



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Institut für Geotechnik; IGT

Flächendeckende Verdichtungskontrolle (FDVK) mittels bodenmechanischer Materialkenngrößen

Contrôle continu du compactage (CCC) à l'aide de paramètres géotechniques

Continuous compaction control based on the geotechnical parameters

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Institut für Geotechnik

M. Preisig, dipl. Ing. ETH
R. Noesberger, dipl. Ing. HTL
Dr. Markus Caprez, dipl. Ing. ETH
Prof. Dr. P. Amann, dipl. Ing.

Ammann Verdichtung AG, Langenthal

Dr. R. Anderegg, dipl. Ing. ETH

Forschungsauftrag VSS 2000/353 auf Antrag der Fachkommission 5 der Vereinigung
Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Zürich, Januar 2006

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
1.1	THEMATIK.....	1
1.2	AUFTRAG IM WORTLAUT	1
1.3	ZIELE DER ARBEIT.....	1
2	GRUNDLAGEN DER FDVK	3
2.1	WALZENTYPEN UND BEWEGUNGSVERHALTEN	3
2.1.1	<i>VARIO – System, Richtschwinger</i>	3
2.1.2	<i>Oszillationswalze</i>	4
2.1.3	<i>Vibrationswalze</i>	5
2.2	MESSSYSTEME DER FDVK.....	10
2.2.1	<i>Grundprinzipien</i>	11
2.2.2	<i>Produkteübersicht</i>	15
3	BESCHREIBUNG DER HERKÖMMLICHEN VERDICHTUNGSKONTROLLEN	17
3.1	STATISCHER PLATTENDRUCKVERSUCH	17
3.2	DYNAMISCHER PLATTENDRUCKVERSUCH.....	19
3.3	MATERIALERSATZMETHODEN	20
3.3.1	<i>Sandersatzmethode</i>	20
3.3.2	<i>Ballonmethode</i>	20
3.4	ISOTOPENSONDE.....	20
3.5	VIBRAFLECT.....	21
4	VERGLEICH FDVK – STATISCHER PLATTENDRUCKVERSUCH.....	23
4.1	PRAKTISCHE UNTERSCHIEDE	23
4.2	UNTERSCHIEDE IN DER WIRKUNG	23
4.3	THEORETISCHE ÜBERLEGUNGEN.....	26
4.3.1	<i>Ammann ACE</i>	26
4.3.2	<i>Bomag BTM-E</i>	28
5	MESSUNGEN	29
5.1	EINLEITUNG	29
5.1.1	<i>Lineare Abhängigkeit zwischen den Vergleichsmessungen</i>	30
5.1.2	<i>Auflistung der durchgeführten Messungen</i>	31
5.2	VERGLEICHSMESSUNGEN MIT EINER TANDEMWALZE	32
5.3	VERGLEICHSMESSUNGEN MIT EINEM WALZENZUG	34
5.3.1	<i>Dammaustelle in Rheinfelden (M12)</i>	34
5.3.2	<i>Versuchsfeld in Lyss (M14)</i>	37
5.3.3	<i>Messungen am Kohlendreieck beim Güterbahnhof in Zürich (M10)</i>	42
5.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	45
6	SCHLUSSFOLGERUNG UND EMPFEHLUNG.....	47
6.1	BESTEHENDE FDVK-NORMEN.....	47
6.2	NOTWENDIGKEIT EINER ANPASSUNG BESTEHENDER NORMEN.....	48
6.2.1	<i>Neuentwicklungen in der Verdichtungstechnik</i>	48
6.2.2	<i>Grosser Aufwand für das Bestimmen der Kalibrierfunktion</i>	48
6.3	MÖGLICHE ALTERNATIVE VORGEHENSWEISE	49
6.4	AUSBLICK	50
6.5	EMPFEHLUNG FÜR SCHWEIZER NORM.....	51

7	LITERATURVERZEICHNIS	53
7.1	FORSCHUNGSARBEITEN.....	53
7.2	SCHWEIZER NORMEN:	55
7.3	DEUTSCHE NORMEN:	55
7.4	ÖSTERREICHISCHE NORMEN:	56
7.5	SCHWEDISCHE NORMEN:.....	56
	ANHANG 1.....	57
8	BEMERKUNGEN.....	58
9	BUCHS, 23. AUG. 2001	59
9.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	60
10	LITTAU, 22. NOV. 2001	61
10.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	63
11	SARGANS, 30. NOVEMBER 2001.....	64
11.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	65
12	TEUFEN, 1. MAI 2002	66
12.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	67
13	NEUHAUS, 8. MAI 2002.....	68
13.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	70
14	RONA, 23. MAI 2002	71
14.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	72
15	KLOTEN, 19. JULI 2002	73
15.1	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE:	74
16	„KOHLENDREIECK“ AM HAUPTBAHNHOF ZÜRICH, AUG. 2002 UND NOV. 2002..	75
16.1	MESSERGEBNISSE VOM 20. AUGUST 2002 (M10):.....	76
16.2	MESSERGEBNISSE VOM 29. NOVEMBER 2002 (M11):.....	81
17	RHEINFELDEN, JULI – NOV. 2002	82
17.1	CHRONOLOGISCHE ÜBERSICHT DER VERSUCHE IN RHEINFELDEN.....	84
17.2	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE JULI – AUGUST 02 (M12):	85
17.3	ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE 7. NOVEMBER 2002 (M13):.....	86
	ANHANG 2.....	87
18	BAUSTELLE TEUFEN (AR), 1. MAI 2002.....	88
19	BAUSTELLE NEUHAUS (SG), 8. MAI 2002.....	89
20	BAUSTELLE RONA (GR), 23. MAI 2002	90

21	DAMMBAUSTELLE RHEINFELDEN (AG), JULI-AUGUST 2002.....	91
22	BAUSTELLE „KOHLENDREIECK“, 20. AUGUST 2002	94
23	FELDVERSUCHE LYSS (BE), 19. MÄRZ 2003-05-19	95
24	STATISCHER PLATTENDRUCKVERSUCH.....	97

Zusammenfassung

Für die Kontrolle der Verdichtung stehen eine grosse Anzahl Versuche zur Verfügung. Die meisten Versuche sind punktuelle Versuche, mit welchen es möglich ist, mehr oder weniger genaue Resultate über die Beschaffenheit des Bodens an der ausgewählten Stelle zu ermitteln. Für das Messen der Homogenität und der genügenden Verdichtung einer Fläche stehen nur wenig Mittel zur Verfügung.

Angesichts der Tatsache, dass die Bodenverdichtung zu den effizientesten Behandlungsmethoden für die Verbesserung der Bodeneigenschaften gehört, ist eine hohe Qualität der Verdichtungskontrolle gefordert. Mit der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) können die gewünschten Anforderungen an die Kontrollmethoden sehr weit erfüllt werden.

In diesem Bericht werden die Einsatzmöglichkeiten und das Kalibrieren von FDVK-Verdichtungsgeräten der neuen Generation untersucht und beschrieben.

Es geht darum, die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mittels bodenmechanischer Materialkennwerten auf verschiedenen schweizerischen Böden zu untersuchen. Die Resultate führen zu Empfehlungen (siehe Kap.6) für eine Revision der Schweizerischen Norm 640 585a („Verdichtung Anforderungen“) und 640 586 („Verdichtung Kontrollmethoden“).

In einigen Ländern sind bereits Normvorschriften für die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle in Anwendung. Die Kalibriermethoden basieren immer auf statistischen Zusammenhängen zwischen bekannten bodenmechanischen Materialkennwerten wie Steifigkeit und Dichte und der an der Walze gemessenen dynamischen Messwerten.

Da die Bodensteifigkeit eine der zentralen Bodenkennwerte für die Dimensionierung und die Homogenitätskontrolle ist, ist die direkte Messung der Steifigkeit während der arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle ein erheblicher Vorteil gegenüber den älteren FDVK-Methoden.

Die Untersuchung der Bodenparameter und der möglichen Kalibrierfunktion in diesem Bericht wird hauptsächlich mit Geräten und dem System unseres Industriepartners für diese Forschungsarbeit, der Ammann Verdichtung AG, durchgeführt. Es wurden auch einige Versuche mit Bomag Verdichtungsgeräten durchgeführt und ausgewertet.

Die Resultate unserer Untersuchungen zeigen, dass eine direkte Messung der Bodensteifigkeit (ME oder EV-Werte) mit den modernen Verdichtungsgeräten unter verschiedenen Bedingungen innerhalb eines relativ guten Vertrauensbereichs möglich ist. Zu den erwähnten Bedingungen gehören das sorgfältige Kalibrieren der Geräte und das Einhalten der Anforderungen an die bearbeitete Schicht. Anforderungen an die Schicht sind: Wassergehalt in einem gewissen Bereich in Funktion des optimalen Wassergehaltes nach Proctor, Ausschluss extremer Korngrößenverteilungen, Homogenität des Materials und der Schicht sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung.

Resumé

Il existe de nombreux essais servant au contrôle du compactage. La plupart d'entre eux sont des essais ponctuels permettant d'obtenir des informations sur les propriétés du sol à un endroit choisi. Néanmoins il existe peu de moyens pour mesurer l'homogénéité et le compactage uniforme d'une surface.

Le compactage du sol faisant partie des méthodes d'amélioration des propriétés des sols les plus efficaces, une qualité très élevée du contrôle de compactage est requise. Les exigences aux méthodes de contrôle peuvent être satisfaites en utilisant le contrôle continu du compactage (CCC).

Ce rapport examine et décrit les possibilités d'utilisation et le calibrage d'appareils de compactage CCC de la nouvelle génération.

L'objectif du travail est d'examiner le CCC à l'aide de paramètres géomécaniques de différents sols qui apparaissent fréquemment sur des chantiers en Suisse. Les résultats mènent à des recommandations (chap. 6) pour une révision des normes suisses 640 585a (« Compactage Exigences ») et 640 586 (« Compactage Méthodes de contrôle »).

Dans certains pays des normes CCC sont déjà en vigueur. Les méthodes de calibration se basent toujours sur des relations statistiques entre des propriétés géomécaniques comme la rigidité et la densité et les valeurs dynamiques mesurées sur le compacteur vibrant.

La mesure directe de la rigidité du sol lors du contrôle du compactage représente un avantage considérable vis-à-vis des méthodes plus anciennes, puisque la rigidité est un des paramètres les plus importants pour le dimensionnement et le contrôle de l'homogénéité.

Dans ce rapport, l'examen des paramètres des sols et de la fonction de calibrage appropriée est effectué principalement avec les machines et le système de notre partenaire industriel pour ce travail de recherche, Ammann Verdichtung AG. Quelques tests ont été faits avec des machines Bomag.

Les résultats de nos recherches montrent, qu'une mesure directe de la rigidité du sol (ME ou EV) avec des compacteurs vibrants modernes est, sous certaines conditions, possible dans les limites d'un intervalle de confiance relativement petit. Ces conditions portent sur le calibrage des appareils ainsi que sur la couche de sol. Les exigences pour la couche sont : teneur d'eau dans des limites en fonction de la teneur en eau optimale selon Proctor, exclusion de courbes granulométriques extrêmes, homogénéité du matériel et de la couche en direction horizontale ainsi que verticale.

Abstract

Several tests exist in order to verify the rate of soil-compaction. Most of them are punctual tests, which allow the acquirement of quite exact information about the workability of the soil, unfortunately only in specific points. On the other hand, only few tests are at the disposal in order to measure the homogeneity and the uniformity of compaction on the total surface.

Compaction is a very efficient soil treatment in order to ameliorate the soil characteristics, but a high-quality control of the rate of compaction is also necessary in order to guarantee the required standards. This target can be largely achieved through the FVDK.

In this report, new possible applications and the calibration of FDVK compaction-devices of the new generation are analyzed and presented.

Main goal of this study is to carry out and test the FDVK within several Swiss soils, basing on well-known soil-mechanics parameters. The results can be useful for the revision of the Swiss Norms, SN 640 585a (“Verdichtung Anforderungen”) and 640 586 (“Verdichtung Kontrollmethoden”).

In some countries, norms about the FDVK are already in use. The calibration methods are always based on statistical relationships between soil-mechanics parameters of the material like stiffness and density, and the measured response on the compaction roller.

The direct measurement of the stiffness during the compaction control represents an important step in comparison with the old methods, considering that the stiffness plays a central role in the control of the material homogeneity and determination of the thickness of the road-layers.

In this paper, the analyses of the soil-parameters and the possible calibration functions have been made possible thanks to our industry partners with whom we collaborate for this research project: Ammann Verdichtung AG. Some tests also have been carried out and analyzed with Bomag devices.

The results of our research show that it is possible to carry out a direct measurement of the material stiffness (M_e or E_v) within the modern compaction-devices under different conditions and in a relative good confidence interval. Important conditions are an accurate calibration of the devices and follow to the requirements for the compacted soil layer. Requirements for the layer are: a range of water content function of the optimum water content according to Proctor, the rejection of extreme cases of grain size distributions, horizontal and vertical homogeneity of the soil layer.

Sommario

Un rilevante numero di prove sono a disposizione del progettista per il controllo del grado di compattazione. La maggior parte sono prove di carattere puntuale, attraverso le quali e' possibile ottenere risultati abbastanza affidabili sulla lavorabilita' del suolo anche se limitatamente a determinate zone. Le prove per il controllo dell'omogeneita' e della uniformita' della compattazione sono invece meno numerose.

La compattazione anche se rappresenta uno dei metodi piu' efficienti per il miglioramento delle caratteristiche meccaniche di un suolo, e' necessariamente da accompagnare ad un accurato controllo in loco. Attraverso l'utilizzo del Controllo Continuo dello stato di Compattazione (CCC), gli standard richiesti possono essere ampiamente raggiunti.

In questo rapporto sono analizzate e descritte le possibilita' di utilizzo e la calibrazione di macchine di nuova generazione per la compattazione CCC.

L'obiettivo e' rappresentato dallo studio del Controllo Continuo dello stato di Compattazione (CCC), attraverso parametri meccanici del suolo, su alcuni tipici suoli svizzeri. I risultati ottenuti forniscono suggerimenti (vedi Cap. 6) per una revisione della norma svizzera Norm 640 585a ("Verdichtung Anforderungen") e 640 586 ("Verdichtung Kontrollmethoden").

In alcuni paesi sono gia' attualmente in vigore normative per il Controllo Continuo dello stato di Compattazione. I metodi di calibrazione si basano sempre su relazioni statistiche tra parametri noti del materiale, come la rigidezza e la densita', e la risposta meccanica misurata sul rullo compattatore.

Poiche' la rigidezza del suolo riveste un ruolo fondamentale per il dimensionamento ed il controllo dell'omogeneita', la sua misura diretta integrata all'opera ed al controllo della compattazione costituisce un evidente vantaggio nei confronti dei precedenti metodi CCC.

L'analisi dei parametri del suolo e delle possibili funzioni di calibrazione in questo rapporto sono stati possibili principalmente grazie alle apparecchiature e ai sistemi dei nostri partner industriali in questo lavoro di ricerca, l'Amman Verdichtung AG.

Alcune prove sono state condotte e interpretate anche con l'ausilio di macchine da compattazione Bomag.

I risultati di questo lavoro di ricerca mostrano che una misura diretta della rigidita' del suolo (ME o EV) con i moderni mezzi di compattazione e sotto diverse condizioni e' possibile in un buon intervallo di confidenza.

Alle sopracitate condizioni appartengono la calibrazione accurata delle apparecchiature e il rispetto degli standard per lo strato sottoposto a compattazione. Gli standard per uno strato sono: Il contenuto di acqua in un determinato intervallo di valori in funzione del valore ottimo del contenuto d'acqua Proctor, l'esclusione di granulometrie "estreme", l'omogeneita' dei materiali e dello strato sia in direzione verticale che orizzontale.

1 Einleitung

1.1 Thematik

Die Bodenverdichtung dient der Minimierung von Deformationen unter Betriebslasten. Insbesondere die Homogenität der verdichteten Schicht ist eine wesentliche Voraussetzung, um differenzielle Deformationen zu beschränken.

Die heute in der Schweiz angewandten Kontrollmethoden für die Verdichtung von Böden basieren gemäss gültigen Schweizer Normen auf punktuellen Versuchstechniken. Für die direkte Messung der Dichte stehen insbesondere die Materialersatzmethoden (Sander-satz- und Ballonmethode) sowie die Isotopsonde zur Verfügung. Weit häufiger aber wird als Dimensionierungskriterium für eine genügende Verdichtung eines Bodens der statische Plattendruckversuch angewendet. Dieser Versuch ermittelt die Verformbarkeit und Tragfähigkeit eines Bodens. Mit der Bestimmung der Verformbarkeit kann indirekt auf den Verdichtungsgrad geschlossen werden. Diese Methoden haben alle den Nachteil, dass sie die Verdichtung punktuell messen, wodurch sie nur bedingt eine Aussage über die Gleichmässigkeit der geprüften Schicht zulassen.

Mit der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) können mit dynamisch angeregten Walzen arbeitsintegriert Verdichtungskennwerte gemessen werden. Dadurch kann einerseits die Gleichmässigkeit der Verdichtung einer Schicht geprüft werden und andererseits ergeben sich auch betriebliche Vorteile, indem der Verdichtungsgrad während des Verdichtungsvorganges laufend kontrolliert wird und bei Bedarf eine Nachbesserung unmittelbar möglich ist.

Verschiedene Anbieter haben bereits seit Jahren dynamisch angeregte Walzen mit arbeitsintegriertem Messsystem auf dem Markt. Allen Systemen ist gemeinsam, dass das an der schwingenden Bandage gemessene Beschleunigungssignal erfasst und analysiert wird. In der Verarbeitung dieses Signals bestehen aber grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen.

In unseren deutschsprachigen Nachbarländern sowie in Schweden existieren bereits Normvorschriften für die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle. Diese Normen basieren auf umfangreichen Forschungsergebnissen, die einen statistischen Zusammenhang zwischen herkömmlichen Verdichtungskontrollen und der FDVK zeigen. Auf dieser Erkenntnis baut die vorliegende Forschungsarbeit auf.

Die Forschungsarbeit wird vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) finanziert.

1.2 Auftrag im Wortlaut

Gemäss dem Auftragsschreiben des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) vom 11. Dezember 2001 wurde das Institut für Geotechnik an der ETH Zürich beauftragt, die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mittels bodenmechanischer Materialkennwerte auf verschiedenen schweizerischen Böden zu untersuchen. Die Forschungsergebnisse sollen zu Empfehlungen für eine Revision der Schweizerischen Norm, SN 640 585a („Verdichtung; Anforderungen“) und 640 586 („Verdichtung; Kontrollmethoden“) führen.

1.3 Ziele der Arbeit

Der statische Plattendruckversuch ist das am weitesten verbreitete Dimensionierungskriterium für den Nachweis einer genügenden Trag- und Gebrauchstauglichkeit für Oberbauten von

Schiene und Strasse. In den oben genannten Ländern wird die FDVK deshalb hauptsächlich mit dem statischen Plattendruckversuch kalibriert. Dies ist gerechtfertigt durch die Tatsache, dass beide Methoden die Steifigkeit des Bodens messen, wogegen Versuche wie die Materialersatzmethoden und die Isotopsonde die Dichte des Bodens ermitteln.

Mit der vorliegenden Forschungsarbeit sollen die Methoden der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle auf schweizerischen Böden untersucht werden. Es soll gezeigt werden, in welcher Weise die bestehenden Dimensionierungsgrundlagen anzupassen sind, damit die FDVK direkt als Dimensionierungskriterium für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von verdichteten Böden eingesetzt werden kann. Dazu werden umfangreiche Vergleichsmessungen zwischen der FDVK und herkömmlichen Verdichtungskontrollen auf verschiedenen typischen Schweizer Böden durchgeführt. Die Untersuchungen beziehen sich auf homogene Schichtaufbauten mit geringer Variation der Eigenschaften mit der Tiefe.

Es werden auch bereits bestehende ausländische Normvorschriften untersucht.

Insbesondere zwei Anbieter von FDVK-Systemen beanspruchen für ihr System, dass es direkt Bodenparameter misst. Diese beiden Systeme werden für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt, wobei das Schwergewicht auf das System des Industriepartners für die vorliegende Arbeit, Ammann Verdichtung AG, Langenthal, gelegt wird.

2 Grundlagen der FDVK

2.1 Walzentypen und Bewegungsverhalten

Im Wesentlichen werden die Walzentrommeln in zwei unterschiedliche Anregungstypen eingeteilt:

- Bandage mit vibrierendem Bewegungsverhalten
- Bandage mit oszillierendem Bewegungsverhalten

2.1.1 VARIO – System, Richtschwinger

Mittels zweier gegenlaufender Unwuchtmassen, die in der Bandagenachse gelagert sind, kann die Richtung der translatorischen Schwingung vorgegeben werden. Bild 2-1 zeigt das Prinzip dieses Walzensystems.

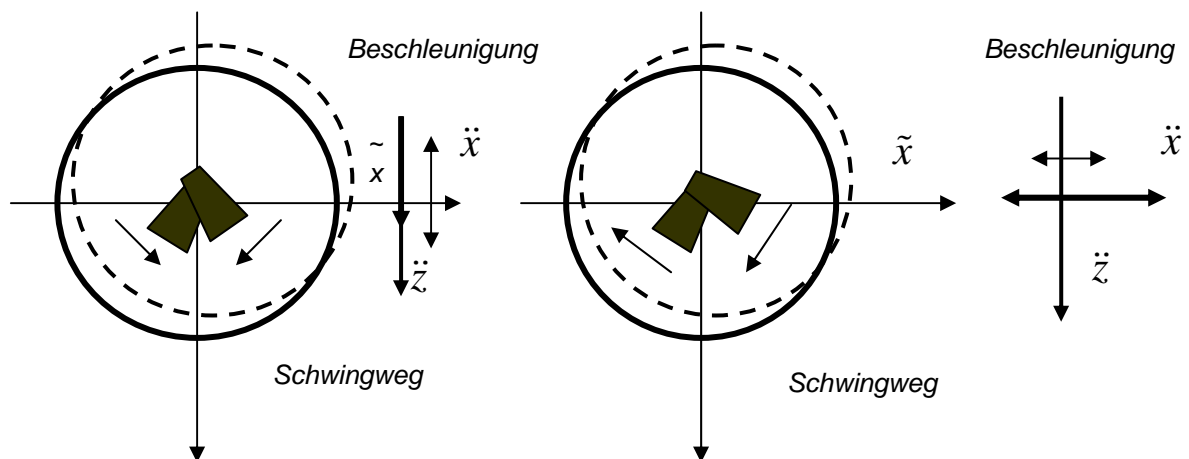


Abbildung 2-1: Richtschwinger (Adam 2000).

Mit dem VARIO – System, einer Entwicklung der Firma BOMAG, kann zwischen einer ausschliesslich vertikalen, einer ausschliesslich horizontalen bzw. beliebig geneigten, resultierenden Erregerbeschleunigung gewählt werden. Walzen dieser Bauart stellen somit eine Sonderform von Vibrationswalzen dar.

2.1.2 Oszillationswalze

Beim Walzentyp Oszillationswalzen sind zwei Exzentermassen axialsymmetrisch – mit einer bestimmten Ausmitte von der Bandagenachse – in der Trommel eingebaut. In Bild 2-2 und 2-3 ist das Prinzip dieses Walzensystems schematisch dargestellt.

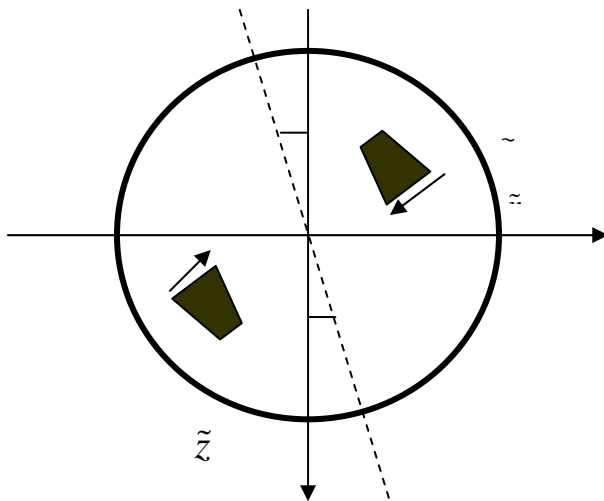


Abbildung 2-2: Schwingweg (Adam 2000)

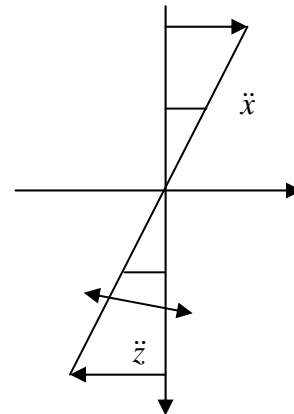


Abbildung 2-3: Beschleunigung (Adam 2000)

Im Betriebszustand führen sie jeweils eine Drehbewegung in die gleiche Richtung aus; damit wird eine rotatorische Schwingung der Trommel um deren Achse erzeugt. Die resultierende Beschleunigung wirkt in tangentialer Richtung. Der Typ der Oszillationswalze wird von der Firma HAMM hergestellt und derzeit hauptsächlich für die Asphaltverdichtung bzw. aufgrund der geringeren Erschütterungswirkung im verbauten Gebiet für ungebundene Materialien eingesetzt. Die Idee und die damit verbundenen Patentrechte gehören der schwedischen Firma Geodynamik.

Bei Vibrationswalzen bzw. bei vertikaler Erregung mit dem VARIO – System erfolgt die Krafteintragung in den Boden primär in vertikaler Richtung, während bei oszillierenden Walzen bzw. bei horizontaler Einstellung des VARIO – Systems die Verdichtung in erster Linie mittels dynamischem Schubeintrag in den Boden erzielt wird.

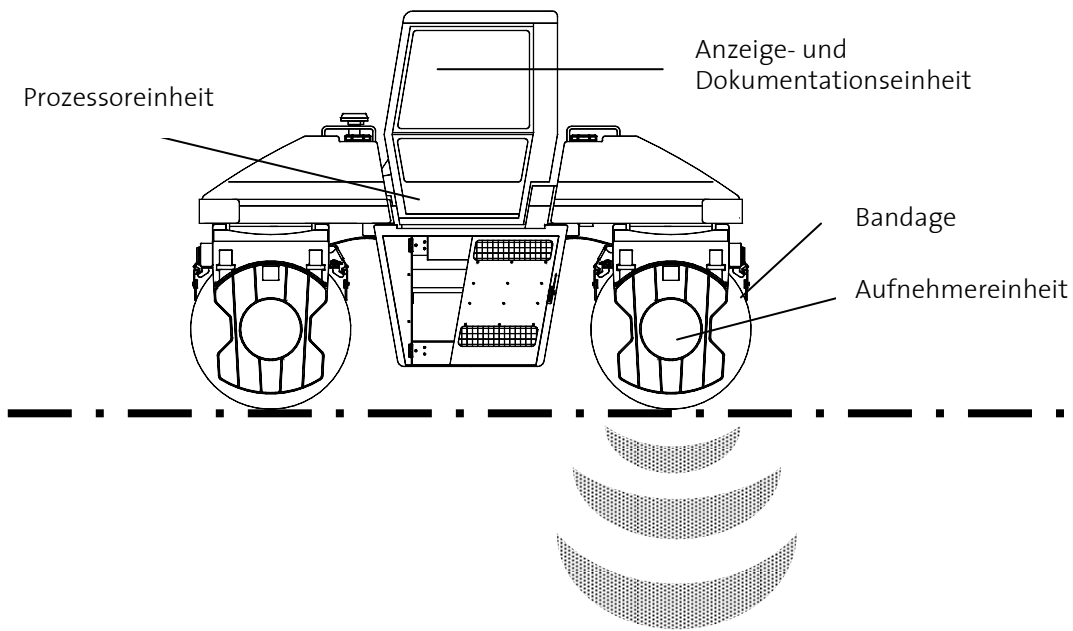


Abbildung 2-4: Bestandteile einer mit FDVK ausgerüsteten Tandemwalze

2.1.3 Vibrationswalze

In der Achse der Trommel befindet sich eine Unwucht, die eine Drehbewegung mit einer bestimmten Frequenz ausführt. Diese verursacht eine translatorische Schwingung, deren Resultierende zu jedem Zeitpunkt – aufgrund der kreisförmigen Bewegung – in eine andere Richtung weist. Die Erregerbeschleunigung ist in jeder Richtung gleich gross.

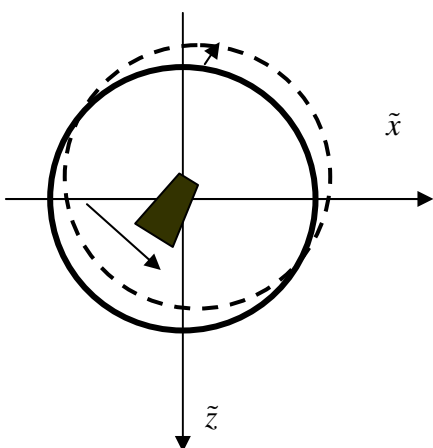


Abbildung 2-5: Schwingweg

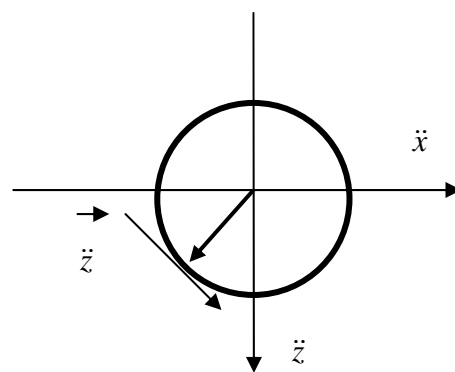


Abbildung 2-6: Beschleunigung

Vibrationswalzen sind dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Bandagen vibrierend angeregt werden können.

Im Erdbau wird meistens der Vibrationswalzenzug eingesetzt, welcher für die FDVK besonders geeignet ist. Der Walzenzug ist vorne mit einer vibrierenden Walzentrommel und hinten mit zwei Gummirädern ausgestattet. Die Trommel kann entweder als Glattmantel- oder als Schaffussbandage ausgeführt sein.

Vibrationswalzenzüge werden über die Hinterräder und meist zusätzlich mit der Bandage angetrieben. Die Walzentrommel ist an den Lagerschalen mittels Gummipuffer, die als Kelvin-Voigt-Element ausgelegt sind, mit dem Rahmen verbunden. Dabei müssen die Kennlinien von Feder und Dämpfer so abgestimmt sein, dass bei Vibrationsbetrieb der Rahmen praktisch in Ruhe bleibt; Einflüsse des Rahmens verfälschen die dynamischen Messwerte. Die Eigenfrequenzen des Rahmens dürfen darüber hinaus kein ganzzahliger Teiler bzw. ganzzahliges Vielfaches der Erregerfrequenzen sein, da Resonanzerscheinungen unweigerlich zu einem Verlust der Aussagekraft der Messwerte führen.

Die statische vordere Achslast setzt sich zusammen aus dem anteilig wirkenden Rahmen sowie aus dem Eigengewicht der Bandage. Da der Aufbau aus konstruktionsgründen nicht exakt symmetrisch ist und es damit zu unterschiedlichen Massenverteilungen kommen kann, ist das Gesamtsystem nicht für den statischen Fall abzustimmen, sondern Zusatzmassen sind so anzuordnen, damit sich dynamisches Gleichgewicht im Vibrationsbetrieb einstellt: ein mögliches Auftreten von Wiegeschwingungen kann somit minimiert werden.

Die Verdichtungsarbeit wird über die vibrierende Bandage eingebracht, die Erregung geschieht über eine exzentrisch rotierende Unwuchtmasse. Die Anregung erfolgt also rotations-symmetrisch. Kann die Bandage frei schwingen, bewegt sie sich im stationären Zustand auch kreisförmig mit konstanter Beschleunigung. Korrespondiert die Walzentrommel dagegen mit dem Boden, werden die Bewegungen und Beschleunigungen verzerrt, die Vorgänge sind zwar im Allgemeinen weiterhin periodisch, jedoch nicht mehr harmonisch. Vordergründig wird das Verhalten in senkrechter Richtung beeinflusst, der Vektor der Bodenkontaktkraft zeigt zwar zu jedem Zeitpunkt in eine andere Richtung, seine primäre Ausrichtung ist jedoch vertikal.

Die Richtung der Resultierenden wird wesentlich von der Unwuchtdrehrichtung und von der Fahrtrichtung der Walze beeinflusst.

Ferner gibt es Kombiwalzen, die ebenfalls mit einer dynamischen Bandage ausgerüstet sind, der Aufbau der Hinterachse ist jedoch im Gegensatz zu Walzenzügen unterschiedlich und entspricht dem einer Gummiradwalze; Tandem – Vibrationswalzen sind mit zwei vibrierenden Bandagen ausgerüstet.

Die beiden letztgenannten Typen kommen zusätzlich neben dem Erdbau verstärkt für die Verdichtung von Asphalt-schichten zum Einsatz.



Abbildung 2-7: Walzenzug (Erdbau).



Abbildung 2-8: Tandemwalze (Asphaltverdichtung).

2.1.3.1 *Bewegungsverhalten der Bandagen von Vibrationswalzen*

Die angegebenen Massen bzw. Massenverhältnisse sowie Erregerfrequenz, Amplitude und Fahrgeschwindigkeit spielen in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit die entscheidende Rolle für das Bewegungsverhalten der Walze. Diese Reaktion ist einerseits gekennzeichnet durch einen möglichen Kontaktverlust der Bandage vom Boden und andererseits durch die Periodendauer der Trommelbewegung. Die dynamischen Messwerte der FDVK sind immer im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Verhaltensweisen der Walzentrommel zu betrachten; die Kenntnis über deren Auswirkungen stellen den Schlüssel zur Erklärung praktisch aller Effekte und Phänomene dar, die bei Anwendung der FDVK auftreten.

- Kontakt

Dieser Betriebszustand ist dadurch gekennzeichnet, dass die periodisch schwingende Bandage zu jedem Zeitpunkt mit dem Boden in Verbindung steht. Ständiger Kontakt kommt bei den meisten Vibrationswalzen lediglich bei sehr geringen Steifigkeiten oder kleinen Kraftamplituden vor, entweder auf sehr weichen plastischen Böden oder auf frischen Schüttungen.

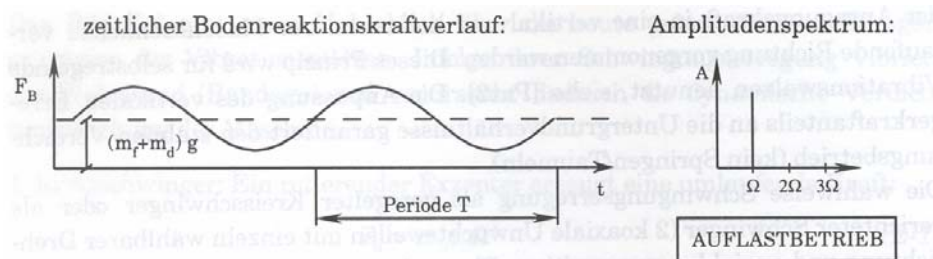


Abbildung 2-9: Betriebszustand Auflast (Anderegg 1997)

- Periodisches Abheben

Die Bandage bewegt sich weiterhin periodisch, die Dauer der Periode entspricht jener der Erregerfrequenz; nach oben gerichtete Kräfte werden jedoch so gross, dass die Bandage vom Boden abhebt. Zugkräfte zwischen Walzentrommel und dem darunter liegenden Boden können naturgemäss nicht übertragen werden. Dieser Zustand tritt bereits bei mittleren Bodensteifigkeiten auf und spielt aufgrund der Häufigkeit des Auftretens für dynamische Verdichtungskontrollen eine wichtige Rolle.

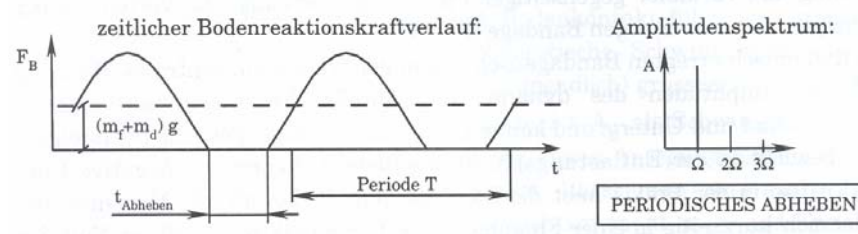


Abbildung 2-10: Betriebszustand Abheben (Anderegg 1997)

- Springen

Nimmt die Steifigkeit des Untergrundes weiter zu, kann es zum Springen der Bandage kommen. Dabei zeigt die Bandage nur mehr bei jeder zweiten Unwuchtumdrehung eine wiederkehrende Bewegung, das heisst einer Periode mit grosser Kräfteintragung folgt eine mit einer niedrigeren. Dies kann unter bestimmten Verhältnissen soweit führen, dass die Bandage während einer Exzenterumdrehung einen vollen Luftschlag ausführt. Theoretisch ist es auch möglich, dass die Periodendauer der Bandagenschwingung dem vierfachen Wert der Periode des Erregers entspricht. Der Uebergang zwischen Abheben und Springen erfolgt kontinuierlich, jedoch sehr rasch. Diese beiden Betriebszustände sind deutlich voneinander zu unterscheiden, da beim Sprungbetrieb die Erschütterungswirkungen grösser bzw. die Vibrationsgeräusche aufgrund der niedrigeren Frequenzen anders sind. Walzen mit grösseren Amplituden bzw. verhältnismässig geringen Rahmenmassen neigen stärker zum Springen als Verdichtungswerkzeuge mit kleiner Amplitude und geringen statischen Rahmenachslasten.

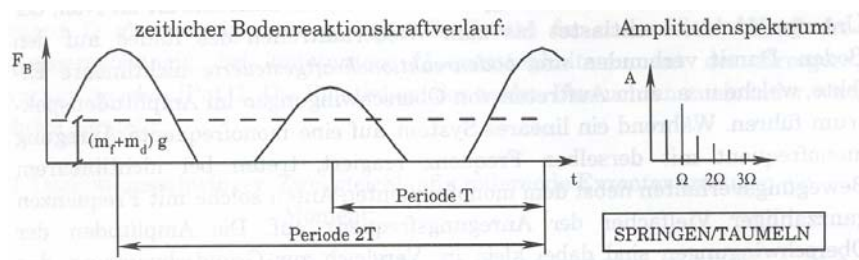


Abbildung 2-11: Betriebszustand Springen/Taumeln (Anderegg 1997)

- Taumeln

Bisher wurde vorausgesetzt, dass die Bandagenachse waagrecht bleibt. Bei sehr hohen Bodensteifigkeiten kann es nun zu Wiegeschwingungen der Walzentrommel kommen. Das bedeutet, dass sich die beiden Seiten der Trommel um 180° phasenverschoben bewegen; schlägt zum Beispiel der linke Rand am Boden auf, so befindet sich der rechte zu diesem Zeitpunkt in der Luft.

Setzt Taumeln ein, so ist die Walze nicht mehr steuerbar, dieser Umstand erfordert ein sofortiges Ausschalten der Vibration. Zusätzlich kommt es zu einer hohen Belastung des Verdichtungsgerätes.

- Chaos

Extrem hohe Bodensteifigkeiten bzw. eine ungünstige Kombination verschiedener Walzen- und Bodenparameter können dazu führen, dass das Bewegungsverhalten nicht mehr periodisch, sondern unkontrolliert bzw. chaotisch abläuft. In diesem Fall ist weder eine Verdichtung noch eine walzenintegrierte dynamische Kontrolle der Verdichtung möglich.

2.2 Messsysteme der FDVK

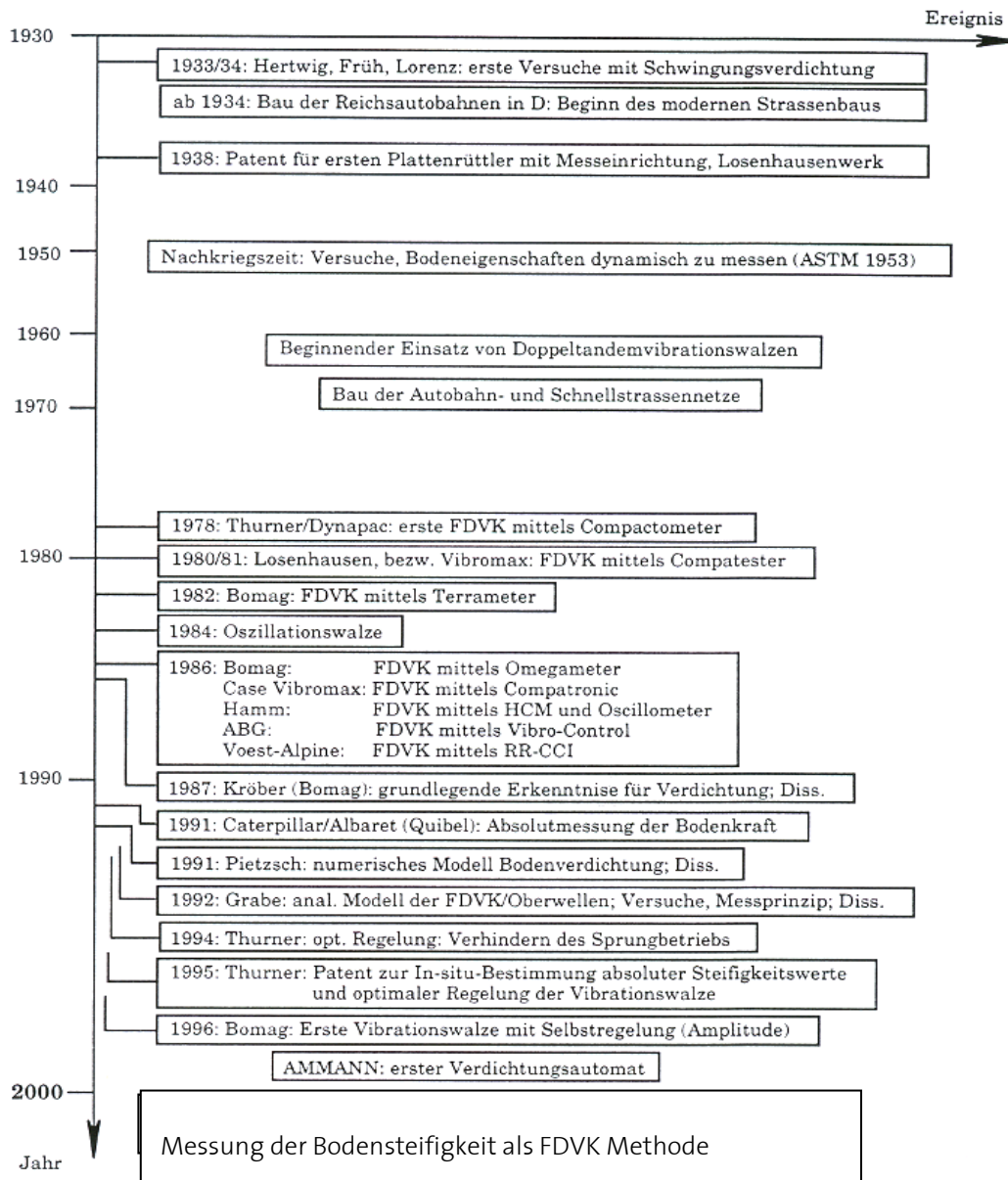


Abbildung 2-12: Historische Entwicklung.

Ein kurzer Überblick über die Geschichte der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle FDVK zeigt auf, dass nach Entwicklung und Umsetzung der dynamischen Bodenverdichtungstechnologie das Zusammentreffen von Maschinenbau und Elektrik/Elektronik ab den 70-er Jahren zu ersten Verdichtungskontroll-Geräten geführt hat (Abbildung 2.12). Mitte der 80-er Jahre hatte praktisch jede damals existierende Walzenfabrik ihr eigenes FDVK-Messgerät.

2.2.1 Grundprinzipien

Grundsätzlich bauen diese Verfahren auf der Analyse der Schwingungsreaktion der Bandage auf. In der Folge werden die fünf wichtigsten näher erläutert. Die einfacheren Verfahren ermitteln Relativmessgrößen und basieren auf den folgenden Grundprinzipien:

- Messen der Amplitude der Bandagenbeschleunigung (Prinzip: „Beschleunigungsamplitude“)
- Bestimmen des Oberwellengehalts der Bandagenbeschleunigung (Prinzip: „Oberwellengehalt“)
- Messen der in den Boden abgegebenen Energie durch Integrieren des Kraft-Weg-Diagramms (Prinzip: „Verdichtungsleistung“)
- Zwei neuere Verfahren ermitteln direkt Bodenkenngößen:
- Bestimmung der Bodensteifigkeit unter Annahme eines elastischen Bodenmodells (Prinzip Ammann)
- Bestimmung der Belastungssteifigkeit durch Differenzieren des Kraft-Weg-Diagramms (Prinzip Bomag)

2.2.1.1 Messen der Amplitude der Bandagenbeschleunigung

Die einfachste Methode zur Überwachung der Verdichtungszunahme besteht in der Messung der Beschleunigungsamplitude der Bandage und deren direkte Wiedergabe über eine Analog- oder Digitalanzeige oder der Ausgabe eines Warnsignals, falls ein Grenzwert überschritten wird. Da die Beschleunigung der Bandage allein aber noch keinen eindeutigen Rückschluss auf die Verdichtung des Bodens gibt, kann lediglich der Fortschritt der Verdichtung verfolgt werden. Ein Warnsignal bei Erreichen eines Grenzwertes macht auch nur dann Sinn, wenn dieser vorgängig durch eine sorgfältige Kalibrierung bestimmt wurde.

2.2.1.2 Bestimmen des Oberwellengehalts der Bandagenbeschleunigung

Bei dieser Methode wird der Verdichtungszustand des Bodens durch das Amplitudenverhältnis aus Oberwelle und Grundwelle des an der vibrierenden Bandage gemessenen Beschleunigungssignals gemessen. Das Gleichgewicht zwischen Zentrifugalkraft der rotierenden Unwuchtmasse und der Trägheitskraft der Bandage ergibt bei einer frei bzw. auf einer voll-elastischen Unterlage schwingenden Bandage eine harmonische Sinusschwingung (Grundwelle). Je nach Festigkeit der Unterlage wird die Grundwelle von Oberwellen überlagert. Durch eine Filterung auf elektronischem Wege wird die periodische Schwingung in sinusförmige Komponenten verschiedener Frequenz und Amplitude zerlegt, nämlich in die Grundwelle und deren ganzzahlige Vielfache (Oberwellen) (Gahbauer et al. 1995).

Untersuchungen ergaben, dass die Amplitude der ersten Oberwelle dieser zusammengesetzten Schwingung signifikant für die Verzerrung der Grundschwingung und damit für den Verdichtungszustand des Bodens ist. Weitere Oberwellen sind geprägt durch maschinentechnische Einwirkungen (z.B. Lagerrauschen) und werden daher für die Messwertbildung nicht berücksichtigt.

Der Messwert ist nicht nur von veränderlichen Boden-, sondern auch von variablen Maschinenparametern abhängig. Aus diesem Grund schreiben die FDVK-Normen für die Verdichtungskontrolle mittels Oberwellenmessung die überwachte Konstanz der Maschinenparameter vor.

2.2.1.3 Messen der in den Boden abgegebenen Energie durch Integrieren des Kraft-Weg-Diagramms

Der vibrierende Walzkörper gibt bei jeder Exzenterumdrehung Bewegungsenergie an die überwalzte Unterlage ab (Bodenkontakt vorausgesetzt). Ein Teil dieser Bewegungsenergie wird vom Untergrund aufgenommen, der Rest der Energie wird an den Walzkörper zurückgegeben (Abbildung 2-13). Der vom Untergrund aufgenommene Teil der Bewegungsenergie ist abhängig vom jeweils herrschenden Verdichtungs- bzw. vom Steifigkeitszustand der Unterlage (Gahbauer et al. 1995).

Die vom Boden effektiv aufgenommene Energie wird nach Division durch die Zeitdauer einer Exzenterumdrehung auch als effektiv abgegebene Leistung P_{eff} des Walzkörpers pro Exzenterumdrehung bezeichnet.

P_{eff} ist abhängig von konstant anzunehmenden Walzenkennwerten und messtechnisch erfassbaren Größen. Bei den Walzenkennwerten sind zu nennen: schwingende Masse der Bandage, statische Achslast und die von den rotierenden Unwuchtmassen hervorgerufene Fliehkraft. Zu messen bleiben die an der Bandage auftretenden Beschleunigungswerte, aus denen sich durch einmalige Integration die Schwingungsgeschwindigkeit der Bandage errechnen lässt.

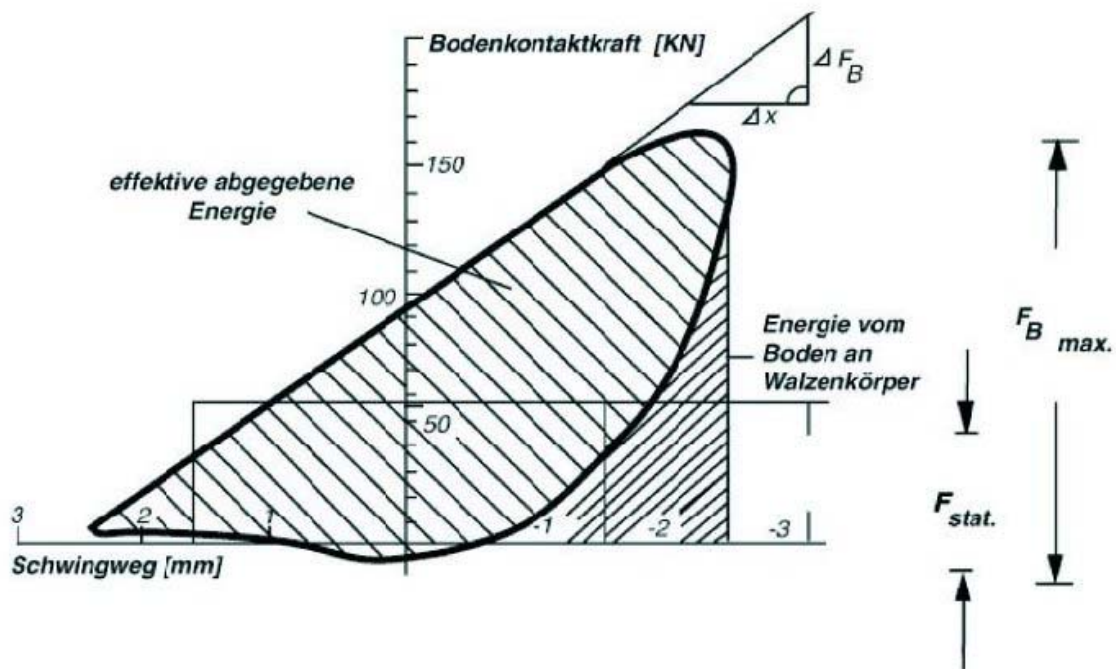


Abbildung 2-13: Energieaustausch zwischen Boden und Walzkörper im Kraft-Weg-Diagramm (Kloubert 2003)

2.2.1.4 Bestimmung der Bodensteifigkeit unter Annahme eines elastischen Bodenmodells

Indem der Untergrund durch ein Kelvin-Voigt-Modell modelliert wird, kann das System Walze-Boden mittels relativ einfacher Gleichgewichtsbedingungen beschrieben werden.

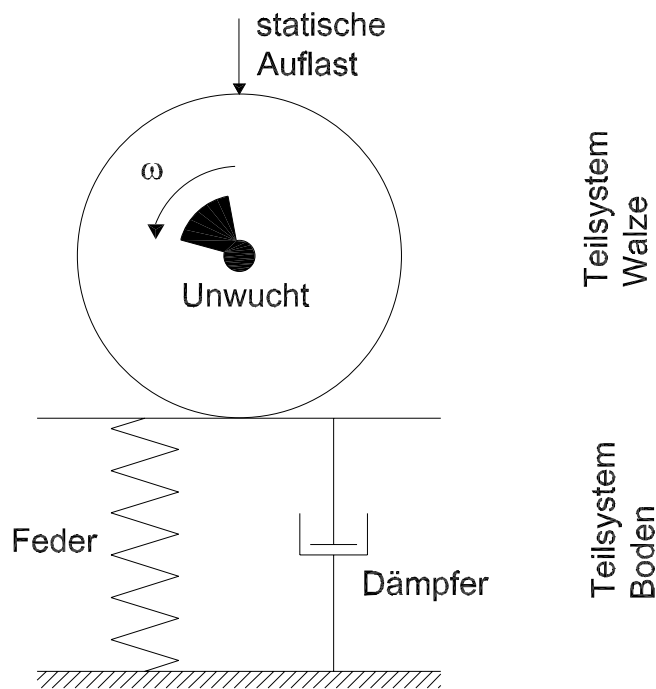


Abbildung 2-14: Dynamisch angeregte Bandage auf durch eine Feder und einen Dämpfer idealisiertem Boden.

Für das Teilsystem Walze gilt:

$$\underbrace{F_B}_I = \underbrace{-m_d \ddot{x}_d}_{II} + \underbrace{m_u r_u 4\pi^2 f^2 \cos(2\pi ft)}_{III} + \underbrace{(m_f + m_d)g}_{IV} \quad (2-1)$$

- I: Bodenkontaktkraft; wirkt zwischen Bandage und Untergrund
- II: Massenträgheitskraft, auch als „Schlagkraft“ bezeichnet
- III: Zentrifugalkraft; durch rotierenden Exzenter (Unwucht) erzeugt
- IV: statisches Auflastgewicht; setzt sich zusammen aus Bandageneigengewicht und Chassisaufkastgewicht

Die Parameter des Schwingungssystems sind:

- schwingende Masse der Bandage m_d [kg]
- statische Auflastmasse des Chassis m_f [kg]
- statisches Moment der rotierenden Unwucht $m_u r_u$ [kgm]
- Frequenz der rotierenden Unwucht f [Hz]

F_B entspricht der Bodenkontaktkraft und \ddot{x}_d der Bandagenbeschleunigung.

Das Teilsystem Boden wird beschrieben durch:

$$F_B = k_B x + c_B \dot{x} \quad (2-2)$$

k_B ist die Steifigkeit und c_B die Dämpfung der Unterlage. Solange die Walze mit dem Boden in Kontakt ist, entspricht x der vertikalen Verschiebung der Bandage. Befindet sich die Walze im Sprungzustand, dann unterscheidet sich x von x_d .

Durch Lösen der beiden Gleichungen kann die Steifigkeit des Bodens k_B , ein maschinenunabhängiger Wert, bestimmt werden.

Die für dieses Bodenmodell getroffenen Annahmen werden in Kapitel 4 genauer untersucht.

2.2.1.5 Bestimmung der dynamischen Bodensteifigkeit durch Differenzieren des Kraft-Weg-Diagramms

Ausgangspunkt bei der Messung der dynamischen Bodensteifigkeit ist das digital aufgezeichnete Kraft-Weg-Diagramm. Dabei wird die Bodenkontaktkraft wie in 2.2.1.4 aus dem Kräftegleichgewicht der Bandage hergeleitet.

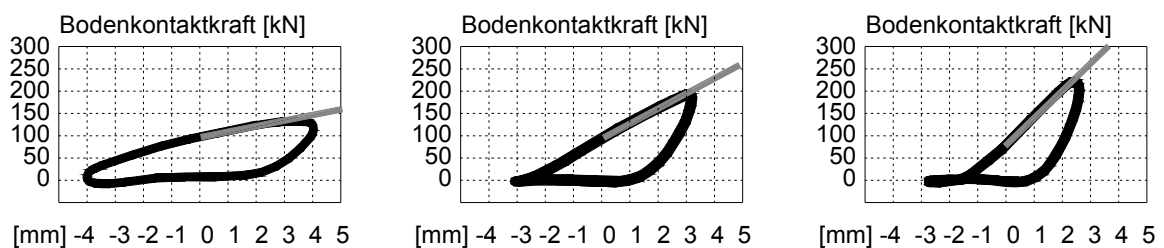


Abbildung 2-15: Kraft-Weg-Diagramm für je einen Belastungszyklus bei zunehmender Verdichtung (Kloubert 2003).

Die Belastungssteifigkeit entspricht der Steigung einer an den Belastungsast gelegten Geraden.

2.2.2 Produkteübersicht

2.2.2.1 Ungeregelte Systeme

Bei unregulierten FDVK-Systemen ist der Walzenfahrer dafür verantwortlich, dass sich die Walze im optimalen Betriebszustand befindet. Über visuelle oder akustische Signale wird dem Fahrer mitgeteilt, ob der gewünschte Verdichtungszustand erreicht ist oder ob noch weiter verdichtet werden muss. Solche Messsysteme sind sehr einfach aufgebaut und geben bloss einen Richtwert wieder. Sie können eingesetzt werden, um die Homogenität der Verdichtung innerhalb eines Baufeldes mit gleichen Untergrundverhältnissen zu testen und um die Zunahme der Verdichtung zu kontrollieren. Zur Abnahme einer verdichteten Oberfläche sind sie jedoch nicht geeignet.

Es folgt eine Auflistung verschiedener Messsysteme für unregulierte Walzen:

Produkt	Hersteller	Messprinzip	Anzeige
Compactometer	Geodynamik	Oberwellengehalt	kontinuierlich
Terrameter und Omegameter	Bomag	Verdichtungsleistung	kontinuierlich, Anzeige „Verdichtung erreicht“
Kompatester*	Vibromax	Beschleunigungsamplitude	Anzeige „Verdichtung erreicht“
Compatronic*	Vibromax	Beschleunigungsamplitude	Spurplot, Anzeige „Verdichtung erreicht“
Vibro-Control*	ABG	Beschleunigungsamplitude	kontinuierlich
HCM-Verdichtungsmesser	Hamm	Beschleunigungsamplitude	kontinuierlich
RR-CCI Verdichtungsmesser	Voest-Alpine	Oberwellengehalt	kontinuierlich

Legende: * Systeme sind nicht mehr verfügbar

2.2.2.2 *Geregelte Systeme mit Messung von Bodensteifigkeiten*

Geregelte FDVK-Systeme haben zum Ziel, zu jedem Zeitpunkt die optimale Verdichtungswirkung zu erzielen. Eine automatische Regelung verarbeitet Signale der Beschleunigungsaufnehmer und passt die Maschinenparameter entsprechend an. Somit kann auch ein unerwünschtes Springen der Bandage verhindert werden.

Auf dem Markt existieren zwei verschiedene Regelkonzepte: das System Ammann ACE mit integriertem Messsystem und das System Bomag Variomatic/Variocontrol mit dazugehörigem Messsystem BTM-E.

- Ammann ACE

Bei diesem System, das auf Vibrationswalzen der Firma Ammann Verdichtungs AG montiert ist, wird ein Bodensteifigkeitswert nach Abschnitt 2.2.1.4 berechnet.

Die automatische Regelung hält die Amplitude der Bodenkontaktkraft konstant, indem Erregerkraft (verstellbare Exzentrizität der Unwucht) sowie Erregerfrequenz geregelt werden. Dadurch kann die Frequenz so angepasst werden, dass sie in den gewünschten Bereich leicht über der Eigenfrequenz des Systems Walze-Boden zu liegen kommt.

Die Exzentrizität der Unwucht ist direkt proportional zur dynamischen Last, die auf die Bandage einwirkt. Bei Verdichtungsbeginn wird zunächst eine grosse Last aufgebracht, die dann mit zunehmender Verdichtung reduziert wird, um Sprungbetrieb zu verhindern. Parallel dazu wird die Frequenz so angepasst, dass der Phasenwinkel zwischen Anregung und Reaktion konstant bleibt.

Ein Display in der Fahrerkabine zeigt fortlaufend den aktuellen Bodensteifigkeitswert k_B an. Falls gewünscht, kann ein Sollwert für die Bodensteifigkeit eingestellt werden, bei dessen Erreichen die Verdichtungskraft (Exzentrizität der Unwucht) automatisch zurückgeregelt wird. Über eine Serie Warnlampen wird dem Fahrer zudem mitgeteilt, ob die Walzgeschwindigkeit, berechnet aus dem optimalen Schlagabstand der Unwucht, richtig, zu hoch oder zu tief ist.

- Bomag VARIOCONTROL und VARIOMATIC mit BTM-E-Messsystem

Die geregelten VARIOCONTROL Walzenzüge und VARIOMATIC / Asphalt Manager Tandemwalzen sind mit Richtschwingsystemen ausgestattet. Das Selbstregelungskonzept hält die Amplitude der Vertikalschwingung sowie die Frequenz konstant, ohne allerdings den Phasenwinkel zu messen. Die Regelung verhindert, dass die Bandage in einen nachteiligen Sprungbetrieb übergeht oder eine Überverdichtung verursacht.

VARIOCONTROL Walzenzüge und VARIOMATIC / Asphalt Manager Tandemwalzen sind standardmässig mit dem BTM-E Messsystem ausgerüstet. Das Messsystem ermittelt analog zu Abschnitt 2.2.1.5 die dynamische Bodensteifigkeit E_{VIB} in MN/m^2 als Mass für den Verdichtungszustand.

Die Messwerte werden kontinuierlich angezeigt und können bei Bedarf ausgedruckt werden. Durch Voreinstellen eines Sollwertes für die Verdichtung wird dem Walzenfahrer über eine Warnlampe mitgeteilt, ob die Verdichtung abgeschlossen ist oder noch nicht.

3 **Beschreibung der herkömmlichen Verdichtungskontrollen**

3.1 **Statischer Plattendruckversuch**

Der statische Plattendruckversuch ist ein Dimensionierungskriterium für den Oberbau von Strasse und Eisenbahn. In der Schweiz ist er der wichtigste Versuch für die Verdichtungskontrolle und ist in den Normen SN 670 312b und 670 317b beschrieben und geregelt.

Ziel des Versuches ist, den Verformungsmodul M_E zur Beurteilung der Tragfähigkeit des Bodens zu bestimmen. Dazu wird eine kreisförmige Platte mit 30 cm Durchmesser durch eine hydraulische Presse zentrisch belastet (Abbildung 3-1). Die Platte muss satt und ohne verbleibende Hohlräume auf der Prüffläche aufliegen. Zum Ausgleich von Unebenheiten wird eine hauchdünne Schicht aus trockenem Sand oder Gipsbrei aufgebracht. In der Praxis zeigt sich, dass häufig zu viel Sand verwendet wird. Dadurch wird bei der Belastung zuerst die Sandschicht zusammengedrückt und der Belastungsmodul somit verfälscht. Weitere Fotos von der Durchführung eines Plattendruckversuches sind in Anhang 2 abgebildet.



Abbildung 3-1: *Statischer Plattendruckversuch. Damit die Lastplatte satt aufliegt wird eine dünne Schicht Sand auf die Prüffläche aufgebracht.*

Nach dem Aufbringen einer Vorbelastung von $0,01 \text{ MN/m}^2$ wird die Last so lange gesteigert bis entweder eine Setzung von 5 mm oder eine Normalspannung von $0,5 \text{ MN/m}^2$ erreicht ist. Die Belastung wird in mindestens sechs Laststufen aufgebracht. Nach dem Erreichen der Maximalbelastung wird die Platte bis auf die Vorbelastung ($0,01 \text{ MN/m}^2$) entlastet. Dann beginnt der Wiederbelastungszyklus. Die Wiederbelastung ist aber nur bis zur vorletzten Laststufe des Erstbelastungszyklus auszuführen, um im vorbelasteten Bereich zu bleiben.

Aus diesem Be- und Entlastungszyklus wird eine Drucksetzungslinie (σ -s-Diagramm) ermittelt. Aus der Steigung der Drucksetzungslinie wird der Verformungsmodul M_E (resp. E_V , nach deutscher Norm) bestimmt. Das Spannungsniveau, bei dem die M_E -Werte bestimmt werden, ist davon abhängig, ob es sich um einen Untergrund und Unterbau, eine Foundationsschicht oder eine Tragschicht handelt. Dem gegenüber wird der E_V -Wert unabhängig von der zu prüfenden Schicht immer zwischen den Laststufen $0.3 \sigma_{\max}$ und $0.7 \sigma_{\max}$ bestimmt. Der Verformungsmodul des Erstbelastungsastes wird M_{E1} oder E_{V1} , der des Zweitbelastungsastes M_{E2} oder E_{V2} genannt.

Zur Ermittlung der Verformungsmoduli wird eine Regressionsparabel durch die gemessenen Punkte gelegt. Dadurch wird der Interpretationsspielraum vermindert. Die Formel zur Ermittlung von M_{E1} und M_{E2} lautet wie folgt:

$$M_E = \frac{D}{a_1 + a_2 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (3-1)$$

wobei: D = Durchmesser der Lastplatte [mm]

a_1 und a_2 = Parameter des Polynoms zweiten Grades

σ_1 = untere Laststufe (Grösse abhängig von der zu prüfenden Schicht) [MN/m²]

σ_2 = obere Laststufe (Grösse abhängig von der zu prüfenden Schicht) [MN/m²]

In der Schweiz wird die Auswertung der Plattendruckversuche immer noch vorwiegend über den M_E -Wert durchgeführt, in unseren Nachbarländern ist der E_V -Wert üblich. Die beiden Verformungsmoduli unterscheiden sich in der Auswertungstheorie der Setzungsberechnung. So wird bei der Bestimmung des M_E -Wertes von einer schlaffen Setzung der Lastplatte ausgegangen. Im Gegensatz dazu wird beim E_V -Wert eine starre Platte vorausgesetzt. Zusätzlich unterscheiden sich die beiden Verformungsmoduli in unterschiedlichen vorgegebenen Laststufen. Die Tiefenwirkung des Versuches beträgt etwa $1.5 \cdot D$ (Durchmesser der Lastplatte), also rund 500 mm.

3.2 Dynamischer Plattendruckversuch

Für diesen Versuch existiert in der Schweiz noch keine Norm. Er findet dementsprechend noch wenig Anwendung. In anderen Ländern hingegen (z.B. Deutschland) wird er alternativ zum statischen Plattendruckversuch zur Nachprüfung der Tragfähigkeit und der Verdichtung von Böden angewendet (Kudla et al. 1991).

Der Vorteil dieser Messmethode liegt in der Schnelligkeit. Ein Versuch lässt sich in ca. 3 bis 5 Minuten durchführen. Ausserdem wird für den Versuch kein Gegengewicht gebraucht, was auch bei engen Arbeitsräumen eine Anwendung ermöglicht. Das Wort „dynamisch“ besagt hier, dass während des Versuches Massenträgheitskräfte auftreten. Der Versuch wird mit dem Fallgewichtsgesetz durchgeführt. Hierbei wird der Boden über eine kreisförmige, als starr angenommene Lastplatte (300 mm) durch ein Fallgewicht stossartig belastet. Eine Masse von 10.2 kg fällt aus einer Höhe von 1.0 m durch eine Stange geführt auf eine Gummifeder. Die Gummifeder sitzt auf einem Gehäuse, das mit der Lastplatte starr verbunden ist. Die maximale Kraft, die beim Fallversuch auf die Lastplatte aufgebracht wird, braucht nicht bei jedem Versuch gemessen zu werden. Erfahrung und Theorie zeigen, dass die maximale Kraft praktisch unabhängig von der zu prüfenden Unterlage ist, so dass sie als konstante angenommen werden kann. Diese konstante Kraft erzeugt bei einer gleichmässigen Spannungsverteilung unter der Lastplatte eine Maximalspannung von 0.09 MN/m². Um eine konstante Fallhöhe gewährleisten zu können, ist oben an der Führungsstange eine Ausklinkvorrichtung angebracht.



Abbildung 3-2: Dynamischer Plattendruckversuch (Fallgewichtsgesetz).

Die Berechnung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} erfolgt wie beim statischen Plattendruckversuch nach der Elastizitätstheorie, nur wird jeweils die maximale Spannung σ_{max} und die maximale Einsenkung s_{max} in die Berechnung eingesetzt. Die Formel lautet wie folgt:

$$E_{vd} = 1.5 \cdot r \frac{\sigma_{max}}{s_{max}} \quad [\text{MN/m}^2] \quad (3-2)$$

wobei: r = Radius der Lastplatte in [mm]

Aufgrund praktischer Tests wurde die Tiefenwirkung dieses Versuches untersucht. Dabei wurden Einflüsse bis etwa 500 mm Tiefe festgestellt. Der Haupteinfluss liegt aber in den obersten 250 mm. Der Einflussbereich des Versuches liegt damit in der gleichen Grössenordnung wie derjenige des statischen Plattendruckversuches.

3.3 **Materialersatzmethoden**

3.3.1 **Sandersatzmethode**

Die Sandersatzmethode ist ein Feldversuch zur Bestimmung der Feuchtdichte sowie des natürlichen Wassergehaltes eines Bodens. Er ist nur durchführbar bei Böden, wo ein Loch ausgeführt werden kann. Der Versuch ist in der Norm SN 670 335a geregelt.

Als erstes muss ein Loch mit einem Durchmesser von ca. 250 mm und einer Tiefe ca. 250 mm ausgehoben werden. Das ausgehobene Material wird gewogen, getrocknet und nochmals gewogen. Daraus werden der Wassergehalt und das Gewicht des feuchten Bodens bestimmt. Zur Bestimmung des Lochvolumens wird Quarzsand, dessen Dichte bekannt ist, über einen Sandbehälter und Trichter in das Loch eingefüllt (Abbildung 3-3). Der Sandbehälter wird vor und nach dem Einfüllen gewogen. Aus der Masse vor und nach dem Versuch und der Dichte des Quarzsandes lässt sich das Lochvolumen bestimmen. Aus der Masse des ausgehobenen Materials und dem Volumen des Loches lässt sich die Feuchtdichte ermitteln.

Ein Versuch dauert ca. 45 Minuten. Als Standardausrüstung für das Feld gehört neben dem Sandbehälter und zugehörigen Utensilien auch eine Waage. Bei längeren Feldeinsätzen kann auf der Baustelle ein Ofen zum Trocknen des ausgehobenen Materials installiert werden.



Abbildung 3-3: Sandbehälter für Sandersatzmethode.

3.3.2 **Ballonmethode**

Mit der Ballonmethode (mit Wasser gefüllter Ballon) werden ebenfalls die Feuchtdichte und der natürliche Wassergehalt eines Bodens bestimmt. Das Prinzip ist das Gleiche wie bei der Sandersatzmethode, nur wird hier das Lochvolumen nicht mit Quarzsand, sondern mit Wasser bestimmt. Der Versuch ist in der Norm SN 670 335a geregelt.

Auch hier muss vorgängig ein Loch ausgehoben werden. Am ausgehobenen Material lässt sich mit demselben Vorgehen wie bei der Sandersatzmethode der Wassergehalt bestimmen. Nach dem Aushub wird das Gerät, bestehend aus einem ca. 700 mm hohen Glaszylinder (110 mm), der mit Wasser gefüllt ist, über dem Loch fixiert. Das Wasser im Zylinder ist von einem Ballon umhüllt. Nun wird mit einem leichten Überdruck das vom Ballon umhüllte Wasser in das Loch gedrückt. Das Lochvolumen ergibt sich aus der Differenz der Ablesungen vor und nach dem Versuch. Bei dieser Methode ist in Betracht zu ziehen, dass bei grobkörnigen Böden der Gummiballon nicht immer satt an der Lochfläche aufliegt, und daher das Volumen unterschätzt werden kann. Dadurch wird die gerechnete Dichte überschätzt.

3.4 **Isotopensonde**

Mit der Isotopensonde können Feuchtdichte und Wassergehalt von fast allen Bodenmaterialien schnell und zerstörungsfrei gemessen werden. Der Versuch ist in der Norm SN 670 335a beschrieben. Die Feuchtdichte wird ermittelt durch die Absorption von Gammastrahlen im Material, der Wassergehalt durch die Absorption von schnellen Neutronenstrahlen. Ein Versuch dauert nur wenige Minuten. Aus diesem Grund können statistisch bessere Werte ermittelt werden als bei den anderen punktuellen Versuchen. Dies lässt eine genauere Aussage über die Homogenität einer verdichteten Schicht zu.

Für die Feldmessungen existieren mehrere Arten von Geräten. In Abbildung 3-4 ist ein

Gerät mit einer Sonde dargestellt, mit welchem die radioaktive Quelle einige Dezimeter tief in den Boden eingeführt werden kann und bei welchem der Empfänger an der Oberfläche des Bodens über der Strahlenquelle angebracht ist. Man misst die direkte und indirekte Strahlung zwischen Quelle und Empfänger. Da die Isotopsonde radioaktive Strahlung erzeugt, müssen alle Personen, die daran arbeiten entsprechend ausgebildet sein. Eine unsachgemässe Handhabung kann eine Gefahr bedeuten.



3.5 Vibraflect

Abbildung 3-4: Isotopsonde.

Das Vibraflect Tragfähigkeitsmessgerät gehört zu den dynamischen Tragfähigkeitsmessgeräten. Das Messprinzip basiert auf dem Erfassen der Einsenkungsmulde unter und neben einer dynamischen, sinusförmigen Last. Mittels eines Schwingers, welcher mit einer Unwucht so eingestellt ist, dass eine sinusförmige, vertikal wirkende dynamische Last generiert wird, wird über eine runde Lastplatte der zu prüfende Boden belastet. Direkt in der Lastplatte und in verschiedenen Abständen horizontal zur Lastplatte werden mittels Beschleunigungssensoren die Wirkungen der dynamischen Last gemessen. Die dynamische Last beträgt 5 kN. Es handelt sich um eine Druckschwellbeanspruchung zwischen fast Null und 5 kN, welche über die kreisförmige Stahlplatte auf den Boden übertragen wird. Durch zweimaliges Integrieren des Beschleunigungssignals der verschiedenen Sensoren kann die Einsenkungsmulde, die so genannte Deflektionsmulde gerechnet werden. Die Grösse und die Form der Deflektionsmulde lassen auf die Tragfähigkeit bzw. auf die Homogenität der Tragfähigkeit der geprüften Schicht schliessen. Das Vibraflect-Gerät ist auf einem Anhänger aufgebaut und hat ein Gesamtgewicht von ca. 400 kg.

4 Vergleich FDVK – statischer Plattendruckversuch

In der Folge werden die wichtigsten Unterschiede zwischen auf Vibrationswalzen basierenden FDVK-Systemen und der in der Schweiz am weitesten verbreiteten Verdichtungskontrollmethode, dem statischen Plattendruckversuch genannt. Sie können in praktische, den Betriebsablauf betreffende sowie in theoretische, die Wirkung betreffende Unterschiede aufgeteilt werden.

4.1 Praktische Unterschiede

Methoden zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle haben einen grossen praktischen Vorteil gegenüber herkömmlichen Methoden. Dadurch nämlich, dass das Messgerät auf dem Verdichtungsgerät montiert ist, kann der Grad der Verdichtung kontinuierlich, flächendeckend und mit einem erheblich kleineren Zeitaufwand gemessen werden. Der Walzenfahrer hat damit die Möglichkeit, während der Verdichtung Schwachstellen im Untergrund zu lokalisieren. Dadurch können rechtzeitig entsprechende Massnahmen getroffen werden, durch die die gewünschten Qualitätsanforderungen erfüllt werden können. Das Ende der Verdichtung kann durch eine verminderte Zunahme des Messwertes erkannt werden.

Die Verdichtungsmessung geschieht arbeitsintegriert und behindert damit den Baustellenbetrieb in einem wesentlich geringeren Ausmass als herkömmliche Methoden. Es können somit Zeit und Kosten gespart werden.

4.2 Unterschiede in der Wirkung

Die beiden Methoden unterscheiden sich in drei wesentlichen Punkten:

- Art der Belastung (statisch – dynamisch)

Die Vibrationswalze, die zur Messung der Verdichtung benützt wird, bringt im Unterschied zum statischen Plattendruckversuch eine dynamische Last in den Boden ein. Die unter der Bandage hervorgerufenen Spannungen resultieren in elastischen Druck- und Scherwellen, die sich im Boden in alle Richtungen fortpflanzen. Erreicht eine Welle eine Schichtgrenze, so entsteht eine refraktierte Welle, die sich in der tieferen Schicht fortpflanzt, und eine reflektierte Welle, die sich nach oben fortpflanzt, bis sie wieder an der Oberfläche ankommt. Diese in der Schicht gefangene wie auch alle weiteren erzeugten und reflektierten Wellen überlagern sich und beeinflussen damit das Bewegungsverhalten der Walze.

Diese Beeinflussung der Bewegung der Walze durch einen geschichteten Untergrund hängt ab vom Verhältnis der Auflagefläche zur Schichtdicke, von den Materialeigenschaften der Schichten und von der Frequenz der dynamischen Anregung. Für gängige Werte kann aber gezeigt werden, dass das Verhalten des Bodens, ausgedrückt durch eine dynamische Steifigkeit, weitgehend frequenzunabhängig ist und dem statischen Verhalten entspricht (Wolf 1994). Dies gilt für gut verdichteten Boden, bei dem der Anteil der plastischen Verformungen vernachlässigbar klein ist.

Ein weiterer Unterschied ergibt sich daraus, dass das Verdichtungsgerät sich fortbewegt. Dadurch wird bei jeder Umdrehung der Unwucht und dem damit verbundenen Belastungszyklus ein neues Bodenpaket belastet. Es kommt somit immer wieder zu einer Erstbelastung. Eine Zweitbelastung wie beim statischen Plattendruckversuch wird nicht durchgeführt.

- Form und Grösse der Auflagefläche

Ein grosser Unterschied besteht in den Auflage- oder Kontaktflächen zwischen Lastplatte resp. Bandage und dem Untergrund. Beim Plattendruckversuch ist die Kontaktfläche kreisförmig und

eben währenddem bei der Walze die Kontaktfläche lang gestreckt rechteckig und gekrümmt ist. Der Plattendruckversuch wirkt auf eine Fläche von genau 0.071 m^2 , die Walze hingegen auf eine von der Einsenkung abhängige Fläche von ungefähr 0.2 m^2 . Die Spannungsverteilungen sind grundsätzlich anders, wie in Abbildung 4-1 ersichtlich ist.

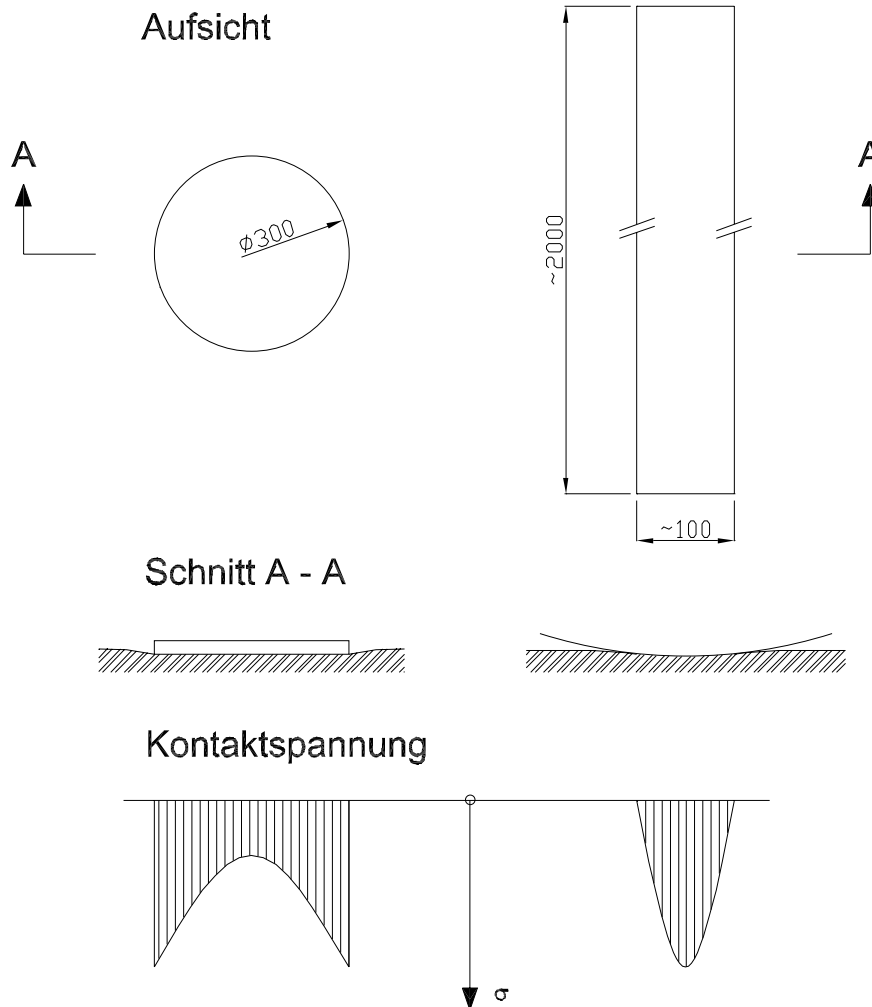


Abbildung 4-1: Kontaktfläche sowie Kontaktspannung beim Plattendruckversuch (links) und bei der Walze (rechts).

Der Plattendruckversuch stellt ein achsensymmetrisches Problem dar, das heißt, es treten nur radiale und axiale Verschiebungen auf. Im Gegensatz dazu sind wir bei der Walze aufgrund der schmalen aber langen Kontaktfläche näherungsweise mit einer Linienlast konfrontiert, die im Bereich der Mitte der Bandage einen ebenen Verzerrungszustand bewirkt. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Tiefenwirkung, da die Spannungen im Untergrund bei der Walze in etwa im Verhältnis zum Abstand abnehmen, wogegen die Abnahme für den Plattendruckversuch ungefähr im Verhältnis zum Quadrat des Abstandes geschieht.

- Aufgebrachte Last

Ein Walzenzug mit einer Masse von 14 Tonnen, einer vorderen Achslast von 9 Tonnen und einer Bandagenbreite von 2.10 m erzeugt eine Linienlast von rund 40 kN/m . Bei einer Aufstandsweite von 10 cm ergibt sich als grobe Schätzung eine durchschnittliche Kontaktspannung von 400 kN/m^2 . Durch die dynamische Anregung kann sich diese Spannung verdoppeln und

Maximalwerte von 800 kN/m^2 annehmen. Im Gegensatz dazu wird beim Plattendruckversuch nach Norm mit einer maximalen Kontaktspannung von 500 kN/m^2 gearbeitet.

- Tiefenwirkung

Aufgrund der oben genannten Überlegungen insbesondere in Bezug auf Kontaktfläche und Last kann qualitativ die Annahme gemacht werden, dass die Tiefenwirkung des Plattendruckversuches kleiner ist als diejenige der Vibrationswalze. Um quantitative Aussagen zu treffen, sind jedoch Spannungs- sowie Beschleunigungsmessungen im Untergrund notwendig. Solche Messungen sind in den Arbeiten von D'Appolonia et al. (1969) und Kröber (1988) durchgeführt worden (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). D'Appolonia (1969) führte in vier Einbautiefen bis 1.8 m Spannungs- und Beschleunigungsmessungen auf schlecht abgestuftem Dünsand durch. Die Messungen von Kröber (1988) wurden in einer Versuchshalle auf einem schlecht abgestuften Kies vorgenommen und beinhalten die Messung der Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen sowie der Druck- und, mittels schräg eingebauter Messdosens, Schubspannungen.

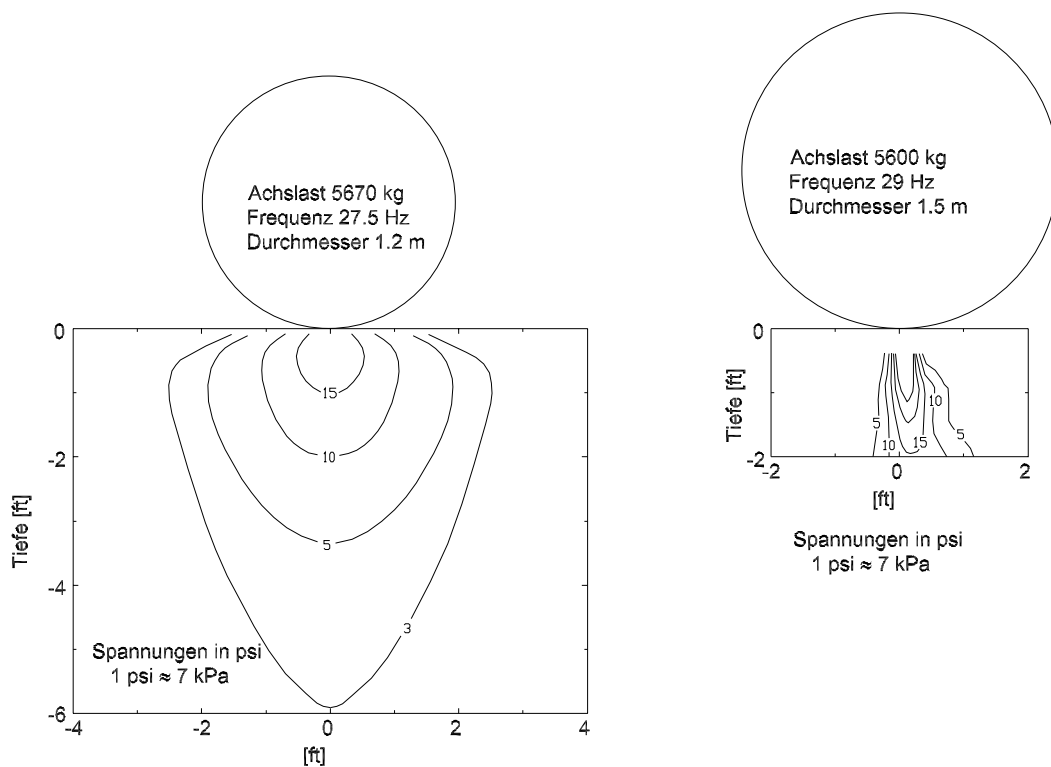


Abbildung 4-2: Verteilung der Vertikalspannungen nach D'Appolonia (1969).

Abbildung 4-3: Verteilung der Vertikalspannungen nach Kröber (1988).

Die in den beiden Untersuchungen verwendeten Vibrationswalzen weisen mit einer statischen Achslast von rund 5,6 t und einer konstanten Anregungsfrequenz um 28 Hz annähernd gleiche Eigenschaften auf. Dennoch zeigen sich zwei stark unterschiedliche Verteilungen der Vertikalspannungen im Boden. So weist Kröber bis in eine Tiefe von 60 cm (2 ft) bedeutend höhere Spannungen nach als D'Appolonia. Zudem pflanzen sich diese Spannungen nach Kröber primär in vertikaler Richtung fort, währenddem bei D'Appolonia eine stärkere seitliche Ausbreitung festzustellen ist. Diese Unterschiede können auf einer Vielzahl Parameter beruhen, die einerseits das Verdichtungswerkzeug und andererseits den Untergrund betreffen. So sind neben Frequenz und statischer Achslast auch die Masse der Unwucht sowie die Art der Anregung, d.h. rotierend oder gerichtet, zu berücksichtigen. Von der Seite des Bodens haben die

Korngrößenverteilung, die Kohäsion, der Wassergehalt sowie der Schichtaufbau einen Einfluss auf die Spannungsausbreitung.

4.3 Theoretische Überlegungen

Bei der Kalibrierung von FDVK-Methoden mit dem statischen Plattendruckversuch stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Form der Kalibrierfunktion. In den in Deutschland, Schweden und Österreich gültigen Normen, die sich mit FDVK-Methoden befassen, wird von einer linearen Abhängigkeit ausgegangen, die nicht zwangsläufig durch den Ursprung führt. Dazu stellen sich zwei Fragen, die von Interesse sind:

- Ist der Zusammenhang zwischen dem Verformungsmodul (Erst- und Zweitbelastungsmodul) und den nach verschiedenen Methoden bestimmten FDVK-Messwerten linear?
- Führt dieser Zusammenhang durch den Ursprung?

Die zwei Punkte sind für die Messsysteme der Firmen Bomag und Ammann (Abschnitt 2.2.2.2) getrennt zu untersuchen:

4.3.1 Ammann ACE

Dem Messsystem der Firma Ammann liegt ein sehr einfaches, visko-elastisches Bodenmodell zugrunde (Preisig et al. 2003). Dieses Verfahren stammt aus dem Bereich der Fundationsdynamik und kann unter gewissen Umständen, die weiter unten beschrieben werden, auch auf das Walzenproblem angewandt werden. Durch Kopplung mit der Walze ergibt sich das in Abbildung 4-4 dargestellte System.

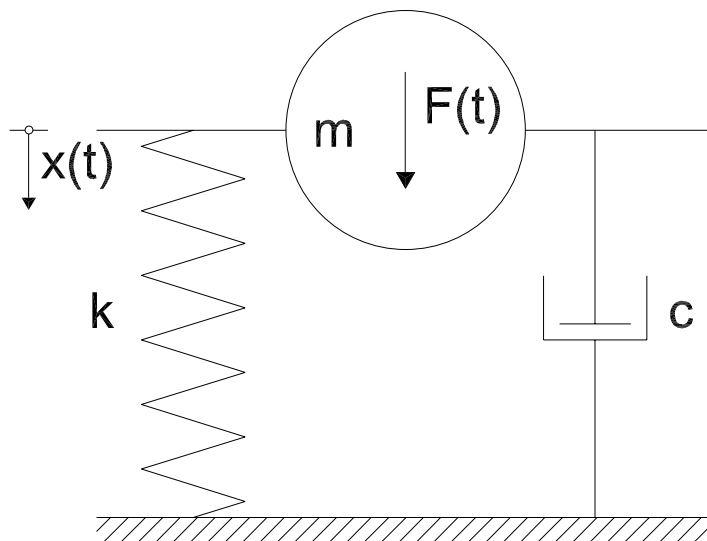


Abbildung 4-4: Mit der Walze gekoppeltes visko-elastisches Bodenmodell

k und c sind frequenzabhängig und entsprechen den Parametern der Feder respektive des Dämpfers, m ist die schwingende Masse und $F(t)$ die Erregerkraft.

Das vertikale Kräftegleichgewicht des Systems kann wie folgt geschrieben werden:

$$F(t) = k x(t) + c \dot{x}(t) + m \ddot{x}(t). \quad (4-1)$$

Die durch eine rotierende Unwucht erzeugte Erregerkraft beträgt:

$$F(t) = F_0 \cos(\omega t). \quad (4-2)$$

Im stationären Zustand ($\omega = \text{konst}$) gilt:

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad \dot{x}(t) = -\omega x_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{und} \quad \ddot{x}(t) = -\omega^2 x_0 \cos(\omega t - \varphi). \quad (4-3)$$

Zur Bestimmung der Bodensteifigkeit werden im stationären Zustand die Beschleunigungsamplitude $\omega^2 x_0$, die Erregerfrequenz $f = \omega/2\pi$ sowie der Phasenwinkel φ zwischen Erregerkraft und Schwingungsantwort gemessen. In dem Zeitpunkt, in dem der Betrag von Verschiebung bzw. Beschleunigung maximal ist, annulliert sich die Geschwindigkeit und der Dämpfungsterm $c \dot{x}(t)$ in Gleichung (4 - 1) wird zu Null. Die Bodensteifigkeit lässt sich somit berechnen als

$$k = \frac{F_0 \cos \varphi}{x_0} + m\omega^2. \quad (4-4)$$

Wie bereits erwähnt ist die Bodensteifigkeit k grundsätzlich frequenzabhängig. Es lässt sich aber zeigen, dass im Bereich der Arbeitsfrequenz einer Vibrationswalze k ungefähr konstant bleibt. Um dies zu zeigen wird die Auflagefläche der Bandage auf ein kreisförmiges, starres Fundament gleicher Grundfläche zurückgeführt, welches auf einem homogenen Halbraum (Dobry et al. 1986) bzw. einer auf einem Halbraum liegenden Schicht (Wolf 1994) aufliegt. Für die Darstellung von k wird die Winkelgeschwindigkeit ω der Anregung mit dem äquivalenten Fundamentradius r_0 multipliziert und durch die Scherwellengeschwindigkeit c_s geteilt:

$$a_0 = \omega r_0 / c_s. \quad (4-5)$$

Für das Walzenproblem lässt sich die dimensionslose Frequenz a_0 der Anregung für gängige Böden und Walzentypen abschätzen. r_0 variiert typischerweise zwischen 10 und maximal 40 cm währenddem c_s oft zwischen 200 und 500 m/s liegt. Bei einer Erregerfrequenz von 40 Hz ergibt sich ein a_0 von maximal 0,4 für gut verdichtbare und bis 1 für sehr weiche Böden. In diesem tiefen Frequenzbereich entspricht die Bodensteifigkeit k der statischen Steifigkeit.

Diese auf einem visko-elastischen Bodenmodell beruhende Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass bezüglich der Annahmen Klarheit herrscht. Ein physikalisches Modell wird postuliert, welches gelöst wird, ohne weitere Annahmen zu treffen. Der aus den Messwerten berechnete Wert k entspricht einer spezifischen Eigenschaft des Bodenmodells und besitzt damit eine unmittelbare physikalische Bedeutung.

4.3.1.1 *Abgrenzung*

Damit das in Abbildung 4-4 gezeigte System bestehend aus einer Feder, einem Dämpfer und einer Masse, die durch eine harmonische Last angeregt wird, Gültigkeit hat, sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Linear elastisches Verhalten des Bodens
- Boden ist kompressibel, d.h. Poissonzahl $\nu < 0,5$ (z. Bsp. nicht gesättigt)
- Die Lasteintragungsfläche ist eben und deren Betrag konstant
- Die Walze ist immer in Kontakt mit dem Boden
- Die Walze befindet sich in einem stationären Schwingungszustand
- Ausser einer statischen Auflast wirken keine äusseren Kräfte auf das System ein

Diese Annahmen gelten annäherungsweise für dichten, gut abgestuften Kiessand, dessen Wassergehalt klein ist. Die Walze darf sich zudem nicht im Betriebszustand periodischen Abhebens befinden.

Da der Verformungsmodul M_E ebenfalls direkt proportional zum E-Modul des Bodens ist, können unter den oben genannten Annahmen die Schlussfolgerungen gezogen werden, dass

- der Zusammenhang zwischen dem Verformungsmodul und dem Bodensteifigkeitswert k_B linear ist
- dieser Zusammenhang durch den Ursprung führt.

4.3.2 *Bomag BTM-E*

Das Messsystem der Firma Bomag misst die Steigung der Hysteresiskurve im Kraft-Wegdiagramm eines Schwingzyklus der Bandage (Abbildung 2-13). Auf idealem, linear elastischem Untergrund und ohne Kontaktverlust zwischen Bandage und Boden hat diese Hysteresiskurve eine ovale Form. Aus dieser Kurve eine konstante Belastungssteifigkeit abzuleiten, ist nicht möglich. Der Messwert E_{VIB} des Systems BTM-E entspricht somit einem empirischen Messwert der nicht auf ein linear elastisches Bodenmodell zurückzuführen ist. Die Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen dem Verformungsmodul und dem Wert E_{VIB} basiert denn auch hauptsächlich auf experimentellen Ergebnissen.

5 Messungen

5.1 Einleitung

Eine zentrale Aufgabe dieses Forschungsprojektes waren Vergleichsmessungen zwischen der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) und herkömmlichen Verdichtungskontrollen. In Kapitel 3 werden die herkömmlichen Verdichtungskontrollmethoden beschrieben (statischer und dynamischer Plattendruckversuch, Materialersatzmethoden, Isotopsonde und Vibraflect). Da der statische Plattendruckversuch das häufigste Dimensionierungskriterium für Oberbauten von Strasse und Schiene ist und er wie die FDVK auch das Verhältnis der aufgebrachten Kraft zur Verformung des Bodens misst, wurde er als Vergleichsgrösse zur FDVK herangezogen.

Insgesamt wurden auf neun Erdbaustellen zwölf verschiedene Bodenmaterialien untersucht. Die statischen Plattendruckversuche wurden von den jeweiligen kantonalen Erdbaulabors, von privaten Erdbaulabors oder von der ETH durchgeführt. Die Versuchsdurchführung stützt sich auf die VSS-Normen ab. Zuerst wurden die FDVK-Werte bestimmt und dann an den gleichen Standorten die Plattendruckversuche durchgeführt.



Abbildung 5-1: Statischer Plattendruckversuch mit direkter Erfassung der Messwerte mit dem Computer.



Abbildung 5-2: Messung der FDVK-Werte mit einem Walzenzug.

5.1.1 Lineare Abhängigkeit zwischen den Vergleichsmessungen

Bei der Regression zwischen dem statischen Plattendruckversuch und der FDVK wurde von einem linearen Zusammenhang ausgegangen. Die FDVK-Werte wurden in der Abszisse als x-Variable definiert. Die Werte aus dem Plattendruckversuch sind in der Ordinate als y-Variable aufgetragen.

Für die Bestimmung der Regressionsgerade wurde die Methode der kleinsten Quadrate angewendet. Als Mass für die Stärke des linearen Zusammenhangs wird das Bestimmtheitsmass r^2 ermittelt. Das Bestimmtheitsmass kann nur Werte zwischen 1 und 0 annehmen. r^2 gibt an, wie viel Prozent der Variation der abhängigen y-Variablen der unabhängigen x-Variablen zugerechnet werden kann. Beispiel: $r^2 = 0.95$ bedeutet, die Variable x erklärt 95% der Variation der y-Variablen als linearen Zusammenhang. Die Regressionsgerade und Korrelation schreibt sich wie folgt:

$$y = a \cdot x + b \Rightarrow r^2 \quad (5-1)$$

wobei: y: Wert des statischen Plattendruckversuches M_E
 x: FDVK-Wert
 a: Steigung der Geraden
 b: Abstich beim Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse
 r²: Bestimmtheitsmass

5.1.2 Auflistung der durchgeführten Messungen

Nummer, Ort, Datum der Messung	Material, Klassifikation	Wassergehalt	Art der Baustelle
M1, Buchs 23. Aug. 01	GW, Kiessand II	$w_n < w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M2, Littau 22. Nov. 01	GW, Kiessand I	$w_n = 4.2 \% > w_{opt}$	Gründungsschicht für Hochbau, Planum
M3, Littau 22. Nov. 01	Betonrecycling, GW	$w_n = 5.0 \%$	Gründungsschicht für Hochbau, Rohplanie
M4, Sargans 30. Nov. 01	GW, Kiessand II	$w_n = 4.7 \% > w_{opt}$	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M5, Teufen 1. Mai 02	SM, Dammschüttung	$w_n = 19.5 \% > w_{opt}$	Unterbau einer Strassenbaustelle (Damm)
M6, Neuhaus 8. Mai 02	SM, Zementstabi	$w_n = 10.6 \% > w_{opt}$	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M7, Neuhaus 8. Mai 02	GP, Kiessand II	$w_n = 2.7 \% < w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M8, Rona 23. Mai 02	GW, Kiessand I	$w_n = \text{ca. } 0\% < w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M9, Kloten 19. Juli 02	Kiessand I	$w_n < w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M10, Kohlendreieck Zürich 20. Aug. 02	GP, Kiessand I	$w_n = 0.7 \% < w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Bahnbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M11, Kohlendreieck Zürich 29. Nov. 02	GP, Kiessand I	$w_n > w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Bahnbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M12, Rheinfelden Juli – Aug. 02	1. CL 2. GC-GM	$w_n = 11.7 \% > w_{opt}$ $w_n = 8.0 \% > w_{opt}$	Unterbau einer Strassenbaustelle (Damm)
M13, Rheinfelden 7. Nov. 02	GW, Kiessand I mit Asphaltgranulat	$w_n = 11.5 \% > w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Strassenbaustelle, Fundationsschicht (Planie)
M14, Lyss 19. März 03	GW	$w_n = 2\% < w_{opt}$ (Feldbeobachtung)	Versuchsfeld in einer Kiesgrube

Tabelle 5-1: Auflistung aller Baustellen, auf denen Vergleichsmessungen zwischen dem statischen Plattendruckversuch und der FDVK durchgeführt wurden.

5.2 Vergleichsmessungen mit einer Tandemwalze

Für die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle werden dynamisch angeregte Walzen mit integriertem Messsystem (FDVK) verwendet. Es gibt hierfür verschiedene Anbieter auf dem Markt. Der Industriepartner dieses Forschungsprojektes, die Firma Ammann Verdichtung AG in Langenthal, entwickelt und produziert Verdichtungswalzen mit FDVK. Sie stellte für die Vergleichsmessungen die Maschinen zur Verfügung.

Bei den Walzen der Firma Ammann (Tandemwalze und Walzenzug) wird das Bewegungsverhalten (Frequenz und Amplitude) kontrolliert und die Kraft geregelt, d.h. die Bodenreaktionskraft wird konstant gehalten, währenddem die Bandagenbeschleunigung gemessen und die Frequenz und Amplitude dementsprechend angepasst werden (genaue Beschreibung siehe Kapitel 2.2.2.2). Es gibt vier vorgegebene Leistungsstufen bei denen jeweils die Kraftereinleitung konstant gehalten wird. Bei Leistungsstufe 1 ist die in den Boden eingeleitete Kraft am kleinsten, bei der Leistungsstufe 4 am grössten. Die nachfolgenden Versuchsreihen wurden alle in Leistungsstufe 2 durchgeführt.

Die wichtigsten Kennziffern der verwendeten Tandemwalze sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Hersteller	Ammann Verdichtung AG
Bezeichnung	AV 95 T
Statische Achslast	4750 kg
Bandagenbreite	1600 mm
Bandagendurchmesser	1200 mm
Zentrifugalkraft pro Bandage	7 – 52 kN
Theoretische Amplitude	4 Stufen: 0.62, 0.4, 0.3, 0.1 mm
Vibrationsfrequenz	25 – 50 Hz, stufenlos verstellbar

Tabelle 5-2: Kennziffern der Tandemwalze AV 95 T.

Abbildung 5-3 zeigt die Vergleichsmessungen auf Kiessand. Alle Versuchsreihen wurden mit einer Ammann Tandemwalze AV 95 T durchgeführt (Leistungsstufe 2).

Die Messungen zeigen deutlich, dass ein starker linearer Zusammenhang zwischen Erst- bzw. Zweitbelastungsmodul aus Plattendruckversuch und dem FDVK-Messwert k_B besteht. Dieser lineare Zusammenhang ist ausgeprägter für den Erstbelastungsmodul. Insbesondere für den Zweitbelastungsmodul nehmen die Abweichungen von der Regressionsgeraden mit wachsendem M_{E2} zu.

In Abbildung 5-4 sind die gleichen Messpunkte wie in Abbildung 5-3, diesmal aber nach Verhältniszahlen zwischen M_{E2} und M_{E1} , aufgezeichnet. Dabei fällt auf, dass die Messpunkte, die am stärksten von der Regressionsgeraden abweichen, jeweils auch grosse Verhältniszahlen aufweisen.

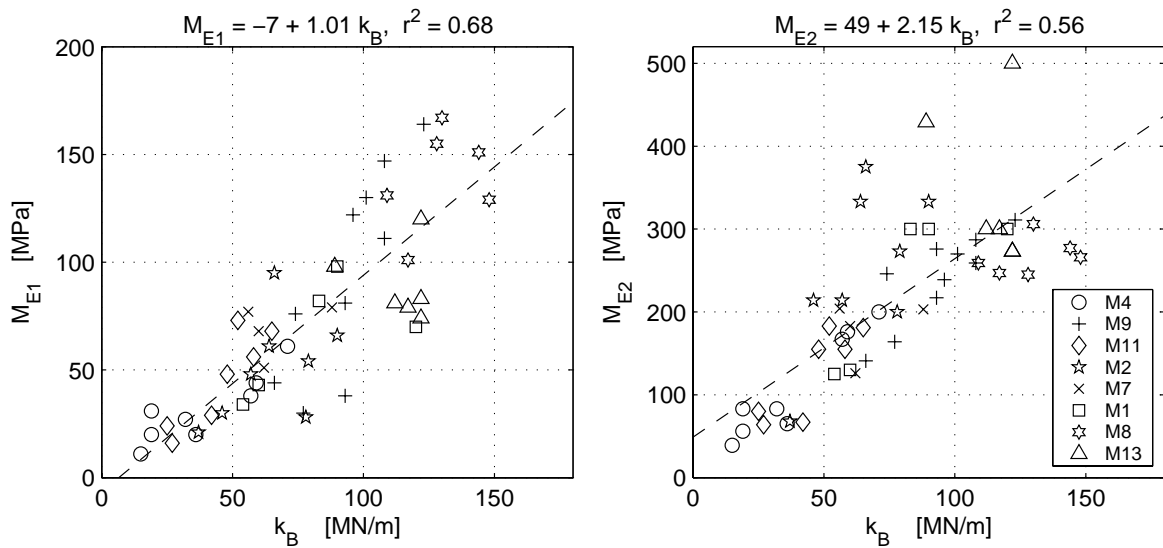


Abbildung 5-3: Resultate der Messungen mit der Tandemwalze AV 95 T auf Kiessand, nach Messserien aufgezeichnet.

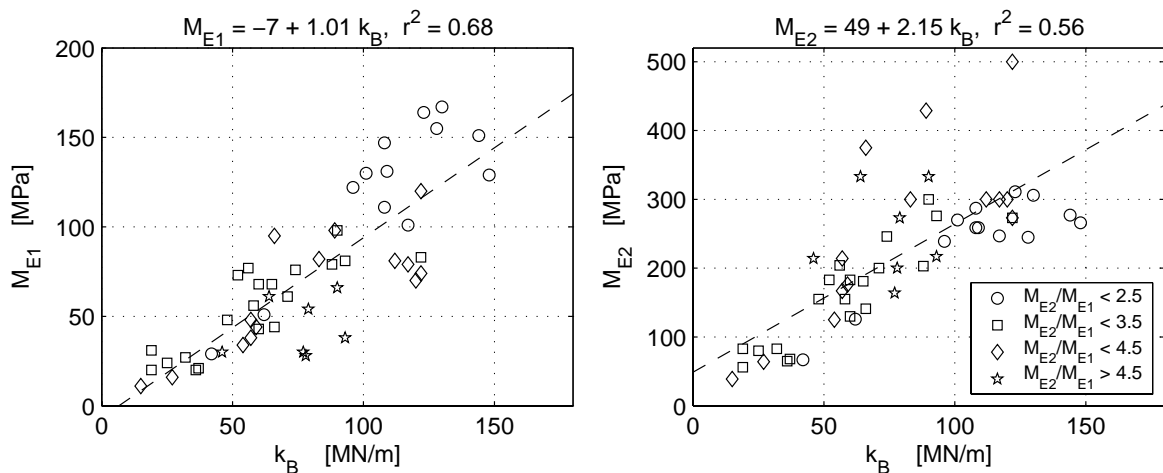


Abbildung 5-4: Resultate der Messungen mit der Tandemwalze AV 95 T auf Kiessand, nach Verhältniszahlen M_{E2}/M_{E1} aufgezeichnet.

Diese Beobachtung weist darauf hin, dass eine kleine Verhältniszahl Voraussetzung ist für eine gute Korrelation zwischen FDVK- und M_E -Wert ist. Eine vorgeschriebene Verhältniszahl von höchstens 2.5 wie in der deutschen Norm festgelegt scheint aber restriktiv zu sein, kann diese Bedingung doch lediglich bei einer kleinen Anzahl Plattendruckversuche eingehalten werden.

Bei Berücksichtigung aller Messwerte beträgt das Bestimmtheitsmass r^2 für die Korrelation mit Erst- resp. Zweitbelastungsmodul 0.68 resp. 0.56 (Abbildung 5-4). Dieses Mass steigt bei Nichtberücksichtigung der Messwerte mit Verhältniszahlen grösser als 4.5 (bzw. 3.5) auf 0.74 resp. 0.62 (bzw. 0.83 resp. 0.79), wie in Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 ersichtlich ist. Eine statistische Auswertung von Plattendruckversuchen in der Schweiz in Bezug auf die Verhältniszahlen M_{E2}/M_{E1} wurde in Caprez et al. (1994) durchgeführt.

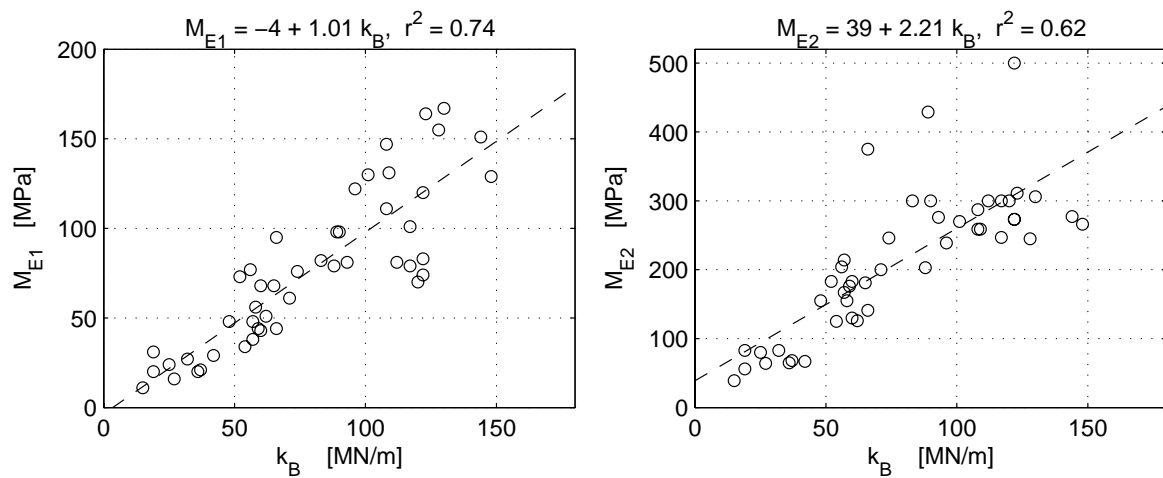


Abbildung 5-5: Resultate der Messungen mit der Tandemwalze AV 95 T auf Kiessand, Verhältniszahlen $M_{E2}/M_{E1} < 4.5$.

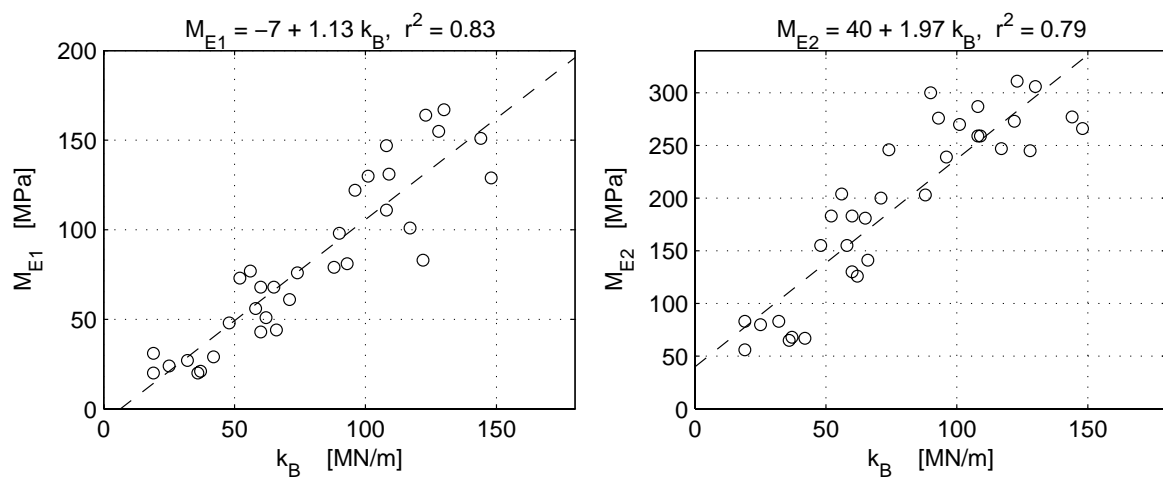


Abbildung 5-6: Resultate der Messungen mit der Tandemwalze AV 95 T auf Kiessand, Verhältniszahlen $M_{E2}/M_{E1} < 3.5$.

Die grossen Abweichungen von der Regressionsgeraden können in einzelnen Fällen auf die Bedingungen zurückgeführt werden, unter welchen die Messserien durchgeführt wurden. So hat bei der Serie M13 in Rheinfelden Regen die Resultate zum Teil verfälscht. An die Oberfläche ausgespresstes Wasser wies unter der dynamischen Last auf eine Verflüssigung des Bodens in Oberflächennähe hin. In vermindertem Ausmass spielte Regen auch bei den Messungen M4 und M11 eine Rolle.

5.3 Vergleichsmessungen mit einem Walzenzug

5.3.1 Dammbaustelle in Rheinfelden (M12)

Auf einer Dammbaustelle in Rheinfelden wurden im Zeitraum von Juli bis August 2002 an acht verschiedenen Tagen Vergleichsmessungen durchgeführt. Bei der untersuchten Schicht handelt es sich um eine kalkstabilisierte Dammschüttung einer Strassenbaustelle. Da auch die Wetterbedingungen an allen Tagen in etwa die gleichen waren (trockenes Wetter bei 20–25°C),

wurden alle Vergleichsmessungen zusammengefasst und als eine Versuchsreihe ausgewertet und dargestellt.

Das Bodenmaterial der Dammschüttung war sehr inhomogen. Es wurden zwei Siebkurven ermittelt. Die erste Siebkurve ergab einen tonigen kiesigen Silt mit Sand (CL), die zweite einen siltigen bis tonigen Kies mit Sand (GC-GM). Gemäss dem Bauunternehmer entspricht das eingebaute Material einem GC-GM. Dies scheint nach einer optischen Beurteilung auf der Baustelle grösstenteils zuzutreffen.

Bei den nachfolgenden Versuchsreihen mit einem Ammann Walzenzug AC 110-2 wurden direkt aufeinander folgend FDVK-Werte in den Leistungsstufen 1, 2 und 3 gemessen. Die wichtigsten Kennziffern können Tabelle 5-3 entnommen werden.

Hersteller	Ammann Verdichtung AG
Bezeichnung	AC 110-2
Statische Achslast	7165 kg
Bandagenbreite	2150 mm
Bandagendurchmesser	1500 mm
Theoretische Amplitude	0 - 1.8 mm
Vibrationsfrequenz	25 - 36 Hz

Tabelle 5-3: Kennziffern des Walzenzugs AC 110-2.

Die drei Leistungsstufen sind gekennzeichnet durch eine jeweils konstant gehaltene Bodenkontaktkraft. Diese wird erreicht, indem die Erregerkraft durch Verdrehen der Unwuchten geregelt wird. Ein separater Regelkreislauf analysiert den Oberwellengehalt der Bandagenbeschleunigung und regelt bei eintretendem Sprungbetrieb die Erregerkraft zurück.

Durch diesen Mechanismus ist gewährleistet, dass auf jedem Untergrund k_B -Werte gemessen werden können. Die Vergleichbarkeit der in verschiedenen Leistungsstufen gemessenen k_B -Werte wird aber dadurch eingeschränkt, dass bei grösserer Schwingungsamplitude die Tiefenwirkung der Messmethode zunimmt. Eine weitere Einschränkung ist auf die Nichtlinearität im Spannungs-Dehnungsverhalten zurückzuführen.

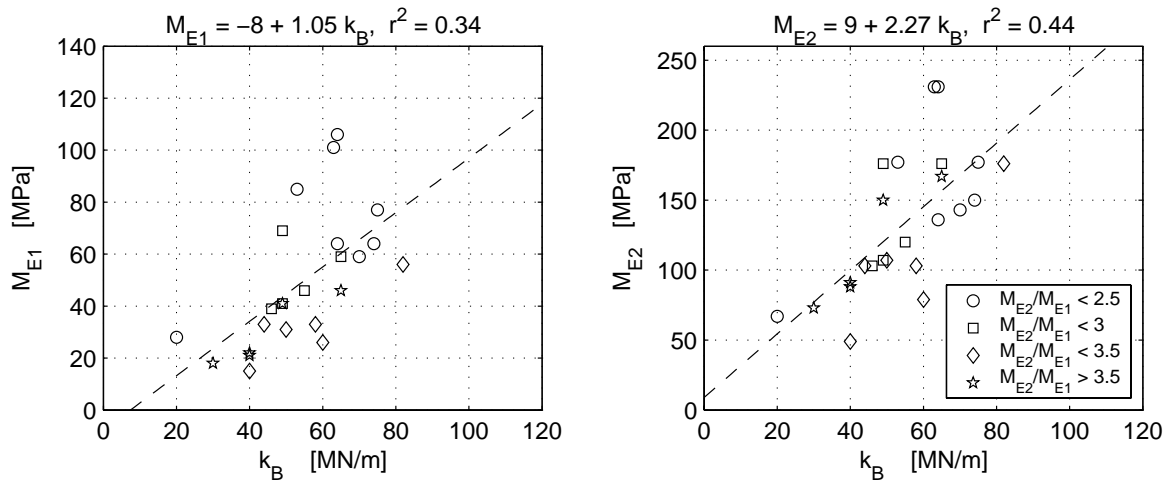


Abbildung 5-7: Resultate der Messungen mit dem Walzenzug AC 110-2 in Rheinfelden (M12), Leistungsstufe 3, nach Verhältniszahlen M_{E2}/M_{E1} aufgezeichnet

In Abbildung 5-7 sind Resultate von Messungen in Leistungsstufe 3 unter Ausschluss von Sprungbetrieb dargestellt. Die Messpunkte sind wiederum nach Verhältniszahlen M_{E2}/M_{E1} aufgetragen. Die Korrelation zwischen FDVK- und Plattendruckwerten ist aber ungenügend und lässt deshalb keine eindeutigen Schlüsse hinsichtlich einer linearen Abhängigkeit zu.

Abbildung 5-8 zeigt die FDVK-Messwerte bei drei aufeinander folgenden Überfahrten des Walzenzuges in verschiedenen Leistungsstufen. Die drei Messreihen beziehen sich auf Messungen an verschiedenen Tagen bei fortschreitender Dammschütthöhe. Trotz Messen in unterschiedlichen Leistungsstufen ist generell eine Zunahme der Verdichtung feststellbar.

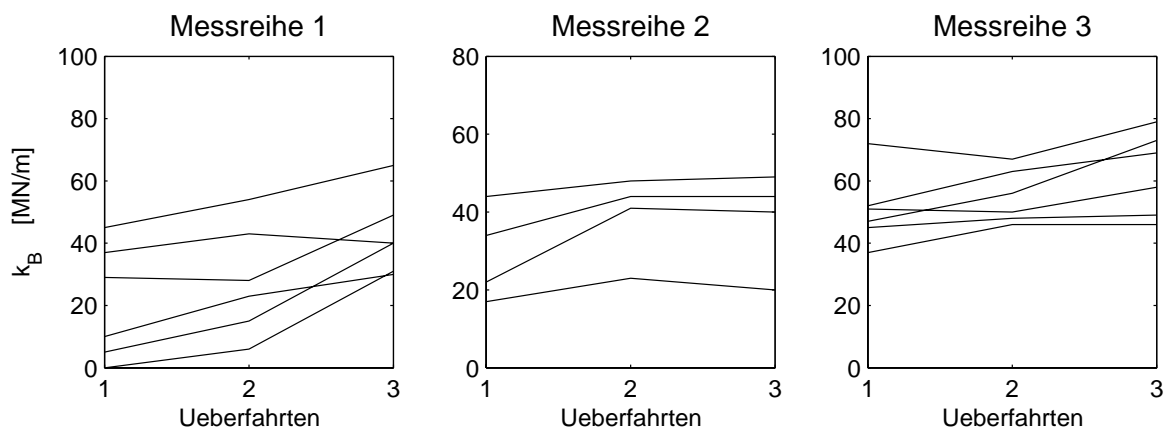


Abbildung 5-8: FDVK-Werte für die Punkte aus drei Messreihen. Überfahrt 1 wurde in Leistungsstufe 1 durchgeführt, Überfahrt 2 in Leistungsstufe 2 und Überfahrt 3 in Leistungsstufe 3

5.3.2 Versuchsfeld in Lyss (M14)

5.3.2.1 Versuchsdurchführung

In der Kiesgrube CreaBeton AG in Lyss wurde eine Versuchsreihe in Anlehnung an die deutsche FDVK-Norm durchgeführt. Als Testfeld wurde dabei eine Schicht von ca. 30 cm Dicke mit vor Ort abgebautem Kiessand geschüttet. Auf zwei nebeneinander liegenden Spuren mit einer Länge von etwa je 15 Metern wurden in der Folge mit zwei Walzenzügen unterschiedlicher Hersteller je 3 Serien FDVK-Messungen durchgeführt. Die Kennwerte der verwendeten Walzen sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

	Ammann AC 110-2	Bomag BW 213 DH-3
Messsystem	ACE mit k_B -Messung	BTM-E mit E_{Vib} -Messung
Bandagenbreite	2150 mm	2130 mm
Bandagendurchmesser	1500 mm	1500 mm
Masse	12030 kg	14606 kg
Achslast Bandage	7165 kg	9070 kg

Tabelle 5-4: Kennwerte der Walzen.

Die Serien bestanden aus je 3 FDVK-Messungen an Punkten eines vor den Versuchen festgelegten willkürlichen Rasters. An diesen Punkten wurde anschliessend je ein Plattendruckversuch zur Ermittlung von M_{E1} , M_{E2} , E_{V1} und E_{V2} durchgeführt. Die erste Messserie wurde auf der unverdichteten Schicht vollzogen, die zweite nach einer Vor- und einer Rückwärtsfahrt mit den Walzenzügen und die letzte im Zustand, in dem mittels FDVK keine weitere Verdichtung mehr messbar war (Endverdichtung).

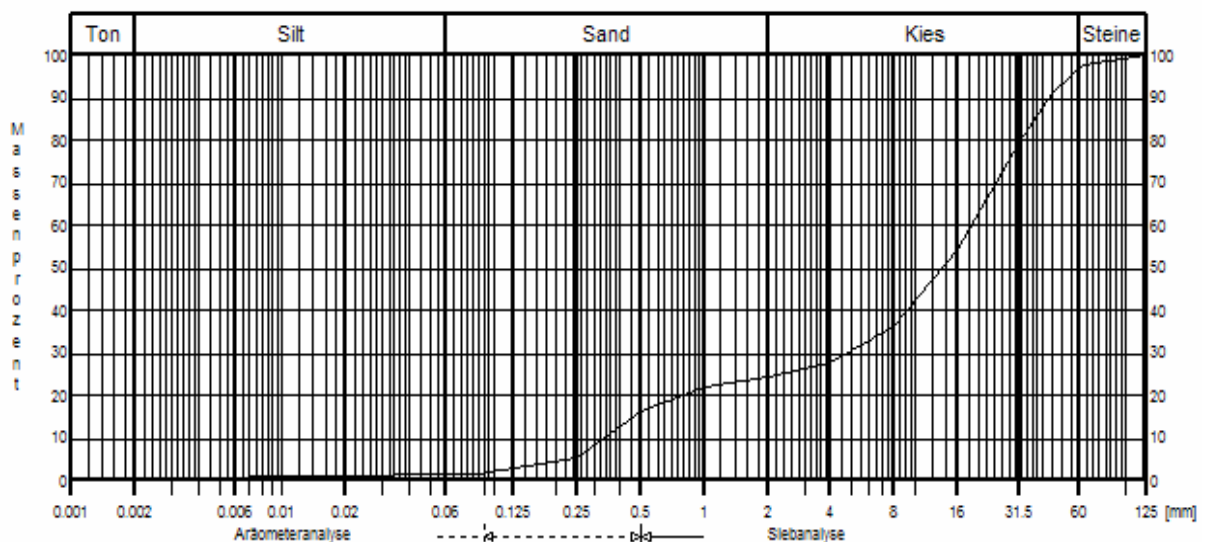


Abbildung 5-9: Korngrößenverteilungskurve des Schüttmaterials.

Das verwendete Material war ein gut abgestufter Kies (GW) mit sehr geringem Feinanteil ($2\% < 0.06\text{mm}$) und einem Grösstkorn von 130 mm, wie in Abbildung 5-9 zu sehen ist. Der Einbauwassergehalt betrug 2%.

5.3.2.2 Resultate

Tabelle 5-5 zeigt die Messresultate der drei Messreihen. Punkte 1 – 6 beziehen sich auf den Zustand zu Beginn der Verdichtung, Punkte 7 – 12 auf die mittlere Verdichtung und Punkte 13 – 18 zeigen den fertig verdichteten Zustand.

	Punkt Nr.	M_{E1}	M_{E2}	E_{V1}	E_{V2}	E_{vib}	k_B
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MN/m]
Spur Bomag	1	28	191	23	145	121	
	2	57		45		100	
	3	26	177	21	137	91	
	7	34	213	28	174	119	
	8	36	346	30	247	135	
	9	42	484	35	311	128	
	13	43	266	36	242	127	
	14	60	328	46	236	146	
	15	49	328	40	235	138	
Spur Ammann	4	28	162	21	133		58
	5	22	299	17	182		53
	6	26	214	20	146		50
	10	62	239	49	191		56
	11	46	247	35	175		56
	12	34	372	28	196		65
	16	59	269	48	214		70
	17	52	534	42	431		73
	18	57	226	45	184		67

Tabelle 5-5: Plattendruck- und FDVK-Messwerte.

5.3.2.3 Auswertung

In der Folge sind die FDVK-Messwerte in Funktion der Erst- und Zweitbelastungsmoduli aufgetragen (Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11).

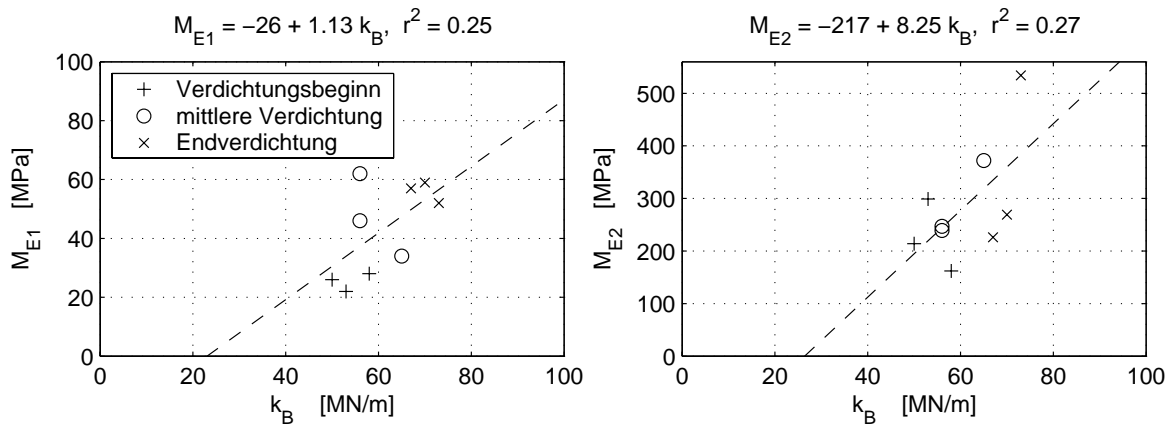


Abbildung 5-10: Messwerte Ammann AC 110-2.

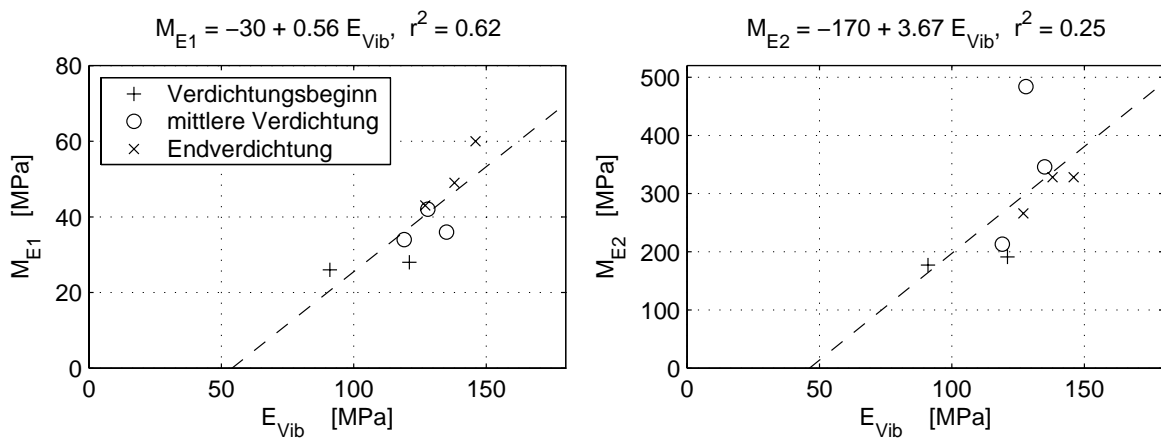


Abbildung 5-11: Messwerte Bomag BW 213 DH-3.

Es lässt sich feststellen, dass sowohl die FDVK-Werte als auch die Verformungsmoduli keine eindeutige Unterscheidung der unterschiedlich verdichteten Messfelder zulassen. Eine lineare Korrelation zwischen den Messwerten kann nicht eindeutig ausgewiesen werden. Dennoch ist aber tendenziell eine Verdichtungszunahme sichtbar. Dazu ist zu bemerken, dass das Material nach der zweiten Messserie schon sehr kompakt war und deshalb für die dritte Messserie keine grosse Zunahme der Verdichtung mehr möglich war.

Die jeweils drei auf einem Feld gemessenen statischen Verformungsmoduli (M_E) weisen zum Teil erhebliche Streuungen auf, die in Einzelfällen bis zu 50 % des Mittelwertes betragen. Dies ist erstaunlich, da aufgrund der Rahmenbedingungen eine sehr homogen verdichtete Schicht zu erwarten ist. Eine mögliche Ursache können grössere Steine in Oberflächennähe sein, die an einzelnen Stellen für eine hohe Steifigkeit sorgen. Bei der Probenentnahme wurden Steine mit Durchmessern bis zu 130 mm angetroffen.

Die Verhältniswerte zwischen Erst- und Wiederbelastungsmodul sind mit 4 bis nahezu 11 für die fertig verdichtete Schicht sehr gross. Um diesen Umstand zu erklären, gibt es mehrere Anhaltspunkte. Der sehr geringe Feinanteil ermöglicht eine stärkere Kornumlagerung und damit eine bleibende Verformung nach der Erstbelastung. Auch weist die Korngrößenverteilung eine hohe Ungleichförmigkeitszahl d_{60}/d_{10} von 56 auf, was im Allgemeinen eine erhöhte Verdichtungsenergie notwendig macht.

D'Appolonia (1969) beschreibt die Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Sand. Durch die Vibrationswalze werden die Bodenkörner in Schwingung versetzt. Durch die wiederholte Abnahme der Vertikalspannungen gefolgt von einem Verdichtungsstoss können sich die Körner neu ausrichten und füllen allfällige Hohlräume aus. Im obersten Bereich der Schicht nehmen die Vertikalspannungen so stark ab, dass die Körner abheben und damit keine bleibende Verdichtung zustande kommt. Eine Auflockerung ist die Folge. Diese ist umso stärker, je grösser die Amplitude der von der Bandage auf den Boden übertragenen Schwingung ist. Diese Auflockerung des oberen Bereichs der Schicht liefert eine weitere Erklärung für die in den vorliegenden Messreihen sehr hohen Verhältniswerte zwischen Erst- und Wiederbelastungsmodul.

Abbildung 5-12 zeigt die plastischen Verformungen durch den Plattendruckversuch am Ende der ersten Entlastung. Gegen Ende der Verdichtung sind letztere auf der von Bomag bearbeiteten Spur tendenziell grösser als auf der Spur von Ammann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Walze von Bomag mit einer grösseren Amplitude verdichtete als jene von Ammann, deren automatische Regelung dies verhindert. Dieser Umstand unterstreicht die Notwendigkeit eines Regelmechanismus, der auch während der Messfahrt die Maschinenparameter an die aktuelle Bodensteifigkeit anpasst.

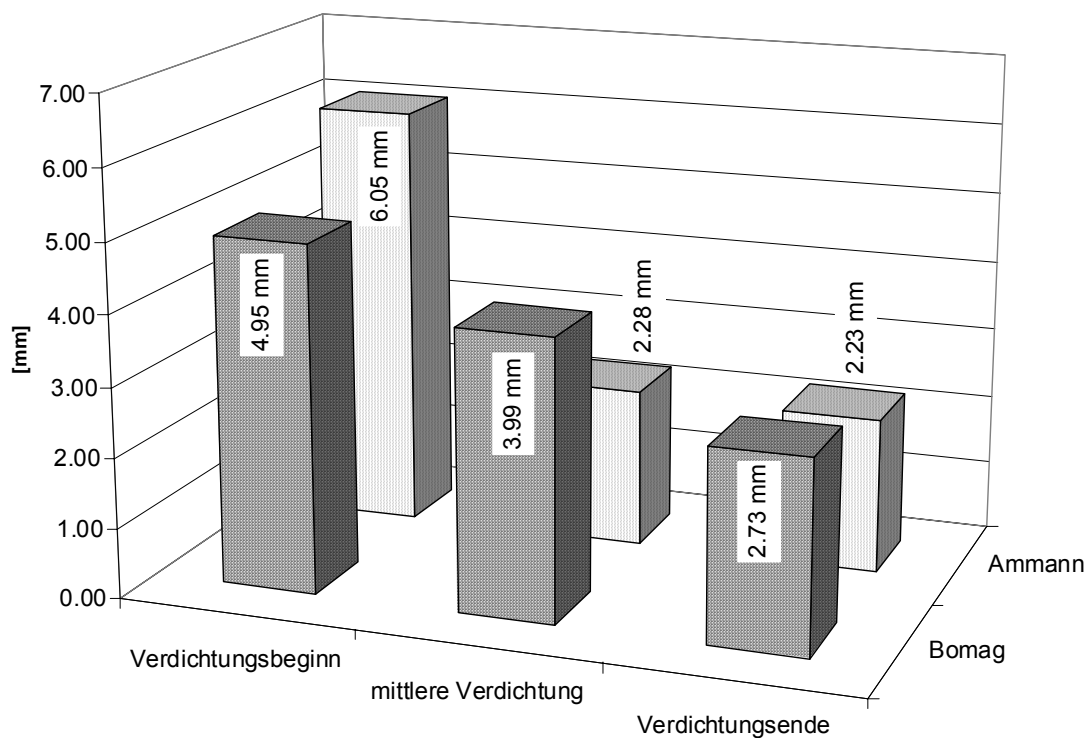


Abbildung 5-12: Plastische Verformungen am Ende der Entlastung (gemittelt über jeweils 3 Punkte einer Spur).

Die grosse Amplitude, mit der die Bomag-Walze arbeitete, verursachte eine sichtbare Kornzertrümmerung an der Oberfläche der entsprechenden Spur (Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14). Dies ist ein Hinweis, dass sehr grosse Bodenkontaktkräfte vorhanden waren, die eventuell die Walze in einen unkontrollierten Sprungzustand versetzten.

Eine grosse Amplitude bewirkt erfahrungsgemäss eine bessere Verdichtung in grösserer Tiefe, währenddem in Oberflächennähe besonders bei kohäsionslosen Materialien eine Auflockerung festzustellen ist. Dies wird aber bei der Verdichtung der nächsten Schicht wieder kompensiert. Die Qualität der Verdichtung wird somit durch eine grössere Amplitude nicht zwingend beeinträchtigt. Für die Verdichtungskontrolle ist es aber von Vorteil, eine Amplitude aufzubringen, die weder starke Auflockerung, noch Kornzertrümmerung, noch Springen der Bandage verursacht.



Abbildung 5-13: Oberfläche nach Ende der Verdichtung Spur Bomag.



Abbildung 5-14: Oberfläche nach Ende der Verdichtung Spur Ammann.

5.3.3 Messungen am Kohlendreieck beim Güterbahnhof in Zürich (M10)



Abbildung 5-15: Messungen am Kohlendreieck in Zürich. Im Einsatz waren je ein Walzenzug und eine Tandemwalze der Firmen Ammann und Bomag (im Hintergrund des Bildes zu sehen).

Am so genannten „Kohlendreieck“ auf der Höhe des Güterbahnhofes beim Hauptbahnhof Zürich werden zwecks Kapazitätserweiterung der Bahn umfangreiche Bauarbeiten getätigt. Auf einem Bahntrasse wurden im August 2002 Vergleichsmessungen durchgeführt (Abbildung 5-16). Dabei waren vier dynamisch angeregte Walzen mit FDVK im Einsatz. Die Firma Ammann sowie die Firma Bomag stellten je einen Walzenzug und eine Tandemwalze zur Verfügung. An 9 von 20 Messpunkten wurden statische Plattendruckversuche durchgeführt. Im Weiteren wurden mit dem Fallgewichtsgerät dynamische Plattendruckversuche gemacht. Bei der untersuchten Schicht handelt es sich um die Planie einer Fundationsschicht aus Kiessand I (GP) mit einer Dicke von min. 25 cm. Die Fundationsschicht wurde auf dem gewachsenen Terrain geschüttet. Die Planie wurde vorgängig von der Bauunternehmung verdichtet und mit Plattendruckversuchen geprüft. Das heisst, die Vergleichsmessungen (FDVK und statische Plattendruckversuche) wurden auf einer fertig verdichteten Planie durchgeführt.

Da nicht nach jeder Überfahrt mit einer Walze ein statischer Plattendruckversuch durchgeführt werden konnte, können lediglich relative Aussagen in Bezug auf die Zunahme der Verdichtung, die Funktionsweise der Walzen und die Qualität der FDVK-Messwerte gemacht werden. Abbildung 5-16 zeigt die Messungen in der Übersicht. Messungen 1 und 2 wurden jeweils in Automatikbetrieb durchgeführt, bei Messung 3 kam Handbetrieb zum Einsatz. Mit den Tandemwalzen wurde nach den Messungen mit den Walzenzügen noch eine vierte Messung gemacht.

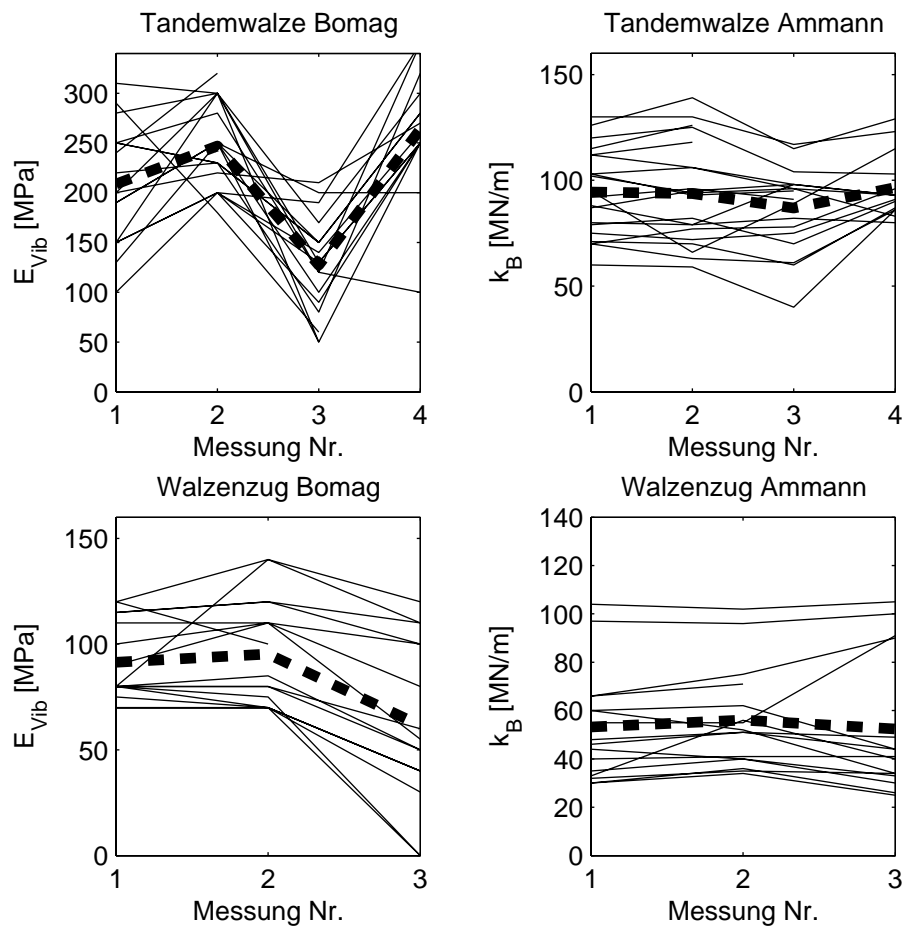


Abbildung 5-16: Verlauf der FDVK-Messwerte während des Versuchsablaufs, die Messungen der einzelnen Punkte sind jeweils durch Linien verbunden. Die gestrichelte Linie entspricht dem jeweiligen Mittelwert.

Folgende Anhaltspunkte können den Messserien entnommen werden:

- Zunahme der Messwerte während des Versuchsablaufs

Tendenziell ist ein leichter Anstieg der FDVK-Messwerte festzustellen. Dieser Anstieg ist ausgeprägter bei den Maschinen von Bomag. Da der Untergrund zu Beginn der Versuchsreihe schon gut verdichtet war, ist die Verdichtungszunahme aber erwartungsgemäss klein.

Die Messwerte der vierten Serie mit den Tandemwalzen sind nicht kleiner als jene der zweiten Serie. Eine Auflockerung des Untergrundes durch die Überfahrt der schwereren Walzenzüge fand somit nicht oder nur in unbedeutendem Mass statt.

- Abhängigkeit der Messwerte von den Maschineneinstellungen

Die dritte Messung wurde jeweils im Handbetrieb durchgeführt. Die dabei aufgebrachte, effektive Schwingungsamplitude der Bandage war bei allen Geräten, besonders deutlich aber bei den Maschinen von Bomag, grösser als im Automatikbetrieb. Die kleineren FDVK-Messwerte aus der dritten Messung zeigen, dass beide Messsysteme nicht bloss von den Bodenkennwerten abhängig sind, sondern auch, zumindest in kleinem Mass, von Maschinenparametern.

- Entdecken von Schwachstellen

FDVK-Methoden können angewandt werden, um während der Verdichtungsarbeit Schwachstellen im Untergrund zu lokalisieren und dann gezielt Massnahmen zu deren Behebung zu treffen.

Nach Abschluss der Messreihen im Kohlendreieck (M10) wurden an 9 Punkten statische Plattendruckversuche durchgeführt, um die Erst- und Zweitbelastungsmoduli M_{E1} und M_{E2} zu messen. In Abbildung 5-17 sind zusätzlich zu den Resultaten der statischen Plattendruckversuche auch jene der dynamischen dargestellt, die zu Beginn der Messreihen vorgenommen wurden. Eine Schwachstelle kann etwa zwischen 40 und 50 Metern ausgemacht werden (P2), während zwischen 20 und 30 Metern (P1) sowie im Bereich von 80 Metern (P3) zwei Stellen mit grösserer Steifigkeit sichtbar sind.

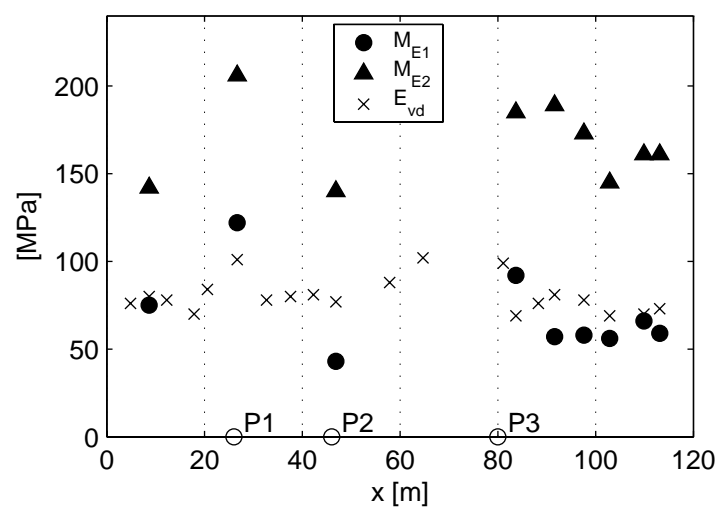


Abbildung 5-17: Bodensteifigkeitswerte aus statischem (M_{E1} und M_{E2}) und dynamischem Plattendruckversuch (E_{vd}). Die dynamischen Plattendruckversuche wurden zu Beginn der Versuchsreihen durchgeführt, die statischen am Ende.

In Abbildung 5-18 sind die FDVK-Messwerte der Walzenüberfahrten gezeigt. Während alle Walzen mit Ausnahme der Tandemwalze von Bomag bei P3 deutlich eine Stelle erhöhter Steifigkeit anzeigen, ist das Bild in Bezug auf P1 und P2 weniger deutlich. Bei P2 zeigen zwar alle Walzen wiederum mit Ausnahme der Tandemwalze von Bomag eine Schwachstelle an, diese ist aber weniger ausgeprägt als in Abbildung 5-17 und zudem nicht die absolut schwächste Stelle. Allgemein scheint, als reflektieren die schwereren Walzenzüge besser die mittels des statischen Plattendruckversuchs gemessenen Werte.

Interessant ist die Messung der Tandemwalze von Ammann nach Überfahrt der Walzenzüge (gestrichelte Linie in Abbildung 5-18). Sie zeigt qualitativ das gleiche Bild wie die Walzenzüge. Dies würde bedeuten, dass bei den Überfahrten der Walzenzüge eine gewisse Homogenisierung der Unterlage stattfand. Eine anfängliche Schwachstelle zwischen 0 und 20 Metern, die auch in den E_{vd}-Werten in Abbildung 5-17 sichtbar ist, konnte verbessert werden, während schon gut verdichtete Stellen unverändert blieben oder sich leicht auflockerten.

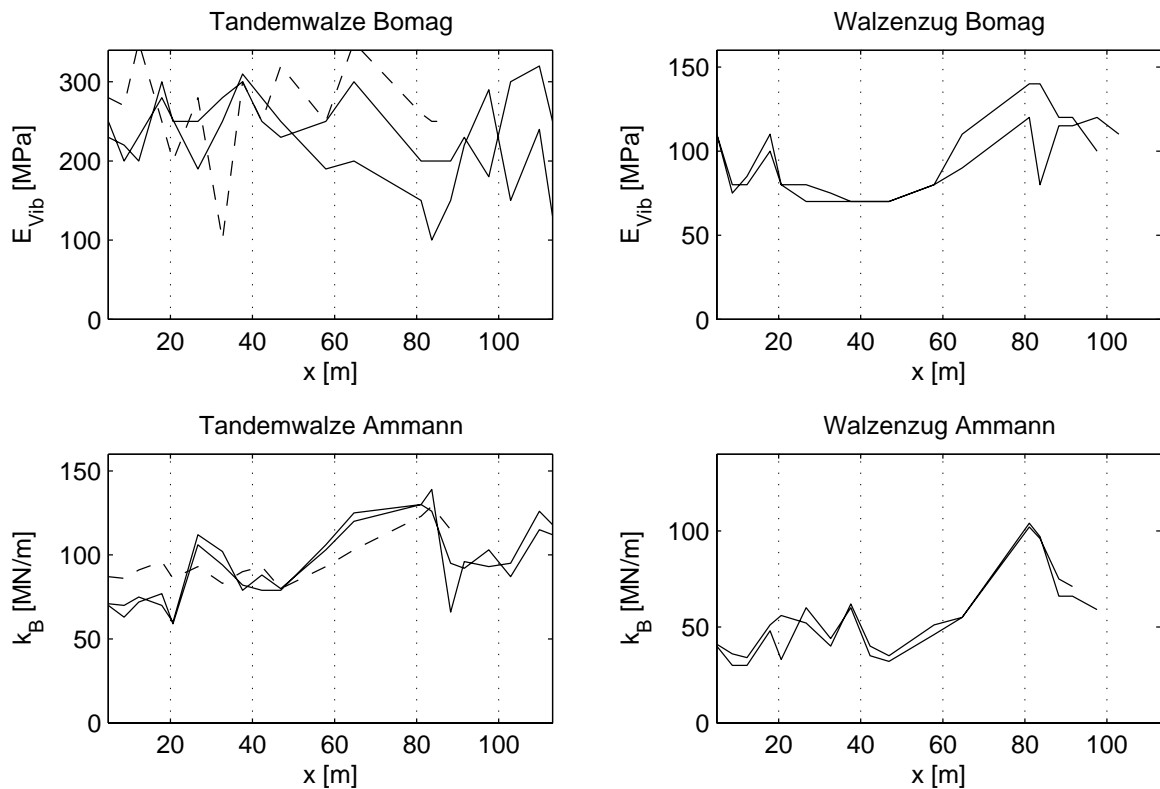


Abbildung 5-18: FDVK-Messwerte der Messserien M10 in Automatikbetrieb. Die gestrichelte Linie zeigt die Messwerte der Tandemwalzen nach den Überfahrten der Walzenzüge.

5.4 Zusammenfassung

Aus den vorliegenden Messresultaten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Für gut verdichtbaren Kiessand besteht ein konstanter linearer Zusammenhang zwischen der von der Tandemwalze Ammann AV 95 T bei konstanter Bodenkontaktkraft gemessenen Bodensteifigkeit k_B und dem Erst- sowie dem Zweitbelastungsmodul (M_{E1} und M_{E2}), bestimmt durch den statischen Plattendruckversuch. Als gut verdichtbarer Kiessand gilt ein ungesättigtes Material der USCS-Klassen GW und GP mit einem Grösstkorn von < 60 mm, auf dem in endverdichtetem Zustand Verhältniszahlen M_{E2}/M_{E1} von kleiner als 3,5 gemessen werden.
- Dieser lineare Zusammenhang kann annäherungsweise durch die Ursprungsgeraden $M_{E1} = k_B$ und $M_{E2} = 2 k_B$ beschrieben werden. Dies gilt für Messungen mit der Tandemwalze Ammann AV 95 T, die in Leistungsstufe 2 durchgeführt werden.
- Die vorliegenden Messresultate reichen nicht aus, um für feinkörnige Materialien ähnliche Aussagen zu treffen. Die Messungen auf siltigen Unterlagen weisen darauf hin, dass nicht die gleichen linearen Zusammenhänge wie für Kiessande gelten.
- Die Messsysteme von Bomag und von Ammann liefern keine von Maschinenparametern unabhängigen Bodenkennwerte. Insbesondere die effektive Schwingungsamplitude der Bandage hat einen erheblichen Einfluss auf die Messwerte.

6 Schlussfolgerung und Empfehlung

6.1 Bestehende FDVK-Normen

Seitdem die ersten walzenintegrierten Messsysteme auf den Markt erhältlich sind, werden sie im Baustellenbetrieb eingesetzt. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass in einigen europäischen Ländern Richtlinien, Prüfvorschriften oder Normen erarbeitet worden sind, in denen Anwendung und Durchführung der FDVK festgelegt und Anforderungen an die Walzen und Messsysteme gestellt sind.

Diese Normen bauen alle auf den gleichen Grundprinzipien auf und unterscheiden sich lediglich in wenigen Punkten. Gemeinsam ist den drei Werken, dass auf einem Kalibrierfeld bei unterschiedlichen Verdichtungszuständen eine Anzahl Messungen mit dem FDVK-Gerät sowie mit dem Vergleichsgerät durchgeführt werden. Die Resultate werden in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen und es wird eine lineare Regression durchgeführt, dessen zugehöriges Bestimmtheitsmass r^2 berechnet wird. Erfüllt das Bestimmtheitsmass die Normkriterien, dann wird der dem konventionellen Verdichtungsanforderungswert entsprechende, zu erreichende FDVK-Wert bestimmt. Einige Details sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

	Deutschland	Schweden	Österreich
Norm	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, ZTVE—StB 94, TP BF-StB Teil E 2	Vägverket, VVMB 603	Österreichische Forschungsgemeinschaft Strasse und Verkehr, RVS 85.02.06
Kalibrierfeld	3 Teilfelder à 20 m, 3 verschiedene Verdichtungsgrade	3 Teilfelder à 20 m, 3 verschiedene Verdichtungsgrade	1 Feld à 100 m
Auswahl der Messpunkte	Nach vorgängig festgelegtem Raster. Bedingung: Messwertunterschied zu Nachbarflächeneinheit < 10%	Nach vorgängig festgelegtem Raster. Bedingung: Messwertunterschied zu Nachbarflächeneinheit < 10%	Nach niedrigen, mittleren und hohen FDVK-Werten
Schwingfrequenz	konstant	konstant	konstant
Kalibrierung mit:	Plattendruckversuch EV2, Verdichtungsgrad Dpr	Plattendruckversuch EV2, Verdichtungsgrad Dpr	Plattendruckversuch EV1
Prinzip	Lineare Regression durch alle Messpunkte	Lineare Regression durch alle Messpunkte	Lineare Regression durch alle Messpunkte
Anforderung	$r^2 > 0.49$	$r^2 > 0.36$	$r^2 > 0.49$

Tabelle 6-1: Übersicht über bestehende FDVK-Normen in anderen Ländern.

6.2 *Notwendigkeit einer Anpassung bestehender Normen*

Bei der Ausarbeitung einer Schweizer FDVK-Norm sprechen zwei Argumente dafür, nicht die in anderen Ländern bestehenden Normen zu übernehmen, sondern einen neuen Ansatzpunkt zu wählen.

6.2.1 *Neuentwicklungen in der Verdichtungstechnik*

Eine Neuentwicklung in der Regelungstechnik von Vibrationswalzen passt sowohl Erregerkraft, als auch Erregerfrequenz den jeweiligen Bodenverhältnissen an, um eine optimale Verdichtungswirkung im leicht überresonanten Bereich zu erzielen. Da aber in allen gültigen FDVK-Normen in anderen Ländern die überwachte Konstanz der Frequenz vorgeschrieben ist, kann diese neue Technik bisher mit den bestehenden Normansätzen nur beschränkt eingesetzt werden.

Die in Kapitel 5 vorliegenden Messergebnisse einer Ammann Tandemwalze mit geregelter Frequenz auf Kiessand haben gezeigt, dass diese Einschränkung unnötig ist. Sie kann ohne Nachteile auf das Ergebnis fallen gelassen werden, falls sichergestellt ist, dass gewisse Anforderungen an das zu verdichtende Material erfüllt sind.

6.2.2 *Grosser Aufwand für das Bestimmen der Kalibrierfunktion*

Das Ziel beim Bestimmen einer Kalibrierfunktion ist es, einen Zusammenhang zwischen dem FDVK-Messwert und dem Messwert des statischen Plattendruckversuches (M_E bzw. E_V) zu finden, der es erlaubt, für einen bestimmten FDVK-Messwert direkt den entsprechenden M_E -Wert abzuleiten.

Um diese Kalibrierfunktion, von der angenommen wird, dass sie einer Geraden entspricht, zu bestimmen, mussten bisher drei Felder unterschiedlicher Dichte untersucht werden. Auf dem ersten Teilfeld wird die Messung bei der ersten Überfahrt vorgenommen, auf dem zweiten Teilfeld nach ca. 2 Überfahrten mit dem Verdichtungsgerät und auf dem dritten Teilfeld nach Abschluss der Verdichtung, das heisst, nach so vielen Verdichtungsübergängen, bis keine Zunahme der Verdichtung mehr feststellbar ist.

Es stellt sich dabei aber die Frage, ob es notwendig und überhaupt sinnvoll ist, vor dem Ende der Verdichtung Plattendruckversuche durchzuführen wie dies bei den Deutschen und Schwedischen Normen verlangt wird. Die dabei erhaltenen Verformungsmoduli und FDVK-Werte liegen oft in einem Bereich, der für das Erkennen des Endzustandes uninteressant ist. Zudem ist die Reproduzierbarkeit der Messungen nicht gewährleistet, da die Walze den Untergrund während der Überfahrt kontinuierlich verändert. Auch ist nicht geklärt, ob die dabei gemessenen Werte den Verdichtungszustand richtig beschreiben. Beim Messvorgang mit Plattendruckgerät und mit Vibrationswalze treten oft erhebliche plastische Verformungen auf, die nach den gültigen Vorschriften zur Durchführung des Plattendruckversuches nicht zulässig sind.

Bei mindestens drei Messpunkten pro Feld sind im günstigsten Fall neun Plattendruckversuche notwendig. Gerade für kleinere Baustellen sowie für Baustellen mit stark variabler Untergrundbeschaffenheit ist der Gewinn bei Anwendung der FDVK in Form einer Reduktion der Anzahl Plattendruckversuche gering.

6.3 *Mögliche alternative Vorgehensweise*

Aus den theoretischen Überlegungen in Kapitel 4 sowie aus den Messergebnissen in Kapitel 5 lässt sich schliessen, dass für gut verdichtbare Materialien ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen dem statischen Verformungsmodul und der nach Abschnitt 2.2.1.4 berechneten Bodensteifigkeit besteht. Aufgrund dieser Erkenntnis könnte die Vorgehensweise zur Bestimmung der Kalibrierfunktion wie folgt aussehen:

- Die Bodenart auf dem Kalibrierfeld wird klassiert. Diese Klassierung kann sich auf eine Feldklassifikation oder eine Einteilung der Böden gemäss ihren bautechnischen Eigenschaften beschränken.
- Bei Zweifel über die Homogenität des Kalibrierfeldes wird mittels Ausgraben eines ca. 60 cm tiefen Loches die Gleichmässigkeit geprüft.
- Der Wassergehalt wird, wie in den entsprechenden Schweizer Normen vorgeschrieben, beim optimalen Verdichtungswassergehalt mit einer gewissen Toleranz eingestellt.
- Das Kalibrierfeld wird verdichtet, bis keine wesentliche Zunahme der FDVK-Werte mehr feststellbar ist.
- Bei einer Anzahl Punkte (mindestens 3), die nach vorgegebenem Raster festgelegt und markiert wurden, werden FDVK-Werte sowie statische Verformungsmoduli gemessen.
- Es werden nur die Punkte verwendet, bei denen das Verhältnis zwischen Zweit- und Erstbelastungsmodul einen bestimmten Wert nicht übersteigt (z.B. 3,5). Falls der Prozentsatz der Punkte, die dieses Qualitätskriterium nicht erfüllen, zu gross ist, ist keine zuverlässige Kalibrierung möglich.
- Falls die Abweichung der Extremwerte ein gewisses Mass ($\pm X\%$) nicht überschreitet, werden die Messdaten in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen (Abbildung 6-1).
- Eine Regressionsgerade, die durch den Ursprung führt, wird nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Diese Gerade kann durch ihre Steigung eindeutig beschrieben werden.
- Der dem erforderlichen statischen Verformungsmodul entsprechende FDVK-Wert kann ermittelt und für entsprechende Qualitätskontrollen verwendet werden.

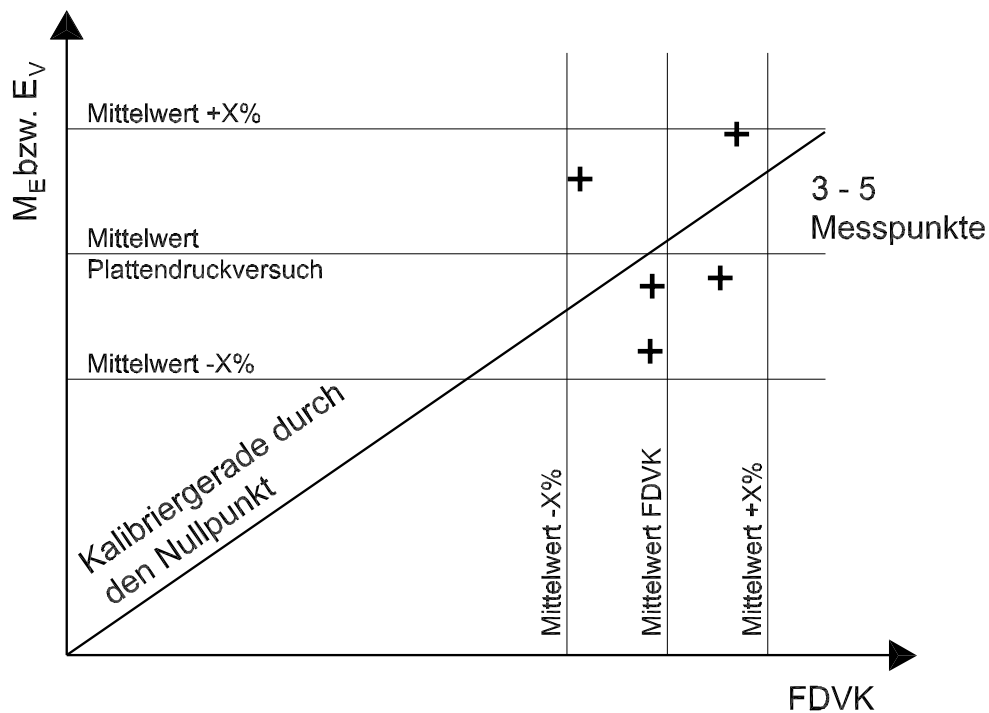


Abbildung 6-1: Kalibrierung

6.4 Ausblick

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse für verschiedene Kiessande ist es denkbar, dass für ein gegebenes Messprinzip eine Unterteilung in Bodenklassen gefunden werden kann, für die jeweils die gleiche Beziehung zwischen FDVK-Messwert und Verformungsmodul aus statischem Plattendruckversuch bestehen. Als Unterteilung bieten sich die USCS-Klassen an. Dies bedingt allerdings die Verfügbarkeit einer grossen Menge experimenteller Daten, die neben den FDVK-Messwerten und den statischen Verformungsmoduli auch genaue Angaben über das Material (z. B. Korngrößenverteilung, Grösstkorn, Feinanteil, Plastizität, Kornform, Gesteinsart, vorhandene Bindemittel, Wassergehalt) und über den Schichtaufbau beinhalten. Es wäre somit ein Normansatz vorstellbar, der lediglich mit einer Probenentnahme und ohne eine vorgängige Kalibrierung der Messwalze auskommt.

6.5 **Empfehlung für Schweizer Norm**

Die Schweizer Normen *Verdichtung Anforderungen* (SN 640 585a) und *Verdichtung Kontrollmethoden* (SNV 640 586) legen die für die Verdichtung zu erreichenden Werte fest und beschreiben die Kontrollmethode zur Überprüfung der Verdichtung des Untergrundes, des Unterbaues und der ungebundenen Materialien des Oberbaues.

Die Norm *Verdichtung Kontrollmethoden* (SNV 640 586) sollte mit den folgenden Kapiteln ergänzt werden:

In Kapitel 3 dieser Norm (Methoden zur Kontrolle der Verdichtung und der Tragfähigkeit) sollte die FDVK als Kontrollmethode zusätzlich zu den beschriebenen Methoden aufgeführt werden. Textvorschlag: Die Kontrolle der Verdichtung und der Tragfähigkeit sowie der Homogenität dieser Bodeneigenschaften kann mittels der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) geprüft werden.

Das Kapitel 4 dieser Norm (Einfluss des Wassergehaltes der Materialien) soll neben den Methoden CBR und Plattendruckversuch zur Bestimmung der Tragfähigkeit auch Bezug auf die FDVK nehmen.

In Kapitel 5 (Methoden zur Kontrolle der Homogenität) soll die FDVK auch als Methode zur Kontrolle der Gleichmässigkeit aufgeführt werden. Dabei soll darauf hingewiesen werden, dass die FDVK eine lückenlose Qualitätskontrolle erlaubt. Entsprechende Anforderungen an die Dokumentation der Resultate sollten auch gefordert werden.

Die Norm *Verdichtung Anforderungen* (SN 640 585a) sollte mit den folgenden Kapiteln ergänzt werden:

In Kapitel 3 (Anzahl der Kontrollversuche) soll darauf hingewiesen werden, dass die FDVK grosse Vorteile gegenüber den punktuellen Kontrollen aufweist. Durch die Vorschrift entsprechend guter Kalibrierresultate bei der FDVK kann der Mess- und Kontrollaufwand bei der Verdichtung und der Tragfähigkeit erheblich reduziert werden.

Die Kapitel 4 (Toleranzen) und 5 (Homogenität eines Teilstückes) sind entsprechend der Resultate in Kapitel 5 dieses Berichtes und der Charakteristik der FDVK-Geräte anzupassen.

Bis zum allfälligen Erscheinen einer separaten „FDVK-Norm“ in der Schweiz, sollten in der Norm *Verdichtung Kontrollmethoden* (SNV 640 586) die Anforderungen an die Qualität der FDVK-Geräte festgeschrieben werden. Für das Kalibrieren der Geräte kann ein Vorgehen wie es in Kapitel 6.3 dieses Berichtes beschrieben ist, angewandt werden.

7 *Literaturverzeichnis*

7.1 *Forschungsarbeiten*

Anderegg R, Studer JA. Geregelte Verdichtung und Verdichtungsmessungen mit Vibrationswalzen auf geschichteten Böden.

Adam D. Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen. *Dissertation, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Strassenforschung Heft 506*, TU Wien, Wien, 2000.

Adam D. Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Bodendynamik. *Felsbau* 2002; **20**(5):133-142.

Anderegg R. Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern. *Dissertation ETH Zürich Nr. 12419*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998.

Anderegg R. Einige Aspekte der Verdichtung („ausführliche Version“). *Dokumentation der Firma Ammann Verdichtung*, Langenthal, 1999.

Anderegg R. Vergleichsmessungen dynamische Druckplatte. *Dokumentation der Firma Ammann Verdichtung*, Langenthal, 1999.

Anderegg R. Technologie der maschinellen Bodenverdichtung. *Dokumentation der Firma Ammann Verdichtung*, Langenthal, 2000.

Anderegg R. Die automatische Verdichtung und Verdichtungskontrolle auf Asphalt und im Erdbau. *Strassen- und Tiefbau* 2000; **54**(1):6-10.

Anderegg R. Ammann Compaction Expert - eine Bilanz. *Dokumentation der Firma Ammann Verdichtung*, Langenthal, 2000.

Anderegg R, Kaufmann K. Geregelte Walzenzüge und die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) Teil 1 & 2. *Strassen- und Tiefbau* 2002; **56**(7-9).

Anderegg R. Verdichtungs – Test. *Dokumentation der Firma Ammann Verdichtung*, Langenthal, 2002.

Beyer H. Anwendung der Methode M2. *Vorträge der FGSV-Tagung „Erd- und Grundbau“*. Erfurt, Heft 8, 1999; 53-60.

Bomag. Grundlagen der Boden- und Asphaltverdichtung, Boppard, 1997.

Caprez M, Songlin M. Dynamische Intensivverdichtung. *Forschungsauftrag 2/79 EVED*, Heft 303, Bern, 1994.

Caprez M, Yang FL, Amsler P. Verhältniszahlen ME2/ME1. *Forschungsauftrag 4/88 EVED*, Heft 308, Bern, 1994.

Chopra AK. *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall: Upper Saddle River, 2001.

D'Appolonia DJ, Whitman RV, D'Appolonia E. Sand compaction with vibratory rollers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)* 1969; **95**(1):263-284.

Dobry R, Gazetas G. Dynamic Response of Arbitrarily Shaped Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering – ASCE* 1986; **112**(2):109-135.

Fellin W, Hochenwarter G, Geiss A. On-line Verdichtungskontrolle bei der Rüttelverdichtung, Innsbruck, 2002.

Floss R. Vergleich der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften unstetiger und stetiger Kiessande hinsichtlich ihrer Eignung als ungebundenes Schüttmaterial im Strassenbau. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1970.

Floss R. Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erdbauten. *Strasse+Autobahn* 1985; **36**(2):52-57.

Floss R, Bräu G, Gahbauer M, Gruber N, Obermayer J. Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Strassenbauten. *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 612*, München, 1991.

Floss R. ZTVE-StB 94: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau. *Kommentar mit Compendium Erd- und Felsbau*, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1997.

Floss R. Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau, Band 1. Bomag, Boppard, 2001.

Gahbauer M, Gruber N, Schlögl F. Flächendeckende Qualitätssicherungssysteme für die Bodenverdichtung. Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München Heft 21: 181-201, TU München, München, 1995.

Grabe J. Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle. Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe Heft 124, Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1992.

Greiffenberg A. Automatisches Mess- und Regel-System zur Verdichtungsanpassung bei Walzenzügen. *Strassen- und Tiefbau* 1999; **53**(6):16-17.

Herren C, Russenberger T, Wilhelm E. Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mittels bodenmechanischer Materialkenngrößen. *Diplomarbeit, IGT-ETHZ, Zürich*, 2001.

Hillmann R. Anwendungsmöglichkeiten und Varianten der Prüfungsmethoden M₂ und M₃ zur Verdichtungsprüfung im Erdbau. *Vorträge der FGSV-Tagung „Erd- und Grundbau“*. Erfurt, Heft 8, 1999; 48-52.

Kloubert HJ. Geräteentwicklung für die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle FDVK. *Vorträge der FGSV-Tagung „Erd- und Grundbau“*. Erfurt, Heft 8, 1999; 64-66.

Kopf F. Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten. *Dissertation, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Strassenforschung Heft 517*, TU Wien, Wien, 1999.

Kröber W. Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden. Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München Heft 23, TU München, München, 1996.

Kröber W, Floss R, Wallrath. Dynamic Soil Stiffness as quality criterion for soil compaction. *Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures: outcome of ETC 11 of ISSMGE*, A. Gomes Correia (Hrsg.), Lisse, 2001.

Kudla W, Floss R, Trautmann C. Dynamischer Plattendruckversuch – Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten. *Strasse+Autobahn* 1991; **42**(1):66-71.

Langer W. Flächendeckende Verdichtungskontrolle. *Strassen- und Tiefbau* 1991; **45**(6):27-38.

Leibundgut HU, Anderegg R. Optimale Verdichtung, Messen des Untergrundverhaltens; Ermittlung der Bodensteifigkeit - Ein Nachweis im Rahmen des KWF-Projektes 2815.1. Langenthal und Zürich, 1996.

Preisig M, Caprez M, Amann P. Validieren von Methoden der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK). *Vorträge des Workshops „Bodenverdichtung“ an der TU Hamburg-Harburg*, Hamburg 2003.

Rixner S. Bodenverdichtung mit harten Bandagen. *Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau* 2001; **43**(7):29-31.

Schwab E, Tykal J. Verdichtungskontrolle mittels dynamischer Messungen. *Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Strassenforschung Heft 319*, TU Wien, Wien 1987.

Straussberger D. Anwendung der Methode M₃ mit flächendecker dynamischer Verdichtungskontrolle (FDVK) als Proof-rolling. *Vorträge der FGSV-Tagung „Erd- und Grundbau“*. Erfurt, Heft 8, 1999; 61-63.

Studer J, Meier P. Dynamische Intensivverdichtung. *Forschungsauftrag 6/78 EVED, Heft 64*, Bern, 1983.

Tophinke, Merkblatt über die flächendeckenden dynamischen Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau, Forschungsgesellschaft für Strasse- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Köln, 1993.

Wehrli C, Anderegg R. Der Verdichtungsautomat und die flächendeckende Erfassung der Bodensteifigkeit (FDVK). *Strassen- und Tiefbau* 1999; **53**(6):10-15.

Weissig D. Grundlagen der Bodenverdichtung. *Wacker Baumaschinen*, München, 1992.

Wolf JP. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice Hall, Upper Saddle River 1994.

7.2 Schweizer Normen:

SN-Norm -670 312b, VSS-Gerät für Plattendruckversuch.

SN-Norm -670 317b, *Plattendruckversuch*.

SN-Norm -670 330b, Verdichtung nach AASHTO.

SN-Norm -670 335a, *Dichte des Bodens*.

SN-Norm -670 345a, *Konsistenzgrenzen*.

SN-Norm -670320b, CBR-Versuche im Laboratorium.

7.3 Deutsche Normen:

Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e. V., Köln 1993.

Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels in Strassenbau, TP BF – StB Teil E 2, Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e. V., Köln 1994.

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Strassenbau, ZTVE-StB 94, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e. V., Köln 1997.

7.4 Österreichische Normen:

RVS 8S.02.6: *Erdarbeiten – Kontinuierlicher Walzenintegrierter Verdichtungsnachweis*, Österreichische Forschungsgemeinschaft Strasse und Verkehr (FSV), Arbeitsgruppe „Untergrund“, Wien 1999.

7.5 Schwedische Normen:

VVMB 603: *Yttäckande packningskontroll*, Vägverket, Borlänge 1994.

Anhang 1

Beschreibung der Baustellen und Versuchsbedingungen

8 *Bemerkungen*

Es wurden auf insgesamt neun Baustellen zwölf verschiedene Bodenmaterialien geprüft. Nachfolgend sind die neun Baustellen chronologisch aufgelistet. Den Tabellen sind unter anderem die Versuchsbedingungen zu entnehmen.

Die statischen Plattendruckversuche wurden zum Teil nach der „alten“ Norm (SN 670 317a) durchgeführt. Ausgewertet wurden sie aber alle nach der heute gültigen Norm SN 670 317b.

Mit dem Standard-Proctorversuch kann der optimale Wassergehalt (w_{opt}) bestimmt und auf Feldverhältnisse umgerechnet werden. Falls der natürliche Wassergehalt des geprüften Materials kleiner als der optimale Wassergehalt ist (sprich $w_n < w_{opt}$), dann liegt der natürliche Wassergehalt auf der „trockenen Seite“, andernfalls liegt er beim Optimum oder auf der „nassen Seite“ (sprich $w_n > w_{opt}$).

9 Buchs, 23. Aug. 2001

Versuchsnummer:	M1
Ort:	Zufahrt zum Parkplatz beim Areal der Firma Acima AG, Im Ochsensand, 9470 Buchs (SG)
Datum und Zeit:	23. August 2001, 8-10 Uhr
Wetter:	schön, ca. 25°C
Baufirma:	Toldo AG, 9475 Sevelen
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche /Anzahl:	Erdbaulabor Tiefbauamt Kanton St. Gallen /5 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-350-50-250 [kN/m ²]: Messung nach „alter“ Norm, Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	GW (gut abgestufter Kies), Kiessand II, Material stängelig, eckig und gebrochen
Schichtaufbau:	Fundationsschicht, ca. 55 cm
Wassergehalt:	wurde nicht bestimmt → Feldbeobachtung: $w_n < w_{opt}$
Bemerkung:	keine

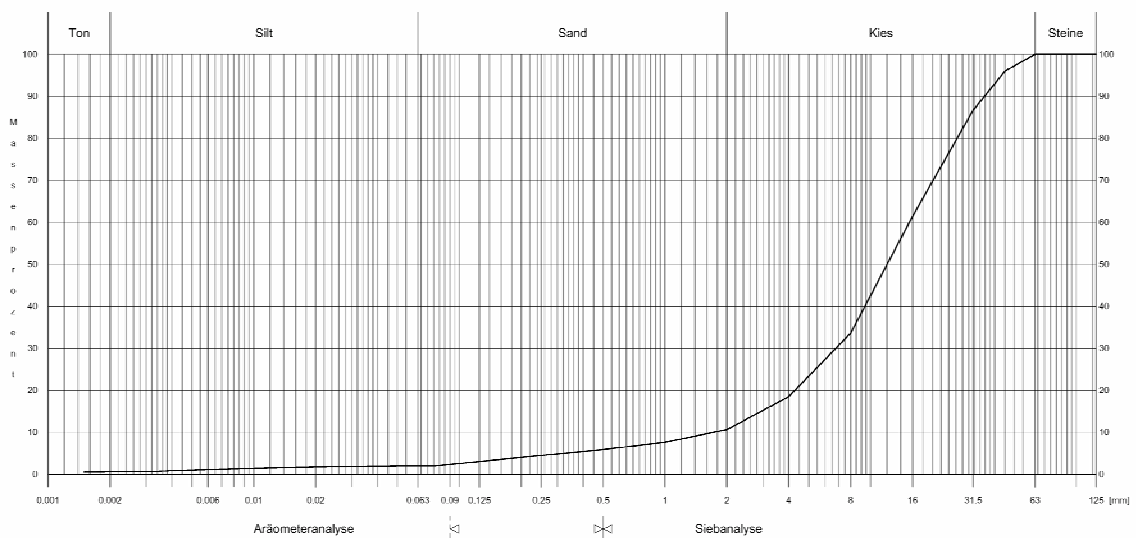


Abbildung A1-1: Siebcurve Kiessand II.

9.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Buchs							
Materialnummer:	46630						
Untersuchtes Material:	GW, Kiessand II						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k_B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]	k_B [MN/m]
1	98	300	3.1	69	237	2.4	105
2	82	300	3.7	58	231	4.0	82
3	34	125	3.7	25	95	3.9	52
4	43	130	3.0	32	110	3.4	58
5	70	300	4.3	49	209	4.3	125

Tabelle A1-1: Messprotokoll von Buchs (SG).

10 Littau, 22. Nov. 2001

Versuchsnummer:	M2 und M3
Ort:	Littau (LU), Baumarkt Hornbach
Datum und Zeit:	22. November 2001, 10 - 13:30 Uhr
Wetter:	bewölkt, ca. 0°C
Baufirma:	Lötscher Tiefbau, 6014 Littau
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	TFB Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, 5103 Wildegg / 10 Versuche auf Kiessand I 4 Versuche auf Recyclingbeton
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-350-50-250 [kN/m ²]: Messung nach „alter“ Norm, Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	- GW (gut abgestufter, sandiger Kies), Kiessand I - Betonrecycling, GW (gut abgestufter, sandiger Kies)
Schichtaufbau:	gewachsenes Terrain (Flussschotter) und Fundations-schicht 30-40 cm
Wassergehalt:	- Kiessand: $w_n = \text{ca. } 4.2 \%$ (wahrscheinlich „nasse Seite“, da $w_n > w_{\text{opt}}$) - Betonrecycling: $w_n = 5 \%$
Bemerkung:	Die Siebkurve des Recyclingbeton wurde von Fachstelle für Boden- und Felsmechanik erstellt.

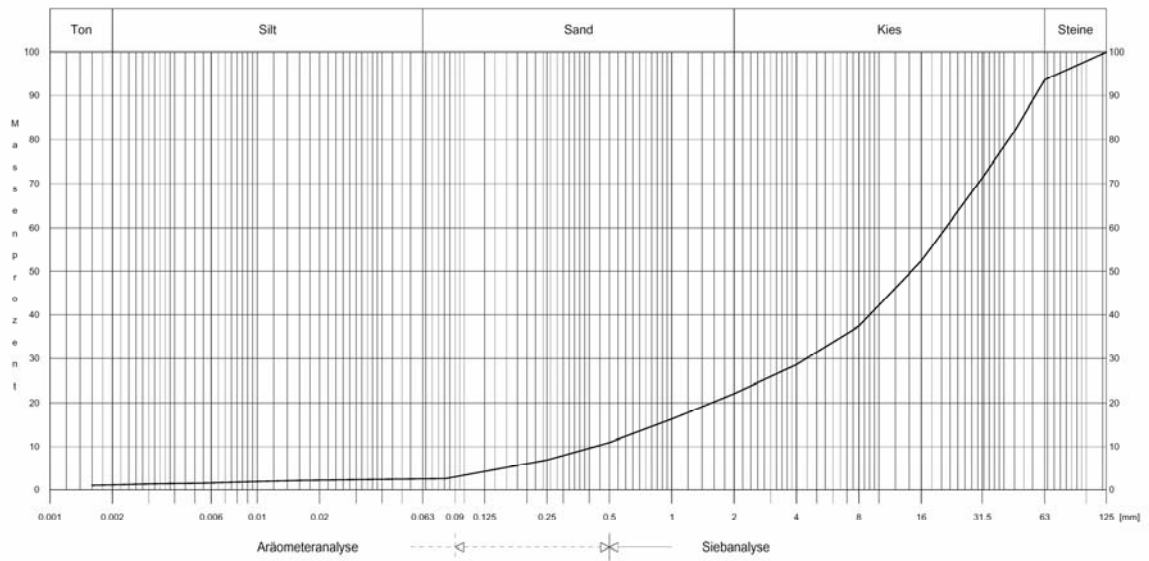


Abbildung A1-2: Siebkurve Kiessand I.

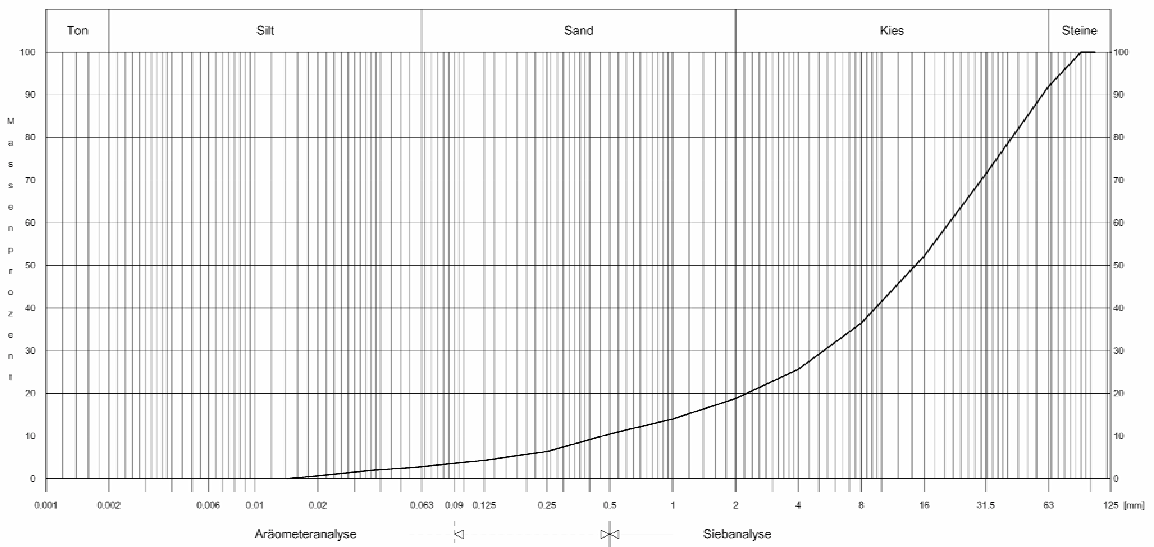


Abbildung A1-3: Siebkurve Recyclingbeton.

10.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Littau							
Materialnummer:	46633						
Untersuchtes Material:	GW, Kiessand I						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k_B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]	k_B [MN/m]
1	95	375	4.0	67	243	3.6	66
2	28	200	7.0	20	134	6.6	78
3	48	214	4.5	31	153	5.0	57
4	30	214	7.1	21	150	7.1	46
5	54	273	5.0	38	187	4.9	79
6	61	333	5.5	42	209	4.9	64
7	21	68	3.3	15	50	3.4	37
8	66	333	3.3	46	231	5.0	86

Tabelle A1-2: Messprotokoll von Littau (LU), Kiessand.

Messprotokoll von Littau							
Materialnummer:	keine Materialprobe entnommen						
Untersuchtes Material:	Betonrecycling, GW						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k_B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]	k_{bm} [MN/m]
1	107	300	2.8				112
2	100	272	2.7				88
3	68	272	4.0				66
4	42	111	2.6				58

Tabelle A1-3: Messprotokoll von Littau (LU), Betonrecycling.

11 Sargans, 30. November 2001

Versuchsnummer:	M4
Ort:	Sargans (SG), Zufahrtstrasse zum Möbel-Pfister
Datum und Zeit:	30. November 2001, 10-16 Uhr
Wetter:	regnerisch, kalt
Baufirma:	Toldo AG, 9475 Sevelen
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	Erdbaulabor Tiefbauamt Kanton St. Gallen / 8 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-350-50-250 [kN/m ²]: Messung nach „alter“ Norm, Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	GW (gut abgestufter Kies), Kiessand II, Material stängelig, eckig und gebrochen
Schichtaufbau:	Fundationsschicht ca. 50 cm (oberste Schicht: ca. 3-5 cm Kiessand Ø 0-31.5 cm)
Wassergehalt:	$w_n = \text{ca. } 4.7\%$ („nasse Seite“, da $w_n > w_{opt}$)
Bemerkung:	keine

11.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Sargans							
Materialnummer:	46630						
Untersuchtes Material:	GW; Kiessand II						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k_B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]	k_B [MN/m]
1	31	83	2.7	23	63	2.8	19
2	61	200	3.3	44	148	3.4	68
3	44	176	4.0	32	118	3.7	56
4	38	167	4.4	26	117	4.4	57
5	20	56	2.8	15	41	2.8	18
6	27	83	3.1	19	63	3.2	33
7	20	65	3.1	15	49	3.2	33
8	11	39	3.2	8	30	3.4	16

Tabelle A1-4: Messprotokoll von Sargans (SG).

12 Teufen, 1. Mai 2002

Versuchsnummer:	M5
Ort:	Einschnitt Einlenker Steinerstrasse an der Umfahrung Teufen (AR)
Datum und Zeit:	1. Mai 2002, 10-12 Uhr
Wetter:	schön, ca. 20°C
Baufirma:	Paul Preisig AG, 9053 Teufen und Hörler Tiefbau, 9052 Niederteufen
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	Tiefbauamt Kanton Appenzell A. Rh. / 5 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-200-50-150 [kN/m ²]: Messung nach „alter“ Norm, Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	SM (siltiger Sand ohne Kies)
Schichtaufbau:	Bei der Messstelle handelt es sich um eine Dammschüttung aus natürlichem Material (Sandstein mit organischen Verunreinigungen). Schichtstärke variabel ca. 0.75 - 1 m.
Wassergehalt:	$w_n = \text{ca. } 19.5\%$ („nasse Seite“, da $w_n > w_{opt}$)
Bemerkung:	Das Schüttmaterial ist nicht homogen. Das Material war teilweise ein weicher Sandstein und teilweise auch ein wenig tonig. Zudem hatte es organische Verunreinigungen. Die Plastizitätseigenschaften konnten nicht bestimmt werden, da das Material zu wenig bindig war.

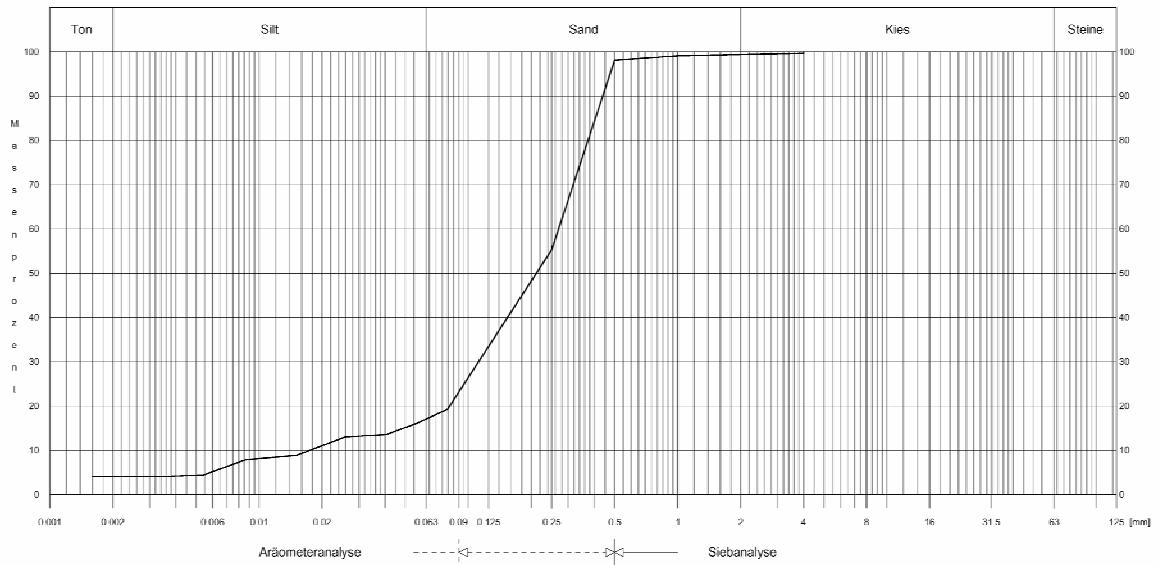


Abbildung A1-4: Siebkurve siltiger Sand.

12.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Teufen							
Materialnummer:	46687						
Untersuchtes Material:	SM						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k_B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]	k_B [MN/m]
1	28	250	9.0	21	187	9.0	40
2	18	77	4.4	13	58	4.4	38
3	14	79	5.8	10	59	5.8	32
4	13	73	5.5	10	55	5.5	29
5	14	83	5.8	11	62	5.8	23

Tabelle A1-5: Messprotokoll von Teufen (AR).

13 Neuhaus, 8. Mai 2002

Versuchsnummer:	M6 und M7
Ort:	Umfahrungsstrasse Wagen-Eschenbach-Schmerikon im Abschnitt Neuhaus (SG)
Datum und Zeit:	8. Mai 2002, 10-14 Uhr
Wetter:	bedeckt, ca. 20°C
Baufirma:	Toller AG, 8733 Eschenbach
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	Erdbaulabor Tiefbauamt Kanton St. Gallen / - zementstabilisiertes Material: 4 Versuche - Kiessand: 4 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-440-0-350 [kN/m ²]: Messung und Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	- SM (siltiger Sand mit Kies), gebrochener Sandstein 0-80 mm mit ca. 80 kg Zement pro m ³ (=Zementstabi) - GP (schlecht abgestufter, sandiger Kies), Kiessand II
Schichtaufbau:	- zementstabilisierte Fundationsschicht, Stärke ca. 35 cm - Kiessand-Fundationsschicht mind. 35 cm, Untergrund gewachsenes Terrain
Wassergehalt:	- SM (Zementstabi) $w_n = 10.6\%$ („trockene oder nasse Seite“ → in Abklärung) - GP, Kiessand II $w_n = 2.7\%$ („trockene Seite“, da $w_n > w_{opt}$)
Bemerkung:	Keine

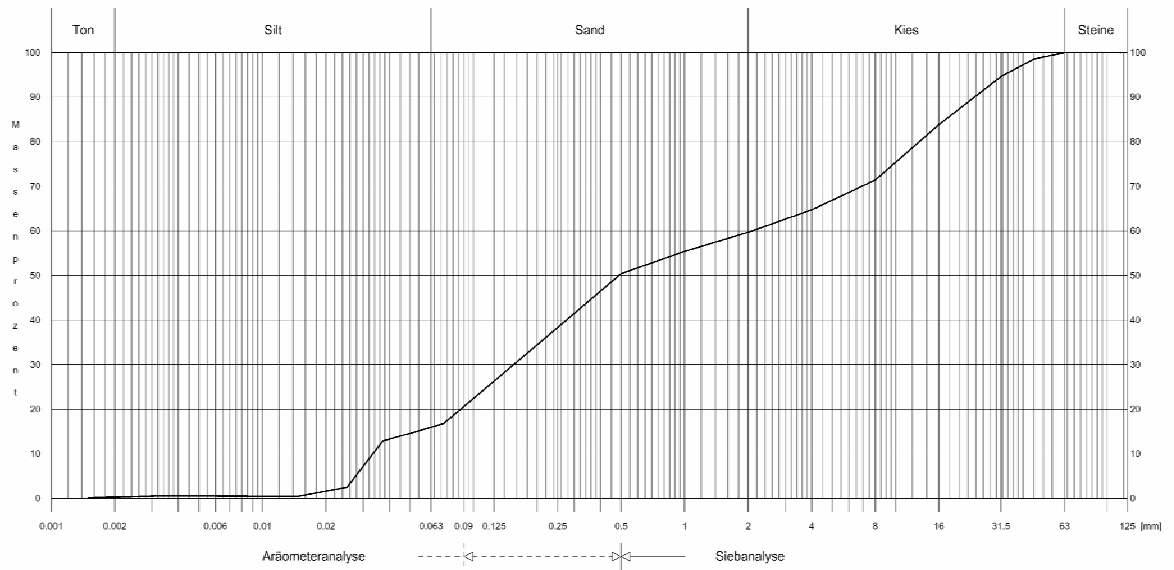


Abbildung A1-5: Siebkurve siltiger Sand.

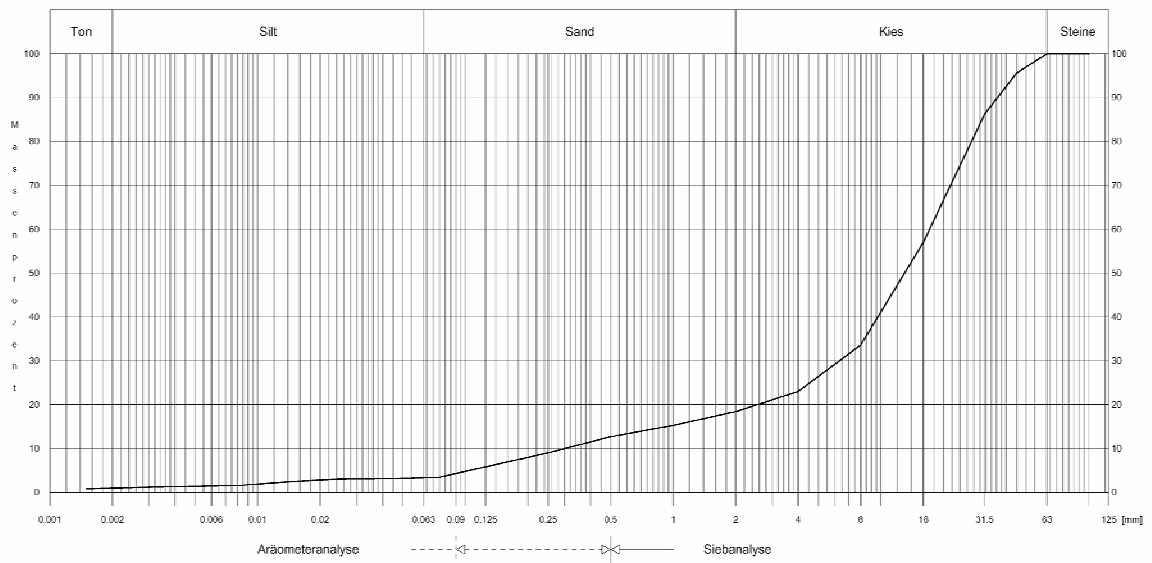


Abbildung A1-6: Siebkurve schlecht abgestufter Kies.

13.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Neuhaus							
Materialnummer:	46684						
Untersuchtes Material:	SM, Zementstabi						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k _B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	k _{bm} [MN/m]
1	65	144	2.2	51	110	2.2	67
2	70	176	2.5	33	129	3.9	93
3	44	88	2.0	33	64	1.9	25
4	114	211	1.9	86	149	1.7	61

Tabelle A1-6: Messprotokoll von Neuhaus (SG), Zementstabi.

Messprotokoll von Neuhaus							
Materialnummer:	46685						
Untersuchtes Material:	GP, Kiessand II						
FDVK:	Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:	2						
k _B -Faktor:	1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						
	M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	k _B [MN/m]
1	77	204	2.7	59	149	2.5	55
2	68	183	2.7	53	137	2.6	58
3	51	126	2.5	37	97	2.6	60
4	79	203	2.6	62	149	2.4	91

Tabelle A1-7: Messprotokoll von Neuhaus (SG), Kiessand.

14 Rona, 23. Mai 2002

Versuchsnummer:	M8
Ort:	an der Julierstrasse bei Rona (GR)
Datum und Zeit:	23. Mai 2002, 14-17 Uhr
Wetter:	zuerst trocken, dann regnerisch, kalt
Baufirma:	Prader & Co., 7000 Chur
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	F. Steiger Beratende Ingenieure, Erdbaulabor, Chur/ 6 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-500-0-400 [kN/m ²]: Messung nach „alter“ Norm, Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	GW (gut abgestufter Kies), Kiessand I
Schichtaufbau:	obere Schicht: Kiessand I \varnothing 0-63 mm (von Steinruch Marmorera), Stärke ca. 20 cm untere Schicht: Recycling-Kiessand II \varnothing 0-90 mm, max. 20% Asphalt, Stärke ca. 60 cm
Wassergehalt:	Material wurde trocken eingebaut, d.h. $w_n = \text{ca. } 0\%$ („trockene Seite“, da $w_n < w_{opt}$)
Bemerkung:	Damit sich das Material besser bindet, wurde Salz beigegeben. Das Material hatte wenig Feinanteil und war offensichtlich fast nicht zu verdichten.

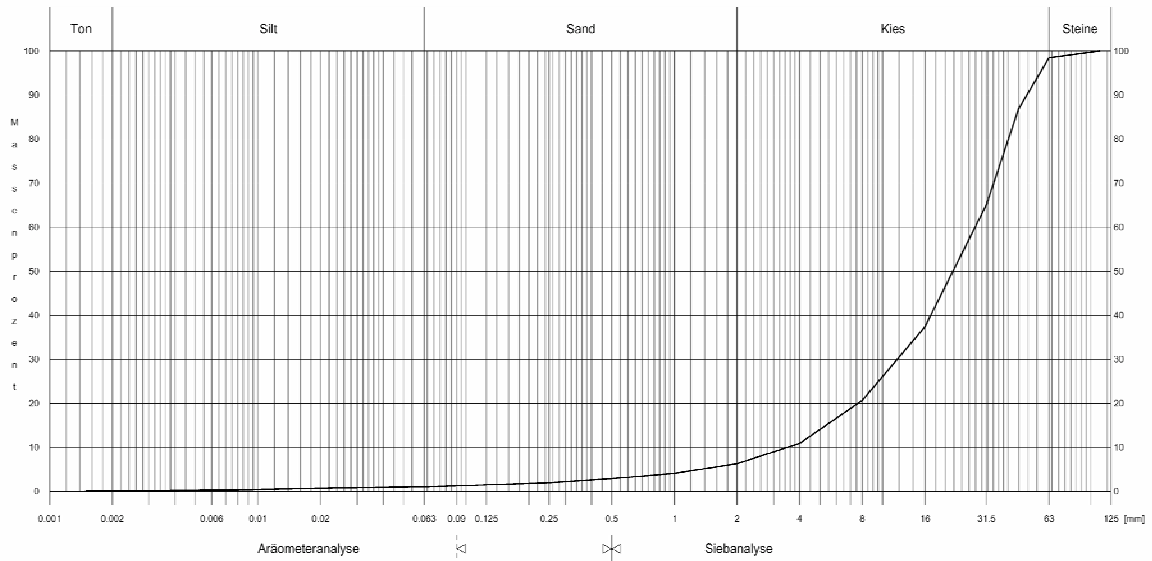


Abbildung A1-7: Siebkurve Kiessand I.

14.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Rona							
Materialnummer:		46686					
Untersuchtes Material:		GW, Kiessand I					
FDVK:		Ammann Tandemwalze AV 95					
Messstufe:		2					
k _B -Faktor:		1.0					
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						k _B [MN/m]
	M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	
1	155	245	1.6	122	195	1.6	126
2	101	247	2.4	81	200	2.5	119
3	167	306	1.8	132	259	2.0	129
4	129	266	2.1	105	213	2.0	141
5	151	277	1.8	120	229	1.9	145
6	131	259	2.0	108	207	1.9	102

Tabelle A1-8: Messprotokoll von Rona (GR).

15 Klotten, 19. Juli 2002

Versuchsnummer:	M9
Ort:	Klotten an der Flughafenstrasse (ZH)
Datum und Zeit:	19. Juli 2002, ab 13 Uhr
Wetter:	schön, ca. 20 °C
Baufirma:	Wistrag AG, 8401 Winterthur
FDVK:	Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	Erdbaulabor Tiefbauamt Kanton Zürich / 10 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-500-0-400 [kN/m ²]: Auswertung Messungen und Auswertung nach gültiger Norm.
Untersuchtes Material:	Kiessand I (für Foundationsschicht)
Schichtaufbau:	bestehende Foundationsschicht, Stärke variabel, min. 45 cm
Wassergehalt:	wurde nicht bestimmt → Feldbeobachtung: $w_n < w_{opt}$
Bemerkung:	Bei der Flughafenstrasse wurde der Belag ersetzt. Dabei wurde die Planie der Foundationsschicht neu planiert. Es wurde das bestehende Material verwendet. Es wurde keine Siebkurve erstellt.

15.1 Zusammenstellung der Messergebnisse:

Messprotokoll von Kloten							
Materialnummer:		keine Materialprobe entnommen					
Untersuchtes Material:		Kiessand I (nach Angaben Bauleitung)					
FDVK:		Ammann Tandemwalze AV 95					
Messstufe:		2					
k _B -Faktor:		1.0					
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK
	M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	k _B [MN/m]
21	81	276	3.4	68	214	3.2	107
22	164	311	1.9	135	272	2.0	126
23	30	164	5.4	25	135	5.4	68
24	44	141	3.2	36	117	3.3	65
25	76	246	3.2	63	200	3.2	73
26	147	287	1.9	121	251	2.1	108
27	122	239	2.0	98	194	2.0	89
28	130	270	2.1	109	239	2.2	97
29	111	259	2.3	91	228	2.5	107
30	38	217	5.7	32	190	6.0	89

Tabelle A1-9: Messprotokoll von Kloten (ZH).

16 „Kohlendreieck“ am Hauptbahnhof Zürich, Aug. 2002 und Nov. 2002

Versuchsnummer:	M10 und M11
Ort:	„Kohlendreieck“ am Hauptbahnhof Zürich, SBB Baustelle
Datum und Zeit:	20. August 2002 und 29. November 2002
Wetter:	- schön, ca. 25°C (20. Aug. 02) - regnerisch, ca. 5 °C (29. Nov. 02)
Baufirma:	ARGE AVZ
FDVK:	20. Aug. 02 Bomag Walzenzug BW 177DH-3 BVC Bomag Tandemwalze BW 184 AD Ammann Walzenzug AC 110-2 Ammann Tandemwalze Typ AV 95 29. Nov. 02 Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	Ammann Walzenzug = 0.75 Ammann Tandemwalze = 1.0
Plattendruckversuche / Anzahl:	Erdbaulabor Tiefbauamt Kanton Zürich / 20. Aug. 02: 9 Versuche 29. Nov. 02: 7 Versuche
Auswertung Plattendruckversuche:	Laststufen 0-500-0-400 [kN/m ²]: Messungen und Auswertung nach gültiger Norm
Untersuchtes Material:	GP (schlecht abgestufter Kies), Kiessand I
Schichtaufbau:	Foundationsschicht ca. 25 cm
Wassergehalt:	20. Aug.02 : $w_n = 0.7\%$ (auf „trockener Seite“) 29. Nov.02: $w_n = 10\%$ (auf „nasser Seite“)
Bemerkung:	Bei beiden Messstellen handelt es sich um die Foundationsschicht eines Gleistrasses. Die Anforderungen des Bauherrn an die Tragfähigkeit der Planie war $M_{E1} > 56 \text{ MN/m}^2$.

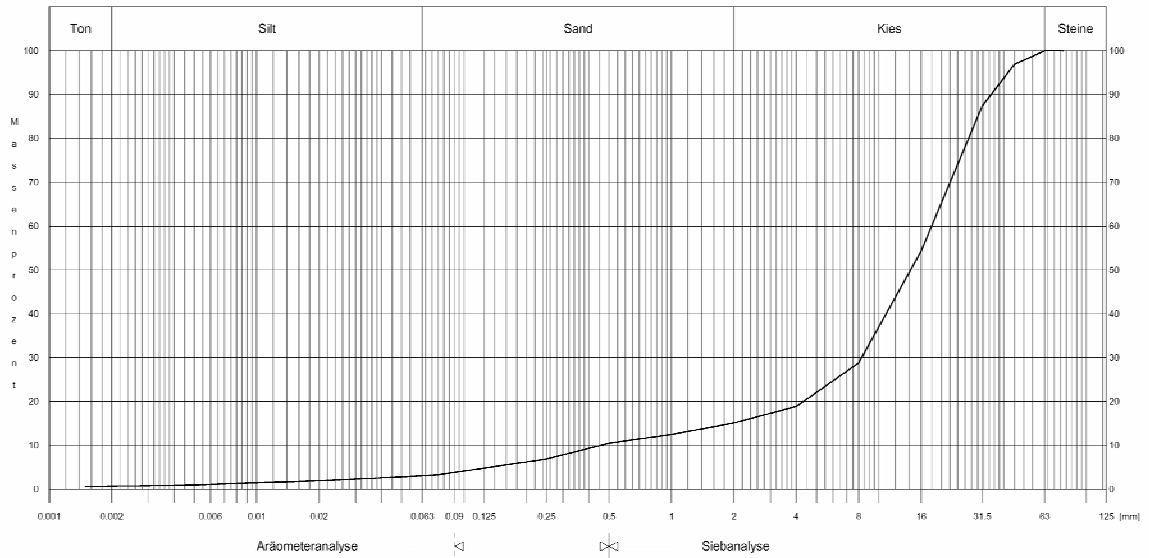


Abbildung A1-8: Siebkurve Fundationsschicht: Kiessand I.

16.1 Messergebnisse vom 20. August 2002 (M10):

Pkt.-Nr.	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]
2	75	142	1.9	57	116	2.0
6	122	206	1.7	93	168	1.8
10	43	140	3.3	34	111	3.3
14	92	185	2.0	73	158	2.2
16	57	189	3.3	46	161	3.5
17	58	173	3.0	47	140	3.0
18	56	145	2.6	45	119	2.7
19	66	161	2.5	52	133	2.5
20	59	161	2.7	48	131	2.7

Tabelle A1-10: Plattendruckversuche.

Messwerte der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle												
Wälzentyp:		Tandemwalze: Ammann AV/95 T mit ACE					FDVK-Wert:		k_B [MN/m]			
Punkt	Automatik			Automatik			Handbetrieb, Kraft 18% f=50HZ			Automatik nach Überfahrt der Wälzenzüge		
	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe
	FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]	
1	71	0.3	1	70		1	60	0.3		87	0.2	1
2	70	0.3	1	63		1	61	0.3		86	0.2	1
3	75	0.3	1	72		1	75	0.3		91	0.2	1
4	70	0.4	1	77		1	78	0.2		96	0.2	1
5	60	0.5	1	59		1	40	0.2		86	0.25	1
6	112	0.3	1	106		1	98	0.3		93	0.25	1
7	102	0.3	1	94		1	96	0.3		83	0.25	1
8	79	0.4	1	82		1	70	0.3		90	0.25	1
9	88	0.4	1	79		1	98	0.3		93	0.2	1
10	80	0.4	1	79		1	82	0.3		80	0.25	1
11	103	0.3	1	106		1	96	0.35		93	0.25	1
12	120	0.3	1	125		1	104	0.3		103	0.25	1
13	130	0.2	1	130		1	117	0.35		123	0.2	1
14	126	0.2	1	139		1	115	0.35		129	0.2	1
15	95	0.3	1	66		1	89	0.35		115	0.2	1
16	92	0.3	1	96		1	91	0.3		-	-	1
17	103	0.3	1	93		1	95	0.35		-	-	1
18	87	0.3	1	95		1	98	0.35		-	-	1
19	115	0.2	1	126		1	-			-	-	1
20	112	0.2	1	118		1	-			-	-	1

Tabelle A1-11: Messwerte Tandemwalze Ammann.

Messwerte der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle												
Wälzentyp:		Tandemwalze: Bomag BW184 AD					FDVK-Wert:		E _{vib} in [MPa]			
Punkt	Automatik			Automatik			Handbetrieb			Automatik		
	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe
	FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]	
1	250	klein	1	230	klein	1	150	0,4	3	280	klein	1
2	200	klein	1	220	klein	1	210	0,4	3	270	klein	1
3	-	klein	1	200	klein	1	190	0,4	3	350	klein	1
4	280	klein	1	300	klein	1	130	0,4	3	250	klein	1
5	-	klein	1	250	klein	1	200	0,4	3	200	klein	1
6	190	klein	1	250	klein	1	150	0,4	3	280	klein	1
7	250	klein	1	280	klein	1	120	0,4	3	100	klein	1
8	310	klein	1	300	klein	1	170	0,4	3	300	klein	1
9	-	klein	1	250	klein	1	100	0,4	3	250	klein	1
10	250	klein	1	230	klein	1	80	0,4	3	320	klein	1
11	190	klein	1	250	klein	1	50	0,4	3	250	klein	1
12	200	klein	1	300	klein	1	120	0,4	3	>350	klein	1
13	150	klein	1	200	klein	1	140	0,4	3	260	klein	1
14	100	klein	1	200	klein	1	130	0,4	3	250	klein	1
15	150	klein	1	200	klein	1	90	0,4	3	250	klein	1
16	220	klein	1	230	klein	1	150	0,4	3		klein	1
17	290	klein	1	180	klein	1	60	0,4	3		klein	1
18	150	klein	1	300	klein	1	50	0,4	3		klein	1
19	240	klein	1	320	klein	1					klein	1
20	130	klein	1	250	klein	1					klein	1

Tabelle A1-12: Messwerte Tandemwalze Bomag.

Messwerte der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle

Wälzentyp: Wälzenzug Ammann AC 110-2 mit ACE FDVK-Wert: k_B [MN/m]

Punkt	Automatik			Automatik			Handbetrieb					
	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe	FDVK		Stufe			
	FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]		FDVK-Wert	A [mm]				
1	40	1.5	2	41	1.25	2	41	0.5				
2	30	1.5	2	36	1.4	2	26	0.5				
3	30	1.6	2	34	1.4	2	25	0.5				
4	48	1.0	2	51	1.5	2	49	0.5				
5	33	0.7	2	56	–	2	40	0.5				
6	60	1.0	2	52	1.2	2	34	0.5				
7	44	1.3	2	40	1.4	2	33	0.6				
8	60	1.3	2	62	1.5	2	44	0.6				
9	35	1.2	2	40	1.2	2	30	0.5				
10	32	1.5	2	35	1.4	2	34	0.5				
11	46	1.5	2	51	1.4	2	44	0.6				
12	55	1.4	2	55	1.2	2	91	0.5				
13	104	0.6	2	102	0.6	2	105	0.7				
14	97	0.6	2	96	0.7	2	100	0.7				
15	66	1.0	2	75	0.8	2	90	0.5				
16	66	1.0	2	71	0.8	2	–	–				
17	59	1.1	2	–	–	2	–	–				
18	–		2	–	–	2	–	–				
19	–		2	–	–	2	–	–				
20	–		2	–	–	2	–	–				

Tabelle A1-13: Messwerte Walzenzug Ammann.

Messwerte der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle

Walzentyp: Walzenzug Bomag BW177 DH3 BVC FDMK-Wert: E_{vib} in [MPa]

Punkt	Automatik, keine Begrenzung von E_{vib}			Automatik, $E_{vib} = 150 \text{ MN/m}^2$			Handbetrieb					
	FDMK		Stufe	FDMK		Stufe	FDMK		Stufe	FDMK		Stufe
	FDMK-Wert	A [mm]		FDMK-Wert	A [mm]		FDMK-Wert	A [mm]		FDMK-Wert	A [mm]	
1	110	>25		110	22		80	0.5	2			
2	80	>25		75	25		ca. 0	0.5	2			
3	80	>25		85	25		<50	0.5	2			
4	100	>25		110	24		100	0.5	2			
5	80	>25		80	20		50	0.5	2			
6	80	>25		70	24		40	0.5	2			
7	75	>25		70	24		40	0.5	2			
8	70	>25		70	25		ca. 0	0.5	2			
9	70	>25		70	24		40	0.5	2			
10	70	>25		70	24		30	0.5	2			
11	80	>25		80	25		60	0.5	2			
12	90	>25		110	25		55	0.5	2			
13	120	>25		140	0.5		110	0.5	2			
14	80	>25		140	0.9		120	0.5	2			
15	115	>25		120	20		100	0.5	2			
16	115	>25		120	1.5		110	0.5	2			
17	120	>25		100	24							
18	110	>25										
19												
20												

Tabelle A1-14: Messwerte Walzenzug Bomag.

16.2 Messergebnisse vom 29. November 2002 (M11):

Messprotokoll vom "Kohlendreieck"								
Materialnummer:		46689						
Untersuchtes Material:		GP, Kiessand I						
FDVK:		Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:		1 und 2						
k _B -Faktor:		1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK	
	M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	k _B [MN/m]	k _B [MN/m]
							Stufe 1	Stufe 2
1	23.8	80.3	3.38	17.8	60.2	3.38	30	25
2	16.4	63.5	3.86	12.0	42.3	3.53	28	27
3	72.5	182.6	2.52	58.0	162.0	2.79	56	52
4	68.1	181.0	2.66	55.0	168.4	3.06	78	65
5	47.7	155.0	3.25	40.1	133.3	3.32	56	48
6	56.5	154.7	2.74	46.7	131.9	2.83	71	58
7	29.4	67.2	2.28	22.2	52.0	2.34	49	42

Tabelle A1-15: Messprotokoll vom Kohlendreieck beim Hauptbahnhof Zürich.

17 Rheinfelden, Juli – Nov. 2002

Versuchsnummer:	M12 und M13
Ort:	Autobahn-Zubringer N3/Ag8 Rheinfelden (AG)
Baufirma:	ARGE A3-Ag8, c/o Tozzo, 4416 Bubendorf
FDVK:	Ammann Walzenzug AC 110-2 und Ammann Tandemwalze Typ AV 95
Multiplikator k_B -Wert	Ammann Walzenzug = 0.75 Ammann Tandemwalze = 1.0
Plattendruckversuche:	Erdbaulabor Tiefbauamt Kanton Aargau
Untersuchtes Material:	- Dammschüttung (kalkstabilisiert ca. 44 kg/m ³): 1. CL / 2. GC-GM (Es wurden zwei Siebkurven durchgeführt. Material ist sehr inhomogen.) - Fundationsschicht: GW, Kiessand I (0-100 mm) mit Asphaltgranulat
Wassergehalt:	5. Juli – 16. Aug. 02: 1. CL: $w_n = \text{ca. } 11.7 \%$ (auf „nasser Seite“???) \Rightarrow in Abklärung 2. GC-GM: $w_n = \text{ca. } 8.0 \%$ (auf „nasser Seite“???) \Rightarrow in Abklärung 7. Nov. 02: $w_n = \text{ca. } 11.5 \%$ (auf „nasser Seite“)
Bemerkung:	Bei den Messungen zwischen dem 5. Juli und dem 16. Aug. wurde die kalkstabilisierte Dammschüttung gemessen. Die Schichtstärke kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Bei der Messung vom 7. Nov. wurde die Fundationsschicht auf der ca. 3 m hohen Dammschüttung gemessen.

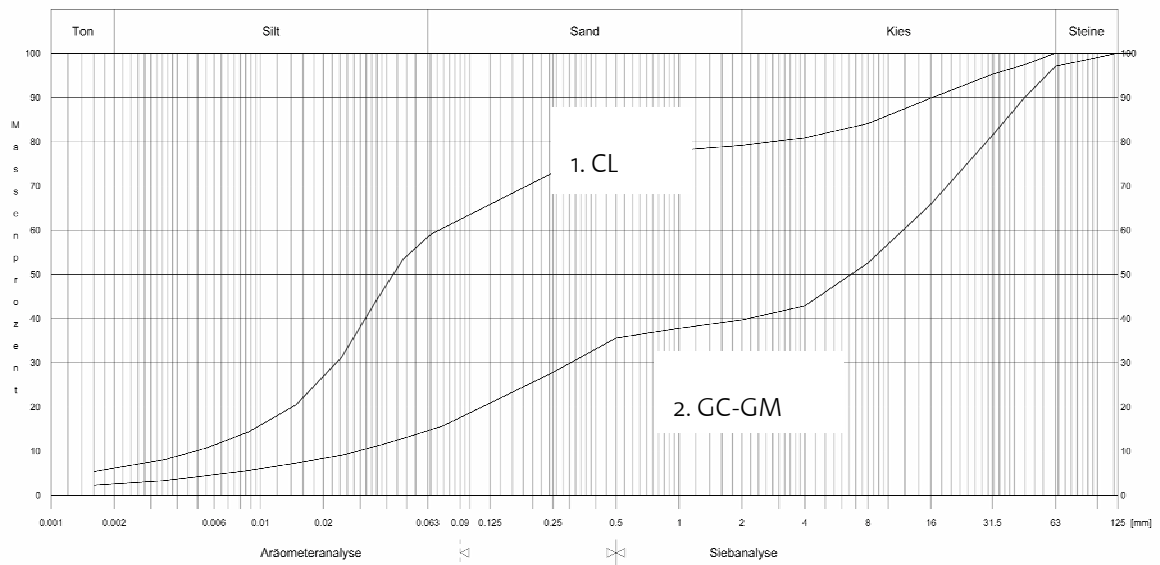


Abbildung A1-9: Siebkurven Dammschüttung (M12).

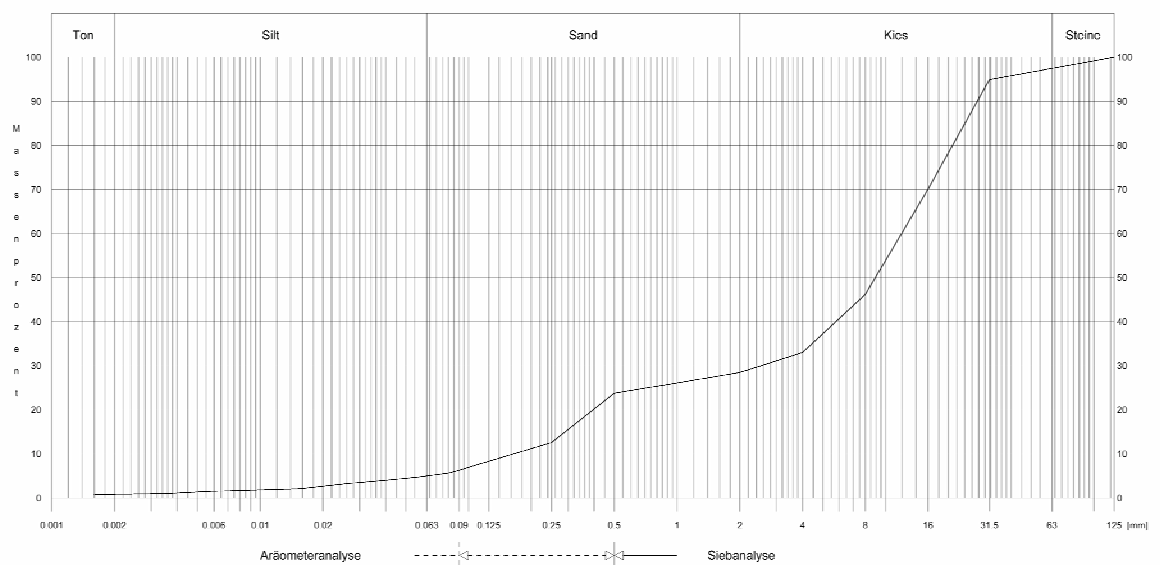


Abbildung A1-10: Siebkurve Fundationsschicht: Kiessand I (M13).

17.1 Chronologische Übersicht der Versuche in Rheinfeldern

Datum	Wetter	Schichtstärke	Anzahl Plattendruckvers uche	Walzentyp
5. Juli 02	schön	ca. 1 m	4	Walzenzug
12. Juli 02	schön, ca. 25°C	ca. 1 m	6	Walzenzug
19. Juli 02	schön, ca. 20°C	ca. 1 m	4	Walzenzug
24. Juli 02	schön, ca. 20°C	ca. 2 m	6	Walzenzug
30. Juli 02	schön, ca. 20°C	ca. 2 m	4	Walzenzug
31. Juli 02	schön, ca. 20°C	ca. 2 m	6	Walzenzug
15. Aug. 02	schön, ca. 20°C	ca. 3 m	4	Walzenzug
16. Aug. 02	schön, ca. 20°C	ca. 3 m	4	Walzenzug
7. Nov. 02	regnerisch, ca. 9°C	ca. 0.5 m	6	Tandemwalze

17.2 Zusammenstellung der Messergebnisse Juli – August 02 (M12):

Messprotokoll von Rheinfelden									
Materialnummer:		46688							
Untersuchtes Material:		CL und GC-GM							
FDVK:		Ammann Walzenzug AC 110-2							
Messtufe:		1 und 2							
k _B -Faktor:		0.75							
Pkt-Nr.	Datum und Nr.	Plattendruckversuch						FDVK	
		M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	k _B [MN/m]	k _B [MN/m]
								Stufe 1	Stufe 2
1	5.07.02 / Nr.5	96	214	2.2	71	158	2.2	151	-----
2	5.07.02 / Nr.6	61	188	3.1	37	134	3.6	46	-----
3	5.07.02 / Nr.7	16	103	6.6	11	76	6.9	30	-----
4	5.07.02 / Nr.8	164	750	4.6	110	563	5.1	161	-----
5	12.07.02 / Nr.15	18	73	4.2	13	53	4.0	10	23
6	12.07.02 / Nr.16	15	49	3.3	12	37	3.2	5	15
7	12.07.02 / Nr.17	46	167	3.6	34	122	3.5	45	54
8	12.07.02 / Nr.18	22	91	4.1	17	66	4.0	-----	6
9	12.07.02 / Nr.19	21	88	4.1	16	69	4.3	37	43
10	12.07.02 / Nr.20	41	150	3.6	30	117	3.9	29	28
11	19.07.02 / Nr.15	28	67	2.4	21	52	2.4	17	23
12	19.07.02 / Nr.16	41	107	2.6	30	84	2.8	44	48
13	19.07.02 / Nr.18	22	91	4.1	17	66	4.0	22	41
14	19.07.02 / Nr.19	33	103	3.2	23	76	3.2	34	44
15	24.07.02 / Nr.33	56	176	3.2	41	141	3.5	72	67
16	24.07.02 / Nr.34	59	143	2.4	46	113	2.5	47	56
17	24.07.02 / Nr.35	69	176	2.5	54	143	2.6	45	48
18	24.07.02 / Nr.36	64	136	2.1	47	111	2.4	52	63
19	24.07.02 / Nr.37	33	103	3.1	25	81	3.3	51	50
20	24.07.02 / Nr.38	39	103	2.7	30	76	2.6	37	46
21	30.07.02 / Nr.41	59	176	3.0	44	136	3.1	61	60
22	30.07.02 / Nr.42	101	231	2.3	73	180	2.5	82	63
23	30.07.02 / Nr.43	77	177	2.3	58	134	2.3	73	74
24	30.07.02 / Nr.44	64	150	2.3	49	113	2.3	63	68
25	31.07.02 / Nr.45	194	231	1.2	162	173	1.1	45	55
26	31.07.02 / Nr. 46	106	231	2.2	75	164	2.2	49	58
27	31.07.02 / Nr. 47	85	177	2.1	62	134	2.2	43	52
28	31.07.02 / Nr. 48	31	107	3.4	23	78	3.4	40	51
29	31.07.02 / Nr. 49	46	120	2.6	34	91	2.7	44	58
30	31.07.02 / Nr. 50	26	79	3.0	19	57	3.0	63	58
31	15.08.02 / Nr.1	129	-----	-----	97	-----	-----	77	72
32	15.08.02 / Nr.2	97	-----	-----	70	-----	-----	97	68
33	15.08.02 / Nr.3	111	-----	-----	78	-----	-----	118	110
34	15.08.02 / Nr.4	130	-----	-----	84	-----	-----	79	75
35	16.08.02 / Nr. 5	162	-----	-----	119	-----	-----	50	58
36	16.08.02 / Nr. 6	199	-----	-----	141	-----	-----	156	87
37	16.08.02 / Nr. 7	144	-----	-----	104	-----	-----	146	70
38	16.08.02 / Nr. 8	160	-----	-----	118	-----	-----	62	114

Tabelle A1-16: Messprotokoll von Rheinfelden (AG).

17.3 Zusammenstellung der Messergebnisse 7. November 2002 (M13):

Messprotokoll von Rheinfeldern								
Materialnummer:		46690						
Untersuchtes Material:		GW, Kiessand I mit Asphaltgranulat						
FDVK:		Ammann Tandemwalze AV 95						
Messstufe:		1 und 2						
k _B -Faktor:		1.0						
Punkt Nr.	Plattendruckversuch						FDVK	
	M _{E1} [MN/m ²]	M _{E2} [MN/m ²]	M _{E2} /M _{E1} [-]	E _{V1} [MN/m ²]	E _{V2} [MN/m ²]	E _{V2} /E _{V1} [-]	k _B [MN/m]	k _B [MN/m]
							Stufe 1	Stufe 2
1	120	500	4.2	83	310	3.8	124	118
2	98	429	4.4	68	273	4.0	100	92
3	83	273	3.3	59	184	3.1	123	118
4	81	300	3.7	55	209	3.8	112	105
5	74	273	3.7	52	196	3.8	134	122
6	79	300	3.8	55	214	3.9	141	121

Tabelle A1-17: Messprotokoll von Rheinfeldern (AG).

Anhang 2

Fotodokumentation

18 Baustelle Teufen (AR), 1. Mai 2002



Abbildung A2-1: Prüffläche auf der Dammschüttung der Strassenbaustelle in Teufen. Material siltiger Sand ohne Kies (SM).



Abbildung A2-2: Material für die Dammschüttung in Teufen. Siltiger Sand ohne Kies (SM).

19 **Baustelle Neuhaus (SG), 8. Mai 2002**



Abbildung A2-3: Prüffläche auf der zementstabilisierten Foundationsschicht der Strassenbaustelle in Neuhaus. Material siltiger Sand mit Kies (SM).



Abbildung A2-4: Statischer Plattendruckversuch auf der zementstabilisierten Foundationsschicht in Neuhaus.

20 Baustelle Rona (GR), 23. Mai 2002



Abbildung A2-5: Prüffläche auf der Fundationsschicht bei der Strassenbaustelle in Rona. Material gut abgestufter Kies (GW), Kiessand I. Das Material wurde bei einem Wassergehalt $w_n = \text{ca. } 0\%$ eingebaut und verdichtet.



Abbildung A2-6: Fundationsschicht in Rona. Es handelte sich um gebrochenes Material mit einem sehr geringen Feinanteil ($\varnothing < 0.06 \text{ mm}$) von 1%. Unter diesen Bedingungen (kleiner Feinanteil und Wassergehalt annähernd null) kann das Bodenmaterial mit einer dynamisch angeregten Walze nicht verdichtet werden.

21 ***Dammaubstelle Rheinfelden (AG), Juli-August 2002***



Abbildung A2-7: Kalkstabilisierte Dammschüttung der Strassenbaustellen in Rheinfelden.



Abbildung A2-8: Verteilen des Kalkes für die Stabilisation.



Abbildung A2-9: Mischen des Kalks mit dem Schüttmaterial.



Abbildung A2-10: Dammschüttung in Rheinfelden. Gräulich ist deutlich der beigemischte Kalk zu erkennen. Der Kalk wurde beigegeben, weil die erforderlichen M_E -Werte nicht erreicht wurden.



Abbildung A2-11: Prüffläche in Rheinfelden.



Abbildung A2-12: Messung der FDVK-Werte in Rheinfelden. Bei der Walze handelt es sich um einen Ammann Walzenzug AC 110-2.

22 **Baustelle „Kohlendreieck“, 20. August 2002**



Abbildung A2-13: Bahnbaustelle am „Kohlendreieck“. Bomag Walzenzug 177DH-3 BVC.



Abbildung A2-14: Bahnbaustelle am „Kohlendreieck“. Ammann Walzenzug AC 110-2.

23 *Feldversuche Lyss (BE), 19. März 2003-05-19*



Abbildung A2-15: Versuchsfeld vor Beginn der Messungen.



Abbildung A2-16: Versuchsfeld nach Abschluss der Messungen. Die rechte Spur wurde vom Walzenzug von Bomag bearbeitet, die linke von Ammann.



Abbildung A2-17: Abdruck vom Plattendruckversuch Nummer 8 (Spur Bomag).

24 Statischer Plattendruckversuch



Abbildung A2-18: Statischer Plattendruckversuch. Der Druckstempel wird unter die Gegenlast (LKW) gestellt. Im Weiteren ist das Stativ zu sehen, an dem die Setzungsmessuhr befestigt ist und daher nicht im Einflussbereich der Setzungsmulde liegen darf.

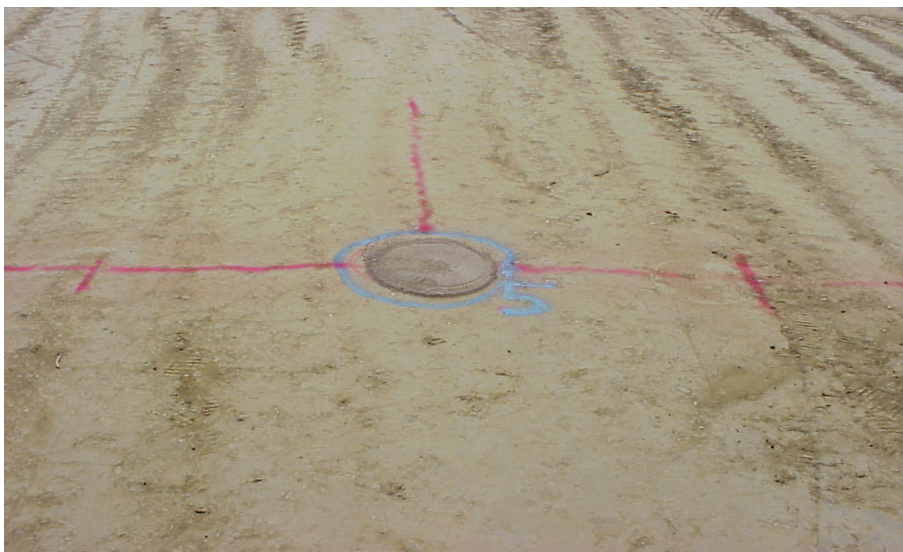


Abbildung A2-19: Statischer Plattendruckversuch. Zum Ausgleich von Unebenheiten wird eine hauchdünne Schicht aus trockenem Sand auf die Prüffläche gebracht. In diesem Fall ist die aufgebrachte Sandschicht zu dick. So wird bei der Belastung zuerst die Sandschicht zusammengedrückt und dadurch der Verformungsmodul verfälscht.

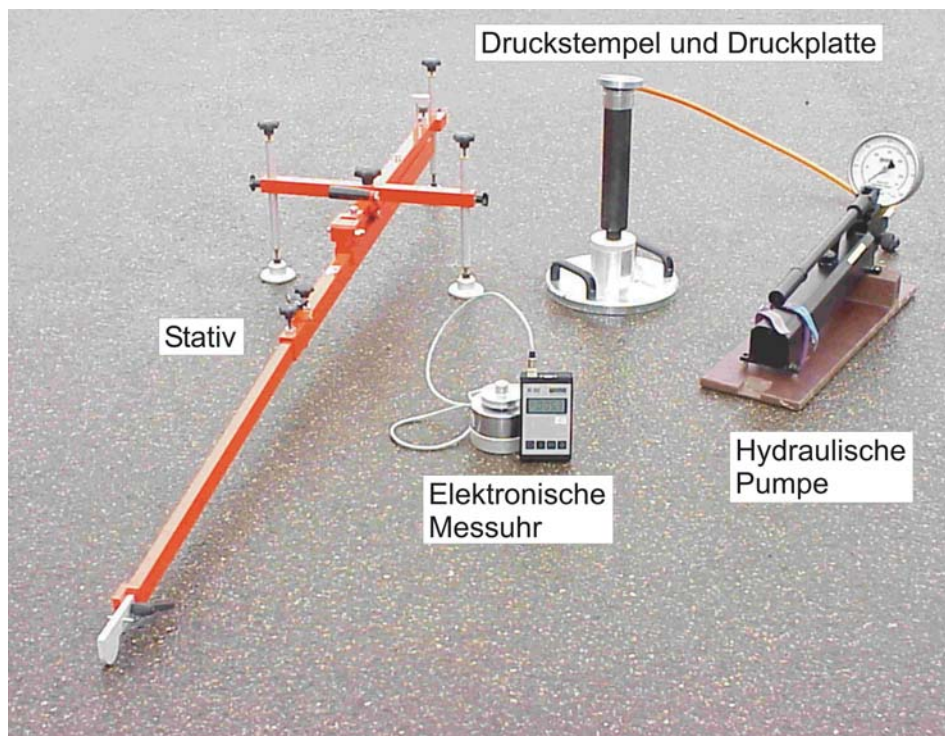


Abbildung A2-20: Utensilien des statischen Plattendruckversuches.