09, Seite 3ff (e.V. D. I., 2001) und E DIN 18134:2010-04 (e.V. D. I., 2010)



Mithilfe eines Tastarmes wird eine Messbrücke mit der Platte verbunden (siehe Abbildung 3), wobei der Tastarm mittig auf der Platte aufsitzen muss. Am Ende der Messbrücke befindet sich ein Messgerät (z.B. Messuhr), welches die Setzung der Platte anzeigt. Bei der alternativen Bauweise befindet sich die Messuhr direkt auf der Platte und wird von der Messbrücke (welche in beiden Fällen als Referenzpunkt dient) auf der Platte gehalten.

Vor dem Jahr 2001, als die derzeit gültige Norm DIN 18134:2001-09 in Kraft getreten ist, war es üblich, Versuchsgeräte mit drei bis vier Messuhren, welche auf der Platte verteilt waren, einzusetzen. Mit der oben genannten Norm ist in Deutschland ein Gerät mit einer Uhr festgelegt worden. Diese Uhr muss jedoch in der Plattenmitte den Weg abnehmen. Die Geräte mit mehreren Uhren nehmen die Setzung der Platte an verschiedenen Punkten auf, deren Ergebnisse werden gemittelt und eine Gesamtverschiebung errechnet. Ein Vorteil dieser aufwendigeren Variante, wie sie zum Beispiel in Österreich noch immer vorwiegend eingesetzt wird, ist die Beurteilung der Verkippung der Platte während des Versuches. Neuere deutsche Geräte können dies mit einer an der Platte montierten Libelle zumindest anzeigen.

## 3.2 Durchführung des statischen Versuches

Vor der Durchführung ist als Erstes darauf zu achten, dass der Prüfpunkt für das Gegengewicht frei zugänglich ist. Das Gegengewicht muss über den Messpunkt gebracht werden. Vom Rahmen des Gegengewichtes, gegen das gedrückt wird, kann mithilfe eines Lotes oder eines Kieskorns im freien Fall der Mittelpunkt der Platte bestimmt werden.

Der zu prüfende Untergrund muss vor Versuchsbeginn möglichst eben sein. Dazu sollten lose Bodenteile entfernt und der Untergrund zum Beispiel mit einer Maurerkelle plan gezogen werden. Bei starken Unebenheiten kann eine „wenige Millimeter dicke Schicht aus trockenem Mittelsand“<sup>9</sup> aufgebracht werden. Damit die Platte satt aufsitzt, ist es empfehlenswert, sie vorher auf den Boden drückend zu drehen. Dadurch verteilen sich die kleineren Körner des Bodens (oder des Sandes) in Plattennähe besser.

Danach kann die Messbrücke aufgebaut werden, wobei darauf zu achten ist, dass sie absolut horizontal steht. Dabei muss der Tastarm mittig auf der Platte sitzen und die Messuhr sollte zu Beginn auf Null gestellt werden. Hinweis: Der Nullpunkt der Messung ist nach DIN 18134:2001-09 bei einer Belastung von  $0,01\text{MN/m}^2$  definiert. Das heißt, die Belastungseinrichtung muss vorher aufgebaut und mit der vorgegebenen Kraft leicht fixiert werden. Das verhindert zum Beispiel auch ein Umfallen der Konstruktion bei der „Laststufe 0“, der Entlastung. Es sollte darauf geachtet werden, dass der Tastarm während des Aufbaus nicht fest mit der Messbrücke verbunden ist, sondern erst nach Justierung in Plattenmitte und Ausrichtung der Messbrücke befestigt wird. Dies vermeidet unnötige Spannungen im Geräteaufbau.

---

<sup>9</sup> DIN 18134 (e.V. D. I., 2001) und (e.V. D. I., 2010)



Prüfstelle vorbereiten (mit Ausgleichsschicht)



Prüfplatte satt aufsetzen



Kraftmessdose auf die Platte aufsetzen.



Hydraulikzylinder aufsetzen und Platte andrücken



Tastarm mittig auf der Lastplatte positionieren



Messbrücke aufstellen und ausrichten

Abbildung 5: Versuchsdurchführung, genauer Aufbau des statischen Prüfgerätes

Jetzt kann damit begonnen werden, die Erstbelastung aufzubringen. Diese sollte in sechs ungefähr gleich großen Lastintervallen bis zur Maximalspannung (siehe Tabelle 1) erhöht werden. Die folgende Entlastung kann in „drei Stufen – 50%, 25%, 0%“<sup>10</sup> erfolgen. Die Wiederbelastung darf nur bis zur vorletzten Belastungsstufe erfolgen, da sonst nicht garantiert werden kann, dass die Werte für den Wiederbelastungsbereich gelten.<sup>11</sup> Bevor nun die Laststufen nacheinander aufgebracht werden, sollte nochmal überprüft werden, ob alle Schrauben fest sind (z.B. die des Tastarmes oder die des Hebelarmverhältnisses) und alle Messeinrichtungen genullt sind (Messuhr und Belastungsanzeige).

Die Laststufenänderung sollte dabei binnen Minutenfrist vollzogen werden. Der Spannungswert muss zwei Minuten, im Verkehrswegebau eine Minute lang gehalten werden. Unter Umständen ist ein Nachpumpen nötig.<sup>12</sup> Außergewöhnliche Versuchsergebnisse (z.B.: unerwartet große Verformungen) sollten nach Ende des Versuchs vermerkt werden. Weitere Klärungen sind dann z.B. durch einen Schurf herbeizuführen.



Abbildung 6: statisches Druckversuchsgerät während einer Messung

<sup>10</sup> DIN 18134:2001-09, Kapitel 7.5.2, 1. Absatz (e.V. D. I., 2001)

<sup>11</sup> DIN 18134:2001-09, Seite 8 (e.V. D. I., 2001)

<sup>12</sup> DIN 18134 (e.V. D. I., 2001) und (e.V. D. I., 2010)

### 3.3 Anforderungen an das Gegengewicht

Die nutzbare Last (z.B. Achslast) muss mindestens 10kN größer, als die höchste Prüflast sein.

Durchmesser [mm]	$\sigma_{\max}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$s_{\max}$ [mm]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Kraft [kN]	rechnerische Gesamtkraft [kN]	empfohlene Mindestmasse [t]
300	0,5	5	0,071	35,343	45,343	5
600	0,25	8	0,283	70,686	80,686	9
762	0,2	13	0,456	91,207	101,207	11

Tabelle 1: Anforderungen an das Gewicht des Gegengewichtes des LPs

Die Werte in der Tabelle sind mit Hilfe der diesbezüglich identischen Normen DIN 18134:2001-09 und DIN 18134:2010-04 berechnet.

Hinweis: Werden die maximalen Setzungen  $s_{\max}$  vor den maximalen Spannungen  $\sigma_{\max}$  erreicht, so ist die Spannung an dieser Stelle als maximale Spannung zu betrachten.

Weitere Anforderungen an das Gegengewicht sind:

- Freie Mindesthöhe unter dem Lasteinleitungspunkt [die Platte, Kraftmessdose und der Hydraulikzylinder müssen darunter passen (prüfgerätabhängig)]
- Freie Maximalhöhe unter dem Lasteinleitungspunkt [die freie Mindesthöhe + 1m (normativ zugelassene Verlängerungsstücke)]
- Abstand der Lastplatte zur Aufstandsfläche des Belastungswiderlagers: mind.  $0,75m^{13}$ , der Abstand  $M_{\text{Lastplatte}} - \text{Achse}_{\text{Auflager}}$  muss  $1500 \pm 5 \text{ mm}$  betragen<sup>14</sup> bzw. zwischen 1,5 und 1,6m liegen<sup>15</sup>

Damit eignen sich als Gegengewicht zum Beispiel Hydraulikbagger, beladene LKWs, Walzen oder vorhandene feste Widerlager. Das Gesamtgewicht ist nicht maßgeblich, sondern das mobilisierbare Gewicht (z.B. Achslast). Dies ist im Einzelnen zu prüfen, bevor die Messung beginnt, da sonst das Gegengewicht angehoben und die normgemäße Maximallast nicht aufgebracht werden kann (angehobene Dampfwalze, links und angehobener Stützenfuß, rechts, siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: angehobenes Gegengewicht

<sup>13</sup> DIN 18134:2001-09, Kapitel 7.2, 3. Absatz (e.V. D. I., 2001) und S.12 E DIN 18134:2010-04 (e.V. D. I., 2010)

<sup>14</sup> DIN 18134:2001-09, Seite 3 ff. (e.V. D. I., 2001)

<sup>15</sup> DIN 18134:2010-04, Seite 9 (e.V. D. I., 2010)

Beim statischen Lastplattendruckversuch mit beweglichem Gegengewicht (z.B.: LKW) ist das in Abbildung 8 gezeigte Problem des Setzungsmuldeneffektes, zu berücksichtigen.

Das Gegengewicht, welches auf dem zu prüfenden Baugrund steht, verursacht eine Setzungsmulde. Diese verfälscht das Ergebnis des statischen Verformungsmoduls leicht. Der Effekt ist nicht gut mathematisch fassbar, da das Gegengewicht bei den Versuchen nicht identisch ist (meist ein Baugerät, wie z.B. LKW, Bagger, Walze, welches gerade auf der Baustelle zur Verfügung steht). Außerdem ist der Versuchsaufbau nur selten so ideal symmetrisch wie in Abbildung 8. Meist wird aus praktischen/technischen Gründen zum Beispiel etwas außermittig geprüft, da sonst z.B. die Anhängerkupplung im Weg ist (siehe Abbildung 9). Der in Abbildung 8 beschriebene Kurzschlusseffekt führt zu einer Überschätzung des Verformungsmoduls<sup>16</sup>.

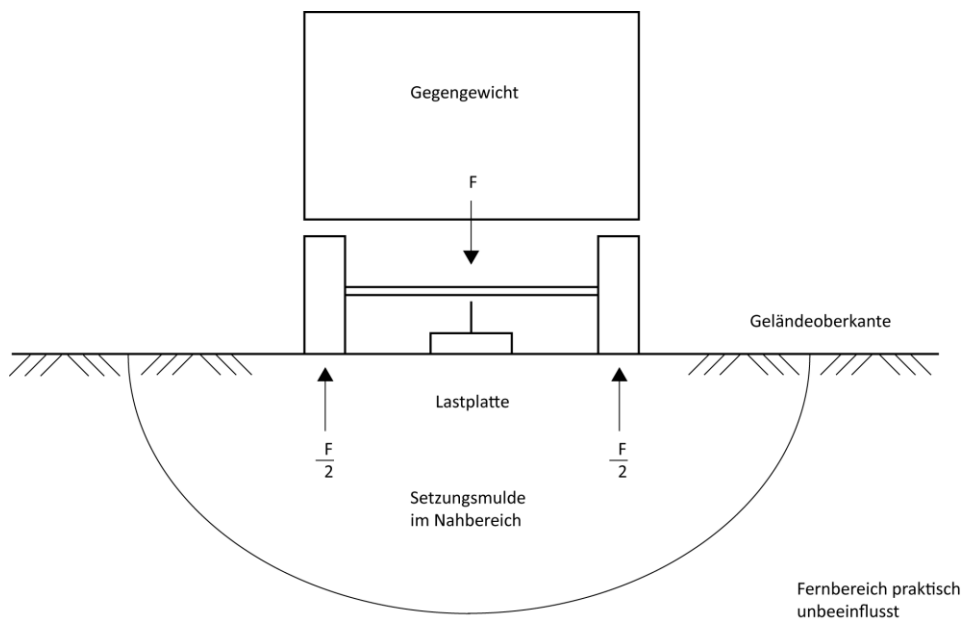


Abbildung 8: Setzungsmuldeneffekt beim statischen Lastplattendruckversuch

Wird nun das Gegengewicht durch die hydraulische Presse nach oben gedrückt, entsteht eine Kraftumlagerung (Durchlaufträger) und die Radlasten sinken, was eine Schwächung des Setzungsmuldeneffektes zur Ursache hat. Diese Schwächung geht in die Setzungsmessung mit ein, da die Messbrücke in der Regel nicht außerhalb der Setzungsmulde steht.



Walze



Bagger



LKW

Abbildung 9: Verschiedene Gegengewichte

<sup>16</sup> (Dipl.-Ing. Dr.techn. Kopf, Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Adam, & Dipl.-Ing. Pulmichi, 2005)

### 3.4 Auswertung des statischen Versuches

Die Messungen der Setzungen werden mit den zugehörigen Normalspannungsstufen als Drucksetzungslinie in ein Diagramm eingetragen, wobei auf der Abszisse die Normalspannung ( $\sigma_0$ ) in MN/m<sup>2</sup> und auf der Ordinate die Setzung (s) in mm (nach unten positiv zählend) angegeben wird. Gegebenenfalls (wenn die Setzung über ein Hebelarmverhältnis gemessen wird) muss die gemessene Setzung mittels der Formel:

$$s = s_M \frac{h_P}{h_M} \quad 17$$

rückgerechnet werden, bevor sie ins Diagramm eingetragen werden kann. Aus diesem Graphen können mit Hilfe eines Polynoms 2. Grades ausgleichende Drucksetzungslinien berechnet und damit der Verformungsmodul  $E_V$  bestimmt werden.

$$s = a_0 + a_1 \sigma_0 + a_2 \sigma_0^2 \quad (\text{Polynom 2. Grades})$$

$a_0$  bis  $a_2$  sind Konstanten des Polynoms 2. Grades, deren Berechnung in der DIN 18134:2001-09 im Anhang B angegeben ist.

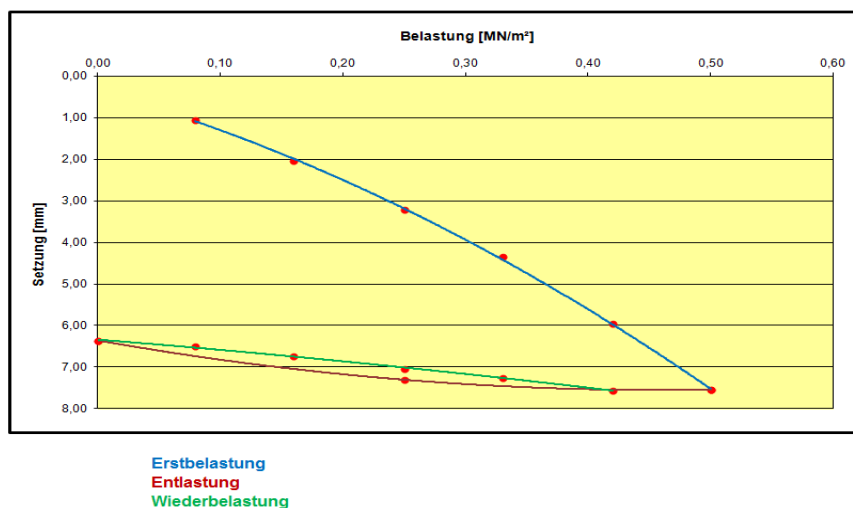


Abbildung 10: Beispiel für eine Spannungs-Plattenverschiebungs-Beziehung

Der Verformungsmodul  $E_V$  wird nun über folgende Gleichung berechnet:

$$E_V = 1,5 r \frac{1}{a_1 + a_2 * \sigma_{0max}} \quad 18$$

$r$  ist der Radius der Lastplatte und  $\sigma_{0max}$  die maximale mittlere Normalspannung (siehe Kapitel 3.3). Wegen des Kurzschluss effektes wird in manchen Literaturquellen bezweifelt, dass der  $E_V$ -Wert ein exakter Bodenkennwert ist<sup>19</sup>.

<sup>17</sup> DIN 18134:2001-09 Gleichung (1) (e.V. D. I., 2001)

<sup>18</sup> DIN 18134:2001-09 Gleichung (3) (e.V. D. I., 2001)

<sup>19</sup> (Dipl.-Ing. Dr.techn. Kopf, Univ.DoZ. Dipl.-Ing. Dr.techn. Adam, & Dipl.-Ing. Pulmichi, 2005)

Aus den Faktoren  $a_1$  und  $a_2$  der Erstbelastung (gewöhnlich mit dem Index „1“ bezeichnet) lässt sich nach oben genannter Formel der Verformungsmodul der Erstbelastung ( $E_{v1}$ ) berechnen, analog dazu aus den Faktoren  $a_1$  und  $a_2$  der Zweitbelastung (gewöhnlich mit dem Index „2“ bezeichnet) der Verformungsmodul der Wiederbelastung ( $E_{v2}$ ).

In den meisten in Deutschland gültigen Regeln und Normen werden an den Zweitbelastungswert  $E_{v2}$  Anforderungen gestellt, nach denen man das Prüflos abnimmt oder ablehnt.

Des Weiteren ist es möglich den Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  zu bilden, der ein Maß für die Verdichtung darstellt. Entspricht der Verhältniswert ungefähr dem in Tabelle 2, so gilt der Baugrund in der Regel als gut verdichtet. Bei einem Wert über dem Tabellenwert ist die Verdichtung i.d.R. nicht als gut zu bewerten. Es ist dabei zu beachten, dass der  $E_{v2}/E_{v1}$ -Wert auch durch das Erhöhen des Kraftschlusses zwischen Platte und Boden nach der Erstbelastung beeinflusst wird<sup>20</sup> (bessere Kraftübertragung möglich).

Bodengruppe	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}/E_{v1}$ [-]
GW, GI	$\geq 100$	$\leq 2,3$
	$\geq 80$	$\leq 2,5$
	$\geq 70$	$\leq 2,6$
GE, SE, SW, SI	$\geq 80$	$\leq 2,3$
	$\geq 70$	$\leq 2,5$
	$\geq 60$	$\leq 2,6$

Falls der  $E_{v1}$ -Wert bereits 60% des o.g.  $E_{v2}$ -Werts erreicht, sind auch höhere Verhältniswerte  $E_{v2}/E_{v1}$  zulässig

Tabelle 2: Verdichtungsgrade in Abhängigkeit von Boden und  $E_{v2}$ -Wert (ZTV E-StB 09)

<sup>20</sup> (Dipl.-Ing. Dr.techn. Kopf, Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Adam, & Dipl.-Ing. Pulmichi, 2005)

## 4. Dynamischer Plattendruckversuch

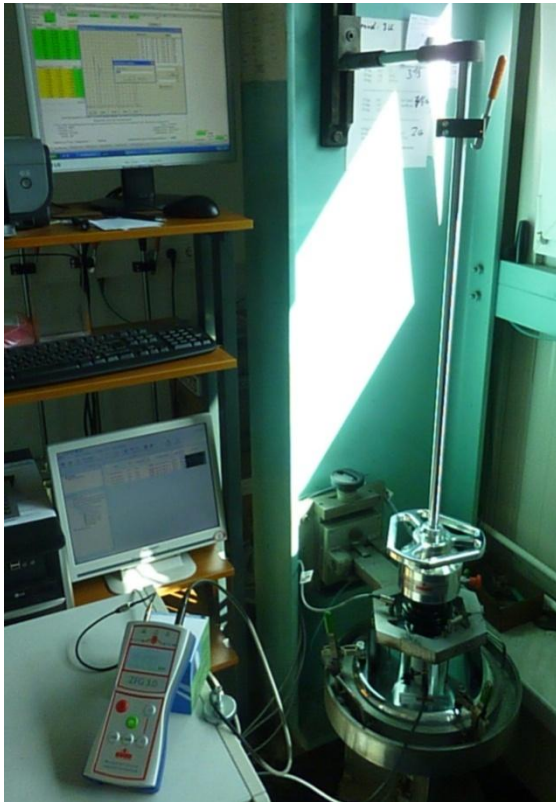


Abbildung 11: Leichtes Fallgewichtsgesetz auf dem Kalibrierungsprüfstand bei ZORN-Instruments

Aus dem Bereich des Straßenbaus kommt der Wunsch, eine Methode zu haben, den „Verformungsmodul“ möglichst auf die dynamischen Verkehrsbelastungen einer Straße zu beziehen. Diesem Wunsch folgend beschäftigte sich Weingart 1977 in seiner Dissertation mit diesem Thema.

Um das Jahr 1990 ging die im Rahmen der genannten Arbeit entwickelte Idee, als Innovation, in den neuen Bundesländern in die Produktion. Seit einiger Zeit wird der dynamische Lastplattendruckversuch (dynamic plat load test), vor allem der mit dem leichten Fallgewichtsgesetz, als Alternative für den statischen Plattendruckversuch verwendet. Das gültige Regelwerk sind die Technischen Prüfvorschriften für den Straßenbau (TP BF-StB Teil B 8.3).

Als charakteristische Belastungsannahme dient ein fahrender Lastkraftwagen (LKW). Festgelegt wurde die Prüflast mit  $0,1 \text{ MN/m}^2$ , was eben jenem LKW mit einem Gewicht von 10 t und einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h entspricht.<sup>21</sup>

Der Anwendungsbereich des dynamischen Geräts ist dem des Statischen sehr ähnlich. Der Temperaturbereich ist ebenfalls (z.B. wegen der Kalibrierung von Fallhöhe, Federstärke und Federvorspannung) von  $0^\circ$  bis  $40^\circ\text{C}$  festgelegt. Das Messen auf bindigen, breiigen, weichen oder flüssigen Böden ist nicht zulässig, da auch hier der Einfluss der flüssigen Phase auf die Versuchsergebnisse zu groß ist. Auch dürfen direkt unter der Platte keine Körner  $> \frac{1}{4} d$  ( $d$  = Lastplattendurchmesser) und der Anteil der Körner  $> 63 \text{ mm}$  muss vernachlässigbar sein. Gestörte Zonen sind vor der Durchführung zu entfernen (verkrusteter Sand oder ähnliche, zum Beispiel spröde Materialien). Eine durch den Stoß erzeugte Querverschiebung der Platte (z.B.: an einem Hang) ist nicht zulässig. In diesem Fall ist der Versuch nicht wertbar.<sup>22</sup>

Laut Vorschrift ist das Prüfgerät mindestens einmal jährlich beim Hersteller zu kalibrieren (siehe Bild oben). Dort wird die Fallhöhe nachjustiert und die Federspannung neu eingestellt, außerdem werden die Sensoren auf Funktion geprüft.

<sup>21</sup> Laut Gespräch mit Herrn Rönnebeck von der Firma Zorn Instruments

<sup>22</sup> TP BF-StB Teil B 8.3 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1992)



## 4.1 Aufbau des Versuchsgerätes

Das dynamische Lastplattendruckversuchsgerät besteht aus folgenden Teilen (siehe dazu auch Abbildung 12):

- Stahlplatte (Durchmesser 300 mm, mit einer Dicke von 20 mm oder 17mm mit 15mm dicker Verstärkungsplatte  $D=150\text{mm}$   $m=15\pm 0,25\text{kg}$  oder 150 mm, früher, bis Ende 1994, 340 mm<sup>23</sup>, mit integriertem Wegaufnehmer in Form eines Beschleunigungs- oder Bewegungssensors, der im Frequenzbereich 8 bis 100 Hz maximal 2% Messungenauigkeit hat).
- Fallgewicht (leichtes Fallgewicht:  $10\text{kg}\pm 0,1\text{kg}$ )
- Führungsstange (mit Ein- und Ausklinkvorrichtung,  $5\text{kg}\pm 0,25\text{kg}$ )
- Tellerfederpaket (meist 16-17 Tellerfedern aus Stahl oder Gummi, verdreht angeordnet)
- Computer (oftmals mit integriertem Drucker, der Rechner wird mit der Platte verbunden und druckt das Ergebnis am Ende aus)
- Sackkarre (neuere Geräte haben meist eine Art Sackkarre, um das Gerät leichter von Punkt zu Punkt transportieren zu können)
- Weitere Hilfsmittel, die nicht zum Versuchsgerät gehören sind unter anderem Spaten, Maurerkelle und trockener Mittelsand

Das Tellerfederpaket ist mit der Fallstange fest verbunden und fixiert das Fallgewicht auf der Stange. Das Tellerfederpaket kann dank Umkippsicherung sicher direkt auf der Lastplatte aufgestellt werden. Dort befindet sich eine Zentrierkugel (siehe Abbildung 2) wodurch nur Druckkräfte auf den Boden übertragen werden können. Ein versehentliches Abheben der Platte vom Boden nach dem Rückstoß des Fallgewichts nach oben ist daher ausgeschlossen.

- Die Stoßdauer  $t_s$  ist mit  $18\pm 2\text{ms}$  festgelegt
- Die Stoßkraft  $F_s$  mit  $7,07\text{kN}$ 
  - Daraus folgt eine Spannung von  $0,1\text{MN}/\text{m}^2$

Eine Untersuchung der Temperaturanfälligkeit der verschiedenen Gerätebauarten (Stahl- und Gummifeder) zeigt, dass Gummifedern viel empfindlicher sind als Stahlfedern und daher weniger zuverlässige Ergebnisse liefern. Es kommt hinzu, dass nur die Stahlfedern vorgespannt werden können.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> TP BF-StB Teil 8.3, Vorwort (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1992)

<sup>24</sup> (Adam, Kopf, & Adam, Der dynamische Lastplattendruckversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät - Theoretische und experimentelle Untersuchungen, 2004)

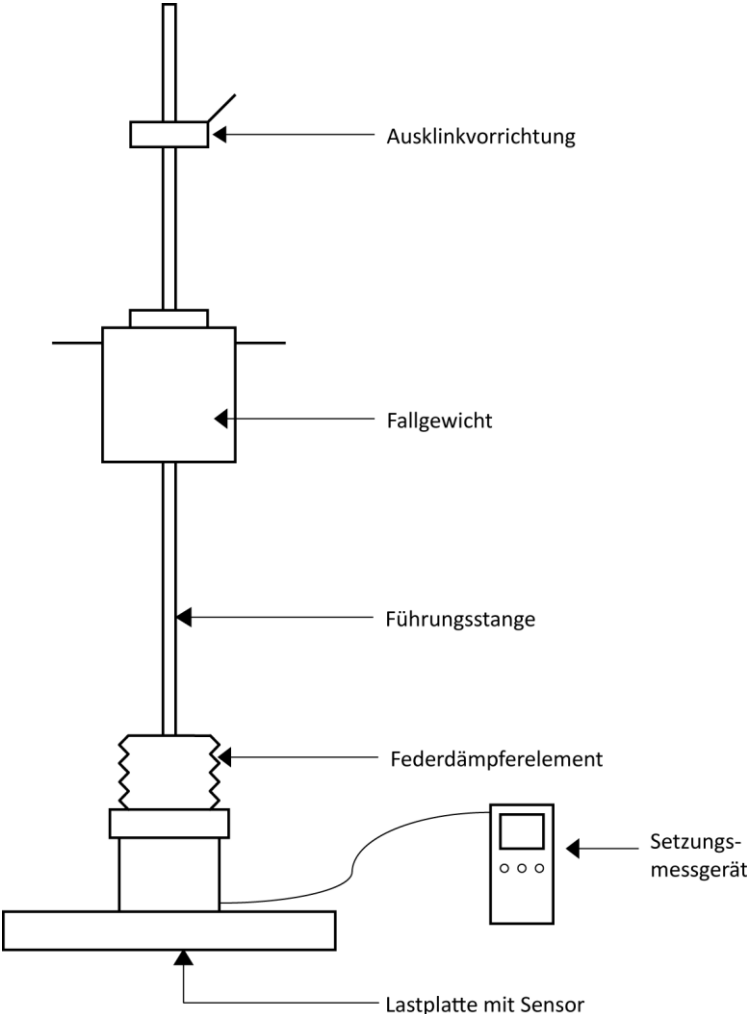


Abbildung 12: Prinzipskizze des dynamischen Leichten Fallgewichtsgerätes

## 4.2 Durchführung des dynamischen Versuches

Der Aufbau des dynamischen Plattendruckgerätes ist für den Anwender leichter zu handhaben als der Statische. Die Lastplatte muss formschlüssig (eventuell mit Hilfe einer Ausgleichsschicht aus trockenem Mittelsand) auf die Prüfstelle gelegt werden. Dann kann die Stange mit Fallgewicht aufgesetzt und der Computer mittels Kabel an der Platte angeschlossen werden. Nach dem Einschalten des Computers ist das Gerät einsatzbereit.



Abbildung 13: Platte des dynamischen Gerätes



Abbildung 14: dynamisches Druckversuchsgerät während einer Messung

Die Durchführung des Versuches ist genau geregelt, wobei der Computer dem Benutzer genaue Anweisungen zur Durchführung gibt. Bevor die Messungen beginnen, wird der Boden durch dreimaliges Fallenlassen des Fallgewichtes vorverdichtet. Sowohl beim Vorverdichten, als auch bei den Messungen muss das Fallgewicht senkrecht auf die Lastplatte fallen, dazu ist eine Libelle am Gerät angebracht (meist an der Ausklinkvorrichtung). Danach beginnt die Messung, auch diese wird dreimal durchgeführt, um Messungenauigkeiten möglichst gering zu halten.

Zu Beginn wird das Fallgewicht an der Ausklinkvorrichtung eingerastet und dann mittels Hebel fallen gelassen. Das Tellerfederpaket am Ende der Stange schleudert das Fallgewicht wieder nach oben, wo es vom Anwender gefangen werden muss. Wird das Gewicht nicht wieder gefangen, schlägt es erneut auf und erzeugt einen Doppelstoß, welcher die Messung beeinflusst und zu Fehlern führt.

### 4.3 Auswertung des dynamischen Versuches

Die Auswertung des dynamischen Plattendruckversuches ist einfach, da der Computer den  $E_{vd}$ -Wert bereits angibt. Aus diesem Grund eignet sich der Versuch auch für Laien der Geotechnik gut als Prüfverfahren<sup>25</sup>.

In der Lastplatte befindet sich ein Beschleunigungs- oder Bewegungsaufnehmer (bauartabhängig), welcher die beim Impuls gemessene Beschleunigung oder Geschwindigkeit der Platte misst und an den Computer weitergibt. Der Computer berechnet aus diesem Wert die Setzung, die der Impuls hervorgerufen hat. Die Berechnung ist eine ein- bis zweifache Integration über die Zeit.<sup>26</sup>

$$\iint a \, dt = \iint \ddot{s} \, dt = \int v \, dt = \int \dot{s} \, dt = s$$

Aus den drei Messungen wird das arithmetische Mittel ( $s_m$ ) gebildet. Nach der Formel

$$E_{vd} = 1,5 * r \frac{\sigma}{s_m} \quad 27$$

wird der dynamische Verformungsmodul berechnet. Mit den festgelegten Konstruktionsmerkmalen des dynamischen leichten Fallgewichtsgerätes lässt sich die Formel zu

$$E_{vd} = 22,5/s_m$$

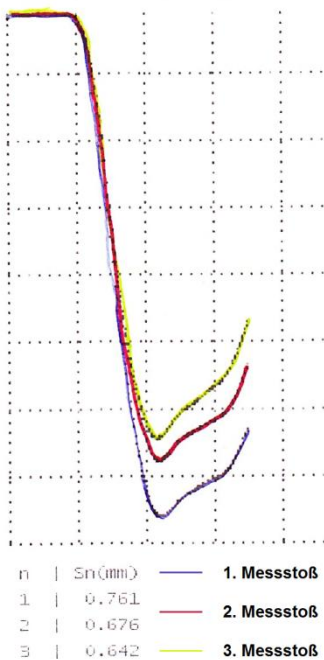


Abbildung 15: typischer Verlauf der Zeit-Verformungskurven

vereinfachen. Ein oftmals integrierter Drucker druckt die Ergebnisse samt Zeit-Verformungskurve aus. Neuere Geräte geben sogar die Gauss-Krüger-Koordinaten mit an.

Der Wert  $E_{vd}$ , den das Gerät ausgibt, ist ein Maß für die Tragfähigkeit des Bodens. Neuere Geräte geben einen  $s/v$ -Wert an. Dieser ist ein Maß für die Verdichtbarkeit des Bodens. Es ist hierbei darauf zu achten, dass die Verdichtbarkeit nichts mit dem Verdichtungsgrad ( $E_{v2}/E_{v1}$ ) des statischen Versuches zu tun hat. Er gibt lediglich die Möglichkeit an, wie weit der Boden noch verdichtet werden kann (wie viel Reserven vorhanden sind).

Der empfohlener Grenzwert für das  $s/v$ -Verhältnis liegt bei  $s/v > 3,5$  ms.<sup>28</sup> Der dynamische Plattendruckversuch ist laut Prüfvorschrift auf  $E_{vd} \leq 70$  MN/m<sup>2</sup>, begrenzt. Nach Weingart (2003) ist er aber unter Umständen noch bis  $E_{vd} < 120$  oder  $150$  MN/m<sup>2</sup> anwendbar. Nach Kopf (2002) von 15 bis 80MN/m<sup>2</sup>.

<sup>25</sup>Neue Landschaft, S. 42f (Mair, 2005)

<sup>26</sup>Grundbau Taschenbuch, Teil 2, Kapitel 8.2 (Witt, 2009)

<sup>27</sup>Handbuch der Baugeologie und Geotechnik, S.123 (Dachroth, 2002)

<sup>28</sup>(Dipl.-Ing. Weingart, Dynamischer Plattendruckversuch im Straßenoberbau, 2003)

## 5. Vergleich zwischen den Geräten

In den Kapiteln drei (statischer Lastplattendruckversuch) und vier (dynamischer Lastplattendruckversuch), wurden die beiden Versuche genauestens vorgestellt. Als Grundlage für die Korrelation dient als Erstes ein Vergleich der beiden Geräte (siehe nachfolgende Tabelle):

Eigenschaft	Statisches Gerät	Leichtes Fallgewichtsgerät	Fazit
Lastplattengröße	300 mm	300 mm	identisch
Bodenpressung	0,5 MN/m <sup>2</sup>	0,1 MN/m <sup>2</sup>	die Belastung des statischen Gerätes ist größer, die des Dynamischen kann aufgerüstet werden
Messbereich/ Eindringtiefe/ (siehe Abbildung 16)	ca. 600 mm	ca. 600 mm	identisch
Einsetzbarkeit	Prüfstelle muss für das Gegengewicht erreichbar sein	nahezu überall	Gegengewicht spielt große Rolle, Vorteil für LFG
Einsatzgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0° bis 40°C</li> <li>• bindiges, weiches bis flüssiges Material ist nicht zulässig</li> <li>• keine Körner &gt; ¼ d und der Anteil der Körner &gt; 63 mm muss vernachlässigbar sein</li> <li>• gestörte Zonen entfernen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0° bis 40°C</li> <li>• bindiges, weiches bis flüssiges Material ist nicht zulässig</li> <li>• keine Körner &gt; ¼ d und der Anteil der Körner &gt; 63 mm muss vernachlässigbar sein</li> <li>• gestörte Zonen entfernen</li> </ul>	identisch
Aufbau	relativ komplexer Aufbau des Versuchsgerätes (für Laien kaum ausführbar)	Kompakt und einfach (für Laien ausführbar)	Vorteil für LFG (für Laien leichter)
Vibrationsempfindlichkeit (z.B. Baustellenverkehr)	sehr hoch, da der Versuch nicht/nur schlecht abgebrochen werden kann	hoch	Vorteil für LFG
Versuchsdauer/ Versuchskosten/ Anschaffungskosten	ca. 1/2 h ca. 100 € ~3500,00 € netto	ca. 5 min ca. 50 € ~5000,00 € netto	Vorteil für LFG
Zusatzkosten	Vorhaltekosten für Gegengewicht	keine	Vorteil für LFG
Wartung	einmal jährlich	einmal jährlich	identisch
Ergebnis	$E_{v1}, E_{v2}, E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd}, (v/s)$	-

Tabelle 3: Vergleich der Geräteeigenschaften

Der Messbereich der beiden Geräte ist nahezu identisch. Die Tiefe  $t$  lässt sich mit ungefähr dem doppelten Lastplattendurchmesser zu rund 60cm Tiefe bestimmen. Seitliche Einwirkungen sind von der Geländeoberkante noch ungefähr bis zu einem Winkel von  $\psi = 40^\circ$  messbar<sup>29</sup>.

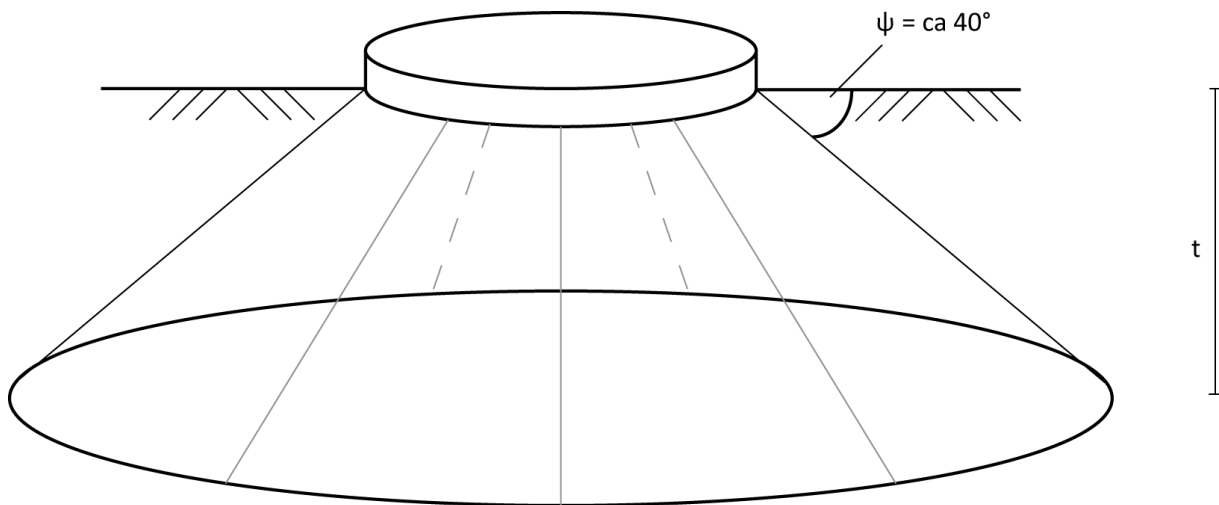


Abbildung 16: Messbereich des statischen und des dynamischen Lastplattendruckversuches

In der Bewertung in Tabelle 3 schneidet das Dynamische Leichte Fallgewichtsgerät deutlich besser ab. Allerdings hat es auch den großen Nachteil, dass der Messbereich der Pressung um das Fünffache kleiner ist, als der des Statischen.

Davon abgesehen muss bei einer Korrelation die Frage gestellt werden, ob der kurze dynamische Impuls und die deutlich länger anhaltende statische Belastung angewandt auf das 3-Phasen-Medium Boden hinreichend ähnliche Effekte haben. Insbesondere für bindige Böden ist zu prüfen, ob bzw. in welchem Umfang eine Konsolidation stattfindet. Solche Untersuchungen sind aber nicht Thema dieser Abreit.

Bei einer normalen statischen Setzung treten drei verschiedene Setzungen auf (Sofort-, Primär- und Sekundärsetzung). Es ist anzunehmen, dass die Sekundärsetzung (Kriechen) auch bei der relativ kurzen Belastungszeit des statischen Versuches keine signifikante Rolle spielt. Allerdings ist es denkbar, dass der statische Versuch zumindest einen Teil der Primärsetzung mit misst. Es ist jedoch nicht bekannt, ob das LFG mit seiner hohen Geschwindigkeit diese ebenfalls oder zu gleichen Teilen misst, wie der Statische.

Der dynamische Versuch ist nach ZTV T alle 600m<sup>2</sup> nachzuweisen, der Statische nur alle 6000m<sup>2</sup>. Das ist jedoch auch der Versuchsdauer und der -kosten zuzuschreiben. Dadurch ist ein durch LFG geprüftes Gebiet mit mehr Stichproben geprüft als eines mit LP-Versuchen.

<sup>29</sup> OIAZ Österreichische Ingenieur und Architekten-Zeitschrift Heft 4-5/2005, Kapitel „Untersuchungen des statischen Lastplattendruckversuches mit der Randelementemethode“ und Untersuchungen des dynamischen Lastplattendruckversuches mit dem Leichten Fallgewichtsgerät unter Verwendung der Randelementemethode“

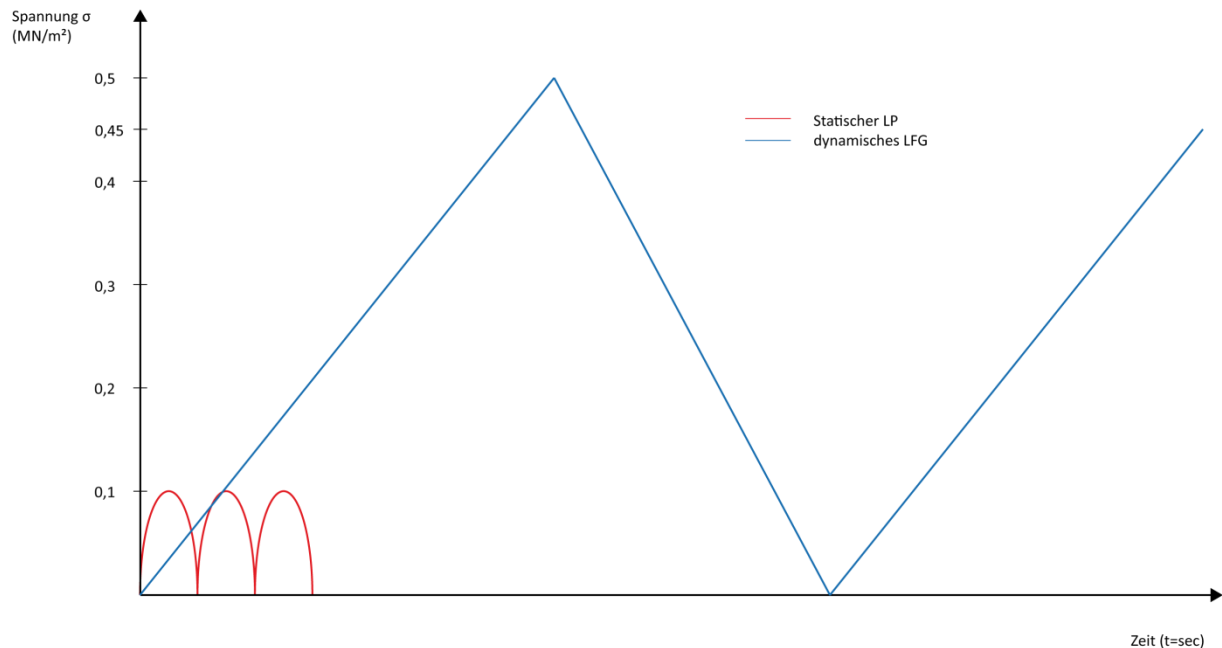


Abbildung 17: qualitative Spannungs-/Zeitverläufe im Vergleich

Wie man anhand Abbildung 17 gut sehen kann, sind die Kraftverläufe der beiden Versuche deutlich unterschiedlich.

- Die Maximallast des statischen Versuchs ist größer (ca. fünf Mal)
- Die dynamische Last setzt sich aus drei kurzen Impulsen zusammen, die gemittelt werden.
- Es gibt bei beiden Be- und Entlastung, sowie Erst- und Wiederbelastung.

Allerdings ist bei der letzten Aussage darauf hinzuweisen, dass das dynamische Gerät den zweiten und dritten Messstoß nicht als Wiederbelastung misst, sondern die drei Stöße statistisch ausgewertet. Außerdem ist zu beachten, dass die „Wiederbelastung“ abermals bis zur Maximallast geht, weswegen es nicht auszuschließen ist, dass der Erstbelastungsbereich mit in die Messung eingeht. Des Weiteren wird nur jeweils ein Wert gemessen.

Die Anforderungen an das zu prüfende Material sind für beide Geräte sehr ähnlich, so dass es auch bei beiden Geräten ähnliche Effekte zu berücksichtigen gibt:

Wichtig für beide Versuche ist, dass das Material nicht direkt nach dem Verdichten (ca. 48h Ruhephase) geprüft werden sollte, da es in der Praxis unbestritten ist, dass in dieser Zeit der Verformungsmodul zunimmt. Dieser Effekt gilt vor allem für Materialien die mit z.B. Kalk beaufschlagt wurden, um eine höhere Tragfähigkeit zu erzielen.

Ein weiteres Problem der beiden Versuchstypen ist die Durchführung auf geschichtetem Baugrund, bei dem die Homogenität nicht gewährleistet ist<sup>30</sup>. Siehe dazu auch Kapitel 8.2.5.

Zu guter Letzt ist die Kornform von zentraler Bedeutung für die Tragfähigkeit eines rolligen Materials.

<sup>30</sup> OIAZ Heft 4-5 (Dipl.-Ing. Dr.techn. Kopf, Univ.DoZ. Dipl.-Ing. Dr.techn. Adam, & Dipl.-Ing. Pulmichi, 2005)

Beschrieben wird dieser Effekt oft von Geogitterherstellern. An dieser Stelle ist die eigentliche Aussage, dass der Schichtaufbau geringer sein muss, wenn man das Material mit Geogittern bewährt. Es werden dabei auch unbewährte Schichtaufbauten betrachtet, diese können hier verwendet werden. Bei grobkörnigen rolligen Materialien, ist die Kornform auch maßgebend für das Verformungsverhalten. So können Körner mit gerundeten Kanten besser aneinander vorbeigleiten, wenn sie belastet werden, als scharfkantige Körner. Bei Letzteren bildet sich ein Verkeilungseffekt aus, der die Tragfähigkeit erhöht.

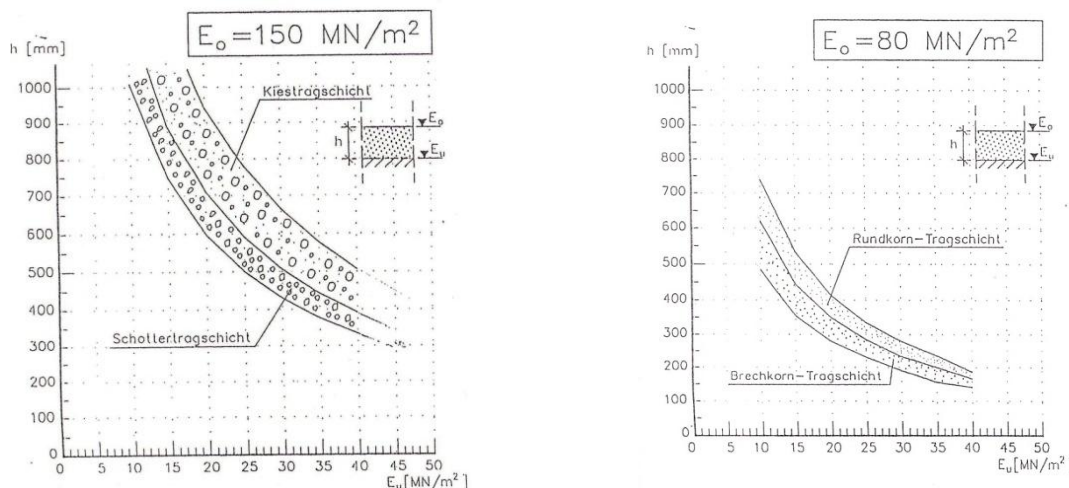
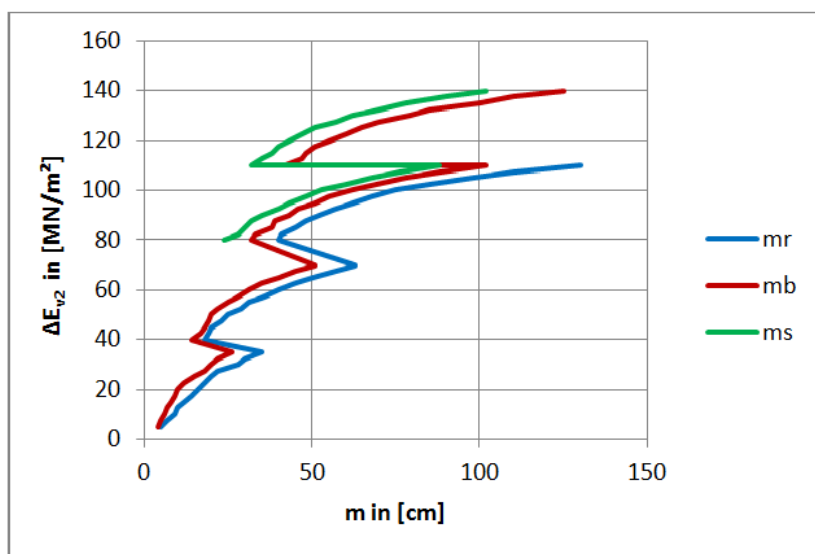


Abbildung 18: Darstellung der Schichtdicke im Verhältnis zur  $E_{v2}$ -Werterhöhung für die verschiedenen Kornformen (Tensar)

In den  $E_{vd}$  zu  $E_{v2}$  Korrelationen aus der Literatur wird dieser Effekt oft vernachlässigt. Es wird meist nur die Korngröße angegeben (z.B. Kies oder GW). Es ist daher anzunehmen, dass sich der Effekt ähnlich oder gleich auf den statischen und den dynamischen Verformungsmodul auswirkt.

Verschiedene Hersteller für Geogitter geben den Anwendern für unterschiedliche Kornformen unterschiedliche Schichtdicken an, die benötigt werden um den  $E_{v2}$ -Wert zu erhöhen. Dabei werden sowohl Werte für mit Geogittern bewehrte Materialien, als auch Werte für Materialien ohne Geogitter angegeben. In den folgenden Abbildungen sind diese zur Veranschaulichung dargestellt, Die genauen Werte sind im Anhang (S. L bis LII) zu finden.



Kurzzeichen	Bedeutung
mr	Rundkorn Sand
mb	Breckkorn Kies
ms	Schotter

$$\Delta E_{v2} = E_{v2, \text{Oben}} - E_{v2, \text{Unten}}$$

Hinweis: Die Sprünge im Graphen ergeben sich, da an diesen Stellen  $E_{v2, \text{Oben}}$  geändert wird.

Abbildung 19: Darstellung der Schichtdicke im Verhältnis zur  $E_{v2}$ -Werterhöhung für die verschiedenen Kornformen (NAUE)



## 6. Bekannte Korrelationen aus der Fachliteratur

Eine Liste von nun an benutzter Fachtermini und deren Definition sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Als Überbegriff für alle Bodenarten wird hier der Begriff Material eingeführt. Es sollte dabei beachtet werden, dass sich der Begriff in dieser Arbeit tatsächlich nur auf Böden und bodenartige Baustoffe bezieht.

<i>Material</i>	<i>Definition (alle Einheiten in mm)</i>	
rollige Böden/Baustoffe		
Kies (Gr, früher G)	Kornform: gerundete	2,0 – 63,0
Schotter	Kornform: kantige	
Sand (Sa, früher S)	0,063 – 2,0	
bindige Böden/Baustoffe		
Schluff (Si, früher U)	0,002 – 0,063	
Ton (Cl, früher T)	< 0,002	

Tabelle 4: Materialdefinitionen

Die meisten Versuchsdaten wurden noch nach alter Norm DIN 4022 und DIN 18196 erfasst und aufgestellt. Daher sind die Daten in den vereinheitlichten Versuchsprotokollen im Anhang noch so aufgeführt. Im Text und in den Tabellen des Textes werden die Bezeichnungen nach aktueller DIN EN ISO 14688-1 angegeben.

Die umfangreiche Literaturrecherche zum Thema Korrelationen von statischen und dynamischen Versuchen liefert eine Bandbreite an Korrelationen, welche hier wiedergegeben werden. Als Erstes fällt auf, dass den Korrelationen unterschiedliche Randbedingungen zugrunde liegen.

Oft werden Korrelationen nur für bestimmte Materialien geltend angegeben, also für Sand (Sa) eine andere Korrelation als für Kies (Gr). Oft (meist in den Richtlinien der ZTV) ist das Material zusätzlich noch in weit, eng und intermittiert gestufte Materialien unterteilt. Diese werden dann zu Gruppen zusammengefasst. Außerdem wird oft eine „gute“ Verdichtung, welche aber nicht genau definiert ist, vorausgesetzt. Des Weiteren werden häufig nur Wertepaare angegeben und nicht eine Formel, mit der man jeden beliebigen Wert umrechnen kann.

Nicht angegeben ist in der Regel die Mächtigkeit  $m$  der Schicht auf der geprüft wird. Es ist daher anzunehmen, dass sie mindestens die Einwirktiefe hat ( $m \geq t_{\max}$ ). Für ein- oder mehrfach geschichteten Untergrund gibt es keine Korrelationen in der Literatur.

Die bekannteste Korrelation ist die „Faustformel“  $E_{v2} = 2 \cdot E_{vd}$ . Diese hat sich auch in der Praxis durchgesetzt, da man sie problemlos direkt auf der Baustelle anwenden kann.

Ein interessanter Fakt ist, dass wenn man die österreichischen und die deutschen Korrelationsansätze vergleicht, in Österreich der  $E_{vd}$ -Wert mit dem  $E_{v1}$ -Wert und nicht wie in Deutschland mit dem  $E_{v2}$ -Wert korreliert wird.

Bereits 1983 (Bodenmechanik, Bobe) gab es für nichtbindige Kiese und Sande Korrelationen zwischen den beiden Versuchen. Man unterschied aber nur anhand der Ungleichförmigkeitszahl (größer oder kleiner gleich 3), für beide Werte waren dann jeweils Zahlen angegeben. ( $U \leq 3$ :  $E_{vd} = 40 \text{ N/mm}^2 \rightarrow E_{v2} = 50 \text{ N/mm}^2$  und  $U > 3$ :  $E_{vd} = 50 \text{ N/mm}^2 \rightarrow E_{v2} = 60 \text{ N/mm}^2$ )

## 6.1 Korrelationen für alle Baumaterialien

Die bisher genannten Daten beziehen sich nahezu ausschließlich auf rollige Materialien, welche in Sande und Kiese getrennt wurden. Neben den bereits genannten Korrelationen gibt es auch noch weitere Ansätze, welche keine Materialbeschränkung aufweisen (siehe Abbildung 20).

Quelle	$E_{v2}$	$E_{vd}$	$E_{v2}/E_{vd}$	Material	Einschränkungen
ZTV E-StB 2009, (Grundbautaschenbuch Teil 2)	120	65	1,8	Alle Materialien	keine
	100	50	2		
	80	40	2		
	45	25	1,8		
Ergänzung ZTVT	180	80	2,3	Alle Materialien	keine
	150	70	2,1		
	120	60	2		
	100	50	2		
	80	40	2		
	60	30	2		
	45	25	1,8		
20	15	1,3			
ZTVA-StB97 Anhang 14	120	60	2	Alle Materialien	keine
	100	50	2		
	80	40	2		
	45	25	1,8		

Tabelle 5: Korrelationen für alle Materialien, aus der Literatur (alle Einheiten in  $\text{MN/m}^2$ )

Auch hier ist der Mittelwert der  $E_{v2}/E_{vd}$ -Verhältnisse mit 1,9 annähernd 2. Aus diesem Grund ist es auch von großem Interesse die Faustformel  $E_{v2} = 2 E_{vd}$  zu betrachten.

Außerdem gibt es auch Korrelationsansätze die in Formeln angegeben sind. Auch diese können in einem Graph im Vergleich zu den anderen Graphen dargestellt werden.

- $E_{vd} = 600 (1 - \exp(- E_{v2}/600))$  <sup>31</sup>
- $E_{v2} \sim (1,5 * E_{vd} - 17,225) / 0,3214$  <sup>32</sup>

In der Abbildung 20 sind diese Wertepaare und Graphen eingearbeitet.

<sup>31</sup>Messe in der Geotechnik, TU Braunschweig (Adam & Kopf, 2002)

<sup>32</sup>Seminar 2006 (Straßen.NRW, 2006)

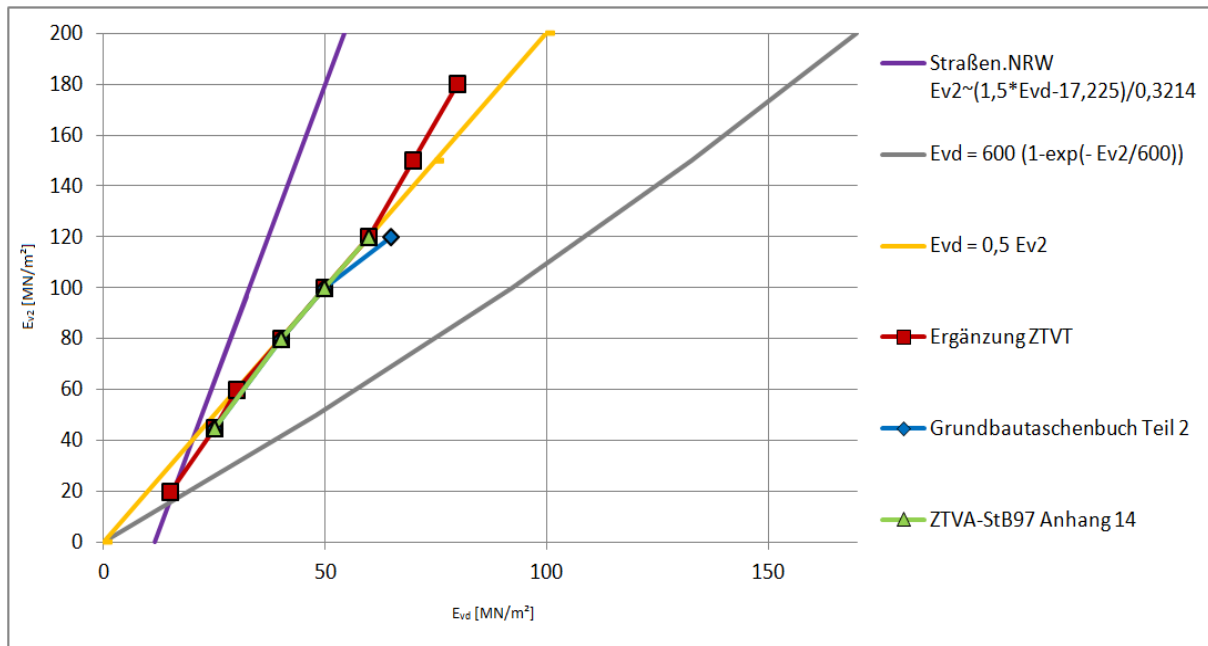


Abbildung 20: Korrelationen für alle Materialien, nach Tabelle 5

## 6.2 Mögliche Korrelationen von rolligen Materialien

### 6.2.1 Korrelationen von Sand

Quelle	$E_{v2}$	$E_{vd}$	$\frac{E_{v2}}{E_{vd}}$	$D_{Pr}$	Material	Einschränkungen
<b>ZTVE-StB 09</b> , Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2009	80	50	1,6	100	GE, SE, SW, SI	wird durch das Verdichtungsverhältnis ( $E_{v2}/E_{v1}$ ) beeinflusst
	70	40	1,75	98		
<b>NGT 39</b> , DB NGT 39 1997 - Deutsche Bahn - Richtlinie für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgerätes im Eisenbahnbau	80	40	2		GI, GW, GE, SE, SW/SI	$10 \leq E_{vd} \leq 125 \text{ MN/m}^2$ max. 30% gebrochenes Material
	60	35	1,71			
	45	30	1,5			
	20	25	0,8			
<b>"Bearing Capacity Test on subsoil and granular layers"</b> Birgit Kliem, Firma Zorn- Instruments, 2002	80	40	2	100	Sand	-
	70	35	2	98		
	60	30	2	97		
<b>"Anhaltswerte zur Kontrolle der Verdichtung mit dem Dynamischen Plattendruckgerät bei der Verfüllung von Leitungsgräben"</b> Gütergemeinschaft Leitungsbau e.V.	80	40	2	100	GE, SE, SW, SI	ausreichende Verdichtung ( $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ ) vorausgesetzt
	70	35	2	98		
	60	32	1,875	97		

Tabelle 6: Korrelation für Sand, aus der Literatur (alle Einheiten in  $\text{MN/m}^2$ )

Man sieht an Abbildung 21 gut, dass die Literatur eine Bandbreite an Korrelationen anbietet, welche teilweise stark divergiert, wobei man für das hier dargestellte Material Sand eine unverkennbare Tendenz erkennen kann. Der Mittelwert der  $E_{v2}/E_{vd}$ -Verhältnisse liegt mit 1,77 leicht unter dem bekannten Faustwert von zwei. Dies liegt aber hauptsächlich daran, dass vor allem in der NGT der Graph für kleine  $E_v$ -Werte stark abfällt. Mit anderen Worten, je besser der  $E_v$ -Wert, desto genauer ist der Faustwert von zwei für die Korrelation auf Sand (nach der Literatur). Dabei ist anzumerken, dass der für die Praxis relevante Bereich von  $E_{v2}$  ungefähr im Bereich zwischen 40 und  $120 \text{ MN/m}^2$  liegt (vgl. Tabelle 2).

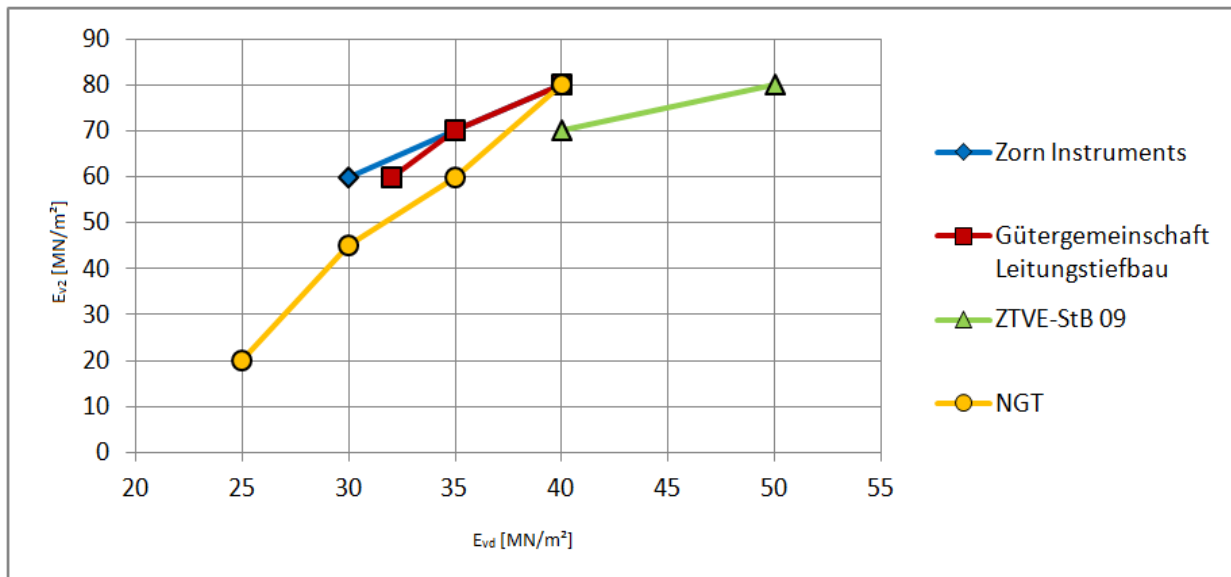


Abbildung 21: Korrelation für Sand, nach Tabelle 6

### 6.2.2 Korrelationen von Kies

Quelle	$E_{v2}$	$E_{vd}$	$E_{v2}/E_{vd}$	$D_{Pr}$	Material	Einschränkungen
<b>ZTVE-StB 09</b> , Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2009	100	50	2	100	GE, SE, SW, SI	wird durch das Verdichtungsverhältnis ( $E_{v2}/E_{v1}$ ) beeinflusst
	80	40	2	98		
<b>NGT 39</b> , DB NGT 39 1997 - Deutsche Bahn - Richtlinie für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgerätes im Eisenbahnbau	80	40	2		GI, GW, GE, SE, SW/SI	$10 \leq E_{vd} \leq 125 \text{ MN/m}^2$ max. 30% gebrochenes Material
	60	35	1,7			
	45	30	1,5			
	20	25	0,8			
<b>"Bearing Capacity Test on subsoil and granular layers"</b> Birgit Kliem, Firma Zorn-Instruments, 2002	100	45	2,2	100	Sand	-
	80	40	2	98		
	70	35	2	97		
<b>"Anhaltswerte zur Kontrolle der Verdichtung mit dem Dynamischen Plattendruckgerät bei der Verfüllung von Leitungsgräben"</b> Gütergemeinschaft Leitungsbau e.V.	120	60	2	100	GE, SE, SW, SI	ausreichende Verdichtung ( $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ ) vorausgesetzt
	100	40	2	98		
	80	40	2	97		

Tabelle 7: Korrelationen für Kies, aus der Literatur (alle Einheiten in  $\text{MN/m}^2$ )

Abbildung 22 zeigt die Korrelationsansätze aus der Literatur für Kies. Vor allem im Vergleich mit Abbildung 21 (Korrelationsansätze für Sand) ist auffallend, dass sich hier ein überschneidender Hauptstrang bildet, welcher leicht gekrümmt ist. Die  $E_{v2}/E_{vd}$ -Verhältnisse sind bei Kies homogener. Da die Werte aus der NGT sowohl für Sand, als auch für Kies gelten, ist im unteren Bereich, analog zum Sand, ein starker Abfall der  $E_{v2}$ - zu  $E_{vd}$ -Werten zu erkennen. Bei Kies beträgt der gesamte Mittelwert 1,86. Im oberen Bereich liegt der Wert sogar genau auf dem Faustwert von 2.

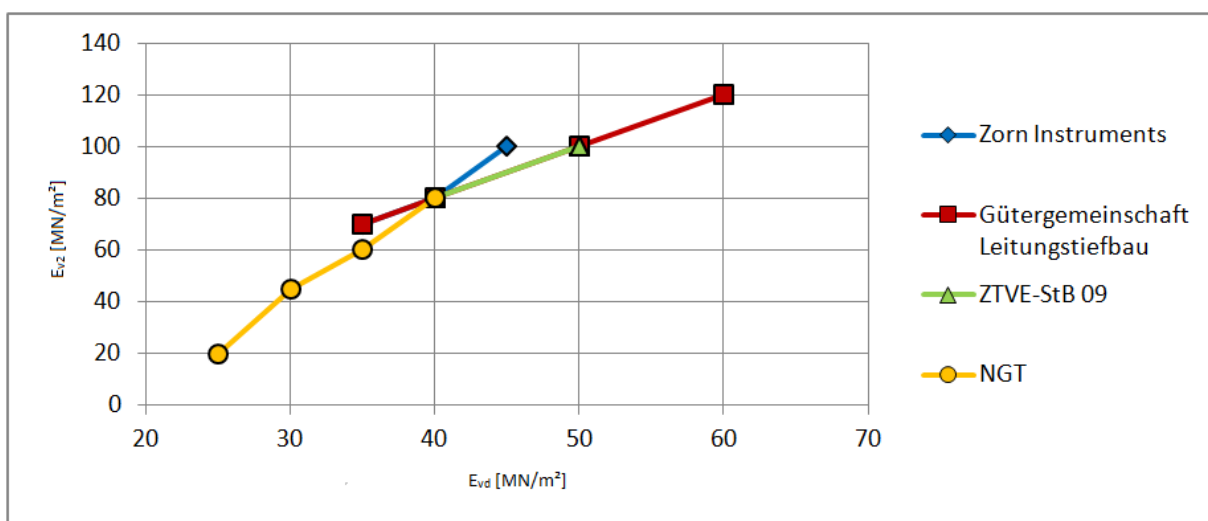


Abbildung 22: Korrelationen für Kies, nach Tabelle 7

### 6.2.3 Korrelationen von rolligen Materialien (aus Österreich)

In Österreich wird der  $E_{vd}$ -Wert mit dem  $E_{v1}$ -Wert und nicht mit dem  $E_{v2}$ -Wert korreliert. In der Richtlinie und Vorschrift für das Straßenwesen (RSV) „Verdichtungsnachweis mittels Dynamischen Lastplattenversuches“ in Kraft getreten im März 2008 in Österreich ist für rollige Böden eine Grenze bei  $E_{v1} = 25 \text{ MN/m}^2$  gezogen. Vor und nach der Grenze sind Umrechnungsfaktoren, in Form von Gleichungen, gegeben (s.u.). Allerdings ist hier die Umrechnung  $E_{vd}$ - $E_{v1}$  nicht erlaubt. Das bedeutet, dass lediglich der zu erfüllende Mindestwert korreliert werden darf. Grund hierfür ist vermutlich die Gefahr der möglichen Streuung des Feldversuches, die sich bei der Multiplikation mit einem Faktor stark auf das Ergebnis auswirken kann und nicht unbedingt auf der sicheren Seite liegt.

- $E_{v1} \geq 25 \text{ MN/m}^2 \rightarrow E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} E_{v1}$
- $E_{v1} < 25 \text{ MN/m}^2 \rightarrow E_{vd} = \frac{6}{5} E_{v1}$

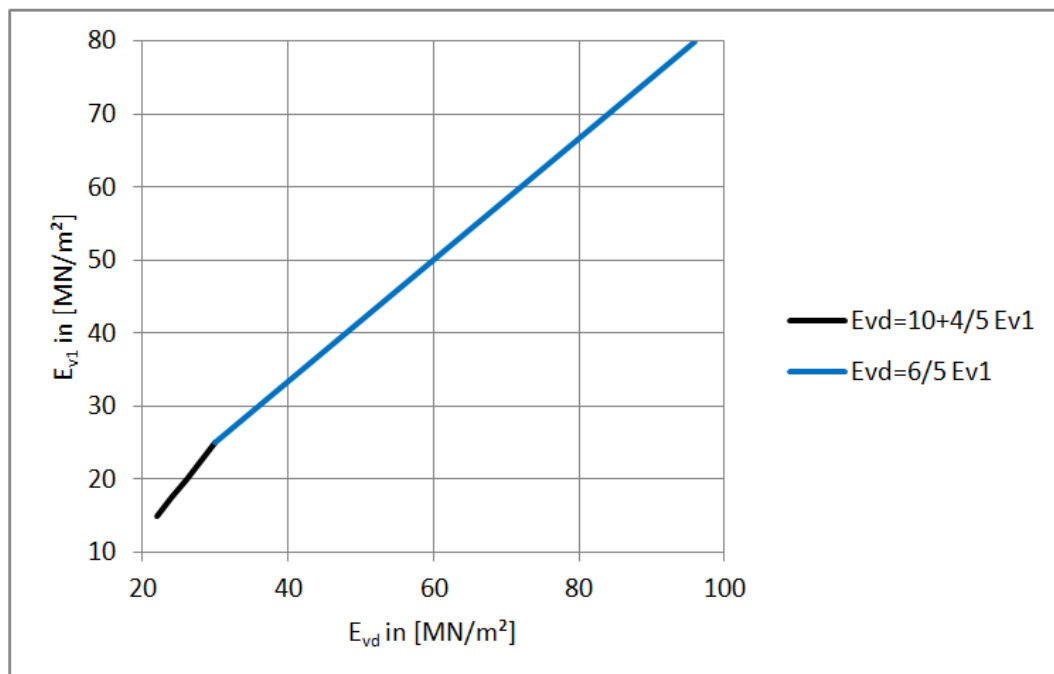


Abbildung 23: RVS - österreichische Richtlinie, Korrelation für rollige Materialien

Die beiden Graphen hintereinander aufgetragen erzeugen den rot-blauen Graphen aus Abbildung 23. Das durchschnittliche  $E_{v1}/E_{vd}$ -Verhältnis beträgt dabei 0,8.

Zusätzlich ist es auch nur zulässig, die erforderlichen Mindestanforderungen mit den Korrelationen umzurechnen. Es ist nicht erlaubt die gemessenen Werte zu korrelieren und diese danach mit den zulässigen Werten zu vergleichen.<sup>33</sup> *Beispiel: Es ist ein  $E_{v2}$ -Wert von  $\text{MN/m}^2$  vorgeschrieben. Es ist nun nicht zulässig, einen  $E_{vd}$ -Wert von  $50 \text{ MN/m}^2$  auf  $100 \text{ MN/m}^2$  zu korrelieren, aber es ist zulässig  $E_{vd \text{ zul}} = E_{v2}/2 = 50 \text{ MN/m}^2$  zu korrelieren.*

<sup>33</sup>RVS 08.03.04 (Österreichische Forschungsgesellschaft, 2008)

### 6.3 Korrelation von bindigen und gemischtkörnigen Materialien

Als Erstes sollte hier erneut erwähnt werden, dass sowohl der statische, als auch der dynamische Lastplattendruckversuch nur bei bindigen Materialien mit steifer bis fester Konsistenz angewandt werden dürfen, was für die Korrelationen heißt, dass diese ebenfalls diese Einschränkung aufweisen müssen.

Quelle	$E_{v2}$	$E_{vd}$	$E_{v2}/E_{vd}$	$D_{Pr}$	Material	Einschränkungen
	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[%]		
"Anhaltswerte zur Kontrolle der Verdichtung mit dem Dynamischen Plattendruckgerät bei der Verfüllung von Leitungsgräben" Gütergemeinschaft Leitungsbau e.V.	45	25	1,8	97	Si, Cl	-
	70	35	2	100	gemischtkörnige Böden	-
	45	25	1,8	97		
	30	20	1,5	95		
NGT 39, DB NGT 39 1997 - Deutsche Bahn - Richtlinie für die Anwendung des leichten Fallgewichtsgerätes im Eisenbahnbau	80	35	2,3	100	Alle anderen Bodenarten (nicht Kies oder Sand)	10 ≤ $E_{vd}$ ≤ 125 MN/m <sup>2</sup> max. 30% gebrochenes Material
	60	30	2	97		
	45	25	1,8	95		
	20	20	1	93		

Tabelle 8: Korrelationen für bindige und gemischtkörnige Materialien, aus der Literatur

Nach der Richtlinie und Vorschrift für das Straßenwesen (RSV) gilt für bindige Materialien die Gleichung  $E_{vd} = 10 + (4/5) E_{v1}$  (auch hier ist die Umkehrfunktion verboten):

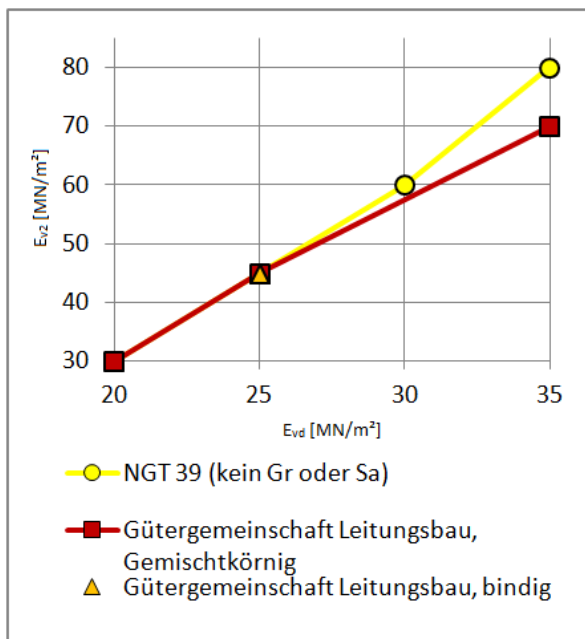


Abbildung 24: bindige und gemischtkörnige Materialien, nach Tabelle 8

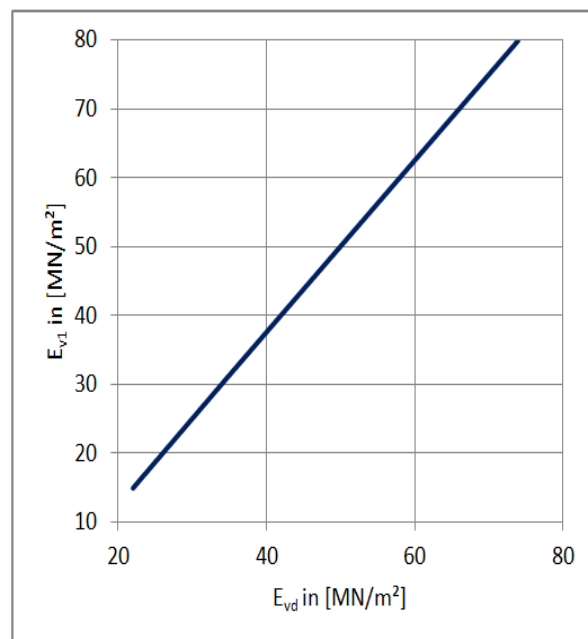


Abbildung 25: RVS - österreichische Richtlinie, bindige Böden



## 6.4 Korrelation von verbessertem Planum

Als Planum wird hier der Baugrund bezeichnet, auf dem der Versuch angewandt werden soll. Oft ist in der Praxis das anstehende Material bindig. Da in der Regel dieses Material die geforderten Anforderungen nicht erfüllt, muss das Planum verbessert werden. In der Praxis gibt es hierfür einige verschiedene Verfahren, vom Bodenaustausch über Tiefengründung bis zum „Erdbeton“ (betonähnliches Material aus verbesserter Erde).

An dieser Stelle ist weder eine Tiefengründung, noch ein Bodenaustausch gemeint, sondern vielmehr eine hydraulische Stabilisierung des anstehenden Bodens mit Bindemittel. In meiner Literaturrecherche und meinen eigenen Versuchen wird nur Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Brandkalk (auf über  $1000^\circ\text{C}$  erhitzter Kalk) verwendet, welcher in bindiges Material eingefräst wurde. Andere Bindemittel, wie z.B. Zement oder Mischbinder werden hier nicht betrachtet.

Quelle	$E_{v2}$	$E_{vd}$	$E_{v2}/E_{vd}$	$D_{Pr}$	Material	Anwendungsbereich
NGT 39	80	40	2,0	100	mit Kalk verfestigtes Material	$\leq 48$ h nach dem Verdichten
	60	35	1,7	97		
	45	30	1,5	95		
	20	25	0,8	93		
	80	45	1,8	100		$> 48$ h nach dem Verdichten
	60	40	1,5	97		
	45	35	1,3	95		
	20	30	0,7	93		
	80	40	2,0	100	mit Brandkalk verbessertes bindiges Material	
	60	35	1,7	97		
	45	30	1,5	95		
	20	25	0,8	93		

Tabelle 9: Korrelationswerte für verfestigte bindige Materialien, nach NGT 39

Die wenigsten Quellen geben Korrelationswerte für bindige oder gar verbesserte bzw. verfestigte bindige Böden an, auch wenn die Grundidee des dynamischen Versuchsgerätes unter anderem gerade für solche Erdstabilisierungen gedacht war<sup>34</sup>.

Wie man auch der Tabelle aus der NGT 39 entnehmen kann, ist der Faktor Zeit bei einer Verfestigung des bindigen Materials zu berücksichtigen. Genau wie Zementbeton aus dem Hochbau braucht auch verbessertes/verfestigtes Material eine gewisse Zeit, um abzubinden. Je länger das Material dazu Zeit hat, desto fester wird es, daher ändert sich auch der  $E_v$ -Wert.

<sup>34</sup>Dissertation (Dipl.-Ing. Weingart, 1977)

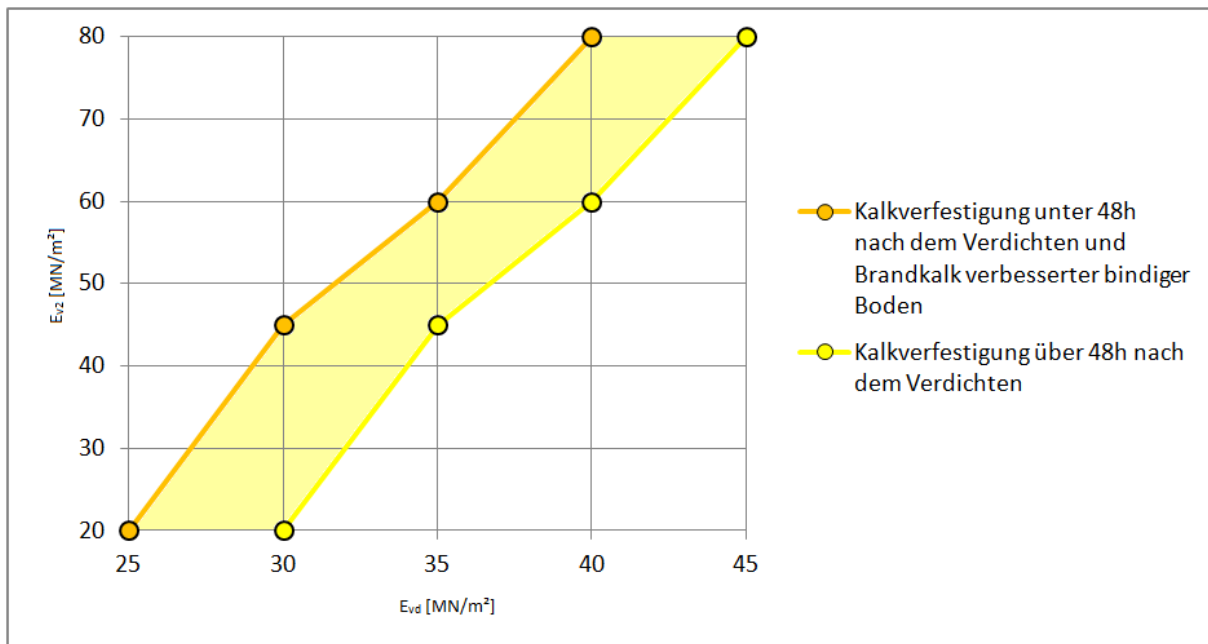


Abbildung 26: verfestigter bindiger Boden, nach Tabelle 9

Mit Ablauf der 48h-Frist sinkt das Verhältnis  $E_{v2}/E_{vd}$ . Es ist davon auszugehen, dass sich Messergebnisse hauptsächlich in der farbig hervorgehobenen Fläche wiederfinden, in der Analogie zum Zementbeton ist diese Aussage jedoch fraglich (48 Tage-Frist).

### 6.5 In der Literatur festgehaltene Versuchsdaten

Nach Weingart (2003) sind die verschiedenen dynamischen Fallgewichtsgeräte untereinander vergleichbar und korrelierbar. Zu diesen vorhandenen Versuchsdaten der dynamischen Versuche sind die Daten der statischen Versuche angegeben. Hier werden nur die des statischen und die des LFG mit einer 300er Platte betrachtet. Das Material ist eine Schottertragschicht mit sehr hoher Tragfähigkeit. Diese ist so hoch, dass das Leichte Fallgewichtsgerät an seine Messgrenzen stößt, jedoch nach Weingart noch vernünftige Daten liefert.

	$E_{V1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V2}/E_{V1}$ [-]	$E_{VD}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V1}/E_{VD}$ [-]	$E_{V2}/E_{VD}$ [-]
W1	272	538	1,98	83,00	3,28	6,48
W2	262	403	1,54	88,00	2,98	4,58
W3	196	408	2,08	116,00	1,69	3,52
W4	154	337	2,19	98,00	1,57	3,44
W5	190	401	2,11	95,00	2,00	4,22
W6	219	449	2,05	95,00	2,31	4,73
W7	151	302	2,00	118,00	1,28	2,56
W8	233	510	2,19	107,00	2,18	4,77
W9	191	471	2,47	94,00	2,03	5,01

Tabelle 10: Versuchsdaten von Weingart (2003)

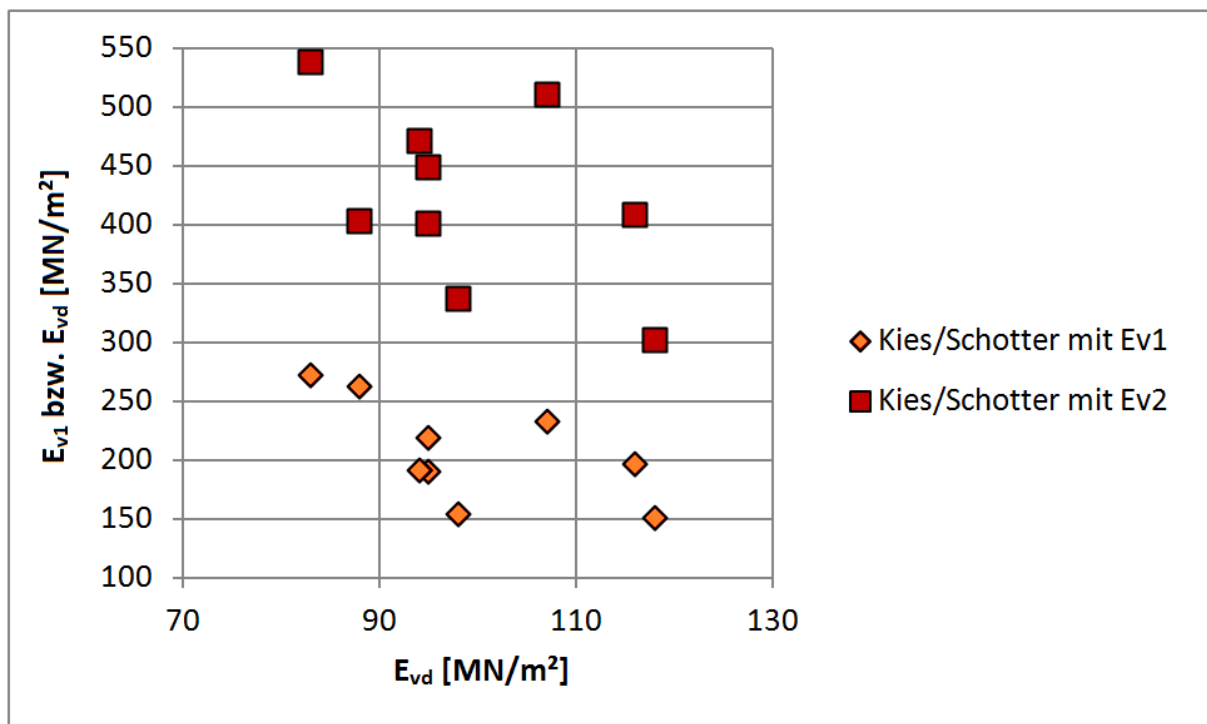


Abbildung 27: Versuchsdaten von Weingart, nach Tabelle 10

Da die  $E_v$ -Werte der Versuche enorm hoch sind, sodass sie in einigen Quellen als nicht zulässig gelten und sich anhand der vorhandenen Punktwolke keinerlei Tendenzen ausmachen lassen, werden diese Versuche nicht weiter betrachtet.

## 7. Versuche

Die Versuchsdaten, welche als Grundlage dieser Arbeit dienen, wurden anonymisiert. In vorliegender Arbeit geht es nur um die Ergebnisse der Versuche und die untersuchten Materialien. Weitere Angaben (Ort, Zeit, etc.) sind aus datenschutzrechtlichen Gründen entfernt worden. Stattdessen dient eine Identifikationsnummer (ID) der Unterscheidung untereinander. Die genauen Versuchsdaten, wie Spannungs- Setzungsverhältnis, Graphen und Verformungsmodule sind im Anhang zusammen mit dem dazugehörigen Baugrund dargestellt.

Quelle	Anzahl	ID
Versuche mit und an der TU Darmstadt	4	U
Eigene Versuche als Praktikant und freier Mitarbeiter der Firma GeolIngenieure Fruchtenicht + Lehmann GmbH	20	SL
Versuche zur Verfügung gestellt von der Firma GeolIngenieure Fruchtenicht GmbH (bis 2005)	35	GF
Versuche zur Verfügung gestellt von der Firma GeolIngenieure Fruchtenicht + Lehmann GmbH	10	GFL

Tabelle 11: Übersicht über die Versuchsquellen mit zugehöriger ID

Alle eigenen Versuche wurden nach dem folgenden Schema durchgeführt:

1. statischer Lastplattendruckversuch
2. ein bis fünf dynamische Lastplattendruckversuche
  - im Umfeld von ca. 1m<sup>2</sup> um den statischen Versuch
  - mindestens im Achsabstand von 0,5m von der bereits belasteten Stelle
  - auf dem Versuchsfeld können die Achsabstände aus Platzgründen unter Umständen kleiner sein.
3. Werte wurden ausgewertet und zusammengetragen

Im Folgenden werden diese Ergebnisse in Graphen  $E_{v2}$  zu  $E_{vd}$  und  $E_{v1}$  zu  $E_{vd}$  aufgetragen. Die unterschiedlichen Materialien werden durch unterschiedliche Farben markiert.

Insgesamt wurden die Versuche an elf unterschiedlichen Orten durchgeführt. Die Gesamtzahl der Versuche beträgt 69.

## 7.1 Verwendete Geräte

Die genauen Bezeichnungen der für Kapitel 7 verwendeten Geräte sind im Folgenden aufgeführt:

- Leichtes Fallgewichtsgerät von der Geolngenieure Fruchtenicht + Lehmann GmbH
  - (HMP LFG Nr. 3637)
- Statisches Prüfgerät von der Geolngenieure Fruchtenicht + Lehmann GmbH
- Leichtes Fallgewichtsgerät von der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt
  - (HMP LFG Nr. 6109)
- Statisches Prüfgerät von der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt
  - (HMP Nr. 0576)
- Sowie weitere Geräte von anderen Firmen oder unbekannter Herkunft



statische Geräte

dynamische Geräte

Abbildung 28: verwendete Geräte

## 7.2 Eigene Versuche an der TU Darmstadt

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an der TU Darmstadt ein Versuchsfeld aufgebaut, auf welchem eine Reihe von Versuchen unter kontrollierten Versuchsfeldbedingungen vorgenommen werden konnten. Außerdem wurde in Kooperation mit der TU Darmstadt auf einer benachbarten Baustelle auf dem Universitätsgelände „Lichtwiese“ ein statischer Lastplattendruckversuch (mit  $\sigma_{\max} = 0,3 \text{ MN/m}^2$ ) durchgeführt. Letztere Versuche wurden mit eigenen dort durchgeführten dynamischen Versuchen verglichen. Die eben beschriebene Versuchsreihe wird im Folgenden mit „U“ bezeichnet.

Das Versuchsfeld an der „Lichtwiese“ besitzt die Maße 1x2m und hat eine Tiefe von ca. 0,7m. Dies gewährleistet das Durchführen der Lastplattendruckversuche, ohne dass sich der natürliche Untergrund mit auf den Versuch auswirkt. Außerdem können auf einem solchen Feld, ohne den Versuchsboden nochmal ein- und ausbauen zu müssen, mehrere Versuche durchgeführt werden. Auch wenn die Anzahl der Versuche statistisch nicht aussagekräftig genug ist um signifikante Tendenzen feststellen zu können, kann man anhand dieser Versuche bereits Abschätzungen und Vergleiche treffen, bzw. durchführen.

Als Gegengewicht dient ein mit zusätzlichen Gewichten beschwerter „Unimog“ der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt. Der Boden, der im Versuchsfeld eingebaut und lageweise, mit Hilfe eines Rüttlers, verdichtet wurde, ist ein Mittelsand.

Geotechnische Daten des Versuchsbodens (Darmstädter Sand) für U2, U3 und U4 sind:

csa\* MSa<sup>35</sup>, (mS, gs<sup>\*36</sup>), der Sand ist enggestuft<sup>37</sup>

Beschreibung	Formelzeichen	Wert
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma$	16 kN/m <sup>3</sup>
Wichte unter Auftrieb	$\gamma'$	10 kN/m <sup>3</sup>
Reibungswinkel	$\phi'$	30°
Kohäsion	$c'$	0 kN/m <sup>3</sup>
Ungleichförmigkeitszahl	$C_u$	2,2
Krümmungszahl	$C_c$	0,9
Korndichte	$\rho_s$	2,64 g/cm <sup>3</sup>
Porenanteil	$n$	0,367 ... 0,446
Porenzahl	$e$	0,579 ... 0,804
Trockendichte	$\rho_d$	1,467 g/cm <sup>3</sup> ... 1,67 g/cm <sup>3</sup>

Tabelle 12: Daten des Darmstädter Sandes

Eine Siebanalyse des Sandes ist dem Anhang (Seite VI) zu entnehmen.

<sup>35</sup> nach DIN EN ISO 14688-1

<sup>36</sup> nach DIN 4022

<sup>37</sup> nach DIN 18196

Der Versuch „U4“ wurde neben dem Versuchsfeld auf dem dort anstehenden unverdichteten natürlichen Untergrund durchgeführt. Eine in-situ Bodenansprache klassifiziert dieses Material als schwach organischen, stark schluffigen Mittelsand.

Im Folgenden ist das Versuchsfeld mit den Positionen und Abständen der verschiedenen Versuche untereinander gezeigt. Es wurde versucht, die statischen Lastplattendruckversuche ungefähr in der Mitte des Versuchsfeldes anzuordnen, ohne dass das Gegengewicht direkt auf dem Versuchsfeld steht. Die dynamischen Versuche wurden rund um den statischen Versuch angeordnet, die im Nahbereich befindlichen dynamischen Versuche werden als arithmetisches Mittel mit den statischen Werten verglichen. Außerdem wurden an den Stellen der statischen Versuche nach deren Beendigung dynamische Versuche durchgeführt. Das Ergebnis ist, wie erwartet, ein höherer  $E_{vd}$ -Wert der dynamischen Versuche, als im Nachbarbereich.



Abbildung 29: Versuche auf dem Versuchsfeld an der TU Darmstadt

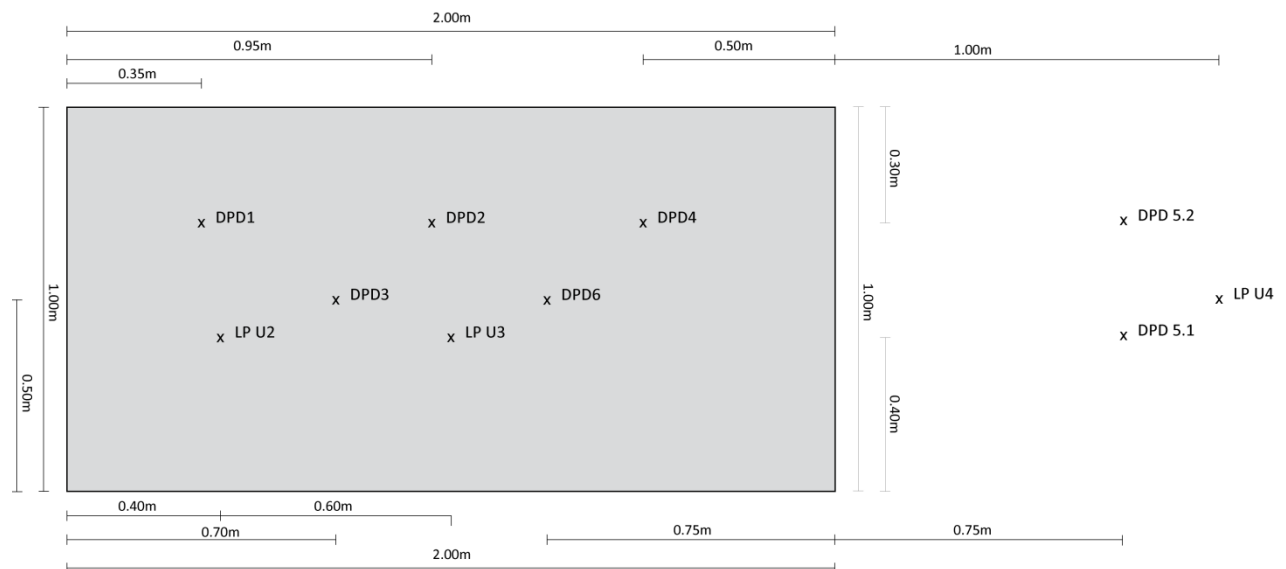


Abbildung 30: Lageplan des Versuchsfeldaufbaus an der TU Darmstadt

Der Versuch DPD 3 kann dank seiner Lage mittig zu den statischen Lastplattendruckversuchen sowohl für den Mittelwert des dynamischen Moduls zugehörig zu U2, als auch zu U3 genutzt werden. Die grau hinterlegte Fläche ist das Versuchsfeld.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 31 angegeben. Dabei sind hier die  $E_{vd}$ -Werte zu den  $E_{v1}$  und den  $E_{v2}$ -Werten aufgetragen. Diese Abbildung verdeutlicht gut, dass das Verdichtungsverhältnis der Versuche nicht homogen ist, da sonst die Punkte einfach nur nach oben verschoben wären.

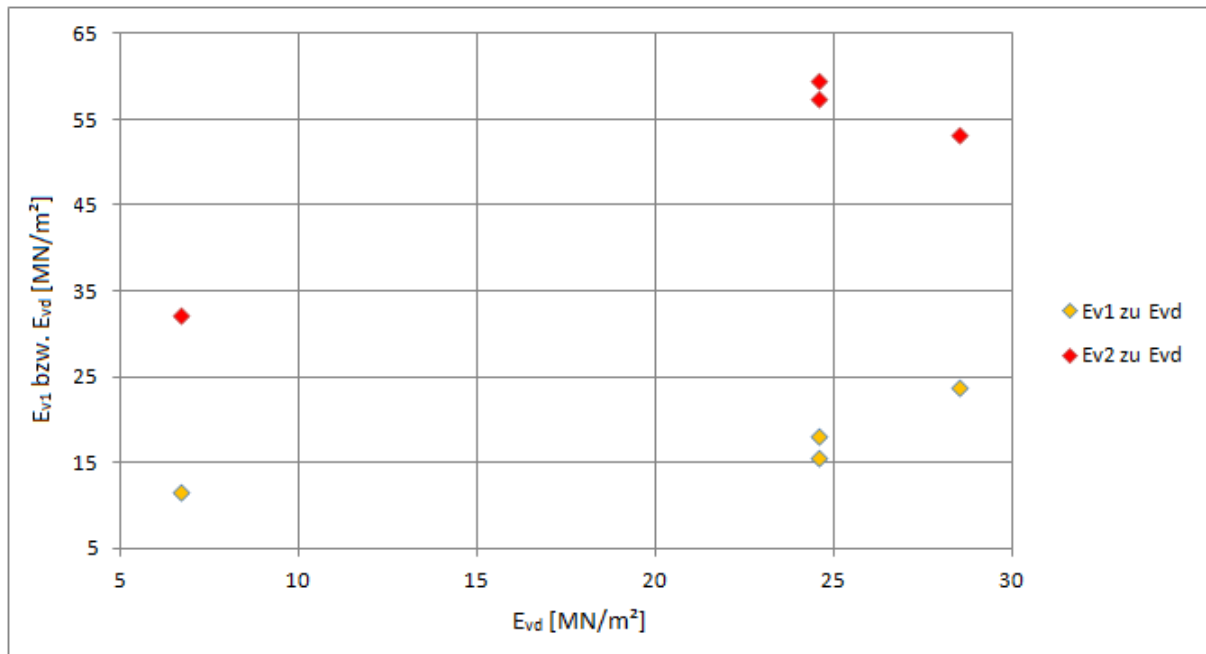


Abbildung 31: Versuchsergebnisse für Sand,  $E_{vd}$  zu  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$  (vgl. Anhang: Seite XLII)



### 7.3 Eigene Versuche

Als Praktikant und freier Mitarbeiter der Firma „GeoIngenieure Früchtenicht + Lehmann GmbH“ habe ich bei verschiedenen Bauprojekten im Rhein-Main-Gebiet, also unter Praxis- und nicht Versuchsbedingungen statische und dynamische Versuche durchgeführt. Diese Versuche sind ebenfalls mit ihren relevanten Daten im Anhang (mit „SL“ bezeichneten, S. VII ff) zu finden.

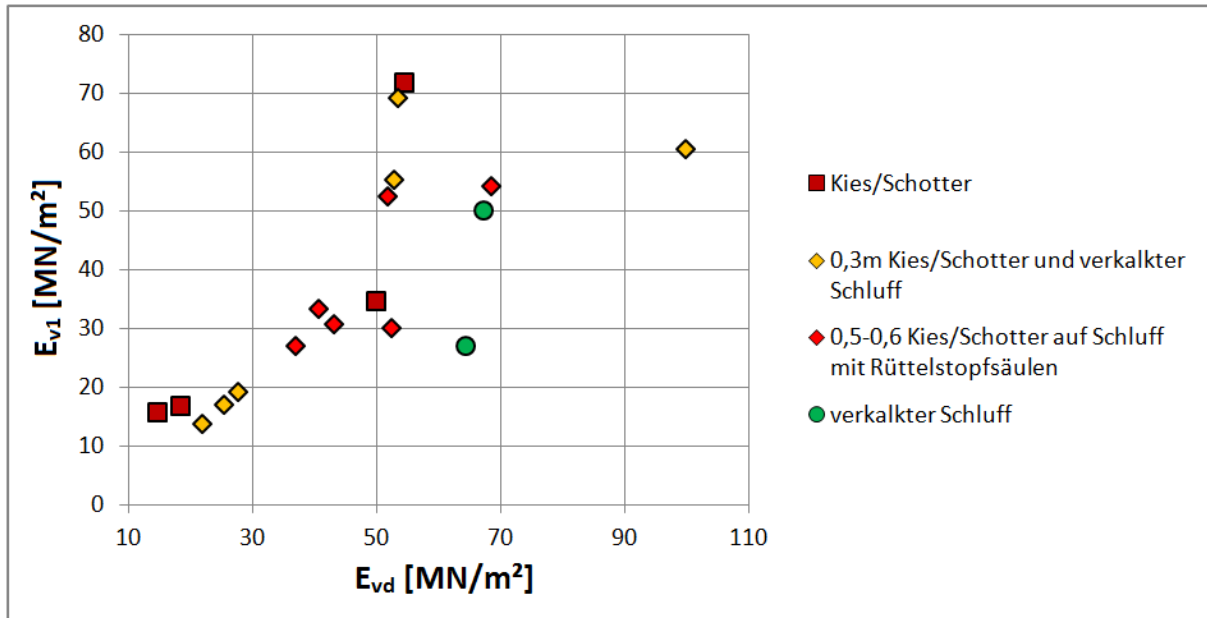


Abbildung 32: Versuche "SL"  $E_{vd}$ - $E_{v1}$ , ohne Asphaltbeton (vgl. Anhang: Seite XL)

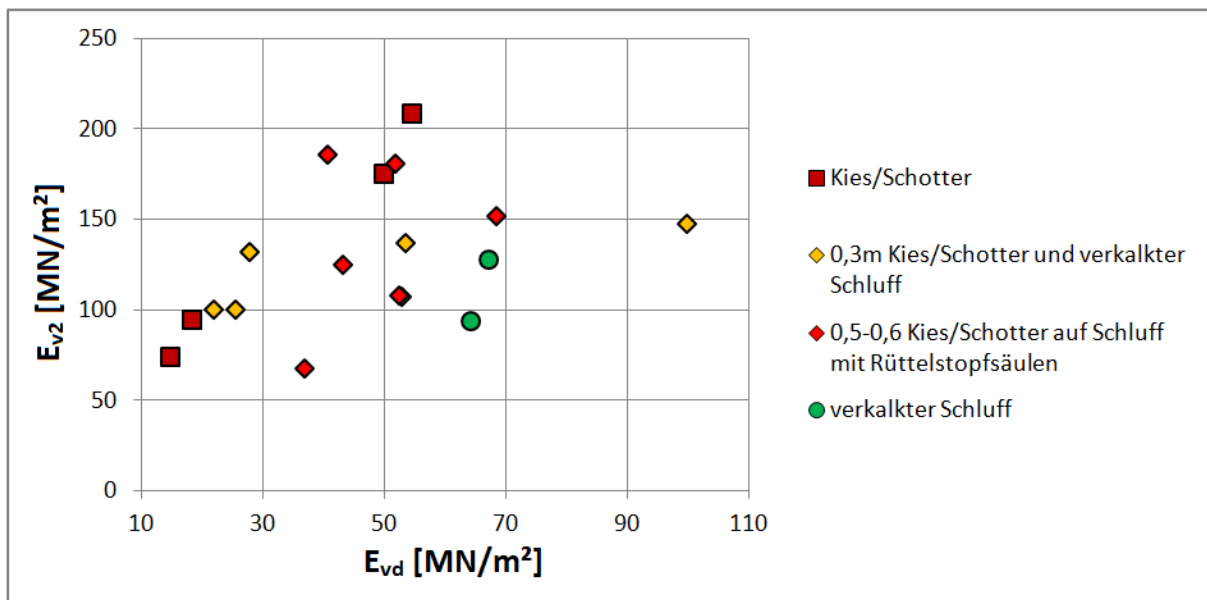


Abbildung 33: Versuche "SL"  $E_{vd}$ - $E_{v2}$ , ohne Asphaltbeton (vgl. Anhang: Seite XL)

Es ist anzumerken, dass die Versuche auf Schotter mit rüttelstopfverdichtetem Planum nicht auf den Rüttelstopfsäulen, sondern in den Zwischenbereichen durchgeführt wurden.

Neben den bereits gezeigten Versuchen werden zwei Versuche auf Asphaltbeton gefahren. Man kann auf Anhieb sehen, dass die Werte deutlich höher sind, als die der anderen Versuche. Eine Aussage zur Korrelation wird hier allerdings schwer fallen, bis unmöglich sein. Zum einen, weil es für eine statistische Erhebung zu wenige Versuche sind, zum anderen scheinen die Werte eher abzunehmen. Außerdem existieren auch keine Referenzen in der Literatur und die Versuchsgeräte sind nicht wirklich für die Prüfung von Asphaltbeton geeignet.

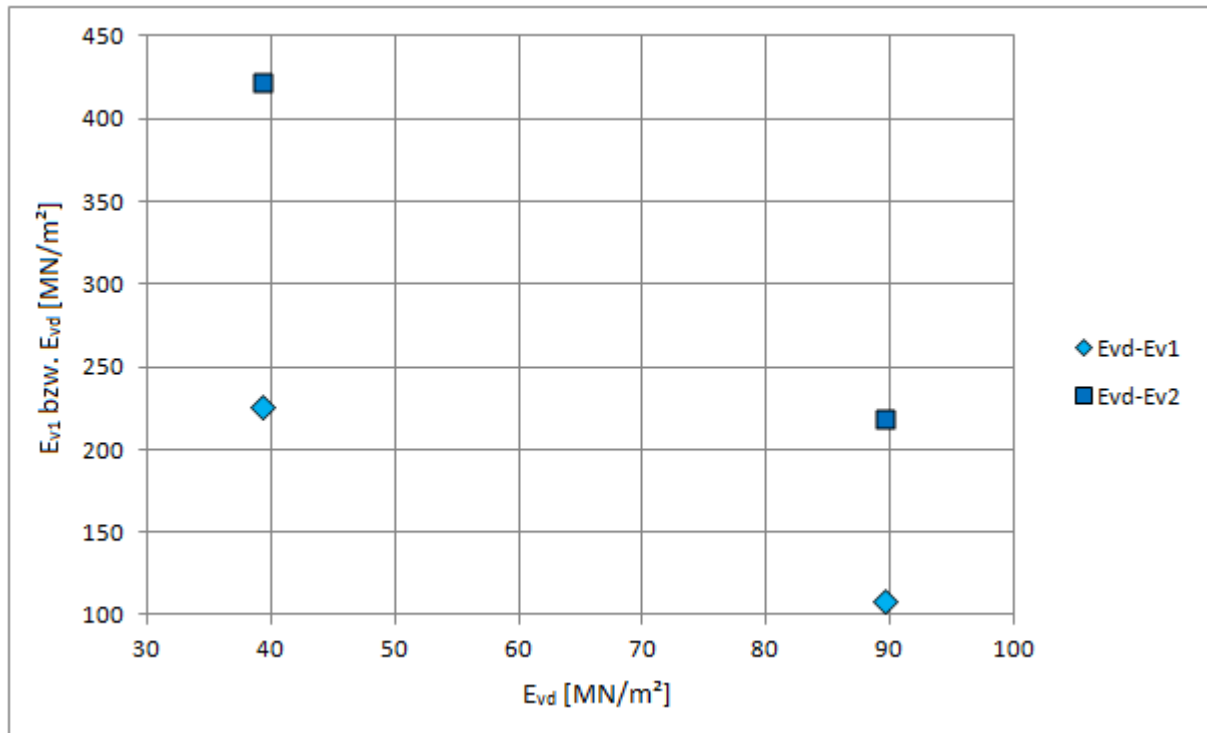


Abbildung 34: Versuche "SL" auf Asphaltbeton (vgl. Anhang: Seite XL)

## 7.4 Zur Verfügung gestellte Versuche

Die Firma „Geolingenieure“ hat auch ohne meine direkte Beteiligung Versuche durchgeführt, die ins Schema passen, da sie an benachbarten Stellen durchgeführte statische und dynamische Versuche beinhalten. Diese Versuchswerte sind Ergebnisse von realen Projekten im Rhein-Main-Gebiet.

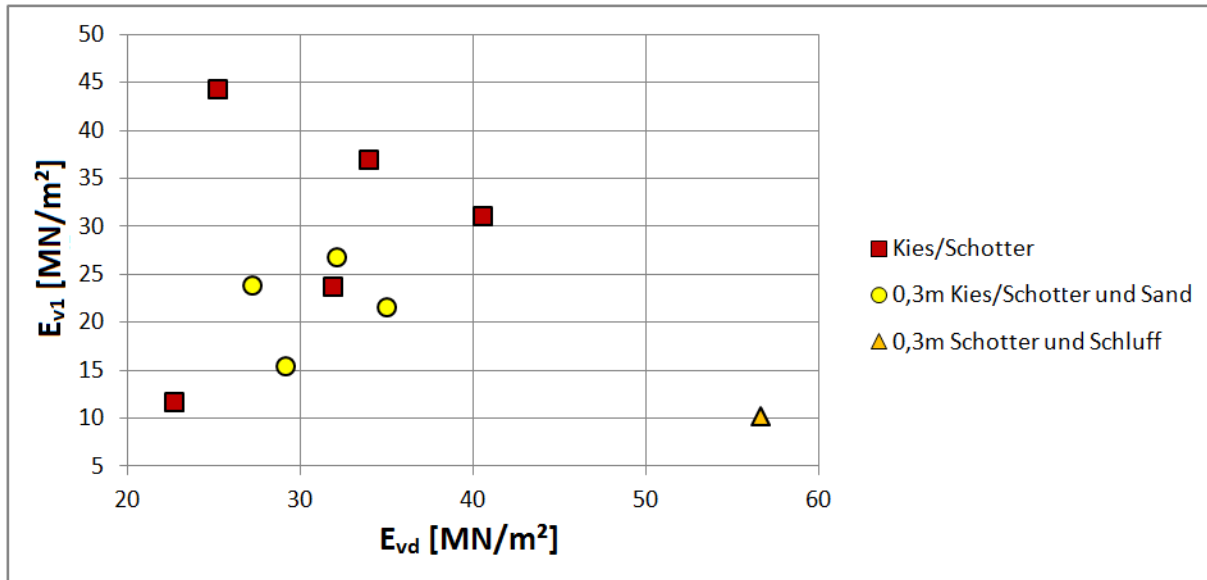


Abbildung 35: Versuche "GFL"  $E_{vd}$ - $E_{v1}$  (vgl. Anhang: Seite XLI)

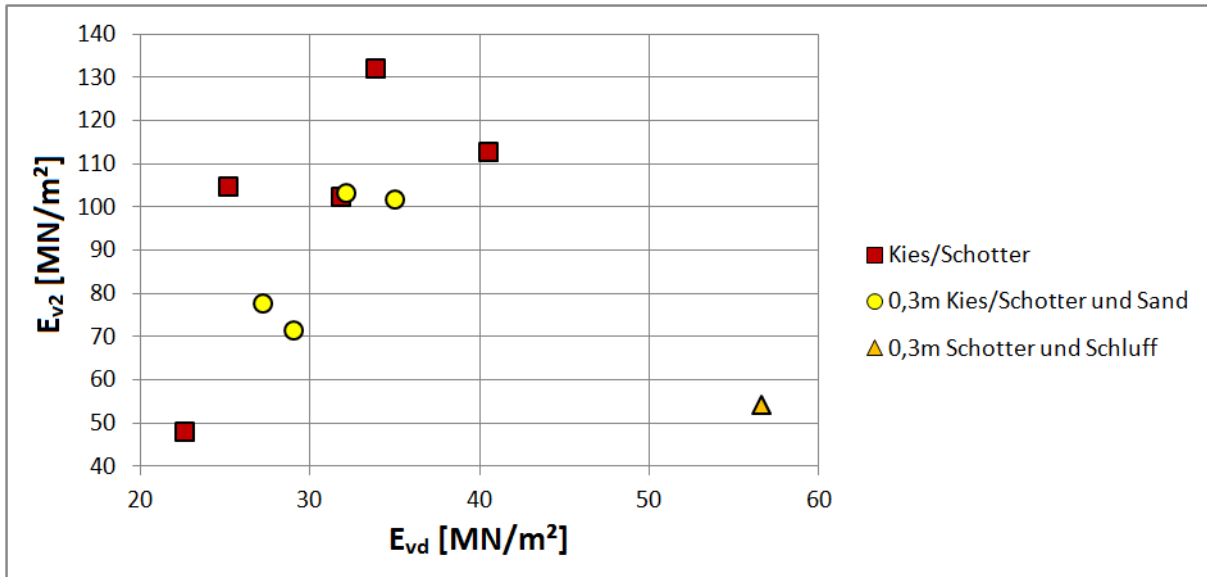


Abbildung 36: Versuche "GFL"  $E_{vd}$ - $E_{v2}$  (vgl. Anhang: Seite XLI)

Auch hier ist deutlich zu sehen, dass das Verdichtungsverhältnis sich durchaus auf die Lage der Punkte auswirkt, so scheint hier die Korrelation von  $E_{v2}$ - $E_{vd}$  besser zu sein als die Korrelation von  $E_{v1}$ - $E_{vd}$ .

Neben den bereits vorgestellten Versuchen gab es im Jahr 2000 bereits Versuche, welche sich mit diesem Thema beschäftigen. Zu diesem Zeitpunkt war die heutige DIN-Norm<sup>38</sup> noch nicht gültig. Aus diesem Grund wurde der statische Lastplattendruckversuch nicht wie in der Norm angegeben mit einer Uhr, sondern mit drei Messuhren durchgeführt. Die Berechnung wurde dann mit dem Mittelwert dieser drei Messungen vorgenommen (Hinweis: im Anhang befinden sich nur die Mittelwerte der Messungen).

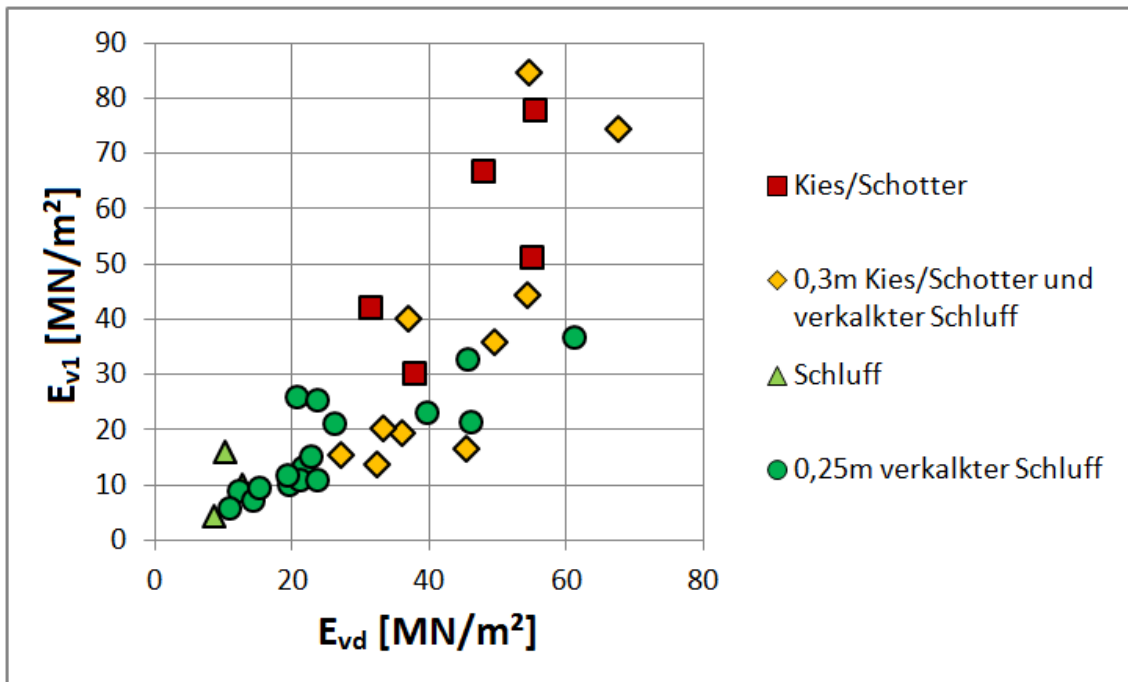


Abbildung 37: Versuche "GF"  $E_{vd}$ - $E_{v1}$  (vgl. Anhang: Seite XXXVII und XXXIX)

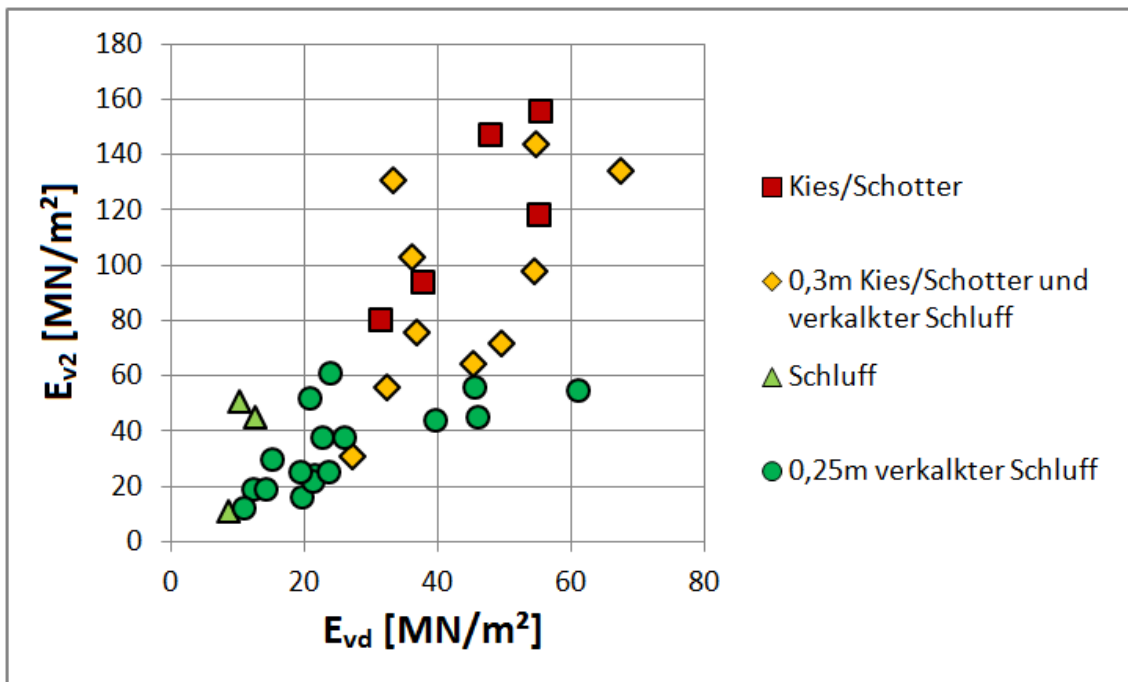


Abbildung 38: Versuche "GF"  $E_{vd}$ - $E_{v2}$  (vgl. Anhang: Seite XXXVII und XXXIX)

<sup>38</sup>DIN 18134 (e.V. D. I., 2001)

## 8. Auswertung der Literatur und Versuchsergebnisse

### 8.1 Auswertung der Literaturdaten

Da nicht alle Literatur-Quellen gleiche Materialien als Randbedingungen formuliert haben, ist ein Vergleich der Quellen untereinander schwierig. Es ist allerdings möglich ein Material nach dem andern zu untersuchen und alle Quellen, die dieses Material nicht ausschließen, in einem Graphen zu vergleichen. Beginnend mit den rolligen Böden wird dies nun so durchgeführt.

Bei den vorliegenden Korrelationen wird in der Regel von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- Die Kornform (rund oder scharfkantig) spielt keine Rolle oder ist mit rund festgelegt
- Die vergangene Zeit nach dem Verdichten spielt keine Rolle oder ist nach einer Ruhephase (ca. 48h) des verdichteten Materials festgelegt
- Das Material ist nicht oder erst nach der Einwirktiefe  $t$  der Versuchsgeräte geschichtet
- Der Verdichtungsgrad ist ausreichend gut

Die meisten dieser Randbedingungen werden in der jeweiligen Literatur nicht explizit erwähnt, sondern vermutlich von Anfang an vorausgesetzt.

#### 8.1.1 Auswertung der Literaturdaten für rollige Materialien

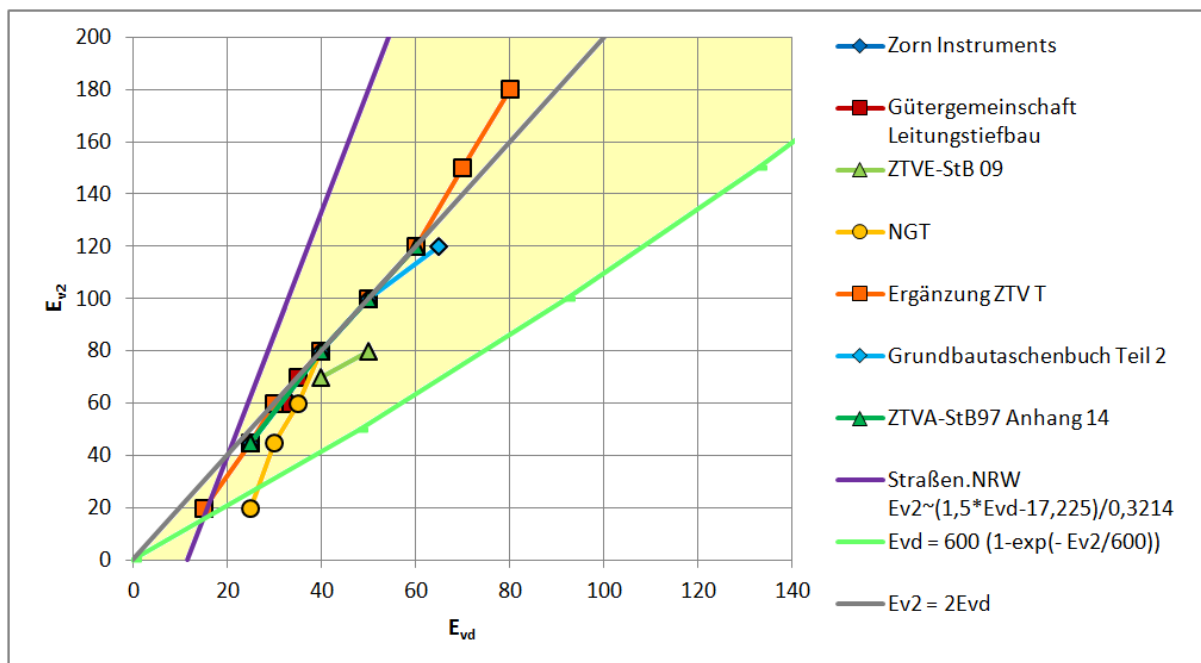


Abbildung 39 Korrelation von Sand

Wie sich bereits in Abbildung 20 gezeigt hat, bildet sich eine scherenförmige Aufweitung des Korrelationsbereiches zu den oberen  $E_v$ -Werten hin aus. Diese Aufweitung wird allerdings nur durch zwei Funktionen erzeugt, die übrigen der Funktionen liegen mittig dazwischen, fast auf der Linie, die

der Faustformel:  $E_{v2} = 2E_{vd}$  (in grau dargestellt) entspricht. Für Sand ist aus allen Literaturdaten ein deutlicher Hauptstrang sichtbar.

Der Bereich, der von den Raum aufspannenden Randfunktionsgraphen eingeschlossen ist, ist in der Abbildung schwach gelb hervorgehoben worden. Es entsteht also eine Fläche, in der nach der Literatur für Sand korreliert werden kann. Die Korrelation ist demnach mit steigenden  $E_v$ -Werten schwieriger.

Die Graphen für Kies sehen denen für Sand sehr ähnlich, vor allem, weil die meisten hier betrachteten Korrelationen für alle rolligen Materialien gelten. Die Funktionen, die jedoch andere Korrelationen für Kies als für Sand anbieten, liegen noch besser im Hauptstrang, als bei Sand. Damit sind die Korrelationen für Kies noch näher an der Faustformel. Laut Literatur scheint also die Korrelation von Kiesen besser möglich zu sein, als die von Sanden. Des Weiteren kann also festgehalten werden, dass laut Literatur für Kies eine Korrelation gemäß der Faustformel im  $E_{vd}$ -Raum ca. 30 – 70  $\text{MN/m}^2$  gilt.

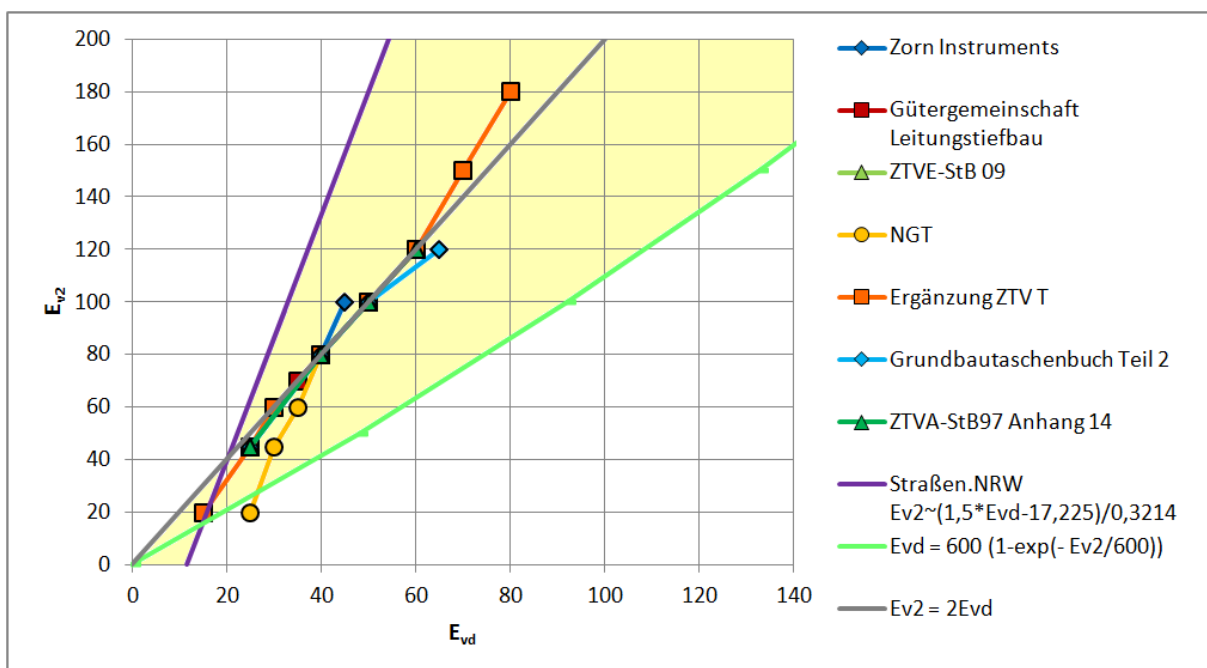


Abbildung 40: Korrelation von Kies

Selbstverständlich bildet sich durch die beiden, die Fläche aufspannenden Randfunktionskurven ein großer Bereich in dem die Versuchswerte liegen können. Da auch die Randfunktionskurven Korrelationsversuche sind, können naturgemäß auch außerhalb der gelben Fläche noch Messwerte liegen. Beide Randfunktionskurven stellen eine absolute Ausnahme in den betrachteten Literaturstellen dar, weswegen ihnen nicht so viel Aufmerksamkeit, wie den anderen acht Korrelationen (welche im Großen und Ganzen eine ähnliche Aussage treffen) zugewandt werden. Dies wird durch die Tatsache untermauert, dass die Graphen, die den Hauptstrang bilden, zum großen Teil normativen Charakter haben, während die beiden Randfunktionskurven diesen nicht aufweisen.

### 8.1.2 Korrelation für bindiges und gemischtkörniges Material

Es ist sehr interessant zu beobachten, dass auch die Literaturquellen, die für verschiedene Materialien unterschiedliche Korrelationen angeben, im Großen und Ganzen am Ende auf dem Hauptstrang und somit auf der Faustformel-Korrelation enden. Wie bereits beschrieben, gelten die beiden das Dreieck aufspannenden Randfunktionen für alle Materialien, daher ist der Effekt (gemäß Kapitel 8.1.1) hier im gleichen Maße zu beobachten.

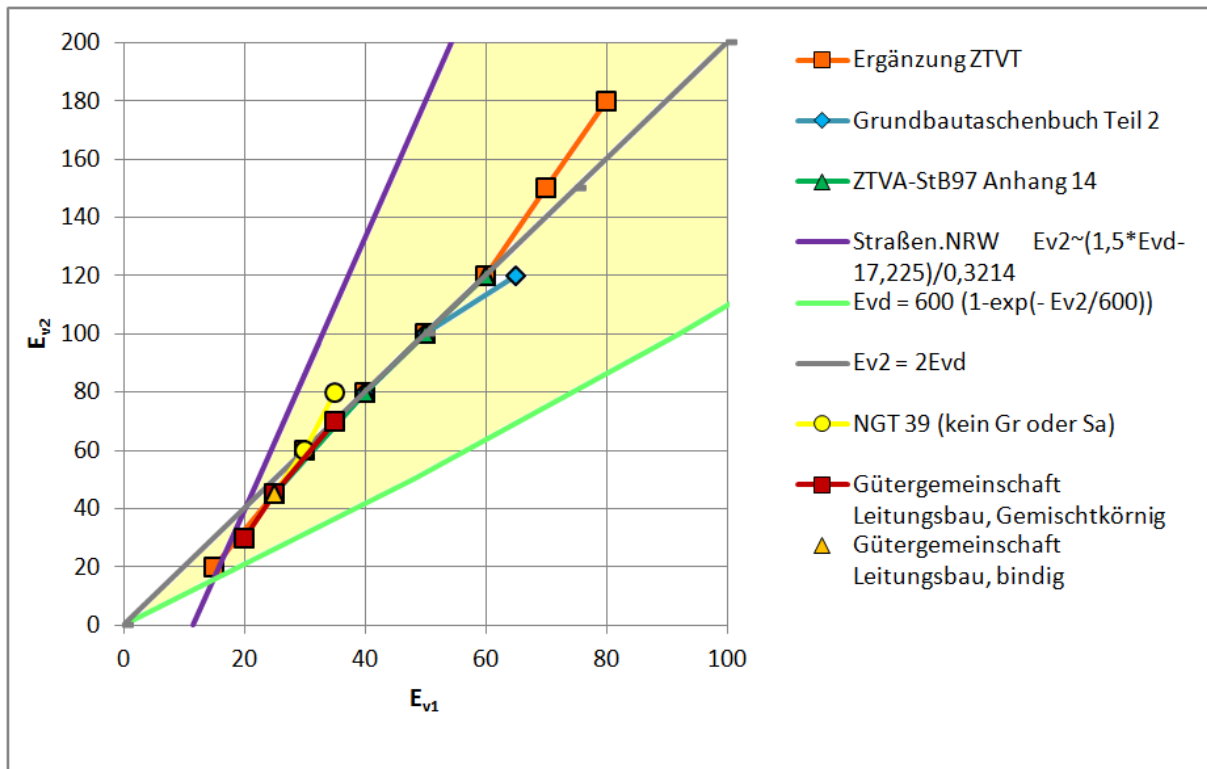


Abbildung 41: Literaturempfehlungen zur Korrelation von bindigen und gemischtkörnigen Materialien

Ein merkbarer Unterschied von den voneinander abweichenden Korrelationen (für unterschiedliche Materialien) ist der Raum, in dem Sie definiert sind. Dieser ist auf der Faustformel-Funktion leicht Richtung Ursprung verschoben.

Bei der Korrelation von bindigen Materialien ist zu beachten, dass der Wassergehalt stark auf die Versuche einwirkt. In der Regel werden die Korrelationen für einen optimalen Wassergehalt angegeben. Dies ist in der Praxis, vor allem bei der Prüfung des Planums, eher selten gegeben.

### 8.1.3 Auswertung der Literaturdaten für verbessertes/verfestigtes Material

Das größte Problem bei einer Zusammenstellung von den Graphen in Bezug auf verfestigte oder verbesserte Materialien ist, dass die meisten Korrelationen den Faktor Abbindezeit nicht berücksichtigen. Trotzdem sind in Abbildung 42 alle Graphen enthalten, die für alle Materialien gelten, zusammen mit denen, die speziell für verkalktes Planum stehen.

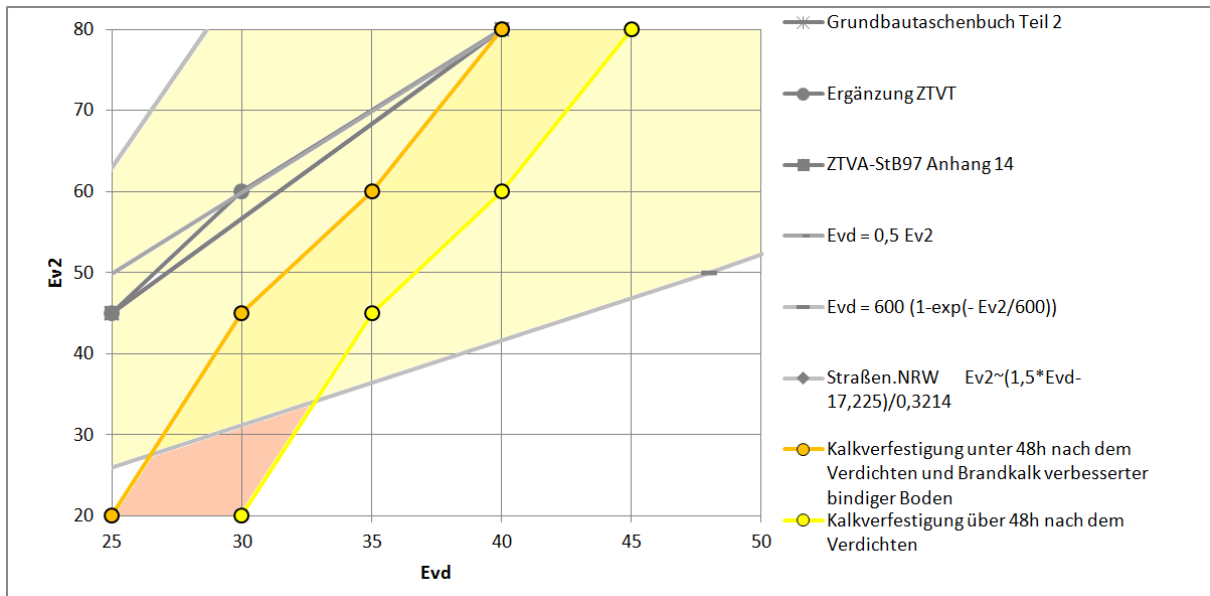


Abbildung 42: Literatur-Empfehlungen zur Korrelation von bindigen verbesserten und verfestigten Materialien

Man sieht an der Abbildung 42, dass verfestigter Boden aus der mittlerweile bekannten Schere der Korrelationsgraphen nach unten ausbricht. Da verfestigte und verbesserte Materialien nicht zu den klassischen Materialien gehören, ist es denkbar, dass einige Literatur-quellen sie vernachlässigt haben, obwohl sie nicht explizit ausgeschlossen wurden.

Festzuhalten ist allerdings, dass vor allem bei verbessertem/verfestigtem Material der Faktor Abbindezeit eine wesentlichere Rolle spielt.



### 8.1.4 Auswertung der Literaturdaten aus Österreich

Beaufschlagt man den Korrelationsansatz der RVS aus Österreich (zusammengesetzter Graph in blau-schwarz) mit einem standardisierten „guten“ Verdichtungsverhältnis (rollige Böden von  $E_{v2}/E_{vd} = 2,5$ ) entsteht der zusammengesetzte Graph in rot für  $E_{v2}$ - $E_{vd}$  (siehe Abbildung 43).

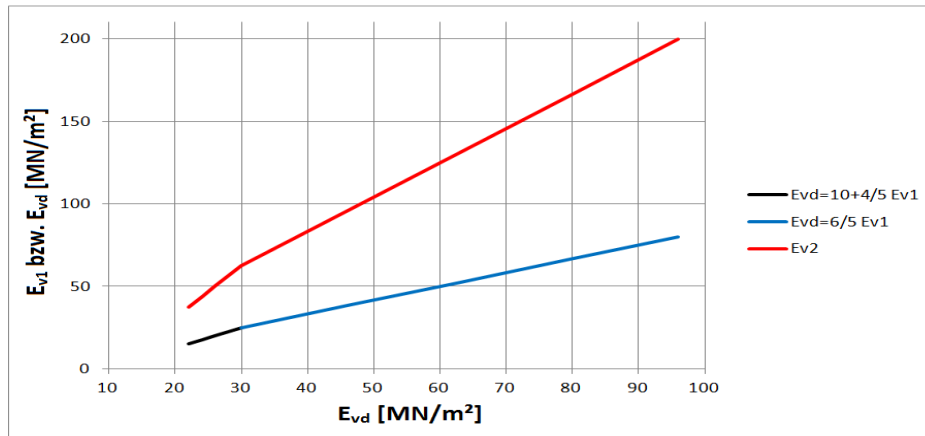


Abbildung 43: RVS mit den doppelten Ordinatenwerten für  $E_{v2}$ -Werte

Natürlich ist dies nicht im Sinne der österreichischen Richtlinie und sollte daher nicht in dieser Weise praktiziert werden. Aber der so entstandene Graph kann dann qualitativ mit den Graphen aus Deutschland verglichen werden.

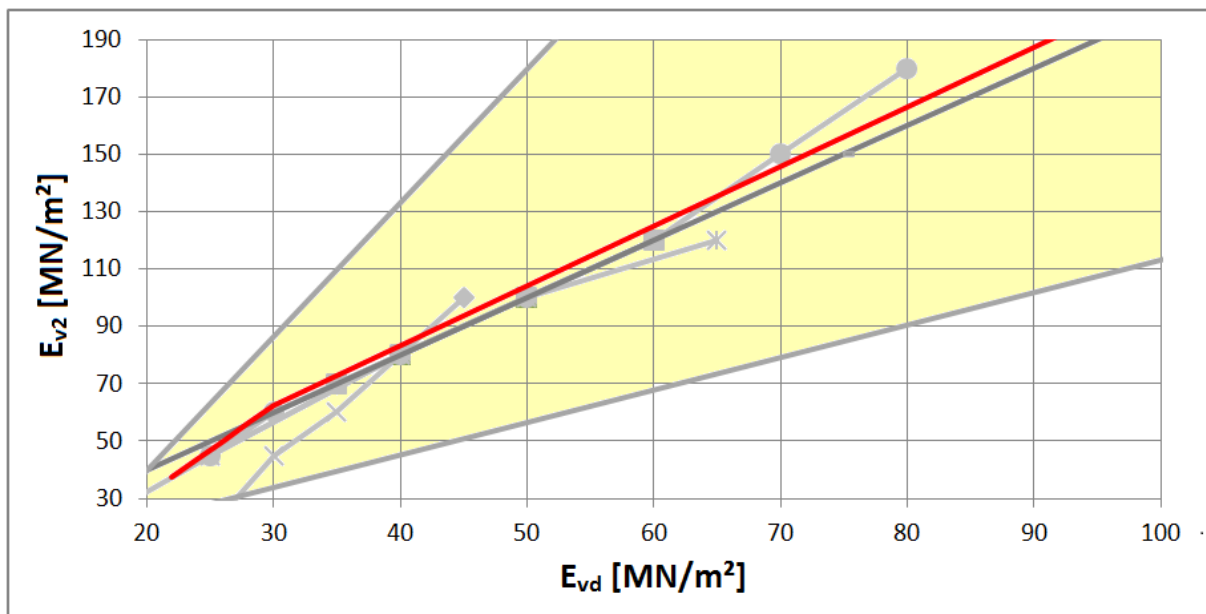


Abbildung 44: Korrelationen aus der Literatur für Kies und alle Baumaterialien mit Umrechnung der österreichischen RVS

Der rote Graph zeigt die umgerechnete Linie. Dieser liegt mittig in den in Deutschland geltenden, bekannten Korrelationen und somit im Hauptstrang. Dieser interessante Fakt zeigt, dass die Korrelation, die seit 2008 in Österreich ihre Gültigkeit hat prinzipiell genau dieselbe Aussage tätigt, wie jene, die in Deutschland vorherrschen.

Die einzigen Unterschiede zu den Korrelationen aus Deutschland sind der Bezug zum  $E_{v1}$ -Wert und dass nur die Mindestanforderungen und nicht die Messwerte korreliert werden dürfen. Wie bereits in Kapitel 6.2.3 genannt wurde, ist der Grund dafür vermutlich die Streuung der Versuche.

Der österreichische Ansatz, die dynamischen Verformungsmodulwerte mit dem des Erstbelastungswertes zu vergleichen, ist eine interessante Herangehensweise, auf die später noch eingegangen wird. Gibt es zwischen dem  $E_{vd}$  und dem  $E_{v1}$ -Wert eine bessere Korrelation, als zu dem  $E_{v2}$ -Wert? Dann wäre es denkbar, diese Korrelation eher durchzuführen. Der Nachteil daran ist allerdings, dass sich in Deutschland sämtliche Anforderungen an Straßenaufbauten (Schotterpolster etc.) auf den  $E_{v2}$ -Wert beziehen. Das bedeutet, dass zur sinnvollen Nutzung von solchen Korrelationen die normativen Anforderungen auch auf den  $E_{v1}$ -Wert umgestellt werden müssten. Dies erscheint wenig realistisch, außerdem könnte man dann auch gleich  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$ -Werte in den Richtlinien angeben.

## 8.2 Auswertung der Versuchsdaten

Alle vorliegenden Versuche in einem Diagramm zusammengestellt sieht man in Abbildung 45:

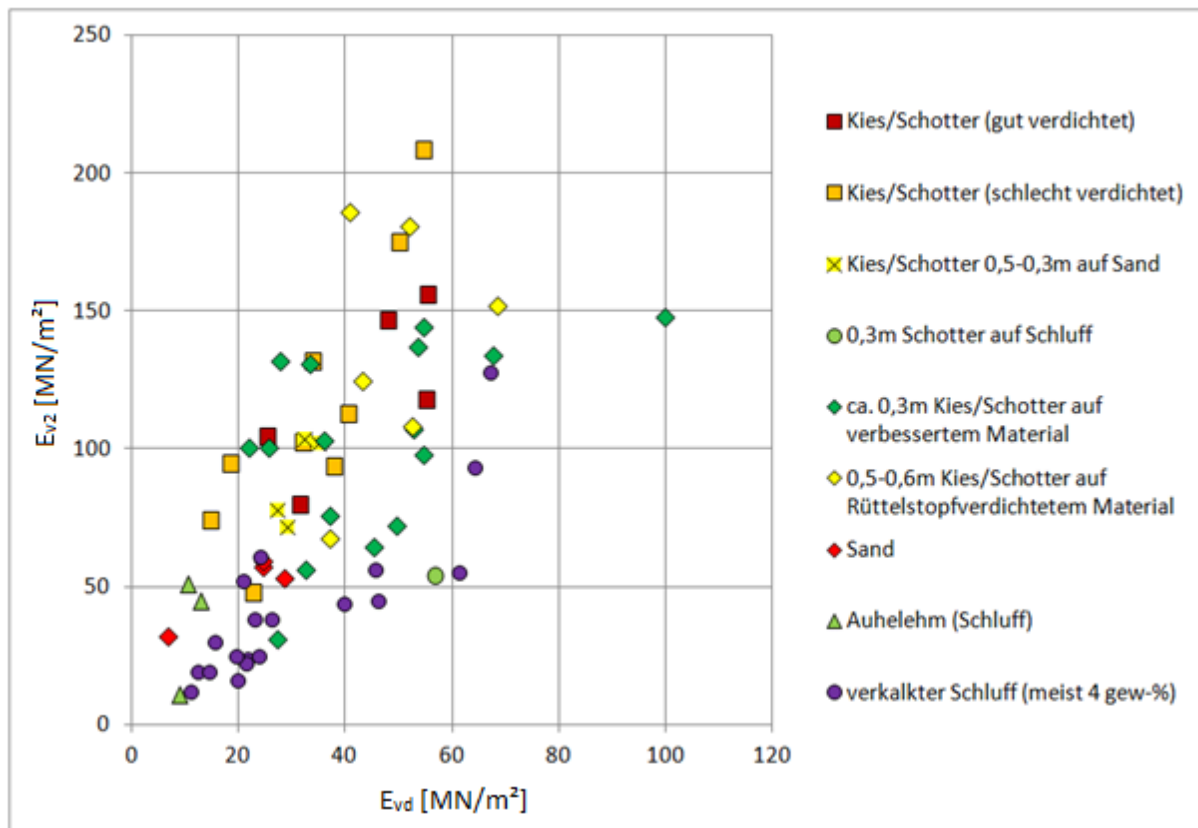


Abbildung 45: alle zur Verfügung stehenden Versuche, außer Asphaltbeton und Versuche von Weingart (2003)

Anhand dieser Punktwolke kann man gut erkennen, dass eine Korrelation zwischen  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$  schwer möglich ist. Betrachtet man die Punkte nach den unterschiedlichen Materialien so lässt sich möglicherweise eine bessere Korrelation aufstellen. Diese These wird vor allem von den Punkten für Kies (rotes Rechteck), Sand (rote Raute) und verbessertem Planum (lila Punkt) untermauert, da diese in ihrer Tendenz stark voneinander abweichen, aber untereinander eher ähnlich liegen.

Diese Beobachtung steht allerdings leicht im Konflikt mit den Aussagen der Literatur, in denen die meisten Korrelationen für die verschiedenen Materialien am Ende auf der Faustformel-Korrelation lagen.

Im Folgenden werden daher die Versuche nach Materialien getrennt und mit den zugehörigen Korrelationen aus der Literatur aufgetragen.

### 8.2.1 Versuchsauswertung für Sand

Beginnt man nun mit den Versuchen auf Sand und fügt diese in die bereits vorgestellten Korrelationen ein, entsteht folgendes Bild:

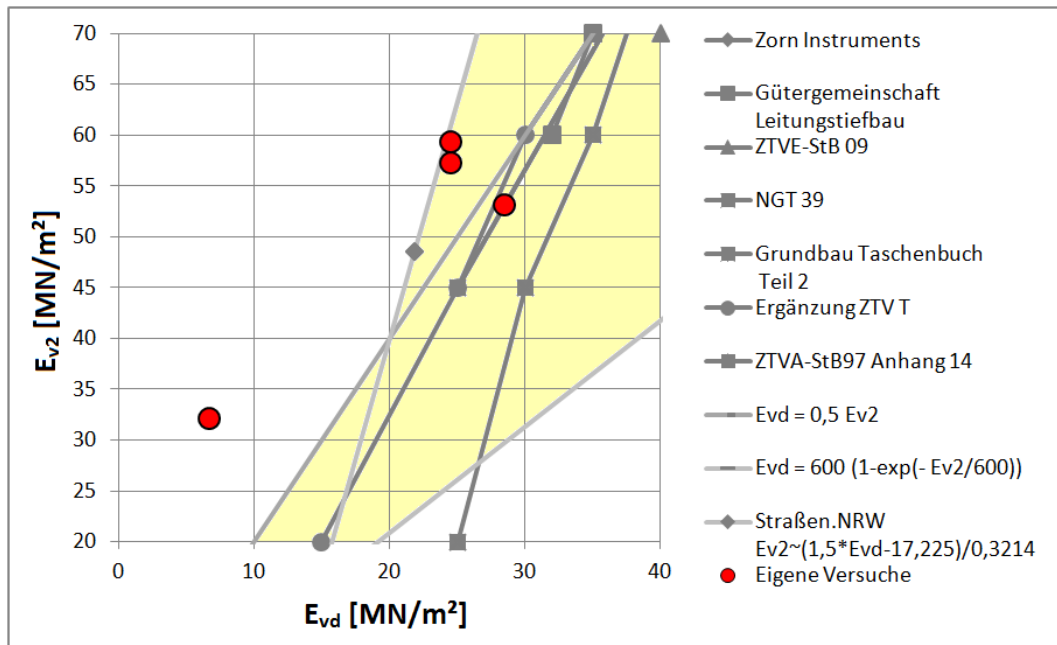


Abbildung 46: eigene Versuche (Sand) im Vergleich zu den Korrelationen

Abbildung 46 zeigt, dass drei von vier Versuchen innerhalb der von der Literatur aufgespannten Fläche liegen (allerdings nur einer auf dem „Hauptstrang“ und die anderen eher darüber).

Dass ein weiterer Versuch völlig aus dem Raster fällt, ist vermutlich dem Fakt geschuldet, dass dieser auf natürlich gewachsenem Boden und nicht auf einer definierten und verdichteten Fläche durchgeführt wurde.

Der genau auf dem Hauptstrang liegende Versuch hat das beste Verdichtungsverhältnis ( $E_{v2}/E_{vd}=2,23$ ). Das Verdichtungsverhältnis der anderen Versuche liegt jeweils deutlich höher.

Aus diesem Grund lässt sich derzeit die Annahme treffen, dass neben der Bodenart auch die Bedingungen (Verdichtungsverhältnis und natürlicher oder eingebauter Boden) eine nicht vernachlässigbare Rolle spielen. Allerdings stehen in dieser Arbeit für eine Korrelationsprognose für gewachsene Böden nicht genug Versuche zur Verfügung.

Die Versuchsdaten (außer für gewachsenen Boden) zeigen bezüglich des Hauptstrangs eine mittlere Abweichung von rund 15% (genauere Daten siehe Anhang XLVIII). Das ist gar nicht so schlecht, allerdings ist die Stichprobe nicht groß genug. Vorbehaltlich weiterer Versuche ist davon auszugehen, dass die Faustformel den aufgefüllten Sand gut beschreibt. Die Daten lassen außerdem den Schluss vermuten, dass ein gut verdichteter Sand besser an der Korrelation liegt, als ein schlecht verdichteter.

Vergleicht man die Versuchsergebnisse des Sandes mit der Korrelation aus Österreich für  $E_{v1}$ -Werte so erhält man den in Abbildung 47 dargestellten Verlauf.

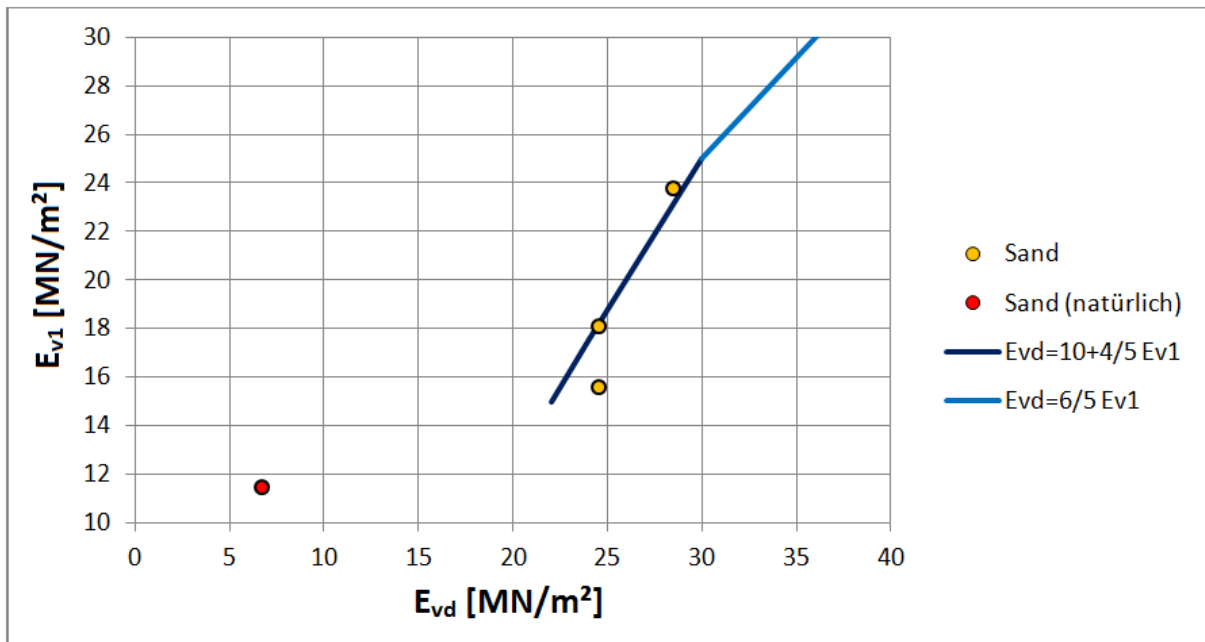


Abbildung 47: eigene Versuche (Sand) im Vergleich zu der österreichischen Korrelation

Es ist gut zu erkennen, dass diese Korrelation die Versuchsdaten (außer für gewachsenen Boden) besser beschreibt, als die für den  $E_{v2}$ -Wert.

### 8.2.2 Versuchsauswertung für Kies

Analog zum Sand lassen sich auch die Versuchsergebnisse für Kies in die entsprechenden Korrelationsfunktionen eintragen, wobei auch hier in guten und weniger gut verdichteten Kiese unterschieden wurde.

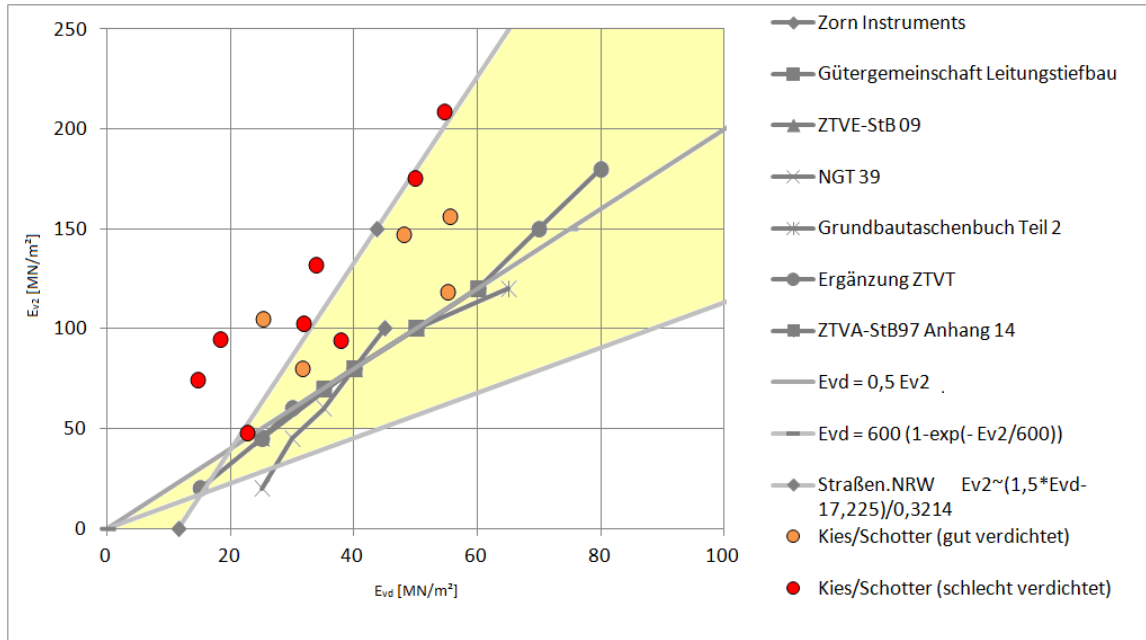


Abbildung 48: Versuche (Kies/Schotter) im Vergleich zu den Korrelationen

Anhand Abbildung 48 fällt auf, dass die gut verdichteten Versuche eher (zu 80%) innerhalb der gelben, von der Literatur aufgespannten, Fläche liegen. Von den schlecht verdichteten Versuchen liegen nur ca. 1/3 der Versuche im gelben Bereich. Im Vergleich zu Abbildung 46 fällt auf, dass die Kies-Versuche alle etwas höher liegen.

Trägt man die Ergebnisse der Versuche wie in Abbildung 48 in die Korrelationen ein und setzt sie dann ins Verhältnis mit den Randfunktionen und der Faustformel, erhält man die Abweichungen der Korrelationen zu den Messwerten. Die Abweichung der Messwerte zur oberen Funktion ist am geringsten, mit einer mittleren Abweichung von 34% (für gut verdichtete) bzw. 36% (für schlecht verdichtete Materialien) immer noch sehr hoch (siehe Anhang XLVIII).

Auf die Faustformel bezogen sind die Abweichungen für gut verdichteten (45%) und für weniger gut verdichteten Kies (85%) noch um Einiges größer. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die Faustformel hier keine gute Korrelation liefert. Die untere Randfunktion eignet sich hierfür gar nicht.

Ausgleichsgraden, welche die gemessenen Werte am besten korrelieren, sind in Abbildung 49 eingetragen.

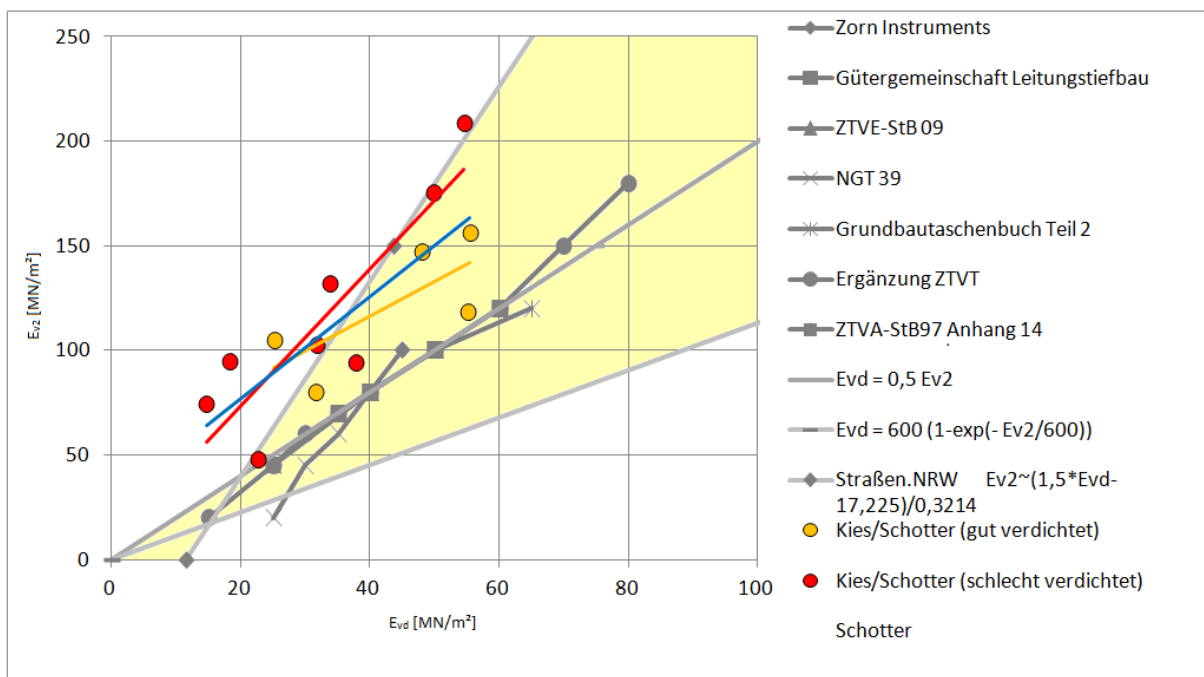


Abbildung 49: Versuche (Kies/Schotter) mit Ausgleichsgraden, die blaue Gerade gilt für alle Werte

Die beiden Graden (jeweils in der Farbe der Punkte) gelten für gute oder schlechte Verdichtung. Die blaue Gerade korreliert alle Versuche für Kies. Alle drei Funktionen sind von der Faustformel nach oben verschoben. Die blaue Korrelation, welche alle Daten erfasst ist ansatzweise parallel zur Faustformel (Steigung ist 2,4).

Ein möglicher Einflussfaktor für die Verschiebung ist die Kornform. Die Versuche haben allesamt auf Schotter, also gebrochenem Material stattgefunden. Wertet man diesbezüglich die Angaben der Firma NAUE aus, so erhält man in etwa eine mittlere Verschiebung von 10 MN/m<sup>2</sup> von Kies- (gerundete Form) zu Schotter (vgl. Anhang LI und LII). Die für die blaue Ausgleichsgerade nötige Verschiebung liegt allerdings eher höher. Es herrscht an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf.

In Österreich werden die dynamischen Verformungsmodule mit den Erstbelastungsmodulen korreliert. Auch für Kies stellt sich die Frage, ob die Korrelation zwischen  $E_{vd}$  und  $E_{v1}$  besser ist, als zwischen  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$ .

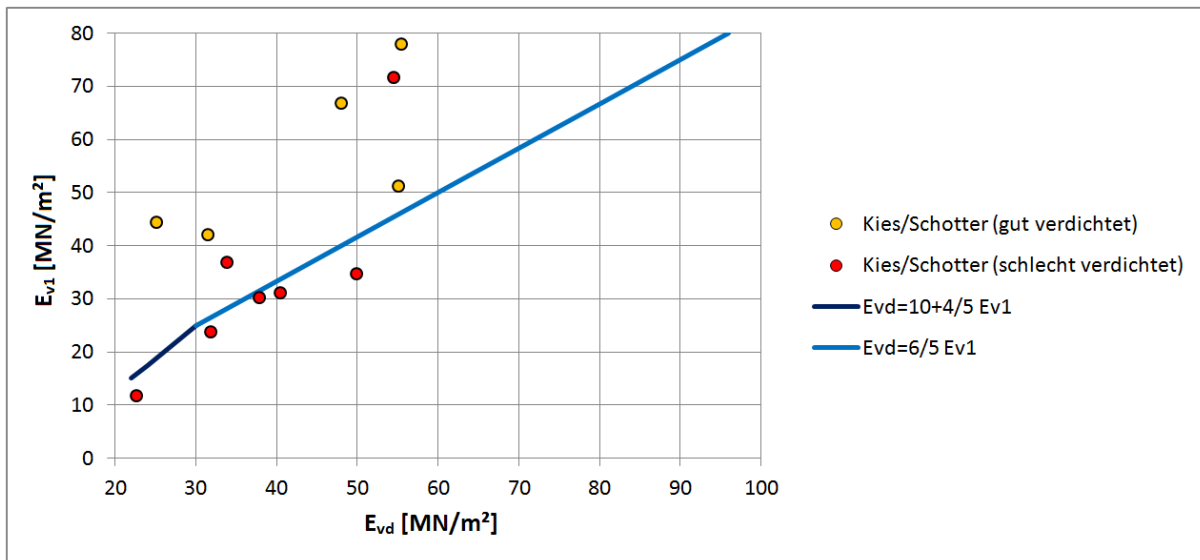


Abbildung 50: Korrelation für Kies/Schotter, mit der Korrelation aus Österreich

Abbildung 50 zeigt, dass die schlecht verdichteten Versuche hier viel besser, ja sogar fast genau auf dem Graphen der österreichischen Korrelation liegen. Es scheint also auch bei Kies tatsächlich so zu sein, dass  $E_{vd}$  mit  $E_{v1}$  besser zu korrelieren ist. Das ist auch nicht sehr verwunderlich, da der Einfluss einer Randbedingung (Verdichtungsgrad) bei  $E_{v1}$  geringer sein muss.

Die Werte für gut verdichtetes Material sind gegenüber der österreichischen Korrelation deutlich nach oben verschoben. Das ist zunächst nicht plausibel. Es könnte wiederum ein Anzeichen dafür sein, dass eben neben dem Verdichtungsverhältnis die Kornform hier tatsächlich eine Rolle spielt. Bei den gut verdichteten Versuchen haben sich die Körner bereits vor der Erstbelastung (des statischen Versuches) untereinander verkeilt. Bei dem schlecht verdichteten Material geschieht dies erst mit der Erstbelastung selbst, weswegen der Effekt nur bei der Korrelation mit der Wiederbelastung auffällt.

Es kann wiederum festgehalten werden, dass  $E_{vd}$  nach dem österreichischen Ansatz besser mit  $E_{v1}$  korreliert, als mit  $E_{v2}$ . Das Verdichtungsverhältnis hat hier weniger bis keinen Einfluss, aber der Einfluss der Kornform ist hier zusätzlich zu beachten. Außerdem sind die bezogenen Abweichungen der Messwerte im Vergleich zur österreichischen Korrelation immer noch groß (siehe Anlage XLIX).



### 8.2.3 Versuchsauswertung für bindige Materialien

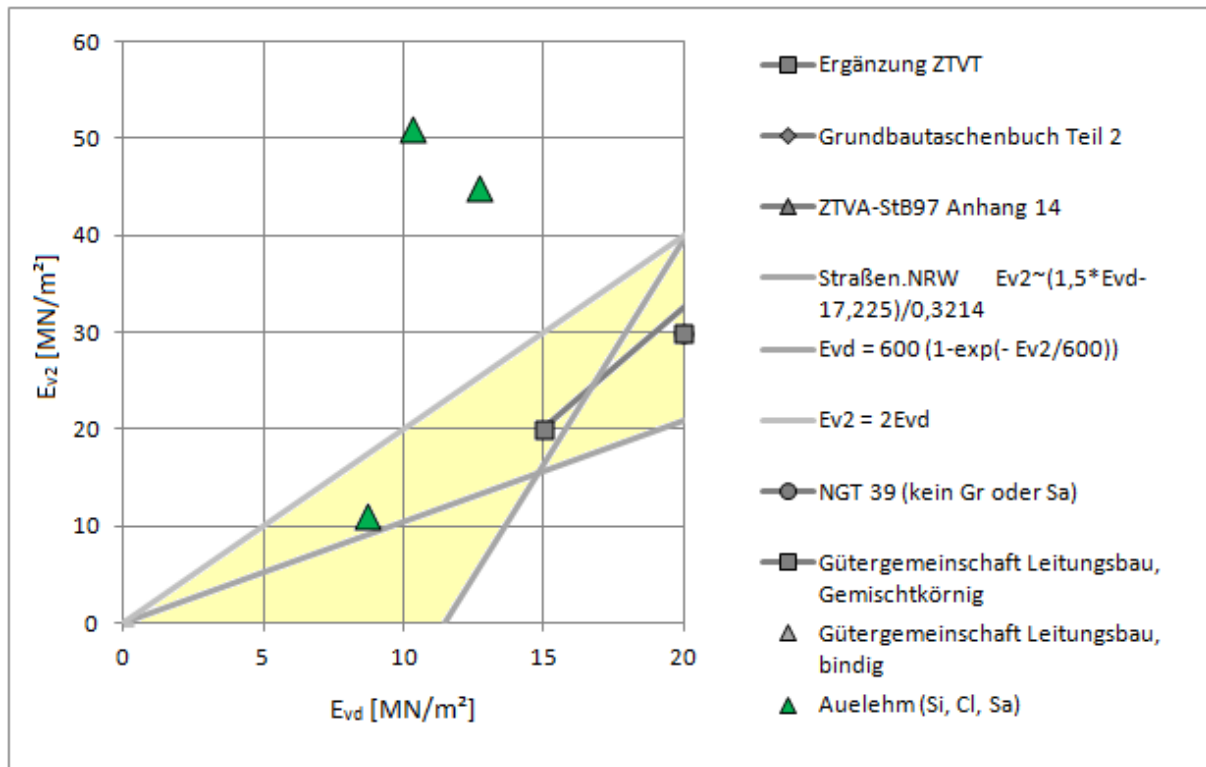


Abbildung 51: Versuche (Schluff) im Vergleich zu den Korrelationen

Die Messwerte für Schluff liegen weit abseits der in der Literatur angegebenen Korrelationen. Es ist möglich, dass dies an der geringen Stichprobe liegt, die außerdem auch nur einen sehr niedrigen  $E_{vd}$ -Wert aufweist.

Da bindige Materialien eher weniger für eine Verdichtungskontrolle relevant sind, wird dies in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

### 8.2.4 Versuchsauswertung für verbesserte Materialien

Wie bereits beschrieben, spielt vor allem bei verbesserten Materialien die Zeit zwischen Verdichtung und Versuch eine noch größere Rolle. Neben der „Beruhigung“ des verdichteten Materials ist auch das zeitabhängige Abbinden zu berücksichtigen. In der NGT werden dafür verschiedene Korrelationen angegeben.

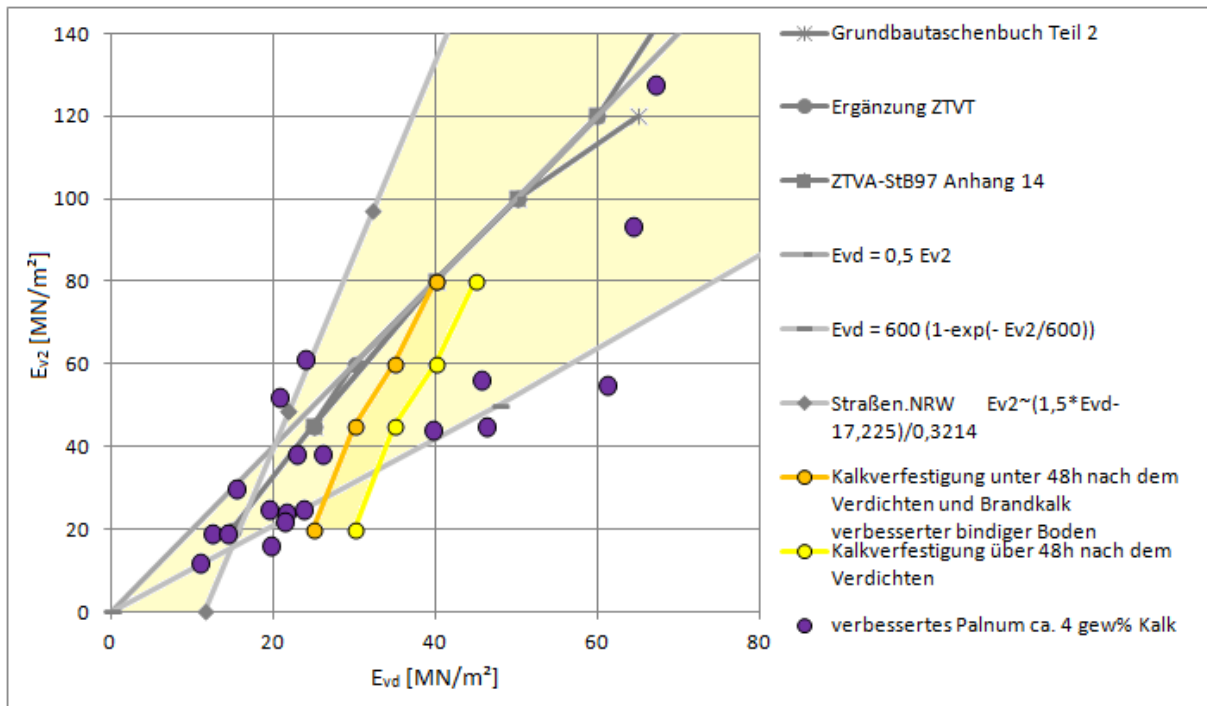


Abbildung 52: Versuche (verbessertes Planum) im Vergleich zu den Korrelationen

Es fällt auf, dass keiner der Versuche im Bereich zwischen den beiden farblich (gelb und orange) markierten Funktionen (welche speziell für dieses Material gelten) liegt. Vielmehr liegen sie in dem scherenförmigen gelb markierten Bereich, der für alle Materialien gilt. Je größer  $E_{vd}$  wird, desto eher liegen sie in der vorliegenden Stichprobe unterhalb der Faustformel. Es hat den Anschein, dass sich die untere Randfunktion  $E_{vd} = 600 (1 - \exp(-E_{vd}/600))$  gut als Korrelation für verbessertes Material eignet.

Es ist bei den Versuchsdaten leider nicht bekannt, wie lange nach der Verbesserung gemessen wurde. Die meisten Daten wurden bereits 2000 erfasst, weswegen dies nicht mehr rekonstruierbar ist.

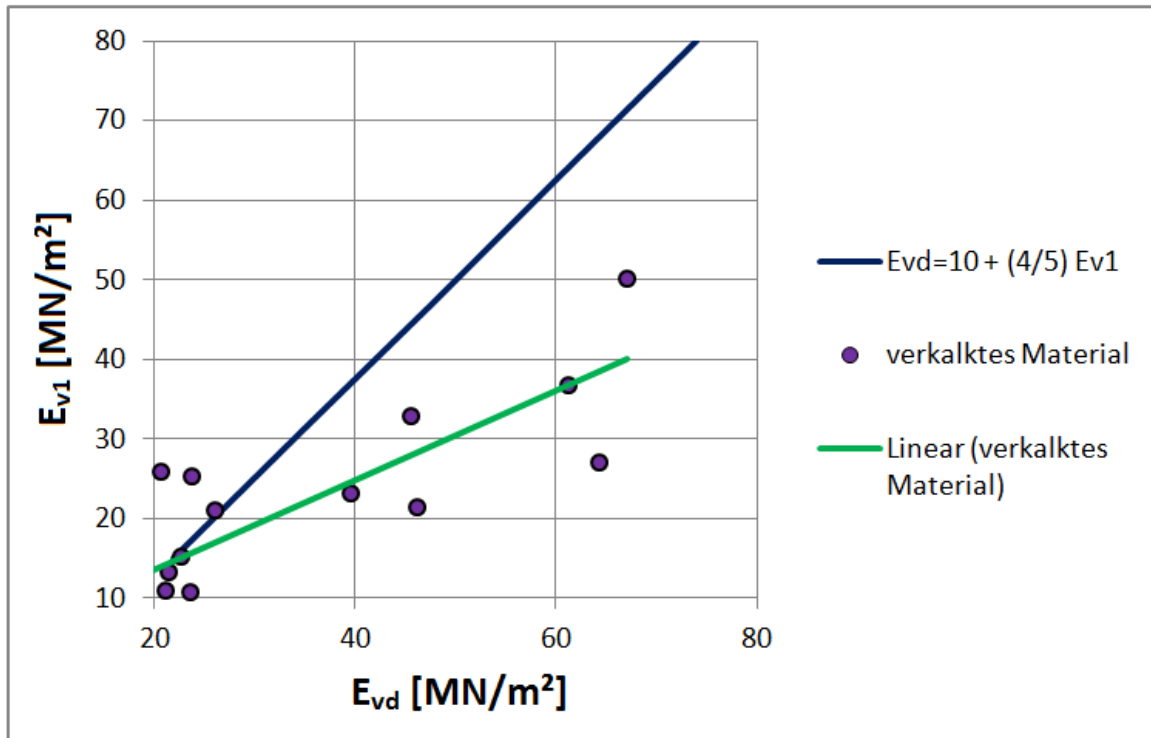


Abbildung 53: Versuche (verbessertes Planum) mit  $E_{v1}$

In Abbildung 53 sind die Versuchsergebnisse für verbessertes Planum (vercalcater Schluff) im Verhältnis zur österreichischen Korrelation für bindiges Material (in blau) dargestellt. Die Versuchswerte weichen stark vom Graphen ab, was jedoch nicht verwunderlich ist, da der Graph für bindiges Material gilt und die Versuche auf verkalktem bindigen Material durchgeführt wurden. Die grüne Ausgleichsgrade der vorhandenen Versuche hat eine wesentlich flachere Steigung, aber die Standardabweichungen der einzelnen Versuche sind trotzdem noch sehr groß.

Bei verbesserten Materialien sind außerdem grundsätzliche Fragen zu klären. Je nach Bindemittel und Abbindezeit können betonähnliche Materialien entstehen. Es stellt sich dann die Frage, ob diese mit den in der Arbeit untersuchten Versuchen überhaupt sinnvoll geprüft werden können. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die maximalen Prüfspannungen (besonders beim LFG) erheblich geringer sind, als in der Betonprüfung verwendete Prüfspannungen.

### 8.2.5 Versuchsauswertung für geschichtete Materialien

Besonders schwer ist es, eine Korrelation zu geschichtetem Baugrund zu finden. Betrachtet man das Problem aus der Sichtweise der herkömmlichen Setzungsberechnung, so wird schnell klar, dass geschichtetes Material eigentlich zwei verschiedene Verformungsmodulare hat. Allerdings geben sowohl der statische, als auch der dynamische Versuch nur einen Modul an. Dieser ist also dann ein aus zwei oder mehr Modulen superpositionierter Modul. Neben der Differenz der beiden Modulen geht selbstverständlich auch die Mächtigkeit der oberen Schicht in erheblichem Umfang in den mit den Versuchen gemessenen „Messwert“ ein.

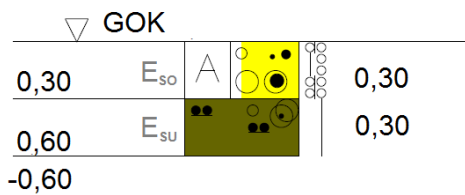


Abbildung 54: Bohrprofilbeispiel

Für den praxisrelevanten Fall, dass die steifere Schicht (z.B. Schotterpolster) über der weicheren Schicht (z.B. Planum) liegt, werden diese Abhängigkeiten nachfolgend mittels Setzungsberechnung für eine Dicke der steifen Schicht von 30 cm gezeigt (mit  $E_v = \frac{1-\nu-2\nu^2}{(1-\nu)(1-\nu^2)} E_s$ ; Querdehnung  $\nu = 0,2$ )

Aus der Formel für die Setzungsberechnung folgt für obiges Bohrprofil (Abbildung 54)  $s = \frac{\sigma_0 b}{E_s} f \rightarrow E_s = \frac{\sigma_0 b}{s} f = \frac{\sigma_0 b}{E_s} \left( \frac{f_1}{E_{s1}} + \frac{f_2 - f_1}{E_{s2}} \right)$  und der f-Tafel für runde Auflasten mit dem Durchmesser 300mm und der Wirtiefe 600 mm folgt:  $E_{s,calc} = \frac{0,68 E_{s1} E_{s2}}{0,41 E_{s2} + 0,27 E_{s1}}$ . Dabei ist  $\Delta E_s$  die Differenz von  $E_{SO}$  und  $E_{SU}$  und  $\mu_{E_s}$  deren Mittelwert.

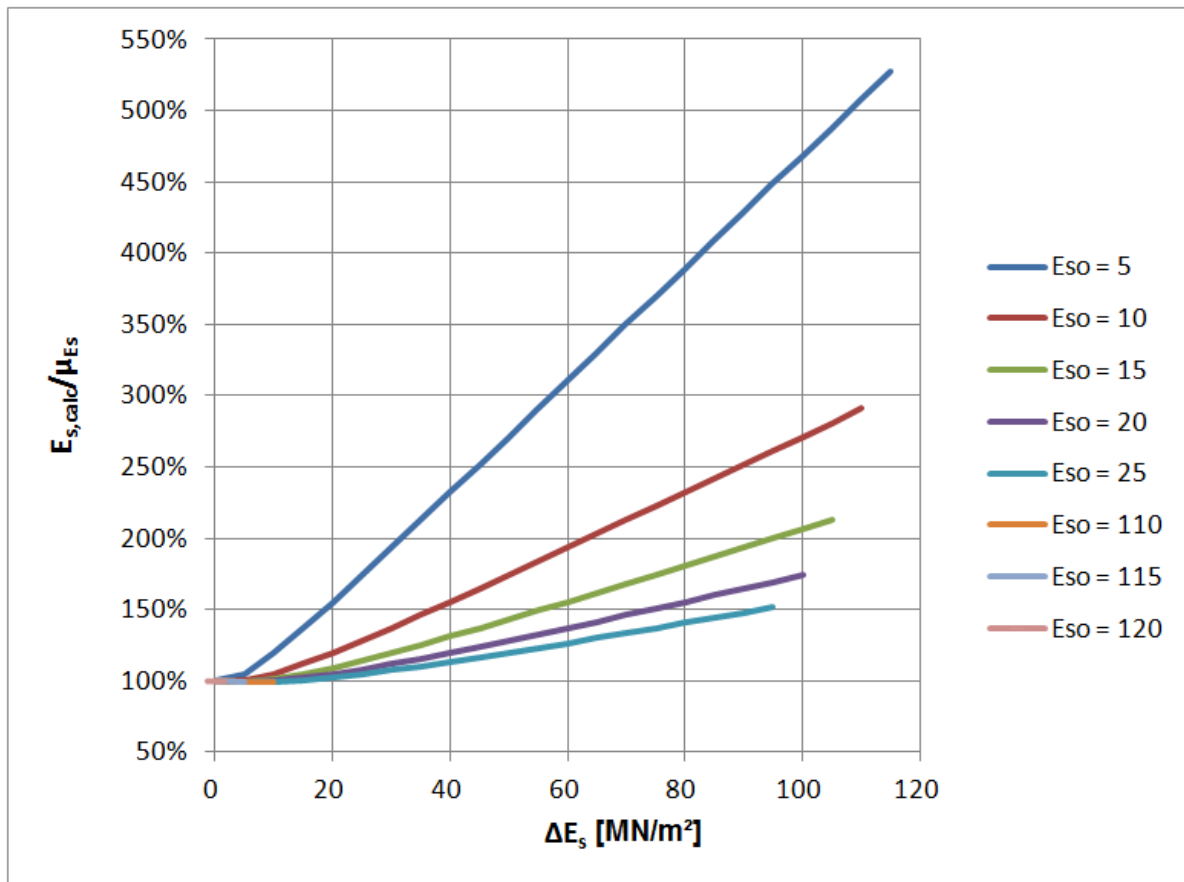


Abbildung 55: Abweichung des Mittelwerts zum rechnerischen Wert des Steifemoduls bei zwei gleich großen Schichten mit unterschiedlichen  $E_s$  Werten

Der in Abbildung 55 dargestellte Verlauf gilt für die in Abbildung 54 exemplarisch dargestellte Schichtung (exemplarische Wertetabelle siehe Anhang XLVII). Es ist zu sehen, dass mit steigender Modulldifferenz die aus der Setzungsformel stammenden kalkulatorischen Module im Vergleich zu den gemittelten Modulen stark abweichen. Die Mächtigkeit der Schichtung selbst hat einen ähnlichen Einfluss. Es gilt, je größer die Dicke der oberen Schicht ist, desto weniger Einfluss hat die untere Schicht.

Damit ist bei geschichteten Materialien sowohl die Aussagekraft des statischen Versuches als auch die des dynamischen Versuches jeweils für sich allein, gesehen, schon sehr begrenzt.

Für jede Kombinationsmöglichkeit aus Material und Schichtung auch noch eine Korrelation zwischen Beiden zu finden ist eine nahezu unmögliche Aufgabe. Um trotzdem eine Beziehung der Versuche vorzunehmen, ist es daher erforderlich diese zu gruppieren. Die Versuche, die auf geschichtetem Material durchgeführt wurden, sind in Abbildung 56 in die Graphen aus der Literatur eingetragen.

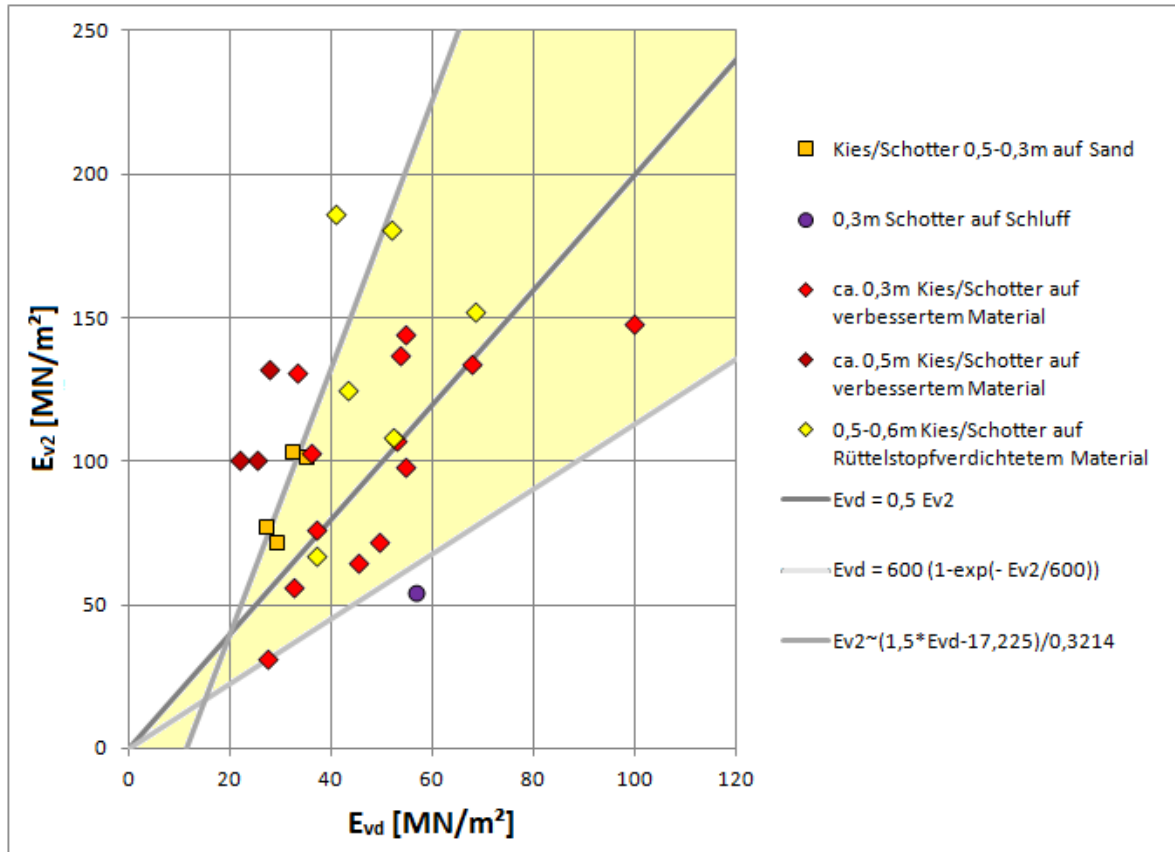


Abbildung 56: Versuche (geschichtetes Material) im Vergleich zu den Korrelationen

Analog zu Kapitel 8.2.4 kann bei geschichtetem Material (Schotter/Sand) fast davon ausgegangen werden, dass die obere Randfunktion passt. Da die Korrelation von einem Straßenbauvortrag stammt, ist es auch möglich, dass sie vorzugsweise für Tragschichten (Kies/Schotter/Sand) gültig ist. Interessant ist auch, dass die unterschiedlich dicke Schichtung keinen Einfluss auf das Ergebnis zu haben scheint. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die beiden Materialien im vorliegenden Fall ähnliche oder gar gleiche Verformungsmodulare haben. Je weniger sich die  $E_v$ -Werte der einzelnen Schichten unterscheiden, desto weniger Einfluss hat die Schichtung.

Die Schichtung Kies auf verbessertem Schluff bildet scheinbar eine diffuse Punktwolke. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass sie sich tatsächlich fast an der Faustformel zu orientieren scheint, vor allem bei einer Schichtung, deren Grenze bei der Hälfte des Messbereiches der Geräte liegt. Die Schichtung bei der die obere Schicht (Schotter) bis 50 cm tief geht, liegt deutlich über der Schere. Damit liegt unter Berücksichtigung der Messtiefe nahezu ungeschichtetes Material vor. Daher erinnert diese Korrelation an jene für Kies/Schotter.

Auch bei der Schichtung Schotter/Kies, auf mit Rüttelstopfsäulen verbessertem Schluff (Versuche fanden zwischen den Säulen statt), ist nur eine undeutbare „Punktwolke“ zu sehen. Auch sie scheint dem Hauptstrang zu folgen, wobei gerade im oberen Bereich eine große Aufweitung zu erkennen ist. Da für eine signifikante Aussage allerdings nicht genügend Versuche vorhanden sind, bleibt dies nur eine Vermutung, die weiterverfolgt werden müsste.

## 8.2.6 Verdichtungsverhältnis

Wie bereits beschrieben, ist die fehlende Aussage über das Verdichtungsverhältnis beim dynamischen Versuch ein großes Problem bei der Korrelation des dynamischen und statischen Lastplattendruckversuches. Dieses Verdichtungsverhältnis ist beim statischen Versuch als  $E_{v2}/E_{v1}$  definiert.

Neuere LFGs können die weitere Verdichtbarkeit prüfen, indem sie den Verhältniswert  $v/s$  angeben, dieser hat laut Hersteller (ZORN Instruments, 2011) allerdings keinerlei Beziehung zum Verdichtungsverhältnis. Leider verfügt nur eines der von mir verwendeten Geräte über diese Funktion. Bei den Messungen auf dem Versuchsfeld an der TU Darmstadt wurden diese Werte erfasst und können mit den  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werten verglichen werden.

Versuch	U2 (Versuchsfeld)	U3 (Versuchsfeld)	U4 (gewachsener Baugrund)
$s/v$ [ms]	3,612	3,446	17,694
$E_{v2}/E_{v1}$ [-]	3,18	3,82	2,79

Tabelle 13:  $s/v$ -Werte der Versuchsreihe U zu den  $E_{v2}/E_{v1}$ -Werten

Der empfohlene Grenzwert für  $s/v$  liegt laut Weingart (1993) bei  $s/v$  von 3,5 ms. Für Messergebnisse unterhalb des Grenzwertes ist demnach eine ausreichende Verdichtung erzielt worden, liegen die Ergebnisse darüber, sollte nachverdichtet werden. Tabelle 13 scheint zu bestätigen, dass der Wert  $s/v$  (der die noch weitere mögliche Verdichtbarkeit angibt) mit dem Verdichtungsverhältnis nichts zu tun hat. Allerdings ist die Stichprobe für eine abschließende Aussage zu gering. Die weitere Verdichtbarkeit des Versuchsfeldes ist nicht groß, obwohl der  $E_{v2}/E_{v1}$ -Wert nicht sehr gut ist. Die Verdichtbarkeit des Versuches U4, welcher auf gewachsenem Boden stattgefunden hat, ist hoch, das Verhältnis wiederum ist aber gut.

Der  $v/s$ -Wert wird bisher in der Literatur nur selten erwähnt und ist in der Praxis ebenfalls relativ unbekannt. Dadurch ist er noch zu wenig verifiziert um weitere Aussagen treffen zu können, meine Versuchsanzahl ist ebenfalls zu gering.

Nach Schulz (2011) ist es durchaus möglich, bereits mit der in der Praxis verbreiteteren älteren Generation von LFGs eine Aussage über die Verdichtungsreserven zu tätigen, indem man den dynamischen Versuch zwei Mal hintereinander an derselben Stelle durchführt. Es stellt sich die Frage, ob man so auch auf das Verdichtungsverhältnis des statischen Plattendruckversuches schließen kann.

Wenn die Differenz der gemessenen dynamischen Verformungsmodule  $\Delta E_{vd}$  vernachlässigbar gering ist, so ist das Material in der Regel gut verdichtet (entspricht  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ ). Neben den  $E_{vd}$ -Werten sind auch die entsprechenden Setzungsmessungen „s“ nahezu identisch.

$$\Delta E_{vd} = E_{vd,2} - E_{vd,1}$$

Dann würde auch jetzt schon eine Korrelation von  $E_{vd}$  zu  $E_{v1}$  anwendbar sein, da man von  $E_{v1}$  über  $\Delta E_{vd}$  eine Umrechnung zu  $E_{v2}$  hätte und somit mit den geforderten  $E_{v2}$ -Werten vergleichen könnte.

Für Sand wurde im Zuge dieser Arbeit an der TU Darmstadt die Bestimmung von  $\Delta E_{vd}$  vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 57 dargestellt.

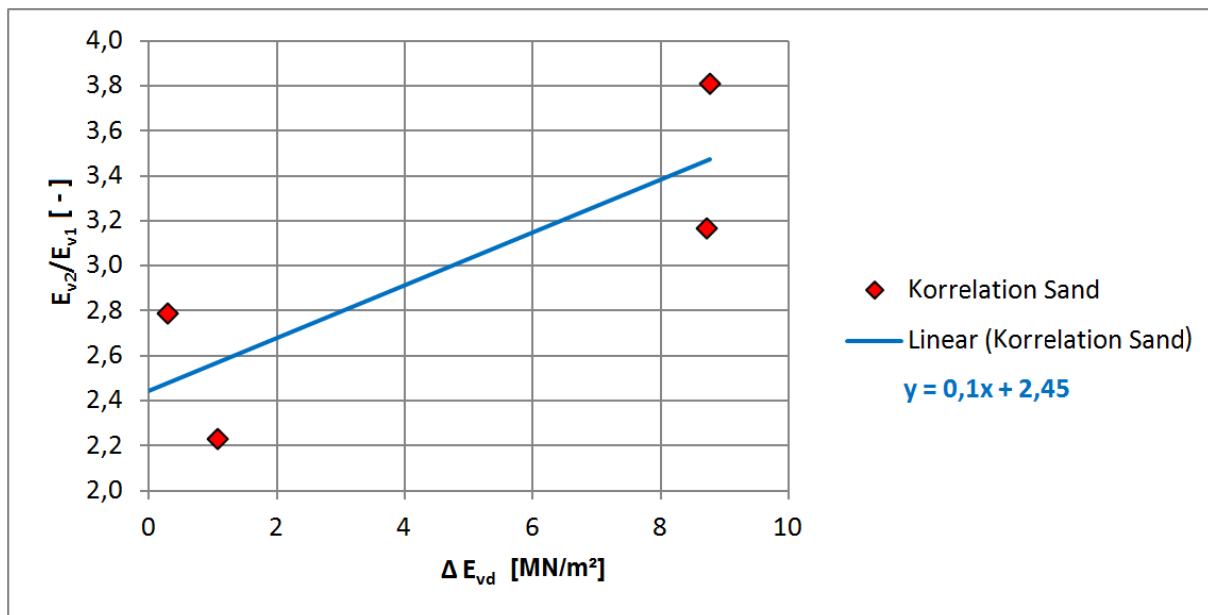


Abbildung 57: Verdichtungsverhältnis  $\Delta E_{vd}$  zu  $E_{v2}/E_{v1}$ , Korrelation für Sand

Aus den nur wenigen Versuchen zeigen sich folgende Tendenzen:

- geringes  $\Delta E_{vd}$  tritt bei geringen Verhältniswerten  $E_{v2}/E_{v1}$  auf
- hohes  $\Delta E_{vd}$  tritt bei großen Verhältniswerten  $E_{v2}/E_{v1}$  auf

Die in blau dargestellte Ausgleichsgerade deutet für Sand eine interessante mögliche Korrelation an, jedoch stehen hierfür nicht genügend Versuche zur Verfügung.



Auf Kies und auf Kies über Schluff mit Rüttelstopfsäulen verbessert wurden ebenfalls  $E_{vd}$ -Werte doppelt bestimmt. Da bei Letzterem die Mächtigkeit der Schotterschicht 50 bis 60 cm beträgt und somit nahezu die gesamte maximale Messtiefe (von ca. 60 cm) umfasst, kann vereinfacht vom gleichen Material ausgegangen werden. Die bestimmten Werte können der unten stehenden Abbildung 42 entnommen werden.

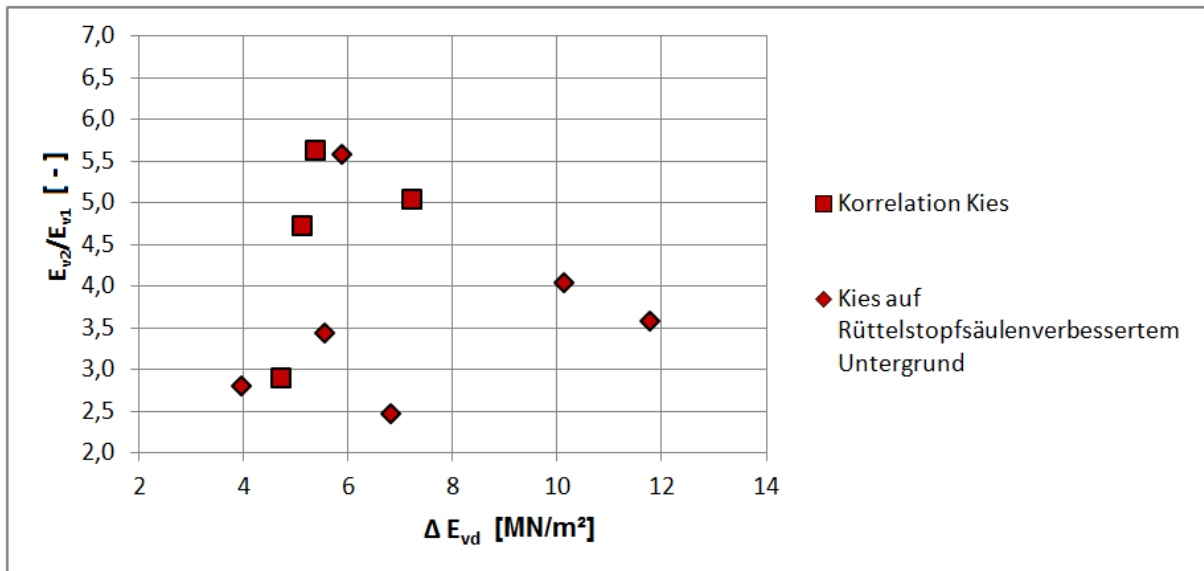


Abbildung 58: Verdichtungsverhältnis  $\Delta E_{vd}$  zu  $E_{v2}/E_{v1}$ , Korrelation für Kies

Die ermittelten Werte für Kies gleichen allerdings eher einem „Punkthaufen“, aus denen sich keine Korrelationen entwickeln lassen. Trennt man die Materialien trotz ihrer Ähnlichkeit doch voneinander, ist das Ergebnis auch nicht besonders aussagekräftig.

**Fazit:** Der  $\Delta E_{vd}$ -Wert ist insbesondere für Sand ein interessanter Ansatz um zu prüfen ob die Verdichtung gut oder weniger gut ist. Dieses sollte mit weiteren Messungen weiterverfolgt werden.

## 9. Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Auf die beiden untersuchten Versuchsarten und damit auch die Korrelation zwischen Beiden wirken eine Reihe von Einflussgrößen, die zunächst festgehalten sind:

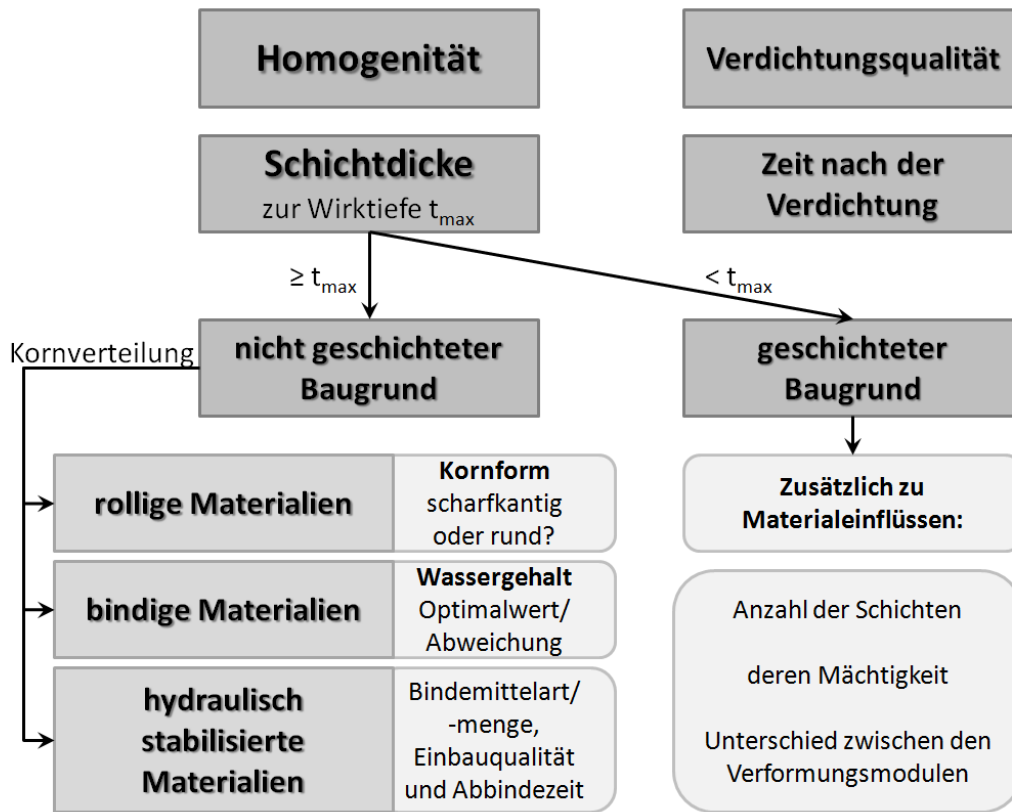


Abbildung 59: Schaubild der Einflussgrößen auf die Versuche

Hieraus ergibt sich, wie kompliziert bereits die Auswertung des Einzelversuches (LFG bzw. statischer LP) unter Berücksichtigung dieser vielfältigen Randbedingungen ist.

Für die Frage der Korrelation zwischen beiden sind zusätzlich die bodenmechanischen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu berücksichtigen:

Gemeinsamkeiten der Versuche:	Lastplattengröße (d = 300 mm) Einflusstiefe $t_{max} \approx 600$ mm	
Unterschiede zwischen den Versuchen:	Belastungsart:	statische Dauerlast vs. dynamischer Impuls
	Belastungszeit	wenige Millisekunden vs. ca. ½ Stunde (siehe Abbildung 17)
	Maximale Prüflast:	0,5 vs. 0,1 MN/m <sup>2</sup> (siehe Abbildung 17)
Ergebnis:	Erst- und Wiederbelastungsmodul vs. dynamischer Modul	

Vor dem Hintergrund:

- vielfältige Einflussgrößen auf den Einzelversuch
- große Unterschiede in der Versuchsart

sind alle Bezüge zur Schaffung einer Korrelation zu sehen.

Die Kernaussagen aus der Literatur und die Ergebnisse der Versuche sind in folgender Abbildung zusammengefasst:

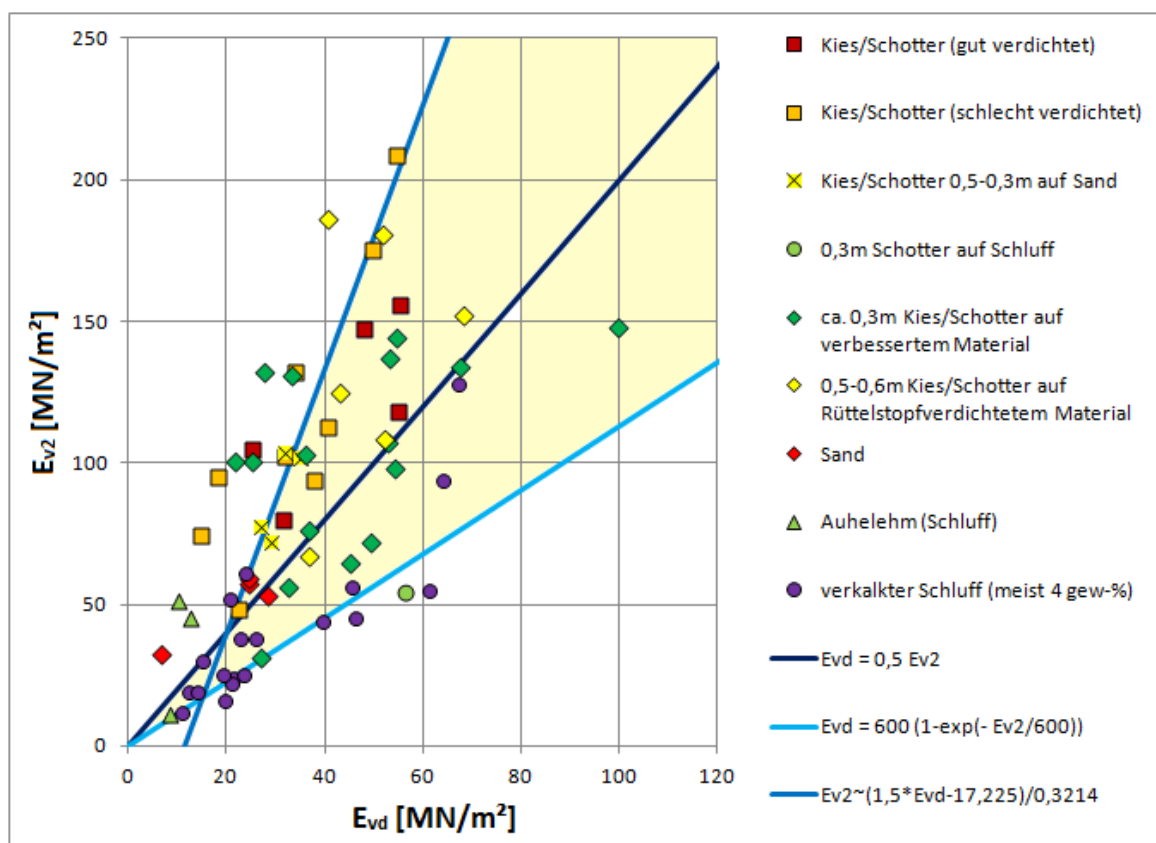


Abbildung 60: Alle verwendeten Versuche in der Korrelationsfläche der Literatur

Über 90% der Literaturdaten geben eine Korrelation an, die ungefähr mit der in der Praxis bekannten Faustformel ( $E_{v2} = 2 E_{vd}$ ) übereinstimmt (siehe ergänzend Abbildung 39 bis 41). Nur zwei deutsche Quellen weichen davon deutlich ab und bilden den in Abbildung 61 markierten scherenförmigen Bereich.

Da auch die den gelben Bereich in Abbildung 60 begrenzenden Randfunktionen ihrerseits Korrelationsfunktionen sind, können Versuchswerte auch außerhalb des Bereiches liegen. Die untersuchten Versuchsergebnisse liegen gemäß Abbildung 60 in diesem Spektrum und belegen, die grundsätzliche Richtigkeit der in der Literatur angegebenen Korrelationen.

Die Abweichung der bekannten Korrelationen untereinander ist relativ groß. Die Abweichungen der Versuchsergebnisse von den Korrelationen sind ebenfalls oft sehr groß.

Literaturquellen aus dem angloamerikanischen Sprachraum behandeln dieses Thema nicht, da dort der ähnliche aber nicht identische CBR-Versuch vorherrscht.

In Österreich wird der dynamische Modul ( $E_{vd}$ ) nicht wie in Deutschland mit dem Wiederbelastungsmodul ( $E_{v2}$ ), sondern mit dem Erstbelastungsmodul ( $E_{v1}$ ) korreliert.

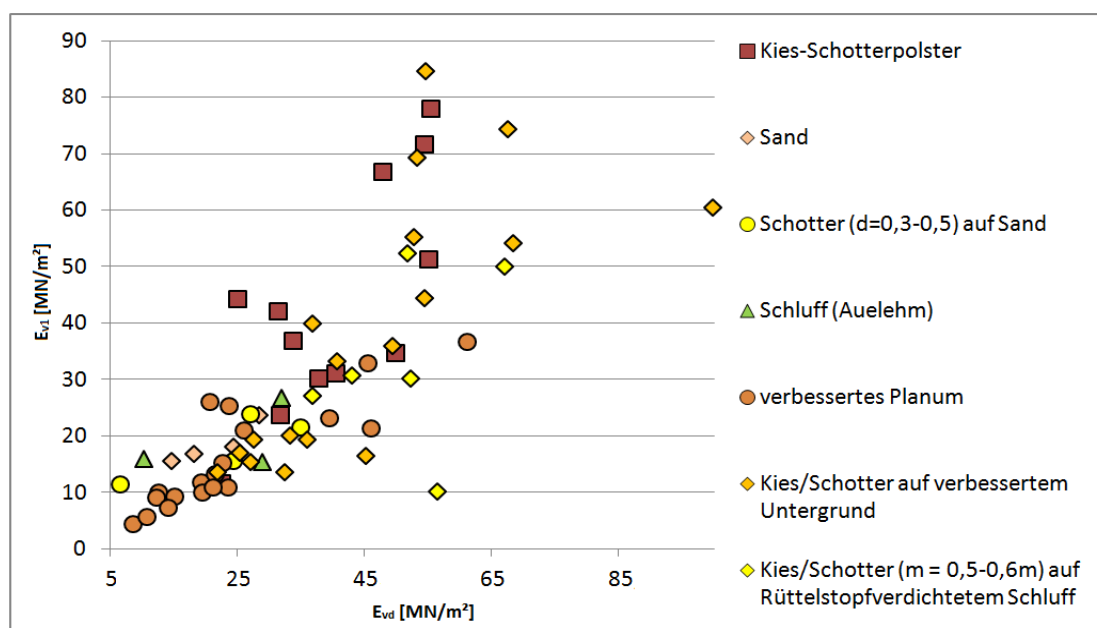


Abbildung 61: Alle verwendeten Versuche mit  $E_{v1}$  zu  $E_{vd}$ .

Wenn man versucht, die Versuche mit  $E_{v1}$  statt  $E_{v2}$  zu korrelieren, sieht man, dass die Versuche dichter zusammen liegen und fast schon eine Gerade bilden (siehe Abbildung 61). Dadurch sieht man bereit, dass eine Korrelation mit  $E_{v1}$  etwas bessere Ergebnisse liefert. Allerdings sind die Abweichungen der Versuchs- und Korrelationsergebnisse untereinander auch noch bei ungefähr 10-15%. Vor allem beim Kies/Schotter scheint auch zum Beispiel die Kornform immer noch eine große Rolle zu spielen (vgl. Kapitel 8.2.2).

Es lässt sich also feststellen, dass die Korrelation mit  $E_{v1}$  etwas bessere Werte liefert, als die mit  $E_{v2}$ . Da beide Korrelationen allerdings teilweise starke Abweichungen aufweisen und die normativen Grundlagen in Deutschland auf den  $E_{v2}$ -Wert bezogen sind, ist eine Korrelation des  $E_{vd}$ -Wertes mit dem  $E_{v1}$ -Wert in Deutschland nicht praktikabel.

Es hat sich gezeigt, dass eine Korrelation zwischen dem statischen und dem dynamischen Verformungsmodul grundsätzlich möglich ist. Die vorhandenen Abweichungen der Theorie (Korrelation) zur Praxis (Versuche) sind teilweise sehr groß. Es gilt hier, dass die Abweichung mit steigendem  $E_v$ -Wert größer wird. Also sollten keine hochfest verdichteten Materialien mit dem dynamischen Gerät geprüft und korreliert werden. Dies ist durch die normativ vorgegebenen Einsatzgrenzen des Leichten Fallgewichtsgerätes aber auch bereits so festgelegt.

Da die Randfunktionen ( $E_{v2} \sim (1,5E_{vd} - 17,225)/0,3214$  und  $E_{vd} = 600(1 - e^{-\frac{E_{v2}}{600}})$ ) sehr kompliziert sind, und die Abweichung der Versuchsergebnisse meist mindestens 10% ausmachen, ist Abbildung 62 (mit vereinfachten Randfunktionen) ein sinnvolles und zusammenfassendes Ergebnis der Literaturrecherche.

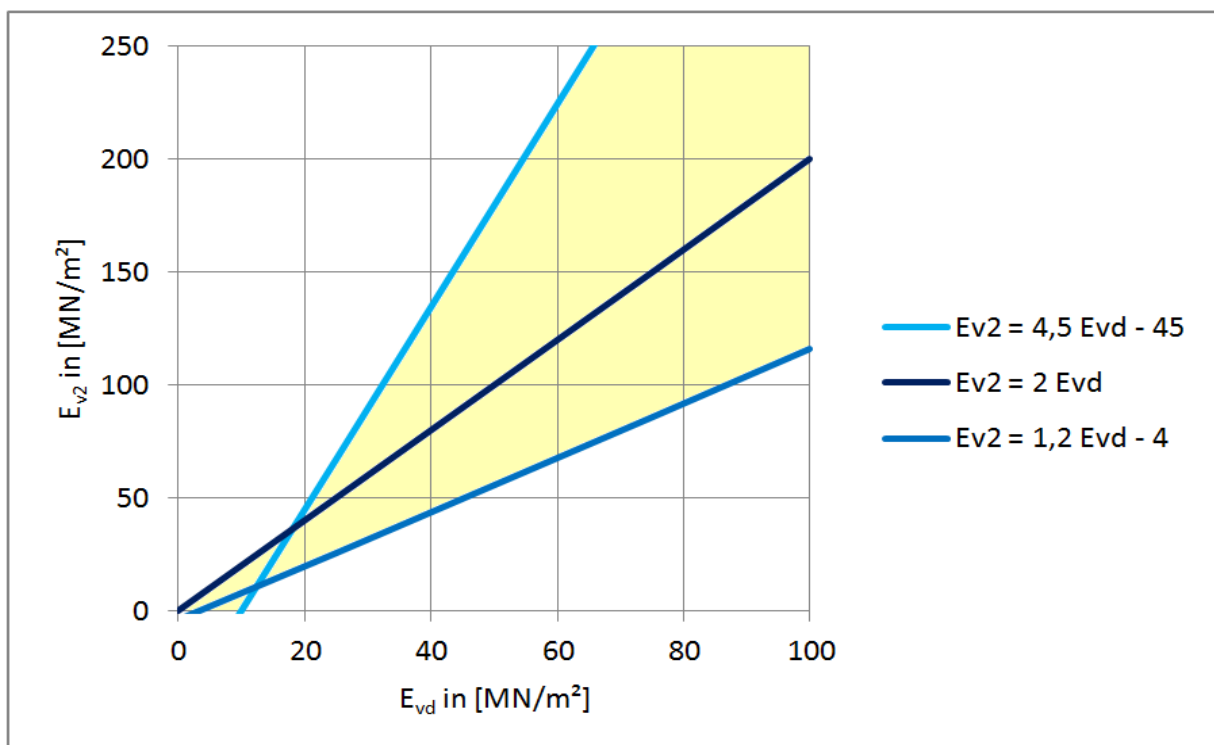


Abbildung 62: vereinfachte Korrelationsschere

An diesen vereinfachten Randfunktionen kann man auch gut erkennen, dass deren Steigung (das  $E_{v2}$  zu  $E_{vd}$ -Verhältnis) zwischen 1,2 und 4,5 liegt. So kann nach Literatur beispielsweise ein gemessener  $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$  sowohl  $E_{v2} = 135 \text{ MN/m}^2$ , aber auch  $44 \text{ MN/m}^2$  zugeordnet werden. Der Faustwert liegt dann bei  $80 \text{ MN/m}^2$ . Einzelne Versuche aus der Praxis weichen sogar noch stärker ab.

Für einzelne untersuchte Materialien deuten sich Spezifizierungen an:

Für **Sand** ist die Faustformel gut anwendbar (zumindest bei gut verdichtetem Sand).

**Kies und kiesiges Material** ist ebenfalls gut mit der Faustformel beschreibbar. Bei scharfkantiger Kornform liegen die Ergebnisse tendenziell oberhalb der Faustformel. Gemessene  $E_{vd}$ -Werte liefern daher mit der Faustformel korreliert auf der sicheren Seite liegende  $E_{v2}$ -Werte.

**Bindige Materialien** sind bei beiden Versuchen auf steife bis feste Konsistenz begrenzt. Zu bindigen Materialien liegen nur sehr wenige Versuche vor. Deswegen können hierzu keine Aussagen getroffen werden. Wichtig ist in jedem Fall die Kenntnis des Wassergehalts ( $w_n$ ) und die Abweichung zum optimalen Wassergehalt ( $w_{opt}$ ). Für Verdichtungskontrollen an bindigen Böden (z.B. Deponie und Dämme) werden meist Laborversuche ausgeführt, da weitere hierfür wichtige Parameter (wie z.B.  $k_f$ ) mit den hier untersuchten Versuchsarten nicht bestimmt werden können.

**Verbesserte und verfestigte Materialien** sind ebenfalls schwer zu fassen. Hier gehen die Zusammensetzung des Materials (z.B. Bindemittelanteil, ursprünglicher Wassergehalt, Ausgangsmaterial) und die Abbindezeit stark ein. Tendenziell liegen die Ergebnisse eher unterhalb der Faustformel, also auf der unsicheren Seite. Bei starker Verfestigung liegt eine in der Literatur so nicht beschriebene Anwendungsgrenze wegen betonähnlichen Materials vor (siehe Kapitel 8.2.4).

Am Kompliziertesten wird die Korrelation, wenn das Material im Messbereich (ca. doppelter Lastplattendurchmesser) **geschichtet** ist. Eine Korrelation ist hierfür wegen noch weiter verkomplizierender Randbedingungen praktisch unmöglich.

Aus der Baustellenpraxis ist bekannt, dass bei allen Materialien nach einer Ruhezeit von mind. 48h nach Verdichtung bessere Werte bei beiden Versuchsarten erzielt werden. In der Literatur gibt es hierzu nur ganz wenige Aussagen.

Bei den Hauptmaterialien (Sand, Kies, Ton/Schluff) ist die Korrelation mit der Faustformel prinzipiell geeignet, wenn die beschriebenen möglichen Abweichungen in Betracht gezogen werden. Der Sachverstand des auswertenden Ingenieurs mit Berücksichtigung der jeweils speziellen Verhältnisse bleiben dabei unverzichtbar.

Für **scharfkantige Materialien** (z.B. Schotter) können Reserven (Korrelation oberhalb der Faustformel) erschlossen werden. Dies erfordert weitere Untersuchungen.

Für **schwach verbesserte Materialien** muss durch weitere Untersuchungen geprüft werden, welche Korrelation unterhalb der Faustformel gültig ist.

Geschichtete Materialien sind in der Praxis relevant (z.B. unterste Lage bei Tragschichten) Eine Korrelation ist kaum möglich Die Bewertung erfordert hier besonders den Sachverstand des Ingenieurs.

Zusammenfassend aus Literatur und eigenen Versuchen ergibt sich, dass bis heute nur die Faustformel ( $E_{v2} = 2 E_{vd}$ ) praxistauglich ist. Die möglichen Abweichungen sind für alle Materialien sehr groß. Für bestimmte Materialien deuten sich bei Anwendung der Faustformel außerdem Ergebnisse sowohl auf der sicheren, als auch auf der unsicheren Seite liegend an (hier herrscht weiterer Forschungsbedarf). Deswegen ist es dringend zu empfehlen, dass für jedes Bauprojekt von vorne herein vertraglich festgelegt wird, ob mit dem dynamischen oder dem statischen Versuchsgerät geprüft werden soll und welche Zielwerte gelten.

## 10. Danksagung

Ich möchte mich bei allen die mich bei dieser Arbeit durch Informationen, Gerätschaften, Versuchsaufbauten, Fachliteratur und Versuchsergebnissen unterstützt haben, recht herzlich bedanken. Vor allem

- Herrn Professor Dr.-Ing. Rolf Katzenbach und Herrn Dipl.-Ing. Steffen Leppla für die Betreuung meiner Thesis
- Dem Team der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt für das Ermöglichen von Versuchen auf dem Gelände der Universität
- Der Firma GeolIngenieure Fruchtenicht + Lehmann GmbH für die gute Zusammenarbeit und das Zurverfügungstellen von Versuchsdaten.
- Der Firma ZORN-Instruments für die gute Zusammenarbeit und das Zurverfügungstellen von Veröffentlichungen und Informationen rund um das dynamische Fallgewichtsgerät und der Möglichkeit der Besichtigung von Produktions- und Prüfräumen.
- Der Firma HMP-Magdeburger Prüfgerätebau GmbH für das Zurverfügungstellen von Veröffentlichungen und Vorschriften mit Korrelationen
- Der Firma Bomag für das Zurverfügungstellen von Veröffentlichungen in Bezug auf die Thematik.
- Der Firma Terratest für das Zurverfügungstellen von Texten rund um das Fallgewichtsgerät
- Der Anix GmbH für Informationen zum statischen Plattendruckversuchsgerät und der guten Zusammenarbeit.

## 11. Verzeichnisse

### 11.1 Abkürzungsverzeichnis

#### Abkürzung

bzw.  
CBR  
d.h.  
i.d.R.  
DPD  
GE  
GI  
GW  
LFG  
LP  
MFG  
SE  
SI  
s.u.  
SW  
vs.  
z.B.

#### Bedeutung

beziehungsweise  
California Bearing Ratio  
das heißt  
in der Regel  
Dynamischer Lastplattendruckversuch  
eng gestufter Kies  
intermittiert gestufter Kies  
weit gestufter Kies  
Leichtes Fallgewichtsgerät  
Lastplattendruckversuch  
Mittelschweres Fallgewichtsgerät  
eng gestufter Sand  
intermittiert gestufter Sand  
siehe Unten  
weit gestufter Sand  
versus  
zum Beispiel



## 11.2 Literaturverzeichnis

### Normative Quellen:

- [ 1 ] DIN 4022 – Baugrund und Grundwasser – 1987, Berlin
- [ 2 ] DIN 4094-1:2002-06 - Baugrund – Felduntersuchungen – Teil1: Drucksondierungen – 2002, Berlin
- [ 3 ] DIN 4094-2:2003-05 – Baugrund – Felduntersuchungen – Teil2: Bohrlochrammsondierung - 2003, Berlin
- [ 4 ] DIN 18127:1997-11 – Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch – 1997, Berlin
- [ 5 ] DIN 18134:1993-01 - Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte Plattendruckversuch – Beuth-Verlag, 1993, Berlin
- [ 6 ] DIN E 18134:2001-09 - Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte Plattendruckversuch – Beuth-Verlag, 2001, Berlin
- [ 7 ] DIN 18196:1988-10 – Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für Bautechnische Zwecke - 1988, Berlin
- [ 8 ] DIN EN 13286-47:2004 - Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes - 2004, Berlin
- [ 9 ] DIN E EN 13286-47:2011 - Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes - 2011, Berlin
- [ 10 ] DIN EN ISO 14688-1:2002 – Geotechnische Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Bemessung und Beschreibung - 2002, Berlin
- [ 11 ] DIN EN ISO 22476-2:2005-04 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen – 2005, Berlin
- [ 12 ] TP BF-StB Teil 8.3 - Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes – 1992, Köln
- [ 13 ] TP BF-StB, Teil E2 – Flächendeckende dynamische Prüfung, 1994, Köln
- [ 14 ] ZTV A-StB 97 - Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen – 1997, München
- [ 15 ] ZTV E-StB 09 - Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – 2009, München
- [ 16 ] Ergänzung ZTV T - Oberbau Tragschichten – Richtlinie, 1996, München
- [ 17 ] Allgemein 'Straßenbautechnik' Nr. 6 / 1997 Verfüllen von Leitungsgräben – Richtlinie, 1997, Hessen
- [ 18 ] DB NGT 39 - Richtlinie für die Anwendung des Leichten Fallgewichtsgerätes im Eisenbahnbau – Deutsche Bahn, 1997
- [ 19 ] RVS 08.03.04 - Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattendruckversuches - Technische Vertragsbedingungen Vor-, Abbruch- und Erdarbeiten, 2008-03, Wien

**Quellen nach Autoren:**

- [ 20 ] Adam, Dietmar und Kopf, Fritz - Messtechnische und Theoretische Untersuchungen als Grundlage für die Weiterentwicklung und Normative Anwendung der dynamischen Lastplatte (Leichtes Fallgewichtsgerät) - Messen in der Geotechnik (TU Wien), 2002-02, Braunschweig
- [ 21 ] Adam, Dietmar und Kopf, Fritz - Dynamische Effekte durch bewegte Lasten auf Fahrwegen - Bauingenieur 78, Springer-Verlag, 2003-01
- [ 22 ] Adam, Dietmar und Kopf, Fritz - Messtechnische und Theoretische Untersuchungen als Grundlage für die Weiterentwicklung und Normative Anwendung der dynamischen Lastplatte (Leichtes Fallgewichtsgerät) – Wien
- [ 23 ] Bobe, Rolf und Hubáček, Helga - Tragfähigkeitsprüfung (Kapitel 4.5) – Bodenmechanik, VEB, 1983, Berlin
- [ 24 ] Brandl, Heinz und Adam, Dietmar – Flächendeckende Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen – Grundlagenforschung und praktische Anwendung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Straßenforschung Heft 506, 2000, Wien
- [ 25 ] Dachroth, W. – Handbuch der Baugeologie und Geotechnik, 2002
- [ 26 ] Floss, Rudolf - Handbuch ZTV E – Kirschbaumverlag, 1997
- [ 27 ] Kliem, Birgit - Bearing Capacity Test on Subsoil and Granular Layers - ZORN Instruments, 2002, Stendal
- [ 28 ] Köhler, U., Herold, A. und Hering, A. - Dimensionierung von Oberbauten von verkehrsflächen und die Einschätzung der Tragkraft des Erdplanums - <http://www.ibh-herold.de>, 2011-08-26 (Zugriff), Ulla
- [ 29 ] Kopf, Fritz und Erdmann, Peter - Numerische Untersuchungen der Flächendeckenden Verdichtungskontrolle - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (OIAZ Heft 4-5/2005), Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 2005-07, Wien
- [ 30 ] Kopf, Fritz, Adam, Christoph und Paulmichl, Ivan - Untersuchungen des statischen Lastplattendruckversuches mit der Randelementemethode - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (OIAZ Heft 4-5/2005), Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 2005-07, Wien
- [ 31 ] Kopf, Fritz, Adam, Dietmar und Paulmichl, Ivan - Untersuchungen des dynamischen Lastplattendruckversuches mit dem Leichten Fallgewichtsgerät unter Verwendung der Randelementemethode - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (OIAZ Heft 4-5/2005), Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 2005-07, Wien
- [ 32 ] Kundula, Wolfram - Fortschreibung der Prüfmethode der ZTV E-StB 09 - Vortrag zur Erd- und Grundbautagung, 2010, Köln
- [ 33 ] Mair, Peter - Der dynamische Plattendruckversuch mit dem leichten Fallgewichtsgerät - Neue Landschaft, Patzer Verlag, 2005-02, Berlin
- [ 34 ] Müller, G. und Huber, H. - Dynamische Bodenbeanspruchung infolge bewegter Lasten - Bauingenieur 66, Springer-Verlag, 1991
- [ 35 ] Schulz, Frank - Kontrolle vermeidet Setzungsschäden - bau MAGAZIN, SBM Verlag, 2011-02, Kempten
- [ 36 ] Weingart, Matthias - Bedienungsanleitung Plattendruckgerät AX01a - Anix GmbH Precision Electronic Instruments, 2010-09, Barleben
- [ 37 ] Weingart, Matthias - Neue Generation statischer Plattendruckgeräte - Anix GmbH Precision Electronic Instruments – Barleben
- [ 38 ] Weingart, Wolfgang, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Elastizität, Viskosität und Festigkeit von Erdstabilisierungen mit Hilfe einer registrierenden Kleinschlagsonde, Dissertation, 1977, Leipzig
- [ 39 ] Weingart, Wolfgang - Einbaukontrolle mit dem Leichten Fallgewichtsgerätauf Tragschichten ohne Bindemittel – Arbeitsweise des Prüfgerätes, Erfahrungen bei seinem Einsatz - Mineralstofftagung, 1993, Nürnberg
- [ 40 ] Weingart, Wolfgang, Freund, Heinz-Jürgen, Großmann, Andreas, Nickol, Reinhardt, Uschmann, Bernd und Weinert Frank – Vergleichende Untersuchungen zur Überprüfung der Wirksamkeit bautechnischer

- Maßnahmen hinsichtlich der Verhinderung von Reflexionsrissbildungen bei hydraulisch gebundenen Tragschichten – Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 789, 2000, Bonn
- [ 41 ] Weingart, Wolfgang – Der Dynamischer Plattendruckversuch im Straßenoberbau – Mineralstofftagung, 2003, Köln
  - [ 42 ] Weingart, Wolfgang - Anwendungsmöglichkeiten des Leichten Fallgewichtsgerätes ZFG 2000 im Straßen- und Erdbau - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (OIAZ Heft 4-5/2005), Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 2005-07, Wien
  - [ 43 ] Witt, Karl Josef - Qualitätssicherung: Prüfung, Anforderungen und Beobachtungen - Grundbau Taschenbuch Teil 2, 7. Auflage, Ernst-Verlag, 2008, Berlin
  - [ 44 ] Zilch, K., Diederichs, C.J. und Katzenbach, R. - Verkehrssysteme und Verkehrsanlagen - Handbuch für Bauingenieure, Springer-Verlag, 2001

**Quellen ohne Autoren:**

- [ 45 ] Planungsgrundsätze & Qualitätssicherung für den Erd- und Straßenbau - Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen, Prüfcenter Münster, 2006
- [ 46 ] Bedienungsanleitung für das Leichte Fallgewichtsgerät ZFG 3000 GPS, ZFG 3000 ECO - ZORN Instruments, 2011-02, Stendal
- [ 47 ] Anhaltswerte zur Kontrolle der Verdichtung mit dem Dynamischen Plattendruckgerät bei der Verfüllung von Leitungsgräben - Gütergemeinschaft Leitungstiefbau e.V., Berlin
- [ 48 ] BRP CONSULT – Tensar Geogitter im Straßenbau, Anlage 6.1 – 6.5
- [ 49 ] NAUE GmbH & Co. KG – Drehscheibe – 2006, Espelkamp-Fiestel

## 11.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: statische Lastplatte .....	6
Abbildung 2: dynamische Lastplatte .....	6
Abbildung 3: Prinzipskizze des statischen Lastplattendruckversuchs .....	7
Abbildung 4: Versuchsaufbau des statischen Plattendruckversuchsgerätes .....	8
Abbildung 5: Versuchsdurchführung, genauer Aufbau des statischen Prüfgerätes .....	10
Abbildung 6: statisches Druckversuchsgerät während einer Messung.....	11
Abbildung 7: angehobenes Gegengewicht.....	12
Abbildung 8: Setzungsmuldeneffekt beim statischen Lastplattendruckversuch .....	13
Abbildung 9: Verschiedene Gegengewichte .....	13
Abbildung 10: Beispiel für eine Spannungs-Plattenverschiebungs-Beziehung.....	14
Abbildung 11: Leichtes Fallgewichtsgesetz auf dem Kalibrierungsprüfstand bei ZORN-Instuments .....	16
Abbildung 12: Prinzipskizze des dynamischen Leichtes Fallgewichtsgesetzes.....	18
Abbildung 13: Platte des dynamischen Gerätes.....	19
Abbildung 14: dynamisches Druckversuchsgerät während einer Messung.....	19
Abbildung 15: typischer Verlauf der Zeit-Verformungskurven .....	20
Abbildung 16: Messbereich des statischen und des dynamischen Lastplattendruckversuches.....	22
Abbildung 17: qualitative Spannungs-/Zeitverläufe im Vergleich.....	23
Abbildung 18: Darstellung der Schichtdicke im Verhältnis zur $E_{v2}$ -Werterhöhung für die verschiedenen Kornformen (Tensor).....	24
Abbildung 19: Darstellung der Schichtdicke im Verhältnis zur $E_{v2}$ -Werterhöhung für die verschiedenen Kornformen (NAUE).....	24
Abbildung 20: Korrelationen für alle Materialien, nach Tabelle 5 .....	27
Abbildung 21: Korrelation für Sand, nach Tabelle 6.....	29
Abbildung 22: Korrelationen für Kies, nach Tabelle 7 .....	30
Abbildung 23: RVS - österreichische Richtlinie, Korrelation für rollige Materialien .....	31
Abbildung 24: bindige und gemischtkörnige Materialien, nach Tabelle 8.....	32
Abbildung 25: RVS - österreichische Richtlinie.....	32
Abbildung 26: verfestigter bindiger Boden, nach Tabelle 9.....	34
Abbildung 27: Versuchsdaten von Weingart, nach Tabelle 10 .....	35
Abbildung 28: verwendete Geräte .....	37
Abbildung 29: Versuche auf dem Versuchsfeld an der TU Darmstadt.....	39
Abbildung 30: Lageplan des Versuchsfeldaufbaus an der TU Darmstadt .....	39
Abbildung 31: Versuchsergebnisse für Sand, $E_{vd}$ zu $E_{v1}$ und $E_{v2}$ (vgl. Anhang: Seite XLII) .....	40
Abbildung 32: Versuche "SL" $E_{vd}-E_{v1}$ , ohne Asphaltbeton (vgl. Anhang: Seite XL) .....	41
Abbildung 33: Versuche "SL" $E_{vd}-E_{v2}$ , ohne Asphaltbeton (vgl. Anhang: Seite XL) .....	41
Abbildung 34: Versuche "SL" auf Asphaltbeton (vgl. Anhang: Seite XL) .....	42
Abbildung 35: Versuche "GFL" $E_{vd}-E_{v1}$ (vgl. Anhang: Seite XLI).....	43
Abbildung 36: Versuche "GFL" $E_{vd}-E_{v2}$ (vgl. Anhang: Seite XLI).....	43
Abbildung 37: Versuche "GF" $E_{vd}-E_{v1}$ (vgl. Anhang: Seite XXXVII und XXXIX) .....	44
Abbildung 38: Versuche "GF" $E_{vd}-E_{v2}$ (vgl. Anhang: Seite XXXVII und XXXIX) .....	44
Abbildung 39 Korrelation von Sand.....	45
Abbildung 40: Korrelation von Kies.....	46

Abbildung 41: Literaturempfehlungen zur Korrelation von bindigen und gemischtkörnigen Materialien .....	47
Abbildung 42: Literatur-Empfehlungen zur Korrelation von bindigen verbesserten und verfestigten Materialien .....	48
Abbildung 43: RVS mit den doppelten Ordinatenwerten für $E_{v2}$ -Werte.....	49
Abbildung 44: Korrelationen aus der Literatur für Kies und alle Baumaterialien mit Umrechnung der österreichischen RVS .....	49
Abbildung 45: alle zur Verfügung stehenden Versuche, außer Asphaltbeton und Versuche von Weingart (2003) .....	51
Abbildung 46: eigene Versuche (Sand) im Vergleich zu den Korrelationen.....	52
Abbildung 47: eigene Versuche (Sand) im Vergleich zu der österreichischen Korrelation.....	53
Abbildung 48: Versuche (Kies/Schotter) im Vergleich zu den Korrelationen .....	54
Abbildung 49: Versuche (Kies/Schotter) mit Ausgleichsgraden, die blaue Gerade gilt für alle Werte .	55
Abbildung 50: Korrelation für Kies/Schotter, mit der Korrelation aus Österreich.....	56
Abbildung 51: Versuche (Schluff) im Vergleich zu den Korrelationen .....	57
Abbildung 52: Versuche (verbessertes Planum) im Vergleich zu den Korrelationen .....	58
Abbildung 53: Versuche (verbessertes Planum) mit $E_{v1}$ .....	59
Abbildung 54: Bohrprofilbeispiel.....	60
Abbildung 55: Abweichung des Mittelwerts zum rechnerischen Wert des Steifemoduls bei zwei gleich großen Schichten mit unterschiedlichen $E_s$ Werten .....	61
Abbildung 56: Versuche (geschichtetes Material) im Vergleich zu den Korrelationen.....	62
Abbildung 57: Verdichtungsverhältnis $\Delta E_{vd}$ zu $E_{v2}/E_{v1}$ , Korrelation für Sand .....	64
Abbildung 58: Verdichtungsverhältnis $\Delta E_{vd}$ zu $E_{v2}/E_{v1}$ , Korrelation für Kies.....	65
Abbildung 59: Schaubild der Einflussgrößen auf die Versuche.....	66
Abbildung 60: Alle verwendeten Versuche in der Korrelationsfläche der Literatur .....	67
Abbildung 61: Alle verwendeten Versuche mit $E_{v1}$ zu $E_{vd}$ , .....	68
Abbildung 62: vereinfachte Korrelationsschere.....	69

## 11.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an das Gewicht des Gegengewichtes des LPs .....	12
Tabelle 2: Verdichtungsgrade in Abhängigkeit von Boden und $E_{v2}$ -Wert (ZTV E-StB 09).....	15
Tabelle 3: Vergleich der Geräteeigenschaften .....	21
Tabelle 4: Materialdefinitionen.....	25
Tabelle 5: Korrelationen für alle Materialien, aus der Literatur (alle Einheiten in $MN/m^2$ ) .....	26
Tabelle 6: Korrelation für Sand, aus der Literatur (alle Einheiten in $MN/m^2$ ).....	28
Tabelle 7: Korrelationen für Kies, aus der Literatur (alle Einheiten in $MN/m^2$ ) .....	30
Tabelle 8: Korrelationen für bindige und gemischtkörnige Materialien, aus der Literatur .....	32
Tabelle 9: Korrelationswerte für verfestigte bindige Materialien, nach NGT 39 .....	33
Tabelle 10: Versuchsdaten von Weingart (2003) .....	35
Tabelle 11: Übersicht über die Versuchsquellen mit zugehöriger ID.....	36
Tabelle 12: Daten des Darmstädter Sandes .....	38
Tabelle 13: s/v-Werte der Versuchsreihe U zu den $E_{v2}/E_{v1}$ -Werten.....	63

## 12. Anhang

### Versuchsprotokolle

Versuche U	Seite	I - IV
Weitere Baugrunddaten der Versuche U	Seite	V - VI
Versuche SL	Seite	VI-XXVI
Versuche GFL	Seite	XXVII - XXXVII
Versuche GF	Seite	XXXVIII - XXXIX

### Zusammenfassung und Tabellen

Zusammenfassung der Versuche nach Quelle sortiert	Seite	XL - XLI
Zusammenfassung der Versuche nach Material sortiert	Seite	XLII - XLV
Versuchsdaten mit doppelten $E_{vd}$ -Versuchen	Seite	XLVI
Geschichteter Baugrund (theoretische Steifemodul-Tabelle)	Seite	XLVII
Abweichungen der Messwerte zu den Korrelationen	Seite	XLVIII - XLIX
Kornform (scharf- und rundkantig nach NAUE)	Seite	L - LII

### **13. Eidesstattliche Erklärung**

Bachelorthesis von Herrn Sirko Lehmann

Erklärung zur Bachelorthesis gemäß §23, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorthesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Unterschrift