

CAT® PAVING PRODUCTS

HANDBUCH DER BODENVERDICHTUNG

 **CATERPILLAR®**



SAFETY WARNING
OPERATOR MUST WEAR SEATBELT
OPERATOR MUST WEAR SAFETY GLASSES
OPERATOR MUST WEAR PROTECTIVE HEADGEAR

STUBELESS



CAT CS78B

CAT® PAVING PRODUCTS

HANDBUCH DER BODENVERDICHTUNG

HANDBUCH DER BODENVERDICHTUNG

CATERPILLAR®

Das *Handbuch der Bodenverdichtung* wird von Caterpillar® Paving Products herausgegeben. Es wurde größte Sorgfalt auf die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Beschreibungen und Informationen gelegt. Die Leistungsdaten dienen lediglich der ungefähren Abschätzung. Aufgrund der vielfältigen projektbezogenen Einflüsse (Bodenarten und -eigenschaften, Zusätze, Wassergehalt, Projektvorgaben, verfügbare Arbeitsmittel, Fertigkeiten der Maschinenbediener, Anwendungspräferenzen des Maschineneigners, Untergrundbedingungen, Höhenlage usw.) gewährleisten weder Caterpillar Inc. noch seine Händler, daß die hier beschriebenen Maschinen und Verfahrenswesen die vorgesehene Leistung erbringen. Da die Maschinenspezifikationen und -materialien ohne Vorankündigung geändert werden können, informieren Sie sich bitte bei Ihrem Cat-Fachhändler über die neuesten Produktdaten und verfügbaren Optionen. Die abgebildeten Maschinen können mit optionalen und/oder nachrüstbaren Ausrüstungen ausgestattet sein. CAT, CATERPILLAR, ihre entsprechenden Logos, das „Caterpillar-Gelb“ und das POWER EDGE-Handelszeichen sowie die Unternehmens- und Produktidentitäten, die hier verwendet werden, sind Markenzeichen von Caterpillar und dürfen ohne Genehmigung nicht verwendet werden.

Hinweis: Für spezifische Produktinformationen wird stets auf das entsprechende Caterpillar-Betriebs- und -Wartungshandbuch verwiesen. Einige abgebildete Maschinen können Nachrüstungen beinhalten, die nicht von Caterpillar hergestellt oder getestet wurden.

ISBN : 978-1-939945-09-9

QGBQ1705

© 2015 Caterpillar Inc. – Alle Rechte vorbehalten.

INHALTSVERZEICHNIS

Kapitel 1:	GRUNDLAGEN DER BODENVERDICHTUNG	9
Kapitel 2:	BODENARTEN UND KLASSIFIZIERUNG	31
Kapitel 3:	PHYSIK DER VERDICHTUNG	39
Kapitel 4:	ANWENDUNGSTECHNIK UND QUALITÄTSKONTROLLE	59
Kapitel 5:	INTELLIGENTE VERDICHTUNG	91
	ANHANG	112
	GLOSSAR DER FACHBEGRIFFE	118

VORWORT

Bodenmaterialien sind die weltweit am häufigsten vorkommenden Baustoffe. Seit der Zeit, als die alten Römer Bodenmaterialien für den Straßenbau nutzten, bis zum Bau von Staudämmen in der heutigen Zeit – immer ist die Leistungsfähigkeit der verwendeten Böden und der darauf errichteten Bauwerke unmittelbar mit der richtigen Verdichtungstechnik verbunden. Heute erfordern Bauvorhaben wie Straßen, Dämme, Stauwerke, tragende Aufschüttungen und Hänge eine kontrollierte Verdichtung, um die vorgegebenen Qualitätsanforderungen erfüllen zu können. Wird während des Baus keine qualitativ hochwertige Verdichtung erzielt, können die Reparaturkosten während der Nutzungsdauer die anfänglichen Baukosten übersteigen.

Bodenmaterialien sind nicht nur die am häufigsten vorkommenden, sondern auch die unterschiedlichsten Baustoffe. Größe und Form der Partikel, Mineralogie, Wassergehalt, Vermischung und Zeit tragen zur Veränderlichkeit der Böden bei. Das vorliegende Handbuch zeigt die Ursachen für die Veränderlichkeit der Böden auf und richtet das Augenmerk auf die Auswahl der richtigen Betriebsmittel, um eine effektive Verdichtungsarbeit leisten zu können. Das Ausbringen des Baustoffes und die Auswahl der Verdichtungstechnik basieren weitgehend auf Faustregeln oder Erfahrungswerten. Angesichts zunehmend kürzerer Bauzeiten und

ergebnisorientierter Leistungsspezifikationen werden die Verdichtungsarbeiten – auch wenn diese lediglich einen kleinen Teil der Baukosten ausmachen – immer ausschlaggebender für den Erfolg eines Projektes.

Dieses Handbuch beschreibt die Grundlagen der Verdichtungsprozesse, die Auswahl effizienter Verdichtungsmaschinen sowie aufkommende Techniken zur Qualitätsbeurteilung, um die Verdichtungszeit optimieren und die Projektkosten unter Kontrolle halten zu können. Die Empfehlungen zur Auswahl der Maschinen basieren auf dem Materialtyp, der Soll-Einbaudicke sowie den Produktivitäts- und Qualitätsanforderungen (z. B. die jeweilige Verdichtung und der Bettungsmodul).

Das Handbuch ist insbesondere hilfreich für Auftragnehmer, die vor Projektbeginn Informationen über den Boden zusammentragen und nutzen möchten, um standortspezifische Angebotspreise und Pläne für den Verdichtungsprozeß erstellen und teure Nachbesserungen und Verzögerungen beim Bau vermeiden zu können.

Techniken zur Messung der Verdichtung, wie Cat® Compaction Control, ermöglichen jetzt die Überwachung des Verdichtungsfortschritts hinsichtlich Einbaudicke, Anzahl der Überfahrten, Compaction Meter Value (CMV) und Machine Drive Power (MDP). Der CMV-Wert ist ein allgemein akzeptierter,



dimensionsloser Parameter für die Bodensteifigkeit, der bei Nutzung der Verdichtungstechnik (Bandage des Walzenzuges) als Meßvorrichtung auf Basis der Schwingungsanalyse Maschine/Boden generiert wird. MDP ist eine neue, innovative Technologie von Caterpillar, die die Fähigkeiten derartiger Systeme optimiert.

Durch die Ermittlung mechanischer Werte am verdichteten Boden in Echtzeit mittels GNSS (Global Navigation Satellite System) können farbkodierte Graphiken bzw. Karten zur Beurteilung der Verdichtungsqualität generiert werden. Diese Karten können mit den Anforderungswerten verknüpft werden, um sicherzustellen, daß die verdichteten Materialien den festgelegten Qualitätskriterien entsprechen. Dieser Ansatz zur Beurteilung der Verdichtungsqualität ist Lichtjahre von der alten Methode – der Prüfung anhand von Stichproben – entfernt. Orientierten sich früher die Verdichtungsanforderungen in Richtung der Festlegung des Verfahrens, so sind heute aufgrund der walzenintegrierten Technik ergebnisorientierte Leistungsanforderungen mit einem 100 %igen Echtzeit-Deckungs-Nachweis möglich. Tatsächlich führen die Intelligenten Verdichtungstechnologien weltweit zum Umdenken der Behörden hinsichtlich der Beurteilung der Verdichtungsqualität.

Das Handbuch vereint die aus dem Engagement von Caterpillar gewonnenen Erfahrungen mit dem Stand des Wissens zur Verbesserung der Verdichtungstechnik und der Arbeitsabläufe. Viele Unternehmer, Techniker, Behörden und Forscher haben ihren Beitrag zu diesem Handbuch geleistet. Neue Verdichtungstechnologien, insbesondere die integrierte, intelligente Verdichtungsüberwachung sowie Methoden für die Prognose der Verdichtungsparameter, verkörpern die wichtigsten Änderungen zur Beurteilung der Verdichtung seit 1933, als Proctor die Standards für die Kontrolle des Wassergehaltes einfuhrte.

Die Nutzer des Handbuchs verfügen damit über ein praktisches Nachschlagewerk zu den Grundsätzen der Bodenverdichtung sowie Informationen von Fachleuten zur Auswahl der Maschinen und Optimierung der Verdichtung. Die Umsetzung der im Handbuch enthaltenen Informationen wird Risiken reduzieren und die Verdichtungsqualität verbessern.

David J. White, Ph.D.
Assoziierter Professor
Iowa State University





EINFÜHRUNG

Wer bauen will, muß verdichten.

Caterpillar freut sich, dieses *Handbuch der Bodenverdichtung* überreichen zu können. Das Handbuch erläutert die Grundlagen der Bodenverdichtung, die Prüftechniken und die Abläufe auf der Baustelle. Es enthält praktische Hinweise zu einer ziemlich komplexen Thematik.

Das Handbuch ist das Ergebnis jahrzehntelanger Erfahrungen in der Erdbewegung sowie des Know-hows zahlloser Personen, die im Laufe der Jahre mit Caterpillar zusammengearbeitet haben.

Egal, ob Sie im Baugewerbe oder in einer Behörde tätig, ein Ausbilder, Auszubildender oder Student oder einfach nur daran interessiert sind, mehr über Bautechniken zu erfahren, das Handbuch wird für Sie ein wertvolles Nachschlagewerk sein.

Eine andere wertvolle Quelle, an die Sie sich zu Fragen der Erdbewegung oder Verdichtung wenden können, ist Ihr lokaler Cat-Händler. Die Mitarbeiter der Händler werden von Caterpillar-Experten geschult, um Sie beraten und unterstützen zu können, indem sie Ihnen die erforderlichen Maschinen, Serviceleistungen und Kenntnisse zur Verfügung stellen, damit Sie in der Lage sind, die bestmögliche Produktivität zu erzielen.



Kapitel 1

GRUNDLAGEN DER BODENVERDICHTUNG

Die Analyse der Zusammensetzung des Bodens bildet die Grundlage, um die Vorgehensweise bei der Verdichtung festlegen und die anforderungsgerechte Tragfähigkeit erreichen zu können.



[WAS IST UNTER VERDICHTUNG ZU VERSTEHEN?]

Mit einfachen Worten gesagt, ist die Verdichtung der mechanische Prozeß zur Steigerung der Dichte eines Materials. Der Boden wird dichter, indem die Poren zwischen den Partikeln, aus denen er besteht, reduziert werden. Im Laufe der Zeit setzen sich lockere Materialien ab und verfestigen sich auf natürliche Weise von selbst. Durch das Einwirken unterschiedlicher mechanischer Kräfte wird die für die Verdichtung erforderliche Zeit von Jahren auf Stunden verkürzt.

Die Verdichtung ist nahezu für jedes Bauvorhaben notwendig, einschließlich des Baus von Straßen, Schienenwegen, Flugplätzen, Gebäuden/ Fundamenten, Rohrleitungen, Staudämmen, Kanälen usw. Hat der Boden ein Bauwerk zu tragen, ist eine Verdichtung in der Regel unerlässlich, um die Stabilität des Bauwerks aufrechterhalten zu können.

Die Bodenverdichtung wird durch den Einsatz einer oder die Kombination mehrerer Kräfte erreicht: statischer Druck, Schlag, Kneten und Vibration.





[**WARUM IST DIE VERDICHUNG WICHTIG?**]

Ein richtig verdichtetes Material kann höheren Belastungen widerstehen, ohne sich zu verformen (Durchbiegung, Rißbildung, Verschiebung). Die ein schweres Bauwerk tragende Unterlage muß sehr dicht sein, damit es sich unter der Last nicht zunehmend verdichtet, was zum Setzen des Bauwerks führt. Dichtes Material ist weniger wasserdurchlässig, was die ungünstigen Auswirkungen des Eindringens von Wasser in den Baukörper reduziert. Die Verdichtung führt auch zur Stabilisierung der Oberfläche und bringt bautechnisch schwache Bereiche zum Vorschein.

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Schichten eines typischen Straßenaufbaus wird die Bedeutung der Verdichtung deutlich. Jede Schicht des Straßenkörpers erfüllt eine bestimmte Aufgabe und trägt zudem das auf ihr ruhende Gewicht.

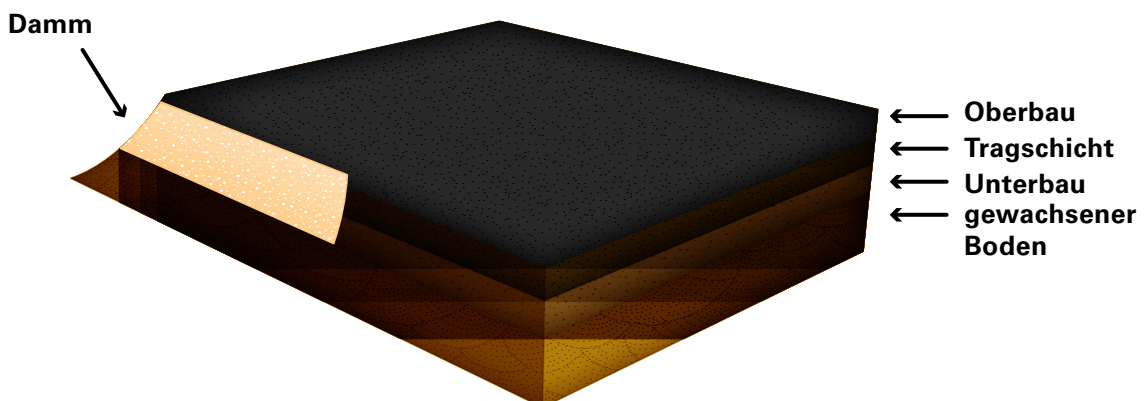
Jede Schicht muß aus dem richtigen Material in der richtigen Dicke und mit der erforderlichen Steifigkeit gebaut werden. Ist eine Schicht nicht stabil genug, gibt die Straße nach.

In jeder Phase des Straßenbaus wird verdichtet. Die Verdichtungsqualität wirkt sich erheblich auf die Nutzungsdauer der Straße sowie auf den Fahrkomfort und möglicherweise auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer aus.

Der Einflußfaktor mit den geringsten Kosten zur Erhöhung der Nutzungsdauer einer Straße ist die Verdichtung. Gemessen an den Gesamtkosten des Bauwerks ist der Aufwand pro Kubikmeter Boden zur Steigerung der Dichte minimal.

Das Erreichen der anforderungsgerechten Dichte ist eine Voraussetzung zur Reduzierung der Unterhaltungskosten einer Straße.

TYPISCHER QUERSCHNITT EINES STRASSENKÖRPERS



[WAS IST UNTER BODEN ZU VERSTEHEN?]

Böden sind unverfestigte Materialien, die aus mineralischen Stoffen bestehen und organische Substanzen enthalten können. Böden bestehen im wesentlichen aus Gesteinsablagerungen, die durch physikalische und chemische Prozesse verwitterten.

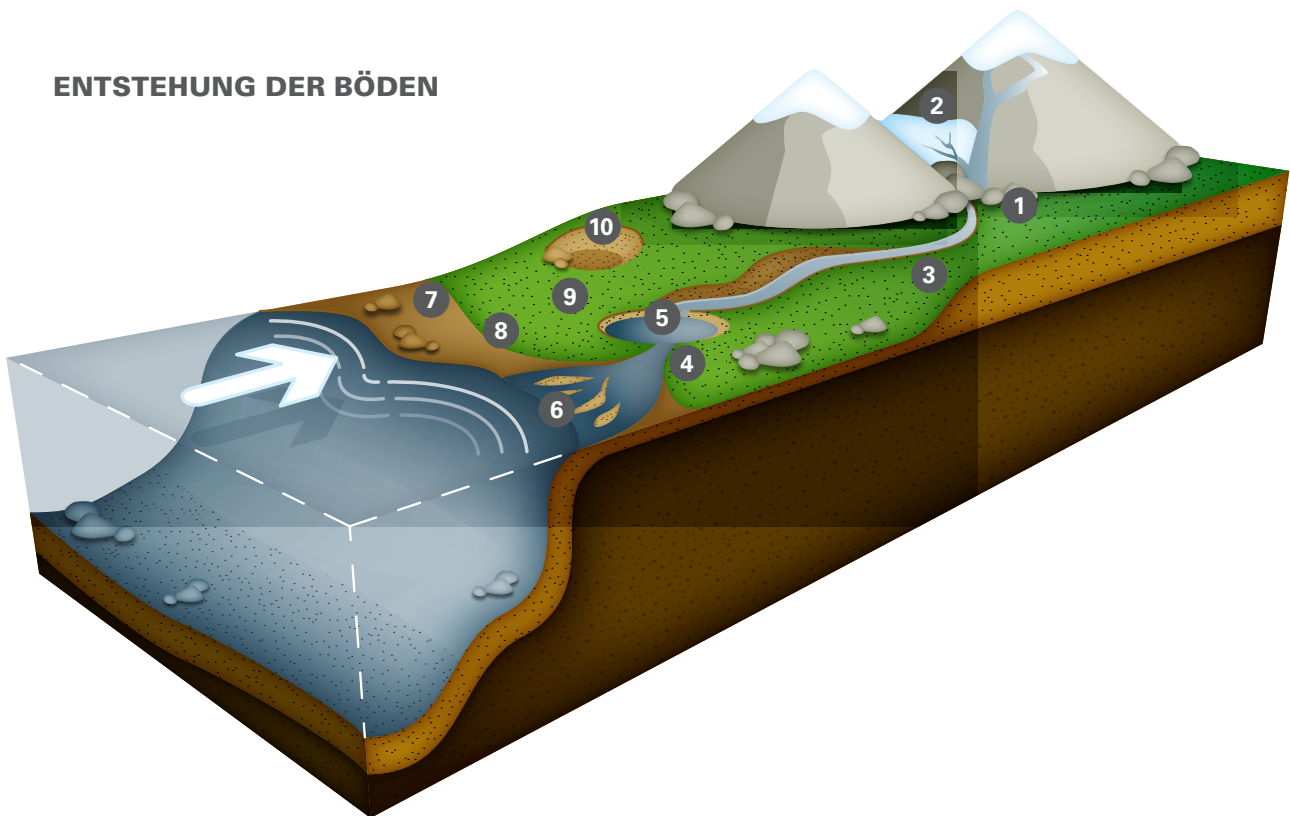
Zu den physikalischen Prozessen gehören Gefrieren und Auftauen, Rollen, Abschleifen und Verwehen.

Durch chemische Prozesse entstehen Tonböden. Langfristige Witterungseinflüsse und Regen spielen eine bedeutende Rolle bei der Bildung

von Ton, der sich von Sand und Kies dadurch unterscheidet, daß er aus dünnen, flachen Partikeln mit plattenähnlichen Strukturen besteht, die ihren Ursprung in unterschiedlichen Gesteinen haben.

Organische Substanzen tragen ebenfalls zur Bodenbildung bei. Wenn Pflanzen absterben, werden ihre Reste Teil des Bodens. Böden mit einem hohen Gehalt an organischen Substanzen sind in der Regel zu schwammig und zu schwach, um für bauliche Zwecke eingesetzt werden zu können.

ENTSTEHUNG DER BÖDEN



1 Verwitterungsböden
zersetztes Gestein

2 glaziale Ablagerungen
vom Gletschereis mitgeführte oder geschaffene Materialien (Moräne bzw. Geschiebemergel)

3 glaziofluviale Ablagerungen
Material aus Gletscherbächen oder Schmelzwässern des Inlandeises

4 fluviale Sedimente (Flußablagerungen)

5 Seeablagerungen

6 Schwemmböden
feinkörnige, durch Wasserströmungen in Ebenen und Mündungsgebieten entstandene Sedimentböden

7 Schwemmlagerungen

8 äolische Sedimente

9 organische Böden
zersetzte Pflanzen

10 künstliche Böden
durch Sprengung und Zerkleinerung entstanden

[**BODENARTEN**]

Trotz der Vielfaltigkeit der physikalischen und chemischen Zusammensetzung von Böden unterscheidet man für bautechnische Zwecke sechs Hauptbodenarten: Blöcke, Steine, Kies, Sand, Schluff und Ton.

Diese sechs Bodenarten werden i. allg. nach ihren Partikelgrößen unterteilt, die anhand eines Siebtests ermittelt werden. Während die technische Spezifikation im einzelnen länderspezifisch

variieren kann, werden die Siebgrößen in der Regel nach einer der beiden Standards definiert: der Internationalen Organisation für Normung (ISO) [www.iso.org] oder der ASTM (American Society for Testing and Materials) [www.astm.org]. Die beiden Standards sind zwar nicht identisch, weisen aber große Ähnlichkeiten auf. Bodenanteile, die zu fein sind, um gesiebt zu werden, werden mittels eines Absetzversuchs bestimmt (siehe Seite 14).

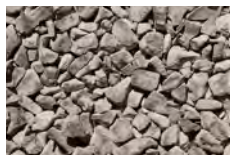
BODENARTEN



Blöcke



Steine



Kies



Sand

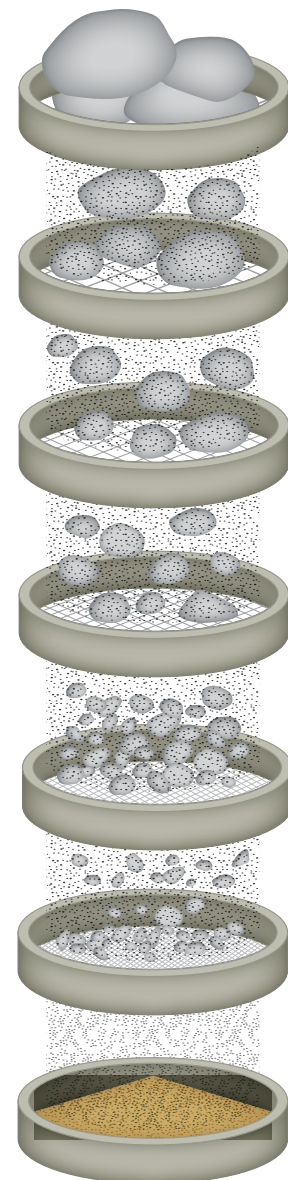


Schluff

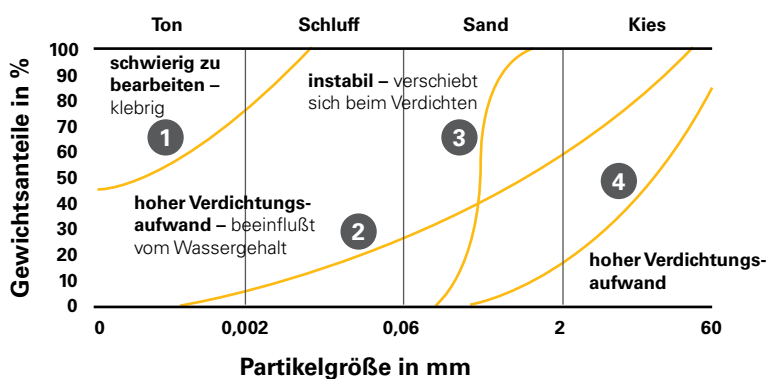


Ton

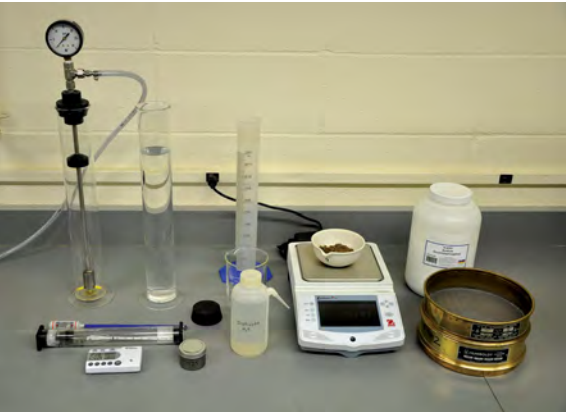
SIEBVERSUCH



VERTEILUNG DER PARTIKELGRÖSSEN



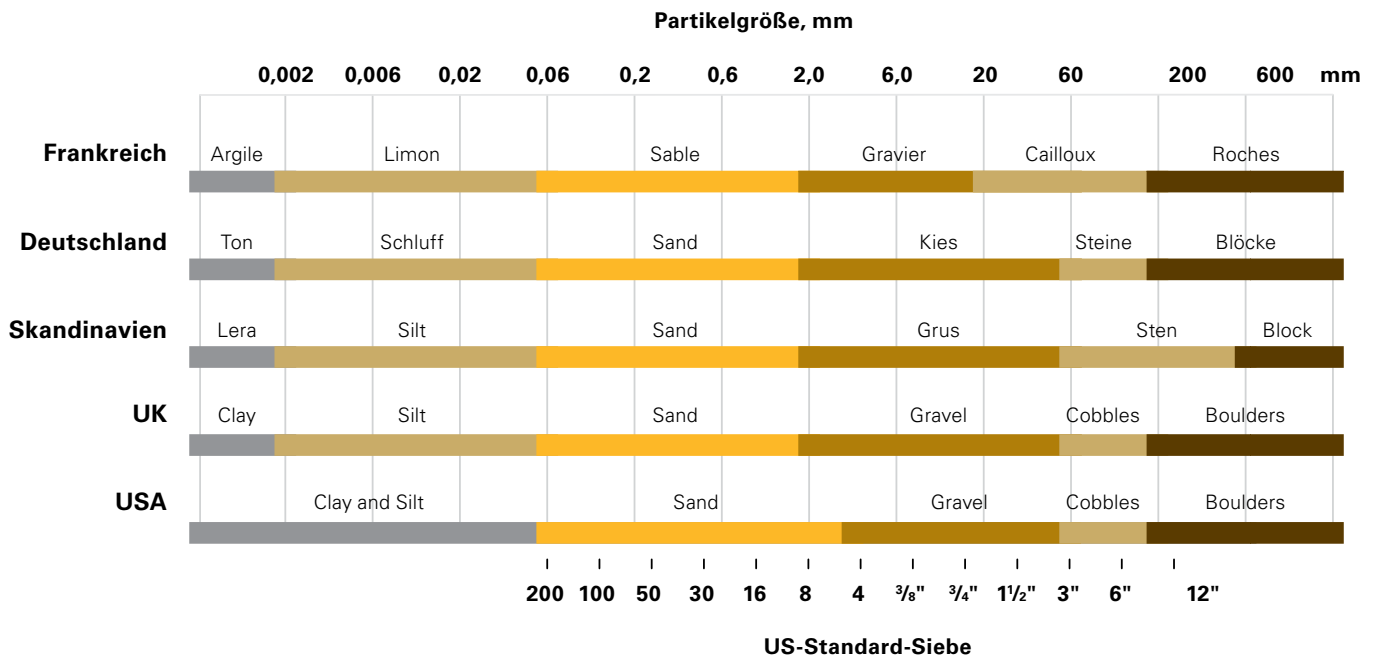
- 1 stark schluffiger Ton
- 2 schluffiger Kies
- 3 enggestufter Sand
- 4 sandiger Kies



Absetzversuch

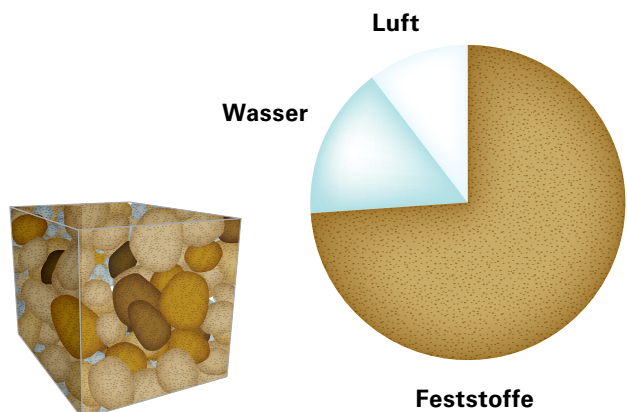
Die Bodenprobe wird in einem Meßzylinder in Wasser dispergiert (suspergiert). Anhand der Zeit, die das Material benötigt, um sich am Boden abzusetzen, können unterschiedliche Korngrößen ermittelt werden. Aus dem Meßwert kann die Wichte der Suspension ermittelt werden, anhand derer der Anteil von Körnern einer bestimmten Größe berechnet werden kann.

VERGLEICHSDIAGRAMM FÜR BÖDEN



Bei einem Bodenmaterial handelt es sich im wesentlichen um ein aus variierenden Anteilen bestehendes Gemisch der zuvor erwähnten Bodenarten. Es besteht nicht nur aus Feststoffen, sondern ist eine Mischung aus Feststoffen (in einer beliebigen Kombination an Bodenarten), Wasser und Luft.

BODENGEMISCH

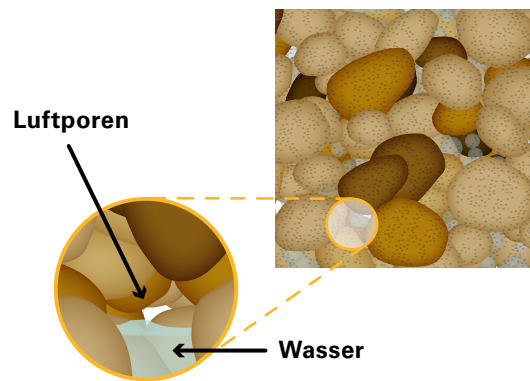


Natürliche oder „gewachsene“ Böden haben sich auf natürliche Art und Weise auf dem Untergrund abgelagert und unterscheiden sich ortsabhängig. Ein Bodenmaterial besteht beispielsweise niemals zu 100 % aus Ton oder Sand, sondern weist immer kleine Anteile verschiedener Bodenarten auf. Die als Baugrund am besten geeigneten Böden sind häufig Gemische aus spezifischen Anteilen von Bodenarten, je nach den gewünschten bautechnischen Eigenschaften.

Geotechniker entwickeln Bodenmaterialien mit bestimmten Eigenschaften und geben die Zusammensetzung anhand der prozentualen Anteile der einzelnen Bodenarten an. Bodenarten, die in einem gewachsenen Boden nicht enthalten sind, werden im erforderlichen Verhältnis zugemischt, um ein Material mit den geforderten technischen Merkmalen zu erhalten. Aus wirtschaftlichen Gründen wird häufig auf die in der näheren Umgebung verfügbaren Zusatzstoffe zurückgegriffen.

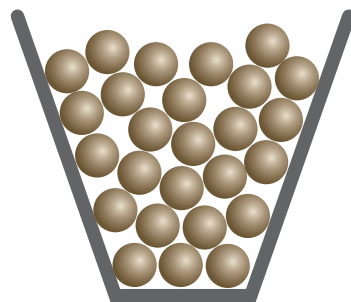
Bei der Untersuchung einer Bodenprobe kann man feststellen, daß die einzelnen Partikel unterschiedliche Größen und Formen aufweisen. Die Bereiche

LUFT-/WASSERPOREN

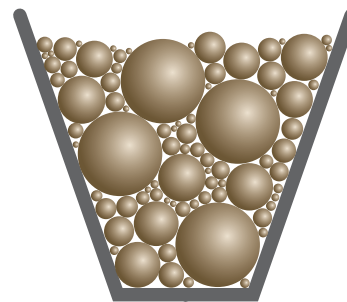


zwischen den Partikeln werden als „Hohlräume“ oder „Poren“ bezeichnet. Poren können entweder mit Luft oder Wasser gefüllt sein. Weist ein Bodenmaterial zu viel Luft und Wasser aufgrund sehr zahlreicher Poren auf, ist der Boden instabil. Bei der Verdichtung ordnen sich die Bodenpartikel. Gleichzeitig werden das Volumen und die Größe der Luftporen auf ein Mindestmaß reduziert, wodurch das Material dichter und stabiler wird.

KORNABSTUFUNG



gleichförmig gestuft oder schlecht abgestuft



weitgestuft oder gut abgestuft

Die einzelnen Partikel eines Bodenmaterials weisen unterschiedliche Größen auf, auch wenn die Unterschiede gering sind. Der Partikelgrößenbereich wird als Kornabstufung oder manchmal als Korngrößen- oder Partikelgrößenverteilung bezeichnet. Idealerweise sind relativ gleiche Mengen aller Korngrößen enthalten, wobei keine Größe dominiert. Böden mit unterschiedlichen Korngrößen bezeichnet man als „weit gestuft“ oder „gut abgestuft“.

Materialien, deren Partikel nahezu dieselbe Größe aufweisen, wie Schwemmsand, sind „gleichförmig gestuft“ oder „schlecht abgestuft“. Sind eine oder mehrere Partikelgrößen nicht im Material enthalten, wird es als „intermittierend gestuft“ bezeichnet. Ein gut abgestufter Boden läßt sich leichter verdichten als ein schlecht abgestufter, da sich die kleineren Körner in die Poren zwischen den größeren Körnern einfügen.

[VIER BODENTYPEN]

Für die Verdichtung eines Bodens ist es wichtig, sowohl seine Bestandteile als auch dessen Reaktion auf die Einleitung von unterschiedlichen Kräften zu kennen. Gemäß ihrer Beschaffenheit werden die Böden in vier Hauptkategorien unterteilt:

1. **bindig**
2. **halbbindig**
3. **nichtbindig**
4. **organisch**

Jede Bodenart reagiert auf die Einwirkung von Kräften anders. Anhand dieser Reaktionen wird die Eignung der Böden als Baugrund festgelegt und bestimmt, welche Arbeitsverfahren zur Anwendung kommen.

Eignet sich ein Boden nicht als Baugrund (wie z.B. organische Böden), wird er entweder ausgetauscht, oder es werden unterschiedliche Mittel eingesetzt, um seine Eigenschaften zu verbessern. Dieses Verfahren wird als „Stabilisierung“ bezeichnet. Dazu gehören die chemische Stabilisierung – zum Beispiel das Einbringen von Portlandzement, Kalk, Flugasche oder Kalziumchlorid – sowie die mechanische Stabilisierung, u. a. durch das Hinzufügen bestimmter Zusatzstoffe oder den Einsatz von Geogittern.

MATERIALTYPEN



Bodenart	Aussehen/ Anfühlen	Bewegung des Wassers	wenn feucht	wenn trocken
körnige Böden, feiner Sand und Schluff	Grobe Körner sind sichtbar. Fühlt sich beim Reiben zwischen den Fingern kiesig an.	Werden Wasser und Boden zusammen auf die Handfläche gegeben und geschüttelt, vermischen sie sich. Wird die Rüttelbewegung gestoppt, erfolgt eine Trennung.	sehr geringe oder keine Plastizität	geringe oder keine kohäsive Festigkeit im trockenen Zustand, die Bodenprobe zerfällt leicht
bindige Böden, gemischt- körnige Böden und Tone	Die Körner sind mit bloßem Auge nicht sichtbar. Fühlt sich beim Reiben zwischen den Fingern glatt und glitschig an.	Werden Wasser und Boden zusammen auf die Handfläche gegeben und geschüttelt, vermischen sie sich nicht.	plastisch und klebrig, können gerollt werden	hohe Festigkeit im trockenen Zustand, zerbröckeln schwer, langsame Wassersättigung

[DIE BEDEUTUNG DES WASSERGEHALTS]

Die Bedeutung des Wassers für die Bodenverdichtung kann nicht genug betont werden. Jede Bodenart reagiert in Abhängigkeit von ihren physikalischen Eigenschaften unterschiedlich auf den Wassergehalt. Für jeden Boden gibt es einen Wassergehalt, der die technischen Eigenschaften des Materials bei einer definierten Verdichtungsarbeit maximiert. Im allgemeinen gilt: Je kleiner die Partikel sind, desto größer ist der Einfluß von Wasser auf die Verdichtung.

Weist ein Boden eine zu geringe Feuchtigkeit auf, ist die Bearbeitung des Materials schwierig, da es den Partikeln an der notwendigen Schmierung fehlt, um sie in einem dichteren Zustand anordnen zu können. Außerdem besteht zwischen den Partikeln keine ausreichende Kohäsion, um zusammenzuhalten.

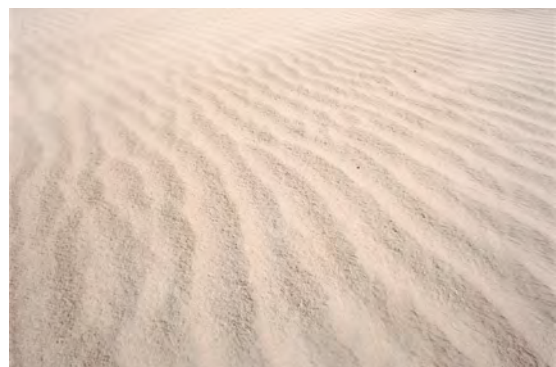
Wasser wird hinzugefügt, um die Kohäsion und die Schmierung zu verbessern. Zuviel Wasser kann zur



Sättigung führen. Dann sind alle Poren mit Wasser gefüllt, und die Tragfähigkeit des Gefüges nimmt ab. Die Partikel sind zudem zu sehr geschmiert und können sich somit leicht verschieben.

Als einfaches Beispiel dafür, wie sehr Wasser die baulichen Eigenschaften eines Bodens beeinflussen kann, stellen Sie sich vor, daß Sie eine Sandburg am Strand bauen. Das Wasser im Sand sorgt für eine ausreichende Haftfestigkeit, um dicke Wände und große Türme formen zu können. Stellen Sie sich nun vor, Sie wollen diese Sandburg in der Wüste bauen. Weil es dem trockenen Wüstenboden an Haftfestigkeit mangelt, ist das unmöglich.

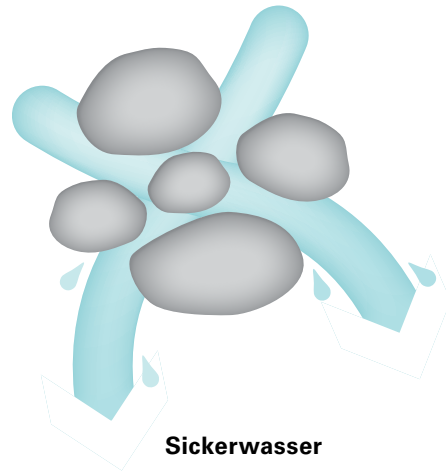
Wasser hat auch andere Wirkungen. Da Wasser inkompressibel ist, kann es Bodenmaterialien verschieben und zur Instabilität führen. Gefrorenes Wasser dehnt sich aus und verdrängt den Boden. Nach dem Auftauen hat es ein geringeres Volumen und schafft Freiräume, die zu Setzungen führen.



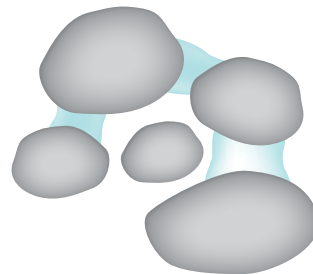
Wasser ist in allen Böden in deren natürlichem Zustand enthalten. Es kann auf drei verschiedene Arten auftreten:

1. Sickerwasser bewegt sich aufgrund der Schwerkraft frei nach unten. Es kann auf natürliche Weise aus einem Boden abfließen.
2. Kapillarwasser wird von kleinen Poren oder Hohlräumen im Boden gehalten. Es gilt als freies Wasser und kann nur durch Absenken des Grundwasserspiegels oder durch Verdunstung beseitigt werden.
3. Hygroskopisches Wasser ist in einem Boden enthalten, nachdem Sicker- und Kapillarwasser beseitigt wurden. Aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Affinität halten einzelne Bodenkörner dieses Wasser in Form eines sehr dünnen Films fest. Man spricht von einem lufttrockenen Boden. Dieses Wasser müßte durch das Trocknen des Bodens in einem Ofen beseitigt werden, um dessen tatsächliches Trockengewicht bestimmen zu können.

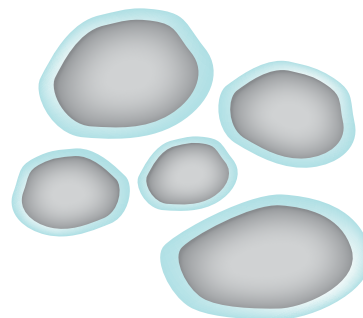
Zuviel Feuchtigkeit bewirkt eine übermäßige Schmierung und damit eine Partikelinstabilität. Zuwenig Feuchtigkeit dagegen reduziert die Kohäsion und behindert die Anordnung der Partikel in einen dichteren Zustand. Für jede Bodenart gibt es einen optimalen Wassergehalt, bei dem die maximale Dichte bei einer definierten Verdichtungsarbeit erreicht wird. Mit Hilfe des Proctorversuchs läßt sich der optimale Wassergehalt bestimmen.



Sickerwasser



Kapillarwasser



hygroskopisches Wasser



[PROCTORVERSUCH]

Die Bedeutung der Verdichtung des Unterbaus ist seit langem bekannt. Aber erst 1933 gelang es dem amerikanischen Bauingenieur *Ralph R. Proctor* vom Bureau of Water Works in Los Angeles, eine standardisierte Methode für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen dem optimalen Wassergehalt und der maximalen Trockendichte des Bodens zu entwickeln. Beim Proctorversuch wird ein Fallgewicht eingesetzt, um in einem Stahlzylinder drei übereinanderliegende Bodenschichten zu verdichten.

Mit dem Standardversuch wird der Wassergehalt ermittelt, bei dem der Boden bei einer vorgegebenen Verdichtungsarbeit optimal verdichtet werden kann. Das Versuchsergebnis dient als Vorgabewert für die auf der Baustelle zu erzielende Verdichtung und wird anteilig von der im Labor ermittelten Trockendichte angegeben. Dieser Wert reicht von 90 bis über 100 %.

Ebenso wurden modifizierte Verdichtungsversuche für Bauwerke eingeführt, die eine höhere Tragfähigkeit erfordern, um extrem schwere Belastungen ertragen zu können oder um die Setzung zu begrenzen. Beim modifizierten (verbesserten) Proctorversuch wird im Vergleich zum Standardversuch ungefähr vier Mal so viel Energie aufgewendet, was sich normalerweise in einem geringeren „optimalen“ Wassergehalt äußert.



Labortechnik für den Proctorversuch

Übersteigen der 100 %igen Trockendichte

Wie kann die Solldichte größer sein als 100 %? Die mit dem Proctorversuch ermittelte Dichte ist nicht die maximale Dichte, die im Feld erreicht werden kann. Die Proctor-Trockendichte von 100 % repräsentiert die maximale Dichte, die mit einer bestimmten Probe unter Verwendung einer definierten Verdichtungskraft beim optimalen Wassergehalt im Labor erzielt wurde. Beim einfachen und beim modifizierten Proctorversuch werden bei derselben Probe unterschiedliche Gewichte und Fallhöhen angewendet und somit unterschiedliche Trockendichten erzielt. Auf der Baustelle werden die „Hammerschläge“ von einer Walzenbandage erzeugt, die eine größere Energie als das Fallgewicht in den Boden einträgt. Es ist nicht ungewöhnlich, Felddichten von 100 bis 115 % der maximalen Proctor-Trockendichte zu erzielen. Aufgrund von Tragfähigkeitsanforderungen und Bodeneigenschaften ist eine Verdichtung von über 100 % des Proctorwertes gerechtfertigt.

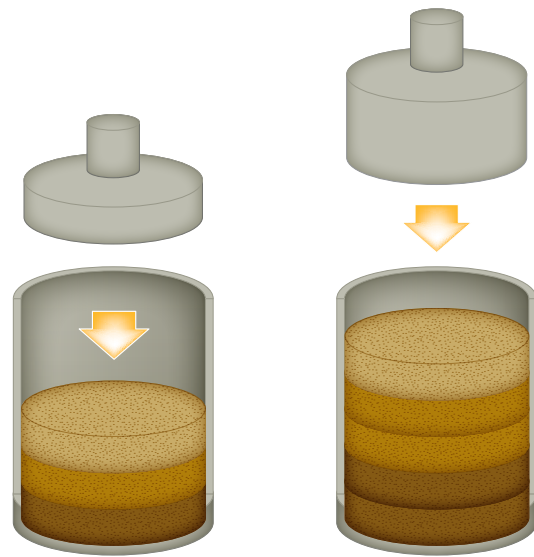
Für eine bestimmte Bodenprobe wird entweder der einfache oder der modifizierte Proctorversuch fünf Mal durchgeführt. Bei jedem Versuch ist die Vorgehensweise die gleiche, allerdings wird jedes Mal der Wassergehalt geändert.

Die Versuchsreihe beginnt mit einem Feuchtigkeitszustand des Bodens, der etwas unter dem vermuteten optimalen Wassergehalt liegt. Nachdem die erste Probe in einem zylindrischen Gefäß verdichtet wurde, wird das Feuchtgewicht bestimmt. Dazu wird ein Teil der Probe in einen Trockenofen gegeben. Ist die Probe völlig trocken, wird sie erneut gewogen. Der Unterschied zwischen Feucht- und Trockengewicht ergibt den Wassergehalt, der als Anteil des Trockengewichts in Prozent angegeben wird.

Eine zweite Probe wird mit einem höheren Wassergehalt verdichtet und das Wiege- und Trocknungsverfahren wiederholt. Weitere Proben mit erhöhtem Wassergehalt werden bearbeitet, bis das spezifische Gewicht abnimmt oder der Boden zu naß wird, um damit arbeiten zu können.

Die ermittelten Werte für die Trockendichte und den Wassergehalt werden anschließend graphisch aufgetragen. Der höchste Punkt der so ermittelten Kurve repräsentiert die maximale Trockendichte und den optimalen Wassergehalt für diese Bodenprobe.

PROCTORVERSUCHE



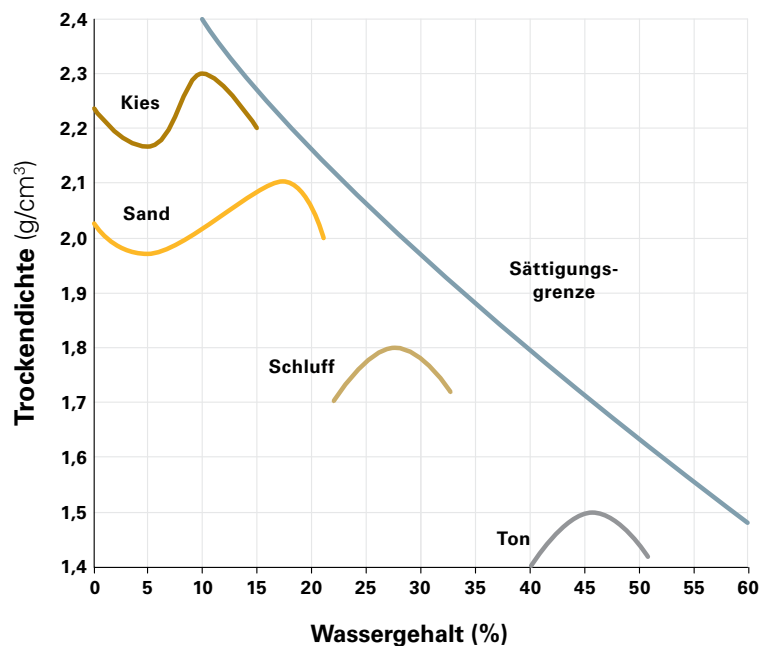
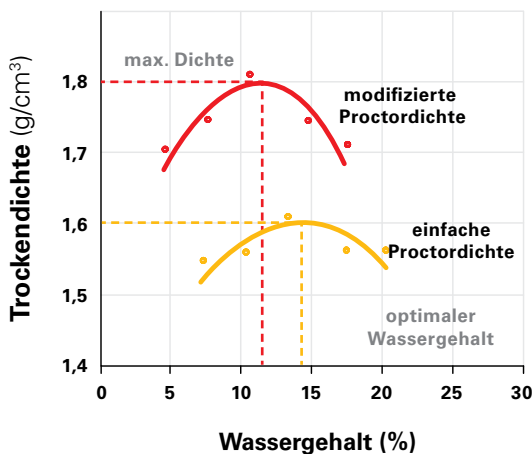
einfacher Versuch

Jede Schicht wird mit 25 Schlägen eines 2,5 kg schweren Fallgewichtes aus einer Fallhöhe von 305 mm beaufschlagt.

modifizierter Versuch

Jede Schicht wird mit 25 Schlägen eines 4,5 kg schweren Fallgewichtes aus einer Fallhöhe von 457 mm beaufschlagt.

PROCTORKURVEN

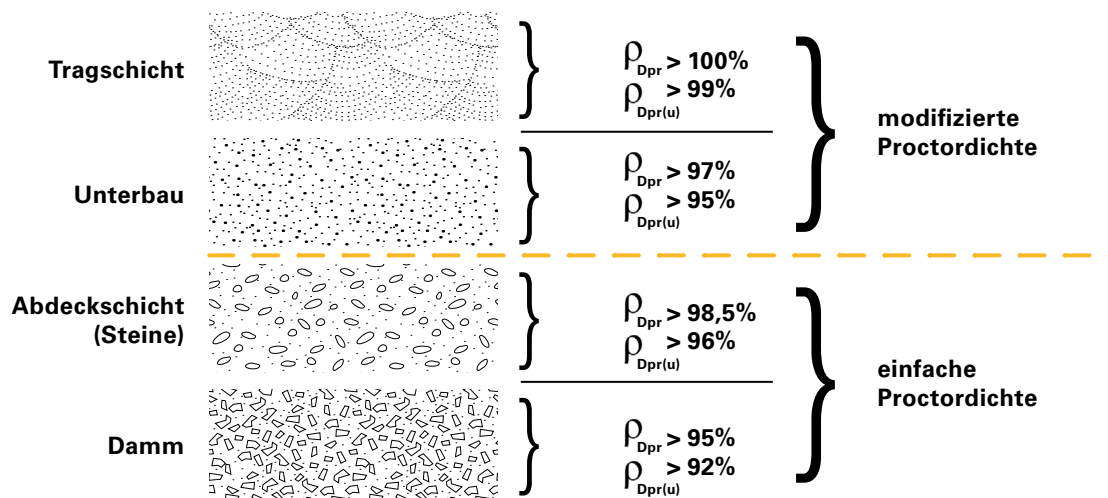


Im Laborversuch wird der Wassergehalt ermittelt, bei dem die maximale Dichte für das betreffende Bodenmaterial erreicht werden kann. Die im Feld geforderten Dichten werden als Anteil der maximalen Labortrockendichte in Prozent angegeben. Im allgemeinen betragen die erforderlichen Felddichten 95 % der einfachen

Proctordichte bei Dämmen und bis zu 100 % der modifizierten Proctordichte beim Bau von Straßen. Dabei muß der Wassergehalt des eingebauten und zu verdichtenden Bodens im Bereich des im Labor ermittelten optimalen Wassergehaltes liegen.

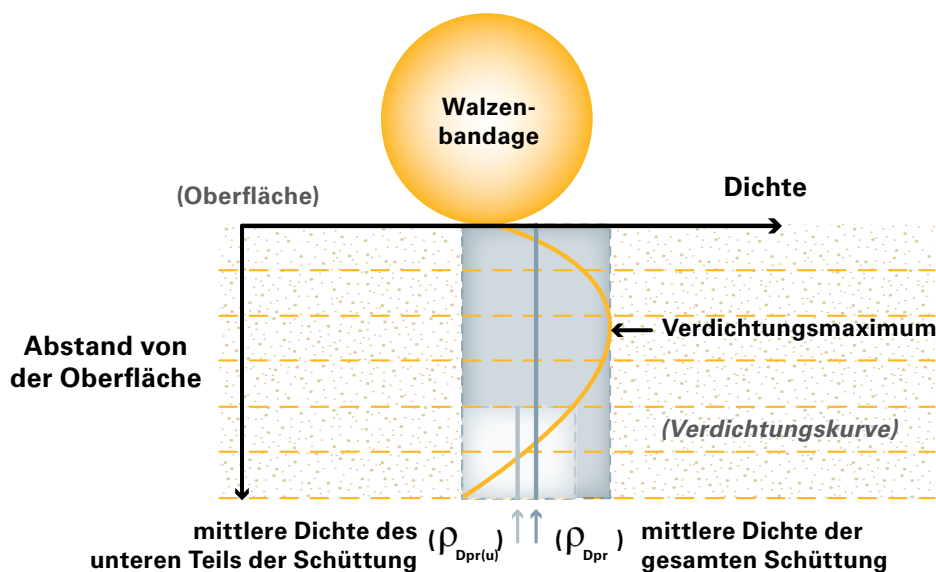
VERDICHTUNGSANFORDERUNGEN

Die Graphik verdeutlicht, daß die Anforderungen an die Dichte um so höher sind, je näher sich das Material an der Oberfläche befindet.



ρ_{Dpr} = mittlere Dichte der gesamten Schüttung
 $\rho_{Dpr(u)}$ = mittlere Dichte des unteren Abschnitts der Schicht

Anhand des dargestellten Verdichtungsverlaufs können die mittlere Dichte der gesamten Schüttung (ρ_{Dpr}) und die mittlere Dichte ihres unteren Abschnitts ($\rho_{Dpr(u)}$) miteinander verglichen werden.



[BODENEIGENSCHAFTEN]

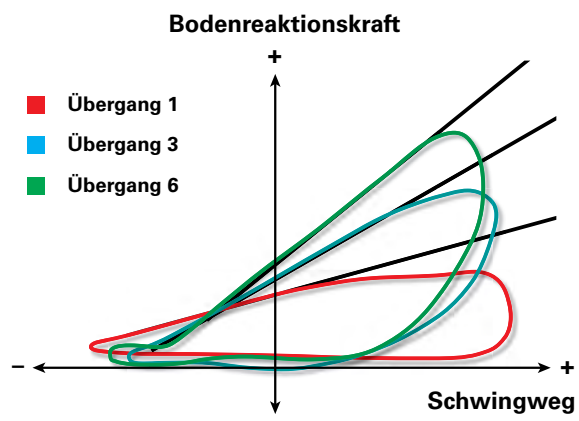
Zur Definition der Eigenschaften und Merkmale verschiedener Böden wird eine Reihe von Begriffen verwendet. Das Verständnis dieser Begriffe ist notwendig, um die Grundlagen und Techniken der Bodenverdichtung zu verstehen.

Tragfähigkeit ist eine entscheidende Eigenschaft eines Straßenkörpers. Mit einfachen Worten gesagt, handelt es sich um die Fähigkeit eines Bauwerks, den Lasten, die es trägt, zu widerstehen. In der Regel wird die Tragfähigkeit durch das Proof-Rolling-Verfahren geprüft, indem ein beladener Lkw über die verdichtete Fläche fährt und sein Einsinken beobachtet wird. Im Straßenbau werden weitere Eigenschaften wie Elastizitätsmodul, Steifigkeit und Dichte herangezogen, um einen Sollwert für die Tragfähigkeit zu bestimmen.



Steifigkeit ist die Fähigkeit eines Bodens, Verformungen unter Last zu widerstehen. Berechnet wird dieser Wert als das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung. Im Gegensatz zum Elastizitätsmodul ist die Steifigkeit keine Eigenschaft des Bodenmaterials an sich. Die Bodensteifigkeit hängt ab vom wirksamen Spannungszustand und den Entwässerungsbedingungen und unterliegt somit auch dem Einfluß der Bodenstruktur und der Konstruktion der Schicht. Damit ist die Steifigkeit eine wirksame Methode zur Abschätzung der Tragfähigkeit eines Bodens.

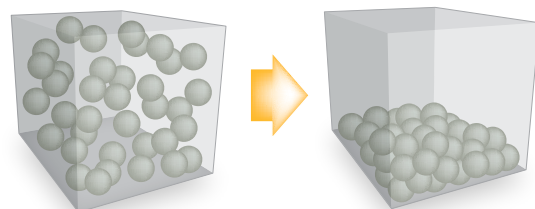
STEIFIGKEIT



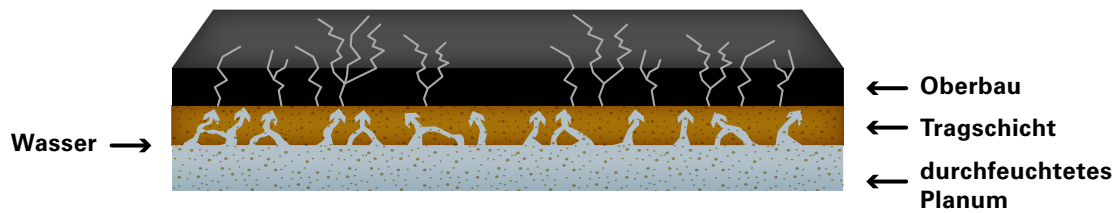
Je steiler die Kurve ansteigt, desto steifer ist der Boden.

Dichte ist der Quotient aus Masse und Volumen, der mit der Abnahme des Volumens zunimmt. Die maximale Dichte ergibt sich bei einer gegebenen Masse bei dem geringstmöglichen Volumen, das ein Körper – im betrachteten Fall der Boden – einnehmen kann. Im porenfreien Zustand erreicht die Dichte ihren maximalen Wert. Sie war die Standardeigenschaft, anhand derer die Tragfähigkeit abgeschätzt wurde. Da jedoch die Dichte nicht mit der Biegefähigkeit korreliert, wird sie nicht mehr allein zur Beurteilung der Tragfähigkeit herangezogen. Ungeachtet dessen ist die Dichte immer noch ein notwendiges Kriterium zur Abschätzung der Tragfähigkeit.

DICHTE



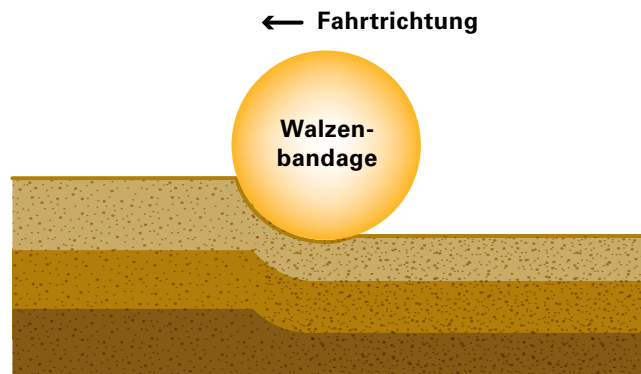
KAPILLARITÄT



Kapillarität ist die Fähigkeit eines Bodens, Wasser auf- oder absteigen zu lassen. Eine wünschenswerte Eigenschaft eines Tragschichtmaterials, das zwischen dem Planum und dem Belag eines Straßenkörpers eingesetzt wird, ist dessen Wirkung als Kapillarsperre, um das Aufsteigen von Wasser aus dem Untergrund zu verhindern. Eine körnige Tragschicht begünstigt das Abfließen des Wassers aus dem Unterbau. Kapillarwasser wird von kleinen

Poren oder Hohlräumen im Boden gehalten. Es gilt als freies Wasser, das durch das Absenken des Grundwasserspiegels, große punktuelle Belastung oder Verdunstung beseitigt werden kann. Ohne die Kapillarsperre der Tragschicht würde eingeschlossenes Wasser das Straßenbett aufweichen und die Nutzungsdauer des Straßenkörpers reduzieren.

KOMPRESSIBILITÄT

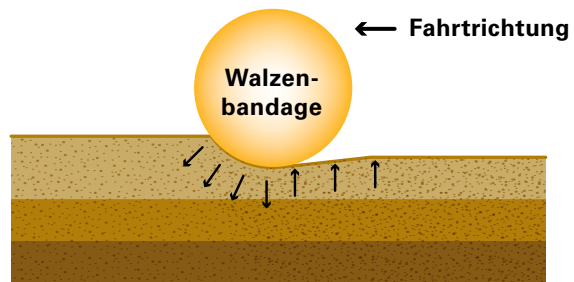


Kompressibilität ist das Maß, um das sich das Volumen eines Materials unter Krafteinwirkung vermindert. Böden mit hoher Kompressibilität besitzen Partikel, die sich leicht selbst ausrichten und somit den zugänglichen Porenraum reduzieren. Im feuchten Zustand besitzen Tonböden normalerweise eine höhere Kompressibilität als körnige Böden, weisen jedoch eine geringere

Durchlässigkeit auf, wodurch das Drainieren und Verdichten solcher Böden sehr langsam vonstatten geht. Werden Lasten schnell aufgebracht, wie z.B. Belastungen durch sich bewegende Räder, baut sich in feinkörnigen Böden ein Wasserdruck auf, der zu einer Zunahme der Kompressibilität führt.

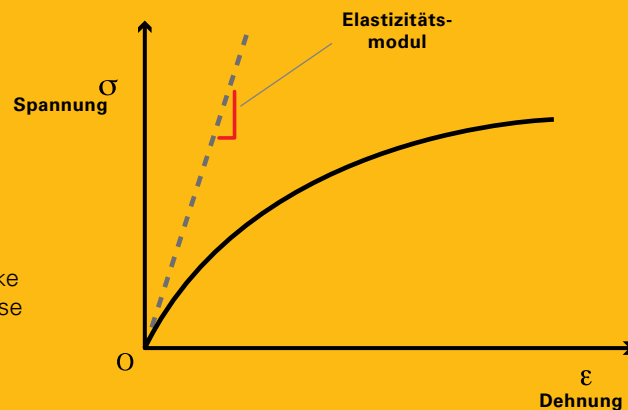
Elastizität ist die Fähigkeit eines Bodens, nach einer Deformation wieder in seinen ursprünglichen Zustand oder in dessen Nähe zurückzukehren, nachdem die Belastung aufgehoben wurde. Die Elastizität kann bei Böden eine wünschenswerte Eigenschaft sein, z. B. um schwankenden Belastungen ohne dauerhafte Verformungen widerstehen zu können. Aus hochelastisch konzipierten Unterlagen mit einem zu geringen Elastizitätsmodul können hohe Spannungen in den darüberliegenden Schichten resultieren. Häufig werden chemische und mechanische Stabilisierungen durchgeführt, um das elastische Verformungsverhalten von Böden und Tragschichten zu verbessern. Organische Böden besitzen eine sehr hohe plastische Verformbarkeit, jedoch einen niedrigen Elastizitätsmodul.

ELASTISCHE UND PLASTISCHE VERFORMUNG

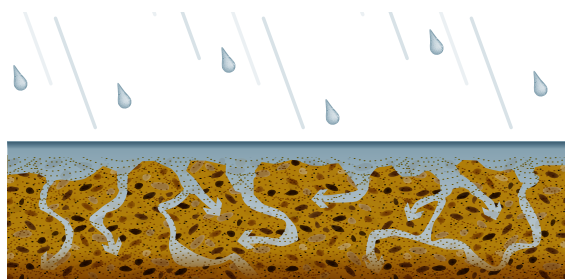


Elastizitätsmodul:

Aus dem Verhältnis von Spannungs- und Verformungsänderung errechnet man den Elastizitätsmodul, der einen Hinweis auf die Tragfähigkeit des Bodens gibt. Die materialspezifische Kennziffer kann mit der sich verändernden Zusammensetzung eines Bodenmaterials variieren. Die erforderliche Dicke des gebundenen Oberbaus basiert üblicherweise auf der Beurteilung des zugrundeliegenden Elastizitätsmoduls.



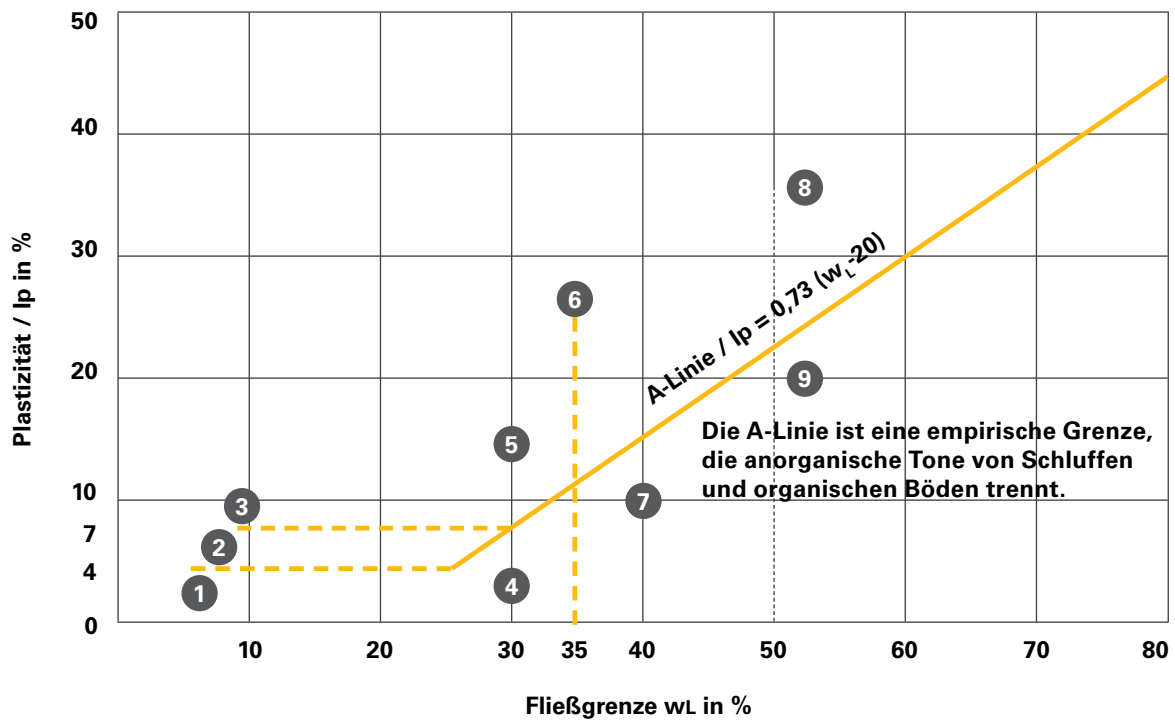
DURCHLÄSSIGKEIT



Durchlässigkeit bezeichnet die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens und ist nicht gleichbedeutend mit der Kapillarität, also der Fähigkeit eines Bodens, Wasser zu absorbieren. Bodenstruktur, Kornabstufung und Verdichtungsgrad beeinflussen die Durchlässigkeit.

Es handelt sich um den variabelsten Bodenparameter mit Werten, die über mehr als 10 Größenordnungen variieren. In der Regel weisen grobkörnige Böden eine höhere Durchlässigkeit als feinkörnige auf, denn sie besitzen größere Poren zwischen den Partikeln.

PLASTIZITÄT

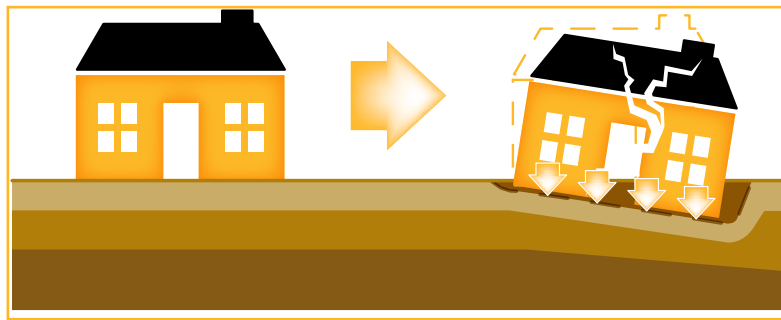


- | | |
|------------------------------|--|
| ① Sand-Schluff-Gemische | ⑥ mittelplastische Tone |
| ② Zwischenbereich | ⑦ Schluffe mit organischen Beimengungen und organogene sowie mittelplastische Schluffe |
| ③ Sand-Ton-Gemische | ⑧ ausgeprägt plastische Tone |
| ④ leicht plastische Schluffe | ⑨ Tone mit organischen Beimengungen und organogene Tone |
| ⑤ leicht plastische Tone | |

Die **Plastizität** bezieht sich auf den Kohäsionsgrad und die Verformbarkeit eines Bodens und wird mit der Plastizitätszahl (I_p) beschrieben. Viele Tonböden weisen einen hohen I_p -Wert auf, sind relativ gut

verdichtbar und besitzen eine große Kohäsion. Ein Boden mit einem I_p -Wert gleich Null ist kohäsionslos oder nicht plastisch. Der Wassergehalt eines Bodens wirkt sich ebenfalls auf dessen I_p -Wert aus.

SETZUNG

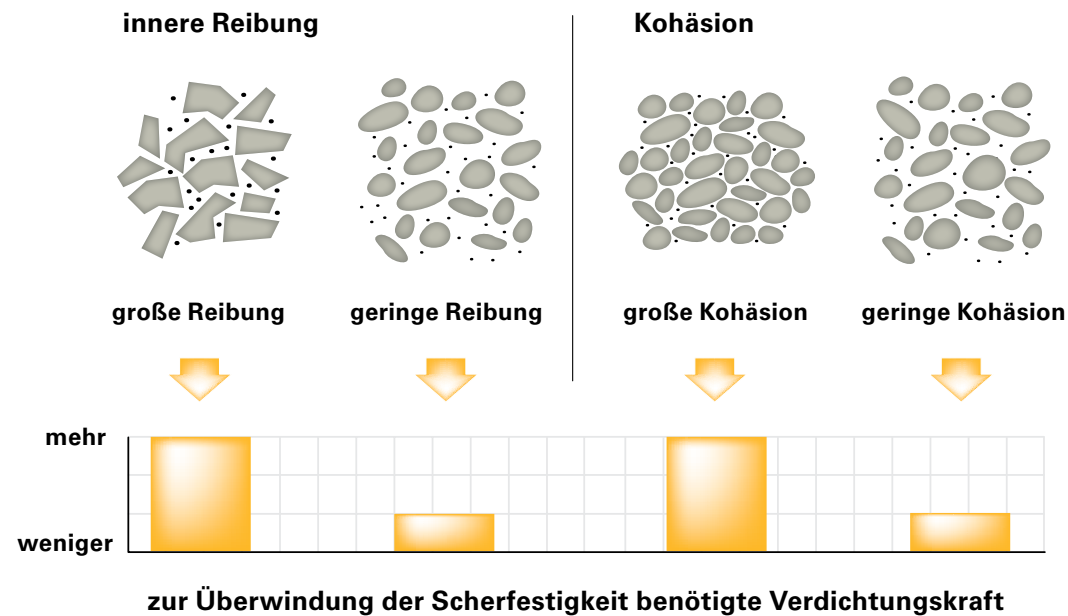


Setzung

Die **Setzung** ist der Prozeß der Absenkung des Straßenbauwerkes aufgrund der Verfestigung des Bodens und ist häufig die Folge einer unangemessenen Verdichtung. Ungenügend verdichtete Bodenpartikel werden sich mit der Zeit

selbst ausrichten und den für Luft oder Wasser zugänglichen Raum reduzieren. Der Setzungsprozeß steht in direktem Zusammenhang mit der Reduzierung des Porenvolumens.

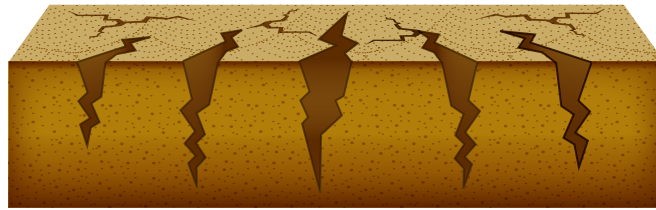
DIE SCHERFESTIGKEIT HÄNGT AB VON ...



Scherfestigkeit ist der Widerstand, den die Bodenpartikel ihrer Verschiebung entgegensetzen, wenn eine Kraft – z. B. eine Vibrations- oder Verdichtungskraft – auf sie einwirkt. Die Scherfestigkeit eines Bodens ist das Ergebnis der inneren Reibung (Verschiebewiderstand) und

der Kohäsion (Haftfestigkeit, zusammenhaltende Kräfte). Unregelmäßig geformte Partikel besitzen eine höhere Scherfestigkeit als glatte Partikel. Je höher die Scherfestigkeit ist, desto höher ist die benötigte Energie, um die geforderte Dichte zu erreichen.

SCHRUMPFEN

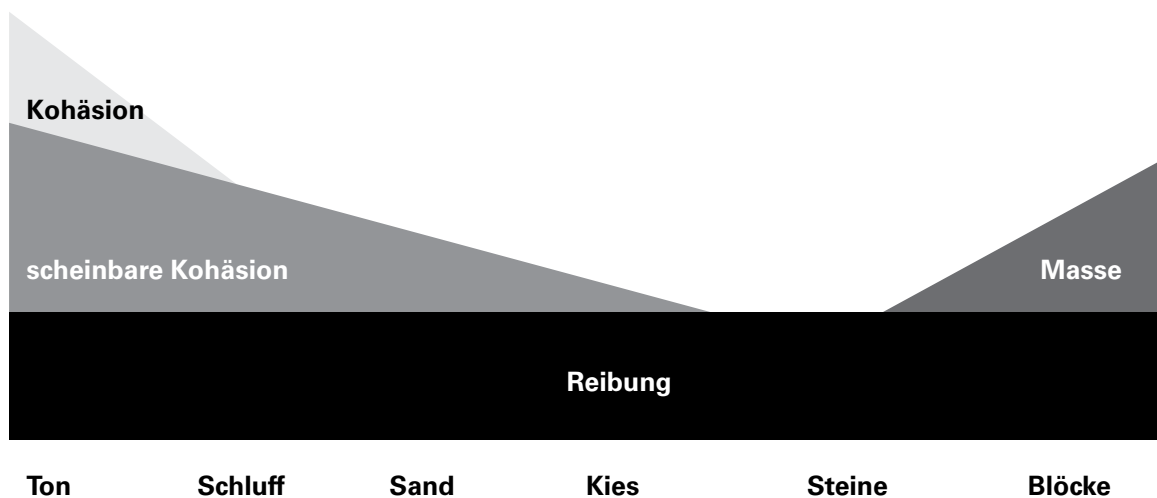


Sichtbare Schrumpfungen oder Schwellungen

sind ein Zeichen dafür, dass es sich um einen feinkörnigen Boden, wie z. B. Ton handelt. Das Schrumpfen oder Anschwellen ist auf die Freisetzung oder den Aufbau von Feuchtigkeit

im Boden zurückzuführen. Ein solcher Boden ist als Baugrund ungeeignet, denn die permanente Änderung seines Volumens kann zum Strukturversagen von Gebäuden oder Straßenbelägen führen.

VERDICHTUNGSWILLIGKEIT



Verdichtungswilligkeit: Während des Übergangs eines Bodens vom lockeren in einen dichteren Zustand wird dessen Verdichtungsfähigkeit häufig auch als Verdichtungswilligkeit bezeichnet, die sich aus dem Quotienten *Differenz zwischen End- und Anfangsdichte geteilt durch die Anfangsdichte* ermitteln lässt. Je größer dieser Verhältniswert ist, desto leichter oder schneller ändert sich die Dichte aufgrund der geleisteten Verdichtungsarbeit. Zu den Faktoren, die die Verdichtungswilligkeit

beeinflussen, gehören die Bodenart, die Kornabstufung des Bodens (da weit gestufte Böden eine höhere Verdichtungswilligkeit als intermittiert gestufte Böden aufweisen), der Wassergehalt, die Scherfestigkeit (Verformungswiderstand) sowie die Verdichtungsenergie und -methode. Sind die Faktoren bekannt, die die Verdichtungswilligkeit verbessern, können die geeigneten Arbeitsmittel und effizienten Verdichtungsverfahren ausgewählt werden.

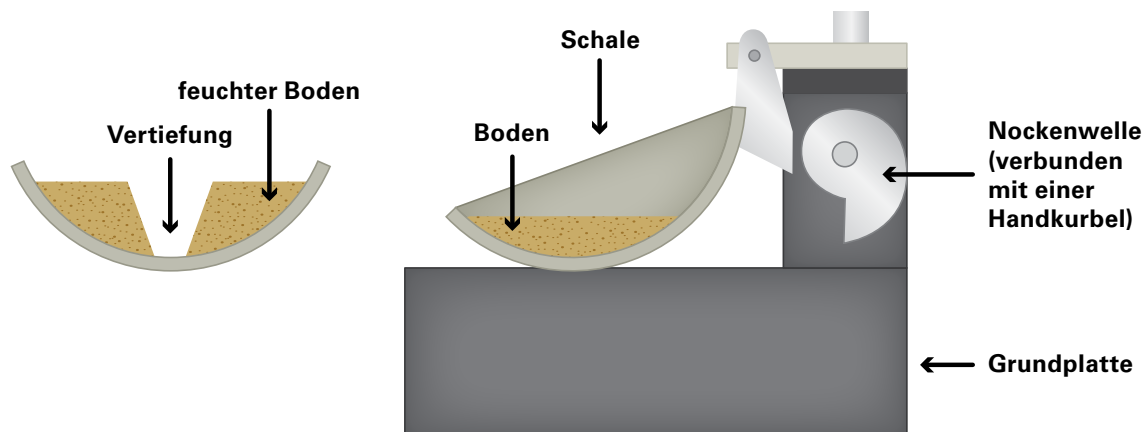
[KONSISTENZGRENZEN]

Inwiefern sich der Wassergehalt auf die Verdichtungswilligkeit eines bindigen Bodens auswirkt, wird am besten anhand der Untersuchung der Konsistenzgrenzen deutlich.

Albert Atterberg, ein schwedischer Chemiker, entwickelte als erster Grenzen für die

Bodenkonsistenz: Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze sowie die Plastizitätszahl. Die Atterberg'schen Zustandsgrenzen bilden die Grundlage für die Differenzierung zwischen hoch plastischen, leicht plastischen und nicht plastischen Böden.

BESTIMMUNG DER FLIESSGRENZE (w_L)



Bestimmung der Fließgrenze nach Casagrande

Fließgrenze (w_L)

Der Wassergehalt, bei dem ein Boden vom plastischen in den flüssigen Zustand übergeht, ist die Fließgrenze. Im Boden ist genug Feuchtigkeit vorhanden, damit innere Reibung und Kohäsion überwunden werden können.

Zur Ermittlung der Fließgrenze eines Bodens wurde ein einfacher Versuch konzipiert. Eine feuchte Bodenprobe wird in eine kleine Schale gegeben und etwas abgeflacht. In der Probe wird mit einem Furchenzieher eine Vertiefung ausgebildet. Danach wird die Schale mit konstanter Geschwindigkeit auf die Grundplatte geschlagen, bis sich die Furche am Schalenboden auf einer Länge von rund 1 cm schließt. Der Versuch wird noch dreimal mit veränderten Wassergehalten wiederholt.

Die ermittelten Wassergehalte werden graphisch über den Schlagzahlen aufgetragen (logarithmische Teilung der Abszisse). Der Wassergehalt bei der Schlagzahl 25 entspricht der Fließgrenze.

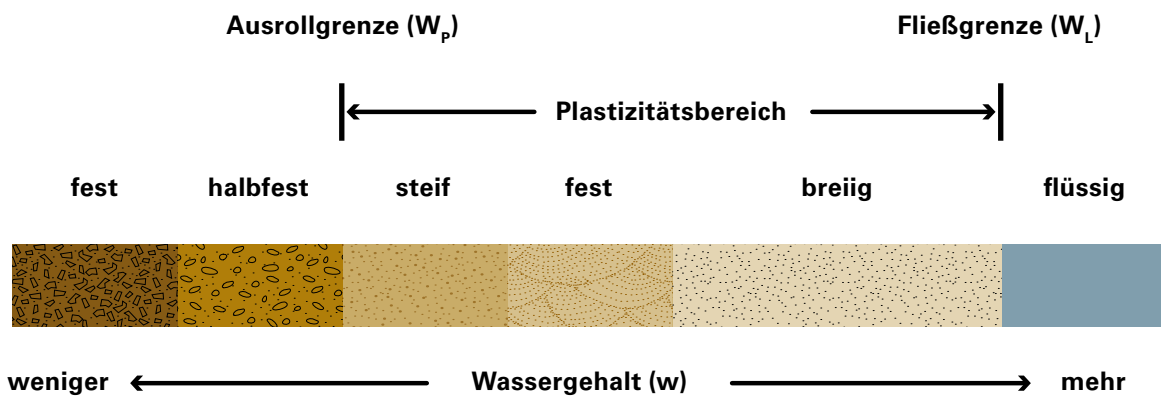
Hohe Fließgrenzwerte kennzeichnen Böden mit hoher Verdichtbarkeit. Normalerweise besitzen Tone hohe Fließgrenzen, sandige Böden weisen geringere Fließgrenzwerte auf.

Ausrollgrenze (w_p)

Dieser Zustand liegt vor, wenn ein Boden vom halbfesten in den plastischen Zustand übergeht. Das ist der Fall, wenn der Boden genug Feuchtigkeit enthält, so daß ein kleiner Teil davon auf einen Durchmesser von ca. 3 mm ausgerollt werden kann, ohne zu brechen.

Die Ausrollgrenze eines Bodens ist ein wichtiger Wert, weil sie den Wassergehalt repräsentiert, bei dem die Partikel übereinandergeschoben werden können und aufgrund ihrer Kohäsion zusammenhalten. Es ist der Punkt, an dem die Verdichtung von Böden mit hohem Tongehalt am günstigsten ist. Die Festigkeit des Bodens nimmt mit der Zunahme des Wassergehaltes oberhalb der Ausrollgrenze schnell ab.

PLASTIZITÄTSZAHL (I_p)



Plastizitätszahl (I_p)

Es handelt sich hierbei um die numerische Differenz zwischen der Fließ- und Ausrollgrenze eines Bodens. Böden, die einen hohen I_p -Wert aufweisen, sind gut verdichtbar und besitzen eine hohe Kohäsion. Ein Boden, dessen Wassergehalt an der Fließgrenze liegt, hat nur eine geringe oder gar keine Haftfestigkeit, weist jedoch eine beträchtliche Kohäsion auf, wenn er die Ausrollgrenze erreicht. Mit Hilfe der Plastizitätszahl können somit die Verdichtbarkeit und Kohäsion eines Bodens abgeschätzt werden.

Schrumpfgrenze (W_s)

Wird der Boden unter die Ausrollgrenze getrocknet, schrumpft er und wird spröde. Der Wassergehalt, bei dem sich das Volumen der Probe nicht mehr ändert, repräsentiert die Schrumpfgrenze. Bei diesem Wassergehalt sind viele nichtplastische (sandige) Böden zu verdichten. Böden, die genug Ton enthalten, um die Plastizitätszahl zu erhöhen, sind am besten zwischen Schrumpf- und Ausrollgrenze verdichtbar.

Der I_p -Wert gibt auch Aufschluß über die Durchlässigkeit. Je höher der I_p -Wert ist, desto geringer ist die Durchlässigkeit. Bei vielen Bauvorhaben, die mit Böden mit hohem Tongehalt ausgeführt werden, müssen gemäß den Anforderungen Materialien mit einer gewissen Kornabstufung sowie einer maximalen Fließgrenze und Plastizitätszahl eingesetzt werden.



Kapitel 2

BODENARTEN UND KLASSIFIZIERUNG

Laborversuche sind zur Klassifizierung der Böden am besten geeignet. Sind diese nicht möglich, kann man einen oder mehrere Feldversuche durchführen, um die Böden identifizieren und die geeignete Verdichtungsmethode bestimmen zu können.



[SYSTEME ZUR BODENKLASSIFIZIERUNG]

Weltweit werden heute mehrere Bodenklassifizierungssysteme eingesetzt. Alle nutzen die Begriffe Kies, Sand, Schluff und Ton, wobei jedoch geringfügige Unterschiede bei

der Numerierung und Bezeichnung bestehen. Die Bodenklassifizierungen sind Standards, anhand derer Böden und deren mechanische Eigenschaften identifiziert werden können.

AASHTO-Bodenklassifizierung – Das breit genutzte Bodenklassifizierungssystem der American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) basiert auf Baustellenergebnissen für den Autobahnbau.

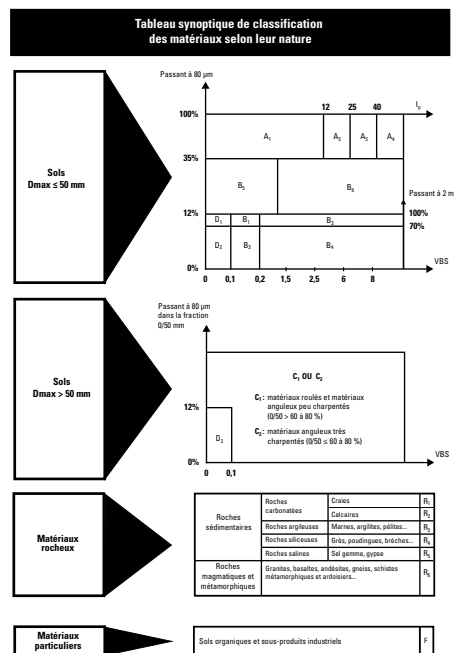
Das System gliedert die Materialien in sieben Hauptgruppen mit einigen Untergruppen. Die Gruppen sind wiederum in zwei Hauptkategorien geteilt: körnige und schluffig-tonige Baustoffe.

AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups)										
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)						Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Group Classification	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7		A-7-5	A-7-6
Sieve Analysis Percent Passing:										
# 10	0-50	0-50	51-100	0-35	0-35	0-35	0-35	38-100	38-100	38-100
# 40	0-30	0-25	0-10							
# 200	0-15	0-5								
Characteristics of Fraction Passing #40:										
Liquid Limit			N.P.	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40
Plasticity Index	0-6			0-10	11+	0-10	11+	0-10	11+	0-10
Group Index	0	0	0	0	0	0-4	0-8	0-12	0-16	0-20
Usual Types of Significant Constituent Materials	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand			Silty Soils		Clayey Soils	
General Rating as Subgrade	Excellent to Good						Fair to Poor			

Für Diagramme in voller Größe wird auf den Anhang verwiesen.

Französisches System der Bodenklassifizierung –

Basierend auf der Untersuchung der Eigenschaften einschließlich Korngrößenverteilung, Plastizität und Sandäquivalenz werden die Materialien in Klassen und Unterklassen eingeordnet.



Deutsches System der Bodenklassifizierung –
 Gemäß DIN 18196 werden alle Bodenmaterialien für den Erd- und Grundbau entsprechend der Korngröße nach DIN 4022, den Masseverhältnissen, der Plastizität und des Gehalts an organischen Komponenten Gruppen zugeordnet. Im allgemeinen werden grobkörnige und feinkörnige Partikel unterschiedlich beurteilt: bei grobkörnigen Partikeln wird die Korngrößenverteilung und bei feinkörnigen die Plastizität als Kriterium eingesetzt.

Hauptgruppe	Korngrößenbereich < 63 µm	Korngrößenbereich > 2 mm	Gruppe (allgemein)	Gruppe (detailliert)	Kürzel und Gruppenbezeichnung
Grobkörniger Boden	> 63	< 40	Kies	Leichteste Kies	KL
				Wichtigste Kies-Sand-Gemische	GW
				Trichterwert gemischte Kies-Sand-Gemische	GU
Gemmteckörniger Boden	5 bis 40	< 40	Sand	Früherste Sande	FE
				Wichtigste Sand-Kies-Gemische	SW
				Trichterwert gemischte Sand-Kies-Gemische	ST
				5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm	SU*
			Kies-Schluff	5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	ST*
				15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm	ST*
				5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	SU*
				15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm	SU*
				5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm	ST
Feinkörniger Boden	< 40	–	Schluff	Leichte plastische Schluffe W _p < 25	UL
				Mittelschwere Schluffe W _p < 25 bis 50	ULM
				Leichte plastische Tone W _p < 25	TL
			Ton	Mittelschwere Tone W _p < 25 bis 50	TM
				Ausgesüßte plastische Tone W _p < 25	TA
				Drümpfene Schluffe W _p < 25 bis 50	DU
Organischer Boden	< 40	–	Nackte braun- und schwarze	Organische Tone W _p < 50	OT
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit humanen Beimengungen	OH
Organischer Boden	> 40	–	Braun- und schwarze	Grob bis gemischtkörnige Böden mit kaligen, kieseligen Beimengungen	OK
				Mit bis mäßig aersierte Torfe	OH
Organischer Boden	–	–	Braun- und schwarze	Zwischere Torfe	HZ
				Torfe (Fruchtbaum)	T
Auflage	–	–	–	Auflage aus Fremdstoffen	A

* Eine Auflage ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schichtung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Unified Soil Classification System – Das einheitliche „Bodenklassifizierungssystem“ (USCS) ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Einstufung von Böden für Bauvorhaben. Das U.S. Army Corps of Engineers und das U.S. Bureau of Reclamation haben das System entwickelt, dessen beschreibendes Merkmal die Bodenstruktur ist.

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM			
SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE	
Boulders	None	Greater than 12"	
Cobbles	None	75 mm (S") to 12"	
1- Coarse Grained Soils:			
Gravel	G	75 mm (S") to #4 Sieve (4.25 mm)	
Course Gravel		75 mm to 19 mm	
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm	
Sand	S	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)	
Course Sand			
Medium Sand			
Fine Sand			
2- Fine Grained Soils:			
Fines		Less than #200 Sieve	
Silt	M	Use Atterberg Limits	
Clay	C	Use Atterberg Limits	
3- Organic Soils			
	O	Use Atterberg Limits	
4- Peat			
	Pt	Visual Identification	
Gradation Symbols			
Well-graded	W	Liquid Limit Symbols	
Poorly-graded	P	High LL	H
		Low LL	L

Britisches System der Bodenklassifizierung –
 Die Britische Norm (BS) dient der Identifizierung der Bodenzusammensetzung. Basierend auf der Korngröße erfolgt eine erste Einordnung in grob- oder feinkörnige Böden. In der Folge werden grobkörnige Böden aufgrund ihrer Korngrößenverteilung weiter unterteilt, während die feinkörnigen Böden nach ihrer Plastizität in Untergruppen gegliedert werden.

SOIL GROUPS		SUB-GROUPS and in laboratory classification				
GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate		GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.05 mm	LIQUID LIMIT	
GRAVEL more than 75% of the material is finer than 4.75 mm	GRAVELS Non-plastic (or slightly plastic) materials of gravel size (more than 75%)	Slightly silty or clayey GRAVEL	G	GW	0 to 5	
		Silty GRAVEL	G-F	GPM	5 to 15	
		Clayey GRAVEL	G-C	GPC	15 to 35	
		Very silty GRAVEL	GF	GML		
		Very clayey GRAVEL	GC	GCL, GCI, GCM, GCV, GCS, GSC		
		Slightly silty or clayey SAND	S	SW	0 to 5	
	SANDS Non-plastic (or slightly plastic) materials of sand size (more than 75%)	Silty SAND	S-F	SMP	5 to 15	
		Clayey SAND	S-C	SPC	15 to 35	
		Very silty SAND	SF	SML		
		Very clayey SAND	SC	SCL, SCL, SCH, SSC, SCS		
		FINE GRAINED SILTS and CLAYS more than 75% of the material is finer than 0.075 mm	Gravelly SILT	MG	MCL, etc.	< 35
			Gravelly CLAY	CG	CL, CH, CHC, CVC, CSC	35 to 70
Sandy SILT	MS		MCL, etc.	70 to 90		
Sandy CLAY	CS		CL, etc.	> 90		
SILT (M SOIL)	M		ML, etc.	< 35		
CLAY (M SOIL)	C		CL, CI, CH, CI, CE	35 to 70		
ORGANIC SOILS	Description letter 'O' suffixed to any group or sub-group symbol			Organic matter in significant amount e.g. OMG - organic silts of high LL		
	PEAT	Pt		Pt - consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)		

Primary Letter
 G = Gravel
 S = Sand
 M = Silt
 C = Clay
 O = Organic Soil
 Pt = Peat

Secondary Letter
 W = Well graded
 P = Poorly graded
 M = With non-plastic fines
 C = With plastic fines
 L = Of low plasticity (LL < 50)
 H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v.1.00 Sept 2010

[KLASSIFIZIERUNG DES BODENS IM FELD]

Klassifizierungssysteme erfordern Laboruntersuchungen, wie die Siebanalyse oder Versuche zur Bestimmung des Plastizitätsindex. Stehen keine vollständigen Laboreinrichtungen zur Verfügung, kann mit Hilfe einfacher

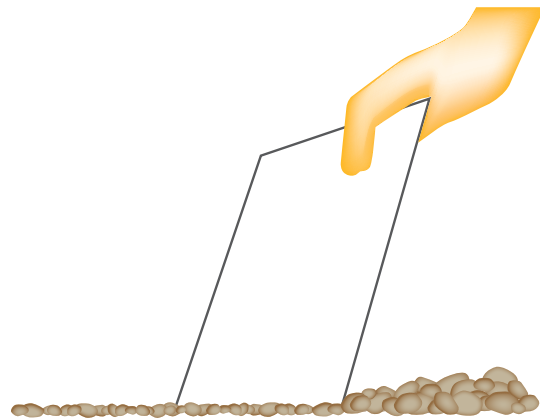
Feldversuche eine Einordnung der verschiedenen Böden vorgenommen werden. Anhand dieser Versuche können Kornabstufung, Plastizität und Korngrößenverteilung eingeschätzt werden.

Kornabstufung/Korngrößenverteilung – Um die Kornabstufung eines trockenen Bodens ermitteln zu können, wird eine Bodenprobe auf einer ebenen Fläche ausgebreitet. Mit Hilfe eines Streifens festem Papiers oder einer Pappe werden die größeren Bodenteilchen auf eine Seite sortiert. Der Anteil der Körner mit einer Größe über 5 mm und die Feianteile (die einzelnen Körner sind mit bloßem Auge nicht zu erkennen) werden abgeschätzt. Nun wird visuell geprüft, ob die separierten großen Bodenpartikel von einheitlicher Größe sind oder sich aus großen, mittleren und kleineren Partikeln zusammensetzen, also schlecht- oder weit gestuft sind.

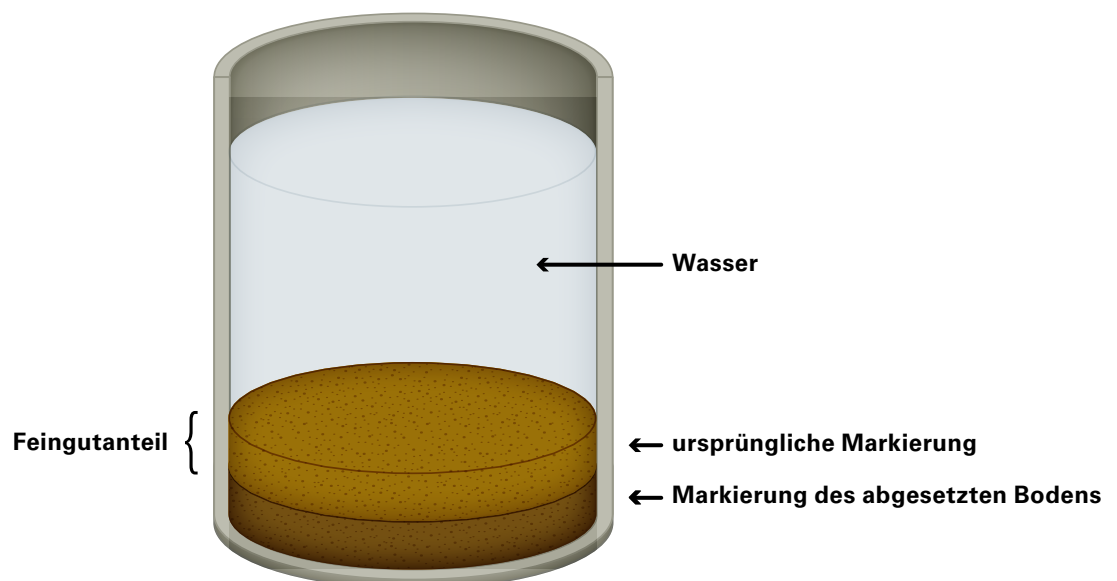
Ist der Boden feucht, löst man mit einem Stift einen Klumpen heraus und nimmt die Abschätzung wie an einem trockenen Boden vor. Um die Feianteile bestimmen zu können, wird ein durchsichtiges Glas 3 mm hoch mit Wasser gefüllt. Anschließend ist so viel Boden hinzuzufügen, daß das Glas zu einem Viertel voll ist. Danach wird weiter Wasser aufgefüllt, bis das Bodenmaterial knapp bedeckt ist.

Der Füllstand wird mit einem Klebeband markiert. Nun wird das Glas zu drei Vierteln mit Wasser aufgefüllt, das Gemisch kräftig durchgeschüttelt und das Glas abgestellt. Nach etwa eineinhalb Minuten wird die Höhe des sich abgesetzten Bodenmaterials markiert. Der Unterschied zwischen den zwei Markierungen entspricht dem Anteil an Feingut.

FELDTEST ZUR UNTERSUCHUNG DER KORNBABSTUFUNG

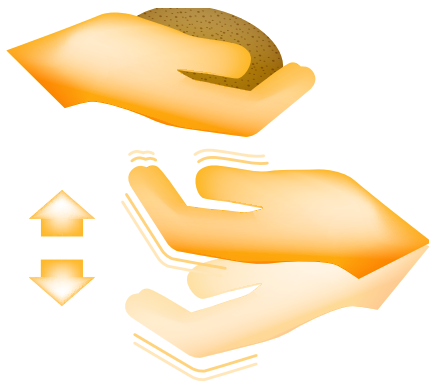


BESTIMMUNG DER FEINANTEILE



Bestimmung der Plastizität feinkörniger Böden im Feld – Um die Plastizität eines Bodens abzuschätzen, können ein oder mehrere Feldversuche durchgeführt werden.

SCHÜTTELVERSUCH

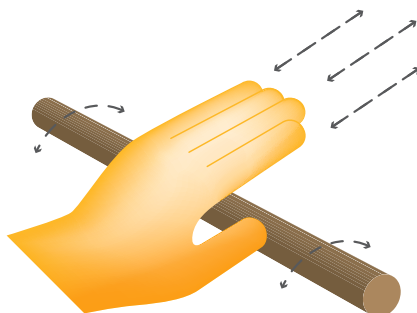


- **Schüttelversuch** – Einen Klumpen feinkörnigen Bodens nehmen, zusammenkneten und dabei möglichst viele große Teilchen aussortieren. Langsam Wasser hinzufügen und das Material so lange durchkneten, bis es klebrig wird. Den Bodenklumpen auf einer Handfläche halten und mit den Fingern der anderen Hand an den Handrücken klopfen.

Wird die Oberfläche des Klumpens glänzend und naß, handelt es sich zumeist um feinen Sand oder Schluff. Tone reagieren nur geringfügig oder gar nicht auf diesen Versuch.

- **Ausrolltest** – Man knetet etwa die Hälfte der Bodenprobe so lange durch, bis der Klumpen trocken ist. Dann versucht man, die Bodenprobe zu einem Strang auszurollen. Ist das nicht möglich, handelt es sich bei diesem Boden definitiv um Schluff oder feinen Sand. Hochplastische Böden benötigen zum Trocknen eine lange Zeit. Sie werden hart und wachsartig: Es ist ein ziemlich hoher Druck erforderlich, um ein Röllchen zu formen, das erst bei einem Durchmesser von 3 mm bricht.

AUSROLLTEST



- **Trockenfestigkeitsversuch** – Die andere Hälfte der Bodenprobe wird zu einer Kugel geformt, die man an der Luft trocknen läßt. Anschließend wird diese zerkleinert und ein zerklüftetes Bruchstück ausgewählt. Nun wird versucht, das Bruchstück zwischen Daumen und Zeigefinger weiter zu zerkleinern. Schluff zerfällt bei geringem Kraftaufwand zu Staub. Ton verhält sich wie Gestein, und es ist so gut wie unmöglich, ihn mit den Fingern zu zerdrücken.

- **Hände waschen** – Nach der Handhabung von Schluff und Sand fühlen sich die Finger staubig an und werden durch bloßes Aneinanderreiben ziemlich sauber. Mit langsam fließendem Leitungswasser läßt sich der Boden abwaschen. Bei Ton bildet sich eine Kruste auf den Fingern, die im trockenen Zustand nicht abgerubbelt und auch nicht mit Wasser abgespült werden kann. Zum Reinigen der Hände müssen diese unter fließendem Wasser aneinandergerieben werden.

HANDVERSUCH



- **Handversuch** – Man nimmt eine Handvoll Boden, drückt ihn zusammen und öffnet dann die Hand. Ist das Material pulvrig und behält seine Form nicht bei, ist es zu trocken. Zerbricht es beim Herunterfallen, ist es zu trocken. Ist die Bodenprobe formbar und zerbricht beim Herunterfallen in nur wenige Stücke, hat sie die richtige Menge an Feuchtigkeit für eine ordnungsgemäße Verdichtung. Fühlt sich der Boden in der Hand plastisch an, hinterläßt Feuchtigkeitsspuren an den Fingern und bleibt beim Herunterfallen in einem Stück erhalten, enthält er zu viel Wasser, um ihn verdichten zu können.

BODENARTEN

- **Absetzversuch** – Zusätzlich zu den oben beschriebenen Feldversuchen kann ein Absetzversuch durchgeführt werden, um sowohl den Anteil der Korngrößen ermitteln als auch einschätzen zu können, wie schwierig es sein wird, den betreffenden Boden zu verdichten. Alles, was man benötigt, ist ein durchsichtiges Glas, Wasser und eine repräsentative Bodenprobe.

Das Glas wird zu einem Viertel bis zu einem Drittel mit Material gefüllt. Anschließend wird Wasser bis 15 mm unterhalb vom Rand zugegeben. Das Gemisch gut umrühren und beobachten, wie sich die Bodenprobe absetzt.

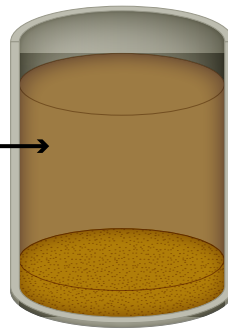
Durch den Absetzvorgang bilden sich drei Schichten aus. Am Boden befindet sich der Sand, dann folgen Schluff und schließlich Ton.

Abgesehen davon, daß die verschiedenen Anteile deutlich hervortreten, zeigt das Ergebnis, ob der Boden gut oder schlecht gestuft ist. Obwohl Schluff- und Tonpartikel mit bloßem Auge nicht zu sehen sind, können Änderungen in der Kornabstufung durch Farbunterschiede ausgemacht werden. Je länger außerdem eine Schicht braucht, um sich abzusetzen, desto feiner sind deren Bestandteile.

Der Absetzversuch gibt Aufschluß über mehrere Dinge. Es werden die Grundbestandteile des Bodens sowie deren Abstufung deutlich. Aus der Absetzdauer kann man auf die Feinheit der Partikel schließen. In den meisten Fällen weisen eine kleine und eine einzige Korngröße (schlecht abgestuft) auf ein weniger stabiles Baumaterial hin, das schwierig zu verdichten ist, da sich die Körner unter der Bandage fortlaufend verlagern.

ABSETZVERSUCH

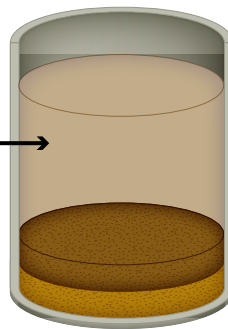
das Wasser kann eine hellbraune, graue oder schwarze Farbe annehmen



setzt sich innerhalb von 1 ½ Minuten ab

← Sand

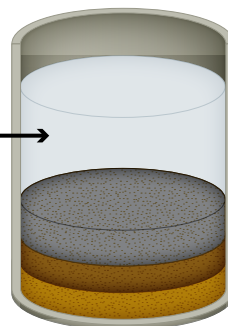
je nach Partikelgröße ist das Wasser beige bis dunkelbraun



setzt sich innerhalb von 10 bis 40 Minuten ab

← Schluff
← Sand

das Wasser ist weiß bis beige, grau, blau oder bläulich grün gefärbt



setzt sich innerhalb von 4 Stunden oder gar nicht ab

← Ton
← Schluff
← Sand

[**ZUSAMMENFASSUNG DER FELDVERSUCHE**]

Bodenarten	Beschreibung
Tone	keine Reaktion beim Schüttelversuch; schmieriges Röllchen, das langsam trocknet; trockene Kruste, die sich schwer von den Händen entfernen lässt
Schluffe	schnelle Reaktion beim Schüttelversuch; schwaches oder krümeliges Röllchen; pulverige Rückstände, die leicht von den Händen abgewischt oder abgewaschen werden können
Schluff- und Ton-Gemische	dazwischenliegende oder widersprüchliche Reaktionen beim Handversuch
toniger Sand oder Kies	genug Tongehalt, um die Hände beim Kneten der Probe zu verschmutzen, aber nicht genug, um einen Klumpen zu formen
schluffiger Sand oder Kies	alle Gemische mit staubigen oder ziemlich sandigen Feinanteilen
reine Sande und Kiese	hinzugefügtes Wasser sinkt ohne Schlamm-Bildung sofort ab
geschossenes oder gebrochenes Gestein	zerklüftetes Material, das keine ausreichende Menge an kleineren Partikeln enthält, um die Zwischenräume zu füllen





Kapitel 3

PHYSIK DER VERDICHTUNG

Das Verständnis der physikalischen Zusammenhänge bei der Verdichtung der unterschiedlichen Bodenarten, deren Verdichtungsfähigkeit sowie der Wirkungsweise der verschiedenen Maschinen ist der Schlüssel, um die Verdichtungsanforderungen so kostengünstig wie möglich zu erreichen.



[**FAKTOREN, DIE DIE VIBRATIONSVERDICHTUNG BEEINFLUSSEN**]

Die Verdichtung des Bodens mit Hilfe der Vibration ist ein komplexer Prozeß. Zahlreiche unterschiedliche Faktoren, die im Gesamtzusammenhang gesehen werden müssen, beeinflussen die Gesamtverdichtungsarbeit. Die Interaktionen zwischen Verdichtungsgerät und Boden bestimmen den Grad der Verdichtungsarbeit. Die Projektspezifikationen legen fest, ob die Verdichtungsarbeit angemessen ist. Die Faktoren oder Eigenschaften, die die Vibrationsverdichtung

beeinflussen, können grundsätzlich unterteilt werden in:

- material- und baustellenspezifische,
- projektspezifische und
- maschinenspezifische Eigenschaften.

Material- und baustellenspezifische Eigenschaften

- **Bodenart** – Jede Bodenart weist spezifische Verdichtungseigenschaften auf. Böden, die sich schwerer verdichten lassen, benötigen schwerere Verdichtungsgeräte.
- **Kornabstufung** – Die Kornabstufung eines Materials wird durch die Korngrößenverteilung dargestellt. Idealerweise sind relativ gleiche Mengen aller Korngrößen vorhanden, wobei keine Größe dominiert.
- **Gleichförmigkeit** – Ein Bodenmaterial setzt sich in der Regel aus zahlreichen Bodenarten und Korngrößen zusammen. Unter Gleichförmigkeit kann man sich den Grad der Verteilung der einzelnen Anteile des Bodens vorstellen. Der Verdichtungszustand eines gleichförmigen Bodengemisches ist instabil.

Die Ungleichförmigkeitszahl (C_u) ist in der Bodenmechanik ein Kennwert zur Beschreibung der Kornverteilung (Sieblinie) eines Bodens. Gemäß DIN EN ISO 14688-2:2004 ist C_u das Verhältnis des Korndurchmessers d_{60} beim Siebdurchgang von 60 % zum Partikeldurchmesser d_{10} bei 10 % Siebdurchgang. Dieses Verhältnis repräsentiert somit die Steigung der Sieblinie innerhalb eines festgelegten Bereiches: zwischen 10 % und 60 % der Siebdurchgänge.

BERECHNUNG DER UNGLEICHFÖRMIGKEITSAHL

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Anhand des C_u -Werts können folgende Aussagen über den Boden getroffen werden:

- $C_u < 5$ = gleichförmiger Boden**
- $C_u 5 - 15$ = ungleichförmiger Boden**
- $C_u > 15$ = sehr ungleichförmiger Boden**



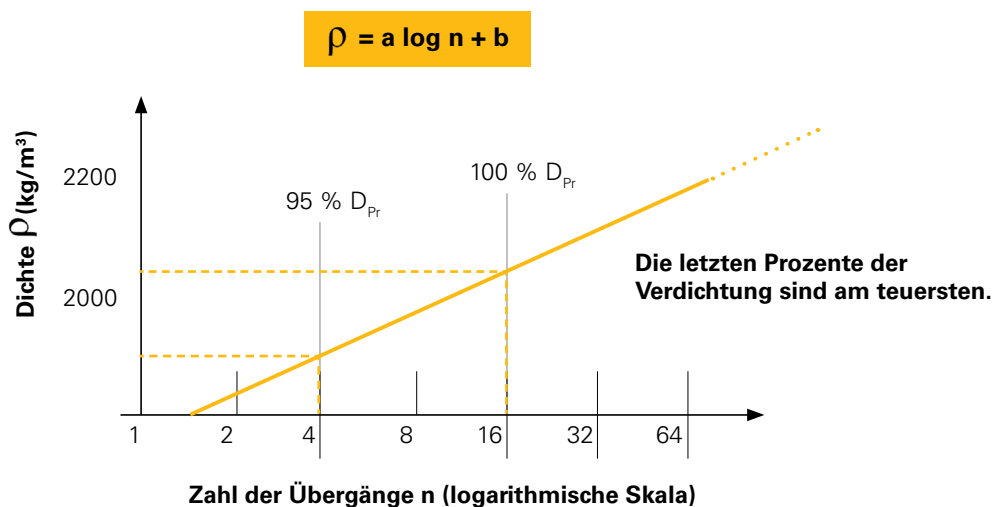
- **Bodenstruktur** – Die sich auf die Verdichtungseigenschaften des Materials auswirkende räumliche Anordnung der Bodenbestandteile ist bei den einzelnen Bodenarten unterschiedlich. Bodenarten mit grobkörniger Struktur erzeugen hohe Reibungen zwischen den Partikeln und erfordern mehr Verdichtungsenergie, um deren Verbindungen zu lösen und die Neuordnung in einem dichteren Zustand zu ermöglichen. Partikel mit einer glatten Oberflächenstruktur lassen sich leichter übereinanderverschieben und erfordern einen geringeren Verdichtungsaufwand.
- **Kornform** – Wie die Struktur, kann sich auch die Form der Partikel auf die Verdichtung eines Bodens auswirken. Gezackte Formen führen tendenziell zu höheren Reibungsverbindungen, die auch eine höhere Verdichtungsarbeit erfordern. Glatte, runde Formen verschieben sich leichter und benötigen einen geringeren Verdichtungsaufwand.
- **Anfangsdichte** – Die Anfangsdichte beeinflusst die Produktivität, denn für deutlich niedrigere

Raumdichten ist eine größere Anzahl an Walzübergängen erforderlich, um die Soll-dichte zu erreichen.

- **Wassergehalt** – Der Wassergehalt ist der für die Bodenverdichtung wichtigste Faktor. Bei einem zu geringen Wassergehalt haften die Partikel nicht aneinander, während sie sich bei einem zu hohen Wassergehalt leicht gegeneinander verschieben können. Jede Bodenart hat einen für die Verdichtung optimal geeigneten Wassergehalt, der mit dem Proctorversuch ermittelt wird.
- **Festigkeit des Gesteins** – Jede Bodenart besitzt unterschiedliche Druckfestigkeiten, je nach Anteil und Eigenschaften der Gesteinskörnung.
- **Unterlage und deren Tragfähigkeit** – Ein Bauwerk ist genau so stabil und belastbar wie das Fundament, das es trägt. Mangelt es der Unterlage einer Straße an Tragfähigkeit, wird es schwierig sein, die darauf aufbauenden Schichten zu verdichten. Ungeeignete Böden können durch chemische oder mechanische Stabilisierung verbessert werden.

KOSTEN DER VERDICHTUNG

Mit der Anzahl der Übergänge nimmt die Dichte zu.



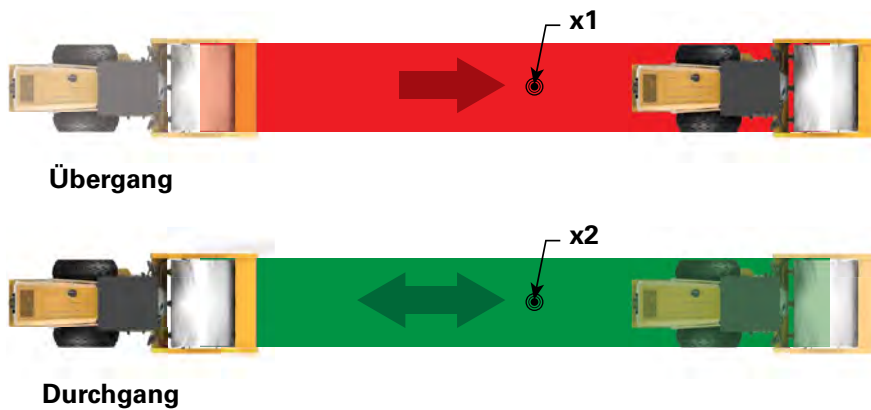
Projektspezifische Eigenschaften

- **Sollverdichtung** – Basierend auf dem einfachen oder modifizierten Proctorversuch wird dieser Wert als Anteil an der aus dem Laborversuch resultierenden maximalen Trockendichte angegeben (im Beispiel 95 % der einfachen Proctordichte D_{Pr}). Je höher die Sollverdichtung ist, desto mehr Übergänge sind in der Regel erforderlich.

Es ist am schwierigsten, den Endwert der Sollverdichtung zu erreichen.

- **Einbau-/Schüttlagendicke** – Beim Einsatz eines Verdichtungsgerätes einer bestimmten Größe beeinflusst die Schüttlagendicke die Produktionsleistung. Eine dicke Schicht erfordert mehr Übergänge als eine dünne Schicht.

ANZAHL DER ÜBERGÄNGE



- **Anzahl der Übergänge** – Bezieht sich darauf, wie oft eine Walze über eine Bodenfläche fährt. Caterpillar bezeichnet als Übergang eine einzelne Fahrt über eine Fläche entweder in Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung. Ein Durchgang besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Überfahrten, normalerweise eine in Vorwärts- und eine in Rückwärtsrichtung.

Die Kenntnis der Anzahl der Übergänge ist insbesondere bei einer Fläche von Bedeutung, die die Verdichtungsanforderungen nicht erfüllt. Erfolgt auf einer Baustelle dieselbe

Überdeckung (Anzahl an Übergängen) und ein Flächenelement erweist sich als nicht ordnungsgemäß verdichtet, kann unter Berücksichtigung der Anzahl der Übergänge die Ursache eingegrenzt werden.

Sind verfahrenstechnische Anforderungen vorgegeben (eine angemessen dimensionierte Walze auf einer Schüttung mit einer speziellen Zusammensetzung und Dicke), ist die Anzahl der Übergänge festgelegt. In diesen Fällen wird erfahrungsgemäß davon ausgegangen, daß eine gewisse Anzahl an Übergängen zum Erreichen der Sollverdichtung genügt.

Maschinenspezifische Eigenschaften

Die Auslegung der Maschine ist von großer Bedeutung für die Verdichtungsdynamik. Zu den beeinflussenden Faktoren gehören: Größe, Gewicht, Radstand, Verhältnis der Achslasten und Gewichtssymmetrie in Fahrtrichtung. Außerdem sind der Durchmesser, die Länge und die Masse der Bandage, die Härte der Schwingmetalle, die Exzentermasse sowie der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Exzentergewichtes und der Bandagenachse relevant. Sogar das Kraftstoffgewicht und das Gewicht des Fahrers beeinflussen die Leistung des Verdichtungsgerätes. Bei der Konstruktion werden all diese Faktoren sorgfältig berücksichtigt.

Bei der Vibrationsverdichtung wird eine Bandage eingesetzt (statisches Gewicht), die sich auf einem nicht homogenen Material sehr schnell (Frequenz) nach oben und unten (Amplitude) und nach vorn



(Arbeitsgeschwindigkeit) bewegt. Frequenz, Amplitude und Arbeitsgeschwindigkeit sind die vom Fahrer auszuwählenden Parameter. Hierzu mehr im weiteren Verlauf von Kapitel 3.

All diese Einflußfaktoren verdeutlichen, daß es nicht immer einfach ist, ein Verdichtungsgerät für eine bestimmte Aufgabe auszuwählen, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Ziel der Vibrationsverdichtung ist es, einen Arbeitspunkt zu finden, an dem die maximale Kraft auf das zu verdichtende Material übertragen wird.

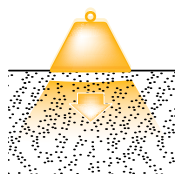
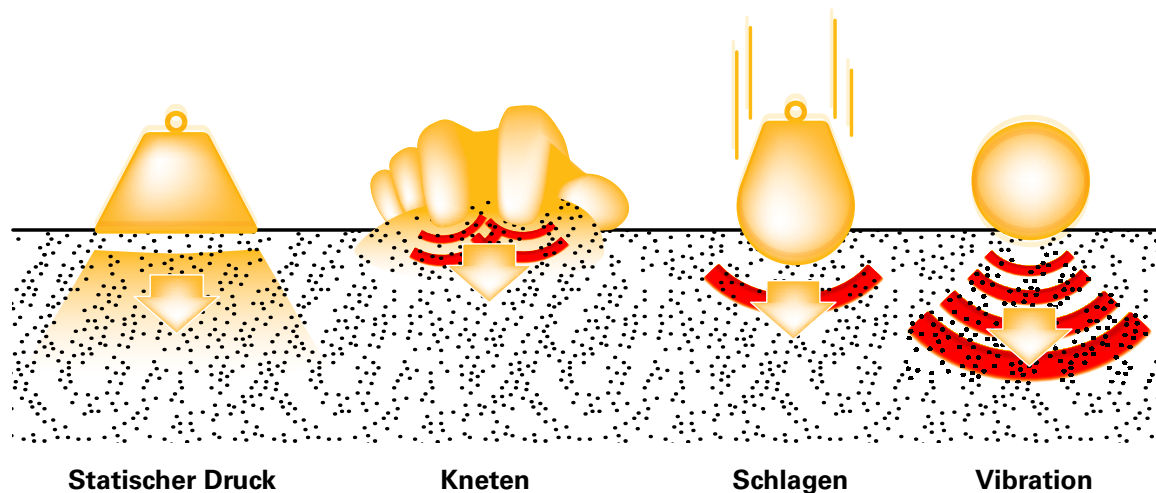
Das ist gegeben, wenn sich die Summe aller Faktoren – Materialeigenschaften, Leistungsmerkmale der Maschine, Amplitude, Frequenz und Fahrgeschwindigkeit – optimal zur projektspezifischen Verdichtungsanforderung verhält.

[**FAKTOREN, DIE DIE VIBRATIONSVERDICHTUNG BEEINFLUSSEN**]

Bei der Vibrationsverdichtung handelt es sich um ein Verfahren, bei dem ein Material mit einem bestimmten Ausgangsvolumen auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt wird. Das wird dadurch erreicht, indem auf eine Kontaktfläche zwischen dem Boden und beispielsweise einer Walzenbandage Kräfte und Bewegungen einwirken, die die natürlichen Verbindungen der Partikel lösen, damit sich diese einander annähern können. Die Hohlräume

oder Poren zwischen den Partikeln, die mit Luft, Wasser oder mit beidem gefüllt sind, werden durch die Kombination von Kraft und Bewegung verringert. Bei der Verdichtung kommen vier Kräfte zum Einsatz:

1. **Statischer Druck,**
2. **Kneten,**
3. **Schlagen und**
4. **Vibration.**



Statischer Druck – Bei der statischen Verdichtung erzeugt der durch das Gewicht des Verdichtungsgerätes verursachte Druck Scherbeanspruchungen im Boden, die dazu führen, daß die einzelnen Partikel aneinander vorbeigeschoben werden. Durch die einwirkenden

Kräfte können die einzelnen Partikel ihre natürlichen Verbindungen untereinander lösen und ordnen sich in einer stabileren Position neu an. Diese Verdichtungskraft wirkt oberflächennah, in größeren Tiefen hat sie nur eine minimale Wirkung.

Mit Hilfe der statischen Linienlast lässt sich die Verdichtungskraft von Walzenzügen mit Glattmantelbandagen vergleichen. Die vertikale Kraft direkt unter der Bandage erzeugt über ihre gesamte Breite die für die Verdichtung erforderlichen Scherspannungen. Die statische Linienlast ergibt sich aus dem Quotienten von Bandagenlast (Achslast) und Bandagenbreite und wird in kg/cm angegeben. Verdichtungsgeräte mit einer höheren statischen Linienlast besitzen ein größeres Verdichtungspotential und damit eine größere Tiefenwirkung.

STATISCHE LINIENLAST

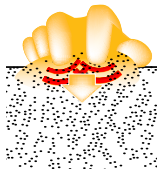


Statische Linienlast	
Vibrationswalzenzüge	
5 – 8 t	16 – 22 kg/cm
8 – 12 t	20 – 30 kg/cm
12 – 15 t	30 – 45 kg/cm
> 15 t	> 45 kg/cm+
Gummiradwalzenzüge	1000 – 3200 kg/Rad

Bei Walzenzügen mit Stampf-, Schaffuß- und Gürtelradbandagen variiert der Spitzendruck kontinuierlich, da sich die Zahl und die Fläche der Spitzen, die den Boden berühren, ändern. Die Eindringtiefe kann ebenfalls die Berechnung beeinflussen. Der Druck der Fußflächen wird in kg/cm² angegeben.

Die statische Verdichtung wird bei Anwendungen eingesetzt, bei denen eine erschütterungsfreie Bearbeitung des Bodens erforderlich ist, entweder aufgrund nahestehender Gebäude, empfindlicher Materialien oder wenn die zu überbauenden Flächen eine geringe Tragfähigkeit aufweisen. Sie kommt ebenfalls zur Anwendung, wenn eine zu hohe Verdichtungsarbeit freies Wasser an die Oberfläche befördern könnte (Pumpeffekt).





Kneten – eine verdichtende Kraft, die die Partikel in einem geringeren Volumen anordnet. Dieses Verfahren ist im oberflächennahen Bereich einer Schüttung besonders wirksam. Das Kneten in Längs- und Querrichtung ist notwendig

bei der Verdichtung von stark geschichteten Materialien, wie Tonböden. Verdichtungsgeräte mit Schaffußbandagen und Gummiradwalzen mit versetzt angeordneten Rädern sind so konzipiert, daß diese Verdichtungskraft in den Boden eingeleitet werden kann.



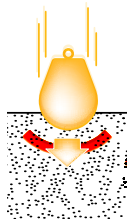
Die durch die Gummiradwalzen erzeugten Kneteffekte basieren auf zwei Faktoren: dem Kontaktdruck und der Radlast. Die Variation der beiden Größen beeinflusst die Leistung des Verdichtungsgerätes.

Mit Hilfe der knetenden Verdichtung kann eine gut versiegelte Oberfläche geschaffen werden, wodurch die Schicht beständiger gegen Wasser- und Witterungseinflüsse wird.

KONTAKTDRUCKFORMEL

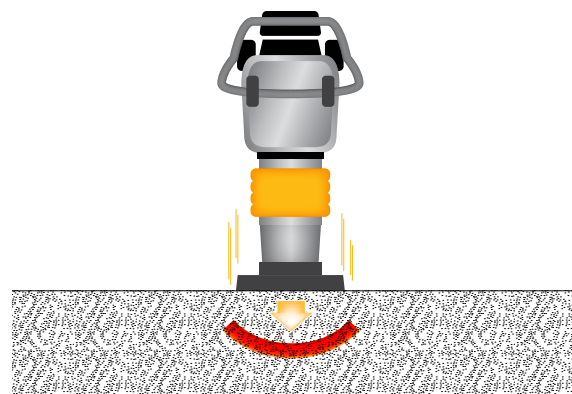
$$\text{KONTAKTDRUCK} \quad \text{kg/cm}^2: \text{bar} = \frac{\text{Radlast (kg)}}{\text{Reifenkontaktfläche (cm}^2\text{)}}$$

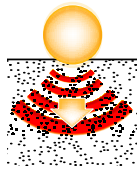
$$\text{RADLAST} \quad \text{kg} = \frac{\text{Betriebsgewicht des Verdichtungsgeräts}}{\text{Anzahl der Räder}}$$



Schlagen – Das Schlagen erzeugt eine größere Verdichtungskraft als die reine Schwerkraft. Das ist darauf zurückzuführen, daß eine sich in Bewegung befindende Masse eine kinetische Energie besitzt, die beim Aufprall an den Boden abgegeben wird. Das Schlagen erzeugt eine

Druckwelle, die von der Oberfläche in den Boden dringt. In der Regel wird eine Schlagfolge eingesetzt. Schlagfolgen von 50 bis 600 Schlägen pro Minute gelten als niederfrequent und finden bei Schlaghämmern und Handstampfern Anwendung. Hochfrequente Schlagfolgen von 1400 bis 3000 Schlägen pro Minute werden bei Vibrationswalzen eingesetzt.





Vibration – Die Vibration ist die Verdichtungsmethode, die am komplexesten und kosteneffizientesten ist. Über 90 % der heute verkauften Verdichtungsgeräte sind Vibrationswalzen, weil deren

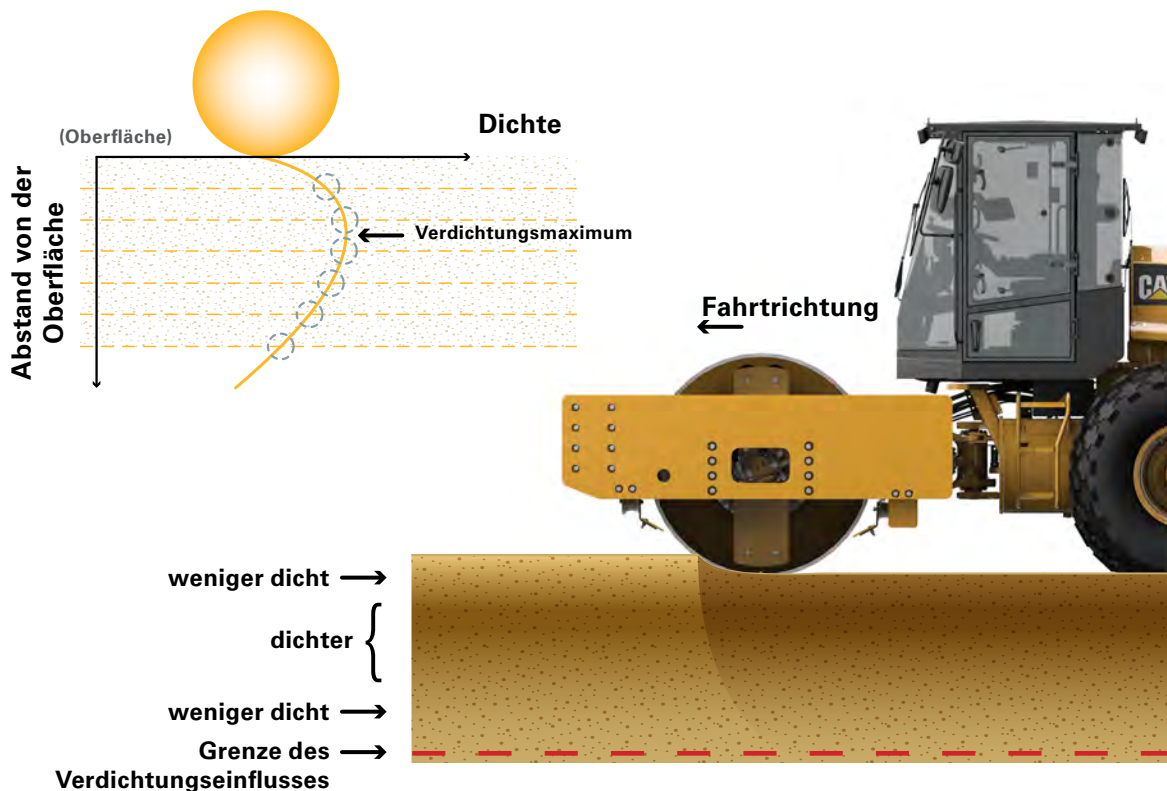
Verdichtungsleistungen denen von statischen Verdichtungsgeräten mit der dreifachen Masse entsprechen. Eine Vibrationswalze arbeitet deutlich wirtschaftlicher als ein statisch wirkendes Verdichtungsgerät vergleichbarer Größe.

Um zu verstehen, wie eine Vibrationswalze arbeitet, muß man sich mit der Dynamik der Vibrationsverdichtung befassen. Zu den Einflußgrößen zählen die Amplitude und die Frequenz sowie die statische Linienlast und das Verhältnis zwischen vibrierender und nicht vibrierender Masse. Vibrationswalzen erzeugen eine schnelle Abfolge von Druckwellen, die sich in alle Richtungen ausbreiten und die Scherfestigkeit zwischen den Partikeln des zum Schwingen angeregten Materials überwinden. Die Partikel ordnen sich um und nehmen einen dichteren Zustand (weniger Poren) ein.

Dem Funktionsprinzip eines Verdichtungsgerätes folgend, wird die zu bearbeitende Schicht nicht von oben bis unten gleichmäßig verdichtet. Ein Verdichtungsgerät mit einer bestimmten Masse verdichtet einen Boden bis zu einer bestimmten Tiefe; der Verdichtungsgrad variiert dabei von der Oberfläche bis zur maximalen Einflußtiefe. Im allgemeinen ist der oberflächennahe Bereich weniger fest, der mittlere Abschnitt wird am stärksten verdichtet, während der Bereich der maximalen Einflußtiefe wieder weniger verfestigt wird.

Die Änderung der Betriebsparameter kann die Wirtkiefte des Verdichtungsgerätes beeinflussen und die Lage der Zone mit der maximalen Verdichtung verändern, wobei jedoch die Tatsache, daß die Bodenverdichtung von oben nach unten variabel ist, bestehen bleibt. Dieses Phänomen wird als „Verdichtungsverlauf“ bezeichnet und muß bei der Auswahl eines Verdichtungsgerätes bzw. der Einstellung seiner Betriebsparameter beachtet werden, damit die geforderten Verdichtungswerte sicher erreicht werden können.

VERDICHTUNGSVERLAUF



Beim Einsatz eines Walzenzuges sollte der oberflächennahe Bereich logischerweise am dichtesten sein. Das Dichtemaximum tritt jedoch unter der Oberfläche auf und nimmt zu tiefer liegenden Bereichen hin ab. Dies bezeichnet man als Verdichtungsverlauf.

[DYNAMIK DER VIBRATIONSVERDICHTUNG]

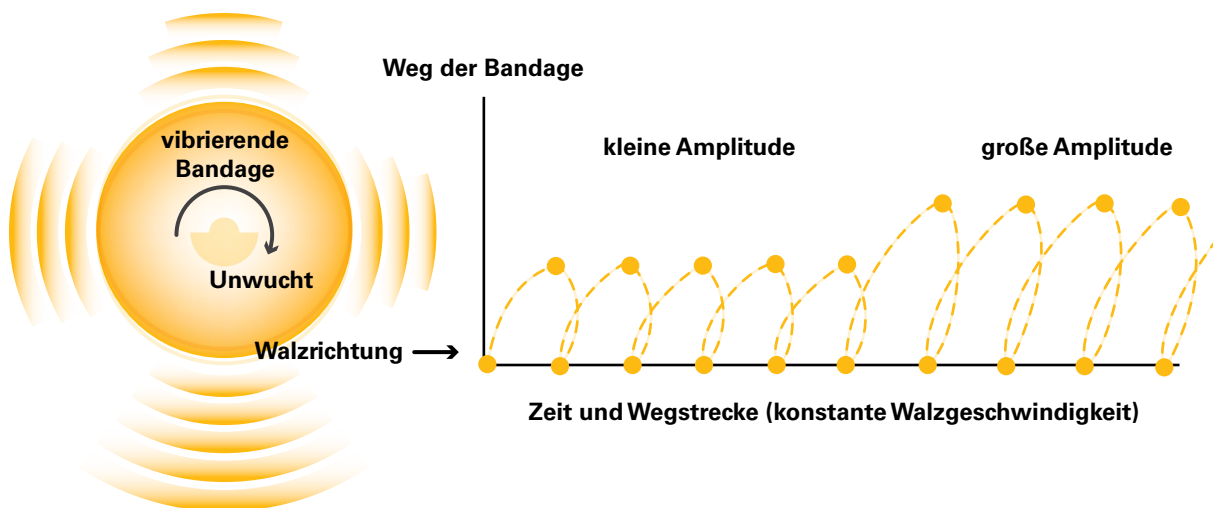
Amplitude – Die Amplitude ist das Maß der vertikalen Bewegung einer Vibrationsbandage aus der Ruhe- bis zu deren Höchstposition (halber Schwingweg). Hersteller werben für diesen Kennwert, der an einer angehobenen Bandage gemessen wird. Die tatsächliche Betriebsamplitude ist jedoch das Produkt aus dem Nennwert der Amplitude und einem Koeffizienten, der sich aus dem Verhältnis zwischen der übertragenen Frequenz zur Resonanzfrequenz (Maschine und Boden) ergibt. Am besten stellt man sich die Amplitude als den Weg der Bandage in den Boden bei dessen Verschiebung und Verdichtung vor.

Mit der Möglichkeit, die Amplitude zu verstellen, können die Kraft und die Bewegung (Beschleunigung) der Bandage auf den Boden geändert werden.

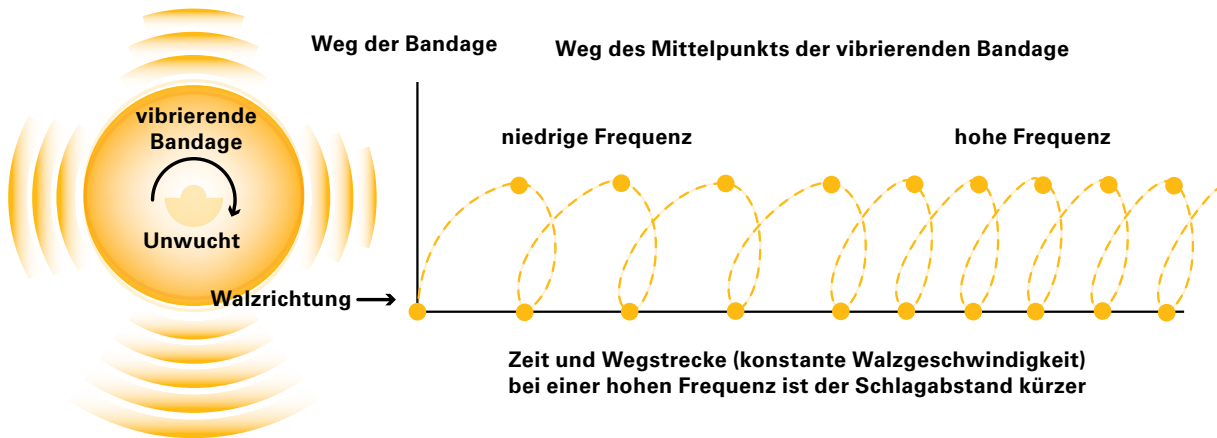
Mit der Annäherung des Bodens an seine maximale Dichte gelangt man an einen Punkt, an dem die von der Vibrationsbandage erzeugte Verdichtungsenergie nicht mehr aufgenommen werden kann. In diesem Zustand kann die Bandage von der Oberfläche abheben. Im Extremfall kann ein kontaktloser Vibrationsdurchgang zwischen Bandage und Boden stattfinden. Diese als „Abheben“ und „Sprungbetrieb“ bezeichneten Betriebszustände werden von einer untypisch kräftigen Vibration der ganzen Maschine begleitet. Das Abheben kann die Maschine beschädigen und zu unerwünschten Ergebnissen am zu verdichtenden Boden führen, z. B. zu einer Auflockerung.

Um das Abheben zu unterbinden, muß der Bediener die Verdichtungsenergie der Bandage verringern, indem er einfach die Amplitude reduziert. Alternativ kann der Bediener im statischen Modus arbeiten.

AMPLITUDE



FREQUENZ



Frequenz und Geschwindigkeit – Die Frequenz bezeichnet die Anzahl der Umdrehungen der Exzentergewichte um ihre Rotationsachsen in einem bestimmten Zeitraum und wird in Hz oder 1/min angegeben. Normalerweise wird je nach Bodenart und Amplitudeneinstellungen mit Frequenzen zwischen 23 und 35 Hz gearbeitet.

Das Verhältnis zwischen Frequenz und Betriebsgeschwindigkeit wird zuweilen nach einer Faustregel so eingestellt, daß etwa alle 25 bis 30 mm jeweils ein Schlag erfolgt.

Eine zu hohe Walzgeschwindigkeit kann eine „Wallbildung“ hervorrufen (der Abstand der Schläge ist zu hoch), wogegen sich eine zu geringe Betriebsgeschwindigkeit negativ auf die Produktionsleistung auswirkt. Für jede Verdichtungsaufgabe gibt es optimale Werte für Geschwindigkeit und Frequenz. Entscheidend ist das Erzielen einer gleichmäßigen Verdichtung. Hilfreich ist der Einsatz einer automatischen Regelung, um ein konstantes Verhältnis zwischen Walzgeschwindigkeit und Frequenz gewährleisten zu können.

Verhältnis zwischen vibrierender und nicht vibrierender Masse – Man könnte meinen, daß die Verdichtungsleistung einer Vibrationswalze einfach durch die Erhöhung der Masse und der Amplitude gesteigert werden kann. Dies trifft jedoch nur bedingt zu.

Bei einer Vibrationswalze ist die vibrierende Masse (Bandage) von der nicht vibrierenden Masse (Rahmen) getrennt. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Massen ist ausschlaggebend für die Ermittlung der wirksamen Masse und Amplitude, mit der die Walze arbeitet. Ein ausgewogenes Verhältnis ist wichtig, damit die Maschine die optimale Energie an den Boden abgeben kann.



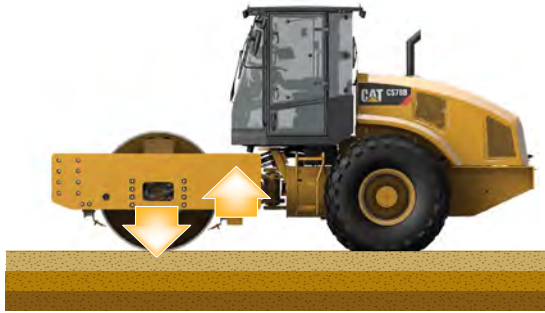
Gesamtbetriebsmasse



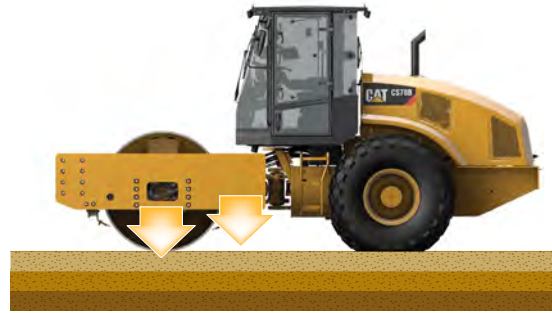
angehobene (nicht vibrierende) Masse



vibrierende Masse



Gegen die Verdichtungsarbeit wirkende Resonanz



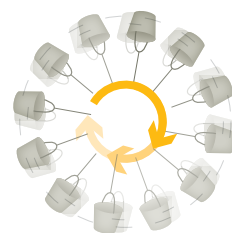
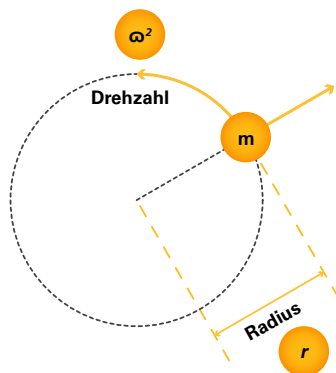
Resonanz durch Konvergenz der Harmonischen

Resonanz – Entspricht die Frequenz der eingeleiteten Vibration der natürlichen Frequenz des Bodens, schwingt dieser mit. Bei der Vibrationsverdichtung ist die Resonanz sehr wichtig.

Die Wechselwirkung zwischen dem zu verdichtenden Material und der Vibrationswalze führt dazu, daß beide vibrieren. Die in der Bandage rotierenden Exzentergewichte regen das Material

zum Schwingen an. Der Schwingzustand, der die Resonanz hervorruft, hängt nicht nur von den Maschineneigenschaften, sondern auch von den Eigenschaften des zu verdichtenden Bodens und seinem sich fortlaufend verändernden Verdichtungsgrad ab. Die optimale Frequenz für die effizienteste Übertragung der Verdichtungsenergie liegt um ca. 15 % über der Resonanzfrequenz.

FLIEHKRAFT



Fliehkraft $F_z = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot r \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2$

Zur Berechnung der Fliehkraft (F_z) wird die Masse (m) der Unwucht mit ihrem Abstand (r) von der Mittellinie der rotierenden Welle und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ($\omega = 2 \pi f$) multipliziert. Der wichtigste Faktor in dieser Gleichung ist die Frequenz (f).

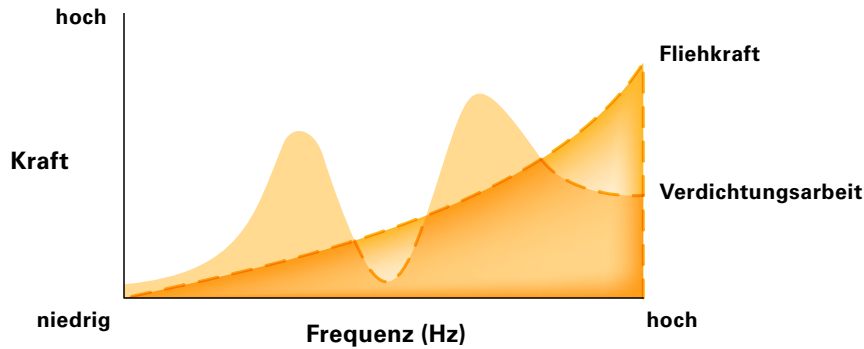
Fliehkraft – Vibrationswalzen erzeugen eine Fliehkraft mit Hilfe der in der Bandage rotierenden Exzentergewichte. Die Fliehkraft entspricht der Kraft, die man spürt, wenn man z. B. einen mit Wasser gefüllten Eimer schwenkt. Die Masse dieser Gewichte, deren Abstand vom Rotationsmittelpunkt und die Frequenz erzeugen diese Kraft. Die theoretisch berechnete Fliehkraft

wird häufig eingesetzt, um die Produktionsleistung von Vibrationswalzen zu kalkulieren. Es ist jedoch keine präzise Methode, um die tatsächliche Leistungsfähigkeit beurteilen zu können. Der wirksame Energieeintrag hängt von einer kompletten Wechselwirkung zwischen dem zu verdichtenden Material und der Maschine ab.

KRAFT UND FREQUENZ

Das Diagramm zeigt, wie die theoretisch berechnete Fliehkraft mit zunehmender Frequenz steigt. Die tatsächlich auf den Boden übertragene Verdichtungsleistung variiert jedoch mit steigender Frequenz und zeigt mehrere „Höhen“ und „Tiefen“.

Man erkennt ein erstes Maximum der Verdichtungsleistung, das schnell abfällt, gefolgt von einem zweiten, größeren Extremwert, der die maximale Maschinenleistung repräsentiert.



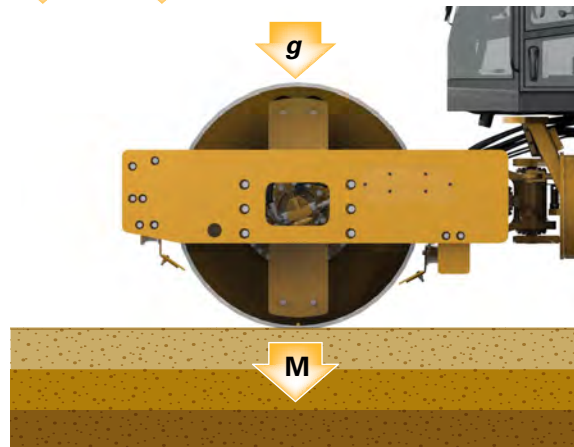
GESAMTKRAFT (F_{TA})

$$F_{TA} = F_C + F_S$$

Mit der Fliehkraft $F_C = 11000 \left(\frac{M}{1000} \right) \left(\frac{r}{1000} \right) \left(\frac{N}{1000} \right)^2$

und der statischen Auflast durch die Bandage $F_S = M \times g$

- M** Masse des Exzentergewichtes (kg)
- r** Abstand der Unwucht zum Rotationsmittelpunkt (m)
- N** Drehzahl (U/min)
- M** statische Auflast (kg)
- g** Erdbeschleunigung (m/s²)



Gesamtkraft – Alle einwirkenden Kräfte haben ihren Anteil an der Verdichtungsenergie, die ein Verdichtungsgerät auf den Boden übertragen kann. Zur Berechnung dieses Wertes wird die

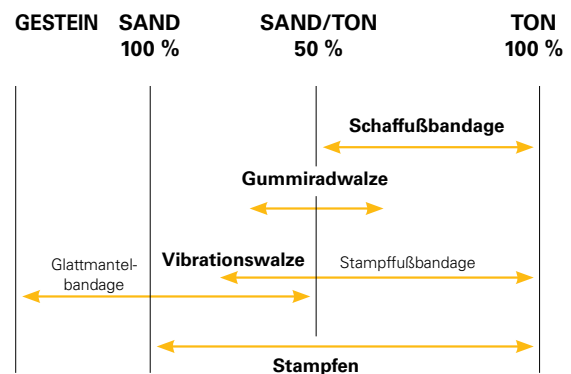
Bandagen-Achslast des Walzenzuges zur Fliehkraft addiert. Wie bei der Fliehkraft, gestattet auch diese Berechnung nur einen groben Vergleich der Verdichtungsgeräte.

[**BODENVERDICHTUNGSGERÄTE**]

Zahlreiche Faktoren beeinflussen die Wahl eines Verdichtungsgerätes. Welche Geräte für ein Vorhaben eingesetzt werden, hängt von den Erfahrungen des Unternehmens, der Bodenart, den verfahrenstechnischen Anforderungen oder auch davon ab, welche Maschinen verfügbar sind. Ebenso ist zu berücksichtigen, wie gut ein Gerät auch für die Erdbewegungs- und -verteilungsarbeiten geeignet ist. Klimatische Bedingungen und Traktionszustände sind ebenfalls bedeutsam. Zudem spielt auch das Interesse des Unternehmens, seinen Maschinenpark zu standardisieren, eine Rolle bei der Entscheidungsfindung.

Das Einsatzdiagramm gibt Hinweise, welcher Gerätetyp sich für welche Aufgaben und Bodenarten eignet. Es gibt kein universelles Verdichtungsgerät, das alle Aufgaben unter allen Einsatzbedingungen erfüllen kann. Jeder Gerätetyp hat spezifische Eigenschaften, die für einen wirtschaftlichen Einsatz zu beachten sind. Häufig müssen Maschinen unterschiedlicher Typen und Größen kombiniert werden, um die Sollverdichtung zu erreichen. Die Auswahl der am besten geeigneten Maschine gewährleistet die effizienteste Realisierung der Arbeiten, da weniger Übergänge, Kraftstoff und Arbeitszeit erforderlich sind.

EINSATZDIAGRAMM



Vibrationswalzen – Vibrationswalzen arbeiten nach dem Prinzip der Partikelumordnung, um Hohlräume zu reduzieren und die Dichte sowie die Tragfähigkeit zu steigern. Verfügbar sind zwei Ausführungen: mit Glattmantel- und mit Stampffußbandage. Um die Vielseitigkeit zu erhöhen, können Walzen mit Glattmangelbandage optional mit Stampffuß-Halbschalen ausgerüstet werden, was deren Nutzung für Stampffußanwendungen erweitert, auch wenn die Leistung gegenüber reinen Stampffußwalzen etwas geringer ausfällt.

Walzen mit Glattmantelbandagen erzeugen drei zusammenwirkende Verdichtungskräfte: statischen Druck, Schlag und Vibration. Verdichtungsgeräte mit Stampffußbandagen erzeugen dieselben Kräfte und generieren zudem einen Kneteffekt. Vibrationswalzen sorgen für eine gleichmäßige Verdichtung der Schüttung.

Die Verdichtungsleistung ist abhängig von der Frequenz, der Amplitude und dem Abstand der Schläge in Walzrichtung.





Ovale StampffüÙe sind eine gute Wahl bei bindigen Böden und dickeren Schichten.

Das Verhältnis Frequenz/Zeit wirkt sich auf die Walzgeschwindigkeit aus, weil damit die Dauer der Krafteinwirkung beeinflusst wird. Erfahrungsgemäß werden beim Einsatz von Vibrationswalzen mit Arbeitsgeschwindigkeiten von 1 bis 2,5 km/h bei Gestein und Ton und 2 bis 5 km/h bei Kies und Sand die besten Ergebnisse erzielt.

Vibrationswalzen mit Glattmantelbandagen waren die ersten dynamisch wirkenden Verdichtungsgeräte, die zur Anwendung kamen. Am wirkungsvollsten werden diese Maschinen bei körnigem Material mit Korngrößen von großen Steinen bis zum Feinsand eingesetzt. Weiterhin finden sie Verwendung bei der Verdichtung gemischtkörniger Böden mit einem maximalen Anteil von 50 % an bindigem Material. Die Schichtdicke variiert je nach Größe des Verdichtungsgerätes. Enthält das einzubauende Material große Steine, können die Schüttungen sehr dick sein (Schüttungen mit einer Dicke bis zu 1,20 m sind keine Seltenheit). Dabei ist zu beachten, daß die Schichtdicke die maximale Steingröße um ca. 300 mm überschreiten sollte, um zu vermeiden, daß große Steine aus der Oberfläche herausragen.

Walzenzüge mit Stampffußbandagen erweitern das Anwendungsspektrum auf Böden mit mehr als 50 % Anteil an bindigem Material sowie mit einem größeren Anteil an Feingut. Wenn ein Stampffuß in die Oberfläche der Schüttung eindringt, werden die bei bindigen Böden vorhandenen Partikelbindungen gelöst, was den Verdichtungsprozess begünstigt. Die Arbeitsfläche der StampffüÙe ist evolventenförmig ausgebildet, um beim Austritt aus dem Material dieses nicht aufzulockern. Ihre keilförmigen Flanken gewährleisten, daß die

Caterpillar bietet optional auch einen Stampffußschalensatz für Glattmantelbandagen an. Dank der zweiteiligen Schalen kann der mit einer Glattmantelbandage ausgerüstete Walzenzug wie eine herkömmliche Stampffußwalze eingesetzt werden. Verfügbar sind Schalensätze für beide Stampffußarten.



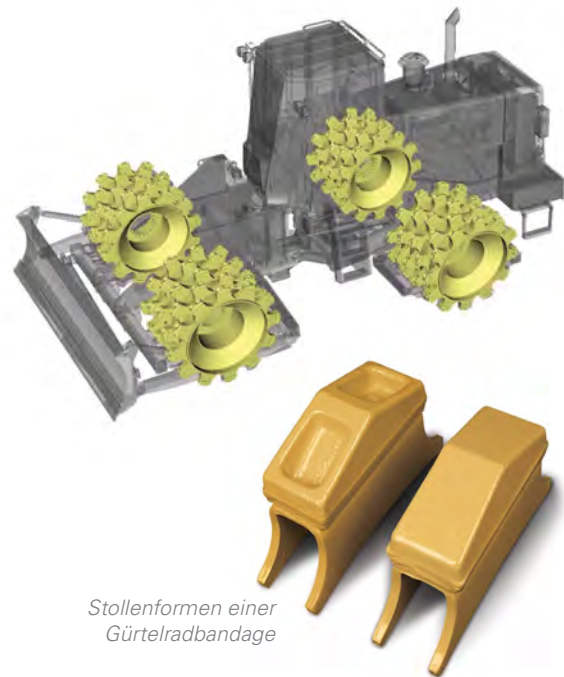
Quadratische StampffüÙe eignen sich am besten für halbbindige Böden und dünnere Lagen.

Bandage bei der Verdichtung des Bodens sauber bleibt (Wassergehalt beachten). Die typische Einbaudicke für Stampffußwalzen liegt bei bindigen Böden zwischen 150 und 460 mm.

Caterpillar bietet zwei Stampffuß-Ausführungen an: quadratische und ovale. Quadratisch ausgebildete StampffüÙe arbeiten wirkungsvoll auf gemischtkörnigen Böden und bei Schüttdicken von weniger als 150 mm. Sie eignen sich zudem sehr gut für die Versiegelung der Oberfläche.

Ovale StampffüÙe besitzen eine geringere Fläche als die quadratischen und erzeugen somit einen größeren Auflagedruck. Dadurch kann der Stampffuß tiefer in die Schüttung eindringen. Ovale StampffüÙe sind wirkungsvoller auf bindigen Böden und bei Schüttungen mit einer Dicke von 150 bis 460 mm, versiegeln aber die Oberfläche weniger gut.





Stollenformen einer Gürtelradbandage

Walzen mit Gürtelradbandagen – Kompaktoren (Walzen mit Gürtelradbandagen) sind schnelle, selbstfahrende, nicht vibrierende Verdichtungsgeräte. In der Regel besitzen sie vier mit Stollen besetzte Räder und sind mit einer Räum- und Schaufel ausgestattet. Die beiden viereckigen Flächen der Stollen sind keilförmig zueinander angeordnet.

Diese Walzen verdichten das aufgeschüttete Material von unten nach oben. Durch ihre Keilform können die Stollen aus der Schüttung austreten, ohne den Boden aufzuwühlen. Daher wird auch die Oberseite der Schüttung verdichtet, und die Oberfläche ist relativ glatt und versiegelt. Walzen mit Gürtelradbandagen erreichen Geschwindigkeiten bis zu 32 km/h. Üblicherweise liegt die Arbeitsgeschwindigkeit zwischen 10 und 15 km/h.

In der Regel werden die Verdichtungsanforderungen mit 2 bis 3 Durchgängen (4 bis 6 Übergängen) in Schüttungen mit Dicken zwischen 200 und 300 mm erreicht, auch wenn bei schlecht abgestuftem, schluffigem Sand oder sehr feinkörnigem Ton 4 Durchgänge erforderlich sein können. Walzen mit Gürtelradbandagen sind mit Ausnahme von

Walzen mit Schafffußbandagen – Die Bezeichnung „Schafffußbandage“ hat ihren Ursprung darin, daß die alten Römer beim Straßenbau Schaffherden so lange über den Boden trieben, bis dieser verdichtet war. Mit dem Begriff „Schafffuß“ werden allgemein alle mit Stollen besetzten Bandagen bezeichnet. In der Praxis besteht allerdings ein großer Unterschied zwischen Schafffuß-, Stampffuß- und Gürtelradbandagen.

einförmigem Sand für alle Böden geeignet.

Wie bereits erwähnt, hinterlassen diese Verdichtungsgeräte eine relativ glatte, versiegelte Oberfläche, so daß beim Verteilen des Materials für die darauffolgende Schicht eine angemessen hohe Geschwindigkeit erreicht werden kann. Da mit Räum- und Schaufel ausgestattete Walzen mit Gürtelradbandagen sowohl verteilen als auch verdichten können, ist es möglich, die Anzahl der Raupen oder Grader für die erforderlichen Erdbewegungen zu reduzieren.

Kompaktoren eignen sich hervorragend für große Bauprojekte. Sie benötigen lange, ununterbrochene Übergänge, um die Geschwindigkeit zu erreichen, die eine hohe Produktionsleistung gewährleistet. Im Vergleich zu Walzenzügen kann bei Schüttlagendicken über 300 mm die Leistung auf etwa das 2- bis 3fache gesteigert werden. Die Entscheidung, welches Gerät besser geeignet ist, kann nur unter Berücksichtigung der verfahrenstechnischen Anforderungen, der Baustellengröße und der verfügbaren finanziellen Mittel getroffen werden.

Ein Schafffußstollen hat einen Durchmesser von 76 bis 127 mm und ist in der Regel 200 mm lang. Die Stollen an Gürtelrad- oder Stampffußbandagen sind keilförmig ausgebildet und besitzen eine ovale oder viereckige Form. Die Stollenspitze ist zudem schmaler als der Stollenfuß – ein wichtiger Unterschied.



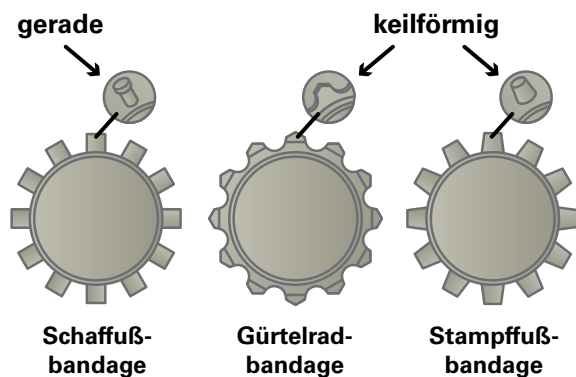
Eine Walze mit Schafffußbandage verdichtet von unten nach oben. Die Stollen dringen durch den oberen Bereich der Schüttung und verdichten in der Tiefe. Beim Austritt der Stollen aus dem Boden nehmen diese Material mit und werfen es aus. Das Ergebnis ist eine lockere Materialschicht im oberen Bereich der Schüttung. Wird mehr Schüttmaterial aufgebracht, wird die obere Schüttung stärker aufgewühlt.

Dieser sich ständig wiederholende Vorgang ist mit einem Vorteil verbunden: nasse Tone und Schluffe können belüftet und getrocknet werden.

Walzen mit Schafffußbandagen weisen jedoch zahlreiche Nachteile auf. Die lockere Zone der Schüttung kann bei Regen wie ein Schwamm wirken und den Verdichtungsprozeß verlangsamen. Generell verteuert das aufgelockerte Material den Verteilungsvorgang durch die Erdbewegungsmaschinen, weil der Zeitaufwand dafür steigt.

Die Geräte können zudem nur bei Geschwindigkeiten von 6 bis 10 km/h arbeiten, was alle Vorteile des Schlagens und der Vibration aufhebt. Druck und Kneten sind die einzigen verdichtenden Kräfte, die auf den Boden einwirken. In der Regel sind 6 bis 10 Durchgänge (12 bis 20 Übergänge) erforderlich, um bei einer 200 mm dicken Schüttung die Solldichte zu erreichen. Die Anwendung von Walzen mit Schafffußbandagen ist rückläufig.

STOLLENAUSFÜHRUNGEN



Gummiradwalzen – Gummiradwalzen kommen für Verdichtungsaufgaben auf kleinen bis mittelgroßen Bauabschnitten zum Einsatz, hauptsächlich bei plattigem, körnigem Material. Oft werden sie im Anschluß an die Vibrationsverdichtung verwendet, um den oberen Bereich der Schüttung endzuverdichten. Gummiradwalzen eignen sich optimal zum Versiegeln von Oberflächen, für die Verdichtung dünner Lagen sowie für spezielle Anwendungen.

Die wirksamen Kräfte (Druck und Kneten), die die Gummiräder erzeugen, wirken von oben nach unten. Der Verdichtungseffekt kann durch die Änderung des Reifendrucks (normale Methode) oder der Ballastierung (weniger häufig) variiert werden. Der Kneteffekt, den die spurversetzten Reifen erzeugen, trägt dazu bei, die Oberfläche zu versiegeln und zu glätten.

Gummiradwalzen können auf Böden und Asphalt eingesetzt werden. Dies ist vorteilhaft für Straßenbauunternehmen, da diese Walzen für mehrere Aufgaben genutzt werden können.



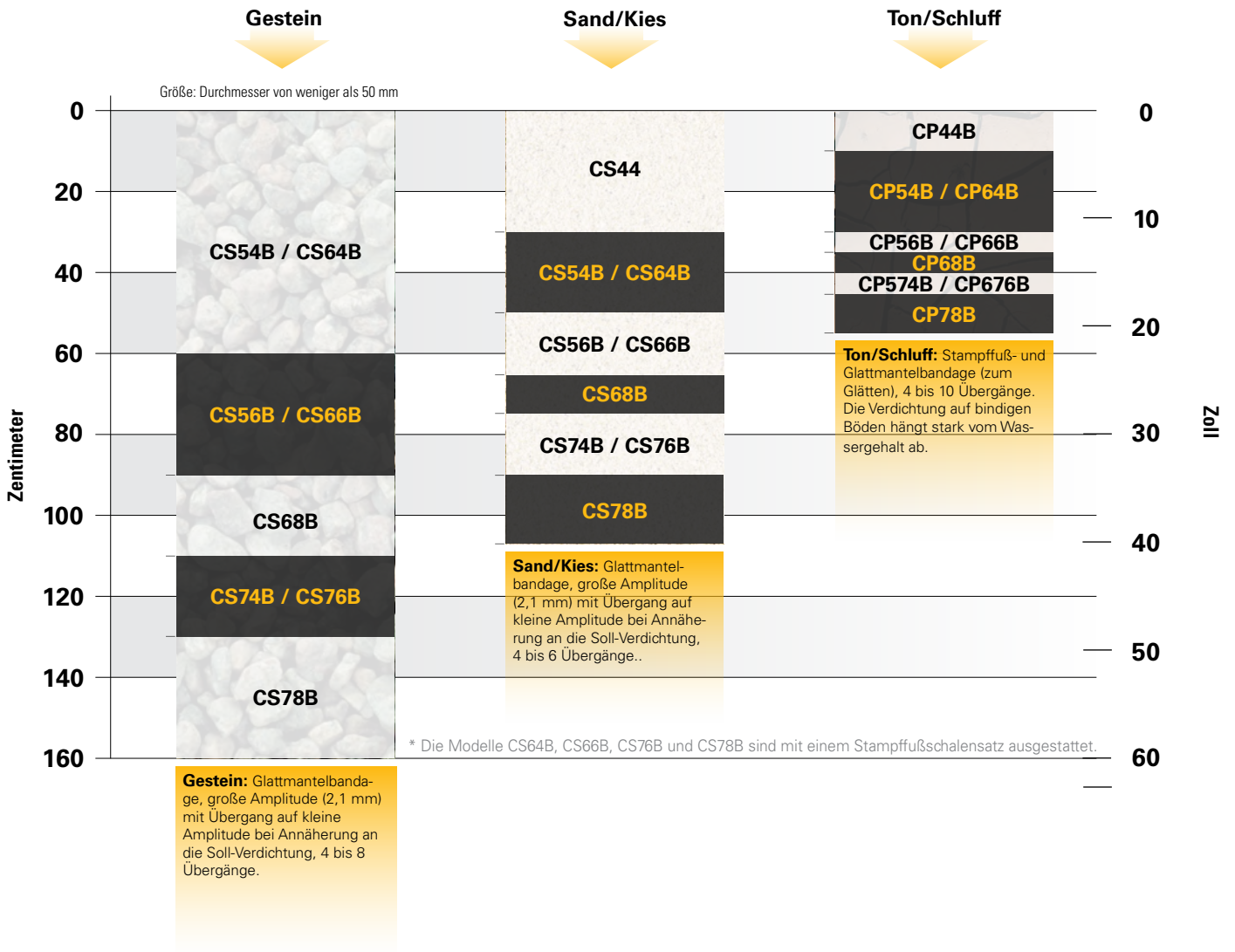


Heckseitige Vibrationsplatten – Zur Verdichtung nichtbindiger Materialien können Vibrationswalzen mit heckseitigen Vibrationsplatten ausgestattet werden. Damit ist es dem Bediener möglich, den Verdichtungsverlauf zu beeinflussen: Die vibrierende Bandage sorgt für die Verdichtung in der Tiefe, während im Vorwärtsbetrieb des Walzenzuges die Vibrationsplatten zeitgleich im oberflächennahen Bereich verdichten und die Oberfläche schließen.

Werden die Vibrationsplatten anwendungsbedingt nicht benötigt, sollten sie von der Maschine abgenommen werden, denn ihr Gewicht vermindert die Linienlast der Bandage. Das kann dazu führen, daß zusätzliche Übergänge erforderlich sind, um die Sollverdichtung zu erreichen.

VERDICHTUNGSTIEFE

Die angegebenen Schichtdicken basieren auf einer Dichte von 95 % der einfachen Proctordichte und können aufgrund unterschiedlicher Bodenbedingungen variieren.



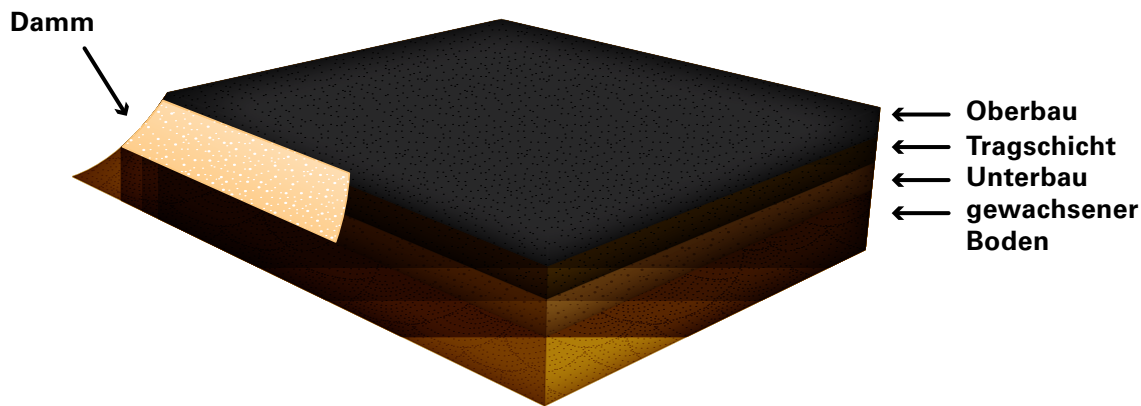


Kapitel 4

ANWENDUNGSTECHNIK UND QUALITÄTSKONTROLLE

Die Projektparameter beeinflussen die Schütthöhe der Böden und deren Verdichtung erheblich. Mit dem Wissen, wie sich die besten Ergebnisse unter den verschiedensten Bedingungen erzielen lassen, kann die Effizienz gesteigert und die Gefahr von Nachbesserungen vermieden werden. Bewährte und neue Meßtechniken unterstützen Sie, damit die gestellten Verdichtungsaufgaben optimal gelöst werden können.





[AUFBAU EINER STRASSE]

Wie jedes Bauwerk, besteht auch eine Straße aus unterschiedlichen Schichten, die spezifische Aufgaben zu erfüllen haben. Die entsprechenden Fachbegriffe können regional unterschiedlich sein. Die einzelnen Schichten wirken zusammen, um die Verkehrslasten tragen zu können, für die sie konzipiert wurden.

Natürliche oder gewachsene Böden – Die ohne menschliches Eingreifen oder chemische Veränderungen auf natürliche Weise entstandenen Böden werden häufig als „Planum“ oder „Unterboden“ bezeichnet und bilden das Fundament der Straße. Zunächst wird der Boden abgetragen, um eine nivellierte, ebene Fläche zu erhalten. Die freigelegten Materialien sind die gewachsenen Böden. Reichen deren Eigenschaften nicht aus, um die Last des Straßenkörpers zu tragen, müssen sie verbessert oder durch geeignete Materialien ersetzt werden. Die Bodenverbesserung kann mechanisch erfolgen, was die Verdichtung, die Verfestigung mit Geogittern oder das Einbringen von Zusatzstoffen beinhaltet, oder chemisch, beispielsweise unter Zugabe von Bindemitteln, wie Portlandzement. Auch eine Kombination beider Techniken ist möglich: immer mit dem Ziel, die Tragfähigkeit des Bodens zu verbessern. Letztendlich muß dieses „Fundament“ eine angemessene Stütze für das darauf lagernde Bauwerk darstellen.

Damm – Als Damm gelten alle Schüttungen, deren Oberseite höher liegt als die angrenzende Oberfläche. Der Unterbau wird entsprechend der Gradienten und der Querneigung in einer gewissen Breite angelegt. In manchen Fällen kann es aufgrund natürlicher Geländeunebenheiten erforderlich sein, geeignetes Baumaterial zu verwenden, um ein ausreichendes Planum für den Unterbau zu schaffen. Dazu werden zusätzliche Lagen dieses Baumaterials eingebracht und verdichtet, um auf die geforderte Höhe des Planums zu kommen.

Unterbau – Die Hauptaufgaben dieser Schicht ergeben sich aus der Verteilung der auf ihr ruhenden Bauwerkslasten in den Unterboden und einer guten Ebenheit, damit beim Bau der darüber angeordneten Schichten deren anforderungsgerechte Ebenheiten erreicht werden können. Abhängig von seiner Zusammensetzung, kann der Unterbau eine Reihe weiterer Aufgaben erfüllen, wie das Filtern oder die Wirkung als Kapillarsperre. Normalerweise besteht diese Schicht zum größten Teil aus verdichteten Untergrundmaterialien, die ggf. verbessert wurden. Es können mehrere Unterbauschichten erforderlich sein, um größere Lasten tragen zu können. Im allgemeinen ist die verwendete Gesteinskörnung größer als in den oberen Schichten.

Tragschicht – Die Tragschicht erfüllt eine ähnliche Funktion wie der Unterbau. Sie verteilt die auf ihr ruhenden Lasten und schützt vor Wasser- und Frosteinwirkung. Je nach Lastanforderungen kann sie ein- oder mehrlagig ausgeführt werden und besteht aus einer speziell abgestuften Gesteinskörnung mit einer kleineren Partikelgröße als im Unterbau.

Die Qualität dieses Fundamentes beeinflusst die Haltbarkeit der darauf verlegten Asphaltdecken. Für weitere Informationen zu den Asphaltdecken wird auf den *Leitfaden für die Asphaltverdichtung* von Caterpillar verwiesen.

[VERFAHREN FÜR DIE BODENVERDICHTUNG]

ARBEITSPLANUNG

Im Zusammenhang mit der Planung der Verdichtung sind folgende Fragestellungen von Bedeutung:

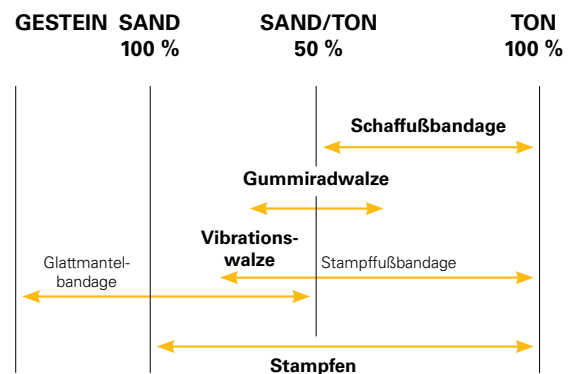
- Welche Kornabstufung hat der Boden und wie wurde er klassifiziert?
- Wie hoch sind maximale Trockendichte und optimaler Wassergehalt?
- Wie hoch ist die Sollverdichtung?
- Welche Einstellmöglichkeiten und Arbeitsgeschwindigkeit hat das Verdichtungsgerät?
- Wie dick soll eingebaut werden?

Das Unternehmen muß den Baustoff, die Anforderungen und den Anwendungsbereich jedes Gerätes kennen. Sind diese Größen bekannt, kann unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Technik ein geeignetes Verfahren festgelegt werden.

Anwendung und Größe des Verdichtungsgerätes – Die Einsatzcharakteristiken der verschiedenen Verdichtungsgeräte können der Abbildung und nachstehender Tabelle entnommen werden. Es werden die Anwendungsbereiche gezeigt, in denen jedes Verdichtungsgerät am wirkungsvollsten arbeitet. Die Einsatzspektren der Gerätetypen lassen sich nicht scharf abgrenzen. Es kommt auch häufig vor, daß Materialien bearbeitet werden, die nicht in den üblichen Anwendungsbereich fallen. Die hier gegebenen Informationen sind daher ausschließlich als durchschnittliche Empfehlungen zu verstehen.

Vielfalt der Baumaßnahmen – Der Erdbau nimmt bei den Baumaßnahmen eine große Bandbreite ein. Dazu gehören die Vorbereitung von Gründungen, das Glätten, Hinterfüllen und Aufschütten von Bodenmaterialien, wobei es sich um Arbeiten für den Bau von Gebäuden, Verkehrswegen, sonstigen Oberflächen oder anderen Bauwerken handeln kann.

EINSATZDIAGRAMM



EINSATZCHARAKTERISTIK VON BODENVERDICHTUNGSGERÄTEN
nur selbstfahrend

Maschine	Schafffußwalze	Gummiradwalze (ab 15 t)	Kompaktor Gürtelradbandage	Vibrationswalze
Einbaudicke verdichtet (mm)	150 – 300	100 – 300	150 – 300	150 – 800*
durchschn. Arbeitsgeschwindigkeit (km/h)	6 – 10	6 – 19	10 – 32	2 – 5
Durchgänge (1 Durchgang = 2 Übergänge)	6 – 10	3 – 8	2 – 4	2 – 4

*hängt von der Art des Bodens, der Größe des Verdichtungsgerätes und der Sollverdichtung ab



Gesteinsschüttungen –

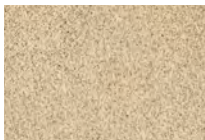
Gestein, das in weitaus größerem Umfang beim Bau von Dämmen, Flugplätzen, Häfen und

Gebäudegründungen zur Anwendung kommt, wird zunehmend auch im Straßenbau als Baumaterial eingesetzt. Gesprengtes Gestein enthält häufig so viel Feingut, daß von beträchtlichen Setzungen ausgegangen werden muß, wenn die Schüttung nicht ordnungsgemäß verdichtet wird.

Gesteinsschüttungen werden üblicherweise in Lagendicken zwischen 450 und 1200 mm eingebaut. Einen ganz bedeutenden Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Schüttung hat die Verteilung des Materials. Beim Einsatz von Raupen wird das Gestein durch das Schild etwas ausgerichtet, und die Laufwerksketten bringen bereits etwas

Verdichtung ein. Daraus resultiert eine relativ gleichmäßige und ebene Oberfläche, was den Einsatz des Verdichtungsgerätes begünstigt.

Nach dem Verteilen sind hohe Verdichtungskräfte erforderlich, um große Steine zum Erreichen der Stabilität der Schüttung umzuordnen. Dafür werden die schwersten Walzen mit Glattmantelbandage ausgewählt. Auf Gesteinsschüttungen arbeitende Walzenzüge unterliegen einer hohen Beanspruchung, weshalb deren Bandagen aus dickem und hochfestem Stahl bestehen müssen. Stellt man fest, daß das Gestein an der Schichtoberfläche zertrümmert wird, muß die Anzahl der Übergänge eventuell reduziert werden. Ist die Maschine mit mehr als einer Amplitudeneinstellung ausgestattet, kann auch eine kleinere Amplitude gewählt werden, um das Brechen des Gesteins zu reduzieren.



Sande und Kiese –

Die Vibrationsverdichtung mit Glattmantelbandagen ist für Sande und Kiese besonders wirtschaftlich. Mit wenigen Übergängen können hohe Dichten erreicht werden, wobei die Einbaudicken von der Größe des Verdichtungsgerätes abhängen.

Frei ablaufende Sande und Kiese mit Feinanteilen von weniger als 10 % können leicht verdichtet werden, insbesondere wenn sie nahezu gesättigt sind. Ist eine hohe Dichte erforderlich und sind die Schüttungen dick, sollte Wasser hinzugefügt werden, das während des Verdichtungsprozesses wieder aus der Schüttung abfließt. Wenn Sande

und Kiese einen Feingutanteil von über 10 % enthalten, ist der Boden nicht mehr frei ablaufend und kann bei zu hohem Wassergehalt elastisch werden. Die maximale Dichte kann beim optimalen Wassergehalt erreicht werden, wofür es notwendig sein kann, feuchten Boden vor der Verdichtung zu trocknen.

Da deren Scherfestigkeit geringer ist, ist es bei schlecht abgestuften Sanden und Kiesen schwierig, im Oberflächenbereich der Schüttung eine hohe Dichte zu erreichen. Dieses Problem stellt sich nicht, wenn mehrere Schüttungen nacheinander verdichtet werden. Der obere Bereich der darunterliegenden Schicht wird mitverdichtet, wenn die neue Schüttung gewalzt wird.

Beim Kontrollieren der Dichte ist diesem Umstand Rechnung zu tragen.



Liegt der Wassergehalt unter dem optimalen Wert, muß Wasser hinzugefügt werden, um sicherzustellen, daß eine einwandfreie Verdichtung erreicht werden kann.

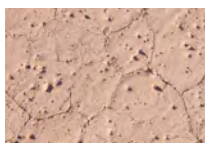


Schluffe – Nichtplastische Feinmaterialien werden üblicherweise mit Hilfe von Walzenzügen mit Glattmantelbandagen verdichtet. Schluffe können in dicken Lagen verteilt und gewalzt werden.

Wie bei allen feinkörnigen Böden hängt die Verdichtungswilligkeit vom Wassergehalt ab. Zum Erreichen der geforderten Verdichtungsergebnisse darf dieser nicht zu sehr vom Optimum abweichen.

Ist er zu hoch, werden Schluffe schnell flüssig und die Verdichtung ist unmöglich. In diesem Fall ist der Boden beispielsweise mit einer Scheibenegge zu belüften, mit trockenerem Boden zu vermischen (hoher Kostenaufwand) oder das einzubauende Material nach dessen Abbau in der Grube besser zu entwässern.

Schluffig-tonige Böden können eine beträchtliche Kohäsion aufweisen. Hier erzielt man mit Stampffuß- und Gürtelradbandagen oder Gummiradwalzen bessere Ergebnisse.



Tone – Tone haben plastische Eigenschaften, weshalb die Verdichtung in hohem Maße vom Wassergehalt beeinflusst wird. Ist dieser zu niedrig, wird Ton hart und fest. Bei

einem Wert über dem optimalen Wassergehalt wird das Material immer plastischer und schwieriger zu verdichten.

Die Herausforderung besteht häufig darin, den Wassergehalt einzustellen. Wasser mit Hilfe von Wasserwagen und Scheibeneggen oder mit einem Bodenstabilisierer hinzuzufügen, ist zeitaufwendig. Eine bessere Alternative kann darin bestehen, Wasser bereits in der Grube in das abgebaute Material einsickern zu lassen. Bei günstigen Witterungsbedingungen (warm und trocken) kann der Wassergehalt unter Verwendung von Scheibeneggen und Bodenstabilisierern reduziert werden; manchmal wird auch entsprechend lange mit Schaffußbandagen gewalzt.

Sogar bei optimalem Wassergehalt erfordert Ton im Vergleich zu nichtbindigen Böden eine höhere Verdichtungskraft und eine geringere Schichtdicke. Verdichtungsgeräte mit Stampffußbandagen sind am besten geeignet, da die Füße in den Boden eindringen und die Haftverbindungen zwischen den Partikeln lösen. Gummiradwalzen können bei Tonen mit einer niedrigen bis mittleren Plastizitätszahl eingesetzt werden.

Bei Vorhaben, bei denen eine hohe Produktionsleistung gefordert und Ton als Einbaumaterial verwendet wird, können mit Gürtelradbandagen in Verbindung mit Walzenzügen mit Stampffußbandagen gute Ergebnisse erzielt werden. Gürtelradbandagen mit Räumschaufeln arbeiten wirkungsvoll beim Verteilen des Materials und beim Zerkleinern großer, harter Tonklumpen, die häufig im Ausbaumaterial vorkommen. Nach den ersten Übergängen mit den Kompaktoren wird die Verdichtung mit den Walzenzügen fortgesetzt und zum Abschluß gebracht.



Ist der Wassergehalt zu hoch, beschleunigt das Aufreißen des Bodens den Trocknungsprozeß.

Tragschicht und Unterbau – Trag- und Unterbauschichten dienen als Fundament für den Oberbau einer Straße oder für ein Gebäude. Ihre Festigkeit nimmt zur Oberfläche hin zu. Welche Materialien für diese Schichten einzusetzen sind, hängt von der Art der Belastung ab.

Natürliche (gewachsene) Böden – Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollten am besten lokal verfügbare Böden verwendet werden. Sind diese geeignet, können sie ohne chemische Behandlungen oder Zusätze genutzt werden. Die anforderungsgerechte Verdichtung steigert die Tragfähigkeit der Böden beträchtlich und beeinflusst weitere Eigenschaften, wie Durchlässigkeit, Kapillarwirkung, Schrumpfen und Quellen, positiv.

Verbesserte Böden (Bodenstabilisierung) – Das Einmischen von Chemikalien in gewachsene oder geschüttete Böden kann deren Stabilität und Tragfähigkeit beträchtlich verbessern. Dieser Vorgang wird als Bodenstabilisierung oder Bodenverfestigung bezeichnet.

Nachdem Kalk oder Zement in den Boden eingebracht wurden, muß dieser mit einer Vibrationswalze verdichtet werden. Welche Gerätegröße dafür einzusetzen ist, hängt von den Eigenschaften des ursprünglichen, nicht verbesserten Bodens ab. Im allgemeinen ist eine Vibrationswalze mit mindestens 15 t Gewicht zu wählen. Sind große Abschnitte an bindigem Boden zu bearbeiten, ist der Einsatz eines Kompaktors (Gürtelradbandage) eventuell wirtschaftlicher. Kleinere Abschnitte können auch mit einer Gummiradwalze verdichtet werden.

Gebrochenes Gestein – Gemäß den Bauanforderungen könnte der Einsatz von gut abgestuftem, gebrochenem Gestein als Tragschicht- oder Unterbaumaterial erforderlich sein. Die Kornabstufung ist während des Brechvorganges zu kontrollieren, um die Vorgaben erfüllen zu können. Gebrochenes Gestein kann in der Regel leichter verteilt und verdichtet werden als feinkörnige Böden. Die Verdichtungsergebnisse sind zudem leichter kalkulierbar. Diese Vorteile bei der Verdichtung werden jedoch durch die Kosten für

Die Vorgaben bezüglich Schichtdicke, erforderlicher Dichte und Verformungsmodul sind streng geregelt.

Die Wahl der Verdichtungsgeräte hängt von der Bodenart ab. Im allgemeinen eignen sich körnige, nichtbindige Böden für Tragschichten und den Unterbau. Glattmantelbandagen oder Gummiradwalzen kommen deshalb am häufigsten zum Einsatz.



Durch die Bodenstabilisierung werden die bautechnischen Eigenschaften eines Bodens verbessert.

Zu Beginn der Arbeiten sollte im Rahmen einer Eignungsprüfung geklärt werden, ob die Stabilisierung auch die geforderten Ergebnisse bringt.

das Brechen und die oftmals längeren Wege zur Baustelle aufgehoben.

Gebrochenes Gestein wird normalerweise in Hinterkippern zur Baustelle transportiert und mit einem Grader oder anderen Geräten in Lagen mit Dicken von 150 bis 250 mm verteilt. Anschließend erfolgt die Verdichtung mittels Glattmantelbandagen (statisch oder dynamisch) oder mit Gummiradwalzen.

[TIPPS FÜR DIE BODENVERDICHTUNG]

Laien vermuten häufig, daß es sich bei der Bodenverdichtung augenscheinlich um etwas ganz Einfaches handelt, tatsächlich stellt sie aber einen der anspruchsvollsten technologischen Abschnitte eines Bauvorhabens dar. Deshalb bieten viele Hersteller Sonderausrüstungen für ihre Verdichtungsgeräte an, mit deren Hilfe Frequenz und Amplitude aufgabenspezifisch eingestellt werden können.

Es gibt keine einfache Methode, die Betriebsparameter eines Verdichtungsgerätes auf das zu bearbeitende Material abzustimmen: die Trial-and-Error-Methode ist oft der beste Weg. Natürlich muß ein Verdichtungsgerät in der angemessenen Größe (Gewicht, Bandagenbreite usw.) ausgewählt werden, um die Leistungsanforderungen erfüllen zu können. Die maximal erreichbare Verdichtung wird normalerweise durch Versuche unter Variation der bedienerabhängigen Größen Frequenz, Amplitude und Walzgeschwindigkeit ermittelt. Anschließend wird die erzielte Leistung analysiert und baustellenpezifisch angepaßt.

Die Hersteller rüsten ihre Maschinen mit immer mehr Technik aus, um die Effizienz steigern zu können. Aber trotz aller technischen Verbesserungen müssen die Grundlagen der Bodenverdichtung berücksichtigt werden, um optimale Verdichtungsergebnisse erreichen zu können. Nachfolgend sind einige Empfehlungen aufgeführt.

WELCHE WALZE EIGNET SICH FÜR WELCHE ANWENDUNG?

BINDIGES MATERIAL

dünne Schichten

Walzenzüge mit Stampffußbandage



FEINKÖRNIGES MATERIAL

wasserempfindlich

Walzenzüge mit Glattmantel- oder Stampffußbandage



REIBUNGSMATERIAL

(Sand 0,063 – 2 mm)

frei ablaufend mit einem Feingutanteil < 7 %

Walzenzüge mit Glattmantelbandage, Tandem-Vibrationswalzen, Gummiradwalzen



GROBKÖRNIIG, FREI ABLAUFEND

Reibungsmaterial

Walzenzüge mit Glattmantelbandage, Tandem-Vibrationswalzen



GROBKÖRNIIG

(Kies 2 – 63 mm)

frei ablaufend

Reibungsmaterial

Walzenzüge mit Glattmantelbandage, Tandem-Vibrationswalzen



GROBES MATERIAL

schwere Partikel

schwere Vibrationsplatten, schwere Walzenzüge (> 12,7 t)



	Durchlässigkeit	Eignung als Baugrund	Eignung als Unterbau	quellfähig	Verdichtungswilligkeit
Kies	sehr hoch	ausgezeichnet	ausgezeichnet	nein	sehr leicht
Sand	mittelmäßig	gut	gut	nein	leicht
Schluff	gering bis mittelmäßig	schlecht	schlecht	etwas	mittelmäßig
Ton	keine +	mäßig	schlecht	schwierig	sehr schwierig
organische Böden	gering	sehr schlecht	ungeeignet	etwas	sehr schwierig

Gleichmäßigkeit der Schüttung und der Walzgeschwindigkeit sowie Einhaltung des Walzschemas

– Die Haltbarkeit von Gebäuden und Straßen ist von Böden abhängig, die nicht nur vorschriftsmäßig, sondern auch gleichmäßig zu verdichten sind. Schwankungen des Verdichtungsgrades in den einzelnen Schichten können zu Setzungen von Gebäuden bzw. zu Unebenheiten der Fahrbahnen führen. Eine der häufigsten Ursachen für Verdichtungsunterschiede liegt in der Verwendung unterschiedlicher Böden, die nebeneinander eingebaut werden.

Da unterschiedliche Bodenarten sich unterschiedlich verdichten lassen und somit auch zu unterschiedlichen Verdichtungsergebnissen führen, ist darauf zu achten, für jede Schüttung ähnliche Materialien zu verwenden. Müssen unterschiedliche Materialien verwendet werden, sollte man auf jeden Fall bestrebt sein, innerhalb einer Einbauebene dasselbe Material zu verwenden – eine Grundvoraussetzung, um gleichmäßige Verdichtungsergebnisse erzielen zu können.

Eine weitere Ursache für Dichteschwankungen liegt im unterschiedlichen Wassergehalt. Da es schwieriger ist, Böden zu verdichten, die zu trocken oder zu feucht sind, sollte die Einhaltung des mit dem Proctorversuch ermittelten optimalen Wassergehaltes bei der Verdichtung auf der gesamten Baustelle angestrebt werden. Dies trägt dazu bei, die gleichmäßigsten und bestmöglichen Verdichtungsergebnisse zu erzielen.

Die Einbaudicke wird normalerweise nicht streng überwacht, vielleicht mit Ausnahme einer Tragschicht direkt unter dem gebundenen Oberbau. Werden alle anderen Faktoren, wie beispielsweise Materialtyp

Einbaudicke – Die Verdichtungstechnik entwickelt sich ständig weiter und bietet immer mehr Optionen und Varianten zur Unterstützung des Verdichtungsprozesses. Bei gleicher Verdichtungsarbeit sind jedoch auch bei den modernsten Verdichtungsgeräten dickere Materialschüttungen weniger dicht als dünnere. Es gibt Ausnahmen von dieser Regel, dennoch sollte eine Einbaudicke angestrebt werden, die – basierend auf der erforderlichen Dichte und einem Minimum an Übergängen – die Produktionsleistung optimiert.

Der Zustand der darunter liegenden Schicht wirkt sich ebenfalls auf die Verdichtung aus. Wurde die Unterlage nicht sorgfältig verdichtet und enthält weichere Bereiche, setzt sich das in die darüber liegende Schicht fort. Deshalb muß jede Schüttung



und Wassergehalt, konstant gehalten, führt eine gleichmäßige Einbaudicke zu einer gleichmäßigen Dichte auf der ganzen Baustelle. Wird die Einbaudicke außer Acht gelassen, werden die gestellten Anforderungen gegebenenfalls nicht erfüllt.

Weitere Faktoren, die die Verdichtung beeinflussen und denen häufig zu wenig Bedeutung beigemessen wird, sind die Anzahl und Überdeckung der Walzübergänge. Parameter, wie die Anzahl der Übergänge, die Walzgeschwindigkeit und die Einstellungen der Vibration, lassen sich allerdings problemlos kontrollieren. Die Nutzung intelligenter Verdichtungstechnologien, wie die Cat-Verdichtungssteuerung (Compaction Control) mit GNSS-Mapping-Funktion, stellt sicher, daß die richtige Anzahl an Walzübergängen und deren Überdeckung eingehalten werden, woraus eine effizientere und homogenere Verdichtung des Bodens resultiert.



gleichmäßig und sorgfältig verdichtet werden, um sicherzustellen, daß die nächsten Schüttungen ebenso erfolgreich verdichtet werden können.

Verdichtungsaufwand – Der Verdichtungsaufwand ist die erforderliche Menge an Energie, die benötigt wird, um die Bodenpartikel unter Volumenabnahme neu zu ordnen. Durch die Änderung maschinentechnischer Parameter, wie Gewicht, Bandagenbreite, Reifendruck, Amplitude und Frequenz, wird die Effektivität der Verdichtung beeinflusst. Einige dieser Einflußgrößen können am Gerät geändert werden, andere – wie die Breite der Bandage – erfordern eine andere Maschine. Für ein gegebenes Bauprojekt sind bestimmte Parametergrößen erforderlich.



Arbeitsgeschwindigkeit – Generell ist die Arbeitsgeschwindigkeit für die Bauleistung von erheblicher Bedeutung. Je schneller die Maschine arbeitet, desto schneller ist die Arbeit erledigt. Anders als bei den anderen Maschinentypen nimmt allerdings bei Vibrationswalzen die Produktionsleistung üblicherweise zu, wenn die Fahrgeschwindigkeit reduziert wird. Es gibt eine optimale Geschwindigkeit, bei der ein Verdichtungsgerät die geforderte Verdichtung am wirtschaftlichsten erreicht.



Allgemeine Regeln für das Ausbreiten des Bodens und dessen Verdichtung –

Nachfolgend werden allgemeine Regeln genannt, die zum Erreichen der geforderten Verdichtung unumgänglich sind:

- Wassergesättigte Schichten dürfen nicht überschüttet werden.
- Böden mit übermäßigem Wassergehalt dürfen nicht eingebaut werden. Das Bodenmaterial ist mit einer langsam fahrenden Raupe gleichmäßig und profilgerecht über die ganze Fläche zu verteilen.
- Vertiefungen in der Oberfläche oder Bereiche mit sichtbaren Entmischungen können durch das Hinzufügen bzw. Austauschen von Bodenmaterial mit derselben Zusammensetzung ausgebessert werden.
- Sofort nach dem Verteilen ist der Boden zu verdichten. Dabei ist von der Außenseite hin zur Flächenmitte vorzugehen.
- Ausgehend von den äußeren Kanten, sind Damm-/Bankettbereiche zur Mitte hin ebenso zu verdichten.
- Bei der Arbeit mit witterungsempfindlichen

Materialien sollte der gesamte geschüttete Boden ein leichtes Quergefälle von ca. 6 % aufweisen, um die Ansammlung von Oberflächenwasser zu vermeiden.

- Bei schlechtem Wetter ist jede Schüttung bahweise in Bandagenbreite komplett zu verdichten. Anschließend ist auf die nächste Bahn umzusetzen. Dieser Vorgang ist so lange fortzusetzen, bis die komplette Fläche verdichtet ist. Die gesamte Oberfläche ist am Tagesende zu glätten und zu versiegeln, um zu verhindern, daß Regenwasser eindringen kann.
- Beim Verdichten auf einer flexiblen Unterlage sollte am besten eine kleine Amplitude mit hoher Frequenz verwendet werden, sofern die Unterlage ausreichend steif ist. Eine große Amplitude und eine mittlere bis niedrige Frequenz sind zu wählen, wenn die Unterlage zusammen mit der ersten Schüttung verdichtet werden soll.
- Mit einer Kombination aus statischer und Vibrationsverdichtung – zuerst die Vibration, dann die statische Verdichtung – lassen sich häufig die besten Ergebnisse erzielen.

[MESSEN DER VERDICHTUNG]

Üblicherweise werden anhand der an einer Bodenprobe im Labor ermittelten Dichten die Verdichtungsanforderungen im Feld festgelegt und vor Ort bestimmt. Mit Laborversuchen (wie dem Proctorversuch) wird der Wassergehalt ermittelt, bei dem die maximale Dichte erreicht werden kann. Solldichten im Feld werden als Anteil dieser maximalen Trockendichte in Prozent angegeben.

Im Allgemeinen betragen die geforderten Felddichten 95 % der einfachen Proctordichte beim Bau von Dämmen und bis zu 100 % der modifizierten Proctordichte im Straßenbau, wobei der Wassergehalt des Bodens im Bereich des im Labor ermittelten optimalen Wassergehaltes liegen muß.

Um gewährleisten zu können, daß die zwei wichtigsten Elemente – Solldichte und

Wassergehalt – bei einem spezifischen Bauvorhaben vorgabegemäß eingehalten werden, werden punktuelle Untersuchungen im Feld durchgeführt, die zudem auch Aufschluß über die Wirksamkeit der eingesetzten Verdichtungsgeräte und angewendeten Baumethoden geben.

Seit einiger Zeit setzen sich walzenintegrierte Meßsysteme mit der Möglichkeit durch, die Verdichtungsqualität unmittelbar mit dem Baufortschritt ermitteln zu können.

Viele Behörden fordern nun die sog. „Intelligente Verdichtung“, die dieses Meßverfahren mit Kartierungssystemen (Mapping-Systemen) verbindet, indem die Meßdaten mit dem Meßort verknüpft werden und damit auch für die spätere Analyse und Dokumentation flächenhaft zur Verfügung stehen.

ENTWICKLUNG DER VERDICHTUNGSMESSUNG



herkömmliche Methoden

- Prozeßkontrolle
- Punkt-für-Punkt-Prüfung
 - Troxlersonde (Isotopensonde)
 - Penetrometer
 - Fallgewichtsgesetz
 - Lastplattendruckversuch
- relativ präzise
- Normalerweise wird eine Fläche von weniger als 1 % der Gesamtfläche geprüft.



walzenintegriertes Meßverfahren

- Beschleunigungsmesser
- Messung des Fahrwiderstandes (MDP – Machine Drive Power)
- Echtzeit-Anzeige der Steifigkeit oder Tragfähigkeit
- schwierig mit den herkömmlichen Punkt-für-Punkt-Messungen zu verknüpfen
- Abhängigkeit der Meßergebnisse von Bodenart und/oder Anwendung



Intelligente Verdichtung

- örtliche Zuordnung der Meßwerte durch die Verknüpfung der walzenintegrierten Messung mit einem satellitengestützten Mapping-System
- Bereitstellung detaillierter Karten zur Visualisierung der geleisteten Walzarbeit
- Bereitstellung von Daten für die Analyse und Dokumentation

Nachfolgend werden einige der am häufigsten eingesetzten Methoden beschrieben. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß mit jeder Prüfmethode die Bodeneigenschaften (z. B. Dichte, Festigkeit usw.) auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt werden, weshalb die Meßergebnisse nur

Feldmessungen (herkömmlich) – Bestimmung der Bodendichte: Zur Ermittlung der Dichte des Bodens im Feld kommen zwei grundlegende Methoden zur Anwendung:

1. Messung der Reaktion eines Bodens auf radioaktive Bestrahlung mittels einer sog. Troxler- oder Isotopsonde

Es ist die am häufigsten eingesetzte Methode zur Bestimmung der Bodendichte im Feld. Allerdings hat sie den Nachteil, daß für den Umgang mit Isotopsonden eine Genehmigung erforderlich ist und die nukleare Strahlungsquelle regelmäßig überwacht und geprüft werden muß. Für den Transport der Geräte sind oftmals Genehmigungen mit dem entsprechenden bürokratischen Aufwand erforderlich.

Die Sonde generiert mittels eines Neutronen- und eines Gammastrahlers einen Meßwert für den Wassergehalt in einer Tiefe von ca. 50 mm und einen für die Raumdichte bis zu einer Tiefe von maximal 300 mm. Mit dieser schnellen und zerstörungsfreien Prüfung werden bei homogenen Böden die besten Ergebnisse erzielt.

Für die Messung der Raumdichte mit einer Isotopsonde gibt es drei grundlegende Verfahren: Direktstrahlungs-, Rückstreu- und Luftspaltverfahren.

Das *Direktstrahlungsverfahren* (Einstechmethode) bietet die höchste Genauigkeit. Die aus der Zusammensetzung des Bodens und der Oberflächenstruktur der zu prüfenden Schicht resultierenden Fehler beeinflussen die Meßergebnisse in nur geringem Maße. Das Verfahren kann für die Prüfung zwischen 50 bis 300 mm Tiefe eingesetzt werden. Die Meßtiefe kann unmittelbar kontrolliert werden – ein wesentlicher Vorteil. Dazu wird für die Bestimmung der Dichte die Gamma-Strahlenquelle an der Spitze eines Stabes bis in eine bestimmte Tiefe des Bodens eingebracht. Die die Bodenschicht durchdringende Direkt- und Streustrahlung wird von den Detektoren der Sonde an der Bodenoberfläche erfaßt. Die Ermittlung des Wassergehaltes erfolgt ebenfalls von der Bodenoberfläche aus.

Beim *Rückstreuverfahren* (Aufsetzmethode) wird vollständig zerstörungsfrei gemessen, da der Gamma-Strahler nicht in den Boden eingebracht

miteinander in Bezug gesetzt werden sollten, wenn die physikalischen Zusammenhänge bekannt sind. So wird bei der punktuellen Prüfung vereinfachend davon ausgegangen, daß die Meßergebnisse auch für nicht geprüfte, benachbarte Flächen oder für die gesamte Baustelle gelten.



Troxler- oder Isotopsonde

wird. Es wird nur die Streustrahlung erfaßt. Die Dichte wird bis zu einer Tiefe von etwa 10 cm gemessen, die oberen 3 cm beeinflussen den Meßwert besonders stark. Wegen ihrer geringen Tiefenwirkung und des verhältnismäßig kleinen Meßvolumens reagieren Aufsatzsonden empfindlich auf Materialinhomogenitäten und Unebenheiten der Oberfläche. Dieses Verfahren funktioniert am besten in geringen Tiefen zwischen 50 und 75 mm.

Mit Hilfe des *Luftspaltverfahrens* wird der Einfluß des Chemismus des Bodens und des Gesteins auf die Dichte weitgehend ausgeschaltet. Das Prüfgerät wird über der Prüffläche angehoben, um den Einfluß aus der Unebenheit der Bodenoberfläche zu reduzieren. Die Genauigkeit dieser Meßmethode entspricht jedoch nicht der aus dem Direktstrahlungsverfahren.

Einschränkungen zur Nutzung radioaktiv messender Geräte ergeben sich aus den Vorschriften, die beim Umgang mit radioaktiven Stoffen zu beachten sind sowie aus der Tatsache, daß bei organischen Böden oder Materialien mit einem hohen Salz- und/oder radioaktiven Gehalt mitunter falsche Werte bestimmt werden. Auch Bodenerschütterungen – beispielsweise durch Baumaschinen – können zu Meßfehlern führen.



Das Sandersatzverfahren zeichnet sich durch eine bewährte Genauigkeit aus.

2. Ersatzverfahren

Eine Grube ausheben, die Masse des entnommenen Bodens durch Wiegen ermitteln und das Volumen der Grube bestimmen

Mit Hilfe geeigneter Wägetechnik ist die Masse der entnommenen Bodenprobe exakt zu ermitteln. Die Bestimmung des Volumens der durch die Entnahme des Bodens entstandenen Grube erfolgt indirekt durch eines der nachfolgend beschriebenen Verfahren:

Sandersatzverfahren – Das in mehreren Schritten durchzuführende Sandersatzverfahren zeichnet sich durch eine bewährte Genauigkeit aus und ist zeitaufwändiger als die Messung mit einer Isotopsonde. Fallweise wird dieses Verfahren auch eingesetzt, um eine Isotopsonde zu kalibrieren. Die Methode zielt auf die Bestimmung des Sandvolumens ab, das erforderlich ist, um die Grube zu füllen, aus der die Bodenprobe entnommen wurde. Der Sand hat eine gleichmäßige Dichte, die sich beim freien Einlaufen in die Grube nicht wesentlich ändert.

Ballon-Verfahren – auch als Densitometerverfahren bezeichnet. Die Anwendung des Verfahrens empfiehlt sich insbesondere für feinkörnige Böden mit eingelagerten Kiesen und Steinen sowie für grobkörnige Böden ohne scharfkantige Steine. Die ersten drei Schritte – Entnahme einer Bodenprobe, deren Wiegen und Trocknen – entsprechen denen des Sandersatzverfahrens. Auf diese Weise wird der Wassergehalt bestimmt.

Zur Bestimmung des Volumens der Grube wird ein Densitometer eingesetzt. Auf die ebene Oberfläche der zu untersuchenden Bodenschicht wird die Grundplatte des Meßgerätes gelegt und der Boden innerhalb des Ringes mindestens 50 mm tief ausgehoben. Auf die Grundplatte wird das mit einer

kalibrierten Flüssigkeit gefüllte Gerät gestellt. Durch Öffnen des Ventils läßt man den Gummiballon unter dem Gewicht der Flüssigkeit auf der Bodenoberfläche anliegen, wobei man den Kolben nach unten drückt. Am Nonius wird nun die Stellung des Kolbens zu Beginn der Messung L_0 abgelesen, der Kolben samt Gummiballon wieder hochgezogen und das Densitometer von der Grundplatte abgenommen und abgestellt. Unterhalb des Loches in der Grundplatte wird der Boden ausgehoben, so daß eine Grube mit ca. 20 cm Tiefe und möglichst senkrechten Wänden entsteht. Anschließend wird das Meßgerät wieder auf die Grundplatte gestellt, der Gummiballon wiederum durch Öffnen des Ventils abgesenkt und der Kolben nachgedrückt. Ist der Ballon gefüllt, nimmt er die Form der Grube an und füllt sie vollständig aus. Die zweite Kolbenstellung L_1 wird am Nonius abgelesen, der Kolben hochgezogen und das Densitometer entfernt.

Das Volumen des Bodenloches V ergibt sich aus der Multiplikation der Kolbenfläche A mit dem Flüssigkeitsvolumen, das der Kolben zwischen den beiden Ablesungen am Nonius L_0 und L_1 verdrängt hat:

$$V = (L_0 - L_1) \cdot A.$$

Die Wichte des feuchten Bodens wird ermittelt, indem das Gewicht der ausgehobenen Probe durch das Volumen der Grube (genau wie beim Sandersatzverfahren) dividiert wird. Das Trockenraumgewicht kann berechnet werden, indem die Wichte des feuchten Bodens durch *1 plus den Wassergehalt* geteilt wird.

Das Densitometerverfahren weist folgende Nachteile auf: der hohe Zeitaufwand zur Ermittlung der Meßwerte, verbunden mit der Tatsache, daß die Genauigkeit davon abhängt, ob der Ballon in der Lage ist, sich den Unebenheiten der Grubenwandung vollständig anzugleichen.



Eine Rammsonde im Einsatz

Messungen der Bodenfestigkeit und -steifigkeit

Die Lagerungsdichte wird seit jeher als Maß für die Bodenverdichtung herangezogen, sowohl um die Anforderungen festzulegen als auch um das Ergebnis zu kontrollieren. Tendenziell werden häufiger Methoden zur Bestimmung der Verdichtung eingesetzt, die in einem direkteren Zusammenhang mit den bautechnischen Anforderungen stehen. Es gibt mehrere Feldmeßmethoden zur Bestimmung der Festigkeit des Bodens. Einige davon sind in diesem Leitfaden beschrieben. Die Methoden lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

1. Eindringwiderstand des Bodens

Für die Bestimmung des Eindringwiderstandes wird beispielsweise in den USA am häufigsten das *Dynamische Konuspenetrometer* eingesetzt. Bei diesem Druck-Sondierverfahren wird ein Meßkopf mit kegelförmiger Spitze mit einer konstanten Geschwindigkeit über ein Gestänge in den Boden gedrückt. Dabei werden der Spitzendruck und die Mantelreibung gemessen.

Eine Alternative zur Drucksondierung ist die *Rammsondierung*, bei der eine kegelförmige Sonde mit einer festgelegten Energie (ein aus einer bekannten Höhe herabfallender Hammer mit einem bestimmten Gewicht) in den Boden gerammt wird. Dabei wird ein Kegel mit einem definierten Durchmesser und einem Öffnungswinkel von 60° eingesetzt. Die Anzahl der Schläge, die für

eine festgelegte Eindringtiefe notwendig ist, wird aufgenommen. Aus der Schlagzahl lassen sich bei rolligen Böden Rückschlüsse auf die Lagerungsdichte ziehen. Die Daten werden als Schlagzahlen pro definierte Eindringtiefe in einem Sondierdiagramm (Schlagzahl- oder Stufendiagramm) aufgezeichnet.

Die *Rammsondierung* hat den Vorteil, daß die Bodenfestigkeit in größeren Tiefen als bei anderen Verfahren gemessen werden kann. Der Kegel kann bis zu einer Tiefe von 1 m und mehr eindringen, auch wenn die Reibungswirkung des Bodens auf den Kegelstab die Werte – insbesondere bei einer Tiefe von über 1 m – beeinflussen kann. Bei härteren Böden sind vergleichsweise mehr Schläge erforderlich, um den Kegel auf die gleiche Tiefe eindringen zu lassen.

Allerdings ist der Einsatz resp. die Eindringtiefe eingeschränkt bei sehr festen und sehr dicht gelagerten Böden sowie Kiesschichten und steinhaltigen Böden, wodurch sowohl die Kegelspitze beschädigt als auch das Gestänge untolerierbar ausgelenkt werden können. Auch die unsachgemäße Verwendung des Fallgewichtes oder die nicht korrekte Zählung der Schläge führen zu Meßfehlern.

Die Arbeit mit Rammsonden ist körperlich anstrengend und kann bei wiederholtem Einsatz zur Ermüdung führen, weshalb sich die Verwendung pneumatischer Rammsonden empfiehlt: insbesondere dann, wenn ein Einsatz der *Leichten Rammsonde* gefordert ist.

2. Reaktion des Bodens auf ein herabfallendes Gewicht

Der *dynamische Plattendruckversuch* dient der Beurteilung der Verdichtung und Bestimmung der Tragfähigkeit von Böden auf der Baustelle. Diesem Verfahren liegt folgendes Prinzip zugrunde: steifere Böden bewirken einen stärkeren Rückprall, wenn ein Gewicht auf ihrer Oberfläche auftrifft. Die durch die Belastungsstöße mit einem definierten Fallgewicht im Boden bewirkten Setzungen werden mit einem Meßgerät aufgezeichnet. Gerätetypen, mit denen diese Methode umgesetzt wird, sind das *Leichte Fallgewichtsgerät (LFG)* und das *Schwere Fallgewichtsgerät (SFG)*.

Dynamische Plattendruckversuche mit dem *Leichten Fallgewichtsgerät (LFG)* lassen sich schnell durchführen. Es handelt sich um ein indirektes Verfahren zur Verdichtungsprüfung, da die vor Ort gemessenen Ergebnisse keinen direkten Bezug zur Proctordichte liefern. Während des Versuches wird der Boden mehrmals stoßweise mit einer definierten Kraft belastet. Durch die Bestimmung der Einsenkung (Setzung) der Platte wird der dynamische Verformungsmodul E_{vd} des Bodens in MN/m^2 ermittelt. Die unmittelbar

nach der Prüfung vorliegenden Ergebnisse können über pauschale Korrelationswerte oder Vergleiche mit den Ergebnissen statischer Lastplattendruckversuche in die entsprechenden E_{v2} -Werte umgerechnet werden.



Leichtes Fallgewichtsgerät

Das *Schwere Fallgewichtsgerät (SFG)* ist eine größere Ausführung des zuvor beschriebenen, manuell zu handhabenden Gerätes. Das *SFG* ist auf einem Fahrgestell montiert und funktioniert nach demselben Prinzip, nur daß der Aufprall auf einer viel größeren Platte erfolgt. Daraus resultiert eine größere Meßtiefe: Während mit dem *LFG* Messungen bis zu einer Tiefe von 150 mm durchgeführt werden können, besitzt das *SFG* eine Energie, die problemlos in eine Bodentiefe von 1 m übertragen werden kann und dem durch eine Vibrationswalze erzeugten Schlag wesentlich ähnlicher ist.

3. Widerstand des Bodens gegen statischen Druck

Der wesentlich zeitaufwändigere *Lastplattendruckversuch* (statischer Plattendruckversuch) ist ein Feldversuch zur Kontrolle der Zusammendrückbarkeit und somit zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Böden. Der Versuch ähnelt einer Probelastung. Es handelt sich um den präzisesten Versuch im Erdbau mit der höchsten Wiederholgenauigkeit. Wie bei den Fallgewichtsprüfungen wird von der Bodenoberfläche aus gemessen: allerdings mit dem Unterschied, daß keine dynamische Kraft wirkt, sondern ein statischer Druck aufgebracht wird. Um einen gut verdichteten, steifen Boden mit statischem Druck zu verformen, ist ein hoher Kraftaufwand erforderlich. Die Größe der Platte muß in etwa der gewünschten Meßtiefe entsprechen.

Für den *Lastplattendruckversuch* sind mehrere Prüfgeräte mit unterschiedlichen Plattendurchmessern verfügbar. Je größer der Plattendurchmesser, desto mehr Kraft ist notwendig, um eine meßbare Einsenkung der Platte in den Boden zu bewirken. Sobald die Platte belastet wird, wird das Einsinken bei einer bestimmten Kraft gemessen und aufgezeichnet. Die Verformungsmodul E_{v1} und E_{v2} werden über eine zweimalige stufenweise Be- und Entlastung des Bodens ermittelt. Anhand der



Vorbereitung eines Lastplattendruckversuches

Versuchsergebnisse sind Aussagen zu verschiedenen Bodenkennwerten möglich, die Proctordichte kann indirekt bestimmt werden. Um die Platte, die üblicherweise einen Durchmesser von 300 mm aufweist, in den Boden einsinken zu lassen, sind erhebliche Kräfte erforderlich. Dazu werden häufig auf der Baustelle verfügbare Lkw oder schwere Baumaschinen als Widerlager verwendet. Die Ergebnisse aus dem Lastplattendruckversuch werden zur Dimensionierung des Oberbaus verwendet.



Einsatz des Proof-Rolling-Verfahrens zur Überprüfung der Stabilität und Gleichmäßigkeit der verdichteten Schicht

Sonstige Feldmessungen

Schließlich werden auch andere Feldmessungen zur Prüfung der Verdichtung eingesetzt, die sich jedoch nicht einer der zuvor genannten Gruppen zuordnen lassen. Diese Verfahren wurden jahrzehntelang allein oder in Verbindung mit anderen Prüfmethode genutzt, um die Tragfähigkeit eines Bodens beurteilen zu können. Viele davon sind noch heute im Einsatz.

1. Proof-Rolling-Verfahren

Das Überfahren der verdichteten Fläche mit entsprechend hohen Achslasten wird in Nordamerika üblicherweise als alternatives Verfahren zu punktuellen Prüfmethode eingesetzt, um sich einen unmittelbaren Eindruck verschaffen zu können, wie die verdichtete Fläche auf eine Belastung reagiert. Weiche Stellen können damit erkannt und die gleichmäßige Tragfähigkeit nachgewiesen werden. Nachdem ein schwer beladener Anhänger über die zu prüfende Fläche gezogen oder alternativ dafür ein voll beladener Lkw-

Kipper verwendet wurde, wird die Tiefe der Spurrillen oder Einsenkungen gemessen. Zu tiefe Spurrillen weisen auf eine ungenügende Verdichtung hin.

Das *Proof-Rolling-Verfahren* läßt keinen direkten Schluß auf die Bodenfestigkeit zu, gestattet aber einen direkten Rückschluß auf die Verdichtungsqualität, von der die Bodensteifigkeit für Bauwerke, wie z.B. für Straßen und Parkplätze, abhängt. Werden auf der geprüften Schicht unter dem Einfluß hoher Achslasten keine Spurrillen sichtbar, läßt sich daraus schließen, daß sich die Fläche unter der Verkehrsbelastung auch nicht einsenken wird – vorausgesetzt, die Straße ist gut drainiert und kann damit dauerhaft stabil bleiben.

Von allen herkömmlichen Verfahren für die Verdichtungskontrolle ist das *Proof Rolling* die Methode, die den größten Stichprobenumfang ermöglicht, da kostengünstig eine wesentlich größere Fläche geprüft werden kann, als dies mit punktuellen Prüfverfahren möglich ist.

2. Tragbarer Trockenofen zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes

Die mit den oben genannten Geräten durchgeführten Messungen sind nur brauchbar, wenn der Wassergehalt des Bodens bekannt ist. Um diesen in situ exakt bestimmen zu können, wird ein tragbarer Trockenofen verwendet.



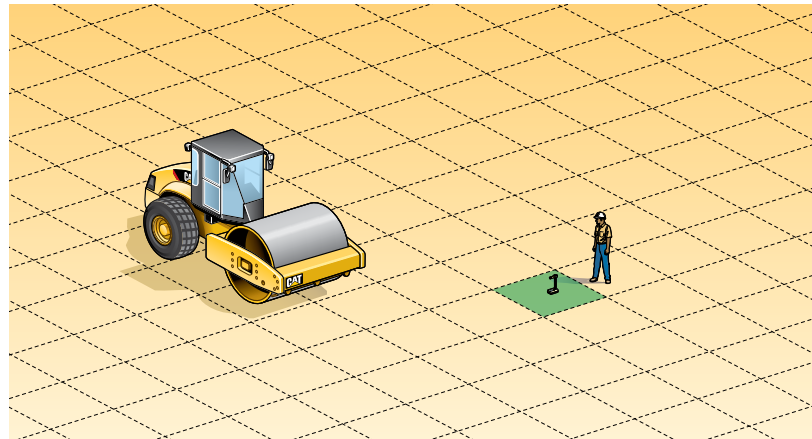
Tragbarer Ofen zur Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens im Feld

Walzenintegrierte Meßsysteme

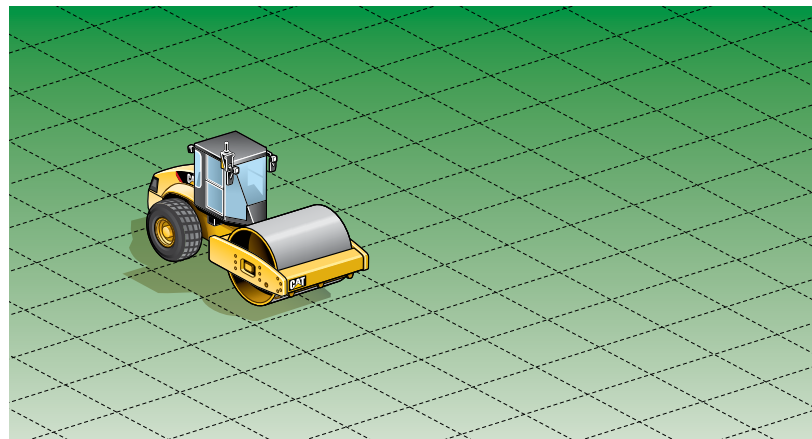
Die Bodenverdichtung basiert in hohem Maße auf Erfahrungswerten. So müssen sich die Walzenfahrer auf ihre Erfahrungen und ihr Urteilsvermögen verlassen, um zu bewerten, ob die Verdichtung erreicht ist, wenn keine zuverlässigen Daten über den Zustand des Bodens zur Verfügung stehen. Deshalb werden – zumindest für Projekte entsprechender Größe und Bedeutung – von Ingenieuren festgelegte Verfahren vorgeschrieben, die bei Einhaltung der Vorgaben zu anforderungsgerechten Ergebnissen führen. Sind die Ergebnisse der in festgelegten Bereichen durchgeführten punktuellen Prüfungen unbefriedigend, muß nachgebessert werden. Alternativ zur punktuellen Prüfung wird in einigen Bereichen das oben bereits beschriebene Proof-Rolling-Verfahren eingesetzt.

Unabhängig von der angewendeten Kontrollmethode gehen Walzenfahrer üblicherweise davon aus, daß die Verdichtung mit dem Arbeitsfortschritt zunimmt. Mit Hilfe punktueller Prüfmethode können nur verhältnismäßig kleine Abschnitte des gesamten Baufeldes erfaßt werden, was die Gefahr in sich birgt, eventuell nicht angemessen verdichtete Bereiche nicht identifizieren zu können. Diese minderverdichteten Bereiche können zum Nachgeben einer Straße oder zu Setzungen unter einem Gebäude führen und kostenintensive Nachbesserungen zur Folge haben.

Im Gegensatz dazu werden die Walzenfahrer mit Hilfe maschinenintegrierter Meßsysteme laufend über den Verdichtungsfortschritt informiert. Das geschulte Personal kann anhand der angezeigten Meßwerte leicht feststellen, ob die erzielte Verdichtung die Vorgaben bereits erfüllt oder weiterverdichtet werden muß. Mit Hilfe der walzenintegrierten Meßsysteme können auch im Untergrund verborgene Materialien bzw. Objekte – wie z.B. Tonklumpen, Äste oder große Steine – entdeckt und lokalisiert werden, die die Qualität der Verdichtung mindern können.



Bei den herkömmlichen Meßsystemen wird nur ein kleiner Teil des verdichteten Bereichs analysiert.



Mit Hilfe der walzenintegrierten Messung wird der gesamte Verdichtungsbereich flächendeckend analysiert.



Mit dem Einsatz walzenintegrierter Meßsysteme läßt sich auf die Bodensteifigkeit schließen.

Was wird mit der walzenintegrierten Messung bestimmt?

Derartige Systeme sind nicht in der Lage, die Bodendichte zu messen, auch wenn diese häufig zur Bewertung der Meßergebnisse herangezogen wird. Aufgrund der veränderlichen Bedingungen während des Verdichtungsvorganges kann kein Wert direkt bestimmt werden. Es werden vielmehr eine Reihe von Faktoren ermittelt, die Hinweise auf die Bodensteifigkeit geben. Wie bereits ausgeführt, ist die Steifigkeit die Fähigkeit eines Bodens, Verformungen, Durchbiegungen oder Einsenkungen

unter dem Einfluß einer Last zu widerstehen. Die Tragfähigkeit ist ein besserer Indikator als die Materialdichte, denn bestimmte dichte Materialien können unter einer Last brüchig werden. Der Boden muß elastisch und bruchstabil sein.

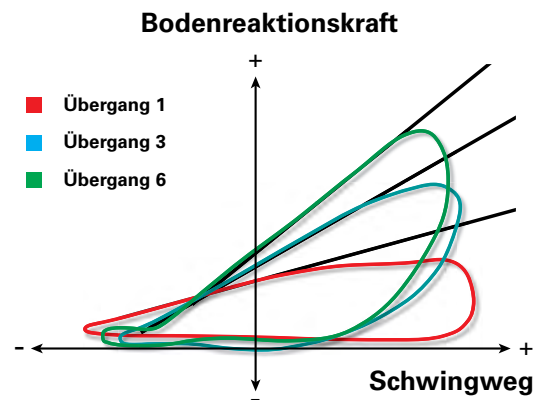
Es stehen zwei verschiedene Meßtechniken zur Verfügung: Systeme mit Beschleunigungssensoren und auf der Antriebsleistung basierende Systeme. Die Messungen werden auf völlig unterschiedliche Art und Weise durchgeführt, und dementsprechend werden auch unterschiedliche Meßdaten bestimmt.

Messung mit Hilfe der Bandagenbeschleunigung

Systeme mit Beschleunigungssensoren werden von den meisten Herstellern angeboten. Ein an der Bandage montierter Beschleunigungssensor ermittelt deren Reaktion beim Kontakt mit dem Boden nach einem Vibrationsschlag. Um auf den Zustand des Bodens schließen zu können, kommen zwei verschiedene Methoden zur Anwendung.

Eine dieser Methoden wird als Kraft-Weg-Messung bezeichnet. Mit Hilfe eines auf der Bandagenachse installierten Beschleunigungssensors wird der Weg der Bandage ermittelt. Da die Leistungsmerkmale der Bandage und der Vibrationseinrichtung sowie das Maschinengewicht und dessen Verteilung bekannt sind, ist es möglich, durch die Messung der Bandagenbeschleunigung die Kraft zu berechnen, die erforderlich ist, um einen bestimmten Schwingweg zurückzulegen. Je steifer der Boden ist, desto höher muß die Kraft sein, um die Bandage einen bestimmten Weg in den Boden eindringen zu lassen. Somit bewirkt eine konstante Kraft, daß die Bandage weniger tief in den Boden eindringt, je steifer dieser wird. Da sich aber die Kontaktfläche zwischen Bandage und Boden mit der Eindringtiefe ändert, handelt es sich um einen Schätzwert und keine exakte Messung.

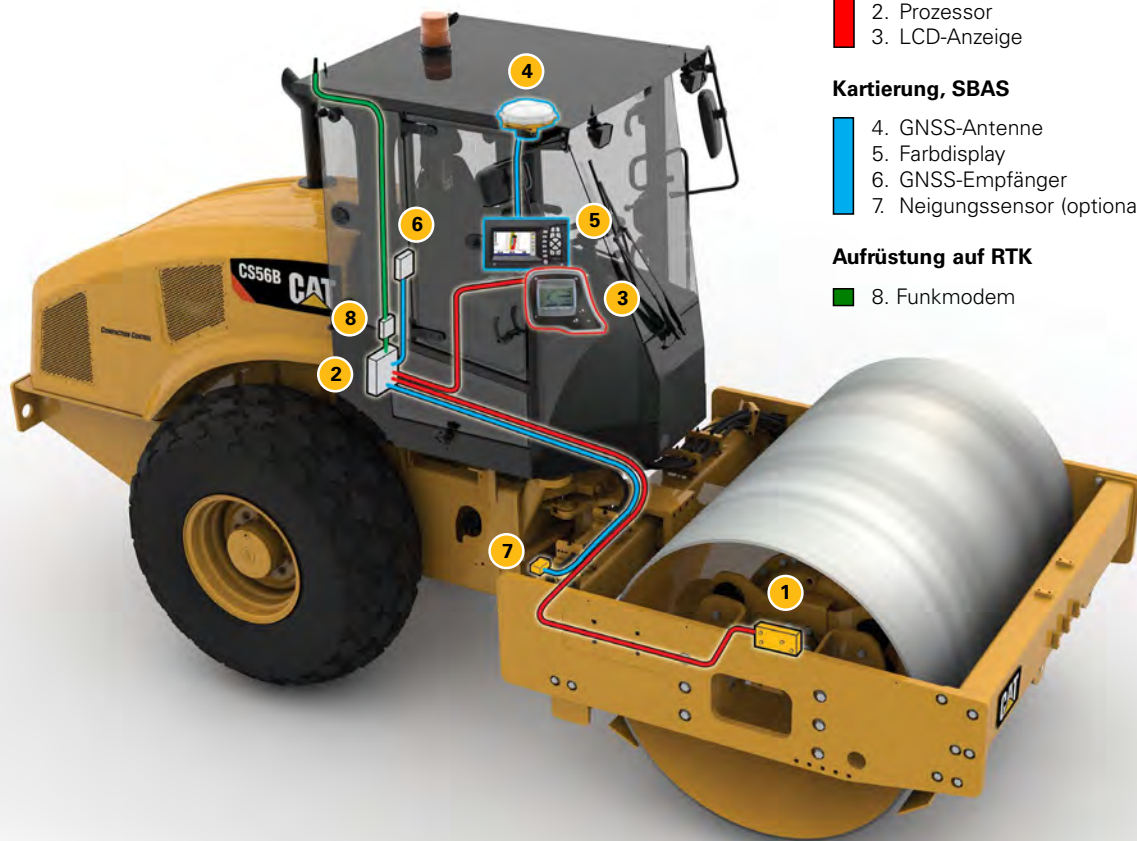
KRAFT-WEG-MESSUNG



Je steiler die Kurve ansteigt, desto steifer ist der Boden.



Beschleunigungssensoren erfassen die Reaktion der Bandage bei deren Kontakt mit dem Boden



Meßsystem

- 1. Beschleunigungsmesser
- 2. Prozessor
- 3. LCD-Anzeige

Kartierung, SBAS

- 4. GNSS-Antenne
- 5. Farbdisplay
- 6. GNSS-Empfänger
- 7. Neigungssensor (optional)

Aufrüstung auf RTK

- 8. Funkmodem

VERDICHUNGSMESSWERT (CMV)

Mit der zweiten Methode wird ein Verdichtungsmeßwert (CMV – Compaction Meter Value) generiert. Das Verfahren wurde in den 1970er Jahren von dem schwedischen Unternehmen Geodynamik entwickelt und wird von Caterpillar sowie mehreren anderen Herstellern eingesetzt.

Das Meßprinzip basiert auf der dynamischen Reaktion der Bandage auf die sich ändernde Steifigkeit des verdichteten Bodens und kann mit einer laufend wiederholten, dynamischen Probelastung verglichen werden. Ein an der Bandage montierter Beschleunigungssensor dient nicht der Bestimmung ihrer vertikalen Bewegungskomponente, sondern der Ermittlung der Rückprall-Beschleunigung der Bandage bei der Vibrationsfrequenz (Grundfrequenz) sowie der ersten Harmonischen (doppelte Vibrationsfrequenz). Beide Werte werden formelmäßig miteinander zu

einem dimensionslosen Relativwert verknüpft.

Unverdichtete Böden absorbieren die Vibrationsenergie. Aber je steifer der Boden mit zusätzlichen Verdichtungsübergängen wird, desto mehr wird die eingeleitete Energie von der Schichtoberfläche reflektiert und desto schneller prallt die Bandage ab. Anhand der Messung dieses Rückpralls ist somit ein Rückschluß auf den Verdichtungszustand des Bodens möglich. Das Ergebnis – der CMV-Wert – gibt Aufschluß über die Bodensteifigkeit und korreliert mit der Dichte des nichtbindigen Bodens. Der Einsatz dieser Technologie ist in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt auch bei gemischtkörnigen Böden möglich.

Je steifer der Boden ist, desto ausgeprägter ist der Rückprall. Wenn die Resonanzfrequenz des Bodens mit der Vibrationsfrequenz der Bandage übereinstimmt, hat der Boden seine maximale Steifigkeit erreicht und kann die vom Verdichtungsgerät angebotene Verdichtungsenergie nicht mehr aufnehmen. Die Bandage hebt ab und kann in Abhängigkeit von der Stärke des Rückpralls in den Sprungbetrieb übergehen. Bezogen auf die Grundfrequenz wird im Amplitudenspektrum nun auch die Komponente mit der halben Frequenz sichtbar. Unabhängig von der eingesetzten Meßtechnik überwachen Systeme mit Beschleunigungssensoren, wie nahe sich die Bandage am Zustand des Abhebens befindet. Dieser Wert wird als RMV-Wert (Resonance Meter Value) bezeichnet und herangezogen, um zu beurteilen, wie brauchbar die Steifigkeitsmessung ist: Je näher sich die Bandage am Zustand des Abhebens befindet, desto weniger brauchbar ist die Messung.

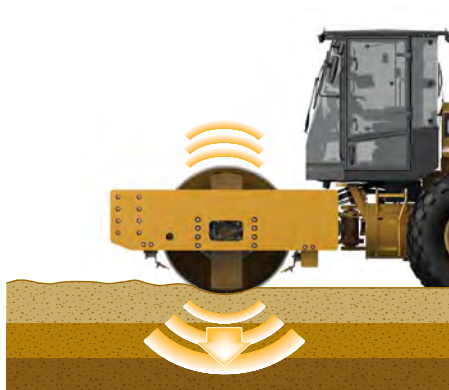
Systeme mit Beschleunigungssensoren messen bis ca. 1,20 m tief in den Boden, je nach Zusammensetzung des Bodens und den Leistungsmerkmalen des Verdichtungsgerätes. Die Messung stellt lediglich einen Mittelwert

dar, präzise Aussagen über die Steifigkeit in einer bestimmten Tiefe sind damit nicht möglich. Die Tiefenmessung eignet sich jedoch ausgezeichnet, um im Untergrund verborgene Objekte identifizieren zu können, die die Qualität der Arbeit und die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes beeinträchtigen könnten.

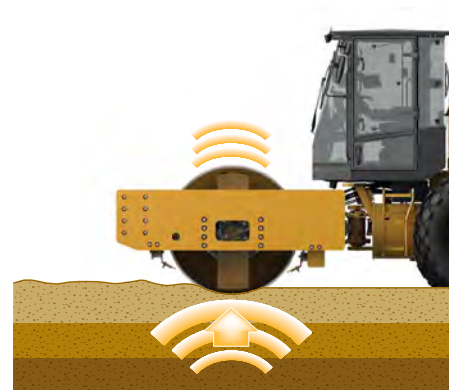
Einer der Nachteile ist, daß die Bandage vibrieren muß, um die Messung durchführen zu können. Aufgrund des Dämpfungseffektes schwach bindiger und bindiger Materialien ist diese Meßmethode für derartige Böden weitgehend ungeeignet. Diese Systeme können für Anwendungen mit ausschließlich statischer Verdichtung oder beim Einsatz von Stampffußbandagen nicht eingesetzt werden.

Ein weiterer Nachteil ist die bereits angesprochene Meßtiefe, die deutlich größer ist als die Dicke einer einzeln zu verdichtenden Schüttung. Infolgedessen wird ein durchschnittlicher Steifigkeitswert über mehrere Lagen ermittelt, der auch von der Steifigkeit des Untergrundes beeinflusst wird.

CMV – WIE FUNKTIONIERT DIESE METHODE?

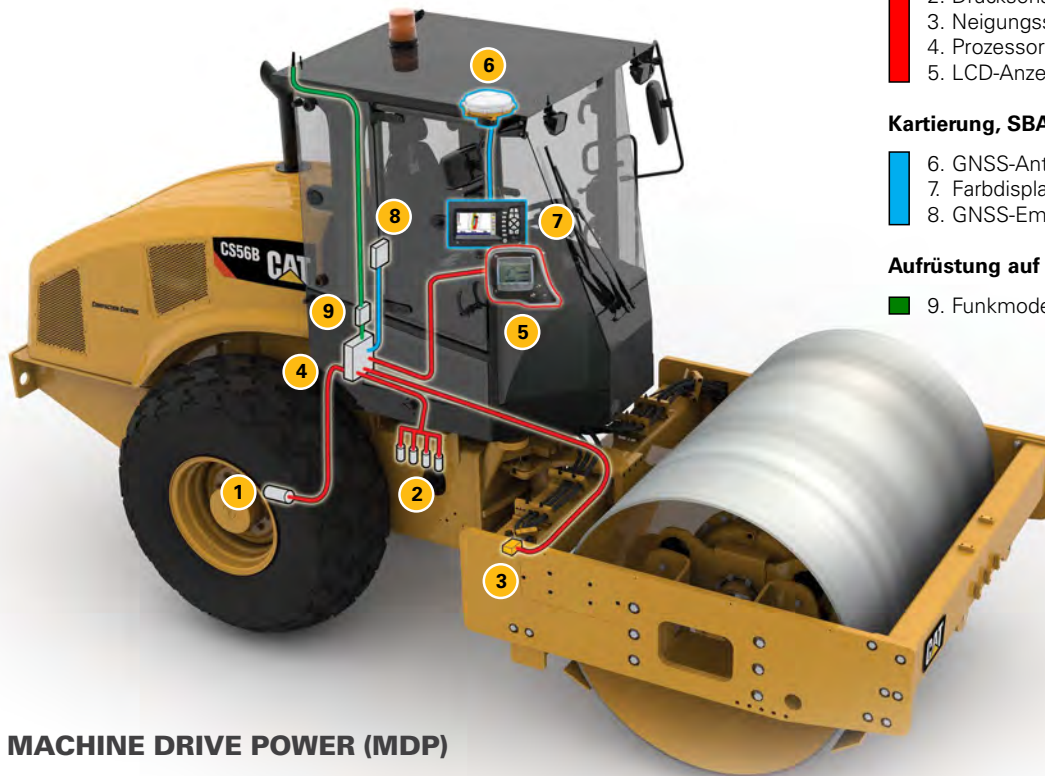


Die vibrierende Bandage überträgt die Vibrationsenergie auf den zu verdichtenden Boden.



Die Schwingantwort des steifer werdenden Bodens wird vom Beschleunigungssensor erfaßt und gemessen.

Der CMV-Wert ist ein theoretischer Wert, der Hinweise über die Bodensteifigkeit liefert.



Meßsystem

- 1. Drehzahlsensor
- 2. Drucksensoren
- 3. Neigungssensor
- 4. Prozessor
- 5. LCD-Anzeige

Kartierung, SBAS

- 6. GNSS-Antenne
- 7. Farbdisplay
- 8. GNSS-Empfänger

Aufrüstung auf RTK

- 9. Funkmodem

MACHINE DRIVE POWER (MDP)

Auf der Antriebsleistung basierende Messung – Mit diesem neuen, innovativen Meßverfahren wird der Rollwiderstand erfaßt, der der Vorwärts- bzw. Rückwärtsbewegung des Verdichtungsgerätes entgegenwirkt. Zu Beginn der Verdichtung sinkt die Bandage tiefer in den lockeren Boden ein und es ist eine bestimmte Antriebsleistung erforderlich, um den Rollwiderstand zu überwinden. Mit dem Arbeitsfortschritt wird der Boden dichter, Steifigkeit und Tragfähigkeit nehmen zu und die erforderliche Antriebsleistung nimmt ab. Je weniger Widerstand das Material also der darüberrollenden Bandage entgegensetzt, desto geringer ist die Antriebsleistung, die die Walze benötigt, um über den zu bearbeitenden Boden zu fahren. Der Rollwiderstand und die zu seiner Überwindung notwendige Antriebsleistung können daher mit der Steifigkeit des Materials verknüpft werden. Derzeit bietet nur Caterpillar dieses – als Machine Drive Power (MDP) bezeichnete – Meßverfahren an, das viele Vorteile beinhaltet.

Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen dem MDP-Wert und der Spurtiefe aus dem – dieser Methode ähnelnden – Proof-Rolling-Verfahren. Außerdem korreliert der Meßwert stark mit der Bodensteifigkeit. Der größte Vorteil der auf der Antriebsleistung basierenden Messung ist jedoch,

daß sie greifbarer ist und eine unmittelbare Berechnung und Abschätzung der Tragfähigkeit des Bodens ermöglicht. Ist der Boden fest genug, um die vom Verdichtungsgerät zu erbringende Antriebsleistung auf ein Mindestmaß zu reduzieren, dann ist er stabil genug, um den Anforderungen an die Verdichtung zu entsprechen. Genau diese Beziehung, auf die sowohl bei der statischen als auch der dynamischen Verdichtung zurückgegriffen werden kann, ist der ureigenste Grund, warum Böden überhaupt verdichtet werden.

Da die auf der Antriebsleistung basierende Methode zur Verdichtungsmessung keine Vibration zur Abschätzung der Bodensteifigkeit erfordert, kann sie bei allen bindigen und nichtbindigen Materialien eingesetzt werden. Sie funktioniert gleichermaßen bei Stampffuß- wie auch bei Glattmantelbandagen als auch bei ein- oder ausgeschaltetem Vibrationssystem. Aus diesen Gründen ist dieses Meßverfahren wesentlich vielseitiger und kann bei weit mehr Anwendungen eingesetzt werden, als das für Systeme mit Beschleunigungsmessungen der Fall ist.

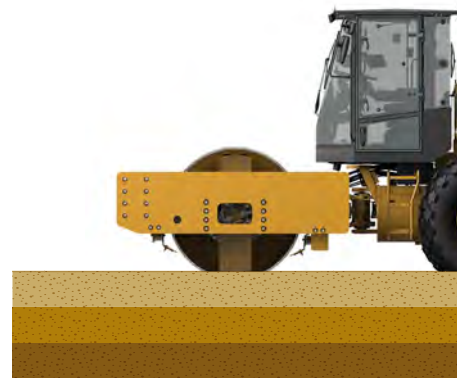
Auf der Antriebsleistung basierende Systeme messen nicht so tief, wie Systeme mit Beschleunigungsmessern: je nach Bodenzusammensetzung und Leistungsmerkmalen des Verdichtungsgerätes zwischen 30 und 60 cm. Diese Meßtiefe entspricht eher einer normalen Schütthöhe. Daher wird nur der zu verdichtende Boden gemessen und nicht ein Mittelwert erfaßt, der aus mehreren Schichten und/oder der Unterlage resultiert. Hinzu kommt, daß diese Meßtiefe auch wesentlich besser mit der Prüftiefe tragbarer Meßgeräte harmoniert, was letztlich zu einer besseren Korrelation führt.

Auf der Antriebsleistung basierende Systeme weisen allerdings auch einige Nachteile auf. Da die Meßtiefe gegenüber den auf Beschleunigungsmessungen beruhenden Systemen geringer ist, eignen sie sich manchmal nicht so gut, um verborgene Objekte oder gestörte Bereiche in der Unterlage identifizieren zu können. Bei Nutzung der Vibration können die Informationen, die den ungeübten Fahrer auf den Zustand des Abhebens der Bandage hinweisen, nicht bereitgestellt werden.

MDP – WIE FUNKTIONIERT DIESE METHODE?



Das Fahren über einen weichen Boden erfordert mehr Antriebsleistung.



Das Fahren über einen steifen Boden erfordert weniger Antriebsleistung.

Da mit dem MDP-Verfahren die Antriebsleistung gemessen wird, die zur Überwindung des Rollwiderstandes erforderlich ist, wird im Vergleich zu den herkömmlichen Systemen ein aussagekräftigerer und direkterer Bezug auf die Bodensteifigkeit genommen.

Faktoren, die die Ergebnisse der walzenintegrierten Messung beeinflussen

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Vibrationsverdichtung um einen komplexen Prozeß, bei dem zahlreiche Faktoren die zum Erreichen der Soll-dichte erforderliche Gesamtverdichtungskraft beeinflussen. Während mit den herkömmlichen Prüfmethode unter Verwendung tragbarer Meßgeräte gerade einmal rd. 1 % der Gesamtfläche erfaßt werden können, werden mit Hilfe der walzenintegrierten Messung flächendeckend Daten gewonnen. Damit besteht die Möglichkeit, schlecht verdichtete Bereiche oder „harte Stellen“ zu identifizieren und Schritte zur Nachbesserung einzuleiten, was zu einem homogeneren Endergebnis der Verdichtung und damit zu einer besseren Qualität führt.

In Abhängigkeit von der eingesetzten Methode gibt es eine Reihe von Faktoren, die die Ergebnisse der walzenintegrierten Messung und deren Korrelation mit den bewährten Feldmessungen beeinflussen. Die Auswirkungen all dieser Faktoren müssen bekannt sein, um dieses Meßverfahren im vollen Umfang nutzen zu können. Drei Hauptfaktoren sind dabei von Bedeutung:

- die korrekte Vorbereitung des zu prüfenden Abschnittes,
- die Prüfmethode und die Datenerfassung sowie
- die Maschinenparameter.

Vorbereitung eines Prüfbereiches

Die korrekte Vorbereitung des zu prüfenden Bereiches einer Baustelle und die genaue Kontrolle des Zustandes des einzubauenden Materials sind von grundlegender Bedeutung für die Qualität der Meßwerte. Können Materialhomogenität und gleichmäßige Verdichtung sowohl für das Planum als auch für den einzubauenden Boden nicht gewährleistet werden, kann sich das unmittelbar auf die Meßwerte auswirken.

1. Herstellung der Tragschicht oder des Unterbaus aus unterschiedlichen Baustoffen

Häufig werden unterschiedliche Materialien innerhalb der einzelnen Schichtebenen des Baukörpers verwendet. Beispielsweise kann eine aus hartem, gebrochenem Gestein bestehende Tragschicht an eine aus relativ weichem Ton bestehende Tragschicht angrenzen. Bei der Überdeckung mit einer dicken Kiesschicht von vielleicht 1 m werden die auf der Gesteinstragschicht gemessenen CMV-Werte wesentlich höher sein als die Werte auf der Tontragschicht. Bei der Prüfung der Dichte mit einem tragbaren Prüfgerät würden sich nahezu identische Werte ergeben, da diese Geräte nur den Bereich der Kiesschicht erfassen. Die Steifigkeit der Tragschicht wirkt sich erheblich auf die Messung mit Beschleunigungssensoren aus, kann aber auch einen begrenzten Einfluß auf die MDP-Meßmethode haben.

Eine steifere Unterlage führt dazu, daß sich das darauf geschüttete Material leichter verdichten läßt und das Erreichen eines höheren Verdichtungsgrades möglich ist. Aus diesem Grund empfiehlt Caterpillar, die Unterlage flächendeckend im Prüfmodus mit der Walze abzufahren und zu kartieren oder mittels des Proof-Rolling-Verfahrens deren Zustand zu ermitteln, bevor neues Schüttgut aufgebracht,



Vorbereitung eines Prüfbereichs

verteilt und verdichtet wird. Wie oben bereits erwähnt, besteht damit die Möglichkeit, schlecht verdichtete Bereiche oder „harte Stellen“ zu identifizieren und nachzubessern, damit in den darüberliegenden Schichten eine gleichmäßige Verdichtung erreicht werden kann.

2. Bodenart

Die Bodenart beeinflusst die CMV- und MDP-Meßergebnisse erheblich, da sich die Federkonstante des Bodens und dessen Dämpfungsrate bei bindigen, gemischt-körnigen und körnigen Böden stark unterscheiden. Das beeinflusst die Reaktion des Bodens auf die eingeleitete Vibration und somit die Messung.

3. Wassergehalt

Grundsätzlich sind die Verdichtungsarbeiten unter den bekannten, zulässigen Bodenverhältnissen auszuführen. Verdichtungsversuche dürfen nicht auf einem nassen, schwammigen Boden oder mit Wasser gesättigtem Material vorgenommen werden. Der Wassergehalt eines Bodens ist eine variable Größe, die sich erheblich auf das Verdichtungsergebnis auswirkt, und Schwankungen kommen häufig auf Baustellen vor – eine der Hauptursachen für die Streuung der CMV-Werte bei ein und derselben Bodenart. Der Auftragnehmer muß diese Einflußgröße unter Kontrolle halten: entweder Wasser hinzugeben mit Hilfe eines Wasserwagens oder den Boden beispielsweise mit einer Scheibenegge auflockern und trocknen lassen. Die Verdichtung ist im Bereich des optimalen Wassergehaltes durchzuführen, der bei nichtbindigen Böden zwischen 4 und 12 % und bei bindigen zwischen 9 und 22 % liegt.



Da das Ausfüllen der Hohlräume zwischen den Bodenpartikeln vom Wassergehalt abhängt, werden die von walzenintegrierten Meßsystemen generierten und auf der Bodensteifigkeit basierenden Meßwerte maßgeblich durch ihn beeinflusst. Ist mehr Luft in den Hohlräumen enthalten, verringert deren Kompressibilität den Meßwert. Ist dagegen mehr Wasser vorhanden, wird aufgrund dessen Inkompressibilität ein höherer Meßwert erzeugt. An einem bestimmten Punkt ist so viel Wasser präsent, daß es als Schmierstoff zwischen den Partikeln fungiert und diesen ermöglicht, sich übereinanderzuschieben, was den CMV-Wert wiederum senkt.

Ein Vorteil der walzenintegrierten Messung äußert sich darin, daß der Wassergehalt eines

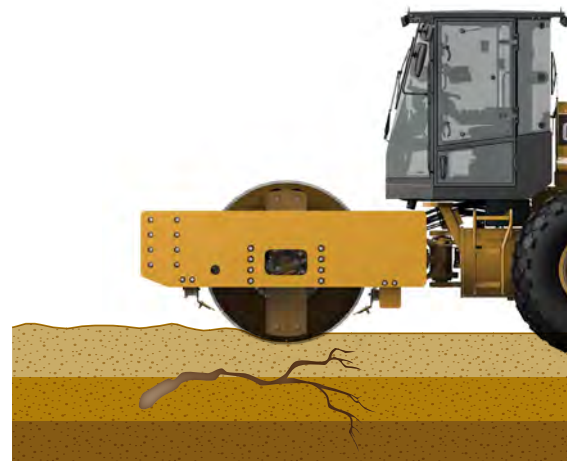
Bodens indirekt dadurch ermittelt werden kann, wie gut der Boden verdichtbar ist. Ein Verdichtungsgerät, das auf körnigem Material arbeitet, benötigt beispielsweise mehr Übergänge, um den Sollwert zu erreichen, da der Boden austrocknet: je trockener der Boden ist, desto mehr Übergänge sind erforderlich. Der Fahrer kann mit Hilfe der ihm auf einem Bildschirm angezeigten Werte reagieren und einen Wasserwagen anfordern, um zu trockene Bereiche zu wässern. Auf feuchten Böden kann die eingeleitete Verdichtungsenergie bewirken, daß das Wasser „stelzt“, also von unteren Schichten bis zur Oberfläche aufsteigt, und dadurch höhere Meßwerte generiert werden. In diesem Fall wird der Walzenfahrer den Boden auflockern lassen, damit das überschüssige Wasser verdunstet.

4. Im Boden verborgene Objekte

Beim Verdichten einer augenscheinlich gleichmäßigen Materialschüttung wird mit der walzenintegrierten Messung fallweise in einem kleinen Bereich ein wesentlich höherer oder niedrigerer Wert als in den angrenzenden Bereichen angezeigt. Beim Nachkontrollieren dieses Abschnittes mit einem mobilen Meßgerät – wie z.B. einer Isotopensonde oder einem Leichten Fallgewichtsgerät – ergibt sich selten dieselbe Meßwertänderung wie bei der maschinenintegrierten Prüfung, da sich die Meßtiefen deutlich unterscheiden.

Wahrscheinliche Ursachen für einen hohen punktuellen Meßwert aus der walzenintegrierten Messung sind ein großer Stein oder ein in wenigen Metern Tiefe verborgenes Stück Beton. Dagegen könnte ein punktuell niedrigerer Meßwert auf einen im körnigen Material vorhandenen großen Tonklumpen oder auch einen Gummireifen hindeuten. Um die örtliche Abweichung der maschinell ermittelten Meßwerte begründen zu können, bleibt nichts anderes übrig, als diesen Bereich auszuheben – eine nicht gerade brauchbare Lösung.

Eine Sonde, die mit einem langen Stab in den Boden getrieben wird oder ein Dynamisches Konuspenetrometer können ebenfalls Aufschluß über die Art der Störung geben, ohne graben zu müssen. Eine entsprechende Entscheidung ist zu treffen, wenn aus der festgestellten Abweichung in den Meßwerten Probleme bei der späteren Nutzung – beispielsweise eines Verkehrsweges – zu erwarten sind. Änderungen in der Tragfähigkeit (Steifigkeit) des verdichteten Bodens können zu höheren Beanspruchungen des Oberbaus führen und damit die Nutzungsdauer verkürzen.



WARNHINWEIS: Bei der Arbeit auf Baustellen, auf denen sich möglicherweise nicht explodierte Munition unter der Oberfläche befinden könnte, sollte vor dem Aushub und der Verdichtung unbedingt ein Metalldetektor eingesetzt werden.

Prüfmethode und Datenerfassung

1. Verknüpfung mit den Meßwerten einer bewährten Feldmeßmethode

Unternehmen, die nicht mit walzenintegrierten Meßverfahren vertraut sind, möchten natürlich die Meßwerte mit den Ergebnissen einer bewährten Feldmeßmethode verknüpfen. Die Prüfung mittels einer Isotopensonde oder das Sandersatzverfahren galten jahrelang als Standardmethoden mit einer guten Korrelation, jedoch bilden sie aufgrund des geringen Meßvolumens und der begrenzten Meßtiefe nicht den vollen Umfang der Bodeneigenschaften ab.

Die zur Verdichtungskontrolle eingesetzte Feldmessung kann die Korrelation mit einem maschinell ermittelten Meßwert unmittelbar beeinflussen. Das bei der walzenintegrierten Verdichtungsmessung (CMV oder MDP) gemessene Effektivvolumen ist wesentlich größer als bei einer konventionellen Meßmethode. Keines der bekannten Feldmeßgeräte mißt weder in derselben Tiefe noch dasselbe Bodenvolumen oder dieselben Bodeneigenschaften.

Aufgrund der relativ einfachen Anwendung werden üblicherweise folgende Feldmeßmethoden eingesetzt, auf die weiter oben bereits hingewiesen wurde:

- Ersatzverfahren
Das in mehreren Schritten durchzuführende Sandersatzverfahren zeichnet sich durch eine bewährte Genauigkeit aus, während beim Densitometerverfahren die Qualität der Messung davon abhängt, ob der Ballon in der Lage ist, sich den Unebenheiten der Grubenwandung vollständig anzugleichen.

- Isotopensonde
Von allen radiometrisch messenden Verfahren bietet die Einstechmethode mit der Möglichkeit, in einer Tiefe zwischen 50 und 300 mm zu prüfen, die höchste Genauigkeit.
- Leichtes Fallgewichtsgerät
Im Vergleich zu walzenintegrierten Meßsystemen wird nur ein effektives Materialvolumen von ca. 1 % erfaßt, wodurch jede Ungleichmäßigkeit des Materials an der Prüfstelle durch den enormen Volumenunterschied stärker betont wird.
- Rammsondierung
Bei dem Meßverfahren wird eine kegelförmige Sonde mit einer festgelegten Energie in den Boden gerammt mit dem Vorteil, daß die Bodenfestigkeit in größeren Tiefen als bei anderen Verfahren gemessen werden kann.

Die Korrelationen zwischen den Meßwerten von Feldmeßgeräten und walzenintegrierten Meßsystemen sind veränderlich und hängen von der Art der jeweiligen Prüfung und ihrer Anzahl ab. Beim Versuch, maschinell erfaßte Meßwerte mit denen einer bewährten Feldmessung zu korrelieren, werden die besten Ergebnisse mit dem Lastplattendruckversuch oder dem Fallgewichtsgerät erzielt.

Es ist außerdem zu bedenken, daß sich das Meßergebnis, das Aufschluß über die Bodensteifigkeit gibt, beim Einsatz der walzenintegrierten Messung während des Meßvorganges ändert.



Aus diesem Grund kann man nicht zurückfahren und erwarten, den gleichen Meßwert zu erhalten, der bei einem vorherigen Übergang generiert wurde. Daraus können fallweise Probleme resultieren, wenn versucht wird, zur Verdichtungskontrolle die CMV- oder MDP-Meßwerte durch den Vergleich mit Werten aus den herkömmlichen Feldmeßmethoden zu überprüfen.

Bestimmte Feldmessungen können häufig am selben Ort oder in dessen unmittelbarer Nähe wiederholt werden, weil die Eigenschaften des Bodens bei der Messung nicht beeinflusst werden. Dagegen übt eine Walze auf Grund ihres Gewichtes bei jedem Übergang – auch bei einer Meßfahrt – einen Einfluß auf den Boden aus. So ist der Plattendruckversuch auch eine der Prüfmethode, die eine Änderung der Bodenstruktur nach sich ziehen.

Die von der Walze aus gemessenen Werte werden wiederholbarer, je mehr sich der Boden seinem maximalen Verdichtungszustand nähert. An diesem Punkt sind äußerst geringfügige Änderungen bei den Verdichtungsmessungen zwischen den Übergängen zu verzeichnen. Ist die Bodenstruktur jedoch schwach, schwanken die Verdichtungswerte, weil die Bodenstruktur zwar bis zu einem gewissen Punkt optimiert werden kann, jedoch beim nächsten Übergang

zusammenbricht. Diese Erscheinung wird als Auflockerung bezeichnet und kommt bei einigen körnigen Bodenarten häufig vor.

2. Umfang der aufgenommenen Meßwerte

Ein zu kleiner Wertebereich und/oder eine zu geringe Zahl an Meßwerten können die Korrelation mit den maschinell ermittelten Werten negativ beeinflussen. Punktwolken, die nicht genug Informationen liefern, um eine qualitative Beurteilung vornehmen zu können, sind unbedingt zu vermeiden.

3. Datenerfassung

Unsicherheiten bei der örtlichen Zuordnung der maschinell ermittelten Meßwerte zu den Ergebnissen aus den Feldmessungen können ebenfalls die Korrelation ungünstig beeinflussen. Bei der Gegenüberstellung der mit unterschiedlichen Methoden an diskreten Orten ermittelten Meßwerte ist daher besonders sorgsam vorzugehen. Vorteilhafterweise ist das Verdichtungsgerät mit einem GNSS-Mapping-System auszurüsten, um die Positionswerte im Versuchsbereich exakt zuordnen zu können.

Maschinentechnische Einflußgrößen

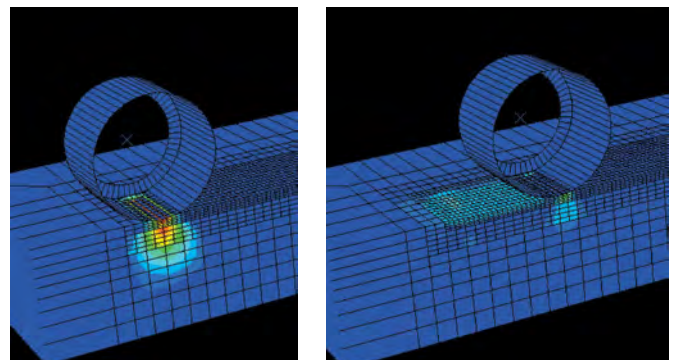
Entwicklungsseitig und nicht zuletzt aufgrund umfangreicher praktischer Anwendungen ist bekannt, daß die walzenintegrierten Meßverfahren von bestimmten maschinentechnischen Faktoren beeinflusst werden, deren unsachgemäßer Einsatz zu irreführenden Meßergebnissen führen kann.

1. Amplitude

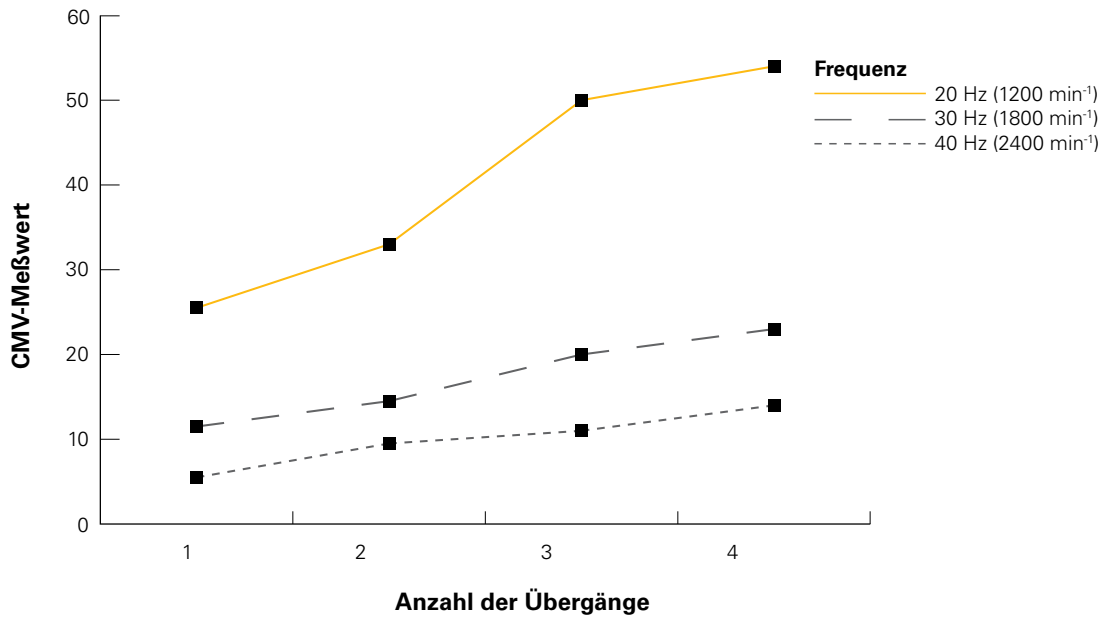
Arbeitet die Bandage mit einer großen Amplitude, wird die Vibrationsenergie tiefer in den Boden übertragen. Das wiederum beeinflusst die maschinell ermittelten Meßwerte, weil sich das Meßvolumen des Bodens vergrößert. Gleichzeitig nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, daß in größeren Tiefen unterschiedliche Bodenarten und -strukturen vorhanden sind.

Möchte man genau das prüfen, sollte eine große Amplitude eingesetzt werden. Ist

man dagegen nur an Informationen über die obersten Schichten interessiert, wird eine kleinere Amplitude empfohlen, bei der die Meßtiefe bereits auch 1,0 m überschreiten kann.



Die Tiefenwirkung nimmt bei der Vibrationsverdichtung mit größer werdender Amplitude zu.



2. Frequenz

Bei der von Caterpillar genutzten CMV-basierten Meßmethode zur Bestimmung der Verdichtung werden mit Hilfe elektronischer Komponenten die von der Bandage abgegriffenen Beschleunigungssignale in eine Halbton-, eine Grundton- und eine Obertonkomponente zerlegt. Für die Berechnung des CMV-Wertes ist das Verhältnis zwischen der Oberton- und der Grundtonkomponente maßgebend. Wird die Einstellung der Erregerfrequenz des Bodenverdichtungsgerätes geändert, ändern sich die entsprechenden Meßwerte, auch wenn die Bodensteifigkeit dieselbe bleibt. Das ist darauf zurückzuführen, daß die CMV-Messung auf einem Boden mit einer bestimmten Steifigkeit tendenziell einen höheren Meßwert bei einer niedrigen Frequenz ergibt und einen geringeren bei einer hohen Frequenz. Die Gründe dafür sind komplex und sind auf das Verhältnis zwischen der Eigenfrequenz des Bodens und der Erregerfrequenz an der Bandage zurückzuführen.

Das Diagramm verdeutlicht, wie sich eine Änderung der Erregerfrequenz auf den CMV-Meßwert prinzipiell auswirkt. Wenn sich alle anderen Maschinen- und Bodenparameter nicht ändern (z.B. Fahrgeschwindigkeit, Amplitude, Bodenart usw.), zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den bei jeder Frequenzeinstellung gemessenen CMV-Werten. Das gilt unabhängig von der Bodensteifigkeit, die mit der Anzahl der Übergänge zunimmt.

3. Fahrgeschwindigkeit

Meßwerte walzenintegrierter Systeme werden in einem gewissen Maße von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Den Meßergebnissen zufolge verringert eine

höhere Fahrgeschwindigkeit in der Regel die CMV-Werte, kann jedoch auch die MDP-Werte erhöhen. Der Einfluß kann nur schwer bestimmt werden, denn Veränderungen hinsichtlich Bodenart, Wassergehalt und der übrigen Faktoren wirken sich ebenfalls auf das Ergebnis aus.

Sind mehrere Übergänge erforderlich, um den geforderten Verdichtungsgrad zu erzielen, ist der Einsatz der Vibration in Kombination mit einer niedrigen Fahrgeschwindigkeit am wirksamsten. Der Abstand der Vibrationsschläge entlang des Fahrweges verringert sich, und es wird mehr Energie in den Boden eingeleitet, der schneller und in einer größeren Tiefe verdichtet wird. Infolgedessen sind weniger Übergänge sowie ein geringerer Zeitaufwand erforderlich, um die Verdichtungsanforderungen zu erfüllen.

Dies wirkt sich auch vorteilhaft auf den Kraftstoffverbrauch aus: Bei zwei Übergängen mit geringer Fahrgeschwindigkeit wird weniger Kraftstoff verbraucht als bei sechs Übergängen mit hoher Geschwindigkeit. Eine allgemeine Faustregel besagt: Langsam fahren, um schnell zu verdichten und die Effizienz zu steigern, aber nicht so langsam, daß es zum Abheben der Bandage oder zur Auflockerung des Bodens kommt. Beim Einsatz walzenintegrierter Meßsysteme haben sich gleichbleibende Geschwindigkeiten zwischen ca. 1 und 2,5 km/h für Steinschüttungen, Schluff und Ton und 2 bis 5 km/h für Sand und Kies bewährt. Die automatische Drehzahlregelung, mit der Cat-Walzen der Baureihe B ausgestattet sind, unterstützt die Einhaltung gleichbleibender Walzgeschwindigkeiten.

4. Fahrtrichtung

Die Fahrtrichtung – vorwärts oder rückwärts – wirkt sich auf die mit walzenintegrierten Meßsystemen ermittelten Werte bei einer bestimmten Bodensteifigkeit aus. Die Differenz zwischen den Meßwerten im Vorwärts- und im Rückwärtsbetrieb bewegt sich normalerweise zwischen 5 bis 20 %, wobei bei extrem weichen Böden höhere Differenzen auftreten.

Die Meßwerte unterscheiden sich abhängig von der Fahrtrichtung, da die Rotation des Exzentergewichtes entweder dem auf die Bandage übertragenen Nettodrehmoment hinzugefügt oder davon abgezogen wird (auch aufgrund des Gewichtsausgleiches und ob sich die Räder fahrtrichtungsbedingt vor oder hinter der Bandage befinden sowie weiterer Faktoren). Das resultierende Drehmoment beeinflusst die Richtung der wirksamen Vibration entweder mehr zum bereits verdichteten oder zum weicherem, noch zu verdichtenden Boden.

5. Vibrationsmodus

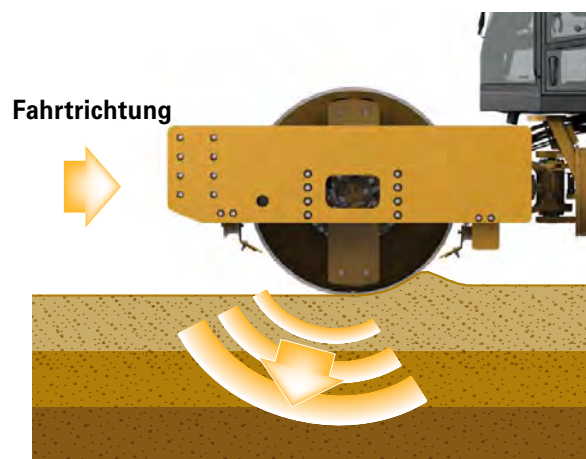
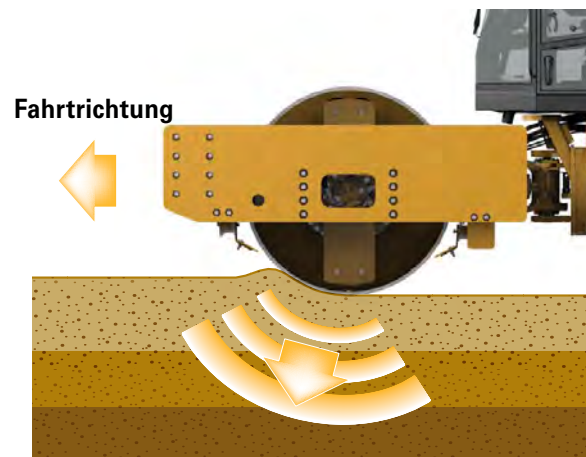
Ein aktiviertes Vibrationssystem kann die Meßwerte ebenfalls beeinflussen: materialabhängig ist der Einfluß entweder bedeutend oder vernachlässigbar. Versuchsergebnissen zufolge liefern Systeme, bei denen die Messung bei abgeschalteter Vibration durchgeführt werden kann, zuverlässigere Ergebnisse, weil die Meßwerte durch weniger variable Größen beeinflusst werden. Das auf der Antriebsleistung basierende MDP-System nutzt genau diesen Vorteil aus.

6. Abheben oder Sprungbetrieb

Nimmt die Steifigkeit eines Bodens zu, nähert sich dessen Eigenfrequenz der Vibrationsfrequenz der Bandage an. Bei jeder Umdrehung der Unwucht kommt es zu einem kurzfristigen Kontaktverlust zwischen Bandage und Boden, und die Verdichtung erfolgt hauptsächlich durch das periodische Aufschlagen der Bandage. Je mehr sich die Maschine dem Abheben nähert, desto unzuverlässiger ist der CMV-Meßwert.

Wird bei zunehmender Bodensteifigkeit weiterhin mit einer großen Amplitude verdichtet oder mit zu geringer Walzgeschwindigkeit gearbeitet, wechselt die Bandage in den Betriebszustand des Springens. Die Schlagintensität der Bandage ist nicht mehr konstant: harte und weiche

FAHRTRICHTUNG



Wenn die Richtung des Exzentermomentes mit der Fahrtrichtung der Maschine übereinstimmt (Darstellung oben), bewirkt das auf die Bandage übertragene Nettodrehmoment, daß der Beschleunigungssensor den Boden in einem bestimmten Winkel erfährt. Stimmt die Richtung des Exzentermomentes nicht mit der Fahrtrichtung der Maschine überein (Darstellung unten), ändern sich die Drehmomente und der Meßwinkel. Daraus resultieren sich deutlich unterschiedende CMV-Meßwerte im Vorwärts- und im Rückwärtsbetrieb.

Schläge wechseln einander ab. Im Extremfall hebt die Bandage bei halber Erregerfrequenz vom Boden ab und trifft nur noch bei jeder zweiten Umdrehung der Unwucht mit einem noch härteren Schlag auf dem Boden auf. Der RMV-Wert (Resonance Meter Value) steigt an, während der CMV-Wert auf ungefähr den halben Betrag abfällt, der dem Zustand der Unterlage ohne Sprungbetrieb entspricht. So können in einer Walzspur mit normalerweise hohen CMV-Werten Bereiche mit zu niedrigen Meßwerten vorkommen, die durch den Sprungbetrieb in diesen Teilabschnitten verursacht wurden und den tatsächlichen Zustand des Bodens nicht repräsentieren.

[VERFAHREN DER WALZENINTEGRIERTEN MESSUNG]

Bodenverdichtungsgeräte, die mit einem integrierten Meßsystem ausgestattet sind, können dem Fahrer in Echtzeit Informationen über die Bodensteifigkeit geben. Die Wirksamkeit dieser Meßmethode wird von zahlreichen variablen Faktoren beeinflusst, was sich unmittelbar auf die Kontinuität der Messung auswirkt. Aus diesem Grund werden die Meßwerte häufig mit den Ergebnissen einer der zuvor erwähnten Feldmeßmethoden korreliert. Mit der zunehmenden Weiterentwicklung dieser Systeme wird auch ihre Funktionsweise verständlicher, und die Ergebnisse werden in höherem Maße akzeptiert.

Das walzenintegrierte Meßverfahren wird üblicherweise in zwei Betriebsarten angewendet: im Produktions- und im Prüfmodus.

Produktionsmodus

Der Produktionsmodus wird angewendet mit dem Ziel, möglichst viel Boden so schnell und effizient wie möglich anforderungsgerecht zu verdichten. Der Maschinist erhält in Echtzeit Angaben zur Bodensteifigkeit und kann minderverdichtete Bereiche identifizieren, die nachgebessert werden müssen.

In diesem Modus wird der Verdichtungsprozeß in der Regel mit einer großen Amplitude eingeleitet, und es wird nur so lange verdichtet, bis der Sollwert erreicht ist. Mit Hilfe der laufend angezeigten Meßwerte kann der Fahrer feststellen, welche Bereiche bereits korrekt verdichtet wurden. Die Aufgabe besteht darin, die Arbeit effizient durchzuführen und so viel Material wie möglich zu verdichten und Bereiche, die bereits ausreichend steif sind, nicht noch mehr zu verdichten. Da die Maschine mit einer großen Amplitude arbeitet, kann sie an einigen Stellen in den Betriebszustand des Abhebens übergehen. Aufgrund der variablen Einflußfaktoren Fahrgeschwindigkeit, Fahrtrichtung,

Betriebszustand und Wassergehalt des Bodens variieren die im Produktionsmodus erfaßten Meßwerte üblicherweise stärker als im Prüfmodus. Die angezeigten Werte können als Richtlinie für die Verdichtungsmessung gelten, und der Mangel an ganz genauen oder weniger streuenden Meßwerten fällt zu diesem Zeitpunkt nicht so sehr ins Gewicht.

Prüfmodus

Nach dem Abschluß der Verdichtung kann in den deutlich präziseren Prüfmodus gewechselt werden und die Walze wird zum Prüfgerät. Zahlreiche variable Größen, einschließlich der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrtrichtung, werden laufend kontrolliert und in den zulässigen Grenzen konstant gehalten, um den Einfluß auf die Meßwerte zu minimieren.

Der Prüfmodus wird eingesetzt, wenn die zuständigen Behörden „Felddaten“ fordern, um die erzielte Bodensteifigkeit in einem Teilbereich oder im gesamten Bauabschnitt exakt nachzuweisen. Unabhängig davon kann das Verfahren in regelmäßigen Abständen während des Baus durchgeführt werden, indem mit der Walze auf kontrollierte Art und Weise über einen fertiggestellten Bauabschnitt gefahren wird.

Um genaue Ergebnisse erzielen zu können, muß der Fahrer dafür Sorge tragen, daß alle variablen Einflußgrößen so konstant wie möglich gehalten werden. Der Prüfmodus kann als die Präzisionsphase in der Bodenverdichtung bezeichnet werden.



EMPFOHLENE VORGEHENSWEISE FÜR DEN NACHWEIS DER VERDICHTUNG

1. Den zu verdichtenden und zu prüfenden Baustellenbereich abstecken und ein Walzschema festlegen, das dem Fahrer ermöglicht, während der Verdichtungsprüfung in Vorwärtsrichtung zu fahren.
2. Eine Geschwindigkeit zwischen 2,5 und 4 km/h festlegen, die beibehalten werden kann: Je langsamer, desto besser. Der Einsatz der automatischen Drehzahlregelung gewährleistet eine konstante Geschwindigkeit, was nicht nur zu einer gleichmäßigeren Verdichtung, sondern auch zu weniger schwankenden Meßwerten führt.
3. Für den Prüfmodus eine kleine Amplitude einstellen. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit verringert, daß die Bandage in den Betriebszustand des Abhebengeräts gerät, und außerdem reicht die Messung nicht zu tief in den Boden hinein. Zudem können die Meßwerte so besser mit denen anderer Prüfmethode korreliert werden.
4. Die Vibration einschalten (nicht bei Walzen, die mit dem MDP-System ausgerüstet sind) und anfahren, um die Verdichtungsmessung bei konstanter Fahrgeschwindigkeit, Amplitude und Frequenz während der Vorwärtsfahrt durchzuführen.
5. Die Walzbahnen sollten sich nur berühren oder geringfügig überlappen: Überlappungen möglichst nur am Bahnende oder in den Wendebereichen. Hinweis: Überlappte Bereiche können als mehrfache Übergänge betrachtet werden und Abweichungen der Meßwerte hervorrufen.
6. Die manuell durchzuführenden Feldmessungen können aufwendig sein und müssen innerhalb der abgesteckten Bereiche so positionsgenau wie möglich vorgenommen werden. Die meisten walzenintegrierten Meßsysteme ermöglichen ohne die optionale GNSS- oder GPS-Funktion keine automatische Datenspeicherung. Es wird empfohlen, eine Kalkulationssoftware wie Excel zu verwenden, um für die Analyse die Daten fahrtrichtungsabhängig sortieren und ausschließlich die Daten aus dem Vorwärtsbetrieb heranziehen zu können. Die Stellen, die als wichtig genug erachtet werden, um sie erneut zu prüfen oder die entsprechenden Meßwerte mit einer Feldmeßmethode zu korrelieren, sind vor Ort zu markieren.
7. Der Wassergehalt des Bodens ist in einem Raster über den gesamten verdichteten und geprüften Bereich zu bestimmen, um die Meßergebnisse entsprechend beurteilen zu können. Mit Hilfe des Rasters, das auf die Baustellengröße und die Anforderung des Auftraggebers abzustimmen ist, kann der Wassergehalt graphisch dargestellt werden. Die erforderlichen Bodenproben sollten sobald wie möglich nach dem Abschluß der Verdichtungsarbeiten entnommen werden.
8. Die manuell aufgezeichneten Daten sind zu überprüfen und die Bereiche auszuwählen, die mit den Ergebnissen anderer Meßmethoden verknüpft werden sollen. Dabei ist auf eine ausreichende Anzahl und Spreizung der Meßwerte zu achten.
9. Bestimmung der Korrelation der Meßwerte an den vorab markierten Stellen. Nicht approximieren, denn der Zustand des Bodens kann sich bereits in einem geringen Abstand erheblich ändern.

HINWEIS: Um die Funktionen der walzenintegrierten Meßsysteme im vollen Umfang nutzen zu können, ist eine GNSS- oder GPS-Mapping-Funktion erforderlich, damit alle Daten positionsgenau aufgezeichnet werden. Für weitere Informationen über die „Intelligente Verdichtung“ wird auf das folgende Kapitel verwiesen.

Zusammenfassung zum walzenintegrierten Meßverfahren

Bei jedem Verdichtungsvorhaben sind Qualität und Kosten die Hauptanliegen. Das effiziente Erreichen der geforderten Verdichtungswerte ist dabei von ausschlaggebender Bedeutung. Es gibt zahlreiche Vorgaben und bewährte Methoden für die Bestimmung der Verdichtung im Feld. Bei den walzenintegrierten Meßverfahren werden den Fahrern nun bessere Mittel zur Verfügung gestellt, um die bestmögliche Verdichtungsqualität zu den geringsten Kosten gewährleisten zu können.

Korrekt eingesetzt, ist das Messen von der Walze aus eine ausgezeichnete Methode, allerdings gibt es auch Grenzen. Bei der Anwendung des Verfahrens erfährt man nichts über die Art des Bodens, dessen Wassergehalt sowie die physikalischen Eigenschaften des zu verdichtenden Materials.

Mit der walzenintegrierten Meßmethode wird die Reaktionsfähigkeit des Bodens ermittelt, um auf seine Tragfähigkeit schließen zu können. Bei korrekter Einstellung und sachgemäßem Betrieb stellt eine entsprechend ausgerüstete Vibrationswalze dem Fahrer Informationen zur Verfügung, die er anderenfalls nicht hätte. Dadurch sind geschulte Mitarbeiter in der Lage, in situ Rückschlüsse auf den Bodenzustand ziehen zu können. Die Daten liefern Hinweise auf die Bodensteifigkeit, stellen jedoch auf Grund der variablen Einflußgrößen keine Garantie dar. Geschultes Personal kann die Meßwerte richtig interpretieren und die für den Erfolg der Baumaßnahme erforderlichen Maßnahmen einleiten. Die festgelegten Abläufe sind oft wichtiger als die Technik selbst.



Kapitel 5

INTELLIGENTE VERDICHTUNG

Die *Intelligente Verdichtung* ist die jüngste Weiterentwicklung im Bereich der Bodenverdichtung. Die Möglichkeit, exakt gemessene Verdichtungswerte mit GNSS-Koordinaten positionsgenau verknüpfen und mit Hilfe eines Bildschirms in der Fahrerkabine visualisieren zu können, war – ebenso wie die Aufzeichnung und Speicherung der umfangreichen Daten – bisher undenkbar. Welche weiteren technologischen Innovationen auf uns zukommen, wird die Zeit mit sich bringen. Caterpillar wird mit den erforderlichen Entwicklungen an vorderster Front mitgestalten.



[WAS VERSTEHT MAN UNTER INTELLIGENTER VERDICHTUNG?]

Der Begriff *Intelligente Verdichtung* variiert behörden- und herstellerabhängig und bezeichnet ganz allgemein eine auf den Verdichtungsprozeß angewandte, walzenintegrierte Meßtechnik, die durch Beseitigung der Unsicherheit manueller Messungen die Arbeitseffizienz auf der Baustelle steigert. Mit Hilfe dieser Technik werden dem Walzenfahrer in Echtzeit Informationen zum Verdichtungsstatus und -fortschritt zur Verfügung gestellt.

Daraus läßt sich ableiten, daß es sich bei den zuvor beschriebenen maschinenintegrierten Meßsystemen um eine Art der intelligenten Verdichtung handelt: Sowohl der Walzenfahrer als auch die Baustellenleitung haben in Echtzeit Zugriff auf Informationen, die früher nicht zur Verfügung standen.

Komplexere Systeme können aus den Meßdaten auch graphische Darstellungen generieren sowie die Daten für die spätere Analyse speichern.

Nachfolgend ein Beispiel für eine ältere Definition eines State Department of Transportation (USA) zur *Intelligenten Verdichtung* (Intelligent Compaction):

Intelligente Verdichtung

Das Verfahren beinhaltet das Messen **und Aufzeichnen von Zeit, Position und Verdichtungsparameter** bei der Verdichtung körniger Böden mit einer Vibrationswalze, die mit einem auf Beschleunigungsmessungen basierenden Meßsystem und einem globalen Positionierungssystem ausgerüstet ist.

Es gibt unterschiedliche Definitionen oder Anforderungen, worum es sich bei einem intelligenten Verdichtungsgerät handelt:

Intelligente Verdichtungswalze

Es handelt sich um Vibrationswalzen, die mit einem Meßsystem mit einem Beschleunigungsmesser ausgerüstet und **in der Lage sind, die Messungen der Verdichtungsparameter aufzuzeichnen.**

Gleichzeitig beschreibt die U.S. Federal Highway Administration (FHWA) die *Intelligente Verdichtung* wie folgt:

Der Begriff ***Intelligente Verdichtung*** bezieht sich auf die Verdichtung von Materialien für den Straßenbau, wie Böden, Gesteinskörnungen oder Asphalt, unter Einsatz moderner Vibrationswalzen, die mit einem integrierten Meßsystem, einem **computergesteuerten Auswertesystem, einem Kartierungssystem auf GPS-Basis** und optional mit einer Regelungstechnik ausgestattet sind. Intelligente Verdichtungswalzen ermöglichen die Echtzeit-Darstellung der Verdichtung sowie die zeitnahe Darstellung des Verdichtungsprozesses durch die Integration von Messung, **Dokumentation** und Regelungstechnik. Intelligente Verdichtungswalzen unterstützen die fortlaufende, farbkodierte graphische Darstellung der genauen Walzenposition, der Anzahl der Walzenübergänge und der Steifigkeitsmeßwerte.

Die Europäische Union formulierte entsprechende Anforderungen an die *Intelligente Verdichtung*. Vom Europäischen Ausschuß für Baumaschinen (Committee for European Construction Equipment – CECE) wurde eine Matrix zur Klassifikation von Baumaschinen erstellt, die mit Systemen zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle ausgestattet sind (siehe Anhang).



Es muß ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß jüngere Begriffsbestimmungen zur *Intelligenten Verdichtung* nicht nur deutlich auf das Leistungsvermögen der integrierten Verdichtungsmessung und die Echtzeitdarstellung für den Walzenfahrer, sondern auch auf die Möglichkeiten zur Aufzeichnung der Positionierungsdaten und deren Speicherung für Dokumentationszwecke und weitere Analysen Bezug nehmen. Der Begriff *Intelligente Verdichtung* wird kontinuierlich weiterentwickelt.

Caterpillar vertritt die Auffassung, daß ein intelligentes Verdichtungsgerät in der Lage sein sollte, die Verdichtung zu messen, die Meßwerte mit GNSS-Koordinaten zu verknüpfen, aufzuzeichnen und zu dokumentieren sowie graphisch darzustellen. Damit sind zahlreiche wirtschaftliche Vorteile sowohl für das Unternehmen als auch für den Auftraggeber verbunden. Zum jetzigen Zeitpunkt definiert Caterpillar den Begriff *Intelligente Verdichtung* wie folgt:

Intelligente Verdichtung
Ein System, das die Verdichtung des Bodens mißt, die Meßwerte anzeigt, die Verdichtungsergebnisse aufzeichnet und mit einem GNSS-Mapping-System darstellt sowie die Verdichtungsarbeit der Maschine anhand der Meßergebnisse überwacht oder steuert.

Diese Definition gilt sowohl für Vibrationswalzen als auch für statische wirkende Verdichtungsgeräte, bei denen ein auf Beschleunigungsmessungen basierendes Meßsystem wirkungslos ist. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei MDP (*Machine Drive Power*) um eine neue Technik, die im Vergleich zur Verdichtungsmessung mit einem Beschleunigungsmesser viele Vorteile aufweist.

Wenn im vorliegenden Handbuch im weiteren von *Intelligenter Verdichtung* gesprochen wird, handelt es sich um eine Walze, die mit einem Verdichtungskontrollsystem (entweder CMV oder MDP) ausgestattet ist und über eine Funktion zur Darstellung der Meßergebnisse sowie die Möglichkeit verfügt, die Daten zu Dokumentationszwecken und für die spätere Analyse aufzuzeichnen und zu speichern.

Positionsbestimmung der Walze auf der Baustelle

Das Potential der walzenintegrierten Verdichtungsmessung kann durch die Nutzung eines globalen Navigationssatellitensystems (GNSS), das die genaue Bestimmung der Position des Verdichtungsgerätes auf der Baustelle mit Hilfe der Satellitenkonstellation im All ermöglicht, gesteigert werden.



Die GNSS-Technik ist weitreichend verfügbar und bietet unterschiedliche Genauigkeiten an, für die teilweise maschinenexterne Ausrüstungen benötigt werden, um die Daten für die Positionskorrektur liefern zu können.

Damit ist es möglich, die Verdichtungsmessung exakt an einer beliebigen Position auf der Baustelle durchzuführen und die erreichten Werte einschließlich Übergangszahl, Fahrtrichtung und vieler anderer Einstellparameter der Walze zu kartieren.

Egal, welches walzenintegrierte System für die Verdichtungsmessung eingesetzt wird, es liefert in Echtzeit die erforderlichen Informationen über den Verdichtungszustand des Bodens. Und mit Hilfe einer Kartierungs-Funktion, die die Aufzeichnung und positionsgenaue Darstellung der Meßwerte ermöglicht, werden diese Informationen noch viel nützlicher.

Positionierung – Wie funktioniert das?

Kartierungs-Systeme nutzen das globale Navigationssatellitensystem (GNSS), um Mapping-Daten für jeden aufgezeichneten Meßwert zur Verfügung zu stellen. Dazu gehören das vom U.S. Department of Defense betriebene GPS, das russische GLONASS und andere Systeme, die sich im Aufbau befinden, wie das europäische Galileo und das chinesische Compass.

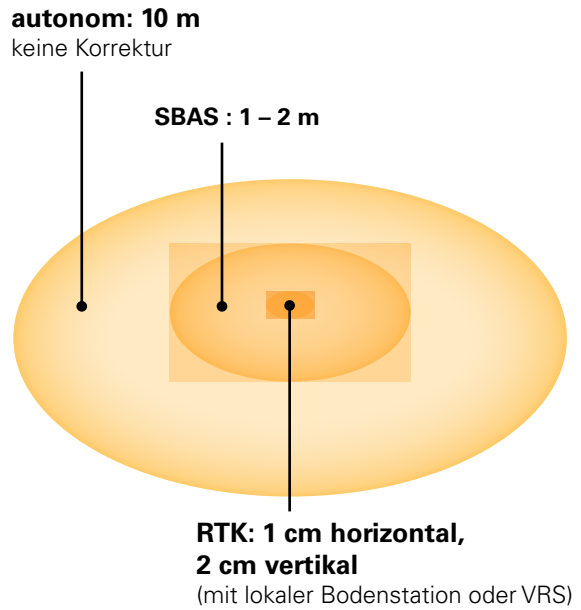
Die Position wird durch Triangulation mit der bekannten Stellung der Satelliten ermittelt. Allerdings sind die Satellitensysteme nicht genau genug, um ohne Korrekturen auskommen zu können. In Bodenverdichtungsgeräte integrierte Mapping-Systeme nutzen diese Möglichkeit zur Korrektur der Satellitensignale, um einen entsprechenden Grad der Genauigkeit zu gewährleisten. Dafür stehen zwei Ergänzungssysteme zur Verfügung: SBAS und RTK.

Die meisten Systeme nutzen SBAS (Satellite Based Augmentation System), um die Positionssignale der Satelliten zu korrigieren. Das SBAS-System trianguliert zu mehreren Bodenstationen mit bekannten „Ankerpunkten“, von denen eine Korrekturmessung geliefert wird. In der Regel wird eine Genauigkeit bis zu 1 m erreicht, maschinenexterne Ausrüstungen sind nicht erforderlich.

Alternativ verstärken viele Hersteller das Signal mit der RTK-Korrektur (Real-Time-Kinematic). Zur Bereitstellung der Korrekturdaten ist der Einsatz lokaler Bodenfunkstationen erforderlich.

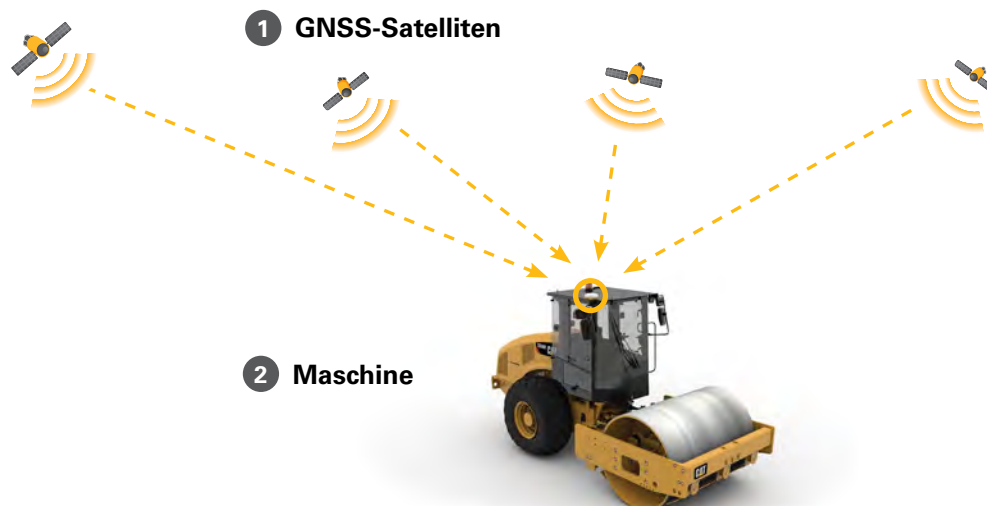
Jüngere Techniken ermöglichen ebenfalls die RTK-Genauigkeit per Mobiltelefon, mit Modemsystemen oder auch mittels VRS (Virtual Reference Stations). Derartige Systeme erfordern eine erfahrene IT-Organisation sowie eine sachkundige Betreuung. Die Bodenstationen sind teuer, und bei der Anwendung von VRS ist eine visuelle Verbindung zwischen Sender und Empfänger erforderlich. RTK ist genauer als SBAS und geht bis in den Zentimeterbereich. Außerdem können Höhendaten ermittelt und im Verdichtungsgerät angezeigt werden.

GENAUIGKEIT DES SATELLITENSYSTEMS

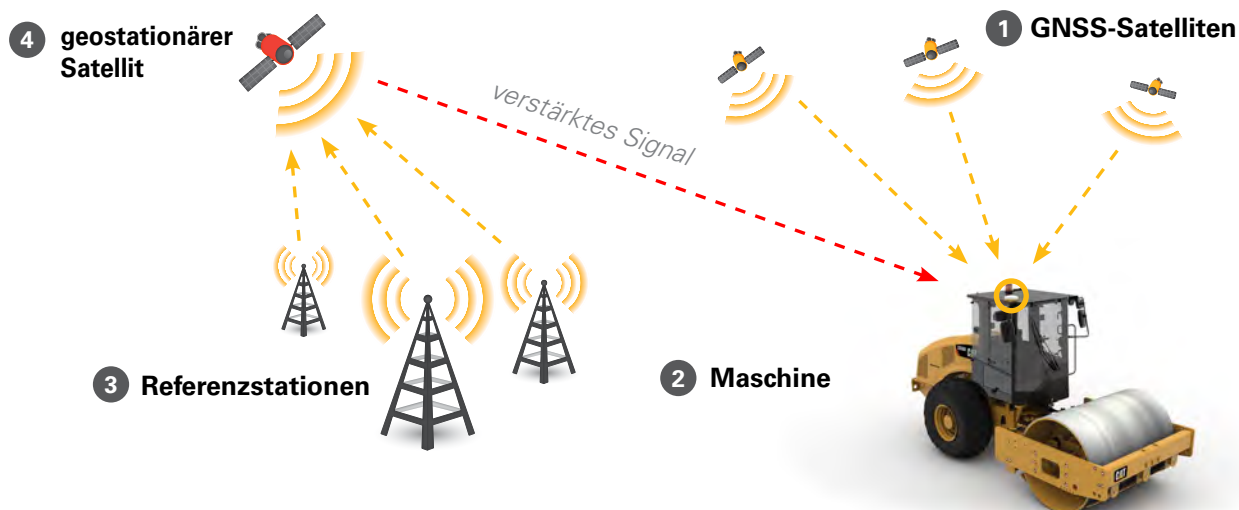


Da die Walze häufig die letzte Maschine ist, die im Erdbau zum Einsatz kommt, ist das mit einer beträchtlichen Zeit- und Kosteneinsparung bei der abschließenden Höhenkontrolle verbunden.

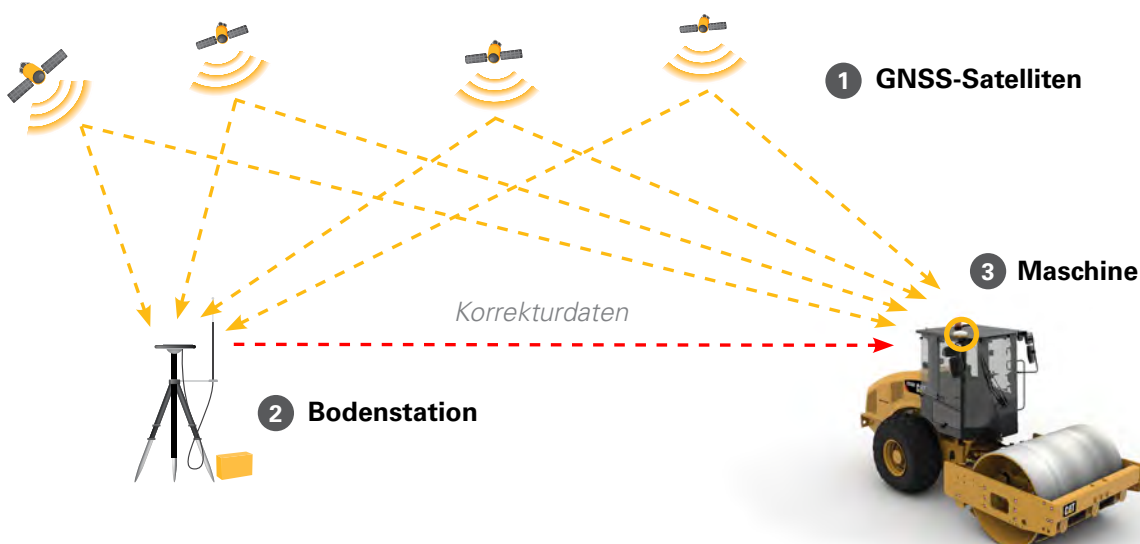
AUTONOM



SBAS (SATELLITE BASED AUGMENTATION SYSTEM)



RTK (REAL TIME KINEMATIC)



Vorteile der Datenpositionierung

Mit Hilfe der maschinenintegrierten Verdichtungsmessung kann in Echtzeit – im Rahmen einer Momentaufnahme – bereits wesentliches über den Verdichtungszustand ausgesagt werden, aber erst mit Hilfe der Datenpositionierung lassen sich ALLE Meßwerte zusammenhängend darstellen. Durch den Übergang von einer Moment- zu einer Gesamtaufnahme wird die Grundlage für die Durchführung umfassender Analysen geschaffen. Sowohl dem Fahrer als auch der Baustellenleitung wird damit ein unmittelbarer Überblick über die Verdichtungsqualität des gesamten Baustellenbereichs ermöglicht und nicht nur eine Momentaufnahme zur Verfügung gestellt.

Diese Möglichkeit stellt ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen den IT-Systemen und den anderen Prüfverfahren dar. Normalerweise werden die Qualitätskontrollen mit

Hilfe tragbarer Prüfmittel zeit- und kostenintensiv an einigen ausgewählten Stellen durchgeführt. Anhand dieser Prüfergebnisse schließt man dann auf einen viel größeren als den tatsächlich geprüften Bereich: häufig im Verhältnis 1 : 1.000.000 – nicht gerade vertrauenswürdig. Mit der Intelligenten Verdichtung bietet sich folglich die Möglichkeit, die im gesamten Baustellenbereich erzielte Verdichtungsqualität in situ flächendeckend zu erfassen und zu kontrollieren.

Einige Systeme sind außerdem in der Lage, 3-D-Zeichnungen auf den Bildschirm in der Walze zu übertragen oder den Arbeitsfortschritt plastisch darzustellen, was auf Baustellen mit fehlenden Absteckungen oder sonstige Markierungen von Vorteil sein kann.

Weiterverarbeitung der erfaßten Daten

Die Vorteile, die die zusätzlich erfaßten Daten dem Fahrer bieten, sind leicht erkennbar. Sie stellen eine wirksame und kosteneffiziente Methode dar, um eine qualitativ hochwertige Verdichtung auf einer Baustelle erreichen zu können. Bislang fordern sowohl die Bauüberwachung als auch die Behörden einfache Nachweise an, indem die – abschnittsweise den unmittelbaren Verdichtungsfortschritt dokumentierenden – Meßergebnisse auf der Walze in Textform ausgedruckt werden. In zunehmendem Maße verlangen die Behörden nun die Erstellung detaillierter Berichte. Voraussetzung dafür ist die Übertragung aller maschinell erfaßten Meßwerte vom Verdichtungsgerät auf einen PC im Büro: entweder manuell per USB-Stick oder drahtlos mit Hilfe entsprechender Hard- und Software.

Die übermittelten Daten müssen mit Hilfe verfügbarer Programme gefiltert und sortiert werden, um die geforderten Berichte erstellen zu können. Dafür bietet sich die Anwendung verschiedener Software-Lösungen an, wie beispielsweise AccuGrade Office, SiteVision Office, VisionLink, Veda u.a., die sich durch Format, Leistungsfähigkeit und Preis unterscheiden.

VISIONLINK-SCHNITTSTELLE



[VORTEILE DER INTELLIGENTEN VERDICHTUNG]

Dokumentation zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung

Mit Hilfe der Intelligenten Verdichtung kann die fertiggestellte Arbeit dokumentiert werden. Sie ermöglicht darüber hinaus die prozeßintegrierte, kontinuierliche Kontrolle des Verdichtungsfortschritts sowie die elektronische Speicherung der Daten und Analyse der Ergebnisse, die in einen Bezug zu früher gewonnenen Meßwerten gebracht werden können.

Steigerung der Produktivität

Das Ergebnis der Verdichtung (Steifigkeit) wird dem Fahrer visuell angezeigt und hilft ihm festzustellen, ob die Sollwerte erreicht wurden. Weiche Stellen oder potentielle Probleme mit dem Wassergehalt können erkannt werden. Zudem ist der Walzenfahrer in der Lage, mit Hilfe der RTK Gefälle und Höhen der Baustelle zu prüfen. Da ihm Echtzeit-Daten übermittelt werden, kann er unmittelbar die gegebenenfalls erforderlichen, qualitätsverbessernden Maßnahmen einleiten.

Effizientere Baustellen

Da die Verdichtung flächendeckend dargestellt wird und damit vor allem auch die Bereiche erkannt werden können, die bereits fertiggestellt sind und keine weiteren Walzübergänge mehr erfordern, können sowohl der Kraftstoffverbrauch minimiert als auch die Anzahl der erforderlichen manuellen Verdichtungsprüfungen deutlich reduziert werden. Einerseits führt das zu einer weiteren Kostenreduzierung, und andererseits kann die Produktivität weiter gesteigert werden, weil weniger Unterbrechungen des Verdichtungsprozesses erforderlich sind.

Zuverlässige Ergebnisse

Die genaue Positionierung ermöglicht die exakte Identifizierung von Verdichtungsproblemen unmittelbar während des Bauprozesses mit dem Vorteil, kosteneffiziente Korrekturen sofort durchführen und das Risiko späterer Nachbesserungen reduzieren zu können. Basierend auf den ermittelten Daten wird die Gesamtqualität der Baumaßnahme maßstabsgetreu in einem leicht verständlichen Format bildhaft dargestellt. Geschulte Walzenfahrer sind in der Lage einzuschätzen, wann die Verdichtung abgeschlossen ist und man guten Gewissens zum nächsten Bauabschnitt wechseln kann, ohne die Ergebnisse der herkömmlichen Prüfungen abwarten zu müssen.

MESSERGEBNISSE



[AKTUELLE VORGABEN FÜR DIE INTELLIGENTE VERDICHTUNG]

Der Einsatz der Intelligenten Verdichtung im Erdbau hat im Lauf der Jahre zugenommen, da sich die Behörden verstärkt mit dieser Technik beschäftigten, sich von deren Vorteilen überzeugen konnten und darauf aufbauend Vorgaben für die Anwendung erarbeiteten. Damit wird gewährleistet, daß die Technik bestimmungsgemäß eingesetzt wird, so daß die geforderten Ergebnisse auch erreicht werden.

So entwickelte die U.S. Federal Highway Administration (FHWA) die nachfolgend aufgeführten, allgemeinen Vorgaben für den Einsatz der Technik bei der Verdichtung von Böden, auf deren Grundlage die State Departments of Transportation die Anwendung der Intelligenten Verdichtung auf deren spezifische Bedürfnisse ausrichten können.

Intelligente Verdichtungswalzen müssen folgende spezifische Anforderungen erfüllen:

1. Bei intelligenten Verdichtungswalzen muß es sich um selbstfahrende Vibrationswalzen mit einer Bandage handeln, die mit Beschleunigungsmessern ausgerüstet ist, um die Wechselwirkungen zwischen der Bandage und dem zu verdichtenden Material messen und die aufgewendete Verdichtungsarbeit bewerten zu können. Intelligente Verdichtungswalzen können mit Glattmantel- oder Stampffußbandagen ausgestattet sein.
2. Der auf der Reaktion des Bodens nach dessen Anregung durch die vibrierende Bandage basierende und dessen Steifigkeit repräsentierende Wert wird als Intelligent Compaction Measurement Value (IC-MV) bezeichnet.

3. Um die Position der Bandage überwachen und die Anzahl der Walzübergänge aufzeichnen zu können, muß jede intelligente Walze mit GPS-Technik ausgerüstet sein.
4. Intelligente Verdichtungswalzen müssen über ein integriertes Dokumentationssystem verfügen, das in der Lage ist, in Echtzeit die Meßwerte (IC-MV) farbcodiert darzustellen sowie die Position der Walze, die Anzahl der Walzübergänge, die Walzgeschwindigkeit, die Vibrationsfrequenz und die Amplitude anzuzeigen.
5. Die Anzeigevorrichtung muß zur Datenübertragung über einen USB-Anschluß verfügen.
6. In der Walze muß ein Meßwertschreiber installiert sein, um Informationen über die Kennnummer der Walze, den Zeitpunkt der Messung, den erfaßten Bereich sowie dessen Anteil am gesamten Bauabschnitt, den IC-MV-Sollwert und die Bereiche, in denen die Sollwerte nicht erreicht wurden, ausdrucken zu können. (Die Drucker-Option kann von jedem State-DOT ausgewählt werden.)

Behörden anderer Länder entwickelten ihre eigenen Vorgaben, die zwar von den FHWA-Vorgaben abweichen können, aber das gleiche Ziel verfolgen: einen Standard für den Einsatz dieser Technik vorzugeben.

Vorg.	Maschine	Feldgröße	Positionsvorgabe	Dokumentation
Mn/DOT (USA)	Vibrationswalze mit Glattmantel- oder Stampffußbandage (25.000 lbs)	100 m x 10 m (Mindestwert an der Basis). Max. Dicke 1,2 m.	ein Kalibrierungs-/ Kontrollstreifen pro Bodenart oder Gewinnungsort	Verdichtung, Steifigkeit, Wassergehalt, Qualitätskontrolle und Korrekturmaßnahmen (wöchentlicher Bericht)
ISSMGE (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) www.issmge.org/	Auswahl der Walze nach Erfahrungswerten	100 m über die Baustellenbreite	Homogene, ebene Oberfläche. Überlappung ≤ 10 % der Bandagenbreite.	Walzschema, Verdichtungsfolge und Walzübergänge, Amplitude, Geschwindigkeit, dynamische Meßwerte, Frequenz, Sprungbetrieb und entsprechende Positionen
Erbau (Österreich)	empfohlen werden Walzenzüge mit Glattmantelbandage	100 m lang über die Baustellenbreite	Keine Ungleichmäßigkeiten in Oberflächennähe (Materialien oder Wassergehalt). Überlappung ≤ 10 % der Bandagenbreite.	Walzschema, Verdichtungsfolge und Walzübergänge, Amplitude, Geschwindigkeit, dynamische Meßwerte, Frequenz, Sprungbetrieb und entsprechende Positionen
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Deutschland)	Walzenzüge sind zu bevorzugen. Anhängewalzen werden akzeptiert.	Jeder Kalibrierungsbereich muß mindestens 3 Teilfelder mit ca. 20 m Länge umfassen.	Eben und ohne Pfützen. Ähnliche Bodenart, Wassergehalt, Schütthöhe und Tragfähigkeit der Schichten. Überlappung ≤ 10 % der Bandagenbreite.	dynamischer Meßwert, Frequenz, Geschwindigkeit, Sprungbetrieb, Amplitude, Entfernung, Meßzeit, Walzentyp, Bodenart, Wassergehalt, Schütthöhe, Datum, Zeit, Dateiname oder Registrierungsnummer, Wetterbedingungen, Position der Testbahnen und Fahrtrichtung, absolute oder auf das Bauvorhaben bezogene relative Höhe, örtliche Bedingungen und Dämme in Randbereichen, Maschinenparameter und festgestellte Abweichungen
Vägverket (Schweden)	Walzenzug mit Vibration oder Oszillation. Linienlast mind. 15 – 30 kg/cm.	max. Dicke 0,2 – 0,6 m	Die Schicht muß homogen und darf nicht gefroren sein. Schutzschichten < 0,5 m können mit dem Unterbau verdichtet werden.	—

Verdichtungsvorschriften	Geschwindigkeit	Frequenz
90 % der Walzenverdichtungsmessungen und der Mittelwert der LFG-Modul-Messungen (basierend auf 3 Prüfungen) müssen 90 % der im Kalibrierungstreifen festgelegten Sollwerte entsprechen.	gleiche Walzgeschwindigkeit bei Kalibrierung und anschließender Verdichtung	
Korrelationskoeffizient $\geq 0,7$. Mindestwert $\geq 95\%$ Ev1, Mittelwert $\geq 105\%$ (oder $\geq 100\%$ im Sprungbetrieb). Die dynamisch erfaßten Meßwerte dürfen bei $\leq 10\%$ der Bahn unter dem angegebenen Mindestwert liegen. Der gemessene Mindestwert muß $\geq 80\%$ des festgelegten Mindestwertes erfüllen. Die Standardabweichung vom Mittelwert muß $\leq 20\%$ bei einem Übergang sein.	konstant 2 – 6 km/h ($\pm 0,2$ km/h)	konstant (± 2 Hz)
Korrelationskoeffizient $\geq 0,7$. Mindestwert $\geq 95\%$ Ev1, Mittelwert $\geq 105\%$ (oder $\geq 100\%$ im Sprungbetrieb). Die dynamisch erfaßten Meßwerte dürfen bei $\leq 10\%$ der Bahn unter dem angegebenen Mindestwert liegen. Der gemessene Mindestwert muß $\geq 80\%$ des festgelegten Mindestwertes erfüllen. Der gemessene Maximalwert eines Übergangs darf den Sollhöchstwert (150 % des Sollmindestwertes) nicht überschreiten. Die Standardabweichung vom Mittelwert muß $\leq 20\%$ bei einem Übergang sein.	konstant 2 – 6 km/h ($\pm 0,2$ km/h)	konstant (± 2 Hz)
Der sich aus einer Regressionsanalyse ergebende Korrelationskoeffizient muß $\geq 0,7$ sein. Der dynamisch ermittelte Meßwert eines einzelnen Abschnitts (Breite der Walzenbandage) darf nicht mehr als 10 % vom angrenzenden Bereich abweichen, um für die Kalibrierung geeignet zu sein.	konstant	
Die Anforderungen in Bezug auf die Tragfähigkeit oder den Verdichtungsgrad müssen erfüllt werden. Mittelwert der Verdichtung für zwei Untersuchungsstellen $\geq 89\%$ bei Untergründen unter der Tragschicht und bei Schutzschichten mit einer Dicke $> 0,5$ m; bei Tragschichten muß der Mittelwert $\geq 90\%$ betragen. Der erforderliche Mittelwert für zwei Untersuchungsstellen hängt von der Art der Schicht ab.	konstant 2,5 – 4,0 km/h	

[ARBEITSABLÄUFE BEI DER INTELLIGENTEN VERDICHTUNG]

Wie beim Einsatz der zuvor beschriebenen maschinenintegrierten Verdichtungsmessung sind ähnliche Arbeitsabläufe zu befolgen. Aufgrund der zusätzlichen Funktionen, die die Hightech-Systeme zur Verfügung stellen, gibt es geringfügige Unterschiede. Auch hier wird zwischen zwei Betriebsarten unterschieden: Produktions- und Prüfmodus.

Produktionsmodus – Wie weiter oben bereits ausgeführt, wird im Produktionsmodus angestrebt, möglichst viel Boden so schnell und effizient wie möglich auf den Sollwert zu verdichten. Die Verdichtung erfolgt bei normalen Betriebsparametern mit Walzgeschwindigkeiten zwischen 1 bis 2,5 km/h für Gesteinsschüttungen und Tone sowie 2 bis 5 km/h für nichtbindige Sande und Kiese sowie Schluffe. In der Regel wird der Verdichtungsprozeß mit der großen Amplitude eingeleitet.

Bei einer für die *Intelligente Verdichtung* konzipierten Walze erhält der Fahrer Hinweise, die über eine einfache dimensionslose Zahl hinsichtlich Bodensteifigkeit oder Tragfähigkeit hinausgehen. Mit der zusätzlichen farblichen Darstellung der Ergebnisse und den Funktionen zum Sammeln und Speichern von Daten hat er nicht nur eine Information über die Verdichtung an der gegenwärtigen Position, er ist darüber hinaus auch in der Lage, die Baustelle anhand der Anzahl der Übergänge, des Anteils an der Sollverdichtung

und dessen Änderung von Walzübergang zu Walzübergang zu überwachen (sowohl für Bereiche mit ausreichender als auch mit schlechter Verdichtung). Gegebenenfalls kann der Fahrer Stellen und Bereiche, die nachverdichtet werden müssen, digital markieren. Alle gespeicherten Daten können extern übertragen werden, um sie bei Bedarf zu prüfen, zu filtern und zu analysieren.

In diesem Betriebsmodus wird dem Walzenfahrer mit Hilfe des Mapping-Systems der Verdichtungsfortschritt auf einem brauchbaren Niveau der Qualitätskontrolle verdeutlicht. Aufgrund der variablen Einflußfaktoren Fahrgeschwindigkeit, Fahrtrichtung, Betriebszustand und Wassergehalt des Bodens variieren die im Produktionsmodus erfaßten Meßwerte üblicherweise stärker als im Prüfmodus. Ungeachtet dessen ist es dem Fahrer möglich, die Effizienz zu steigern und die Gleichmäßigkeit der Verdichtung zu verbessern, weil er sich während des Verdichtungsprozesses nicht mehr auf Schätzwerte verlassen muß.

Unmittelbar nachdem die vorgegebenen Sollwerte erreicht wurden, kann der Fahrer zu einem neuen Abschnitt wechseln, während das mit der Qualitätskontrolle beauftragte Personal den bearbeiteten Abschnitt für den Übergang im Prüfmodus vorbereiten und die erforderlichen Prüfungen durchführen kann, um sicherzustellen, daß das Ergebnis die Vorgaben erfüllt.



Prüfmodus – Nach dem Abschluß der Verdichtung im Produktionsmodus kann das System zur Verdichtungsmessung wie eine Prüfwalze eingesetzt werden, um die Verdichtungsqualität mit diesem präziseren Modus zu überprüfen. Das ist erforderlich, wenn die zuständige Behörde eine entsprechende Dokumentation oder eine Karte abfordert, die einen genauen Rückschluß über die Bodensteifigkeit im betreffenden Bauabschnitt gestattet.

Dabei ist unbedingt zu gewährleisten, daß die variablen Größen kontrolliert und in den zulässigen Grenzen konstant gehalten werden. Aus diesem Grund sollten als Betriebsparameter eine gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h und eine kleine Amplitude gewählt werden. Dadurch wird die Beeinflussung der Meßwerte durch die o.g. variablen Größen unterbunden, und die Daten eignen sich zur Erstellung der geforderten Berichte. Besteht

die Gefahr übermäßiger Verdichtung, des Abhebens oder des Sprungbetriebs oder liegen andere Probleme vor, kann im Prüfmodus die Vibration nicht genutzt werden. Gleiches gilt für eine mit der MDP-Technik ausgestattete Maschine.

Es ist zu beachten, daß sich der Verdichtungsgrad des Bodens und damit seine Steifigkeit während der Meßfahrt ändern, da die Walze über ihr statisches Gewicht einen Druck auf das verdichtete Material ausübt und die Kräfte in den darunter liegenden Boden übertragen werden. Aus diesem Grund muß der Walzenfahrer die während der Messung auf den Boden einwirkende Kraft reduzieren. Aufgrund der Möglichkeit, die Messungen statisch – also ohne Vibration – durchführen zu können, eignen sich auf der Antriebsleistung basierende Meßsysteme (MDP) optimal für diese Aufgabe.



EMPFOHLENE VORGEHENSWEISE FÜR DEN NACHWEIS DER VERDICHTUNG

1. Ein Walzschema festlegen, das dem Fahrer ermöglicht, während der Verdichtungsprüfung in Vorwärtsrichtung zu fahren.
2. Eine Geschwindigkeit zwischen 2,5 und 4 km/h festlegen, die beibehalten werden kann: Je langsamer, desto besser. Der Einsatz der automatischen Drehzahlregelung gewährleistet eine konstante Geschwindigkeit, was nicht nur zu einer gleichmäßigeren Verdichtung, sondern auch zu weniger schwankenden Meßwerten führt.
3. Für den Prüfmodus eine kleine Amplitude einstellen. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit verringert, daß die Bandage in den Betriebszustand des Abhebens gerät, und außerdem reicht die Messung nicht zu tief in den Boden hinein. Zudem können die Meßwerte so besser mit denen anderer Prüfmethoden korreliert werden.
4. Im Anzeigemenü „proofing on“ („Prüfmodus ein“) wählen und die Vibration einschalten (nicht bei Walzen, die mit dem MDP-System ausgerüstet sind) und anfahren, um die Verdichtungsmessung bei konstanter Fahrgeschwindigkeit, Amplitude und Frequenz während der Vorwärtsfahrt durchzuführen.
5. Die GNSS-Positionsfunktion verwenden, um die Maschine so steuern zu können, daß auf dem zu prüfenden Abschnitt nur ein Übergang erfolgt. Die Walzbahnen sollten sich nur berühren oder geringfügig überlappen: Überlappungen möglichst nur am Bahnende oder in den Wendebereichen.
6. Nach dem Überfahren des gesamten Abschnitts an der Anzeige „proofing off“ („Prüfmodus aus“) wählen.
7. Der Wassergehalt des Bodens ist in einem Raster über den gesamten verdichteten und geprüften Bereich zu bestimmen, um die Meßergebnisse entsprechend beurteilen zu können. Mit Hilfe des Rasters, das auf die Baustellengröße und die Anforderung des Auftraggebers abzustimmen ist, kann der Wassergehalt graphisch dargestellt werden. Die erforderlichen Bodenproben sollten sobald wie möglich nach dem Abschluß der Verdichtungsarbeiten entnommen werden.
8. Die aufgezeichneten Daten sind zu überprüfen und die Bereiche auszuwählen, die mit den Ergebnissen anderer Meßmethoden verknüpft werden sollen. Dabei ist auf eine ausreichende Anzahl und Spreizung der Meßwerte zu achten.
9. Bestimmung der Korrelation der Meßwerte an den vorab mit Hilfe eines Handheld GNSS möglichst exakt markierten Stellen. Nicht approximieren, denn der Zustand des Bodens kann sich bereits in einem geringen Abstand erheblich ändern (siehe Hinweis im nächsten Abschnitt).

Hinweis: Überlappte Bereiche können als mehrfache Übergänge betrachtet werden und Abweichungen der Meßwerte hervorrufen.

[GESTAFFELTER EINSATZ VON ZWEI WALZEN]

Zur Ermittlung des Sollwerts für die Verdichtungsmessung (CMV oder MDP) und die Anzahl der erforderlichen Übergänge gibt es mehrere Möglichkeiten, die teilweise behördenseitig vorgeschrieben werden und sich von den im vorliegenden Handbuch beschriebenen Vorgehensweisen unterscheiden

können. Tendenziell geht man eher dazu über, einen Abschnitt flächendeckend mindestens auf das geforderte Niveau zu verdichten und nimmt zunehmend von dem Versuch Abstand, einen gleichmäßigen Verdichtungswert in allen Bereichen einer Baustelle zu erzielen.

Kalibrierung auf der Baustelle mit Hilfe eines Probestreifens und eines unabhängigen Prüfgerätes

Mit dieser Methode wird das Ziel verfolgt, den Einfluß möglichst vieler Variablen beim Meßprozeß zu eliminieren und dieselben Bodenmaterialien und Meßverfahren zu verwenden, die auch später auf der Baustelle eingesetzt werden. Diese äußerst zeit- und kostenintensive Vorgehensweise ist allerdings der beste Weg, um den technologischen Prozeß in seiner Gesamtheit verstehen zu können.

1. Einen Probestreifen festlegen, der während der Dauer des Bauvorhabens so belassen werden kann und ähnliche Eigenschaften bezüglich Boden, Gefälle und Unterbau aufweist und somit den Großteil der Baumaßnahme repräsentiert.
2. Den Probestreifen ausheben/aufschütten und den Untergrund ebnen.
3. Mit einer Vibrationswalze, die mit einem System für die Intelligente Verdichtung ausgerüstet ist, im Prüfmodus bei kleiner Amplitude, konstanter Frequenz (oder ausgeschalteter Vibration bei MDP) und einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von 3 km/h während der Vorwärtsfahrt eine Karte mit dem Ausgangszustand der Verdichtung erstellen.
4. Weist die Verdichtungskarte eine hohe Variabilität auf (90 % der Werte weichen mehr als 20 % vom Durchschnittswert ab), sollte versucht werden, die Unterlage mit einer großen Amplitude zu verdichten, um die Verdichtungsgrade der weicheren Bereiche denen mit höheren Werten anzugleichen. Schritt 3 wiederholen.
5. Ist die Unterlage gleichmäßig verdichtet (90 % der Werte weichen nicht mehr als 20 % vom Durchschnitt ab), den Vorgang mit Schritt 6 fortsetzen. Ist dies nicht der Fall, muß ein anderer Abschnitt für den Probestreifen (Schritt 1) ausgewählt oder die Unterlage verbessert werden, um gleichmäßigere Ausgangswerte zu erzielen. Das kann das Ausgraben verborgener Materialien wie Steine oder Tonklumpen oder das Stabilisieren des Bodens mit Kalk oder anderen Stoffen beinhalten. Wird ein Stabilisierungsmittel für den Probestreifen eingesetzt, muß es ebenfalls auf der Baustelle verwendet werden, damit der Probestreifen repräsentativ ist.
6. Die Verdichtung ist mit Hilfe eines Plattendruckversuches oder eines Leichten Fallgewichtsgerätes unter gleichmäßiger Verteilung der Prüfstellen auf der gesamten Fläche des Probestreifens zu kontrollieren. Keine Prüfungen mit Isotopsonden oder Sandersatzgeräten durchführen, da diese andere Bodeneigenschaften (Dichte) als die Vibrationswalze (Steifigkeit) messen. Die Prüfpunkte müssen mit einem GNSS-Gerät mit cm-Genauigkeit lokalisiert werden, um mit den Meßwerten der von der Intelligenten Verdichtungswalze erstellten GNSS-Verdichtungskarte korreliert werden zu können. Als Alternative zur Rasterprüfmethode kann die GNSS-Walzenkarte genutzt werden, um vereinzelte Positionen auszuwählen, die repräsentativ für hohe, mittlere und niedrige Verdichtungswerte sind. Für jeden Wertebereich sind mindestens drei Prüfungen durchzuführen (mindestens 9 Prüfpunkte). Je mehr Prüfpunkte gewählt werden, desto genauer sind die statistischen Aussagen.
7. Für jeden Prüfpunkt ist der Wassergehalt zu bestimmen. Schwankt der Wassergehalt stark, liefern die Korrelationen keine einheitlichen Ergebnisse.

Vorsichtshalber ist zu bedenken, daß jedes Feldmeßgerät, das für die Kalibrierung der walzenintegrierten Verdichtungsmessung verwendet wird, eine eigene Meßvariabilität aufweist. Das bedeutet, daß bei mehrmaligen Messungen auf ein und demselben Boden mit denselben Eigenschaften nicht immer dieselben Ergebnisse angezeigt werden. Beispielsweise können die mit einer Isotopsonde an derselben Prüfstelle erzielten Meßwerte um 15 % variieren, weshalb es üblich ist, einen Wert zu messen, das Meßgerät um 90° zu drehen und die Messung zu wiederholen. Aus den beiden Einzelwerten wird der Mittelwert gebildet.

8. Die Werte der Verdichtungsprüfung sind mit denen der GNSS-Walzenkarte zu verknüpfen, indem die mit der Walze ermittelten Werte auf der y-Achse und die Ergebnisse der lokalen Feldprüfungen auf der x-Achse aufgetragen werden. Die graphische Darstellung wird als Streudiagramm oder scatter plot bezeichnet.
9. Um die beste Kalibrierung zwischen den Meßwerten zu erhalten, ist die Kurve anzupassen. Die Eichung ist nur gültig für die betreffende Bodenart auf dieser Baustelle und für die Verdichtungsmessung der Unterlage.
10. Die erste Schicht Bodenmaterial aufbringen und gleichmäßig in der angegebenen Dicke verteilen.
11. Den Boden so lange walzen, bis er gleichmäßig verdichtet ist und sich die Meßwerte der integrierten Verdichtungsmessung bei der Vorwärtsfahrt nur noch geringfügig ändern.
12. Die Schritte 2 bis 9 für diese Schicht wiederholen. Die für diese Schütthöhe gültige Kalibrierungskurve wird für dieses Material auf der gesamten Baustelle verwendet.
13. Die Schritte 10 bis 12 für alle weiteren Schichten wiederholen, wobei jede Schicht eine eigene Kalibrierungskurve besitzt.
14. Verändern sich die Bodenbedingungen aufgrund der Witterung, muß ein erneuter Prüfungsvorgang auf dem Probestreifen durchgeführt werden, um ein neues Akzeptanzniveau für den Wert der integrierten Verdichtungsmessung festzulegen.



Kalibrierung der Meßwerte der walzenintegrierten Verdichtungsmessung an der Anzahl der Übergänge (ohne unabhängiges Prüfgerät)

Diese oder eine ähnliche Methode wird in einigen skandinavischen Ländern eingesetzt. Sie hat einen sehr starken praktischen Bezug, erfordert einen geringeren Zeit- und Ressourcenaufwand und stellt damit eine gute Alternative zu anderen, standardisierten Kontrollverfahren dar. Das primäre Ziel besteht darin, einen gerätespezifischen Anforderungswert für die maximale Verdichtung des auf der Baustelle verwendeten Materials festzulegen und die Anzahl der Übergänge zu ermitteln, die erforderlich sind, um die Vorgabe zu erreichen. Außerdem wird das Erzielen eines gleichmäßigen Verdichtungsniveaus auf der gesamten Baustelle angestrebt. Dazu wird ein Probestreifen genutzt, um die Verdichtungskennwerte festzulegen. Im Grunde genommen kann jeder Teilbereich einer Baustelle als Probestreifen angesehen werden, und das Anlegen eines separaten Testabschnittes hat lediglich optionalen Charakter.

1. Einen Probestreifen festlegen, der während der Dauer des Bauvorhabens so belassen werden kann und ähnliche Eigenschaften bezüglich Boden, Gefälle und Unterbau aufweist und somit den Großteil der Baumaßnahme repräsentiert.
2. Den Probestreifen ausheben/aufschütten und den Untergrund ebnen.
3. Mit einer Vibrationswalze, die mit einem System für die Intelligente Verdichtung ausgerüstet ist, im Prüfmodus bei kleiner Amplitude, konstanter Frequenz (oder ausgeschalteter Vibration bei MDP) und einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von 3 km/h während der Vorwärtsfahrt eine Karte mit dem Ausgangszustand der Verdichtung (Prüfkarte) erstellen.
4. Den Wassergehalt des Bodens an mehreren Stellen des Probestreifens kontrollieren. Ist der Wassergehalt zu hoch oder zu niedrig, muß er vor der Verdichtung verbessert werden.
5. Weist die Verdichtungskarte eine hohe Variabilität auf (90 % der Werte weichen mehr als 20 % vom Durchschnittswert ab), ist die Unterlage mit einer großen Amplitude zu verdichten, bis die Werte der Verdichtungsmessung im Probestreifen gleichmäßiger sind. Schritt 3 wiederholen.
6. Wurde eine gleichmäßige Verdichtung erreicht, ist der Wassergehalt an mehreren Stellen zu kontrollieren und aufzuzeichnen.
7. Die erste Schicht Bodenmaterial aufbringen. Die Prüfkartenfunktion auswählen und die Schüttung mit einer großen Amplitude bei einer langsamen, gleichmäßigen Fahrgeschwindigkeit (3 km/h) verdichten. Vor dem Wechsel auf unverdichtetes Material auf jeder Walzbahn je einen Übergang vorwärts und rückwärts ausführen. Der Wassergehalt des eingebauten Bodens sollte gleichmäßig sein und nahe am Optimum liegen.
8. Den Verdichtungsprozess auf der gesamten Fläche wiederholen und den Verdichtungswert notieren, der bei jedem Walzübergang dominiert.



9. Schritt 8 so lange wiederholen, bis sich der auf der Walze angezeigte Wert zwischen den Übergängen nicht mehr wesentlich ändert oder die Walze in den Sprungbetrieb übergeht.
10. Der Mittelwert, der sich bei der maschinellen Messung einspielt, ist der Anzeige-Sollwert, und die Anzahl an Übergängen, die erforderlich ist, um diesen Sollwert zu erreichen, ist die entsprechende Übergangs-Sollzahl.
11. Die Ergebnisse sind zu protokollieren. Anzeige-Sollwert und die Übergangs-Sollzahl sind für diese Schicht entsprechend einzustellen.
12. Schritte 7 bis 11 für jede neue Schicht mit einer neuen Prüfkarte wiederholen. Im Endeffekt hat man für jede Schicht jeweils einen Sollwert für die Verdichtung und die Übergangszahl.
13. Werden in mehreren Schichten nahezu identische Werte erzielt, kann man einen einheitlichen Sollwert für die Verdichtungsmessung für alle entsprechenden Schichten verwenden.
14. Die gesamte Fläche der Baumaßnahme wird mit Hilfe der Verdichtungskarte verdichtet, um gleichmäßige Werte in allen Bereichen zu erzielen.
15. Mit zunehmender Erfahrung sind geschulte Walzenfahrer in der Lage, die Sollwerte für die Verdichtungsmessung und die Übergangszahl ohne Probestreifen festzulegen.
16. Wird abschließend ein präziserer Meßwert für den erzielten Verdichtungsgrad gefordert, wird die Walze im Prüfmodus eingesetzt (siehe oben).





Verwendung der Meßwerte der *Intelligenten Verdichtung* ohne baustellenseitige Kalibrierung

Dieses Verfahren ist am praktikabelsten, weil es nur einen geringen oder gar keinen zusätzlichen Zeitaufwand erfordert. Für das sich optimal für den oben beschriebenen Produktionsmodus eignende Verfahren sind Kenntnisse der Bodenverdichtung im Allgemeinen sowie der Funktionsweise des Systems und einige Erfahrungen mit seiner Anwendung erforderlich.

Das Ziel besteht darin, die Möglichkeiten der *Intelligenten Verdichtung* zu nutzen, um die entsprechenden Änderungen bei fortschreitender Verdichtung von Übergang zu Übergang vergleichen und ermitteln zu können, wann die geleistete Verdichtungsarbeit unter den gegebenen Bedingungen ausreichend ist. Wie bereits erwähnt, stellt der Einsatz der *Intelligenten Verdichtung* und der maschinenintegrierten Verdichtungsmessung keine Garantie für das Verdichtungsergebnis dar: häufig ist der gewählte Arbeitsablauf wichtiger als die auf einer Baustelle verwendeten Mittel und Technologien. Ein Verdichtungsgerät kann beispielsweise nach einer bestimmten Anzahl an Übergängen auf einem bestimmten Material an seine Leistungsgrenze kommen, so daß die Sollverdichtung nicht mehr erreicht werden kann und alle späteren Übergänge nutzlos sind. Um Zeitverlust und unnötigen Kraftstoffverbrauch vermeiden zu können, wäre es von Vorteil zu wissen, wann dieser Zustand eintritt.

1. Der ausgewählte und mit der *Intelligenten Verdichtung* ausgerüstete Walzenzug sollte unter Berücksichtigung der Bodenart, des Wassergehaltes, der Schichtdicke usw. der geforderten Verdichtung so gut wie möglich entsprechen. In diesem Handbuch wurden bereits einige Faktoren hinsichtlich der Bemessung und Einstellung der Verdichtungsparameter aufgeführt.
2. Vor Beginn der Verdichtung ist der Bildschirm auf der Walze so einzustellen, daß die Meßwerte der Verdichtungsmessung angezeigt werden und die anteilige Veränderung zwischen den einzelnen Übergängen verglichen wird.
3. Die Mapping-Funktion kann anwendungsspezifisch so eingestellt werden, daß jeder prozentualen Änderung zwischen den einzelnen Übergängen eine bestimmte Farbe zugeordnet wird: z.B., daß Bereiche mit einer 50- bis 100 %igen Änderung zwischen den einzelnen Übergängen rot, mit einer 10- bis 49 %igen Änderung gelb und mit einer 0- bis 9 %igen Änderung grün angezeigt werden. Basierend auf Erfahrungswerten oder den spezifischen Baustellenbedingungen können diese Bereiche bedarfsgerecht geändert werden.

4. Um eine grüne Karte zu bekommen, wird nun entsprechend dem im Punkt 3 aufgeführten Beispiel verdichtet.
5. Werden einige Bereiche auf dem Bildschirm nicht grün dargestellt, und es sind nur geringfügige oder gar keine Änderungen zwischen den einzelnen Übergängen festzustellen, weist das auf Eignungsprobleme des Bodens oder auch auf Probleme im Unterbau hin, die behoben werden müssen.
6. Weist die Karte genügend grüne Markierungen auf und werden keine weiteren Änderungen der maschinell erfaßten Meßwerte zwischen den einzelnen Übergängen festgestellt, werden Lastplattendruckversuche oder Prüfungen mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes (siehe Beispiele) durchgeführt. Man verwendet ein gleichmäßiges Prüfschema im gesamten zu verdichtenden/zu prüfenden Bereich um nachzuweisen, daß die Sollverdichtung erreicht wurde.
7. Wird anhand der durchgeführten Feldmessungen eine ausreichende Verdichtung festgestellt, wird der Vorgang auf der Baustelle wie oben beschrieben fortgesetzt.
8. Wurde die geforderte Verdichtung nicht erreicht, können dafür zwei Gründe vorliegen:
 - 1) Die Maschinengröße und das Betriebsgewicht sind für die Bodenart und die Schichtdicke nicht geeignet und/oder
 - 2) der Wassergehalt des Bodens ist entweder zu hoch oder zu niedrig.In beiden Fällen kann die Walze keinen weiteren Verdichtungsfortschritt mehr erzielen, so daß die Bedingungen entsprechend zu ändern sind.



[FEHLERDIAGNOSE ZUR INTELLIGENTEN VERDICHTUNG]

Wie bereits erwähnt, können spezifische Baustellenbedingungen und betriebsbedingte Faktoren die Meßergebnisse Intelligenter Verdichtungssysteme beeinflussen. Mit zunehmender Erfahrung kann der Walzenfahrer bestimmte Muster erkennen und die wahrscheinlichen Ursachen einer Abweichung von den Sollwerten verstehen. Nachfolgend werden einige der am häufigsten auftretenden Probleme mit den entsprechenden Ursachen und Lösungen genannt, um gegebenenfalls auftretende baustellenseitige Probleme schneller lösen zu können.

Problem: Die maschinell erfaßten Meßwerte liegen unter den Sollwerten

Ursache: Der körnige Boden ist für die Verdichtung zu trocken: die Bodenstruktur bricht zusammen, und der Boden lockert auf.

Lösung: Vor der weiteren Verdichtung dem Boden Feuchtigkeit zuführen. Körnige Böden können viel Wasser aufnehmen, bevor sie zu feucht werden: das Wasser fließt tendenziell ab. Man fügt etwas mehr Wasser als erforderlich hinzu, um den ungünstigen Einfluß des Abfließens und Austrocknens auf die Verdichtung zu reduzieren.

Ursache: Der Boden besteht aus Ton und nicht aus Kies oder körnigem Material. Oder es kann sich Ton unter der Oberfläche befinden und die Meßwerte beeinflussen.

Lösung: Den Tonboden abtragen, sofern das möglich ist, oder die niedrigeren Werte akzeptieren. Alternativ ein auf der Antriebsleistung basierendes System (MDP) mit walzenintegrierter Verdichtungsmessung verwenden, das durch bindigen Boden nicht beeinflusst wird.

Ursache: Die Bandage wechselt auf den steiferen Bodenbereichen in das Abheben oder in den Sprungbetrieb. In diesem Fall sind die RMV-Werte hoch und die Verdichtungsmeßwerte (CMV) tendenziell geringer, als es die Bodeneigenschaften erwarten lassen.

Lösung: Eine kleine Amplitude einstellen. Arbeitet die Walze immer noch im Abheben, ist die Verdichtung abgeschlossen. Eine weitere Verdichtung im Abheben kann zur Auflockerung führen.

Ursache: Der Tonboden ist zu feucht.

Lösung: Den Boden mit einer Scheibenegge oder mit einem Recycler/Bodenstabilisierer auflockern, so daß dieser trocknen kann, bevor man die Verdichtung fortsetzt. Alternativ kann ein auf der

Antriebsleistung basierendes System (MDP) mit walzenintegrierter Verdichtungsmessung verwendet werden. Allerdings ist auch hier darauf hinzuweisen, daß der Wassergehalt noch zu hoch sein kann, um ordnungsgemäß verdichten zu können.

Ursache: Das zu verdichtende Material wurde über einer nicht verdichteten oder nicht stabilisierten Unterlage eingebaut. Es treten bei der Verdichtung sehr starke Walkeffekte auf, und der Boden läßt sich nicht verdichten.

Lösung: Die obere Bodenschicht muß entfernt und die Unterlage verbessert werden. Dazu kann es erforderlich sein, den Boden zu trocknen, nachzuverdichten, Kalk oder andere Mittel zur Bodenstabilisierung hinzuzufügen oder sogar den ungeeigneten Boden auszuheben und zu ersetzen.

Ursache: Die Bandagenfrequenz ist höher, als sie sein sollte (was eher unwahrscheinlich ist).

Lösung: Die Bandagenfrequenz sollte ca. 30 Hz betragen, um die gleichmäßigsten Verdichtungsergebnisse zu erzielen. Ein Mechaniker sollte prüfen, warum die Vibrationsdrehzahl nicht korrekt ist. Alternativ kann ein auf der Antriebsleistung basierendes System (MDP) mit walzenintegrierter Verdichtungsmessung eingesetzt werden, um festzustellen, ob sich dies irgendwie auf die Gleichmäßigkeit der Verdichtungsergebnisse auswirkt.

Ursache: Ein oder mehrere Objekte befinden sich im Untergrund, die nicht so steif wie der sie umgebende Boden sind: Holz oder andere Biomassen, vergrabener Müll oder auch ein Tonklumpen. Dies wird auf der Karte als relativ örtlich begrenzter Bereich dargestellt.

Lösung: Die Objekte/Materialien ausheben und durch guten Boden ersetzen, wenn das als notwendig erachtet wird (Einzelfallentscheidung).

Ursache: Die Fahrgeschwindigkeit ist zu hoch.

Lösung: Die Geschwindigkeit reduzieren, um effizient zu arbeiten und höhere Verdichtungswerte zu erreichen. Die automatische Drehzahlregelung einsetzen, wenn das Verdichtungsgerät mit dieser Funktion ausgestattet ist.

Ursache: Die Fahrtrichtung beeinflusst die Meßwerte der walzenintegrierten Verdichtungsmessung.

Lösung: Dies ist normal. Im Vorwärts- und Rückwärtsbetrieb werden unterschiedliche Werte gemessen. Die einzige Lösung ist, nur in eine Richtung zu fahren oder – wie üblich – zur Analyse nur die Meßwerte aus einer Fahrtrichtung heranzuziehen.

Problem: Die maschinell erfaßten Meßwerte liegen über den Sollwerten

Ursache: Bei der Tragschicht oder dem Unterbau handelt es sich um steifere Bodenarten als erwartet.

Lösung: Keine. Die Steifigkeit des Untergrundes sollte geprüft werden – in der einfachsten Art und Weise beispielsweise mit Hilfe der Rammsondierung. Ist der Boden steifer als erwartet, sind die Ergebnisse als normale Werte zu akzeptieren.

Ursache: Ein Objekt befindet sich unter der Oberfläche. Dabei kann es sich um einen Stein, eine Betonplatte, Reste eines alten Straßenbelags oder ein Fundament handeln.

Lösung: Das Objekt ausgraben und mit dem eingebauten Boden ersetzen, um eine gleichmäßige Verdichtung erreichen zu können.

Ursache: Die Fahrgeschwindigkeit ist gelegentlich zu niedrig. (Dies ist unwahrscheinlich, es sei denn, der Walzenfahrer versucht, mit einer vorgegebenen Zahl an Übergängen zu verdichten.)

Lösung: Eine gleichmäßige Geschwindigkeit beibehalten. Die automatische Drehzahlregelung einsetzen, wenn das Verdichtungsgerät mit dieser Funktion ausgestattet ist.

Ursache: Der Boden ist gefroren.

Lösung: Keine.

Problem: Die maschinell erfaßten Meßwerte schwanken

Ursache: Die Bodeneigenschaften variieren. Das kommt häufiger vor, als man annehmen würde. Verborgene Objekte, Änderungen in der Bodenzusammensetzung und ungleichmäßige Wassergehalte können die Werte der walzenintegrierten Verdichtungsmessung beeinflussen.

Lösung: Sind die Schwankungen erheblich und müssen behoben werden, zuerst die einfachste Lösung einsetzen. Den Wassergehalt prüfen und justieren. Gegebenenfalls verborgene Objekte ausgraben und mit dem eingebauten Boden ersetzen, wenn dies als erforderlich angesehen wird.



Ursache: Die im Vorwärtsbetrieb gemessenen Werte der walzenintegrierten Verdichtungsmessung sind höher/niedriger als die aus dem Rückwärtsbetrieb.

Lösung: Dies ist normal und ändert sich je nach Bodenart und Verdichtungsgrad. Normalerweise werden die Unterschiede mit zunehmender Verdichtung geringer. Die einzige Lösung ist, nur in eine Richtung zu fahren oder – wie üblich – zur Analyse nur die Meßwerte aus einer Fahrtrichtung heranzuziehen.

Ursache: Die Bandage arbeitet bei der Verdichtung im Sprungbetrieb. Das Abheben kann umfangreiche Schwankungen der Meßwerte der walzenintegrierten Verdichtungsmessung bewirken, da die Mittelwerte tendenziell sinken, wenn die Bandage auf härterem Boden in den Sprungbetrieb übergeht.

Lösung: Eine kleine Amplitude einstellen. Hebt die Bandage dann ebenfalls ab, hat der Boden die maximale Steifigkeit für das eingesetzte Verdichtungsgerät erreicht. Alternativ kann ein auf der Antriebsleistung basierendes System (MDP) mit walzenintegrierter Verdichtungsmessung eingesetzt werden, um festzustellen, ob sich dies irgendwie auf die Gleichmäßigkeit der Verdichtungsergebnisse auswirkt.

[DIE ZUKUNFT DER INTELLIGENTEN VERDICHUNG]

Wie bereits erwähnt, ist die Messung der Bodensteifigkeit aufgrund der zahlreichen variablen Einflußgrößen äußerst komplex. Mit zunehmendem Einsatz der *Intelligenten Verdichtung* wird man jedoch auch deren Vorteile besser verstehen. Je mehr Erfahrungen man mit dieser Technik sammelt, desto mehr werden die zusätzlichen Vorteile neuer Systeme wie Machine Drive Power (MDP) erkannt und Anwendungsprobleme gelöst, die die jüngste Entwicklung mit sich brachte. Mit der Zeit werden auch die Hardware-Lösungen für die verfügbaren Systeme preiswerter und können in einem noch größeren Umfang zur Unterstützung der Bodenverdichtung eingesetzt werden.

Das Verdichtungsgerät der Zukunft besitzt vermutlich mehrere Meßsysteme, da jede einzelne Technologie spezifische Einsatzmöglichkeiten bietet. Neue Meßtechniken werden sich etablieren, vielleicht ein bodeneindringendes Funkmeßsystem, Ultraschalltechniken oder magnetische Bildgebungssysteme. Dreidimensionale Bilder, die den gesamten Straßenkörper darstellen, könnten erstellt werden. Techniken für die Messung des Wassergehalts könnten einen Fahrer darauf hinweisen, wann ein Wasserwagen oder ein Aufreißer erforderlich ist. Jeder Walzenfahrer würde Zugang zu den Informationen aller auf der Baustelle arbeitenden Maschinen haben (Maschine-Maschine-Kommunikation). Damit wäre es möglich, den gesamten Baufortschritt in Echtzeit zu verfolgen: ein Vorteil, wenn mehrere Verdichtungs- oder Meßgeräte gleichzeitig eingesetzt werden. Baustellenleiter könnten die Daten überwachen und nutzen, um täglich die kosteneffizientesten Entscheidungen zu treffen.

Meßdaten werden in der Zukunft mehr und mehr an Bedeutung gewinnen. Aus der Notwendigkeit, mit Hilfe noch zu entwickelnder Sensoren diese Daten einfach, schnell und sicher von der Baustelle auf externe Geräte (PCs, Tablets usw.) zu übertragen, wird sich ein spezifischer Entwicklungsbereich ausbilden. Die aktuellen Technologien stellen bereits jetzt ein so viel Mehr an Daten zur Verfügung, die für Bauleiter und Bauüberwacher von erheblichem Nutzen sind. Die Möglichkeiten, Daten extern filtern und sortieren sowie einen baustellenseitigen Bericht erstellen zu können, der den Anforderungen des Auftraggebers entspricht, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Gerade in diesem Bereich sind in naher Zukunft viele Vorgaben zu erwarten.

Wir befinden uns in einer äußerst interessanten Ära der Verdichtungswissenschaft, und die Zeit wird es mit sich bringen, welche Fortschritte und Technologien auf uns zukommen werden. Eines ist jedoch gewiß: Mit den steigenden Anforderungen an die Einsparung von Kosten, an die Qualität und die Effizienz, wird der Einsatz der *Intelligenten Verdichtung* zunehmend gefordert und weltweit in die Ausschreibungen aufgenommen werden.

ANHANG

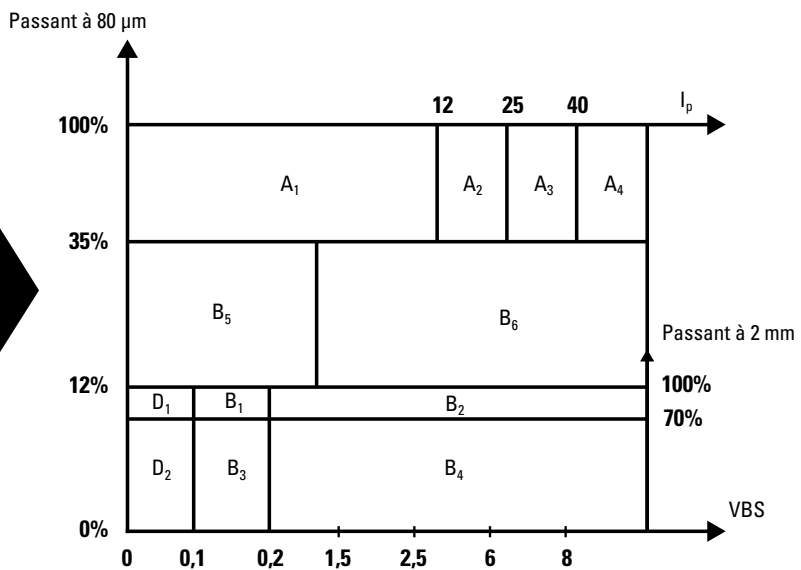
[KLASSIFIZIERUNG DER BÖDEN]

AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups)											
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)							Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Sieve Analysis Percent Passing:											
# 10	0-50		51-100								
#40	0-30	0-50	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
#200	0-15	0-25	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
Characteristics of Fraction Passing #40:											
Liquid Limit				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+
Plasticity Index	0-6		N.P.	0-10	0-10	11+	11+	0-10	0-10	11+	11+
Group Index	0		0	0		0-4		0-8	0-12	0-16	0-20
Usual Types of Significant Constituent Materials	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
General Rating as Subgrade	Excellent to Good						Fair to Poor				

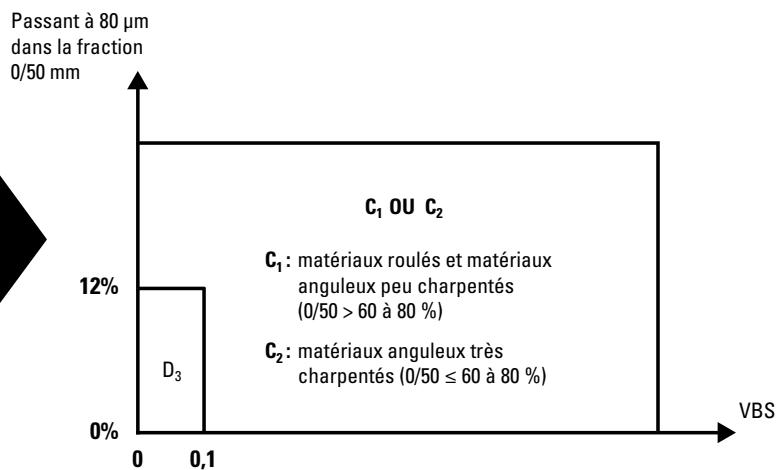
AASHTO-Bodenklassifizierung

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

Sols
D_{max} ≤ 50 mm



Sols
D_{max} > 50 mm



Matériaux rocheux

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
		Calcaires	R ₂
	Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R ₃
	Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅
Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆

Matériaux particuliers

Sols organiques et sous-produits industriels	F
--	---

Hauptgruppe	Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm	Korngrößenanteil > 2,0 mm	Gruppe (allgemein)	Gruppe (detailliert)	Kurzzeichen Gruppensymbol
Grobkörniger Boden	≤ 5	< 40	Kies	Enggestufte Kiese	GE
				Weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW
				Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GI
			Sand	Enggestufte Sande	SE
				Weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SW
				Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SI
Gemischtkörniger Boden	5 bis 40	< 40	Kies-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU*
			Kies-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT*
		≤ 40	Sand-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU*
			Sand-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST*
Feinkörniger Boden	< 40	—	Schluff	Leicht plastische Schluffe $W_L \leq 35$	UL
				Mittelpastische Schluffe $W_L = 35$ bis 50	UM
			Ton	Leicht plastische Tone $W_L \leq 35$	TL
				Mittelpastische Tone $W_L = 35$ bis 50	TM
				Ausgeprägt plastische Tone $W_L = 50$	TA
				—	—
Organogener Boden	< 40	—	Nicht brenn- und schwelbar	Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50	OU
	≤ 40			Organogene Tone $W_L > 50$	OT
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen	OH
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen	OK
Organischer Boden	—	—	Brenn- und schwelbar	Nicht bis mäßig zersetzte Torfe	HN
				Zersetzte Torfe	HZ
				Mudden (Faulschlamm)	F
Auffüllung ¹	—	—	—	Auffüllung aus Fremdstoffen	A

1 - Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Deutsches System der Bodenklassifizierung (DIN 18196)

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE	
Boulders	None	Greater than 12"	
Cobbles	None	75 mm (3") to 12"	
1- Course Grained Soils:			
Gravel	G	75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm)	
Course Gravel		75 mm to 19 mm	
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm	
Sand	S	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)	
Course Sand Medium Sand Fine Sand			
2- Fine Grained Soils:			
Fines		Less than #200 Sieve	
Silt	M	Use Atterberg Limits	
Clay	C	Use Atterberg Limits	
3- Organic Soils			
	O	Use Atterberg Limits	
4- Peat			
	Pt	Visual Identification	
Gradation Symbols		Liquid Limit Symbols	
Well-graded	W	High LL	H
Poorly-graded	P	Low LL	L

United Soil Classification System (USC) des U.S. Bureau of Reclamation

SOIL GROUPS GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate			SUB-GROUPS and in-laboratory identification				
			GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.06 mm	LIQUID LIMIT	
COARSE SOILS less than 35% of the material is finer than 0.06 mm	GRAVELS More than 50% of coarse material is of gravel size (coarser than 2 mm)	Slightly silty or clayey GRAVEL	G GW GP	GW GPu CPg	0 to 5		
		Silty GRAVEL	G-F	G-M	GWM GPM	5 to 15	
		Clayey GRAVEL		G-C	GWC GPC		
		Very silty GRAVEL	GF	GM	GML, etc.	15 to 35	
		Very clayey GRAVEL		GC	GCL GCI GCH GCV GCE		
	SANDS More than 50% of coarse material is of sand size (finer than 2 mm)	Slightly silty or clayey SAND	S	SW SP	SW SPu SPg	0 to 5	
		Silty SAND	S-F	S-M	SWM SPM	15 to 35	
		Clayey SAND		S-C	SWC SPC		
		Very silty SAND	SF	SM	SML, etc.	15 to 35	
		Very clayey SAND		SC	SCL SCI SCH SCV SCE		
FINE SOILS more than 35% of the material is finer than 0.06 mm	Gravelly or sandy SILTS and CLAYS 35% to 65% fines	Gravelly SILT	FG	MG	MLG, etc.		
		Gravelly CLAY		CG	CLG CIG CHG CVG CEG		
		Sandy SILT	FS	MS	MLS, etc.		
	Sandy CLAY	CS		CLS, etc.			
	SILTS and CLAYS 65% to 100% fines	SILT (M SOIL)	F	M	ML, etc.		
		CLAY		C	CL CI CH CV CE		< 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90
	ORGANIC SOILS		Description letter 'O' suffixed to say group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount e.g. MHO – organic silt of high LL		
PEAT		Pt – consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)					

Primary Letter

G = Gravel
S = Sand
M = Silt
C = Clay
O = Organic Soil
Pt = Peat

Secondary Letter

W = Well graded
P = Poorly graded
M = With non-plastic fines
C = With plastic fines
L = Of low plasticity (LL < 50)
H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v1.00 Sept 2010

Britisches System der Bodenklassifizierung

[VERDICHTUNGSANFORDERUNGEN]

im Verdichtungsgerät integrierte Vorrichtungen zur kontinuierlichen Überwachung der Verdichtung

BASIC/MINIMUM REQUIREMENTS					
One of the lower 3 blocks (one value)	At least 2 blocks	3 top blocks	Top block or 4 lower blocks	2 lower blocks	At least one block
		Time stamp	Close-loop mode		
Qualitative observation (ex: double-jump...)		Mapping on board	Actual N passes	Data post-treatment facilities, & additional information	
Dimensional bearing capacity (ex: modulus...)	Number of passes (actual vs. target value)	Automatic positioning on board 2D or 3D	Actual frequency	Result by histogram and statistics	Data exchange between machines
Dimensional (ex: stiffness...)	Relative evolution (% related to target values D or ND)	Manual positioning 2D + layer (optional)	Actual amplitude A0	Result by distance or surface	Remote data exchange
Non-dimensional value	End of compaction (D or ND)	Distance 1D	Actual speed V	Identification of machine and CCC device	Data exchange from office (USB stick)
1 Behaviour of the material (dynamic response)	2 Status of compaction (Comparison)	3 Positioning, traceability during process	4 Operational information (record and display)	5 Control report, documentation	6 Communication, others

From the pamphlet *CECE – Guidelines to evaluate soil and asphalt compactors equipped with continuous compaction control (CCC)*

GLOSSAR DER FACHBEGRIFFE

- A -

Abheben	Auch bezeichnet als Sprungbetrieb. Ein Phänomen, bei dem die Bandage von einem Vibrationsschlag zurückprallt und hoch genug springt, damit sich die Unwucht einmal um ihre Achse drehen kann, während sich die Bandage noch in der Luft befindet.
Amplitude	halber Schwingweg der Bandage
Auflockerung	Verlust an Verdichtung durch weitere, nicht erforderliche Verdichtungsarbeit
Ausrollgrenze	Zustandsgrenze nach Atterberg: bezeichnet den Punkt, an dem ein Boden genug Feuchtigkeit (Wasser) enthält, damit er verformbar ist

- B -

Boden	Die aus Partikeln bestehenden Materialien können auch organische Bestandteile enthalten.
Bodenstabilisierung	Oberbegriff für die Strukturverbesserung und -verfestigung des Bodens mit dem Ziel, dessen Tragfähigkeit zu erhöhen
Bodenverbesserung	Verfahren, mit dem die Eigenschaften eines Bodens durch chemische oder mechanische Mittel verändert werden, um dessen Eignung als Baustoff zu verbessern

- C -

CMV-Verfahren	ein vom schwedischen Unternehmen Geodynamik entwickeltes und von Caterpillar eingesetztes Verfahren zur Anzeige der Bodensteifigkeit
----------------------	--

- D -

Damm	jede Schüttung, die höher liegt als die angrenzende Oberfläche
Dichte	Die Dichte gibt das Verhältnis der Masse eines Körpers zu seinem Volumen an und ist traditionell ein Indikator für die Tragfähigkeit.
Durchlässigkeit	Durchgängigkeit eines Materials für Gase oder Flüssigkeiten

- E -

Eigenfrequenz	Frequenz, bei der eine Masse aufgrund ihrer spezifischen Merkmale schwingt
Elastizität	Fähigkeit eines Bodens, nach einer Verformung wieder in seinen ursprünglichen Zustand oder in dessen Nähe zurückzukehren, nachdem die Belastung aufgehoben wurde
energiebasierte Meßmethode (MDP)	Das MDP-Meßprinzip (Machine Drive Power) basiert auf der Ermittlung des Rollwiderstandes der Bandage beim Überfahren des eingebauten Bodens.

- F -

Feinanteile	Materialien mit einer äußerst geringen Partikelgröße, die unter einem bestimmten – durch den Siebversuch festgelegten – Schwellenwert liegen. Feinanteile passieren das kleinste (unterste) Sieb. Weltweit werden unterschiedliche Siebgrößen benutzt, die sich allerdings nur geringfügig unterscheiden.
feinkörnige Böden	Böden, in deren Zusammensetzung die Feinanteile überwiegen
Fliehkraft (oder Zentrifugalkraft)	Trägheitskraft, die radial von der Rotationsachse nach außen gerichtet ist und durch eine rotierende Unwucht erzeugt wird
Fließgrenze	Zustandsgrenze nach Atterberg: bezeichnet den Punkt, an dem ein Boden so viel Wasser enthält, daß er als Flüssigkeit betrachtet wird
Frequenz	Anzahl der Umdrehungen der Unwucht pro Sekunde

- G -

Gefälle	gibt die Neigung einer Oberfläche an
Gesamtkraft	maximale Vibrationskraft, die ein Verdichtungsgerät auf den Boden übertragen kann
Gesteinskörnung	körniger, tragfähiger, mineralischer Bestandteil des Straßenaufbaus, der üblicherweise aus Sand, Kies, Muschelkalk, Schlacke, gebrochenem Gestein oder feinem Material besteht
gleichförmig abgestuft	auch als schlecht abgestufter Boden bezeichnet; Eigenschaft grobkörniger Böden, Partikel relativ gleichförmiger Größe zu enthalten; daher schwerer verdichtbar
Gleichmäßigkeit	Konstanz der Materialbeschaffenheit und des Verfahrens
Globales Navigations-satellitensystem (GNSS)	Oberbegriff für satellitenbasierte Positionsbestimmung und Navigation einschließlich GPS und GLONASS
Globales Positionsbestimmungssystem (GPS)	ein aus 24 Satelliten und Bodenstationen bestehendes, US-gesteuertes, weltweites Funknavigationssystem
GLONASS	ein dem GPS ähnliches, russisches Navigationssatellitensystem
Gradient der Verdichtung	siehe Verdichtungsverlauf
grobkörniger Boden	Klassifikation für Böden, die aus nichtbindigen Partikeln (Körnern) bestehen. Sand und Kies gelten als grobkörnige Böden. Grobkörnige Böden werden als schlecht, intermittierend oder weit gestuft definiert, was deren Verdichtungswilligkeit widerspiegelt.

- H -

Hohlräume (Poren) der Raum in einem Materialvolumen, in dem keine mineralischen Feststoffe zu finden sind

- I -

Intelligente Verdichtung Als intelligente Verdichtung („Intelligent Compaction“) wird allgemein eine auf den Verdichtungsprozeß gerichtete, walzenintegrierte Meßtechnik bezeichnet, die durch die Beseitigung der Unsicherheit manueller Messungen die Arbeitseffizienz auf der Baustelle steigert

- K -

Kalibrierung Anpassung der Systemparameter an die Verdichtungseigenschaften des eingebauten Bodens

Kapillarität Fähigkeit eines Bodens, Wasser auf- oder absteigen zu lassen

Kies grobkörniges, mineralisches Material; gemäß der USCS-Klassifikation handelt es sich dabei um Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 75 mm, die das Sieb Nr. 4 nicht passieren können

Kneten Durch den Knetprozeß werden die Partikel zu einer dichteren Masse umgelagert.

Kohäsion (oder Haftfestigkeit) die zusammenhaltenden Kräfte in bindigen Böden, d. h. die Fähigkeit eines Materials, bei Änderungen seines Wassergehalts oder bei Überflutung seine Form beizubehalten

Kompressibilität das Maß, um das das Volumen eines Materials reduziert wird, wenn eine Kraft darauf einwirkt

Kornabstufung Größenbereich einzelner Bodenpartikel

Korn eine Mineralpartikel

Korngrößenverteilung Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Korngrößen im Boden

Kraft-Weg-Verfahren Verfahren zur Ermittlung der Bodensteifigkeit, indem aus der Bandagencharakteristik und der Bandagenbeschleunigung die Einsinktiefe der Bandage berechnet wird

- L -

Linienlast ein Maß, um das Verdichtungspotential von Walzenzügen mit Glattmantelbandagen im statischen Betriebsmodus miteinander vergleichen zu können.

- M -

maschinenintegrierte Messung der Verdichtung Durchführung von Verdichtungsmessungen mit Hilfe in der Walze eingebauter Systeme

- P -

Partikelverteilung	siehe Korngrößenverteilung
Planum	Eine eben hergestellte Fläche, auf der weitere Baumaßnahmen für den Straßenbau ausgeführt werden. Im wesentlichen dient das Planum als Fundament des Bauwerks und wird manchmal als „Erdplanum“ oder „Planie“ bezeichnet.
Plastizität	Eigenschaft eines feinkörnigen Bodens, sich ohne Rißbildung oder erkennbare Volumenänderung über den Rückverformungspunkt hinaus zu verformen
Plastizitätszahl	Differenz zwischen Fließ- und Ausrollgrenze eines Bodens. Dieses Maß wird herangezogen, um zu bestimmen, in welchem Ausmaß eine Bodenverfestigung für feinkörnige Böden erforderlich ist. Anhand der Plastizitätszahl kann unterschieden werden, ob Schluff oder Ton vorliegt.
Proctorversuch (einfacher oder modifizierter)	Laborversuch, bei dem der optimale Wassergehalt eines Bodens zum Erreichen der maximalen Trockendichte bei definierter Verdichtungsarbeit bestimmt wird
Produktionsmodus	Nutzung des Verdichtungssystems für hochproduktive Anwendungen mit eingeschränkter Genauigkeit
Prüfmodus	Nutzung des Verdichtungssystems für hochpräzise Anwendungen mit eingeschränkter Produktivität

- Q -

Qualitätskontrolle (QK)	das Verfahren, das ein Unternehmen umsetzt, um sicherzustellen, daß die Verdichtungsarbeit gemäß den Vorgaben ausgeführt wird
Qualitätssicherung (QS)	Summe aller Maßnahmen, die herangezogen werden, um eine konstante Verdichtungsqualität zu erzielen

- R -

Resonanz	Übereinstimmung der Vibrationsfrequenzen zweier schwingender Massen
Resonanzfrequenz	bei der Bodenverdichtung der Punkt, an dem die Amplitude des schwingungsfähigen Bodens größer ist als bei dessen Anregung durch die vibrierende Bandage
RMV-Wert (Resonance Meter Value)	ein Wert, der angibt, wie weit sich die Bandage der Grenze zum Abheben nähert
Rollwiderstand	die Kraft, die der Abrollbewegung der Walzenbandage auf dem Boden entgegengerichtet ist

- S -

Sand	nichtbindige, mineralische Partikel bestimmter Form und Größe
Scherfestigkeit	Fähigkeit von Bodenpartikeln, bei der Einwirkung von Scherkräften Verschiebungen zueinander zu widerstehen
Schlag (Aufprall)	Erzeugung eines Kraftstoßes (schnelle Impulsänderung), beispielsweise durch das Herabfallen eines Gewichtes. Schläge mit niedriger oder unregelmäßiger Frequenz (50 bis 600 Schläge pro Minute) gelten als Stoßkräfte.
schlecht gestuft	auch als gleichförmig abgestufter Boden bezeichnet; Eigenschaft grobkörniger Böden, Partikel relativ gleichförmiger Größe zu enthalten; daher schwerer verdichtbar
Schluff	bindiges, feinkörniges mineralisches Material (Boden)
Schüttung	eine einzelne, aus Bodenmaterial bestehende Schicht, die in der Dicke variieren kann
Setzen	Prozeß der Senkung des Straßenbauwerkes aufgrund der Verfestigung des aufgeschütteten Bodens
Sprungbetrieb	siehe Abheben
Station	nicht standardisierter, baustellenbezogener, technologischer Abschnitt
statischer Druck	Mit dem Verdichtungsfortschritt und damit kleiner werdender Kontaktfläche zwischen Walzenbandage und Boden nimmt bei konstanter Gewichtskraft der Bandage und des Rahmens (Walzenzug) der statische Druck zu.
Steifigkeit (Boden)	Als Steifigkeit wird in der Bodenmechanik die Biegebeständigkeit unter Last bezeichnet. Sie ist ein indirektes Merkmal für die Tragfähigkeit.
Struktur	Die Struktur einer Bodenpartikel beeinflusst die Reibung im Kontaktbereich mit anderen Partikeln.

- T -

Ton	feinkörniges Bodenmaterial, das aufgrund des elektro-chemischen Potentials an seiner spezifisch großen Oberfläche Wasser bindet
Tragfähigkeit	Fähigkeit eines Materials, eine Last zu tragen
Tragschicht	Die aus anforderungsgerechtem Material in einer bestimmten Dicke aufgebaute und veraltet auch als „Deckenunterbau“ bezeichnete Tragschicht hat die Aufgabe, Lasten zu verteilen, als Drainage zu fungieren und die Frosteinwirkung zu minimieren.

- U -

Übergang	Wie oft eine Walze über einen Abschnitt fährt. Manchmal gilt als „Übergang“ die Vorwärts- und Rückwärtsfahrt, d. h. die doppelte Überfahrt über einen bestimmten Bereich. Manchmal wird als Übergang eine einzelne Fahrt einer Walze über einen Abschnitt bezeichnet. Caterpillar bezeichnet als Übergang eine einzelne Fahrt über einen Abschnitt entweder in Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung.
Ungleichförmigkeitszahl	Kennwert zur Beschreibung der Sieblinie (Körnungslinie, Körnungskurve) eines Bodens
Unterbau	Schicht zwischen Planum und Tragschicht

- V -

Verdichtung	Verminderung der Hohlräume in einem Material durch Einwirken von statischen bzw. dynamischen Kräften; Erhöhung der Dichte
Verdichtungsmeßwert (Compaction Meter Value, CMV)	Der CMV-Wert gibt einen Hinweis auf die Bodensteifigkeit: Die Beschleunigung der Walzenbandage wird kontinuierlich mit Meßtechnik erfaßt, und aus dem Beschleunigungssignal wird ein dimensionsloser Relativwert der Verdichtung ermittelt. Der CMV-Wert ist der Quotient aus der Amplitude der ersten Oberschwingung (doppelte Vibrationsfrequenz der Bandage) und der Amplitude bei der Erregerfrequenz.
Verdichtungsverlauf (Gradient der Verdichtung)	Verlauf der Verdichtung innerhalb der Schicht. Tendenziell sind Böden im Bereich der Oberfläche und der Unterlage geringer verdichtet, während die Verdichtung im dazwischen liegenden Bereich stärker ausfällt.
Verdichtungswilligkeit	das Maß, in dem materialspezifische Verformungswiderstände des Bodens überwunden werden
Vibration	Eine hochfrequente Reihe von Schlägen (1400 bis 4000 Schläge pro Minute), die rasch aufeinanderfolgende Druckwellen erzeugt. Die von einer Walze erzeugten Vibrationen können die Verbindungen zwischen den Teilchen des zu verdichtenden Bodens lösen.

- W -

Wassergehalt	die in einer Masse enthaltene Flüssigkeitsmenge (Wasser) im Verhältnis zur Gesamtmasse
weitgestuft	auch als gut abgestuft bezeichnet; Eigenschaft grobkörniger Böden, Partikel vieler unterschiedlicher Größen zu enthalten; daher leichter verdichtbar
Zustandsgrenzen nach Atterberg	Festlegung von sieben Stufen der Bodeneigenschaften beim Übergang des Bodens vom festen in den flüssigen Zustand. Die wichtigsten Konsistenzgrenzen zwischen diesen Bereichen sind Ausroll- und Fließgrenze.



WARNING
Always use proper tie-off technique. See the operator's manual for details.
WARNING
Always use proper tie-off technique. See the operator's manual for details.

STUBELESS



CAT CS78B



CATERPILLAR®