Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

> Schriftenreihe Heft 17

# Vergleichsuntersuchungen über die Wirkung von vibrierend und oszillierend arbeitender Verdichtungswalze

von Rudolf Floss Andreas Reuther

München, 1990

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

DISSERTATIONS- UND FOTODRUCK FRANK GmbH 8000 München 2, Gabelsbergerstr. 15, Tel. 288663

## Inhaltsverzeichnis

1.	Aufgabenstellung und Versuchsziel	1
2.	Verdichtungsprinzipien	4
2.1	Vibrierende Verdichtung	4
2.2	Oszillierende Verdichtung	5
3.	Maschinendaten	6
4.	Aufbau der Versuchsfelder und Versuchsausführung	7
4.1	Versuchsaufbau	7
4.2	Versuchsausführung	8
4.2.1	Unterbau	8
4.2.2	Frostschutzschicht	9
4.2.3	Hydraulisch gebundene Tragschicht	10
4.2.4	Bituminöse Oberbau-Schichten	11
5.	Boden- und Straßenbaustoffe	13
5.1	Unterbau	13
5.2	Frostschutzschicht	13
5.3	Hydraulisch gebundene Tragschicht	14
5.4	Bituminöse Tragschicht	16
5.5	Bituminöse Deckschicht	17

6.	Meßtechnik und Meßprogramm	18
6.1	Unterbau und Frostschutzschicht	18
6.2	Hydraulisch gebundene Tragschicht	20
6.3	Bituminöse Schichten	21
7.	Ergebnisse der Untersuchungen	23
7.1	Unterbau	23
7.1.1	Trockendichte	23
7.1.2	Verformungsmodul	28
7.1.3	Setzungsmessungen	30
7.1.4	Beobachtungen	30
7.2	Frostschutzschicht	31
7.2.1	Trockendichte	31
7.2.2	Verformungsmodul	33
7.2.3	Setzungsmessungen	34
7.2.4	Beobachtungen	35
7.3	Hydraulisch gebundene Tragschicht	36
7.3.1	Trockendichte	36
7.3.2	Setzungsmessungen	37
7.3.3	Druckfestigkeitsprüfungen	38
7.3.4	Beobachtungen	39

7.4	Bituminöse Oberbau-Schichten	39
7.4.1	Dichtemessungen	39
7.4.2	Setzungsmessungen	41
7.4.3	Einbautemperaturen	41
7.4.4	Ebenheit	42
7.4.5	Beobachtungen	42
8.	Nachuntersuchungen	43
8.1	Unterbaumaterial	43
8.1.1	Trockendichte	43
8.1.2	Verformungsmodul	44
8.1.3	Setzungsmessungen	46
8.1.4	Beobachtungen	47
8.2	Frostschutzschicht	47
8.2.1	Trockendichte .	48
8.2.2	Verformungsmodul	49
8.2.3	Setzungsmessungen	49
8.2.4	Beobachtungen	49
9.	Dynamische Verdichtungskennwerte	51
10.	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlußfolgerungen	53
10.1	Allgemeines	53
10.2	Unterbau	55
10.3	Frostschutzschicht	56

10.4	Hydraulisch gebundene Tragschicht	59
10.5	Bituminöse Oberbauschichten	60
10.6	Schlußbemerkungen	61
11.	Literaturverzeichnis	62
12.	Bilder	64
13.	Tabellen	90
14.	Photos	112

#### 1. Aufgabenstellung und Versuchsziel

Seit Jahrzehnten bewähren sich nunmehr die mit Vibratoren ausgerüsteten Verdichtungsgeräte für das Verdichten von Bodenschichten im Erd- und Tiefbau, sowie von Tragschichten und dünnlagigen Deckschichten im Landverkehrswegebau. Einerseits ist die Wirkleistung der Vibrationsverdichtungsgeräte maschinentechnisch so optimiert worden, daß die für Erdbauwerke, Verkehrs- und Staudämme, sowie Straßen- und Eisenbahnkörper geforderten Kriterien in der Regel erfüllt werden könne, andererseits konnte die Maschinentechnik auch die Flächenleistung dieser Geräte soweit erhöhen, daß bei richtiger Einsatzplanung die Verdichtungsleistung auf die jeweilige Förder- und Einbauleistung abgestimmt werden konnte. So stehen der Praxis seit langem sowohl für kleine Erdbaumaßnahmen, wie sie z.B. der Leitungstiefbau aufweist, bis hin zu Großbaustellen mit enormen Tagesleistungen geeignete Vibrationsverdichtungsgeräte zur Verfügung, mit denen sich die geforderte Qualität sicher herstellen läßt.

-1-

In jüngster Zeit bietet der Baumaschinenmarkt einige neue Verdichtungswalzen an, die statt des Vibrators mit einem sog. Oszillator ausgerüstet sind. Die maschinentechnischen Unterschiede der beiden Wirkprinzipien sind in Abschnitt 2 näher beschrieben. Im wesentlichen wird beim oszillierenden Prinzip durch Tangentialkräfte, die ein laufend wechselndes Drehmoment erzeugen, vorwiegend Schubenergie in die zu verdichtende Masse abgegeben. Beim vibrierenden Walzenprinzip versetzen die Fliehkräfte der Exzentermassen den Walzenkörper in rotierende Schwingungen, die je nach Steifigkeit der Unterlage vorwiegend Druck und zum geringeren Schubenergie der zu verdichtenden Masse zuführen. Sofern sich bei der gewählten Schwingungsfrequenz und Schwingungsamplitude keine volle Ankopplung der Vibrationswalze an die zu verdichtende Masse einstellt, kann es bei rein kohäsionslosen Böden und Baustoffen direkt im obersten, nicht beauflasteten Bereich nur zu relativ geringer Verdichtung kommen.

Mit der Entwicklung der oszillierenden Verdichtungstechnik wurde deshalb darauf abgezielt, dieses nachteilige Phänomen an der freien Oberfläche der zu verdichtenden Unterlage zu vermeiden und im übrigen auch insgesamt eine noch verbesserte Verdichtungswirkung zu erreichen. Die wenigen bisher existierenden Untersuchungen über oszillierend arbeitende Verdichtungswalzen geben jedoch keinen eindeutigen Aufschluß über Wirkung und Leistungsverhalten dieser Geräte. Sie genügen weder in praktischer noch in wissenschaftlicher Hinsicht, weil ihnen die Systematik fehlt, um die Einflußgrößen beurteilen zu können.

Aus diesen Gründen war es an der Zeit, durch eine systematische, vergleichende Untersuchung unter genauen reproduzierbaren Versuchsbedingungen aufzuklären, wie unterschiedlich sich vibrierend und oszillierend arbeitende Walzen tatsächlich verhalten, um hieraus Erkenntnisse für maschinelle Weiterentwicklungen gewinnen zu können. Diese Untersuchungen fanden in der Versuchshalle des BOMAG-Forschungszentrums in Boppard statt, deren überdachte Versuchsfläche von 40 m Länge und 10,5 m Breite ideale Voraussetzung bot, um unabhängig vom Witterungsverlauf über einen längeren Zeitraum

- 2 -

arbeiten und vergleichen zu können. Zum Einsatz kam eine Tandem-Vibrationswalze BW 160 A, bei der eine der beiden Bandagen mit Vibrationsschwingsystem gegen eine Bandage mit oszillierend wirkendem Drehschwinger ausgetauscht wurde. Damit waren die Voraussetzungen für eine volle Vergleichbarkeit der maschinentechnischen Parameter geschaffen, weil gleiche Abmessung, Linienlast, Frequenz und Arbeitsgeschwindigkeit gegeben waren.

In der Absicht, möglichst mehrere Boden-, Baustoff- und Schichtvarianten zu erfassen, wurde für die Untersuchung ein standardisierter Straßenaufbau (Beschreibung siehe Abschnitt 4 und 5) gewählt. Im Vordergrund stand dabei nicht die Frage, ob und wie sich die Mindestanforderungen der für diesen standardisierten Aufbau geltenden Vorschriften erfüllen lassen, sondern allein die Sicherstellung der Vergleichbarkeit für die beiden genannten Verdichtungsprinzipien.

Außerdem war in einem Zusatzprogramm zu untersuchen, bei welchen Frequenz- bzw. Amplitudenspektren die Vibrationswalze zu Verdichtungen führt, die auch an der nicht beauflasteten Oberfläche der zu verdichtenden Masse die erforderliche Qualität sicherstellt.

- 3 -

## 2. Verdichtungsprinzipien

#### 2.1 Vibrierende Verdichtung

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Vibrators. Die Vibration wird von einem Kreisschwinger erzeugt. Exzentrisch zum Mittelpunkt der im Zentrum der Bandage umlaufenden Rotorwelle angeordnete Massen erzeugen Fliehkräfte, die den Walzenkörper in eine rotierende Schwingung versetzen.

Die Schwingbewegung eines Massenpunktes der Bandage infolge der Erregung und der elastischen Bodendämpfung ist eine Überlagerung zweier einfacher, harmonischer Schwingungen, die entlang senkrecht zueinander stehender Achsen verlaufen. Im Idealfall vollführt das Verdichtungswerkzeug (vom Boden abgehoben) eine Kreisbewegung. Für die Beschleunigung in der Bandagenmitte stellt sich ein rein sinusförmiger Verlauf ein. Dieser Fall entspricht dem Grenzfall eines lose angekoppelten bzw. extrem weichen Bodens.

Mit zunehmender Bodensteifigkeit verformt sich der Kreis näherungsweise in eine Ellipse, deren Hauptachsen gegenüber dem Umlaufsinn in entgegengesetzter Richtung gedreht sind. Bei konstanter Erregerfrequenz ist das Verhältnis der Ellipsen-Achsen ein Maß für die erreichte Verdichtung. Mit Zunahme der Verdichtung des Bodens nimmt das Verhältnis bzw. die Differenz der Ellipsen-Hauptachsen zu, bis der Zustand des Springens erreicht wird /3/, /7/. Durch diese Bewegungsart wird dem Boden Druck- und Schubenergie zugeführt, wobei der Schubanteil der gesamten transferierten Energie bei 20 bis 25 % liegt /7/.

#### 2.2 Oszillierende Verdichtung

Den prinzipiellen Aufbau des Oszillators zeigt Bild 2. Mittig in der Bandage angeordnet ist die Antriebswelle. Sie treibt über Zahnriemen zwei außermittig angeordnete Exzenterwellen an. Die Exzenterwellen haben gleichen Drehsinn; die Unwuchtgewichte sind 180 Grad phasenverschoben. Durch diese Anordnung heben sich die Radialkräfte zu jedem Zeitpunkt auf. Die verbleibenden Tangentialkräfte erzeugen ein laufend wechselndes Drehmoment.

Die Verfechter der oszillierenden Verdichtung gehen davon aus, daß die Verdichtung in der Hauptsache durch zyklisch in die Unterlage eingeleitete Schubenergie bewirkt wird. Durch die Drehschwingung der Bandage wird mit Unterstützung der statischen Achslast Schubenergie an das zu verdichtende Material übertragen.

Das oszillierende Verdichtungswerkzeug vollführt im Idealfall (Bandage vom Boden abgehoben) eine reine Drehschwingung. Der Bandagenmittelpunkt ist in Ruhe. Bei Ankoppelung der zu verdichtenden Bodenmasse verschiebt sich der Ruhepunkt vertikal in Richtung Boden. Damit wird der reinen Drehschwingung eine translatorische Bewegung überlagert. Die Größe der translatorischen Bewegung (horizontaler

- 5 -

Anteil) wird bei der Meßwerterfassung als Maß für den erzielten Verdichtungszustand herangezogen.

## 3. Maschinendaten

Zur Verdichtung wurde eine BOMAG-Walze vom Typ BW 160 AD 1 verwendet (Photo 1). Es handelt sich um eine Tandem-Vibrationswalze mit zwei Amplituden, die sowohl im Erdbau als auch im bituminösen Straßenbau eingesetzt wird. Die hintere vibrierende Bandage wurde gegen eine Bandage mit Oszillations-Schwingsystem ausgetauscht. Die Walze wurde vor dem Testeinsatz auf einer öffentlichen Waage verwogen. Die Differenz in der statischen Achslast zwischen Vorder- und Hinterachse von 400 kg wurde während des Verdichungsbetriebes durch Füllen des vorderen Wassertanks ausgeglichen, so daß auf beiden Achsen eine statische Linienlast von 28 kg/cm sichergestellt war.

Zur Nachverdichtung der Frostschutzschicht wurde eine Vibrationsplatte vom Typ BPR 50/55 eingesetzt (Photo 2). Die für diese Testreihe wesentlichen Maschinendaten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

#### 4. Aufbau der Versuchsfelder und Versuchsausführung

## 4.1 Versuchsaufbau

Für den Versuch wurde ein standardisierter Straßenaufbau gemäß RSTO 86, Bauklasse 1 gewählt:

officer baa				
Frostschutzschicht	d	=	33	СШ
hydraulisch gebundene Tragschicht	d	=	15	ст
bituminöse Tragschicht	d	=	10	СШ
bituminöse Deckschicht	d	=	4	cm
	Frostschutzschicht hydraulisch gebundene Tragschicht bituminöse Tragschicht bituminöse Deckschicht	Frostschutzschicht d hydraulisch gebundene Tragschicht d bituminöse Tragschicht d bituminöse Deckschicht d	Frostschutzschichtd =hydraulisch gebundene Tragschichtd =bituminöse Tragschichtd =bituminöse Deckschichtd =	Frostschutzschichtd = 33hydraulisch gebundene Tragschichtd = 15bituminöse Tragschichtd = 10bituminöse Deckschichtd = 4

Bild 3 zeigt eine Schnittzeichnung des Versuchsaufbaus. Die Unterbaulagen und die Frostschutzschicht wurden über die gesamte Breite der Versuchsgrube eingebaut. Die Abmessungen der Oberbauschichten erstreckten sich über eine Länge von je 30 m und eine Breite von je 3 m. Die Baustoffeigenschaften gehen aus Kapitel 5 hervor.

Im Vibrator-Versuchsfeld arbeitete nur die vibrierende Bandage dynamisch, während die mit dem Oszillationsschwingsystem ausgerüstete Bandage statisch mitlief. Entsprechendes gilt für das Oszillator-Versuchsfeld. Es wurde darauf geachtet, daß die Abfolge 'dynamisch arbeitende Bandage – statisch mitlaufende Bandage' für die entsprechenden Übergänge in den beiden Versuchsfeldern gleich war. Lief beispielsweise im Vibrator-Versuchsfeld beim Übergang X die vibrierende Bandage vor und die mit dem Oszillator ausgerüstete Bandage nach, so war es im Oszillator-Versuchsfeld entsprechend umgekehrt.

## 4.2 Versuchsausführung

#### 4.2.1 Unterbau

Die Versuchsgrube wurde bis 120 cm Tiefe ausgehoben. Der Untergrundboden wurde mit einem Radlader durchgemischt und mit Wasser auf einen mittleren Wassergehalt von 4,5 – 5 % angefeuchtet. Auf ein Anfeuchten auf den laut Proctorcharakteristik optimalen Wassergehalt von 6 % wurde bewußt verzichtet, da das Material in diesem Bereich sehr empfindlich anspricht und leicht in den überfeuchten und damit wenig tragfähigen Bereich "umkippt". Bis zum Einbau wurde das Material in einer Box gelagert und durch Abdecken mit einer Folie gegen Austrocknung geschützt.

Vor dem Einbau wurde die Sohle der Versuchsgrube mit einem 17 t Walzenzug (BW 217 D) verdichtet, bis mit dem BOMAG-Terrameter /6/ keine weitere Verdichtungszunahme zu verzeichnen war. Der Untergrundboden wurde mit Hilfe eines Radladers in der vorgesehenen Höhe aufgeschüttet (Photo 3). Der Einbau und die Verdichtung erfolgte in drei Lagen.

Die Verdichtung wurde mit einer für Erdbauarbeiten üblichen Geschwindigkeit von 2 km/h und mit einer Vibrationsfrequenz von 30 Hz (große Amplitude) durchgeführt. In der Regel waren 16 Übergänge erforderlich. Nach dem ersten Übergang wurden die für die Dichtemessung nötigen PVC-Rohre eingebaut (siehe dazu Abschnitt 6.1). Gemessen wurde jeweils nach einer Verdopplung der Übergangszahl, d.h. nach 2, 4, 8 und 16 Übergängen. Aufgrund der großen Zahl der Meßpunkte (zwischen 50 und 60 einzelne Dichtemessungen pro Lage und Verdichtungsgerät) nahmen allein diese Dichtemessungen zwei Tage in Anspruch. Die Lastplattenversuche wurden entprechend DIN 18 134 /13/ einen Tag nach Verdichtungsende (16. Übergang) ausgeführt, so daß die Messungen einer Lage mit Vorbereitungsarbeiten eine Woche Zeit in Anspruch nahmen. Als Maß für das Verdichtungsende wurde der mittlere erzielte Verdichtungsgrad (gemittelte Trockendichte über der Meßtiefe/Proctordichte beim Einbauwassergehalt) herangezogen. Nach jedem Arbeitstag wurden die Versuchsfelder sorgfältig mit Folie abgedeckt, um ein Austrocknen der Oberfläche zu vermeiden (Photo 4). Photo 5 zeigt die Schüttung von Lage 3 kurz vor Verdichtungsbeginn.

## 4.2.2 Frostschutzschicht

Das Frostschutzmaterial wurde mit dem Radlader geschüttet. Die Überhöhung der Schüttung betrug 14 % der Solldicke. Um entsprechend der Proctorcharakteristik eine optimale Verdichtung zu erzielen, wurde das Material kurz vor der Verdichtung von seinem natürlichen Feuchtegehalt von 3,0 % auf i.M. 4,5 % angefeuchtet. Auf eine weitere Materialanfeuchtung auf den im Proctorversuch ermittelten optimalen Wassergehalt von 6 % wurde verzichtet. Bei der Anfeuchtung auf i.M. 4,5 % konnte bereits einen Tag nach der Verdichtung ein Feuchtegradient zwischen 3,7 % in 5 cm Tiefe und 5,5 % in 25 cm Tiefe beobachtet werden. Bei einer Anfeuchtung auf i.M. 6 % wäre dieser Feuchtegradient mit Sicherheit krasser ausgefallen. Ziel war allerdings, die Verdichtung bei möglichst geringem Feuchtegradienten durchzuführen, um so ein gleichmäßiges Verdichtungsergebnis über die gesamte Meßtiefe zu erreichen.

Vorversuche hatten gezeigt, daß die Walze bei 2 km/h Fahrgeschwindigkeit sowohl vibrierend als auch oszillierend eine hohe Bugwelle aufschiebt. Um diesen für die Oberflächenfestigkeit nachteiligen Effekt abzumindern, wurde die Walzgeschwindigkeit im Vergleich zum Unterbau um 1,5 auf 3,5 km/h (ca. 1 m/sec.) erhöht. 8 Übergänge wurden mit 30 Hz, 4 weitere mit 45 Hz gefahren. Dichtemessungen erfolgten nach 4, 8 und 12 Übergängen. Der Verformungsmodul wurde einen Tag nach Verdichtungsende mit dem statischen Lastplattendruckversuch ermittelt.

Nach Abschluß der Walzübergänge wurde die Wirkung einer schweren Vibrationsplatte (BPR 50/55, Betriebsgewicht = 420 kg, statische Flächenlast = 1632 kg/m<sup>2</sup>) zur Nachverdichtung der Schicht getestet.

#### 4.2.3 Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)

Das Material für die hydraulisch gebundene Tragschicht wurde von einem ortsansässigen Betonhersteller geliefert. Um einer Materialentmischung entgegenzuwirken, wurde das fertige Mischgut auf LKW zum Einbauort transportiert. Eingebaut wurde in einer Breite von 3,0 m mit einem Straßenfertiger bei einer Überhöhung von 20 % der Solldicke (siehe Photo 6). Die Stampfbohle lief während des Einbaues so niederfrequent wie möglich, um eine nennenswerte Verdichtung durch den Fertiger zu vermeiden. Auf diese Weise konnte eine möglichst große Verdichtungsspanne für die eigentlichen Verdichtungsversuche gewährleistet werden.

Der Verdichtungsvorgang verlief ähnlich wie auf der Frostschutzschicht mit abgestufter Vibrationsfrequenz. Einem ersten statischen Übergang folgten 4 Übergänge mit 30 Hz Vibrationsfrequenz sowie 3 weitere Übergänge mit 45 Hz. Gefahren wurde nur eine Spur in der Mitte des Versuchsfeldes entsprechend der Bandagenbreite von 168 cm um Überlappungen zu vermeiden. Ein realer Bezug zwischen Übergangszahl und Meßwert konnte dadurch garantiert werden. Die Randbereiche, die zur Meßwertgewinnung nicht herangezogen wurden, wurden nach Abschluß der Verdichtung mit einer Vibrationsplatte (BPR 50/55) nachverdichtet. Die Oberfläche wurde zwei Tage lang befeuchtet und durch Abdecken mit Folie gegen Austrocknen geschützt.

## 4.2.4 Bituminöse Oberbau-Schichten

Der Einbau erfolgte mittels Fertiger. Die Deckschicht wurde auf die noch warme Tragschicht (mittere Oberflächentemperatur = 50 °C) aufgebaut (warm in warm Bauweise). Die Gefahr von Rißbildungen oder Abtrennungen konnte dadurch verhindert werden. Zum anderen wurde ein zu rasches Auskühlen der Deckschicht vermieden, so daß genügend Zeit für die Messungen zwischen den jeweiligen Walzübergängen verblieb.

Die Materialien für das Oszillator-Versuchsfeld wurden mit einer ca. 20 – 30 Grad höheren Temperatur angeliefert. Entscheidend für den Beginn des Verdichtungsvorganges und damit für die Sicherstellung der Vergleichbarkeit waren annähernd gleiche Materialtemperaturen zum Zeitpunkt der Verdichtung. So wurde z.B. mit dem Einbau der "Oszillator-Deckschicht" vom Zeitpunkt des Eintreffens des Mischgutes bis zum Einbau über eine Stunde gewartet, bis die Mischguttemperatur von i.M. 220 °C auf i.M. 190 °C abgesunken und somit der Temperatur der "Vibrator-Deckschicht" beim Einbau entsprach.

Die Tragschichten wurden mit sechs 30 Hz- und zwei nachfolgenden 45 Hz-Übergängen verdichtet. Auf den Deckschichten wurden sechs Übergänge mit 45 Hz gefahren.

## 5. Boden- und Straßenbaustoffe

#### 5.1 Unterbau

Als Unterbaumaterial wurde ein mittelbindiger, gemischtkörniger Kies der Frostempfindlichkeitsklasse F2 (gering bis mittel frostempfindlich) verwendet. Sieblinie /11/ und Proctorcharacteristik /12/ können den Bildern 4 und 5 entnommen werden. Die ZTVE-StB 76 fordert für diese Bodengruppe (GU nach DIN 18 196 /14/) einen Verdichtungsgrad bis 50 cm unterhalb des Planums von D<sub>Pr</sub> = 100 % und einen Verformungsmodul Ev2 von mindestens 100 MN/m<sup>2</sup>.

Folgende Kennwerte wurden ermittelt:

-	Kornanteil < 0,063 mm	12 %
-	Korndichte	g <sub>c</sub> = 2650 kg/m³
-	Proctordichte	$q_{D_{m}}^{3} = 2235 \text{ kg/m}^{3}$
-	optimaler Wassergehalt	$W_{D_{r}}^{P_{r}} = 6,1\%$

Da der Einbauwassergehalt ( $w_E$ ) i.M. ca. 1,5 % unterhalb des optimalen Wassergehaltes ( $w_{PP}$ ) lag, wurde zur Beurteilung des Verdichtungsgrades die jeweilige im Proctorversuch ermittelte Dichte beim Einbauwassergehalt ( $g_F$ ) herangezogen.

## 5.2 Frostschutzschicht

Als erste Tragschicht wurde eine Frostschutzschicht aus einem weitgestuften, rundkörnigen Kies-Sand-Gemisch der Bodengruppe GW und der Frostempfindlichkeitsklasse F1 (nicht frostempfindlich) hergestellt. Sieblinie und Proctorcharacteristik sind in den Bildern 6 und 7 dargestellt. Die Sieblinie zeigt eine stetig verlaufende Körnungslinie innerhalb des gemäß ZTVT-StB 86 vorgeschriebenen Bereiches.

Folgende Kennwerte gelten für diesen Boden:

-	Kornanteil < 0,063 mm	1,9 %
-	Kornanteil > 16 mm	31 %
-	Kornanteil > 2 mm	59 %
-	Ungleichförmigkeitsgrad	U = 49,5
-	Korndichte	$g_{c} = 2633 \text{ kg/m}^{3}$
-	Proctordichte	$g_{Dm}^{3} = 2126 \text{ kg/m}^{3}$
-	optimaler Wassergehalt	WD = 6 %
-	dichteste Lagerung	$max S d^{PT} = 2180 \text{ kg/m}^3$
-	lockerste Lagerung	$min \& d = 1870 \ kg/m^3$

Zur Beurteilung des Verdichungsgrades wurde die im Proctorversuch ermittelte Dichte beim Einbauwassergehalt in Relation gesetzt ( $S_E$ = 2110 kg/m<sup>3</sup>, w = 4,5 %).

## 5.3 Hydraulisch gebundene Tragschicht

Auf der Frostschutzschicht wurde eine hydraulisch gebundene Tragschicht eingebaut. Grundmaterial war ein ungebrochenes Kies-Sand-Gemisch gemäß ZTVT-StB 86 (Korngemisch 0/32). Die erforderlichen Eignungsprüfungen wurden von dem zuständigen Betonlieferanten durchgeführt. Die Sieblinie des Grundmaterials (ohne Bindemittel) sowie die bei der Eignungsprüfung ermittelte Proctorcharacteristik für einen mittleren Bindemittelgehalt von 4 % zeigen die Bilder 8 und 9. Folgende Kennwerte gelten für das HGT-Material:

-	Ungleichförmigkeitsgrad	U	=	32	
-	Korndichte (Grundmaterial)	80	=	2650	kg/m <sup>3</sup>
-	Proctordichte	25			-
	(Zementgehalt = 4 %)	Spr	=	2168	kg/m <sup>3</sup>
-	optimaler Wassergehalt	WD	=	7,4	%
-	Proctordichte des angelieferten	P	r.		
	Mischgutes beim Einbauwasser-	-			
	gehalt	S <sub>E</sub>	=	2210	kg/m <sup>3</sup>
-	Éinbauwassergehalt i.M.	Ŵ	=	6,0	%
-	erforderlicher Zementgehalt	Ľ		5,0	%
-	WZ-Wert	WZ	=	1,2	

Bei dem Bindemittel handelte es sich um einen Portlandzement PZ 35F mit einer Normenfestigkeit von  $50 \pm 2$  N/mm<sup>2</sup>. In der Eignungsprüfung wurde ein recht hoher Zementgehalt von 5 % ermittelt. Für die Herstellung der Proctorkörper zur Feststellung der Druckfestigkeit arbeitete der Betonlieferant nach dem "Merkblatt für Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit Zement" (Ausgabe 1975) und nicht nach der TP HGT-StB 86. In diesem Merkblatt wird empfohlen, bei der Herstellung der Probekörper einen 100er Proctortopf zu verwenden, wobei der Anteil des Bodens 20/63 durch einen gewichtsmäßig gleichgroßen Anteil des Bodens 4/20 zu ersetzen ist. Bei einem Anteil der Korngruppe 20/32 von ca. 15 % verändert man durch diese Vorgehensweise die Materialzusammensetzung erheblich. Um für dieses "veränderte" Material eine gleiche Endfestigkeit zu erzielen, muß eine relativ große Zementmenge zugemischt werden.

Nach Erfahrungen in der Schweiz ist nicht der nach Proctor ermittelte optimale Wassergehalt als der günstigste anzusehen, sondern derjenige Einbauwassergehalt, bei dem die Kontinuität der flüssigen Phase nicht mehr gegeben ist. Demnach sollte beim Einbau eine Sättigungszahl von  $S_r = 0,6...0,8$  eingehalten werden. Für einen Einbauwassergehalt von w<sub>F</sub> = 6,0 % ist diese Forderung erfüllt.

Die nach Proctor ermittelte Trockendichte beim Einbauwassergehalt ergab einen Wert von  $g_E^2 = 2210 \text{ kg/m}^3$  und wurde zur Beurteilung der Verdichtung herangezogen. Da die in der Eignungsprüfung ermittelte Proctordichte ( $g_{Pr}$ ) für nur 4 % Zement und 7,4 % Wasser ermittelt wurde, erscheint diese als Vergleichsmaß hier nicht sinnvoll.

## 5.4 Bituminöse Tragschicht

Für die bituminöse Tragschicht wurde gemäß ZTVT-StB 86 ein Bitukies (0/32) der Mischgutart C mit 30 % gebrochenem Splitt gewählt.

Laut Eignungsprüfung des Lieferanten gelten folgende Kenngrößen (vom März 1988):

-
%
%
%
kN
mm
$kg/m^{3}$
Vo1%
135

Entgegen den Angaben in der Eignungsprüfung lieferte die Feststellung der Marshall-Dichte ( $g_{Ma}$ ) des Materials im Anlieferungszustand einen Wert von nur  $g_{Ma}$  = 2324 kg/m<sup>3</sup>. Für die Beurteilung des Verdichtungsgrades wurde in Absprache mit dem Lieferanten dieser Wert angesetzt.

## 5.5 Bituminöse Deckschicht

Als Deckschicht wurde ein Asphaltbeton 0/11 S gemäß ZTVbit-StB 84 hergestellt, deren Hohlraumgehalt 7 % nicht übersteigen darf.

Laut Eignungsprüfung des Lieferanten gelten folgende Kenngrößen (vom Februar 1989):

_	Basalt-Edelsplitt	8/11		23	%
-	Moräne-Edelsplitt	5/8		15	%
-	Basalt-Edelsplitt	2/5		10	%
-	Basalt-Edelbrechsand	0/2		51	%
_	Kalksteinmehl			1	%
-	Bindemittelsorte			B 80	
-	Gesamtbindemittelgehalt			6,61	%
	(bezogen auf 100 % Miner	al)			
-	Marshallstabilität (bei	60 °C)		8,9	kN
-	Fließwert (bei	60 °C)		3,5	mm
-	Marshalldichte	SMA		2525	kg/m <sup>a</sup>
-	Hohlraumgehalt	H	it =	3,1	%
		U	10		

Bei der Eigenüberwachungsprüfung am angelieferten Baustoffgemisch wurde eine Marshalldichte von  $g_{Ma}$ = 2451 kg/m<sup>3</sup> ermittelt, die zur Beurteilung des Verdichtungsgrades zugrundegelegt wurde.

## 6. Meßtechnik und Meßprogramm

#### 6.1 Unterbau und Frostschutzschicht

## DICHTEMESSUNGEN UND WASSERGEHALT

Sämtliche Dichteergebnisse wurden mit radiometrischen Meßverfahren gewonnen, bei denen die Streuung bzw. Absorption der Gamma-Strahlen ein Maß für die Dichte des durchstrahlten Mediums ist.

Die Dichtemessungen im Unterbau und in der Frostschutzschicht wurden mit der Doppelsonde /1/ ausgeführt. Photo 7 zeigt das Meßgerät im Einsatz. Strahler und Detektor befinden sich parallel zueinander in PVC-Rohren. Da eine absolut genaue Parallelität der Meßrohre nicht gewährleistet werden kann, die Abstände von Strahler und Detektor aber das Ergebnis stark beeinflussen, werden die Rohrabstände mit speziell angefertigten Abstandslehren vor jedem Meßvorgang exakt ausgemessen. Ein Rechenprogramm errechnet daraus die wahre Meßstrecke in der jeweiligen Tiefe, die zusammen mit der Gamma-Zählrate und dem Wassergehalt die Trockendichte liefert. Die Messungen erfordern vorher eine Eichung an speziell dafür angefertigen Bezugsstandards. Der relative Fehler der Dichte beträgt etwa 1 %, so daß eine sehr gute Reproduzierbarkeit des Verfahrens gegeben ist.

Die Dichten wurden entlang der Meßstrecke an 11 Punkten in Tiefenabstufungen von je 5 cm und jeweils 2 m Meßabstand ermittelt. Die Mittelung der Meßwerte ergibt ein repräsentatives Dichteprofil der jeweiligen Lage über der Meßtiefe. Der zur Ermittlung der Trockendichte erforderliche Wassergehalt wurde durch Ofentrocknung einer Bodenprobe bei 105 C ermittelt.

#### SETZUNGSMESSUNGEN

Die Änderungen der Schichtdicken wurden durch Setzungsmessungen auf konventionelle Weise mit Nivelliergerät und Meßlatte ermittelt.

Schütthöhe – Lagendicke Setzung (%) = ----- x 100 Schütthöhe

## LASTPLATTEN-VERSUCHE

Die Verformungsmoduln Ev1 und Ev2 wurden nach DIN 18 134 einen Tag nach Abschluß der Verdichtung mit dem statischen Lastplattendruckversuch in sechs Punkten ermittelt und der Mittelwert hieraus als Maß für die jeweilige Lage zugrundegelegt. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe eines Rechenprogrammes, das nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ein Polynom 1. Grades mit vorgegebener Genauigkeit aus den eingelesenen Meßwerten errechnet.

#### DYNAMISCHE MESSUNG DER VERDICHTUNG

Verdichtungsgeschwindigkeit und Vibrationsfrequenz wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Der Vibrator war mit einem BOMAG-TERRAMETER /6/, /7/ ausgestattet. Der mit diesem Gerät aufgezeichnete OMEGA-Wert läßt eine Aussage über die Zunahme der Bodensteifigkeit und über vorhandene Unstetigkeiten in der Verdichtung zu. Aufgrund der äußerst sorgfältigen Materialaufbereitung lag nach der Schüttung ein gleichmäßig durchfeuchtetes, homogenes Material vor, das nur geringfügige Unstetigkeiten in der Verdichtung aufwies. Der OMEGA-

- 19 -

Wert war nahezu über die gesamte Meßstrecke konstant. Beim Oszillator wurde die horizontale Beschleunigungskomponente in Bandagenmitte aufgezeichnet und einer entsprechenden Auswertung unterzogen.

Die Diskussion der Meßwerte befindet sich in Kapitel 9. Da sich allerdings zwischen dem OMEGA-Wert beim Vibrator und der entsprechend verarbeiteten horizontalen Beschleunigungskomponente beim Oszillator kein eindeutiger Zusammenhang herstellen ließ, haben diese Kenngrößen für den eigentlichen Vergleich nur eine untergeordnete Bedeutung.

## 6.2 Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)

#### DICHTEMESSUNGEN

Da die Dichteänderung der hydraulisch gebundenen Tragschicht in Abhängigkeit von der Übergangszahl registriert werden sollte, zum anderen aber wegen des fortschreitenden Abbindeprozesses nur eine begrenzte Zeit für die Messungen zur Verfügung stand, kamen radiometrische Messungen mit der Doppelsonde hier nicht in Frage. Für die Messung wurde deshalb eine TROXLER-Aufsetz- und Einstichsonde vom Typ 3440 für kombinierte Dichte- und Feuchtemessungen verwendet, die von der Firma TROXLER speziell für diese Versuchsserie zur Verfügung gestellt worden war /4/, /5/, /9/. Gemessen wurde im Back-Scatterverfahren (Rückstreuverfahren) während der Walzübergänge und im Direct-Transmission-Mode (Durchstrahlmethode) nach Verdichtungsende. Unebenheiten an der Oberfläche wurden durch eine dünne Lage Quarzsand ausgeglichen. Mit dieser Meßmethode konnte auch die Dichte der Schüttung unmittelbar hinter dem Fertiger ermittelt werden.

Nach Versuchsabschluß wurden außerdem an jedem Meßpunkt Bohrkerne entnommen und deren Dichte durch Tauchwägung bestimmt (siehe Photos 8 und 9).

#### SETZUNGSMESSUNGEN

Die Setzungen wurden analog Abschnitt 6.1 gemessen.

ÜBERPRÜFUNG DER EIGENSCHAFTEN DES ANGELIEFERTEN BAUSTOFF-GEMISCHES Am angelieferten Baustoffgemisch wurden Materialproben entnommen und daran die Proctordichte beim Einbauwassergehalt ermittelt. Der Wassergehalt wurde entsprechend DIN 1048 /15/ im Darrversuch ermittelt. Pro Meßbahn wurden gemäß TP HGT-StB 86 drei Probekörper im Proctorzylinder verdichtet und diese bis zur Druckfestigkeitsprüfung 28 Tage lang bei einer Luftfeuchtigkeit > 95 % gelagert.

## 6.3 Bituminöse Schichten

#### DICHTEMESSUNGEN

Bei den bituminösen Lagen spielte der Faktor Zeit wegen der raschen Abkühlung eine noch wesentlichere Rolle als bei der hydraulisch gebundenen Tragschicht. Daher wurde auch hier die Verdichtung mit der in Abschnitt 6.2 genannten TROXLER-Sonde gemessen, allerdings nur im Back-Scatter-Modus. Die Kontrolle der Ergebnisse wurde an Bohrkernen nachvollzogen (siehe Photos 8 und 9). Die TROXLER-Sonde 3440 ist keine speziell ausgebildete Dünnschichtsonde. Im Rückstreuverfahren wird eine Meßtiefe von max. 10 cm erfaßt, mit einer stärkeren Gewichtung der oberen Zone. Am Durchschnittsergebnis haben z.B. die oberen 2 cm einen Anteil von ca. 40 %, während die darunter liegenden 8 cm mit etwa 60 % in das Ergebnis eingehen /8/. Daher mußte auf der Deckschicht im Nomograph-Modus gemessen werden, d.h. unter Berücksichtigung der Lagendicke und der Dichte der Tragschicht wurde deren Einfluß auf das Meßergebnis rechnerisch eliminiert.

#### SETZUNGSMESSUNGEN

Die Setzungen wurden analog Abschnitt 6.1 ermittelt.

#### TEMPERATURMESSUNGEN

Die Mischguttemperatur wurde mit Thermoelementen vor dem jeweiligen Walzübergang gemessen.

## ERMITTLUNG DER BEZUGSDICHTE

Vom gelieferten Mischgut wurden je drei Mashall-Probekörper hergestellt. Die dabei ermittelte Dichte ( $S_{Ma}$ ) wurde für die Verdichtung als Vergleichsmaß zugrundegelegt.

#### EBENHEITSMESSUNGEN

Auf der Deckschicht wurde die in der ZTVbit-StB 84 geforderte Ebenheit mit einer 4 m langen Aluminiumlatte überprüft (Photo 10).

#### 7. Ergebnisse der Untersuchungen

#### 7.1 Unterbau

In Unterbau-Lage 1 wurden erste Erfahrungen für die weitere Vorgehensweise gesammelt. Die Schütthöhe von 45 cm erwies sich als zu hoch und wurde für die weiteren Schüttlagen auf 38 cm reduziert.

## 7.1.1 Trockendichte

Für die Beurteilung der erzielten Dichteergebnisse wurden zwei Auswertungen gewählt:

- (1) Änderung der Dichte über die Meßtiefe nach Verdichtungsende: Dabei wurden die Werte entsprechender Meßtiefen aller Meßpunkte gemittelt. Man erhält so einen repräsentativen Mittelwert für die jeweilige Meßtiefe und für die Zahl der Übergänge.
- (2) Abhängigkeit der mittleren Dichte von der Übergangszahl: Als mittlere Dichte wurde der Mittelwert aus den unterschiedlichen Meßtiefen bei der jeweiligen Übergangszahl, d.h. der 'integrale' Wert über die gesamte Meßtiefe angenommen.

Als Vergleichsmaß für die erzielte Verdichtung wurde aus den im Abschnitt 4 und 5 bereits genannten Gründen die im Proctorversuch ermittelte Trockendichte  $g_E$  beim Einbauwassergehalt w<sub>E</sub> herangezogen.

Alle Dichteergebnisse der drei Unterbau-Lagen sind in numerischer

Form mit Standardabweichung, relativem Fehler und der Streubreite in Tabelle 2 aufgelistet.

## Lage 1

Die Bilder 10 und 11 zeigen die Dichteergebnisse für die Lage 1. Deutlich erkennbar ist die wachsende Differenz zwischen den beiden Vedichtungsarten mit zunehmender Übergangszahl. Der Vibrator übersteigt die  $\$_E$ -Grenze bei 12 Übergängen. Beim Oszillator kann auch bei nochmaliger Verdoppelung der Übergangszahl auf 32 diese Grenze noch nicht erreicht werden. Nach 16 Übergängen verzeichnet der Vibrator eine 1.M. 4,6 % höhere Trockendichte. In 30 cm Tiefe beträgt die Differenz sogar 6,1 %.

Es sind die tiefer liegenden Zonen, die sich mit dem Oszillator wesentlich weniger verdichten. Während beim Vibrator zwischen den Übergängen ein nahezu kontinuierlicher Dichtezuwachs über die gesamte Meßtiefe verzeichnet wird, ist dieser beim Oszillator im wesentlichen auf die oberflächennahen Bereiche begrenzt.

Für den Aufbau von Lage 2 wurde für beide Versuchsfelder gleiche mittlere Untergrunddichte (Lage 1) vorausgesetzt, so daß im Oszillator-Versuchsfeld eine Nachverdichtung notwendig wurde. Wie Bild 11 zeigt, führten 5 weitere Übergänge mit der BW 160 AD 1 im Vibrationsmodus zu einer Dichtesteigerung von 2,3 % über die gesamte Meßtiefe, so daß der im Vergleich zum Vibrator-Versuchsfeld gröBere Dichtegradient über die Meßtiefe nach wie vor vorhanden war, und ein Angleich der Dichteprofile nicht erzielt wurde. Der theoretisch erwartete Dichtezuwachs mit der Tiefe gegenüber der schon hoch verdichteten oberflächennahen Zone blieb aus. Diese Beobachtung läßt annehmen, daß der mit Oszillation verdichtete oberflächennahe Bereich einen weiteren Energietransfer in tiefere Lagen behindern. Erst durch 2 Übergänge mit einem 17 t Walzenzug (BW 217 D: 1,6 mm Amplitude, 28 Hz Vibrationsfrequenz) konnte weitere Verdichtungsenergie eingetragen werden, allerdings mit dem Effekt einer geringfügigen Wiederauflockerung in der Oberflächenzone.

## Lage 2

Die Dichtemeßergebnisse aus Lage 2 zeigen die Bilder 12 und 13. Im Vergleich zu Bild 10 erkennt man deutlich den Einfluß der reduzierten Schütthöhe. Mit dem Vibrator wird über die gesamte Meßtiefe die  $g_E$ -Grenze überstiegen. Nach 16 Übergängen ist die Lage im Mittel auf die Proctordichte  $g_{Pr}$  verdichtet. Der Oszillator überschreitet dagegen mit 16 Übergängen im Mittel gerade die  $g_E$ -Grenze (Bild 12). Lediglich die halbe Lagendicke wird über  $g_{Pr}$  hinaus verdichtet. Die untere Hälfte bleibt unterhalb dieses Wertes. Nimmt man für die Beurteilung des Verdichtungszustandes das Verhältnis aus mittlerer Dichte und Proctordichte beim Einbauwassergehalt, so wäre der Verdichtungsvorgang mit Vibration schon nach 4 Übergängen beendet gewesen; beim Oszillator sind dagegen mindestens 14 Übergänge nötig. Zur erforderlichen Nachverdichtung des Oszillator-Versuchsfeldes kam wieder ein 17 t Walzenzug (BW 217 D) zum Einsatz. 2 Übergänge mit 1,6 mm Amplitude und 28 Hz Vibrationsfrequenz ließen die mittlere Dichte um 2 % wachsen; zwei weitere mit 0,8 mm Amplitude und 40 Hz lediglich um 0,5 % (Bild 12). Wiederum wird ersichtlich, daß große Energie notwendig ist, um bei einer hochverdichteten Oberflächenzone (Deckel) den darunterbefindlichen Bereich nachzuverdichten. Der Dichteverlauf über die Meßtiefe nach Abschluß der Nachverdichtung ist in Bild 13 mit aufgenommen.

Die Verteilung des Luftporengehalts n<sub>a</sub> über die Meßtiefe nach Abschluß des Verdichtungsprogrammes geht aus Bild 14 hervor. Der gemäß ZTVE-StB 76 für bindige und gemischtkörnige Böden einzuhaltende Grenzwert von n<sub>a</sub> = 12 % ist vergleichsweise mit eingetragen. Mit dem Vibrator wird diese Anforderung über die gesamte Meßtiefe erfüllt, mit dem Oszillator dagegen im unteren Bereich nicht.

#### Lage 3

Die Ergebnisse aus Lage 3, dargestellt in den Bildern 15 und 16, stimmen mit denen aus der 2. Lage (vergleiche Bilder 12 und 13) weitgehend überein. Die Dichte-Differenzen von 1 % beim Vibrator sowie die minimalen Differenzen beim Oszillator über der Meßtiefe lassen sich auf den 0,5 % höheren Wassergehalt der Lage 3 zurückführen.

Ähnlich wie in Lage 2 überschreitet die mittlere Dichte beim Vibra-

tor die  $\$_E$ -Grenze schon mit dem 4. Übergang. Die Proctordichte  $(\$_{pr})$  wird aufgrund des höheren Wassergehaltes nach 11 Übergängen (16 Übergänge auf Lage 2) erreicht. Im Oszillator-Versuchsfeld macht sich der höhere Wassergehalt bezüglich der Übergangszahl nicht bemerkbar. Eine annähernd gleiche Anzahl von Übergängen wie auf Lage 2 sind zum Erreichen der  $\$_E$ -Grenze notwendig (16 auf Lage 3 gegenüber 14 auf Lage 2).

Der Luftporengehalt n<sub>a</sub> von Lage 3 nach Abschluß der Verdichtung geht aus Bild 14 hervor. Die Tendenz entspricht den Ergebnissen aus der Lage 2. Die 1 % besseren Werte im Oszillator-Versuchsfeld gegenüber Lage 2 sind auf den größeren Wasseranteil zurückzuführen, der dazu führt, daß bei gleicher Trockendichte mehr Luftporen mit Wasser ausgefüllt sind. Die 2 % besseren Werte im Vibrator-Testfeld können zum einen dem höheren Wassergehalt und zum anderen der dadurch bedingten höheren Verdichtung des Materials zugeschrieben werden. Die Tendenz im Luftporengehalt zwischen Vibrator und Oszillator stimmt mit der Dichtemessung überein, d.h. minimale Differenzen an der Oberfläche bis hin zu beachtlichen Differenzen in der Tiefe.

Die Tiefenverdichtung des Oszillator-Versuchsfeldes wurde erst durch drei Übergänge mit der BW 217 D erreicht (28 Hz Vibrationsfrequenz, 1,6 mm Amplitude).

#### 7.1.2 Verformungsmodul Ev

Auf der ersten Lage wurde auf Lastplattenversuche verzichtet. Da die Spannungseinflußtiefe der Lastplatte etwa mit dem 1,5 fachen des Plattendurchmessers aufgenommen wird, hätte man mit Sicherheit den Einfluß der hochverdichteten Unterlage mit eingemessen. Die Einzelergebnisse der Versuche auf den Lagen 2 und 3 zeigen die Tabellen 3 und 4.

Lage 2 zeigt bezüglich der Verformbarkeit das erwartete Ergebnis. Die Ev1-Werte sind wegen der stark verdichteten Oberflächenbereiche annähernd gleich. Wegen des kleineren Dichtegradienten über der Meßtiefe weist der Vibrator die besseren Ev2-Werte auf. Die Verhältniswerte Ev2/Ev1 sind für beide Verdichtungsarten gleich und genügen den in der ZTVE StB 76 gestellten Anforderungen.

Auf Lage 3 kehren sich die Meßergebnisse um. Im Vibrator-Versuchsfeld sind beide Ev-Werte um ca. 10 MN/m<sup>2</sup> niedriger als auf Lage 2, wofür aber die höhere Bodenfeuchte von 0,5 % gegenüber Lage 2 Ursache sein dürfte. Für den Oszillator sind die Verformungsmoduln der Lage 3 in etwa gleichgroß wie diejenigen der Lage 2. Trotz geringerer Tiefenverdichtung schneidet der Oszillator im Vergleich zum Vibrator auf Lage 3 bezüglich der Verformungsmoduln etwa gleichwertig ab, wobei der Verhältniswert Ev2/Ev1 sogar niedriger als der im Vibrator-Versuchsfeld ausfällt.

In der Beurteilung dieser Ergebnisse müssen allerdings folgende Unterschiede im Versuchsablauf berücksichtigt werden: Beim Oszillator lagen zwischen dem Verdichtungsbeginn und den Lastplattenversuchen 8 Tage Zeitunterschied. Wegen eines Defekts der Doppelsonde mußte der Versuchsablauf nach dem 4. Übergang eine Woche lang unterbrochen werden. Die Liegezeit zwischen Verdichtungsbeginn und Messung war viermal länger als beim Vibrator (8 statt 2 Tage). Das Versuchsfeld war während der Pause sorgfältig mit Folie abgedeckt. Unter der Folie bildete sich Kondenswasser, was auf eine Austrocknung des Materials hinweist. In /2/ wird nachgewiesen, daß bei schwach bis stark schluffigen Kiesen und allen anderen bindigen Böden eine Zunahme der Verformungsmoduln mit der Liegezeit entsteht, während der Wassergehalt durch Austrocknung abnehmen kann, oder die durch die dynamische Beanspruchung beim Verdichten gestörte Struktur des Bodens ihre Endfestigkeit erreicht.

Betrachtet man die Differenz der Ev1-Werte von Lage 3, so stimmt diese mit der Differenz der Ev2-Werte aus Lage 2 etwa überein. Reduziert man die Ev1- und Ev2-Werte der 3. Lage des Oszillator-Versuchsfeldes um gerade diese Differenz, so zeigt sich dieselbe Tendenz wie bei Lage 2, d.h. etwa gleiche Ev1-Werte und etwas niedrigere Ev2-Werte für den Oszillator. Außerdem muß angemerkt werden, daß beim Oszillator der Einfluß der unteren, mit Vibration nachverdichteten Lage in das Meßergebnis mit einfließt, so daß in Frage steht, ob die Werte des Oszillator-Versuchfeldes überhaupt für den Vergleich geeignet sind. Um den Einfluß von Unterschieden von Versuchsbedingungen dieser Art auszuschalten, wurde daher nach Abschluß der Versuchsserien eine weitere Schicht mit einer großen Schütthöhe von 70 cm nachgeschaltet. Die Ergebnisse dieser Nachuntersuchung sind in Abschnitt 8.1 diskutiert.

## 7.1.3 Setzungsmessungen

Die Ergebnisse der Setzungsmessungen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Nenneswerte Differenzen in der Setzung zeigt nur die Lage 1. Die Ergebnisse der Lagen 2 und 3 sind im Rahmen der Meßgenauigkeit praktisch identisch. Eine Fehlmessung von i.M. 3 mm hat bereits einen Meßfehler von 1 % zur Folge, so daß das Verfahren der Setzungsmessung für niedrige Schütthöhen als Vergleichsgrundlage nicht zweckmäßig erscheint.

## 7.1.4 Beobachtungen

Die Photos 11 und 12 zeigen Aufnahmen des Oszillator-Versuchsfeldes Lage 2 nach 16 Übergängen. Die Oberfläche ist hart und weckt den Eindruck einer guten Verdichtung. Auffallend ist das 'glänzende' bis 'speckige' Aussehen. Mit zunehmender Bodensteifigkeit drückt sich die Bandage immer weniger tief ein, so daß der Schlupf zwischen Bandage und Boden mit zunehmender Übergangszahl wächst. Die Bandage 'rutscht' mit einer Frequenz von 30 Hz und einer Tangentialamplitude von 1,4 mm über die Oberfläche, ähnlich einem durchdrehenden Rad, hinweg. Dabei wird ein großer Teil der Verdichtungsenergie an der Oberfläche durch Reibung in Wärme umgewandelt.
#### 7.2 Frostschutzschicht

Das Frostschutzmaterial wurde mit einer Schütthöhe von 360 mm und einem mittleren Wassergehalt von 4,5 % einlagig eingebaut.

## 7.2.1 Trockendichte

Die Ergebnisse der Dichtemessungen sind in den Bildern 17 und 18 aufgetragen. Eine numerische Auflistung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 6. Ausgehend von der Proctordichte  $S_{\rm Pr}$  als Bezugsdichte konnten mit Vibrator und Oszillator nach 8 Übergängen mit 30 Hz und 4 Übergängen mit 45 Hz nur 96 %, d.h. überaschenderweise eine relativ geringe Verdichtung erreicht werden. Zwischen dem 8. und 12. Übergang ließ sich auch keine nennenswerte Dichtesteigerung mehr erzielen.

Dieses Ergebnis gab Anlaß zu einer Untersuchung des Frostschutzmaterials, hinsichtlich seiner Verdichtbarkeit. Gemäß DIN 18 126 /10/ wurde die lockerste und dichtetste Lagerung zu max  $g_d$  = 1867 bzw. min  $g_d$  = 2176 kg/m<sup>3</sup> ermittelt. Die Eigenschaften eines feinkornfreien Korngemisches werden durch diese Kenngrößen anschaulich charakterisiert. Die Bereiche der bezogenen Lagerungsdichte I<sub>D</sub> für lockere (I<sub>D</sub> = 0...0,35), mitteldichte (I<sub>D</sub> = 0,35 ... 0,5), dichte (I<sub>D</sub> = 0,5...0,7) und sehr dichte (I<sub>D</sub> = 0,7...1) Lagerung sind in den Bildern 17 und 18 mit eingetragen. Weder mit dem Vibrator noch mit dem Oszillator konnte der Bereich der sehr dichten Lagerung ( $I_D > 0,7$ ) erreicht werden. Wie die Bilder 17 und 18 zeigen, ließen sich nur Ergebnisse im Bereich der dichten Lagerung erzielen. Die Proctordichte  $\$_{Pr}^{s}$  kennzeichnete bereits eine sehr dichte Lagerung und eine zu strenge Bezugsdichte, wenn man mit den Anforderungen von 103 % gemäß ZTVT StB 86 für ungebundene Trag- und Frostschutzschichten vergleicht. Die Dichte war nach Verdichtungsende über die gesamte Schichtdicke etwa gleichgroß. Der bei den Unterbau-Lagen festgestelle Dichegradient trat somit hier nicht auf.

Durch eine Nachverdichtung beider Versuchsfelder mit einer Vibrationsplatte (BOMAG BPR 50/55) konnte das Ergebnis wesentlich verbessert werden. Durch 5 Übergänge stieg der Verdichtungsgrad um 2,5 % auf 98,5 %. Die mittlere Dichte lag jetzt im Bereich der sehr dichten Lagerung (Bild 17). Die Dichtesteigerung war allerdings nur auf die oberen 20 cm begrenzt (Bild 18). In 25 cm Tiefe übte die Platte mit ihren 420 kg Betriebsgewicht keinen Einfluß mehr aus.

Diese Untersuchung bestätigte deutlich und erfahrungsgemäß die hervorragende Wirkung von Plattenrüttlern zur Verdichtung von Tragschichtmaterialien, die kein oder kaum Feinkornanteil enthalten. Verdichtungsgrade von 103 % wurden allerdings auch durch die Platten-Nachverdichtung nicht erreicht. Erzielbar ist eine Dichte beim Einbauwassergehalt ( $\$_E$ ), die bezogen auf die Proctordichte ( $\$_{Pr}$ ) einem Verdichtungsgrad von 99,5 % entsprach.

### 7.2.2 Verformungsmodul Ev

Die durch Versuche auf der Frostschutzschicht ermittelten Verformungsmoduln sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Auch diese Werte sind überraschend niedrig und streuen stark. Zwei weitere statische Übergänge verbesserten das Ergebnis nur unbedeutend. Bemerkenswert war, daß sich mit dem Oszillator bessere Ergebnisse als mit der Vibrationswalze einstellten. Die Ev1-Werte sind geringfügig, die Ev2-Werte allerdings um 25 MN/m<sup>2</sup> höher als im Vibrator-Versuchsfeld. Diese Differenzen sind umso beachtlicher, auch wenn die Werte ansich den Anforderungen der ZTVT-StB 86 nicht genügen, wenn man bedenkt, daß sich keine wesentlichen Dichteunterschiede in den beiden Versuchsfeldern nachweisen ließen.

Bezüglich der Verhältniswerte Ev2/Ev1 ergaben sich mit dem Oszillator zwar geringfügig günstigere Werte, aber insgesamt erwiesen sich beide Verdichtungsarten als völlig unbefriedigend. Verantwortlich hierfür dürften die niedrigen Ev1-Werte infolge der während des Verdichtens in der Schichtoberflächenzone entstandenen Sandanreichung sein.

In Tabelle 8 sind die Verformungsmoduln für beide Versuchsfelder aufgelistet, die durch die Nachverdichtung mit der Vibrationsplatte BPR 50/55 erzielt wurden. Sowohl für die Ev1-Werte als auch für die Ev2-Werte konnten beachtliche Steigerungen erzielt werden, so daß jetzt die Größenordnung den Anforderungen, wie sie z.B. die ZTVT-StB 86 vorsieht, entsprach. Auch die Verhältniswerte Ev2/Ev1 konnten den Anforderungen entsprechend entschieden verbessert werden.

- 33 -

Die Lastplattenversuche wurden jeweils 2 Tage nach denen vor der Nachverdichtung durchgeführt. Eine wesentliche Beeinflussung der Ergebnisse durch Wassergehaltsänderungen wird in diesem Zeitraum ausgeschlossen.

Die Dichtemessungen in den mit der Virbrationsplatte nachverdichteten Feldern haben gezeigt, daß lediglich in den oberen 20 cm ein nennenswerter Dichtezuwachs erzielt wurde. Die Differenz im Ev1-Wert zwischen Vibrator- und Oszillator-Versuchsfelder blieb aber nach der Nachverdichtung nahezu konstant, während die Ev2-Differenz etwas geringer ausfiel. Es läßt sich hieraus schließen, daß die oberen 15 - 20 cm der Schicht den wesentlichen Anteil an der Größe des Verformungsmoduls ausmachen.

### 7.2.3 Setzungsmessungen

Die Setzungen beider Versuchsfelder zeigt Tabelle 9. Es lassen sich daraus keine praktisch bedeutenden Unterschiede erkennen. Allerdings wurden im Vibrator-Versuchsfeld durch die Nachverdichtung mit der Vibrationsplatte weitere 10 mm Setzung gegenüber 4 mm beim Oszillator erzielt.

## 7.2.4 Beobachtungen

Die Photos 13 und 14 zeigen Oberflächenaufnahmen beider Versuchsfelder, nachdem das lose Material an der Oberfläche mit einem Handfeger abgekehrt worden war. Die Unterschiede sind deutlich zu sehen. Während aus der Oberfläche des Vibrator-Versuchsfeldes sehr viel größere Körner herausgelöst sind, finden sich diese im Oszillator-Versuchsfeld noch fest in das Gefüge eingebunden. Die unmittelbare Oberflächenzone ist fester gepackt und das Korngefüge in stärkerer Verzahnung. Vom gesammelten 'Kehrgut' wurden Siebungen angefertigt, die diese Beobachtung bestätigen (Sieblinien siehe Bild 19). Der Anteil der Körner zwischen 2 und 10 mm machte beim Vibrator 35 %, beim Oszillator dagegen nur 8 % aus.

Die Summe aller Beobachtungen deuten auf eine weniger gut geschlossene, verdichtete und verzahnte Oberflächenzone im Vibrator-Versuchsfeld für das feinkornarme Frostschutzmaterial hin.

# 7.3 Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)

## 7.3.1 Trockendichte

Die mit der TROXLER-Sonde 3440 im Back-Scatter-Verfahren gemessenen und entsprechend der Bohrkern-Auswertung korrigierten Dichtewerte zeigt Bild 20 als Funktion der Übergangszahl. Die numerischen Ergebnisse sind in Tabelle 10 aufgeführt. Mit Vibrator und Oszillator konnten auf dieser hydraulisch gebundenen Tragschicht bei der gewählten Schichtdicke von 15 cm etwa gleichgroße Dichtewerte erzielt werden.

Der mit dem TROXLER-Verfahren gemessene Verdichtungsgrad hinter dem Fertiger lag nur bei 89 % der Proctordichte. Nach einem statischen und 7 dynamischen Übergängen konnte in beiden Verdichtungsfeldern ein Verdichtungsgrad von nur 96 % verzeichnet werden. Fehler in der Handhabung des Meßgerätes können aber aufgrund der sorgfältigen Vorgehensweise während der Messung (mehrfache Kalibrierung am Bezugsstandard vor Meßbeginn, Ausgleich von Bodenunebenheiten mit Quarzsand) ausgeschlossen werden. Auch ein Wechsel des Meßmodus zum Direct-Transmission-Mode (Einstichverfahren, Einstichtiefe = 10 cm) änderte nichts am Ergebnis.

Die Vermutung des Sondenherstellers, daß die natürliche Gamma Aktivität des Grundmaterials das Meßergebnis verfälscht, bestätigte sich nicht. Eine am Kernforschungszentrum Karlsruhe veranlaßte Untersuchung des HGT-Materials auf natürliche Gammastrahlung ergab eine Aktivität von  $110 \pm 10$  Gammaquanten pro Sekunde und Kilogramm. Bei einer Aktivität des Sondenstrahlers von 8 mCi (296 x  $10^6$  Bq) verfälscht die natürliche Aktivität des Materials das Ergebnis mit Sicherheit nicht.

Es mußte davon ausgegangen werden, daß die TROXLER-Sonde für die hydraulisch gebundene Tragschicht zu geringe Werte lieferte. Die Auswertung der Bohrkerne lieferte dagegen mit einem Verdichtungsgrad von 101 % ein um 5 % höheres Ergebnis.Die Bohrkerndichten wurden deshalb als die wahren Dichten betrachtet, wobei das Bohrkernvolumen nach Paraffinieren der Prüfkörper durch Tauchwägung bestimmt wurde. Die Verdichtungsgrade wurden um die Differenz von 5 % nach oben korrigiert, so daß sich für die Verdichtungsspanne zwischen Schüttung und Endverdichtung ein Bereich zwischen 94 und 101 % ergab. Da beide Versuchsfelder allerdings keine wesentlichen Unterschiede aufzeigten, spielten die Absolutwerte für den Vergleich nur eine untergeordnete Rolle.

## 7.3.2 Setzungsmessungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 11 enthalten. Auch hierbei lassen sich keine relevanten Unterschiede erkennen. Die vorgesehene Einbaudicke von 150 mm konnte bis auf eine Abweichung von nur 5 mm eingehalten werden. Entscheidend war, daß die Schichtdicke nach der Verdichtung in beiden Verdichtungsfeldern praktisch identisch war, was wiederum die sorgfältige Vorgehensweise im gesamten Versuchsablauf widerspiegelt.

## 7.3.3 Druckfestigkeitsprüfungen

Die an den vom angelieferten Baustoffgemisch nach dem Proctor-Verdichtungsverfahren gefertigten Probekörper sowie an den Bohrkernen durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die Festigkeiten waren aufgrund des hohen Zementgehaltes von 5 % zwar hoch, lagen aber im Vergleich zu den Anforderungen (ZTVT-StB 86) noch innerhalb der Toleranzgrenze von 7 bis 12 N/mm<sup>2</sup>. Die Druckfestigkeiten der Bohrkerne streuten allerdings stark, und zwar auch über den für die Eignungsprüfung zulässigen Toleranzbereich hinaus. Im Mittel erfüllten allerdings die Bohrkernergebnisse die Toleranzbreite. Hier muß erwähnt werden, daß an den Bohrkernen keine für den Druckversuch notwendige parallelen, ebenen Flächen vorhanden waren, so daß diese erst mit Gießharz nachgebildet werden mußten. Es bleibt offen, ob die Gießharzansätze das Ergebnis beeinflußten.

Die Vergleichsergebnisse Vibrator/Oszillator der Druckfestigkeitsprüfungen an den Bohrkernen aus beiden Versuchsfeldern fielen so uneinheitlich aus, daß wegen der zu geringen Versuchsanzahl auch keine Folgerungen möglich waren.

### 7.3.4 Beobachtungen

Die Photos 15 und 16 zeigen die Oberflächenaufnahmen der hydraulisch gebundenen Tragschicht nach Verdichtungsende. Die Oberfläche des Vibrator-Versuchsfeldes zeigt relativ ungeregelte Rißstrukturen als Folge von Auflockerungen im unmittelbaren Oberflächenbereich. Auf der Oberfläche des Oszillator-Versuchsfeldes bilden sich dagegen starke schuppenförmige Rißbilder ab, eine Erscheinung, die durch die Scherwirkung der eingetragenen Verdichtungsenergie bedingt sein dürfte. Nach dem Abkehren des losen Materials zeigten beide Versuchsfelder annähernd gleiches Aussehen (Photos 17 und 18). Das auf der Frostschutzschicht noch beobachtete Herauslösen größerer Körner aus der Oberfläche des Vibrator-Versuchsfeldes konnte bei der hydraulisch gebundenen Tragschicht nicht festgestellt werden.

#### 7.4 Bituminöse Oberbauschichten

## 7.4.1 Dichtemessungen

Die mit der TROXLER-Sonde 3440 im Back-Scatter-Verfahren gemessenen und entsprechend den Bohrkern-Ergebnissen korrigierten Dichtewerte zeigt Bild 21 sowohl für die Tragschicht als auch für die Deckschicht. Die entsprechenden numerischen Ergebnisse sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Die Vibrationsverdichtung der bituminösen Tragschicht ergab nach Verdichtungsende einen i.M. 2 % höheren Verdichtungsgrad. Die Marshalldichte  $S_{Ma}$  = 2324 kg/m<sup>3</sup> wurde dabei bereits nach 3 Übergängen überschritten. Der Oszillator benötigt dagegen 2 Übergänge mehr.

Die Dichteergebnisse der 4 cm dünnen Deckschicht deuten auf Vorteile der Oszillationsverdichtung gegenüber der Vibrationsverdichtung hin. Allerdings fallen die Qualitätsunterschiede nicht signifikant aus. Der 1 % höhere Verdichtungsgrad im Oszillator-Versuchsfeld liegt in der Größenordnung des relativen Fehlers der Dichtemessung, so daß aus dieser Untersuchung nicht eindeutig hervorgeht, ob das eine Verdichtungsprinzip dem anderen überlegen ist.

Auch für die bituminösen Schichten lieferte das radiometrische Meßverfahren von der Bohrkernmessung abweichende Ergebnisse. Die Differenzen waren allerdings nicht so gravierend wie für die hydraulisch gebundenen Tragschicht. Bei den Messungen in der Tragschicht lagen die Werte im Oszillator-Versuchsfeld 2 % und im Vibrator-Versuchsfeld 1 % niedriger als die Bohrkern-Auswertungen. Auf der Deckschicht kehrten sich die Verhältnisse um. Hier wurden mit der TROXLER-Sonde 1,7 % höhere Werte für die Oszillation und 1,1 % höhere Werte für die Vibration ermittelt.

Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse ist das für die Auswertung benutzten Nomogrammverfahren mit dem der Einfluß der Tragschicht auf das Ergebnis der Deckschicht rechnerisch anhand der Schichtdicke und der Dichte der Tragschicht eliminiert wird. Sind die Ergebnisse der Messung auf der Tragschicht schon mit einem Fehler behaftet, so pflanzt sich dieser in den Ergebnissen der Deckschicht fort. Auch Fehlmessungen in der Dicke der Deckschicht spiegeln sich unmittelbar im Ergebnis wider.

# 7.4.2 Setzungmessungen

Die Setzungsmeßergebnisse für die bituminösen Schichten zeigt Tabelle 14. Die gemessenen Setzungen fallen im Vibrator- und Oszillator-Versuchsfeld im Rahmen der Meßgenauigkeit etwa gleichgroß aus, so daß Verhaltensunterschiede hieraus nicht erkennbar werden.

### 7.4.3 Einbautemperaturen

Die mittleren Temperaturen (gemittelt aus 10 Meßpunkten) vor den Walzübergängen sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Wie man sieht, wurden jeweils entsprechende Übergänge bei nahezu gleichen Temperaturen gefahren, wodurch die Vergleichbarkeit gewährleistet blieb. Trotz der 'Warm in Warm-Bauweise' beim Einbau der Deckschicht kühlte das Material rasch aus.

## 7.4.4 Ebenheit

Die Ebenheit der Deckschichten wurde mit einer 4 m langen Aluminium-Meßlatte überprüft. Laut ZTVbit-StB 84 dürfen auf einer Länge von 4 m keine Ebenheitsdifferenzen von mehr als 4 mm auftreten. Diese Forderung wurde von beide Verdichtungstypen erfüllt. Probleme gab es allerdings beim Reversieren der Maschine mit nicht abgeschalteter Vibration bzw. Oszillation. Hier 'gräbt' sich der Oszillator tiefer in die noch weiche Oberfläche ein und verursacht so Verformungen, die durch nochmaliges Verdichten nicht mehr rückgängig gemacht werden können.

## 7.4.5 Beobachtungen

Die Tragschichten, sowohl oszillierend als auch vibrierend verdichtet, neigten ab 8. Übergang zu Rißbildungen an der Oberfläche (siehe Photos 19 und 20), so daß der Verdichtungsvorgang abgebrochen werden mußte. Auf der Deckschicht wies das mit Oszillation verdichtete Versuchsfeld den besseren Oberflächenschluß auf.

## 8. Nachuntersuchungen

#### 8.1 Unterbau

Die beim Verdichten von Unterbau und Frostschutzschicht festgestellten Diskrepanzen zwischen Trockendichte und Verformungsmodul (z.B. gleichgroße Verformungsmoduln trotz unterschiedlicher mittlerer Trockendichte bei sonst gleichen Parametern) gaben Anlaß zu einem Nachuntersuchungsprogramm. Vorrangiges Ziel dabei war, jegliche Einflüsse der Unterlage auszuschalten. Deshalb wurde das Unterbau-Material einlagig mit extrem großer Schütthöhe von 70 cm eingebaut und verdichtet. Das Versuchsfeld wurde je zur Hälfte vibrierend und oszillierend verdichtet. Unterschiede in Schütthöhe, Dichte der Unterlage, Vorverdichtung durch das Schütten sowie Wassergehaltsdifferenzen konnten so eliminiert werden. Die Verdichtungen und Messungen wurden auf beiden Versuchsfeldern am gleichen Tag absolviert, so daß es auch in den Liegezeiten keine Differenzen gab. Gemessen wurde die Trockendichte (bis 50 cm Tiefe unter Planum), die Verformbarkeit und die Setzung der Schicht in Abhängigkeit von der Übergangszahl.

## 8.1.1 Trockendichte

Die Dichteänderung in Abhängigkeit von der Meßtiefe für die Übergänge 4, 8 und 16 zeigen die Bilder 22 und 23. Die Feststellungen aus den früheren Versuchen wurden im wesentlichen bestätigt. Allerdings stellten sich erhebliche Dichtegradienten über die Schichtdicke ein, wobei die Divergenz zwischen Vibrator- und Oszillator-Versuchsfeld nicht so stark ausgeprägt war. Es fällt auf, daß trotz der großen Schütthöhe im Vergleich zu den Unterbau-Lagen 2 und 3 in entsprechenden Meßtiefen in etwa identische Dichten erzielt werden konnten (vergleiche Abschnitt 7.1, sowie die Bilder 13 (Lage 2) und 16 (Lage 3) mit den Bildern 22 und 23). Beim Oszillator war der Verdichtungsvorgang nach 8 Übergängen weitgehend abgeschlossen. Durch eine nochmalige Verdoppelung der Übergangszahl von 8 auf 16 konnte die Dichte i.M. um lediglich 1 % gesteigert werden. Beim Vibrator wurde zwischen Übergang 8 und 16 noch ein beachtlicher Dichtezuwachs von i.M. 3 % über die gesamte Meßtiefe verzeichnet. Das bereits nach 4 Übergängen erreichte Dich-

teprofil des Vibrator-Versuchsfeldes konnte im Oszillator-Versuchsfeld erst nach 8 bis 16 Übergängen ausgeglichen werden.

#### 8.1.2 Verformungsmodul

Die Ergebnisse der Lastplattenversuche finden sich in den Tabellen 16 bis 18 und sind graphisch in Bild 24 dargestellt. Daraus geht hervor, daß mit zunehmender Verdichtung die Differenz zwischen den Ev1-Werten beider Versuchsfelder kleiner wird, während die Differenz zwischen den Ev2-Werten etwa gleichgroß bleibt. Nach 16 Übergängen ergab sich der gleiche Sachverhalt wie auf Lage 2 (siehe Abschnitt 7.1 und Tabelle 3), d.h. nahezu identische Ev1-Werte und niedrigere Ev2-Werte beim Oszillator. In der Größenordnung entsprechen die Werte denen aus Lage 3 (Tabelle 4), obwohl die Schütthöhe fast doppelt so groß war und die Dichte nach der Tiefe stark abnahm.

Nach Übergang 16 wurde die Oberfläche der beiden Versuchsfelder an 3 Stellen 17 cm tief abgegraben und die Ev-Werte erneut ermittelt. Wie die Werte in Tabelle 19 zeigen, konnten im Vibrator-Versuchsfeld noch ca. 10 MN/m<sup>2</sup> größere Verformungsmoduln als an der Oberfläche ermittelt werden. Im Oszillator-Versuchsfeld lag der Ev1-Wert i.M. ca. 15 MN/m<sup>2</sup> und der Ev2-Wert i.M. ca. 40 MN/m<sup>2</sup> niedriger als an der Oberfläche, was im Vergleich zum Vibrator-Versuchsfeld ursächlich der wesentlich geringeren Verdichtung im unteren Schichtbereich zufällt.

Nach 4 Übergängen konnte im Vibrator-Versuchsfeld bereits der günstigere Verhältniswert Ev2/Ev1 erzielt werden. Nach 8 Übergängen waren diese Verhältniswerte für Vibration und Oszillation etwa gleich, während nach 16 Übergängen im Oszillator-Versuchsfeld geringfügig bessere Verhältniswerte vorlagen. Grund dafür ist der relativ starke Zuwachs des Ev1-Wertes im Oszillator-Versuchsfeld zwischen Übergang 8 und 16. Auch wenn die Verdoppelung der Übergangszahl von 8 auf 16 im Oszillator-Versuchsfeld keinen nennenswerten Dichtezuwachs mehr brachte, so konnte dennoch die bei der Erstbelastung entstehenden plastischen Verformungsanteile noch entschieden verbessert werden (Ev1-Werte). Der für das elastische Verhalten bei Belastungswiederholungen maßgebliche Ev2-Wert blieb allerdings hinter dem der mit Vibration verdichteten Lagen zurück. Auch auf dem in 17 cm Tiefe angelegten Meßniveau blieben die Verhältniswerte Ev2/Ev1 zwischen Vibration und Oszillation etwa gleichwertig, während allerdings die mit Oszillation erzielten Absolutwerte Ev1 und Ev2 im Vergleich zur Vibration und den Anforderungen der ZTVE-StB 76 völlig unbefriedigend waren.

Aus den Ergebnissen läßt sich schließen, daß der Lastplattendruckversuch nicht in jedem Fall für die Beurteilung des Verdichtungszustandes genügend Aussage bringt. Wie schon in Abschnitt 7.2 festgestellt, wird die Verformbarkeit der Schicht im wesentlichen durch die Eigenschaften in den oberen 15 bis 20 cm beeinflußt. Dichteunterschiede, insbesondere im unteren Schichtbereich, kommen im Lastplattendruckversuch nicht klar zum Ausdruck.

Während der Vibrator sowohl hinsichtlich der Dichte als auch des Verformungsmoduls eine wesentlich bessere Tiefenwirkung erbrachte, begrenzte sich die Wirkung des Oszillators auf eine gute Verdichtung im Oberflächenbereich. Dichte und Verformungsmodul nahmen mit der Meßtiefe rasch ab. Der Oszillator regelte die Körner nur in einer dünnen deckelförmigen Lage dicht ein. Der deckelförmiger Oberflächenschluß schirmte die Tiefenwirkung regelrecht ab. Trotz mangelhafter Dichte im unteren Schichtbereich trug der "Deckel" zu einer gut tragfähigen und lastverteilenden Wirkung bei.

#### 8.1.3 Setzungsmessungen

Die große Schütthöhe von 0,7 m verdeutlichte sich auch in den Unterschieden der Setzungen von Vibrator- und Oszillator-Versuchsfeld (Tabelle 20). Nach 16 Übergängen lag die mit dem Vibrator erreichte Setzung der Schicht um 4,5 % höher als im Oszillator-Versuchsfeld. Die Dichtedifferenz kam somit auch in den Setzungen beider Versuchsfelder zum Ausdruck.

## 8.1.4 Beobachtungen

Die bereits in Abschnitt 7.1 beschriebenen Beobachtungen über die glänzend-speckige und glatte Oberfläche des Oszillator-Versuchsfeldes (siehe Photos 11 und 12) wurden auch in der Nachuntersuchung bestätigt.

#### 8.2 Frostschutzschicht

Die im Vibrator-Versuchsfeld (siehe Abschnitt 7.2.2) festgestellten Verformungsmoduln, die aufgrund der Oberflächenauflockerung geringer als diejenigen im Oszillatior-Versuchsfeld waren, gaben Anlaß zu der Annahme, daß das Energieangebot des Vibrators für dieses sand- und feinkornarme Material zu groß war. Die Vibrationsamplitude wurde daraufhin auf 0,2 mm reduziert und das gesamte Versuchsprogramm mit Vibrations- und Oszillationsverdichtung wiederholt. Das Material wurde beim natürlich angelieferten Wassergehalt von  $W_E = 2,5$  % verdichtet. Da der Einfluß des Wassergehaltes sich auf die Verdichtbarkeit dieses Materials von untergeordneter Bedeutung erwiesen hatte, (siehe Proctor-Kurve Bild 7), wurde auf eine zusätzliche Anfeuchtung verzichtet. Verdichtet wurde mit insgesamt 14 Übergängen bei 30 Hz Vibrationsfrequenz. Gegenüber der ersten Versuchsserie mit 12 Verdichtungsübergängen und abgestufter Vibrationsfrequenz ergab sich eine gleiche Anzahl dynamischer Arbeitsspiele.

#### 8.2.1 Trockendichte

Eine Gegenüberstellung der Dichteergebnisse aus dem Erst- und Wiederholungsprogramm zeigt Bild 25. Die Ergebnisse sind numerisch in Tabelle 21 aufgelistet. Die Reduktion der Verdichtungsamplitude auf 0,2 mm brachte einen Dichtezuwachs in den oberen 15 cm von i.M. 1 %. Die Dichteergebnisse im Oszillator-Versuchsfeld aus Erst- und Nachuntersuchung wichen nur geringfügig voneinander ab. Auch wenn die Dichte im Vibrator-Versuchsfeld verbessert werden konnte, reichte dies noch nicht aus, um den Bereich der sehr dichten bezogenen Lagerungsdichte I<sub>D</sub> zu erzielen. Bild 26 zeigt die mittlere Trockendichte in Abhängigkeit von der Übergangszahl. Wiederum ist die sehr gute Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse erkennbar. Mit der kleinen Amplitude von nur 0,2 mm und damit der reduzierten Verdichtungsenergie war der Vibrator dem Oszillator bezüglich der Dichte auch im oberflächennahen Bereich der Frostschutzschicht überlegen.

- 48 -

## 8.2.2 Verformungsmodul

Tabelle 22 zeigt die Ergebnisse der Lastplattendruckversuche. Es konnten hiernach Verformungsmoduln erreicht werden, die den mit Oszillation erzielten Ergebnissen gleichwertig waren. Die Größe der Werte stimmte mit dem des Oszillator-Versuchsfeldes aus der ersten Versuchsreihe überein (vergleiche Tabelle 7). Der Grund für die Verbesserung der Verformbarkeit im Vibrator-Versuchsfeld war die Reduzierung der Verdichtungsenergie, womit Auflockerungen an der Oberfläche vermieden werden konnten. Bestätigt wird das auch durch die im Abschnitt 8.2.4 beschriebenen visuellen Beobachtungen.

## 8.2.3 Setzungsmessungen

Wie im Abschnitt 7.2.3 bereits festgestellt, konnte mit den Setzungsmessungen praktisch kein Unterschied zwischen den Versuchsfeldern nachgewiesen werden.

#### 8.2.4 Beobachtungen

Die Photos 21 und 22 zeigen Oberflächenaufnahmen beider Versuchsfelder nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials. Es sind keine Unterschiede erkennbar. Das Herauslösen größerer Körner aus der Oberfläche des Vibrator-Versuchsfeldes trat bei der Verdichtung mit der reduzierten Vibrationsamplitude nicht mehr auf. Bestätigt wurde das auch durch die vom losen Oberflächenmaterial angefertigten Siebanalysen (siehe Bild 27). Aus den Ergebnissen muß gefolgert werden, daß im ersten Versuchsprogramm das sand- und feinkornarmen Frostschutzmaterial mit zu großer Amplitude und damit zu großem Energieangebot verdichtet worden war.

### 9. Dynamische Verdichtungskennwerte des BOMAG-Terrameters

Beim Herstellen des Unterbaus, der Frostschutzschicht und der hydraulisch gebundenen Tragschicht wurde der Verdichtungszustand während der Verdichtung kontinuierlich mit dem BOMAG-Terrameter /6/, /7/ überprüft. Wegen der sorgfältigen Aufbereitung der Materialien und der gleichmäßigen Schichten wurden auch sehr gleichmäßige OME-GA-Werte über die geamten Versuchsfelder gemessen und somit eine sehr gleichmäßige Verdichtung nachgewiesen. Bestätigt wird das einmal durch die geringen Streuungen der Dichteergebnisse (i.M. bei 1 % relativem Fehler), zum anderen durch die in den unterschiedlichen Meßpunkten sehr gut reproduzierbaren Verformungsmoduln.

Auf den Unterbau-Schichten (Wassergehalt i.M. 4,5 %) erzielte die BW 160 nach 16 Übergängen einen OMEGA-Wert von i.M. 800. Auf dem feinkornarmen Frostschutzmaterial wurden nach 12 Übergängen i.M. 450 OMEGA-Einheiten verzeichnet. Auf der hydraulisch gebundenen Tragschicht lag der OMEGA-Wert mit 500 Einheiten während der letzten Verdichtungsfahrt nur wenig höher als auf der Frostschutzschicht.

Der OMEGA-Wert für die Frostschutzschicht lag mit 450 Einheiten im mittleren Meßbereich (Maximalwert = 1000). Der entsprechend auf dieser Schicht festgestellte mittlere Ev2-Wert, der ein Maß für die elastische Verformbarkeit der Schicht ist, wurde zu 72 MN/m<sup>2</sup> ermittelt. Der auf dem Unterbau gemessene OMEGA-Wert von 800 entsprach einem mittleren Ev2-Wert von 135 MN/m<sup>2</sup>. Die Ergebnisse stimmen mit dem in /6/ veröffentlichten Zusammenhang zwischen OMEGA-Wert und Verformungsmodul Ev2 für das Kies-Sand-Gemisch (Rheinkies) recht gut überein. Der OMEGA-Wert spiegelt offensichtlich sehr gut den Zustand der elastischen Verformbarkeit der Schicht wider. In /6/ wurde für den dort untersuchten Rheinkies ein linearer Zusammenhang festgestellt.

Beim Oszillator wurde die horizontale Beschleunigungskomponente in der Bandagenmitte mitgeschrieben und einer rechnerischen Weiterverarbeitung unterzogen. Der ermittelte Wert stieg mit wachsender Übergangszahl i.M. zwar geringfügig an, ein eindeutiger Zusammenhang mit der Verdichtung konnte allerdings nicht herausgefunden werden, weil dieser Wert auch von zahlreichen maschinentechnischen Parametern beeinflußt wird. Eine Korrelation zwischen OMEGA-Wert und dem Oszillator-Kennwert stellte sich nicht ein, so daß die dynamischen Verdichtungkennwerte für den im Untersuchungsprogramm verfolgten Vergleich zwischen Oszillator- und Vibratorverdichtung nur von untergeordneter Bedeutung waren. Dabei darf nicht übersehen werden, daß die genannten dynamischen Kennwerte materialspezifisch beeinflußt und nicht ohne weiteres auf andere Maschinentypen oder Materialien übertragbar sind.

### 10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlußfolgerungen

### 10.1 Allgemeines

Das ausgeführte Forschungsprogramm über die Wirkung der Vibrationswalze im Vergleich zur Oszillationswalze hat wesentliche Aufschlüsse erbracht und deutlich gemacht, daß das eine System das andere nicht ohne weiteres ersetzen, aber für bestimmte Aufgaben sinnvoll ergänzen könnte. Dabei muß allerdings zwischen ungebundenen und gebundenen Materialien und den Unterschieden hinsichtlich der praktischen Anforderungen im Erdbau einerseits und Straßenbau andererseits klar differenziert werden.

Im allgemeinen bewirkt die Vibrationswalze eine wesentlich bessere Tiefenwirkung als die Oszillationswalze, diese jedoch bewirkt eine recht günstige Verdichtung der bei Vibration auflockerungsempfindlichen Oberflächenzone. Die oszillierend arbeitende Walze regelt die Kornaggregate in einer zwar nur dünnen, aber gut lastverteilend wirkenden Schicht so dicht ein, daß eine Art deckelförmiger Oberflächenschluß entsteht. Die Wirkung dieses Deckels wird deutlich durch die mit den Plattendruckversuchen erzielten  $E_{V2}/E_{V1}$ -Verhältniswerte. Die Oszillationswalze kann deshalb dann Vorteile bringen, wenn ein möglichst dichter Oberflächenschluß erzielt werden soll (z.B. abschließende Endverdichtung eines Feinplanums) oder sehr dünne Schichten einzubauen und zu verdichten sind.

Bei umlagerung- und wasserempfindlichen Erdstoffen besteht aber

-53-

die Gefahr, daß der dünne Deckel die lastverteilende Wirkung nur vorübergehend vortäuscht, weil sie bei Auflockerung durch Einbau überliegender Schichten oder durch Aufweichung des Bodens wieder aufgehoben werden könnte. Deshalb ist es sowohl im Erdbau als auch im Tragschicht- und Deckenbau unverzichtbar, darauf zu achten, daß nicht nur der Oberflächenschluß, sondern mittels geeigneter Vibrationswalze eine effektive und nicht reversible Tiefenverdichtung erzielt wird.

Darüberhinaus muß bedacht werden, daß die bei Vibrationsverdichtung in bestimmten Fällen beobachtete Oberflächenauflockerung einer Schicht aufgehoben werden kann, wenn die darüberliegende Schicht eingebaut und mit der Vibrationswalze effektiv tiefenwirksam mitverdichtet wird, was voraussetzt, daß der Einbau in nicht überzogen großen Schichtdicken erfolgt.

Die Auflockerung der Oberflächenzonen läßt sich grundsätzlich und von vornherein auch dann vermeiden bzw. reduzieren, wenn die Vibrationswalze mit sehr niedriger Schwingungsamplitude arbeitet.

Wie die Forschungsergebnisse zeigen, reagieren ungebundene Erdstoffe unterschiedlich bei vibrierender und oszillierender Verdichtung, so daß im folgenden einige spezielle Aspekte des Untersuchungsprogramms zusammengefaßt werden.

#### 10.2 Unterbau

Bei der Verdichtung des sogenannten Unterbaumaterials – einem schluffigen Kies mit ca. 12 % abschlämmbaren Feinkorn < 0,06 mm (Bild 4) – zeigte sich die deckelbildende Wirkung der Oszillationswalze auf allen Lagen in eklatanter Weise (siehe Abschnitt 4.2.1, 5.1, 7.1 und 8).

Mit zunehmender Zahl der Walzenübergänge wurde die Oberfläche immer härter und glatter. Die Bandage drückte sich kaum noch ein, ihr Schlupf wuchs und sie rutschte zunehmend über die Oberfläche. Eine Verzahnung mit der darüber einzubauenden Schicht, wie sie im Erdbau erwünscht ist, läßt sich unter solchen Bedingungen nicht mehr erreichen. Der Effekt des Deckels bewirkt allerdings – wie besonders auch die Nachuntersuchungen in Abschnitt 8 verdeutlichen – daß die bei der Erstbelastung (Ev1-Wert) entstehenden plastischen Verformungsanteile bei weiterer oszillierender Verdichtung noch wesentlich reduziert werden können, obwohl sich keine nenneswerte Dichtesteigerung mehr einstellt.

Der Deckel behindert aber in starkem Maß den Energietransfer in der Tiefe bei weiterer Verdichtungarbeit, so daß unerwünscht große Dichtegradienten zwischen Ober- und Unterfläche der zu verdichtenden Schicht entstanden. Ein weiterer Energietransfer in den unteren Schichtbereich würde sehr große Verdichtungsenergie voraussetzen, die aber mit der Oszillationswalze nicht mehr erbracht werden kann. Zudem würde mit zunehmender Zahl der Übergänge der Einbaufortschritt behindert bzw. verzögert und kein wirtschaftlicher Einsatz der Walze mehr möglich sein.

Bei oszillierend verdichteten fein- und gemischtkörnigen Böden muß auch, wie die Untersuchungen gezeigt haben, damit gerechnet werden, daß sich der Luftporenanteil im unteren Schichtbereich in der Regel mehr oder weniger weit über dem erforderlichen Grenzwert von 12 % einstellt, so daß ein wesentliches Verdichtungskriterium bei normalem Energieeintrag nicht eingehalten würde.

## 10.3 Frostschutzschicht

Die Verdichtung der Frostschutzschicht erbrachte mehrere neue Erkenntnisse hinsichtlich des Vergleichs von Vibrations- und Oszillationswalze (siehe Abschnitt 4.2.1, 5.2 und 7.2). Bei dem eingebauten Material handelt es sich um ein den Anforderungen entsprechendes Kies-Sand-Gemisch, und zwar ein weitgestuftes, stark kiesreiches Gemisch, mit weniger als 2 % abschlämmbaren Feinkornanteilen. Überraschend war zunächst, daß sich weder mit der Vibrations- noch mit der Oszillationswalze die Anforderungen für ungebundene Tragschichten hinsichtlich Verdichtungsgrad und Verformungsmodul erfüllen ließen.

Aufgrund der ergänzend ausgeführten Untersuchungen über die Verdichtungseigenschaften dieses Materials läßt sich allgemein schließen, daß der Proctorversuch für derart kohäsionslose Kies-Sand-Gemische Bezugswerte ( $\mathcal{S}_{Pr}$ ,  $w_{Pr}$ ) liefert, die im Hinblick auf Ver-

- 56 -

dichtungsanforderungen von mehr als 103 % für ungebundene Tragschichten zu streng liegen und mit wirtschaftlichen Mitteln der Verdichtung kaum erreichbar sind. Diese Feststellung konnte auch auf das Verdichten mit der Vibrationsplatte erweitert werden, obwohl mit der im Programm ausgeführten Nachverdichtung bestätigt wurde, daß sich Tragschichtmaterialien mit geeigneter Vibrationsplatte optimal verdichten lassen. Mißt man die Proctordichte an der auf die lockerste und dichteste Lagerung bezogenen Größe  $I_D$ , so liegt sie im Bereich der "sehr dichten" Lagerung, während die Verdichtungen in den Versuchsfeldern nur Dichtewerte im "dichten" Bereich erbrachte, die aber hinsichtlich der Qualität einer ausreichend guten Verdichtung der Schicht entsprechen.

Abgesehen von diesen grundsätzlichen Erkenntnissen, läßt sich aus dem Vergleich der Ergebnisse folgern, daß weder die Größe der erzielten Dichtewerte noch deren Tiefenverteilung über die Schichtdicke nenneswerte Unterschiede zwischen Vibrationswalze und Oszillationswalze erkennen ließen und sich im übrigen die Verdichtungswirkung beider Walzentypen auf ca. 25 cm Tiefe begrenzte. Um so bemerkenswerter war, daß die Oszillationswalze wesentlich größere Verformungsmoduln als die Vibrationswalze erbrachte. Hierin zeigt sich, daß der allgemein anerkannte Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad und Verformungsmodul auch von anderen Einflüssen überlagert werden kann.

Die Ursache für die festgestellte Erscheinung lag auch in diesem Fall in der von der oszillierenden Walze ausgehenden Deckelwirkung. In der oberflächennahen Zone regelten sich die Körner beim Verdichten mit der Oszillationswalze ganz anders als bei der Vibrationswalze ein, und zwar in Form einer starken Korn zu Korn-Verzahnung mit sandreichem Porenschluß und ziemlich glatt wirkender, aber widerstandsfähiger Oberfläche. Inwieweit diese Oberflächengüte von dauerhaftem Bestand ist, wenn die Schicht überbaut wird, konnte im Rahmen des Versuchsprogramms nicht untersucht werden. Auf jeden Fall bewirkte bereits die vergütete oberflächennahe Zone eine gute Lastverteilung und hatte wesentlichen Anteil an der Größe der Verformungsmoduln. Im Unterschied hierzu wies die Oberfläche der mit der Vibrationswalze verdichteten Frostschutzschicht doch Auflockerungen auf, wobei besonders große Körner herausgelöst waren.

Von besonderer Bedeutung erwies sich in diesem Zusammenhang die Nachuntersuchung gemäß Abschitt 8.2, bei der die Verdichtungsenergie mit der Oszillationswalze wie vorher, dagegen mit der Vibrationswalze bei gleich großer Frequenz wie vorher, aber mit nur sehr geringer Amplitude von 0,2 mm in die Frostschutzschicht eingetragen wurde. Diese Änderung der Vibrationsverdichtung resultierte in einem wesentlich verbesserten Oberflächenschluß, verbunden mit erhöhter Dichte und höherem Verformungsmodul im oberen Schichtbereich. Die Oberflächen zwischen Vibrations- und Oszillations-Versuchsfeld glichen sich praktisch. Aus den Ergebnissen dieser Nachuntersuchungen wird daher geschlossen, daß sich Oberflächenauflokkerungen auch bei der Vibrationsverdichtung vermeiden lassen, wenn die Schlußverdichtung mit sehr kleiner Amplitude erfolgt.

## 10.4 Hydraulisch gebundene Tragschicht

Als Kriterium für das Verdichten der hydraulisch gebundenen Tragschicht (siehe Abschnitt 4.2.3, 5.3 und 7.3) konnten lediglich Dichtemessungen an Bohrkernen sowie Setzungsmessungen und Druckfestigkeitsprüfungen an den Bohrkernen herangezogen werden, während Plattendruckversuche wegen der hydraulischen Erhärtung der Schicht prüftechnisch nicht möglich waren.

Während die Druckfestigkeitsprüfungen an den Bohrkernen wegen zu geringer Zahl und uneinheitlicher Ergebnisse keinen Aufschluß lieferten, läßt sich aus den Dichte- und Setzungsmessungen schließen, daß keine nennenswerten Qualitätsunterschiede aus der Verdichtung mit Vibrations- und Oszillationswalze erkennbar werden.

Die Oberflächen beider Versuchsfelder zeigten Rißstrukturen, die sich bei der Oszillationsverdichtung infolge Scherwirkung schuppenförmig, bei der Vibrationsverdichtung infolge Auflockerung ziemlich ungeregelt darstellten. Ein Herauslösen von größeren Körnern, wie noch auf der Frostschutzschicht im Vibrationsversuchsfeld beobachtet, konnte auf der Oberfläche der hydraulisch gebundenen Tragschicht offensichtlich auf Grund der hydraulischen Bindung nicht mehr festgestellt werden.

- 59 -

#### 10.5 Bituminöse Oberbauschichten

Die Verdichtung der bituminösen Trag- und Deckschichten erfolgte gemäß Abschnitt 4.2.4 mit Materialien, wie in Abschnitt 5.4 und 5.5 beschrieben. Die Qualitätsprüfungen mit der in Abschnitt 6.3 ausgeführten Prüftechnik waren auf Dichtemessungen (radiometrische Messungen und Prüfungen an Bohrkernen) sowie Setzung- und Ebenheitsmessungen begrenzt.

Die mit Vibrations- und Oszillationsverdichtung erzielten Qualitätsunterschiede fielen nicht signifikant aus. Während bei den Tragschichten die Vibrationsverdichtung den höheren Verdichtungsgrad bei weniger Übergängen erreichte, deuteten sich bei den dünnen Deckschichten Vorteile der Oszillationsverdichtung an. Die Ergebnisse unterschieden sich jedoch im Rahmen der Genauigkeit der Dichtemessung so wenig, daß sich aus den Untersuchungen noch kein eindeutiger Trend abzeichnet.

Bei beiden Verdichtungsarten bildeten sich an der Oberfläche Risse aus, wenn die Zahl der Übergänge groß war. Wird die Zahl der Übergänge so begrenzt, daß dies nicht eintritt, kann mit der Oszillationsverdichtung eine relativ geschlossenere Oberfläche erreicht werden.

- 60 -

#### 10.6 Schlußbemerkungen

Abschließend läßt sich feststellen, daß die Untersuchungen wertvolle und grundsätzliche Erkenntnisse über das Verhalten der oszillierend arbeitenden Verdichtungswalze erbracht haben. Die Vibrationswalze erweist sich für die meisten Aufgaben, die im Erdbau zu bewältigen sind, der Oszillationswalze überlegen. Sie kann auch die Vorteile der Oszillationswalze hinsichtlich deren guter Oberflächenverdichtung bei Materialien, die zu Auflockerung an der Oberfläche neigen, ausgleichen, wenn die Oberflächenschlußverdichtung mit sehr kleiner Schwingungsamplitude erfolgt.

Eine ähnliche Beurteilung ergibt sich auch für das Verdichten von ungebundenen Trag- und Frostschutzschichten.

Bei den hydraulisch oder bituminös gebundenen Schichten zeichnen sich bisher noch keine signifikanten Vor- und Nachteile der beiden Verdichtungstypen ab. Die Ergebnisse fallen je nach Schichtdicke und Materialverhalten wechselseitig aus. Die Oszillationswalze zeigt Vorteile hinsichtlich des Oberflächenschlusses der verdichteten Schicht. Es sollten aber weitere Untersuchungen darüber angestellt werden, ob und wie sich dieser Oberflächenschluß bei der Vibrationsverdichtung ähnlich gut verbessern läßt. 11. Literaturverzeichnis

/1/ - : Doppelsonde DS-100-77, Bedienungsanleitung

/2/ Floss, R. : Veränderung der Ev-Werte des Plattendruckversuchs in Abhängigkeit von der Liegezeit verdichteter Schüttungen; Forschungsauftrag 5.063 G79 E, Technische Universität München, Mai 1982

/3/ Floss, R.; Gruber, N.; Obermayer, J.:

Beschleunigungsmessung an Vibrationswalzen zum Nachweis der Bodenverdichtung; Auszug aus 'Symposium Meßtechnik im Erdund Grundbau, München 1983'; Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Essen 1983

/4/ Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen:

TP BF-StB Teil B 4.3; Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von Böden, 1988

/5/ Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen:

Arbeitsanleitung für den Einsatz radiometrischer Geräte für zerstörungsfreie Dichtemessungen auf bituminösen Schichten, 1984

- /6/ Kirchner, R. : Dynamische Kontrolle der Verdichtung im Erdbau; Staßen- und Tiefbau Heft 6, 1986
- /7/ Kröber, W. : Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden, Dissertation; Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss, Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München; Hochschulschriftenreihe Heft Nr. 11, Müchen 1988
- /8/ Weiland, G. : Radiometrische Dichte- und Feuchtebestimmung; Troxler Electronics GmbH, Alling, 1987
- /9/ : Troxler-Sonde 3440, Operating Manual Troxler Elektronic Laboratories; North Carolina USA

/10/	-	: DIN 18126 Bestimmungen der Dichte nicht bindiger Böden bei lockerster und dichte- ster Lagerung
/11/	-	: DIN 18123 Korngrößenverteilung
/12/	-	: DIN 18127 Proctorversuch
/13/	-	: DIN 18134 Plattendruckversuch, 1976
/14/	-	: DIN 18196 Bodenklassifikation für techni- sche Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen, 1970
/15/	-	: DIN 1048 Prüfverfahren für Beton





Bild 1: Prinszipskizze des Vibrators





# Bild 3: Versuchsfelder

- 65 -



Bild 4: Sieblinie Unterbaumaterial

Gewichtssumme (%)






.

# Bild 6: Sieblinie Frostschutzkies

. 68 -

Bild 7: Proctorkurve Frostschutzkies





#### Bild 8: Sieblinie HGT-Grundmaterial

1.1

- 70 -



Bild 9: Proctorkurve HGT-Material (mit 4 % Bindemittel)

- 71 -







Bild 11: Trockendichte in Abhängigkeit von der Meßtlefe (16 Übergänge, Lage 1 Unterbau)

- 73 -





Trockendichte (kg/m<sup>2</sup>) Vibrator  $g_E = 2152 \text{ kg/m}^3$  $w_E = 4.2 \text{ Kg/m}^3$ Oszillator 

Zahl der Übergänge



Bild 13: Trockendichte in Abhängigkeit von der Meßtiefe (16 Übergänge, Lage 2 Unterbau)

- 75 -





Meßtiefe (cm)

- 76 -









Bild 17: Nittlere Trockendichte in Abhängigkeit von der Übergangszahl (Frostschutzschicht)







Bild 19: Frostschutzschicht: Sieblinien des abgekehrten Oberflächenmaterials und Sieblinie des Ausgangsmaterials

Korndurchmesser (mm)



<u>Bild 20:</u> Ubergangszahl (Ergebnisse entsprechend der Bohrkerndichten korrigiert)

- 82 -







Bild 22: Vibrator Versuchsfeld: Unterbaumaterial mit 0,7 m Schütthöhe; Trockendichte in Abhängigkeit von der Meßtiefe bei 4, 8 und 16 Übergängen



<u>Bild 23:</u> Oszillator-Versuchsfeld: Unterbaumaterial mit 0,7 m Schütthöhe; Trockendichte In Abhängigkeit von der Meßtlefe bei 4, 8 und 16 Übergängen



Bild 24: Untergrundboden mit 0,7 m Schütthöhe: Verformungsmoduln in Abhängigkeit von







- 87 -





Zahl der Übergänge



Bild 27: Nachuntersuchung auf dem Frostschutzmaterial: Sieblinien des abgekehrten Oberflächenmaterials

# 13. Tabellen

Tabelle 1:	Technische Masc	hinendaten	
<u>BW 160 AD 1</u>			
Gewichte			
Betriebsgewicht	- I	1.3	9400 kg
Achslast vorn/hint statische Linienla	rderen Wassertan ten ast vorn/hinten	к)	4700 kg 28 kg/cm
Bandagen			
Breite Durchmesser			1676 mm 1200 mm
Vibrationssystem		vorn	hinten
Art Frequenzen Amplituden		Vibrator 30/45 Hz 0,95/0,45 mm Vertikalamplitude	Oszillator 30/45 Hz 1,4 mm Drehschwing- amplitude am Außenmantel
Vibrationsplatte E	3PR 50/55 D		
Gewichte			
Betriebsgewicht Betriebsgewicht mi statische Flächen]	it Anbauplatten last		395 kg 420 kg 1632 kg/m
Abmessungen			
Breite der Grundpl Breite mit Anbaupl Länge der Grundpla	latte latten atte		550 mm 850 mm 905 mm
Vibrationssystem			
Frequenz Zentrifugalkraft			58 Hz 50 kN

# Unterbau Lage 1 Übergänge 2,4,8 und 16

	Vibrator	2 Übergänge	f = 30 Hz		0sz	illator 2 Ū	bergānge f =	30 Hz
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
10	2112	21,38	1,01	61,0	2091	36,48	1,75	134,0
20	2058	25,56	1,24	79,0	2003	41,78	2,09	159,0
30	2010	23,72	1,18	72,0	1934	31,54	1,63	92,0
	Vibrator	4 Übergänge	f = 30 Hz		0sz	illator 4 Ū	bergānge f =	30 Hz
10	2171	18,21	0,84	61,0	2133	30,99	1,45	100,0
20	2093	27,62	1,32	76,0	2031	36,10	1,78	132,0
30	2051	33,70	1,64	100,0	1960	33,83	1,73	95,0
	Vibrator	8 Übergänge	f = 30 Hz		0sz	illator 8 Ū	bergänge f =	30 Hz
10	2225	24,18	1,09	72,0	2168	42,07	1,94	167,0
20	2137	20,21	0,95	66,0	2061	42,68	2,07	158,0
30	2087	30,21	1,45	95,0	1980	36,59	1,85	111,0
	Vibrator	16 Übergäng	je f = 30 Hz		Osz	illator 16	Übergänge f	= 30 Hz
10	2268	19,37	0,85	75,0	2207	30,43	1,38	102,0
20	2183	22,02	1,00	61,0	2076	42,55	2,05	142,0
30	2130	18,52	0,87	59,0	1997	31,73	1,59	108,0

Tabelle 2: Dichteergebnisse der Unterbau- Lagen 1,2 und 3 mit statistischen Kenngrößen

-91-

	Vibrator 2 Übergänge f = 30 Hz					Oszillator 2 Übergänge f = 30 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)		
5	2152	27,80	1,29	92,0	2164	23,36	1,09	78,8		
10	2128	23,08	1,10	76,0	2093	15,60	0,75	58,0		
15	2081	27,32	1,33	101,0	2046	27,34	1,35	97,0		
20	2065	20,97	1,03	81,0	2018	22,99	1,15	70,0		
25	2052	18,47	0,91	57,0	2003	26,83	1,35	86,0		

Unterbau Lage 2 Übergänge 2 und 4

	Vibrato	r 4 Übergāng	gef=30 Hz	Oszillator 4 Übergänge f = 30 Hz				
5	2240	28,56	1,29	87,0	2236	41,83	1,88	157,0
10	2179	16,86	0,78	57,0	2146	24,29	1,14	88,0
15	2130	21,84	1,04	64,0	2084	27,19	1,32	91,0
20	2093	20,91	1,01	74,0	2045	28,34	1,40	82,0
25	2091	30,05	1,45	81,0	2023	24,74	1,24	72,0

- 92 -

Unterbau	Lage 2	übergänge	8	und	16
----------	--------	-----------	---	-----	----

	Vibrato	r 8 Übergäng	ef=30Hz	Oszillator 8 Übergänge f = 30 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
5	2297	32,43	1,43	107,0	2268	27,80	1,24	82,0
10	2228	17,70	0,80	45,0	2180	25,93	1,20	79,0
15	2174	18,56	0,86	51,0	2108	35,55	1,70	130,0
20	2135	24,01	1,14	79,0	2057	42,91	2,12	142,0
25	2118	32,40	1,55	86,0	2034	34,08	1,69	89,0

	Vibrato	r 16 Übergār	ngef=30H	Oszillator 16 Übergänge f = 30 Hz				
5	2341	17,32	0,75	60,0	2306	26,13	1,14	80,0
10	2258	34,56	1,55	112,0	2206	30,87	1,41	103,0
15	2216	22,59	1,03	59,0	2124	26,43	1,25	82,0
20	2172	24,52	1,14	71,0	2095	31,90	1,54	102,0
25	2157	30,69	1,44	93,0	2058	22,60	1,11	48,0

•

- 93-

#### Unterbau Lage 3 Übergänge 2 und 4

	Vibrat	or 2 Übergär	ngef=30Hz	Oszillator 2 Übergänge f = 30 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
5	2206	19,22	0,87	68,0	2211	21,10	0,96	64,0
10	2141	29,76	0,97	57,0	2140	20,34	0,95	57,0
15	2116	16,31	0,77	53,0	2088	27,76	1,33	76,0
20	2090	33,88	1,62	117,0	2042	36,00	1,76	85,0
25	2070	17,78	0,86	69,0	2020	29,48	1,46	85,0

	Vibrat	or 4 Übergā	ngef=30 H	Oszillator 4 Übergänge f = 30 Hz				
5	2286	40,21	1,76	140,0	2271	21,85	0,96	60,0
10	2217	21,17	1,23	89,0	2202	17,78	0,81	48,0
15	2174	31,43	1,45	111,0	2128	25,77	1,21	66,0
20	2145	35,57	1,66	124,0	2072	22,12	1,07	65,0
25	2114	22,25	1,05	82,0	2065	34,41	1,66	96,0

#### Unterbau Lage 3 Übergänge 8 und 16

L.	Vibrat	tor 8 Übergä	ngef=30Hz	Oszillator 8 Übergänge f = 30 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
5	2340	26,49	1,13	105,0	2291	20,39	0,89	75,0
10	2258	35,77	1,58	127,0	2190	27,68	1,26	80,0
15	2216	30,31	1,37	106,0	2129	32,78	1,54	102,0
20	2158	23,30	1,08	79,0	2074	19,59	0,95	60,0
25	2147	14,53	0,68	51,0	2053	27,41	1,34	83,0

	Vibra	tor 16 Über	gāngef=30	Oszillator 16 Übergänge f = 30 Hz				
5	2358	11,68	0,50	41,0	2314	19,55	0,84	61,0
10	2285	10,30	0,45	30,0	2221	30,95	1,39	88,0
15	2246	12,05	0,54	42,0	2147	28,78	1,34	86,0
20	2203	23,21	1,05	72,0	2088	19,66	0,94	74,0
25	2190	19,47	0,89	64,0	2066	24,28	1,18	85,0

- 95 -

		Vibrato	r	Oszillator			
	<sup>E</sup> V1 (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	Ev1 (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	
Nr. 1	59,9	142,1	2,37	56,6	128,7	2,27	
Nr. 2	55,3	136,5	2,47	52,0	130,3	2,51	
Nr. 3	63,3	141,4	2,23	59,1	127,2	2,15	
Nr. 4	62,3	136,7	2,19	64,2	136,1	2,12	
Nr. 5	65,7	142,5	2,17	61,3	130,5	2,13	
Nr. 6	59,1	135,5	2,29				
Mittel	60,9	139,1	2,28	58,6	130,6	2,23	

Tabelle 3: Verformungsmoduln Unterbau-Lage 2

Tabelle 4: Verformungsmoduln Unterbau-Lage 3

		Vibrator		Oszillator				
	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	<sup>E</sup> V2 (MN/m²)	EV2/EV1	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>		
Nr. 1	61,9	140,0	2,26	56,4	122,8	2,18		
Nr. 2	53,4	129,0	2,42	52,6	123,5	2,35		
Nr. 3	54,6	133,9	2,45	69,3	136,7	1,97		
Nr. 4	50,4	127,8	2,54	69,0	139,6	2,02		
Nr. 5	41,1	115,4	2,81	66,5	140,4	2,11		
Mittel	52,3	129,2	2,47	62,8	132,6	2,11		

iaberre 2. – oncerbau-ragen, rigebnizse der serzundsmessund (verarchundsende	Tabelle 5:	Unterbau-Lagen:	Ergebnisse	der	Setzungsmessung	(Verdichtungsende
--	------------	-----------------	------------	-----	-----------------	-------------------

		Vibrator		Oszillator				
Lage	1	2	3	1	2	3		
Schütthöhe (mm)	450	385	375	454	381	375		
Setzung (mm)	96	92	95	89	89	97		
Lage ver- dichtet (mm)	354	291	280	365	292	375		
Setzung (%)	21,4	24,0	25,5	19,7	23,3	25,9		

97 -

	Vibrator 4 Übergänge f = 30 Hz					Oszillator 4 Übergänge f = 30 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)		
5	2038	20,24	0,99	62,0	2050	32,27	1,56	117,0		
10	2024	25,68	1,27	79,0	2015	23,81	1,18	74,0		
15	2031	23,90	1,18	80,0	2014	8,41	0,42	25,0		
20	2027	29,67	1,46	102,0	2008	12,41	0,62	41,0		
25	2001	29,21	1,46	109,0	2005	30,72	1,53	80,0		

	-					
Tabelle 6:	Dichteergebnisse	der	Frostschutzschicht	und	statistische	Kenngrößen

1	Vib	orator 8 übe	rgānge f = 3	0 Hz	. Oszillator 8 Übergänge f = 30 Hz				
5	2045	21,41	1,05	52,0	2056	34,13	1,67	133,0	
10	2042	24,57	1,20	93,0	2023	30,85	1,53	111,0	
15	2049	22,45	1,09	74,0	2039	15,75	0,77	54,0	
20	2054	22,71	1,11	76,0	2038	17,41	0,85	56,0	
25	2032	28,67	1,41	90,0	2043	38,14	1,87	85,0	

	Vibrator 8 ū	iberg. f=30 H	z + 4 Überg.	f=45 Hz	Oszillator 8 Überg. f=30 Hz + 4 Überg. f=45 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m <sup>3</sup> )	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	
5	2032	18,20	0,89	50,0	2050	33,58	1,64	114,0	
10	2023	21,15	1,05	79,0	2029	24,18	1,19	81,0	
15	2050	20,12	0,98	65,0	2051	21,75	1,06	63,0	
20	2056	21,46	1,04	74,0	2055	20,11	0,98	54,0	
25	2047	20,36	0,99	54,0	2044	19,88	0,97	56,0	

	Nachverdic	htung Vib	rator-Versuc	Nachverdichtung Oszillator-Vers			fersuchsfeld	
5	2114	21,59	1,03	58,0	2128	10,41	0,49	30,0
10	2106	16,32	0,78	56,0	2119	16,87	0,80	41,0
15	2099	14,89	0,71	55,0	2106	21,18	1,01	60,0
20	2096	16,14	0,76	40,0	2094	19,23	0,92	59,0
25	2069	22,32	1,06	47,0	2039	11,31	0,56	16,0

- 99 -

		Vibrator		Oszillator				
	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	<sup>E</sup> v1 (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	Ev2/Ev1		
Nr. 1	14,27	76,48	5,37	16,42	84,78	5,16		
Nr.2	13,35	74,69	5,59	20,57	102,85	4,99		
Nr. 3	13,19	74,95	5,68	22,68	104,73	4,62		
Nr. 4	11,53	68,47	5,94	25,30	101,93	4,03		
Nr. 5	9,50	66,33	6,98	17,48	93,31	5,34		
Mittel	12,40	72,18	5,80	20,49	97,46	4,76		

Tabelle 7: Frostschutzschicht: Verformungsmoduln nach 12 Verdichtungsübergängen (Vibrator/Oszillator)

<u>Tabelle 8:</u> Frosschutzschicht: Verformungsmoduln nach einer Nachverdichtung mit einer Vibrationsplatte (BPR 50/55)

	ų.	Vibrator	4	Oszillator			
	<sup>E</sup> v1 (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	
Nr. 1	46,61	128,42	2,76	54,38	143,08	2,63	
Nr. 2	52,69	131,73	2,50	60,32	145,28	2,41	
Nr. 3	45,75	131,67	2,40	63,11	148,39	2,35	
Nr. 4	51,62	129,50	2,51	58,25	140,39	2,41	
Nr. 5				57,43	141,07	2,46	
Mittel	51,52	130,33	2,53	58,07	143,06	2,46	

Tabelle 9: Frostschutzschicht: Ergebnisse der Setzungsmessung

	Vibrator	Oszillator
Schütthöhe (mm)	360	362
Setzung 12 Überg. (mm)	40	42
Setzung (%)	11,1	11,6
Setzungszunahme durch Nachverdichtung (mm)	10	4
Setzung gesamt (mm)	50	46
Lage verdichtet (mm)	310	316

		Vibrator			Oszillator				
Übergang	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	
Schüttung	2058	30,83	1,58	115,0	2072	32,90	1,68	114,0	
1 statisch 1 f = 30 Hz	2184	23,51	1,13	82,0	2186	8,39	0,40	32,0	
2 f = 30 Hz	2227	33,56	1,58	113,0	2208	16,14	0,77	58,0	
3 f = 30 Hz	2207	15,72	0,75	43,0					
4 f = 30 Hz	2242	33,97	1,59	108,0	2234	28,93	1,36	78,0	
5 f = 45 Hz	2221	17,46	0,83	49,0	2221	33,85	1,60	105,0	
6,7 f=45 Hz	2220	28,35	1,34	99,0	2225	11,82	0,56	30,0	

Tabelle 10: Dichteergebnisse der hydraulisch gebundenen Tragschischt und statistische Kenngrößen
		Vibrator	Oszillator
Schütthöhe	(mm)	188	187
Setzung	(mm)	33	31
Setzung	(%)	17,6	16,6
Lage verdichte	t (mm)	155	156

 Tabelle 11:
 Hydraulisch gebundene Tragschicht: Ergebnisse der Setzungsmessung (Verdichtungsende)

 
 Tabelle 12:
 Hydraulisch gebundene Tragschischt: Druckfestigkeiten in N/mm² nach 28 Tagen Lagerung

	<b>Vibrator</b> Probekörper	<b>Oszillator</b> Probekörper	<b>Vibrator</b> Bohrkern	Oszillator Bohrkern
Nr. 1	9,6	12,4	7,9	7,4
Nr. 2	12,4	8,4	14,7	13,6
Nr. 3	13,6	11,9	9,6	15,3
Mittel	11,9	10,9	10,7	12,1

			Tr	agschichter	ו			
		Vibra	itor			Oszilla	itor	
Übergang	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittlewert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kġ/m³)
Schüttung	2207	34,94	1,60	104,0	2222	20,51	0,94	67,0
1,2 f=30 Hz	2299	45,13	1,99	107,0	2290	13,58	0,61	37,0
3,6 f=30 Hz	2366	16,16	0,69	48,0	2342	10,86	0,47	37,0
7,8 f=45 Hz	2394	22,69	0,96	74,0	2349	17,89	0,78	50,0

			De	ckschichte	n			
		Vibra	ator			0szil	lator	
Übergang	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
Schüttung	2213	39,21	1,75	149,0	2168	43,16	1,95	118,0 -
1,2 f=45 Hz	2317	16,32	0,70	53,0	2322	29,19	1,23	98,0
3,6 f=45 Hz	2386	21,37	0,89	77,0	2407	22,43	0,91	78,0

Tabelle 13:

Dichteergebnisse der bituminösen Trag- und Deckschichten und statistische Kenngrößen

- 104 -

		Tragschicht Vibrator	Tragschicht <b>Oszillator</b>	Deckschicht Vibrator	Deckschicht Oszillator
Schütthöhe	(mm)	128	117	43	48
Setzung	(mm)	18	17	6	9
Setzung	(%)	14,1	14,5	14,0	14,5
Lage verdichtet	(mm)	110	100	37	. 39

Tabelle 14: Bituninöse Oberbauschichten: Ergebnisse der Setzungsmessung (Verdichtungsende)

## Tabelle 15: Bituninöse Oberbauschichten: Mittlere Mischguttemperaturen während der Verdichtung

		Tragschicht Vibrator	Tragschicht Oszillator	Deckschicht Vibrator	Deckschicht Oszillator
T-Anlieferung	(°C)	180	195	190	225
vor Übergang 1	(°C)	156	153	107	111
vor Übergang 3	(°C)	134	125	87	95
vor Übergang 7	(°C)	105	110	·	
Verdichtungsende	(°Ć)	97	102	72	82
Ungebungstemp.	(°C)	21	24	20	25

		Vibrator		Oszillator		
	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	Ev2 (MN/m²)	<sup>E</sup> V2 <sup>/E</sup> V1	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>
Nr. 1	25,10	77,39	3,08	17,96	76,87	3,78
Nr. 2	26,69	79,89	2,99	17,26	67,24	3,90
Nr. 3	27,68	83,68	3,13	17,85	67,39	3,78
Nr. 4	25,43	75,92	2,99	18,46	68,00	3,65
Nr. 5				17,72	69,68	3,93
Mittel	26,53	79,22	2,99	17,85	68,04	3,81

 Tabelle 16:
 Nachuntersuchungen am Unterbaumaterial: Verformungsmoduln nach

 4 Übergängen

Tabelle 17:	Nachuntersuchungen am Unterbaumaterial: Verformungsmoduln n	ach
	8 Übergängen	

		Vibrator			Oszillator	
	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	Ev2 (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	Ē <sub>V1</sub> (MN/m²)	<sup>E</sup> v2 (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>
Nr. 1	39,10	114,65	2,93	29,02	91,56	3,15
Nr. 2	38,33	112,36	2,93	31,03	90,91	2,93
Nr. 3	38,79	117,90	3,04	31,58	92,88	2,94
Nr. 4	38,07	110,22	2,90	30,30	94,79	3,13
Nr. 5	37,34	111,87	3,00	30,52	93,02	3,05
Mittel	38,33	113,40	2,96	30,49	92,63	3,04

		Vibrato	or	Oszillator		
	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	Ev2/Ev1
Nr. 1	47,02	120,00	2,55	47,46	114,58	2,41
Nr. 2	51,00	125,87	2,47	52,82	115,38	2,18
Nr. 3	55,73	136,36	2,45	49,75	113,64	2,28
Nr. 4	52,13	129,22	2,48	52,26	121,54	2,33
Nr. 5	53,54	126,76	2,37	50,14	117,88	2,35
Mittel	51,88	127,64	2,46	50,49	116,60	2,31

 Tabelle 18:
 Nachuntersuchungen am Unterbaumaterial: Verformungsmoduln nach

 16 Übergängen

Tabelle 19: Nachuntersuchungen am Unterbaumaterial: Verformungsmoduln in 17 cm Tiefe

		Vibrator		Oszillator		
	<sup>E</sup> V1 (MN/m <sup>2</sup> )	E <sub>V2</sub> (MN/m <sup>*</sup> )	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	EV2/EV1
Nr. 1	51,55	125,00	2,42	37,60	76,66	2,04
Nr. 2	67,57	140,63	2,08	29,74	73,77	2,48
Nr. 3	66,82	150,00	2,24	36,24	86,54	2,39
Mittel	61,98	138,54	2,24	34,53	78,99	2,29

Tabelle 7.20:	Nachuntersuchungen	am	Unterbaumaterial:	Ergebnisse	der
	Setzungsmessungen				

	1	Vibrator	Oszillator
Schütthöhe	(mm)	690	670
Setzung	(mm)	159	125
Setzung	(%)	23,1	18,6

-108-

Vibrator (0,2 mm Amplitude) 4 Übergänge f = 30 Hz					Oszillator 4 Übergänge f = 30 Hz			
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
5	2033	31,14	1,53	91,0	2014	4,99	0,25	10,0
10	2016	24,33	1,21	76,0	1992	7,12	0,36	14,0
15	2028	22,34	1,10	69,0	2012	13,56	0,67	38,0
20	2027	20,12	0,99	62,0	2003	10,65	0,53	29,0
25	2015	21,82	1,08	60,0	2008	18,97	0,94	50,0

Vibra	Vibrator (0,2 mm Amplitude) 8 Übergänge f = 30 Hz					Oszillator 8 Übergänge f = 30 Hz			
5	2066	25,36	1,23	70,0	2003	22,24	1,03	48,0	
10	2073	20,51	0,99	56,0	2038	14,74	0,46	29,0	
15	2075	19,76	0,95	66,0	2057	27,85	1,41	90,0	
20	2056	19,24	0,94	57,0	2051	22,40	1,09	71,0	
25	2047	31,42	1,54	67,0	2047	33,84	1,63	96,0	

Tabelle 21: Nachuntersuchung auf dem Frostschutzmaterial (Vibrator mit 0,2 mm Verdichtungsamplitude): Dichteergebnisse und stati-

- 109 -

Vibrator (0,2 mm Amplitude) 14 Übergānge f = 30 Hz				Oszillator 14 Übergänge f = 30 Hz				
Meßtiefe (cm)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw. (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)	Mittelwert (kg/m³)	Standardabw (kg/m³)	Rel. Fehler (%)	Streubreite (kg/m³)
5	2077	27,69	1,33	68,0	2031	21,16	1,04	70,0
10	2087	19,00	1,78	46,0	2064	21,50	1,05	78,0
15	2087	23,81	1,15	65,0	2060	25,37	1,23	70,0
20	2067	19,98	1,04	62,0	2064	32,23	1,56	83,0
25	2048	20,82	1,02	55,0	2053	38,47	1,82	86,0

- 110 -

		Vibrator		Oszillator			
	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	E <sub>V1</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> (MN/m²)	E <sub>V2</sub> /E <sub>V1</sub>	
Nr. 1	23,49	108,55	4,62	20,54	96,35	4,69	
Nr. 2	18,29	108,59	5,94	18,56	91,56	4,93	
Nr. 3	17,40	95,01	5,46	19,59	98,58	5,03	
Nr. 4	17,30	95,47	5,52	19,87	102,28	5,15	
Nr. 5	23,08	109,86	4,76	18,51	96,92	5,24	
Mittel	19,91	103,50	5,20	19,41	97,20	5,00	

 Tabelle 22:
 Nachuntersuchung auf dem Frostschutzmaterial (Vibrator mit 0,2 mm

 Verdichtungsamplitude):
 Verformungsmoduln

14. Photos



Photo 1: Tandem-Vibrationswalze BW 160 AD 1



Photo 2: Vibrationsplatte BPR 50/55 D



Photo 3: Materialschüttung mit Radlader



Photo 4: Mit Folie abgedeckte Versuchsfelder zur Verhinderung von Austrocknungserscheinungen an der Oberfläche



Photo 5: Schüttung Unterbau-Lage 3 kurz vor Verdichtungsbeginn



Photo 6: Einbau der hydraulisch gebundehen Tragschicht mit Fertiger und Messung der Schüttdichte mit der TROXLER-Sonde 3440







Photo 8: Borhkerne des Oberbaus (Deckschicht, bituminöse Tragschicht, hydraulisch gebundene Tragschicht)







Photo 10: Deckschicht: Überprüfung der Ebenheit



Photo 11: Oszillator-Versuchsfeld: Unterbau Lage 2 nach Verdichtungsende



Photo 12: Oberflächenstruktur zu Photo 11



Photo 13: Vibrator-Versuchsfeld: Oberflächenstruktur der Frostschutzschicht nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials



Photo 14: Oszillator-Versuchsfeld: Oberflächenstruktur der Frostschutzschicht nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials



Photo 15: Vibrator-Versuchsfeld: Oberfläche der hydraulisch gebundenen Tragschicht nach Ende der Verdichtung



Photo 16: 0szillator-Versuchsfeld: Oberfläche der hydraulisch gebundenen Tragschicht nach Ende der Verdichtung

- 119 -



Photo 17: Vibrator-Versuchsfeld: Oberflächenstruktur der hydraulisch gebundenen Tragschicht nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials



Photo 18: Oszillator-Versuchsfeld: Oberflächenstruktur der hydraulisch gebundenen Tragschicht nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials



Photo 19: Vibrator-Versuchsfeld: Rißbildungen in der bituminösen Tragschicht



Photo 20: Oszillator-Versuchsfeld: Rißbildungen in der bituminösen Tragschicht



Photo 21: Nachuntersuchung auf dem Frostschutzmaterial (Vibrator mit 0,2 mm Verdichtungsamplitude): Oberflächenstruktur nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials im Vibrator-Versuchsfeld



Photo 22: Nachuntersuchung auf dem Frostschutzmaterial (Vibrator mit 0,2 mm Verdichtungsamplitude): Oberflächenstruktur nach Entfernen des losen Oberflächenmaterials im Oszillator-Versuchsfeld

## Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für

Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Heft 1982	1	Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden - vergriffen -
Heft 1983	2	Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässig- keitstheorie in der Bodenmechanik
Heft 1984	3	In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach - vergriffen -
Heft 1985	4	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikat~ gel-injizierter Sande
Heft 1985	5	Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle
Heft 1986	6	Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien
Heft 1986	7	Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkenn- werten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse
Heft 1986	8	Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben
Heft 1 <b>9</b> 87	9	Testing of bentonite suspensions
Heft 1987	10	Beiträge zur Felsmechanik
Heft 1988	11	Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrations- verdichtung von Böden
Heft 1988	12	Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge
Heft 1989	13	Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise

Heft 14Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannun-1989gen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlaumbauten

Heft 15Beitrag zur Analyse des Tragverhaltens von einfach1989bewehrten Zweischichtensystemen

Heft 16 Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau 1990

Heft 17Vergleichsuntersuchungen über die Wirkung von vibrierend1990und oszillierend arbeitender Verdichtungswalze