

IGT Institut für Geotechnik

Strassenbau

Dynamische Intensivverdichtung

Energieaufnahme bei dynamischer Verdichtung und Beurteilung der Verdichtungseigenschaften von Böden

Compactage dynamique intensif

**Absorption d'énergie lors du compactage dynamique et appréciation des qualités
de compactage des sols**

März 1994

Schlussbericht zum Forschungsauftrag 2/79

Eidgenössisches Verkehrs- und
Energiewirtschaftsdepartement;
Bundesamt für Strassenbau
Monbijoustrasse 40
3003 Bern

auf Antrag von

VSS
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich

M. Caprez, Songlin Ma
ETH-Zürich

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	III
Zusammenfassung	IV
Résumé	IV
Summary	V
1. Einleitung	1
2. Auftrag	2
2.1 Vorgeschichte	2
2.2 Auftrag im Wortlaut	2
2.3 Auftragsanalyse	3
3. Vorgehen	4
4. Verdichtung und Verdichtungsenergie	4
4.1 Zweck der Verdichtung und Verdichtungsuntersuchung	4
4.2 Verdichtungsarten und Einflussgrössen	6
4.3 Dynamische Intensivverdichtung	12
4.4 Verdichtungsenergie	16
4.5 Energieaustausch bei der Verdichtung	21
5. Bodenmodelle	23
5.1 Allgemeines	23
5.2 Grundelemente	25
5.3 Bodenmodelle	26
5.4 System Verdichtungsgerät/Boden	27
6. Erklärungen zum Verdichtungsverfahren	30
7. Schlussfolgerungen	34
8. Literatur	35

Vorwort

Die Verdichtung von Bodenmaterialien als eine der rationellsten Formen zur Verbesserung der Bodeneigenschaften wurde am IGT der ETH (vormals IGB) aus verschiedenen Blickpunkten untersucht. Es ist einer der grossen Verdienste von emer. Prof. Dr. F. Balduzzi, dass er diese Thematik schon sehr früh aufgegriffen, mit entsprechenden Forschungsarbeiten untersucht und in die Lehre und die Praxis eingebracht hat.

Unter der Leitung von Prof. Balduzzi wurden verschiedene Forschungsvorhaben ausgeführt, aus welchen hervorgeht, dass eine zusätzliche Verdichtung von Bodenmaterialien eine deutlich überproportionale Steigerung von gewünschten bodenmechanischen Eigenschaften wie Tragfähigkeit, Stabilität und Homogenität bewirkt. Die Motivation zum vorliegenden Bericht gründet denn auch in den vielversprechenden Resultaten, welche mit dem Aufbringen von "Hochverdichtung" unter Laborverhältnissen erzielt wurden. In dieser Arbeit wurden Bodenproben in Verdichtungstöpfen mit Schlagverdichtung von Fallmassen aus grosser Höhe verdichtet. Der einzelne Verdichtungsschlag wies damit ein Vielfaches des Impulses von demjenigen des standardisierten Proctor-Verdichtungshammers auf.

Die dynamische Intensivverdichtung wird im wesentlichen gleich wie die im Laborversuch aufgebrachte Hochverdichtung ausgeführt. Auch die DYNIV benützt als Weiterentwicklung des Freifallstampfverfahrens die grosse Fallmasse aus grosser Höhe, welche den zu verbessernden Boden durch einzelne Schläge verdichtet.

Allerdings zeigen Erfahrungen und Versuche, dass die DYNIV mit Laborversuchen nicht befriedigend zu erfassen ist (Modellmassstab). Versuche auf experimenteller Basis im Labormassstab versprachen keine weiteren Einsichten zur Erklärung der dynamischen Intensivverdichtung. Daher haben die Bearbeiter dieser Studie grossen Wert auf eine ausgedehnte Literaturrecherche und -auswertung und die eher grundsätzliche theoretische Behandlung der Verdichtung gelegt. Die Erfahrungen der Forschungsstelle auf dem Gebiet der Verdichtungsversuche konnten für diese Arbeit benutzt werden.

Dr. M. Caprez

Prof. H.J. Lang

Zusammenfassung

Die Verdichtung von Bodenmaterialien ist ein Energieaustauschprozess zwischen der abgegebenen Energie des Verdichtungsgerätes und der aufgenommenen Energie des Bodens. Nur ein Teil — welcher von vielen Einflussgrössen abhängig ist und sich während des Verdichtungsvorganges ändert — der vom Verdichtungsgerät abgegebenen Energie kann für die gewünschten Effekte im Boden, die Zunahme der Lagerungsdichte, genutzt werden. Die Energie $E = \int p^* ds$ kann als Massstab der effektiven Verdichtungsenergie betrachtet werden und sie ist messbar.

Die vom Verdichtungsgerät an das Bodenmaterial abgegebene Energie und die vom Boden aufgenommene Energie bei der Verdichtung können als Hilfsmittel für die Beurteilung der Verdichtbarkeit eines Materials und der Eigenschaften von Böden bei der Verdichtung sowie für die Beurteilung der Effektivität des eingesetzten Verdichtungsgerätes herangezogen werden.

Die Verdichtungsvorgänge können mittels der Energieaufnahme bei der Verdichtung und mittels eines Modells zusätzlich theoretisch erklärt werden. Zur Zeit sind verschiedene Untersuchungen zu diesem Thema in Bearbeitung.

Die Studien über das Verhalten des Systems Vibrationswalze/Boden zeigten, dass die Erkenntnisse für verschiedene Anwendungen wie z.B. Verdichtungsmaschinenbau, Beurteilung der Bodeneigenschaften und flächendeckende Verdichtungskontrolle, usw. verwendet werden können.

Résumé

Le compactage des sols est un échange d'énergie entre l'énergie provenant de la machine à compacter et l'énergie absorbée par le sol. Seule une partie de l'énergie émanant de la machine - dépendant de nombreux facteurs et variant durant le processus de compactage - peut être utilisée pour obtenir les effets désirés dans le sol, soit l'augmentation de la compacité. L'énergie $E = \int p^* ds$ peut être considérée comme critère de l'énergie de compactage effective et elle est mesurable.

L'énergie transmise au sol par la machine à compacter et l'énergie absorbée par le sol sont des aides utiles quand il s'agit de porter un jugement sur la compactabilité

d'un sol ou de caractériser un sol pour le compactage, ainsi que pour mesurer l'efficacité de la machine à compacter.

Les processus de compactage s'expliquent par l'énergie absorbée par le sol durant le compactage et aussi théoriquement par un modèle. Plusieurs projets de recherche concernant ces problèmes sont en cours.

Les recherches sur le comportement du système rouleau vibrant/sol ont donné des résultats qui peuvent être utilisés pour des applications diverses telles que construction de machines à compacter, jugement des caractéristiques du sol et contrôle du compactage de surfaces étendues.

Summary

The compaction of soils represents an exchange of energies between the energy emitted from the compaction machine and the energy absorbed by the soil. Only a small part of the emitted energy - due to the influences and the changes occurring during the compaction process - can be used to obtain the desired effects in the soil, e.g. to increase the bearing capacity. The energy $E = \int p^* ds$ may be considered as the measure of the effective compaction energy and is measurable.

The energy transmitted to the soil by the compaction machine and the energy absorbed by the soil during compaction are useful aids when assessing the compaction ability of a given material and the characteristics of a soil for compaction, as well as for the judgement of the compaction machine's effectiveness.

The compaction process can be explained through the energy intake during compaction and theoretically by an additional model. Several investigations regarding these problems are presently under way.

The studies related to the behaviour of the system vibration-machine/soil gave results that can be used for various applications such as construction of compaction machines, assessment of soil characteristics and compaction control of surface areas.

Dynamische Intensivverdichtung

Energieaufnahme bei dynamischer Verdichtung und Beurteilung der Verdichtungseigenschaften von Böden

1. Einleitung

Die Verdichtung von Bodenmaterialien spielt in der Geotechnik und im Strassenbau eine sehr wichtige Rolle. Eines der massgebendsten Qualitätsmerkmale für die Tragfähigkeit und die Gebrauchsdauer von Strassen und Foundationen ist die Verdichtung. Verschiedene Forschungsarbeiten zeigen die überproportionale Zunahme der Eigenschaften wie Tragfähigkeit, Stabilität und Homogenität von Schichten für Foundationen mit der Zunahme der Dichte. Allerdings ist der Zusammenhang zwischen Bodenart, Verdichtungszustand und Einsatz des optimalen Verdichtungsgerätes noch weitgehend auf empirische Daten angewiesen.

Standardisierte Verdichtungsversuche im Feld und im Labor wie z.B. Proctor- und MCV-Versuche bilden die Grundlage für das Optimieren von Verdichtungswassergehalt, Dichte und aufgebrachter Verdichtungsenergie. Die Art der Verdichtung — Fallhammer, Verdichtungsschläge einer bestimmten Fallmasse auf das zu verdichtende und prüfende Material usw. — wird bei diesen Versuchen für alle Bodenklassen gleich behalten.

Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Verdichtungsgeräte in der Praxis führen zur Notwendigkeit, die Mechanismen des Verdichtungsvorganges näher zu untersuchen, wozu dieser Bericht einen Beitrag leisten soll.

In der Praxis und bei Laborversuchen werden verschiedene Verdichtungsmethoden angewandt. Diese Verdichtungsmethoden oder Verdichtungsarten haben unterschiedliche Verdichtungswirkungen auf die Bodenmaterialien. Das zu verdichtende Material nimmt bei der Verdichtung Energie auf und wird verdichtet. Die Unterschiede zwischen den Verdichtungswirkungen der verschiedenen Verdichtungsarten bestehen darin, dass die Materialien bei den Verdichtungsvorgängen unterschiedliche Anteile der effektiv aufgebrachten Energie aufnehmen. Diese Einflüsse und Vorgänge können mit dem bodenmechanischen Verhalten der Materialien vor und nach der Verdichtung untersucht werden.

2. Auftrag

2.1 Vorgeschichte

Aus der Erfahrung, dass mit grossen Fallmassen aus grosser Höhe auch Bodenschichten verdichtet werden können — dynamische Intensivverdichtung DYNIV —, deren Verdichtungsmechanismus mit bodenmechanischen Ueberlegungen und Untersuchungsmethoden nur unbefriedigend erklärbar ist, ergab sich die Frage nach dem Mechanismus der Verdichtung bzw. der Verdichtungswirkung verschiedener Verdichtungsarten.

In einer ersten Phase wurden die Aspekte und Erfahrungen der dynamischen Intensivverdichtung untersucht. Diese Untersuchung führte zu einem Bericht [6]. Eine weitere Phase soll den Einfluss verschiedener Verdichtungsarten und Energien näher untersuchen.

2.2 Auftrag im Wortlaut

Gemäss Auftragsschreiben des Eidgenössischen Departementes des Innern vom 29. März 1979 wurde die Bodendynamikerguppe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich beauftragt, die im Rahmen des Auftrages Nr. 6/78 begonnenen Pilotversuche mit siltigen und tonigen Böden fortzusetzen um damit die Grundlagen zur Erarbeitung von Kriterien und einer Untersuchungsmethodik zu schaffen. Diese sollen dem projektierenden Ingenieur die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Intensivverdichtung erlauben.

2.3 Auftragsanalyse

Der Forschungsauftrag 2/79 trägt den Titel "Dynamische Intensivverdichtung". Dabei geht es faktisch um die Beurteilung des Einflusses einer bestimmten Verdichtungsart auf das bodenmechanische Verhalten von Böden. Dies ist aus der damaligen Problemstellung (1978) zu verstehen, die davon ausging, dass für eine zufriedenstellende Erfassung und Erklärung der Wirkung der dynamischen Intensivverdichtung die theoretischen bodenmechanischen Zusammenhänge abzuklären sind.

Dieser Auftrag wurde in einem ersten Teil behandelt und es wurden die nötigen praktischen und theoretischen Ueberlegungen und Untersuchungen durchgeführt, welche zur Erstellung des Berichtes EVED-ASB Nr. 64 vom März 1983 [6] führten und einen ersten Abschluss fanden. Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem zweiten Teil des Forschungsauftrages, nämlich der Untersuchung der Wirkung verschiedener Verdichtungsarten und -Energien auf das bodenmechanische Verhalten des Bodens.

Bei der dynamischen Intensivverdichtung können grundsätzlich zwei Verfahren unterschieden werden [6]:

- Die erste Methode entspricht einem Konsolidationsverfahren zur Verdichtung feinkörniger, wassergesättigter Böden oder solchen mit hohem Wassergehalt.
- Das zweite ist eine gewöhnliche Schlagverdichtung, wobei nur die Dimensionen von Fallgewicht und Fallhöhe aussergewöhnlich sind. Diese Methode kann zur Verdichtung von grob- oder gemischtkörnigen Böden verwendet werden.

Beiden Verfahren ist die Art und Weise der an der Oberfläche erzeugten Belastung gemeinsam.

Die Fragestellung ergab sich aus der Tatsache, dass die erste Untersuchung [6] auf gewisse Fragen wie "Mechanismus des Verdichtens gesättigter oder beinahe gesättigter Böden" durch schwere Fallgewichte nicht restlos Antwort geben konnte. Aufgrund der ersten Untersuchung wurden einige Annahmen bezüglich des Verdichtungsmechanismus wie z.B.. "hydraulic fracturing" usw. getroffen.

3. Vorgehen

Aufgrund ausgewählter Fragestellungen zu den folgenden Problemkreisen wurde eine Auswertung der Literatur durchgeführt.

- Theoretische Erklärung zu den Verdichtungserscheinungen bei verschiedenen Verdichtungsarten an Hand der Energieaufnahme oder eines Modells
- Zusammenhänge zwischen Verdichtungsarten, absorbierter effektiver Verdichtungsenergie und bodenmechanischen Eigenschaften der verdichteten grobkörnigen Bodenmaterialien.
- Verdichtungswirkungen von verschiedenen Verdichtungsgeräten auf die Bodenmaterialien
- Zusammenhänge zwischen Labor- und Felduntersuchungen.

4. Verdichtung und Verdichtungsenergie

4.1 Zweck der Verdichtung und Verdichtungsuntersuchung

Unter Verdichtung versteht man definitionsgemäss die Verminderung des Porenvolumens eines Bodens ohne wesentliche Veränderung seiner Korngrössenverteilung bei der Verdichtung [8]. In der Geotechnik und im Strassenbau spielt die künstliche Verdichtung von Bodenmaterialien eine sehr wichtige Rolle. Die Verdichtung hat zwei Hauptzwecke: den Boden zu verbessern und genügend hohe Homogenität sowie Stabilität der bodenmechanischen Eigenschaften zu erreichen.

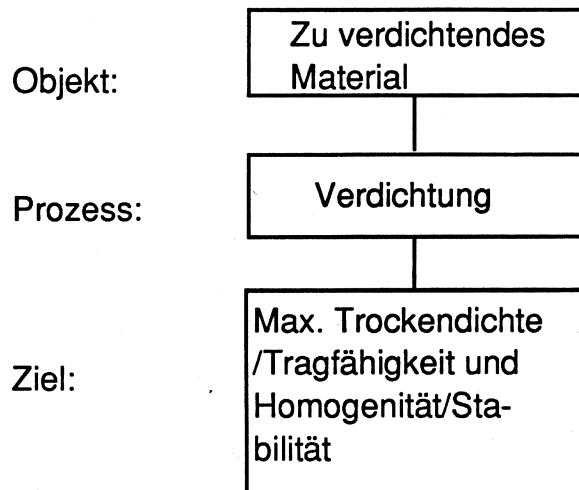


Bild 1 Zweck der Verdichtung

Um die Verdichtungseigenschaften eines Bodens und die Verdichtungswirkungen verschiedener Verdichtungsarten und Geräte beurteilen zu können, wurden mehrere Versuchsmethoden entwickelt. Verschiedene Untersuchungen, von standardisierten Laborversuchen (Proctor-Versuch usw.) bis zu Baustellenversuchen, von einzelnen Proben bis zu ganzen Systemen Verdichtungsgerät/Boden, wurden in Labor, Feld und Baupraxis durchgeführt.

Die Untersuchung der Verdichtung dient zwei Hauptzielen:

- Verdichtungskontrolle und Beurteilung der Eigenschaften von Böden
- Wahl geeigneter Verdichtungsarten und Geräte.

Die Arbeiten im Bodenverdichtungsbereich können im wesentlichen wie folgt dargestellt werden.

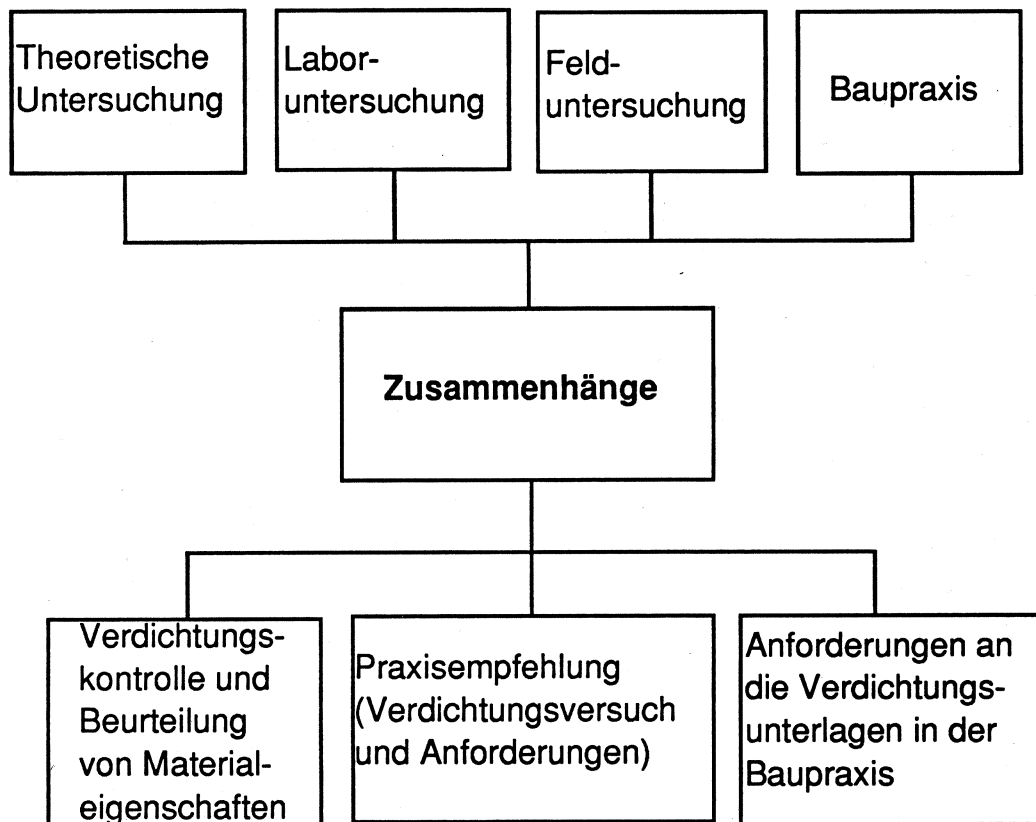


Bild 2 Arbeiten im Bereich der Bodenverdichtung

4.2 Verdichtungsarten und Einflussgrößen

Der Verdichtungsvorgang (insbesondere bei der Vibrationsverdichtung) lässt sich grundsätzlich in vier Prozesse gliedern [3], von denen jeder einzelne mit unterschiedlichem Anteil eine Rolle bei der Verdichtung spielt.

- Ordnungsprozess
- Transportprozess
- Ausscheidungsprozess (Luft und Wasser)
- Destrukturierungsprozess

Diese vier Prozesse oder Kombinationen davon können bei der Verdichtung gleichzeitig stattfinden. Jeder Prozess wendet die vom Verdichtungsgerät an das zu verdichtende Material abgegebene Energie auf.

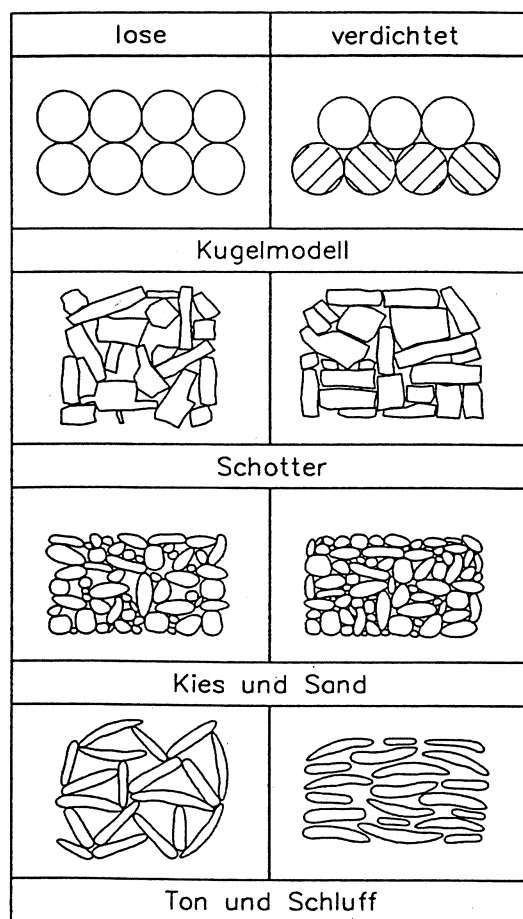


Bild 3 Verdichtung von Haufwerken

Die Bau- und Laborpraxis hat mehrere verschiedene Verdichtungsmethoden oder Verdichtungsarten zur Verfügung. Diese haben unterschiedliche Verdichtungswirkungen auf die Bodenmaterialien. Dabei wird die Verdichtung von vielen Grössen beeinflusst.

Die für die Verdichtung wichtigen Einflussgrössen bzw. Eigenschaften der Bodenmaterialien werden hauptsächlich von folgenden Grössen beeinflusst [3].

- Bodenart (Mineralzusammensetzung siehe Bild 4)
- Korngrössenverteilung
- Wassergehalt
- Plastische Eigenschaften/Konsistenz, Konsistenzgrenzen
- Kornform und Kornrauigkeit

Boden	Sandkorn	Schluffkorn	Feinstes
	Gew. - %		
1	88	10	2
2	78	15	13
3	73	9	18
4	32	33	35
5	5	64	31
6	5	85	10
7	6	22	72
8	94		

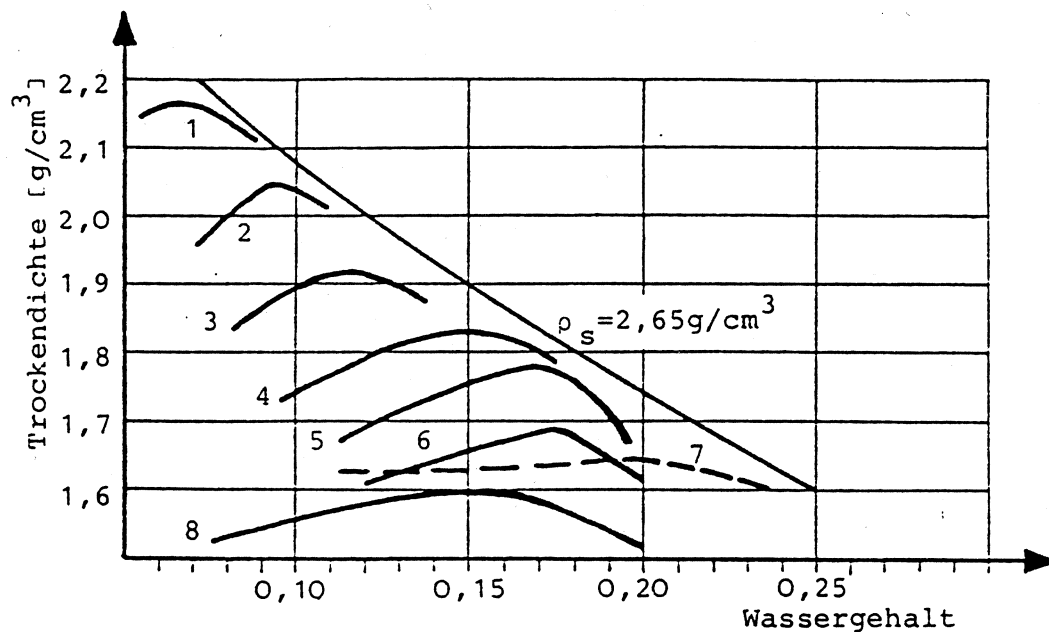


Bild 4 Einfluss der Kornzusammensetzung auf die Ergebnisse des Proctorversuches(aus[5])

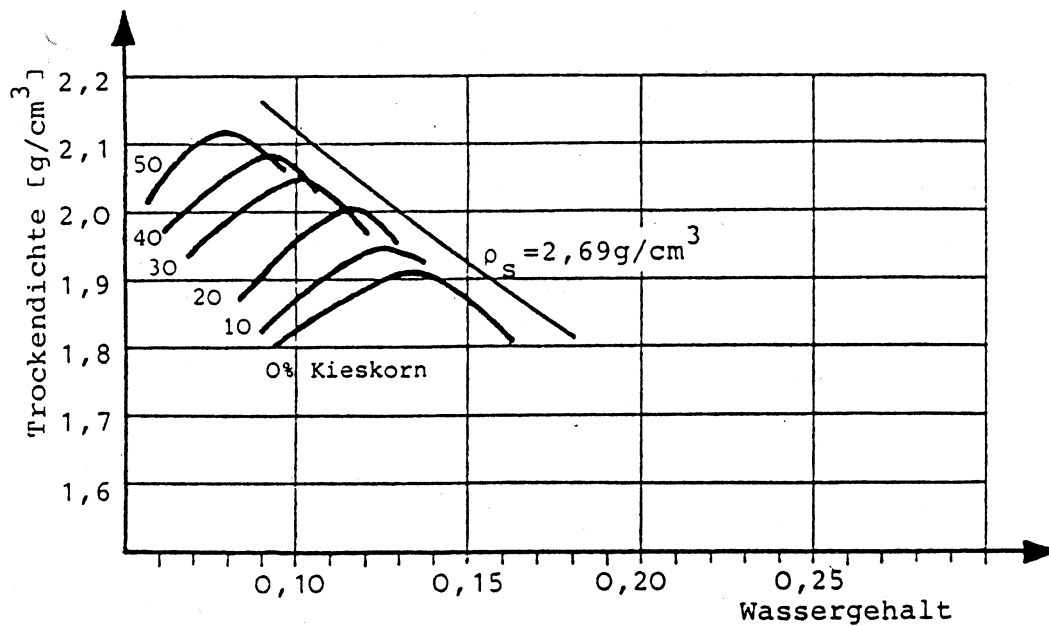


Bild 5 Einfluss des Kieskornteils auf die Ergebnisse des Proctorversuches bei einem schluffigen Sand nach Zeigler

Die für die Verdichtung wichtigen Aspekte der Verdichtungsmethoden sind:

- Verdichtungsart (Statisch, Stoss, Vibration)
- Verdichtungsarbeit, Verdichtungsenergie
- Anzahl der Verdichtungsbehandlungen
(z.B. Schlagzahl, Lastwechselzahl, Einwirkungsdauer, Energie pro Schlag usw.).

	Statische Last	Stoß	Vibration
Verdichtungsprinzip			
Einflussgrößen	Geometrie der Aufstandsfläche Flächenlast	Impuls Stoßbeschleunigung Stoßkraft	Schwingamplitude des Walzkörpers Walzkörperbeschleunigung Fliehkraft Fahrgeschwindigkeit

Bild 6 Verdichtungsprinzipien und Einflussgrößen [3]

Bei der Verdichtung von Fundations- oder Tragschichten als auch bei Verdichtungsversuchen im Labor spielt neben weiteren Einflüssen die Steifigkeit oder Tragfähigkeit der Unterlage eine massgebende Rolle.

Im Labor

Die Verdichtung im Labor wird von vielen Grössen beeinflusst [10]. Die vorherrschenden Faktoren sind:

- Bodenart und Bodeneigenschaften
- Verdichtungsenergie und Form ihrer Einwirkung
- Auflagerbedingungen für die Prüfform
- Gefässgrösse und Gefässform
- Behandlung des Versuchsmaterials
- Prüfmethode für Dichte- und Wassergehaltsbestimmung
- Arbeitsweise des Laboranten

Die Grösse der Verdichtungsarbeit und die Verdichtungsart haben dabei entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Dichte des Bodens.

Der Einfluss gesamten aufgebrauchten Verdichtungsenergie auf die erreichte Trockendichte ist je nach Wassergehalt der Probe stark unterschiedlich. Das ist nicht nur bei der Proctor-Verdichtung sondern auch beim MC-Versuch (Moisture Condition Versuch) und weiteren Versuchsarten festzustellen. Das Trockenraumgewicht steigt mit der Schlagzahl oder mit der aufgebrauchten Energie solange eine bestimmte Sättigung des Materials nicht überschritten wird, und der plastische Widerstand der Probe überwunden werden kann. Bei Erreichen einer Grenzsättigung (Wasser zu Porenvolumen) kann die Trockendichte bei gegebener Verdichtungsart auch bei Steigerung der Verdichtungsenergie nicht mehr vergrössert werden. Der am Transport and Road Research Laboratory in England entwickelte Versuch [7] kann als eine neue Methode zur Prüfung der Verdichtbarkeit von fein- und grobkörnigen Bodenmaterialien angewandt werden [8].

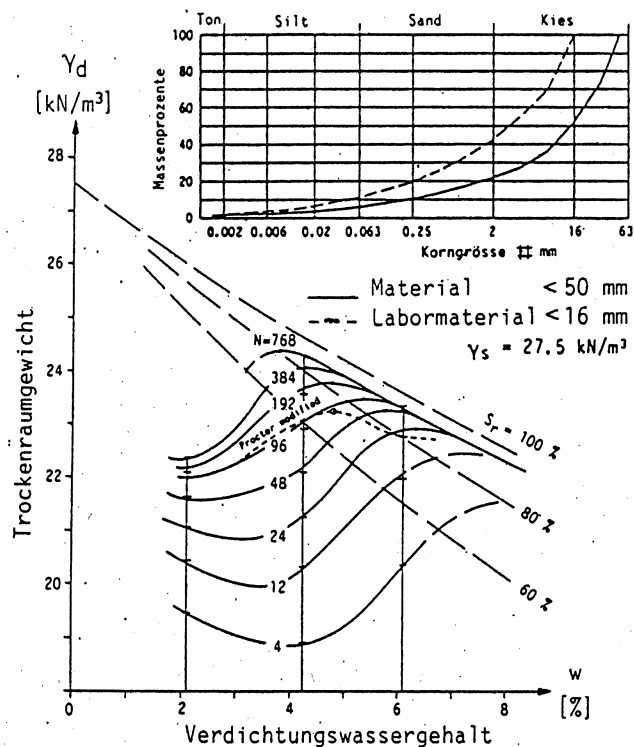


Bild 7 Typische MC-Verdichtungskurven (aus [8])

Verdichtungsmaschinen in der Baupraxis

- Schwere statische Walze
- Mittelschwere Vibrationswalze
- Schwere Gummiradwalze
- Gekoppelter Plattenrüttler
- Frosch

In Bild 8 sind Beispiele von Verdichtungskurven verschiedener Verdichtungs-
maschinen aus der Baupraxis in Abhängigkeit des Wassergehalts des zu ver-
dichtende Bodens dargestellt.

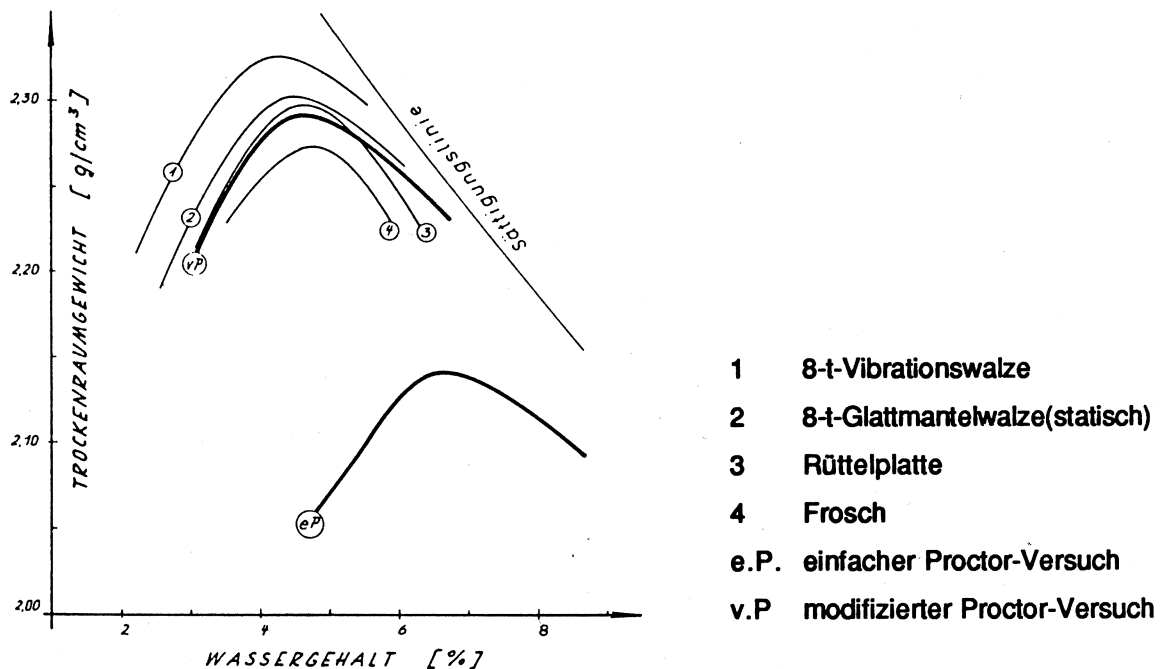


Bild 8 Verdichtungskurven [12]

Verdichtungsversuche im Labor bezwecken entsprechende Einbau- und Kontrollvorschriften für die Feldverdichtung aufzustellen. Damit sollten die Verdichtungsarten und vor allem die Verdichtungswirkungen von Laborversuchen in einer eindeutigen Beziehung zu denjenigen der Feldverdichtung stehen. Dies ist nicht bei allen Böden der Fall. Der klassische Proctor-Verdichtungsversuch wurde seinerzeit für bindige Böden etabliert und eignet sich für kohäsionslose grobkörnige Böden nur sehr bedingt.

4.3 Dynamische Intensivverdichtung

Die dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) ist eine Weiterentwicklung des klassischen Freifallstampfverfahrens mit grösserer Fallmasse und höhe. Die Erfahrung hat gezeigt, dass mit dynamischer Intensivverdichtung die Tragfähigkeit des Untergrundes gegenüber dem Freifallstampfverfahren um ein Mehrfaches ver-

bessert werden kann. Durch die dynamische Intensivverdichtung des Untergrundes können die Setzungen, wie sie durch Erschütterungen des rollenden Verkehrs hervorgerufen werden, weitgehend vorweggenommen werden. Ein Beispiel der Ergebnisse dynamischer Intensivverdichtung ist im Bild 10 dargestellt.

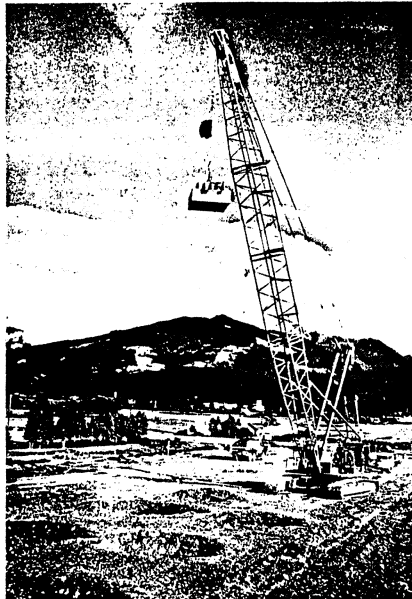


Bild 9 DYNIV-Gerät im Einsatz auf der Tauern-Autobahn in Oesterreich (Foto Ménard)

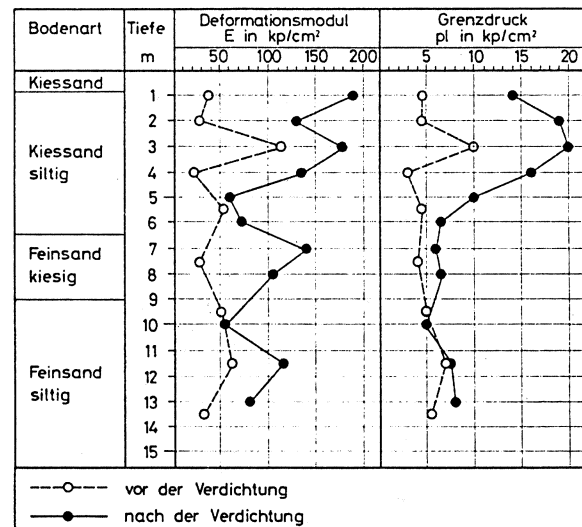


Bild 10 Ergebnisse von Pressionmetermessungen vor und nach der DYNIV

Die dynamische Intensivverdichtung unterscheidet sich von den klassischen Labor- und Feldverdichtungsmethoden. Bei der DYNIV werden zwei Verfahren unterschieden:

- Konsolidationsverfahren zur Verdichtung feinkörniger, wassergesättigter Böden oder solchen mit hohem Wassergehalt.
- Schlagverdichtung zur Verdichtung von grob- oder gemischtkörnigen Böden (Dimensionen von Fallgewicht und Fallhöhe stark unterschiedlich von denjenigen der Laborverdichtung, Modellmassstab!).

Bild 11 stellt Verdichtungs und Konsolidationsvorgänge der dynamischen Intensivverdichtung bei feinkörnigen Böden dar. In diesem Fall spielt der "Konsolidationsvorgang" eine wichtige Rolle. Im Gegensatz dazu ist der Konsolidationsvorgang bei der DYNIV grobkörniger Böden von untergeordnetem Einfluss.

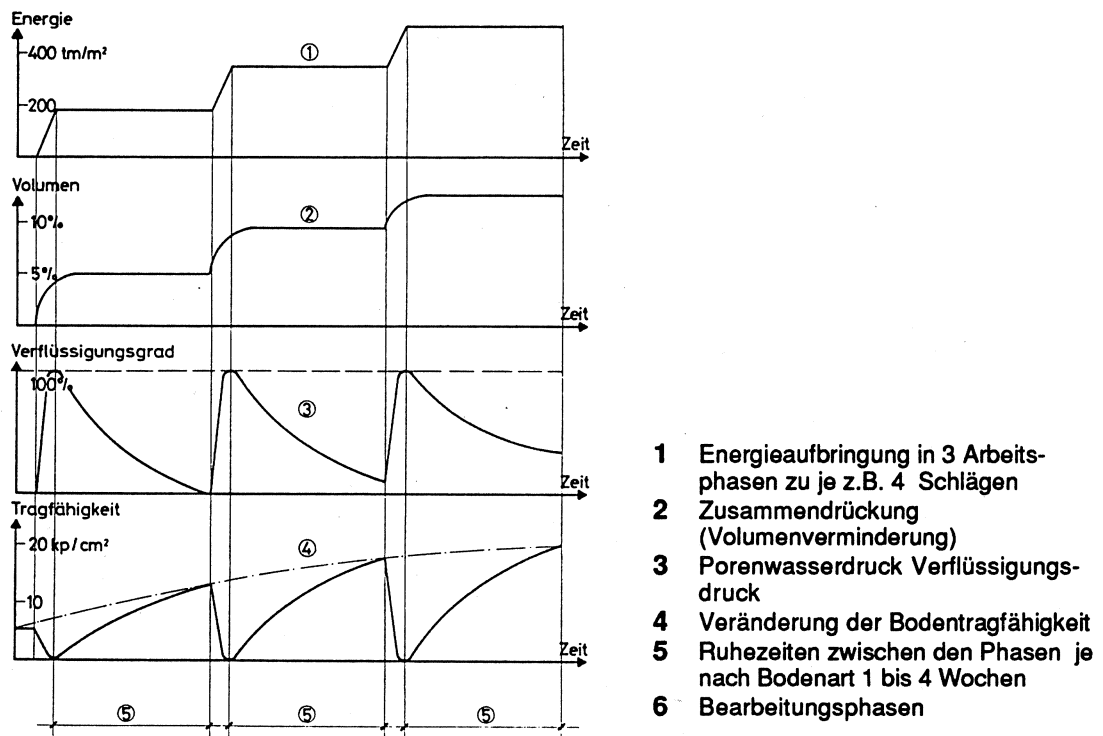


Bild 11 Wirkung der DYNIV im Zeitablauf von drei Verdichtungsphasen nach L. Ménard

GÖDECKE [16] und BEINE [15] haben die dynamischen Intensivverdichtungen anhand von Laborversuchen simuliert. Die Tragfähigkeitserhöhung durch DYNIV hängt von den Parametern (Fallhöhe, -Masse, Schlagzahl pro Bearbeitungszyklus und Dauer der Ruhepause) ab.

GÖDECKE hat verschiedene Kombinationen der Parameter bei der DYNIV feinkörniger Böden untersucht. Die günstigsten Kombinationen wurden daraus ermittelt.

Bei der DYNIV grobkörniger Böden gibt es weniger Einflussparameter als bei der DYNIV feinkörniger Böden. BEINE hat die "Verdichtungswirkung der Fallmasse und Lastausbreitung in nichtbindigen Boden bei der Intensivverdichtung" untersucht. Anhand von Modellversuchen an nichtbindigem Boden werden das Arbeitsverhalten der Fallmasse beim Aufprall analysiert und Kriterien zur Beurteilung der Verdichtungswirksamkeit aufgezeigt. Die erzeugten dynamischen Boden-

spannungen werden dargestellt. Es zeigt sich, dass bei nichtbindigem Boden eine Analogie wie bei statischer Belastung anwendbar ist, mit deren Hilfe der Verdichtungsablauf vorausberechnet werden kann. Der Zusammenhang zwischen Maximalbeschleunigung $\ddot{x}^*$ und Auftreffgeschwindigkeit V_0 wurde im Labor gemessen. Der Einfluss der Fallhöhe $h = V_0^2 / 2g$ auf maximal dynamische Oberflächenspannungen $\sigma_{0\text{dyn}} = \ddot{x}^* \cdot m / F$ ist im Bild 12 dargestellt. Die Einflüsse von Masse m und Grundfläche F der Fallmasse sind aus Bild 13 ersichtlich. Die grösste Beschleunigung bei gleicher Auftreffgeschwindigkeit wurde bei der kleinsten statischen Sohlpressung $\sigma_0 = m \cdot g / F$ gemessen, während bei der grössten Sohlpressung die niedrigste Maximalbeschleunigung auftrat. Die Grundfläche der Fallmasse war gleich gross. Die Masse hat einen entscheidenden Einfluss auf die Grösse der Maximalbeschleunigung und damit auf die Verdichtungswirkung [16]. Die Grundfläche hat ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Maximalbeschleunigung.

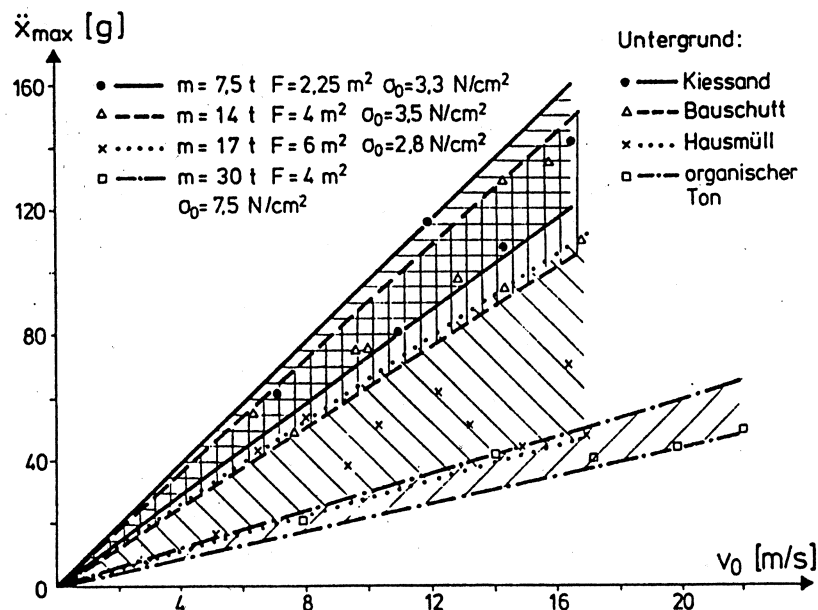


Bild 12 Zusammenhang zwischen Maximalbeschleunigung und Auftreffgeschwindigkeit bei Feldmessungen auf unterschiedlichen Böden

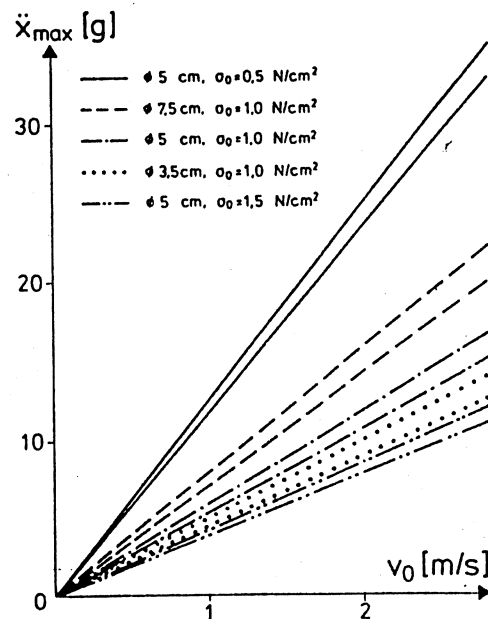


Bild 13 Zusammenhang zwischen Maximalbeschleunigung und Auftreffgeschwindigkeit bei Labormessungen auf trocken Feinsand

4.4 Verdichtungsenergie

Bei der Verdichtung nimmt das zu verdichtende Material die vom Verdichtungsgerät abgegebene Energie auf. Ein Teil dieser Energie bewirkt eine Zunahme der Lagerungsdichte der Einzelkörner. Das Material wird verdichtet. Der Verdichtungsprozess ist in diesem Sinne ein Energieaustausch- und Energiewechselungsprozess. Die Verdichtung grobkörniger Bodenmaterialien erfolgt durch die Umlagerung der Körner. Bei der Verdichtung lagern sich die Körner um, indem die kleinen Körner in die Poren zwischen den grösseren Körnern rutschen, dadurch werden diese grobkörnigen Baustoffe verdichtet. Als Folge dieses Verdichtungsprozesses wird die Anzahl der Kontaktstellen zwischen den Einzelkörnern erhöht und der spezifische Korn- zu Korndruck für eine gegebene Belastung wird reduziert. Die Tragfähigkeit des Bodens wird erhöht und die Setzungsempfindlichkeit wird vermindert. Diesen Prozess des Verkleinerns des Porenvolumens kann man als einen Kornumlagerungsprozess ansehen. In Bild 14 sind die Einflüsse dieses Kornumlagerungsprozesses auf die Zusammendrückungsmodule in Abhängigkeit der Porenziffern dargestellt.

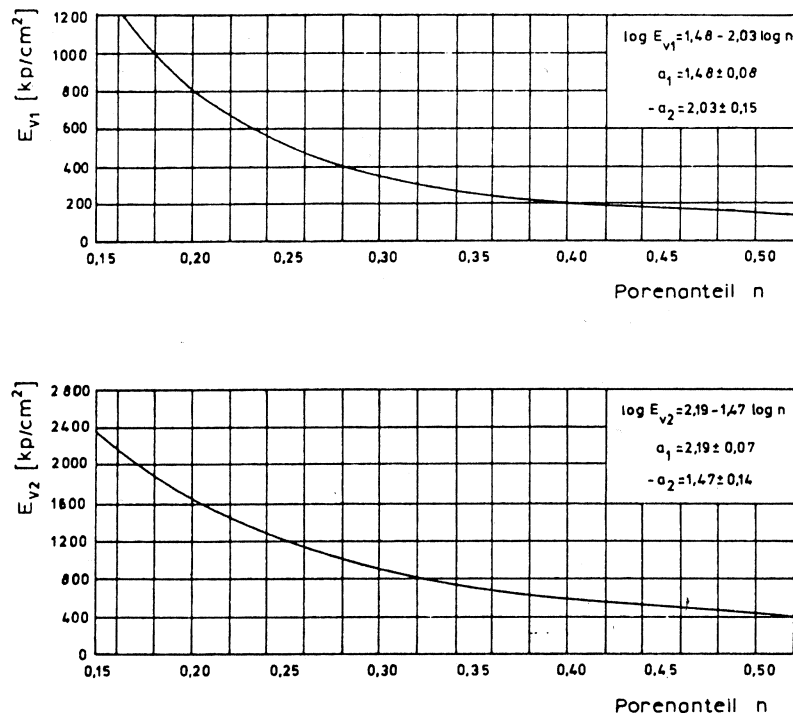


Bild 14 Beziehung zwischen Verformungsmodul E_v und Porosität n für Sande und Kiessande nach Floss

Die zur Kornumlagerung direkt beitragende Energie bei der Verdichtung setzt sich aus einer Summe verschiedenartiger Energieanteile [2] zusammen. Die gesamte eingebrachte Verdichtungsenergie wird dabei vom Boden nur teilweise in Form von zunehmender Lagerungsdichte aufgenommen. Ein weiterer Anteil der eingebrachten Energie wandelt sich in andere Energiearten um und trägt dem gewünschten Dichtezuwachs nicht bei.

Der Begriff der Verdichtungsenergie E welche zur Kornumlagerung direkt beiträgt kann wie folgt beschrieben werden [2]:

$$E = E_v + E_s + E_a + E_r + E_o \quad (1)$$

dabei bedeuten:

- E Verdichtungsenergie
- E_v Effektive Verdichtungsenergie
- E_s Seismische Energie
- E_a Akustische Energie
- E_r Thermische Energie
- E_o Oberflächenenergie

Die effektive Verdichtungsenergie E_v ist von den übrigen Energiearten der Summe, die nicht zur Verdichtung beitragen ($E_s + E_a + E_r + E_o = E_i$), nicht zu isolieren [2]. Sie ist massgebend für die Verdichtung und ist nicht als konstanter Teil der Summe in (1) während des Verdichtungsvorganges anzusehen. Bei jedem Verdichtungsschlag oder Lastwechsel ändern sich die Anteile der einzelnen Summanden in (1).

Für jedes Verdichtungsverfahren wird es einen Endzustand der Schüttung geben, bei welchem keine oder nur verschwindend wenig Energie für die Verdichtung des Korngerüstes (Zunahme der Lagerungsdichte) verfügbar wird ($E_v \approx 0$). Damit kann (1) in der Form geschrieben werden:

$$E_{in} = E_{sn} + E_{an} + E_{rn} + E_{on} \quad (2)$$

dabei bedeuten:

E_{in}	Verdichtungsenergie die nicht zur Lagerungsdichte beiträgt
E_{sn}	Seismische Energie nach n Verdichtungszyklen
E_{an}	Akustische Energie nach n Verdichtungszyklen
E_{rn}	Thermische Energie nach n Verdichtungszyklen
E_{on}	Oberflächenenergie nach n Verdichtungszyklen

Wenn keine zusätzlichen äusseren Eingriffe (wie z.B.. grössere Fallmasse usw.) in die Schüttung vorgenommen werden, bleibt E_{in} für alle weiteren Lastspiele dieses Verdichtungsverfahrens konstant. Das ist die Grenzbedingung der Festigkeitshypothese [2]:

$$E \approx E_{in} = \text{const} \quad (3)$$

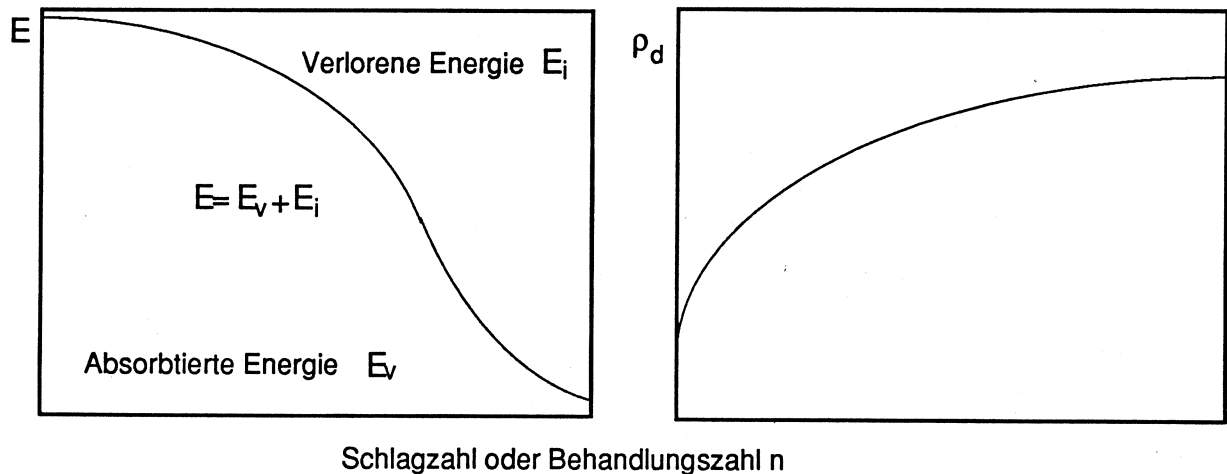


Bild 15 Schematische Darstellung der Energie bei der Verdichtung

Bei der dynamischen Intensivverdichtung entspricht die aufgebrachte Energie faktisch der potentiellen oder kinetischen Energie. Diese können wie folgt beschrieben werden:

$$E_{\text{extern}} = m \cdot g \cdot h = 1/2 \cdot m \cdot V_o^2 \quad V_o^2 = 2 \cdot g \cdot h$$

dabei bedeuten:

- m Masse der Fallmasse
- h Fallhöhe
- V_o Aufprallgeschwindigkeit der Fallmasse m

U. SMOLTCZYK [27] hat die aufgebrachte Energie als "externe" Energie (E_{extern}) bezeichnet. Unter der Annahme, dass die anderen Energiearten als mechanische Energien keine Rolle spielen und bei der Verdichtung vernachlässigt werden können, hat er die "interne" Energie, die der Boden aufnimmt, in vier Teile unterteilt.

$$E_{\text{intern}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

dabei bedeuten:

- E1 durch elastische Wellen abgeleitete Energie
- E2 durch volumenkonstante Verschiebungen aufgebrauchte Energie
- E3 durch Zusammendrückung (Volumenverschiebung durch Kornverschiebungen) aufgenommene Energie
- E4 durch Zertrümmerung von Körnern oder eines Körngefüges aufgebrauchte Energie

Gemäss dem mechanischen Energiesatz ist $E_{\text{extern}} = E_{\text{intern}}$. Ob die aufgebrachte "externe" Energie bei der Verdichtung durch den zu verdichtenden Boden gut absorbiert wird, kann mit der Energie:

$$E = \int m \cdot X'' \cdot dx \quad \text{und} \quad E/E_{\text{extern}}$$

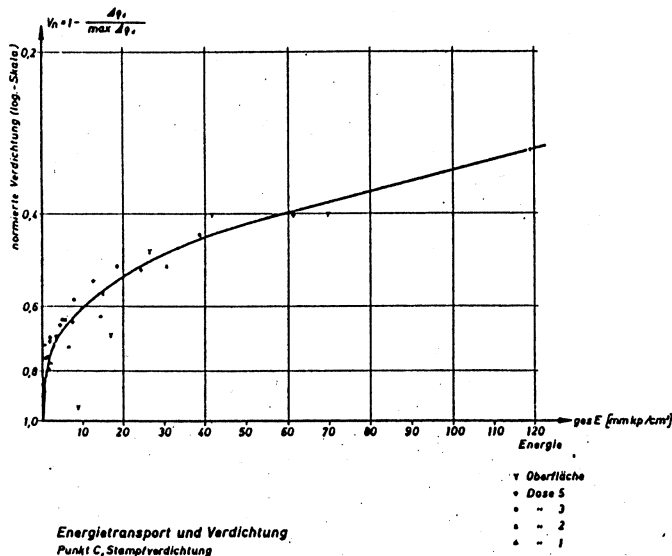
beurteilt werden (in [16] wurde $E = \int m \cdot X'' \cdot dx$ als E_{intern} betrachtet). Dadurch können auch die Verdichtungswirkungen der dynamischen Intensivverdichtung beurteilt werden.

Bei der Verdichtung kann die Energieaufnahme

$$E = \int p(t) \cdot ds(t) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} p(t) & \text{vertikale Drücke} \\ s(t) & \text{vertikale Bewegungen} \end{array}$$

als Massstab der effektiven Verdichtungsenergie (E_v) und als Hilfsmittel für die Beurteilung der Verdichtungswirkungen verschiedener Verdichtungsarten angesehen werden. Diese ist messbar.

Die Energieaufnahme bei der Verdichtung wurde von H. Keller [2] untersucht. Die Zusammenhänge zwischen vertikalem Energietransport und Verdichtung sind in Bild 16 dargestellt.



$$\Delta p_d = p_d - p_{d0}$$

mit:

p_d Trockendichte

p_{d0} Trockendichte vor der Verdichtung

$$\max \Delta p_d = \max p_d - p_{d0}$$

$\max p_d$ bei Schlagzahl $N \rightarrow$ unendlich
mit einem bestimmten Verdichtungsverfahren in der betreffenden Schütthöhe
erzielten Trockendichte

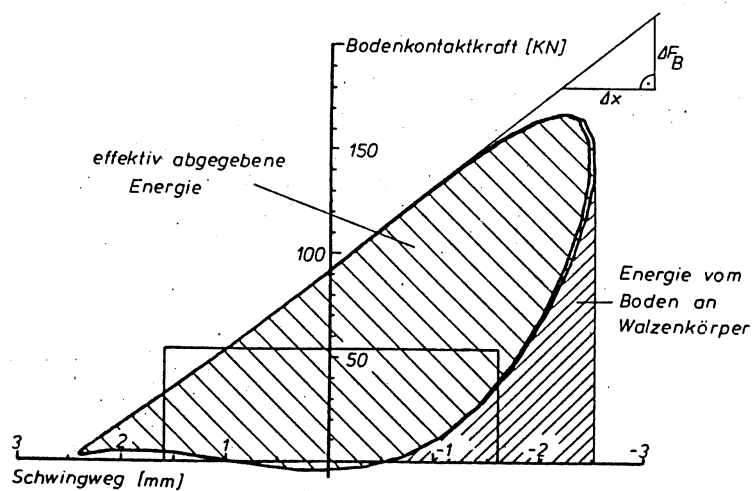
Bild 16 Energietransport und Verdichtung

Bodeneigenschaften und Zustände wie Wassergehalt, Festigkeit, Dichte, usw., beeinflussen die Bewegung des Verdichtungsgerätes. Die Änderung der einzelnen Energieanteile ist eine Folge der eingetretenen Verdichtungswirkung.

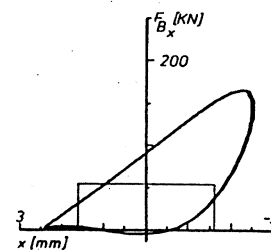
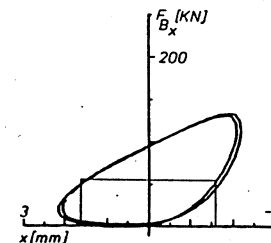
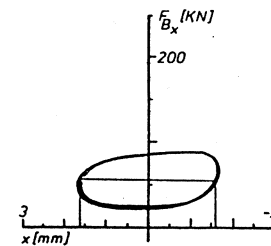
4.5 Energieaustausch bei der Verdichtung

Die dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung wurden von W. Kröber [14] untersucht und beschrieben. Die Verdichtungskraft auf die zu verdichtende Materialoberfläche verändert sich während der Verdichtung des Bodens, sie wird grösser mit zunehmender Lagerungsdichte. Die vom Verdichtungsgerät an den Boden abgegebene Energie und die vom Boden aufgenommene Energie ver-

ändern sich mit der Aenderung der Bodensteifigkeit. Die Aenderung der Eigenschaften des Bodens während der Verdichtung kann man mittels dieser Energieänderung bei der Verdichtung beurteilen.



Darstellung der Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit des Schwingweges des Walzenkörpers (Vertikalanteil) im Indikator diagramm, Energieaustausch zwischen Verdichtungswerkzeug / Boden und dynamische Federsteifigkeit des Bodens.



Indikatordiagramme in vertikaler Richtung für zunehmende Bodensteifigkeiten

Bild 17 Energieaustausch bei der Verdichtung

5. Bodenmodelle

5.1 Allgemeines

In den Forschungsarbeiten über die Veränderung und die Beurteilung der Bodeneigenschaften während und nach der Verdichtung wurden verschiedene Bodenmodelle entweder für:

- (1) die Berechnung des Verformungsverhaltens vom Boden [3], [19], [22], [24],
oder
- (2) die Erklärung der Konsolidationstheorie nach Terzaghi [6], oder
- (3) die Zusammenhänge zwischen dem Verhalten der Verdichtungswerkzeuge
und der Bodenkennziffern [3], [13]

entwickelt. Die meisten von diesen befassen sich mit (1) und (3). Für die Untersuchung von (1) und (3) sind Bodenmodelle mit folgenden Eigenschaften und Möglichkeiten erforderlich:

- Darstellung des Spannungs- Verformungsverhaltens bei statischer, zyklischer oder dynamischer Belastung.
- Darstellung von plastischen und elastischen Verformungen, die entweder allein oder in Kombination miteinander auftreten können.

Es ist aber schwierig, mit solchen Modellen die Verformungseigenschaften von Böden genau nachzubilden. Die Beziehungen zwischen der Belastung und der Verformung sind beim Boden als Haufwerk verschiedener Einzelkörner mit unterschiedlichen Eigenschaften komplizierter als bei künstlichen Baustoffen, wie z.B. Stahl oder Beton. Bereits bei einer statischen Belastung ergibt sich beim Boden bekanntlich ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung (Bild-18a). Wesentlich komplizierter sind die Verhältnisse bei dynamischen, zyklischen Belastungen [24], wie sie bei der Vibrationsverdichtung auftreten (Bild-18b).

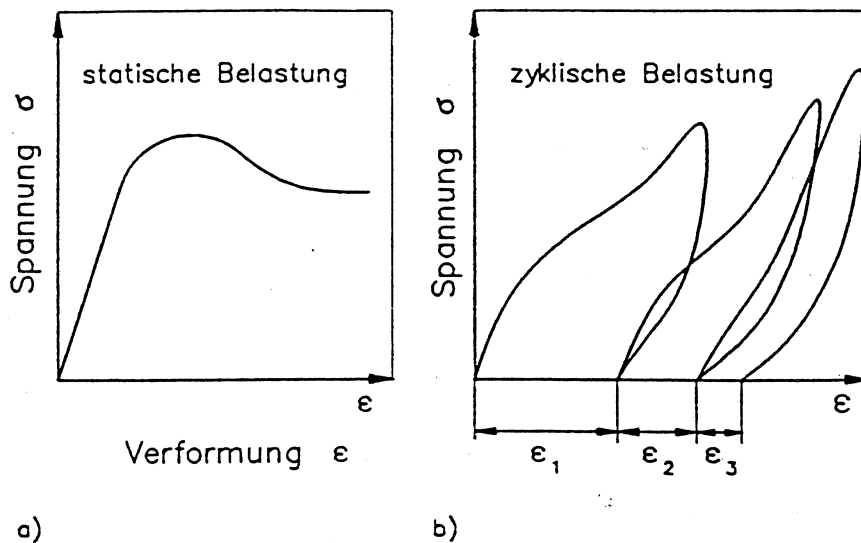
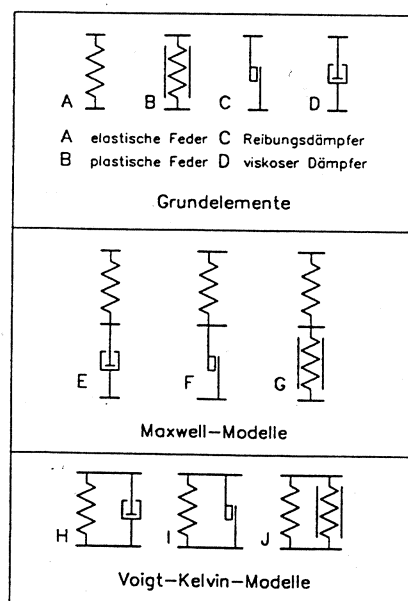


Bild 18 Schematische Spannungs- Verformungsdiagramme für Böden (aus [3])

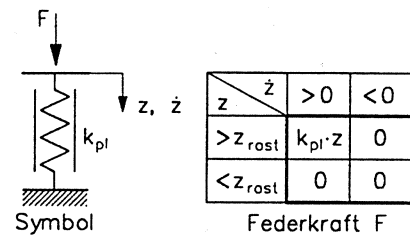
Die Steifigkeit für die Belastungs- und die Entspannungsphase sind verschieden und werden hauptsächlich durch die Amplitude der Belastung, durch die Zahl der Lastwechsel sowie durch die Belastungsfrequenz beeinflusst [24]. Dieses Verformungsverhalten des Bodens ist damit zu erklären, dass die grundlegenden Eigenschaften wie Plastizität, Elastizität und Viskosität miteinander gekoppelt sind. Der Verlauf der Verformungskurven für statische und dynamische Belastungen resultiert aus der Ueberlagerung dieser Eigenschaften [3].

5.2 Grundelemente

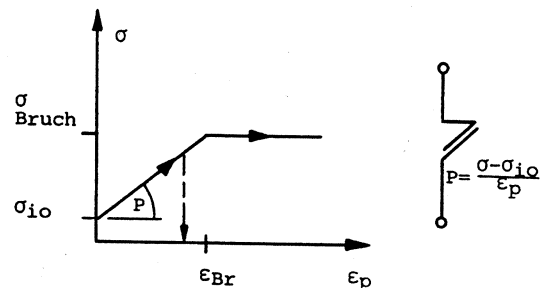
Die Grundelemente der Modelle für elastische, plastische und viskose Verformungen sind in Bild 19 dargestellt.



Grundelemente und Strukturmodelle für verschiedene Arten der Bodenverformung [3]



Symbol und Kraftübertragung einer einrastenden Feder [3]



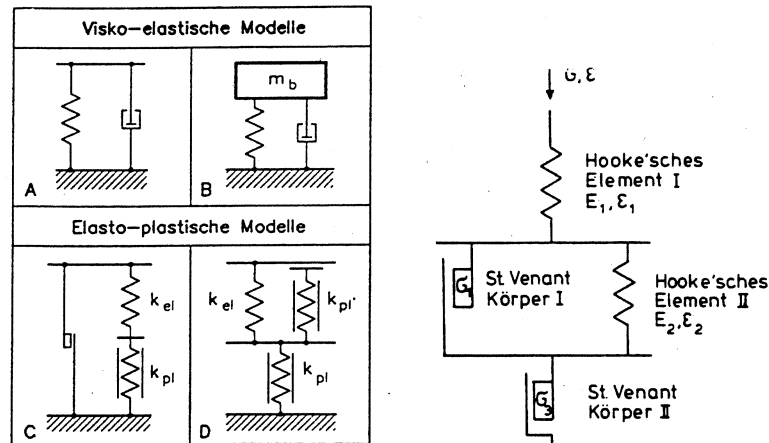
Darstellung des irreversiblen Verformungsanteils mittels Reibungsmodell mit initialem Widerstand σ_{io} , linearer Spannungs-Dehnungs Beziehung, Plastizitätsmodul p und "Bruchspannung" σ_{Br} [18]

Bild 19 Grundelemente der Bodenmodelle

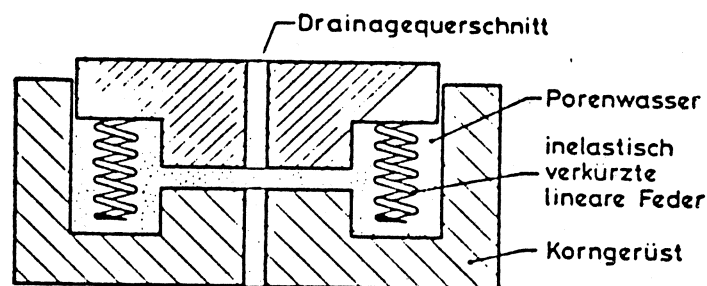
5.3 Bodenmodelle

Um das Verhalten der Böden unter verschiedenen Spannungs-Verformungszuständen erfassen und darstellen zu können, wurden entsprechende Bodenmodelle aufgestellt.

Beispiele:

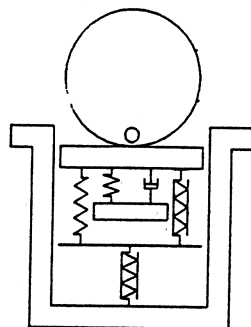


a). Verformungseigenschaften



Modifizierter Terzaghi-Oedometer

b). Erklärung des Mechanismus



c). System Verdichtungswerkzeug/Boden

Bild 20 Darstellung der Bodenmodelle für unterschiedliche Zwecke

5.4 System Verdichtungsgerät/Boden

Das Verdichtungsgerät und der zu verdichtende Boden können als ein System betrachtet werden [3], [5], [13], [14].

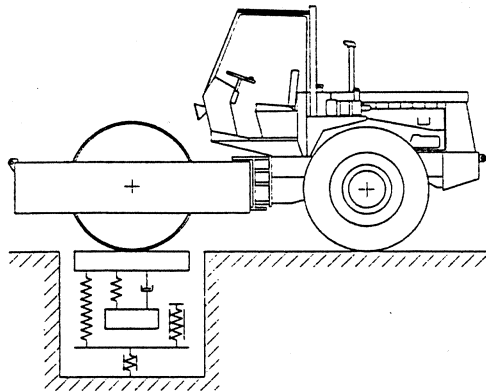


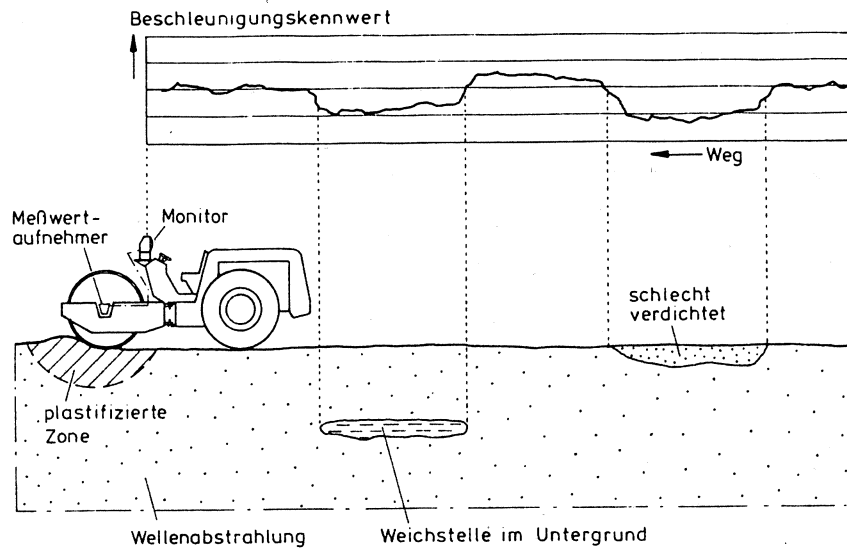
Bild 21 System Walzenzug/Boden [3]

Die Verdichtungswirkung und das Verhalten des Verdichtungsgerätes sowie die Veränderung der Bodeneigenschaften während der Verdichtung beeinflussen einander. Diese Grössen stehen in einer gegenseitigen Beziehung, welche sich je nach Boden und Verdichtungszustand ändert. Die Art und Grösse dieser Beziehung kann herangezogen werden um:

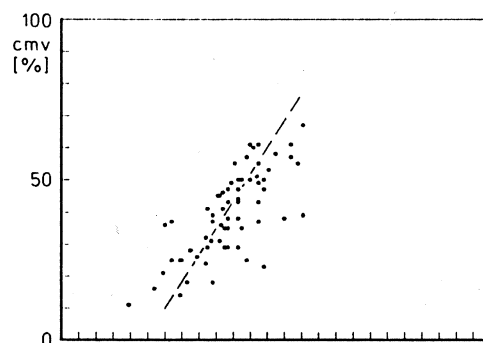
- die Verdichtungswirkung von Verdichtungsmaschinen zu optimieren
- die Eigenschaften vom Boden mit dem Verhalten des Verdichtungs-
werkzeuges zu beurteilen, und
- die Homogenität vom Boden kontrollieren zu können.

D. Pietzsch [3] hat sich mit "Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und zur Verdichtungswirkung von Vibrationswalzen" beschäftigt. In der Arbeit wurden Walzenverhalten, Walzenparameter und Bodeneigenschaften miteinander verglichen. Mit diesem Ansatz konnten die Parameter und die Verdichtungswirkung von Vibrationswalzen optimiert werden.

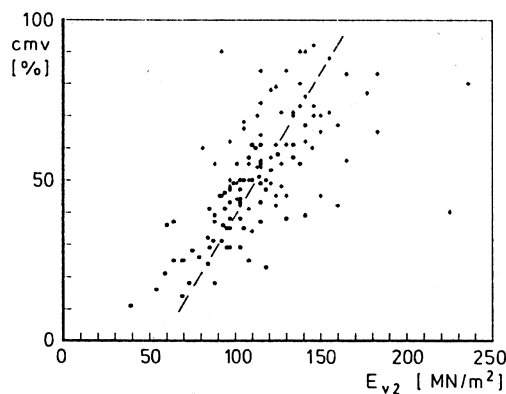
Die obengenannte Idee (Betrachtung des Systems Verdichtungsgerät/Boden) wurde auch von J.Grabe [13] mit dem Thema "Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle" verwendet. Das dynamische Verhalten des Verdichtungsgerätes zeigt gute Beziehungen mit den Bodenkennziffern (Bild 22). Diese Zusammenhänge können nicht nur für die dynamische Verdichtungskontrolle sondern auch die kontinuierliche Homogenitätskontrolle vom Boden angewandt werden.



a) **Prinzip der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle**



Fläche 4000 m²
65 Versuche
Lineare Regression $r = 0,73$
 $E_{v2} \text{ [MN/m}^2\text{]} = 51 \text{ [MN/m}^2\text{]}$
 $+1,19 \text{ cmv [\%]}$
b) sämtliche Versuche auf dem Erdplanum



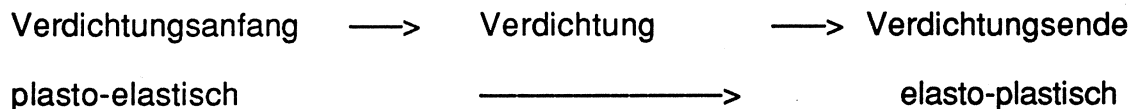
Fläche 8000 m²
129 Versuche
Lineare Regression $r = 0,57$
 $E_{v2} \text{ [MN/m}^2\text{]} = 61 \text{ [MN/m}^2\text{]}$
 $+1,08 \text{ cmv [\%]}$
c) Sämtliche Versuchsergebnisse auf dem Erdplanum und auf der Frostschuttschicht

b) **Korrelation zwischen dem Verformungsmodul E_{v2} (Zweitbelastung) und dem dynamischen Walzenmesswert cmv**

Bild 22 Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle

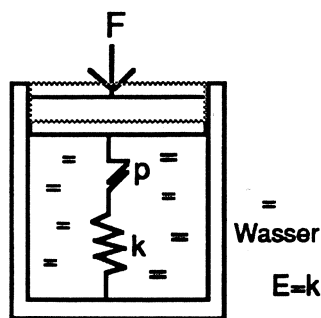
6. Erklärungen zum Verdichtungsvorgang

Für die rechnerische Behandlung des Verhaltens eines zu verdichtenden Bodens kann im allgemeinen von folgendem Verformungsverhalten ausgegangen werden: Zu Beginn der Verdichtung zeigt der Boden ein ausgeprägt plastisch-elastisches Verhalten. Der Anteil an Viskosität ist sehr gering. Diese Eigenschaften verändern sich während des Verdichtungsvorgangs vom plastisch-elastischen hin zu elastisch-plastischem Verhalten. Bei sehr kleinen dynamischen Deformationen kann gar von rein elastischem Verhalten ausgegangen werden.

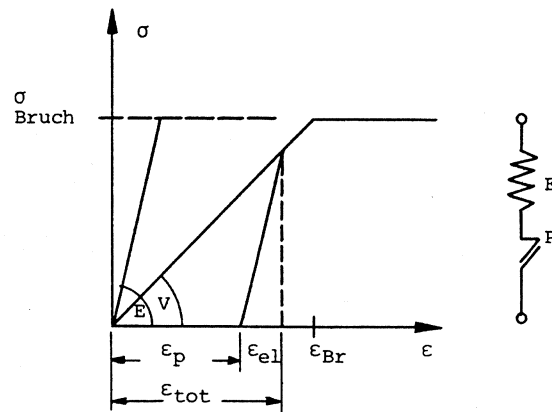


Die Veränderung der Eigenschaften des Bodens während der Verdichtung lässt sich wie folgt erklären. Das zu verdichtende Material nimmt beim Verdichtungs-vorgang Verdichtungsenergie auf und verformt sich plastisch. Der plastische Verformungsanteil verkleinert sich mit zunehmender Verdichtung, mit jedem Verdichtungsschlag oder Lastwechsel. Diese Erscheinung kann sowohl gemessen als auch mittels der Energieaufnahme bei der Verdichtung am Modell erklärt werden. Dabei ist am Anfang der Verdichtung von losen Schichten der Anteil an aufgenommener Verdichtungsenergie, welche zur bleibenden dichteren Lagerung der Einzelkörner beiträgt relativ gross und wird dann mit zunehmender Verdichtung asymptotisch kleiner.

Der Zweck dieses einfachen Modells ist vorerst nicht, die Berechnung der Verformungseigenschaften sondern die Erklärung der gegenseitigen Beziehung zwischen der plastischen und elastischen Verformung.



a) Modell



b) Elasto-plastisches Verformungsverhalten

Bild 23 Modell und elasto-plastisches Verformungsverhalten

k und p repräsentieren die Elastizität bzw. die Plastizität des Bodens. s_p beschreibt die bleibende Verformung des Elementes (P). Die vom Element (P) aufgenommene Energie kann nicht an das Verdichtungsgerät zurückgegeben werden. Der Boden wird als Folge der Energieaufnahme durch das Element (P) bzw. dessen bleibender Verformung s verdichtet.

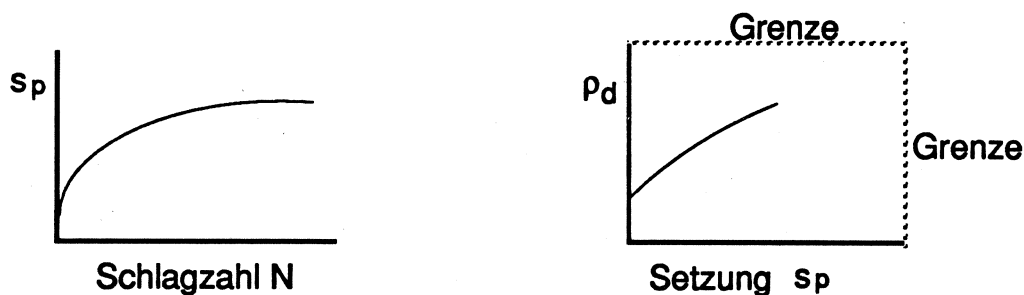
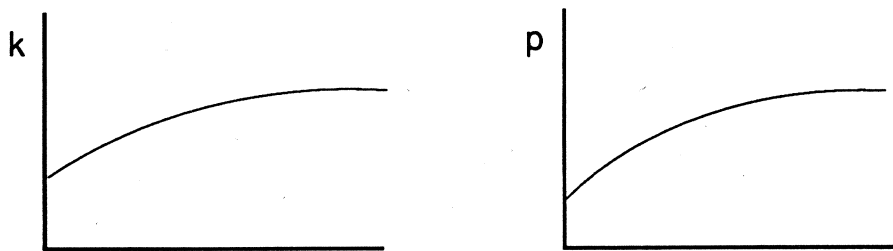


Bild 24 Schematische Beziehung zwischen N , totaler Verformung s_p und p_d

Aus Bild 17 ist zu ersehen, dass sich die Steifigkeit des Bodens während und durch die Verdichtung verändert. Die Veränderung der Eigenschaften des Bodens bei der Verdichtung kann mit den Änderungen von k und p in Bild 25 schema-

tisch erklärt werden. Durch die Zunahme der Lagerungsdichte tritt eine Zunahme der Anzahl der Korn-zu-Korn-Kontakte ein. Damit wird die durch das Korngerüst abzutragende Kraft von einer grösseren Anzahl Kontaktstellen übertragen. Die zu übertragende Kraft an den einzelnen Kontaktstellen wird kleiner, und die dadurch induzierte Deformation auch. Damit kann die Zunahme der Steifigkeit erklärt werden.



Schlagzahl N (Verdichtungsarbeit und Wassergehalt=const)

Bild 25 Veränderung von k und p während der Verdichtung (schematisch)

Bei gegebener Verdichtungsart und -arbeit und gegebenem Wassergehalt können k und p nur bestimmte Grenzwerte erreichen. Der Widerstand gegen plastische Verformung kann mit folgender Beziehung beschrieben werden:

$$Q = p s + u$$

dabei bedeuten:

- Q = Widerstand gegen plastische (irreversible) Verformung
- p = Plastizitätsmodul
- s = plastische Verformung des Elementes P
- u = proportional zu Porenwasserdruck

In diesem Fall könnte die Verdichtungskraft F (F verändert sich während der Verdichtung, siehe Bild 17) den Widerstand Q nicht übersteigen. Der Boden kann unter dieser Verdichtungsart und -arbeit nicht weiter verdichtet werden. Dieser Zustand kann durch $E \approx E_{in}$ ($E_v \approx 0$) beschrieben werden.

Wenn man die Dichte weiter erhöhen wollte, müsste eine höhere Verdichtungsenergie bzw. -art (grössere F) aufgebracht werden, um den Widerstand Q zu über-

winden und grössere Setzungen s_p erreichen zu können. Der Boden müsste mehr effektive Energie aufnehmen. Beispiel: siehe Bild 26.

Bei der Intensivverdichtung grobkörniger Böden mit genügender Durchlässigkeit ist der Konsolidationsvorgang nicht relevant, gleich wie bei der MC-Verdichtung ist die Verdichtungsarbeit (oder Schlagkraft F) so gross, dass die Kraft F den Widerstand Q überwinden und das Wasser bei grossen Schlagzahlen relativ schnell aus der Probe auspressen kann (Bild 26 Bereich-III1).

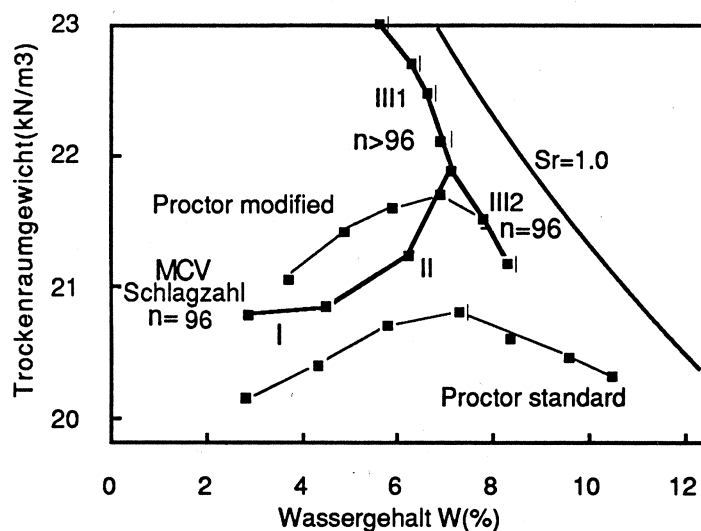


Bild 26 Verdichtungskurve eines Kiessandes

Bild 26 zeigt auch, dass die Energieaufnahme bei den Verdichtungsvorgängen der MC-Verdichtung und der Proctor-Verdichtung unterschiedlich sind (vgl. modified Proctor-Kurve und MC-Kurve ($n=96$)).

Durch die Energie $E = \int F(t) \cdot ds(t)$ kann auf die Veränderung der Bodeneigenschaften infolge der Verdichtung geschlossen werden. F und s sind messbare Grössen.

Die Unterschiede zwischen den Vorgängen und Wirkungen zwischen der Intensivverdichtung und anderen Verdichtungsarten können mit den Änderungen der

Energieaufnahme während der Verdichtung und dem dargestellten Modell theoretisch erklärt werden. Damit können auch die Änderungen der Bodeneigenschaften während der Verdichtung beurteilt werden.

7. Schlussfolgerungen

Mit den durchgeführten Untersuchungen und der Auswertung der Literatur können die Zusammenhänge zwischen den im bodenmechanischen Labor üblichen Verdichtungsversuchen und der Verdichtung im Feld generell erklärt und beschrieben werden.

Es kann dabei festgestellt werden, dass die heute üblichen Laborverdichtungsprüfungen (basierend auf dem Proctor-Versuch) sowohl bezüglich Geräte als auch bezüglich Verdichtungsenergien insbesondere bei der Anwendung auf grobkörnige kohäsionslose Böden mit geringen Wassergehalten nur bedingt anwendbar sind. Die damit erhaltenen Resultate sind nicht geeignet stichhaltige Einbauvorschriften im Feld zu erarbeiten und müssen in jedem Falle anhand eines Versuchsfeldes kalibriert werden. Dies trifft vor allem in den Wassergehaltsbereichen zu wo die Sättigung eine untergeordnete Rolle auf die Verdichtung spielt (genügend durchlässige Böden oder solche mit Wassergehalt auf der trockenen Seite der Verdichtungskurve).

Das System Verdichtungsmaschine/Boden ist im Labor mit den gängigen Versuchen nicht nachzubilden. Eine Ergänzung der Versuchsvorschriften für Laborversuche, welche das Erstellen von Einbauvorschriften und Einbaukontrollen im Feld zum Ziel haben ist angezeigt.

8. Literatur

- [1] Lambe & Whitman
Soil Mechanics; John Wiley & sons inc. New York 1979
- [2] H. Keller
Die Energieaufnahme rolliger Böden bei dynamischen Verdichtungs-
vorgängen
Dissertation TH Aachen, 1971
- [3] D. Pietzsch
Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und zur Verdichtungs-
wirkung von Vibrationswalzen
Dissertation TU Berlin, 1991
- [4] M. S. Muradi
Beitrag zur Klärung der bodenmechanischen Eigenschaften künstlich
verdichteter feinkörniger(bindiger) Böden
Dissertation TU München, 1976
- [5] U. Hahn
Untersuchungen zur Beurteilung des maximalen Verdichtungsgrades
von grobkörnigen ungebundenen Strassenbaustoffen
Dissertation TH Aachen, 1982
- [6] P. Meier und J. Studer
Dynamische Intensivverdichtung.EVED/ASB/VSS Bericht Nr. 64
ETH Zürich, 1983
- [7] A. W. Parsons
Moisture condition test for the engineering behaviour of earthwork
material
Transport and Road Research Laboratory, 1978
- [8] P. Honold
Neue Methode zur Prüfung der Verdichtbarkeit von Lockergesteinen
Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Fels
mechanik, Herbsttagung 1987
- [9] P. Honold
Neue Versuchsmethode auf der Basis der Moisture Condition-
Verdichtung zur Stabilisierung von Lateritkiesen ohne Binde-
mittel im tropischen Strassenbau
Dissertation ETH Zürich, 1985
- [10] W. Brand und R. Floss
Der Proctor-Versuch als Eignungsprüfung und Maßstab für die
Güteprüfung
Strasse und Autobahn Heft 1/1965

- [11] G. Paulmann und B. Grätz
Untersuchung der Verdichtung von Tragschichten ohne Bindemittel
Bundesminister für Verkehr, D-Bonn; Forschung Strassenbau und
Strassenverkehrstechnik
Heft 546/1989
- [12] H. Brandl
Ungebundene Tragschichten im Strassenbau
Bundesministerium für Bauten und Technik
Strassenforschung Heft 67, Wien 1977
- [13] J. Grabe
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur
flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle
Dissertation Uni Fridericiana, Karlsruhe, 1992
- [14] W. Kröber
Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der
Vibrationsverdichtung von Böden
Dissertation TU München, 1988
- [15] R. A. Beine
Verdichtungswirkung der Fallmasse und Lastausbreitung in
nicht bindigem Boden bei der dynamischen Intensivverdichtung
Dissertation Ruhr-Uni Bochum, 1986
- [16] J. Gödecke;
Die dynamische Intensivverdichtung wenig wasserdurchlässiger
feinkörniger Böden
Dissertation Ruhr-Uni Bochum, 1979
- [17] P. Siedek, R. Voss und R. Floss
Die Bodenprüfverfahren bei Strassenbauten
Werner-Verlag 1982
- [18] S. Huschek
Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck
Dissertation ETH Zürich, 1983
- [19] T. Gerhardt
Zur Bestimmung von Materialkennwerten eingebauter Strassen-
baustoffe mit dem Plattendruckversuch bei Berücksichtigung der
Eigenschaften ungebundener Haufwerke
Dissertation TU Hannover, 1976
- [20] R. Rüegger
Dynamische Verdichtungskontrolle ungebundener Fundations-
schichten mittels Schwingungsmessungen
VSS Forschungsbericht, April 1980

- [21] K. H. Engehausen
Ein Beitrag zur Auswahl geeigneter Vibrationsgeräte für die
optimale Verdichtung im Erdbau
Dissertation Uni Hamburg, 1976
- [22] B. W. Grätz
Eine Analyse des mit dem Plattendruckversuch festgestellten
Verformungsverhaltens ungebundener Mineralstoffgemische
aus Quarzporphyr in der Bauphase
Dissertation TH Darmstadt, 1982
- [23] E. Mewes
Strukturmodelle und Systematik der Fliessvorgänge
Archive of Applied Mechanics 21/1953 p104-111
- [24] J. Studer und A. Ziegler
Bodendynamik
Springer-Verlag, 1986
- [25] F. Balduzzi
Zementstabilisierter Oberbau
ASB-EVED Forschungsbericht Nr. 190, Mai 1990
- [26] P. Eder, R. Apothéloz
Das DYNIV-Verfahren; Autobahn Bern-Biel, Neue Wege beim Strassenbau
auf Torfböden; Strasse und Verkehr Nr. 4 / 1976
- [27] U. Smolczyk
Deep compaction,
Proceedings of the VIII ECSMFE, Vol. 3 p. 1105 - 1116, 1983