

# Dynamische Bodensteifigkeit als Qualitätskriterium für die Bodenverdichtung

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kröber, FH Koblenz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Rudolf Floss, TU München

## 1. Zusammenfassung

Seit etwa 2 Jahrzehnten ist es möglich, durch Messungen des Schwingungszustandes am Verdichtungswerkzeug bereits während des Verdichtungsvorganges Messgrößen zur Beurteilung des Verdichtungszustandes anzugeben. Dabei handelt es sich um indirekte Messgrößen, die durch eine Kalibrierung auf die klassischen Messgrößen zurückgeführt werden müssen.

Zur Überprüfung der Verdichtung werden bei den klassischen Verfahren physikalisch verifizierbare Messgrößen, wie Dichte und Verformungsmodul, zur Beurteilung herangezogen. Die Ermittlung erfolgt im Anschluss an den Verdichtungsvorgang.

Durch systematische Weiterentwicklung des Messverfahrens ist es nun möglich bei jeder Vibrationsbewegung aus dem Zusammenhang zwischen Kraft und Einsenkung des Verdichtungsgerätes unmittelbar eine Messgröße zu ermitteln, die in direktem Zusammenhang zum Verformungsmodul  $E_V$  des Bodens steht. Dieser Messwert wird mit Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  bezeichnet. Da es sich um eine direkte, physikalisch verifizierbare Messgröße handelt, kann eine Kalibrierung mit dem Verformungsmodul zukünftig entfallen.

Durch Messungen mit unterschiedlichen Vibrationsgeräten und unterschiedlichen Böden wird gezeigt, dass der ermittelte Vibrationsmodul unabhängig von den Maschinenparametern ermittelt werden kann.

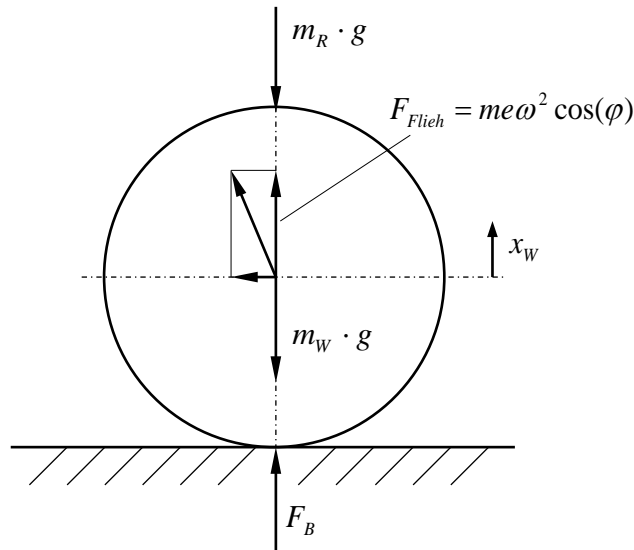
## 2. Physikalische Grundlagen des Messprinzips

Zur Messung des Bewegungsverhaltens der schwingenden Bandage werden Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt. Nach dem Newton'schen Axiom messen die Beschleunigungsaufnehmer die Absolutbeschleunigungen der schwingenden Masse in Abhängigkeit von der Zeit. Durch die Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer lassen sich alle in der Schwingebene auftretenden Bewegungsabläufe analysieren (siehe z.B. /4/).

Für Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  wird die vertikale Komponente der Beschleunigung numerisch ausgewertet. Die Ermittlung des Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  stützt sich deshalb auf die rein vertikale Betrachtung, weil für diesen Fall in der Literatur /2/ eine geschlossene Lösung existiert, mit der aus dem Kraft/Weg-Zusammenhang auf den Modul des Bodens bzw. des Untergrundes geschlossen werden kann.

In vertikaler Schwingrichtung wirken neben der gemessenen Massenkraft des Walzenkörpers folgende Kräfte:

- die Fliehkraft des Erregersystems ,
- die Gewichtskraft der schwingenden Masse zuzüglich der durch die verwendeten Gummifederelemente im Wesentlichen statisch wirkende Gewichtskraft der Obermasse; die Summe ist gleich der gesamten statischen Achslast,
- die gesuchte Bodenkontaktkraft.



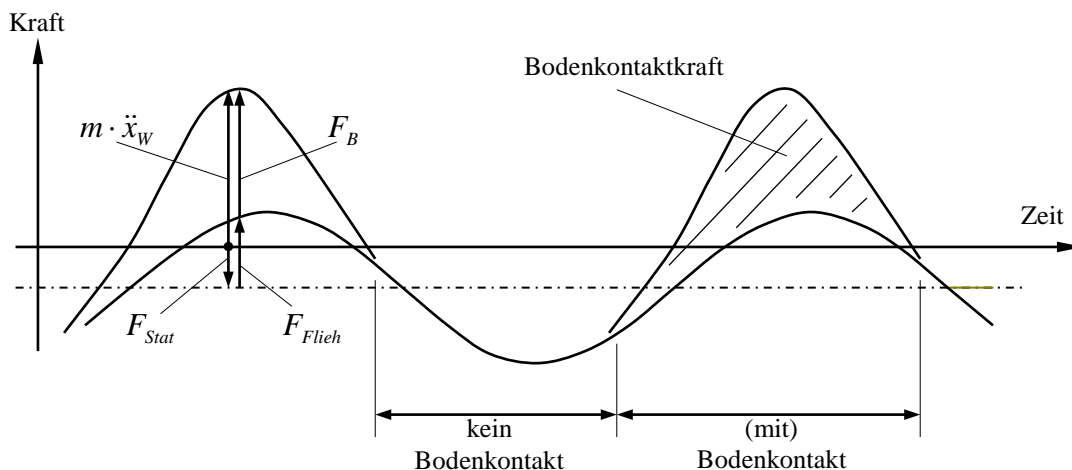
**Fehler! Textmarke nicht definiert.** Bild 1: Kräftegleichgewicht am schwingenden Walzenkörper

$$m_W \cdot \ddot{x}_W = \underbrace{m \cdot e \cdot \omega^2 \cos(\varphi)}_{F_{\text{Flieh}}} - \underbrace{m_W \cdot g - m_R \cdot g}_{-F_{\text{Stat}}} + F_B$$

$$m_W \cdot \ddot{x}_W = \underbrace{F_{\text{Flieh}} - F_{\text{Stat}}}_{\text{Sinusfunktion, siehe Bild 2}} + \underbrace{F_B}_{\text{Bodenkontaktkraft}}$$

Die Auswertung geht zunächst aus von dem gemessenen zeitlichen Verlauf der Beschleunigung bzw. der proportionalen Massenkraft. Diese Massenkraft lässt sich in zwei Teile aufteilen:

- einen um die statische Achslast  $F_{\text{Stat}}$  nach unten verschobenen reinen sinusförmigen Fliehkraftverlauf  $F_{\text{Flieh}}$
- den Differenzanteil, die gesuchte Bodenkontaktkraft  $F_B$



**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Kräfte und Bodenkontakt

Aus der Beschleunigung wird parallel zur Berechnung der Bodenkontaktkraft durch zweimalige Integration der Schwingweg des schwingenden Walzenkörpers ermittelt, Bild 3. Zur Auswertung wird nun die zwischen dem Boden und Bandage wirkende Bodenkontaktkraft über dem Schwingweg des Walzenkörpers bzw. der dem Boden aufgeprägten Verformung aufgetragen. Dadurch entsteht das sogenannte Indikatorgramm. Indikatorgramme werden in der Technik auch verwendet bei

Verdichtern und Kompressoren sowie bei Verbrennungskraftmaschinen. Die indizierte Fläche entspricht der pro Exzenterumdrehung in den Boden abgegebenen Verdichtungsarbeit bzw. der abgegebenen Energie. Nach Multiplikation mit der Erregerfrequenz erhält man die abgegebene Verdichtungsleistung.

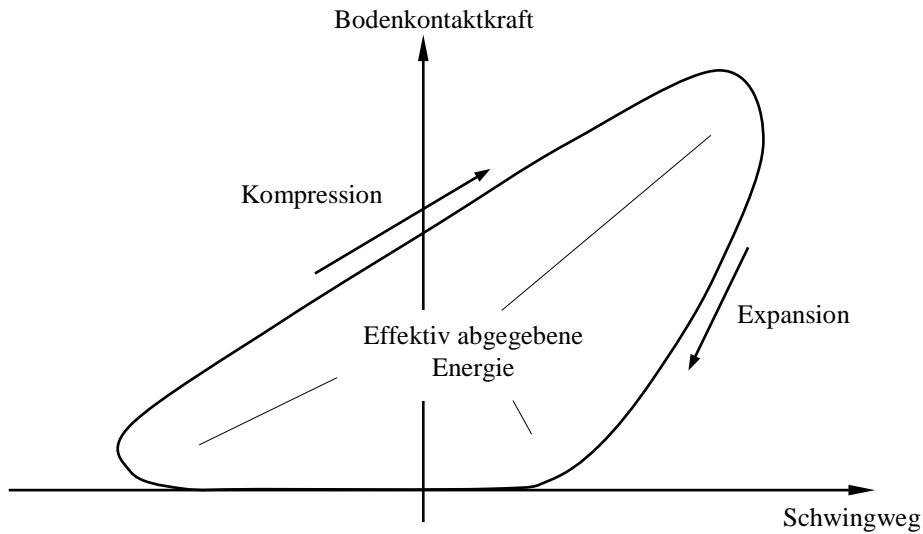


Bild 3: Indikatordiagramm, Darstellung von Kompressions- und Expansionsphase, effektiv abgegebene Verdichtungsenergie

Die weitere Betrachtung geht jedoch nicht von der indizierten Fläche aus, sondern von der Steigung der Kraft-Weg-Kennlinie während der Kompressionsphase des Bodens. Es ist plausibel, dass bei einer geringen Steifigkeit des Bodens die Kompressionskurve flach verläuft und bei zunehmender Steifigkeit des Bodens während der Kompressionsphase der in den Boden eindringenden Bandage mehr Widerstand entgegengesetzt wird.

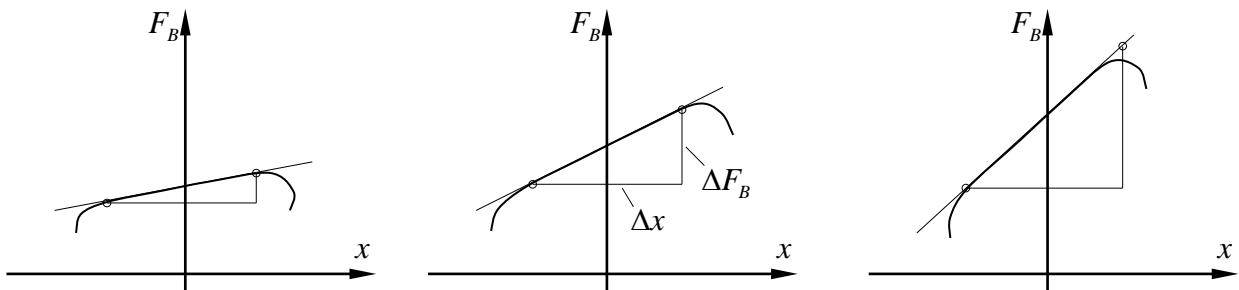


Bild 4: Zunehmende Steifigkeiten des Bodens bzw. des Untergrundes führen zu einer höheren Steigung der Kraft-Weg-Kennlinie

Eine Kenngröße zur Beurteilung der Steifigkeit des Bodens stellt somit das Verhältnis von  $\Delta F_B$  zu  $\Delta x$  dar.

$$k = \frac{\Delta F_B}{\Delta x}$$

Diese Kenngröße ist mit verschiedenen grundsätzlichen Nachteilen behaftet. Die Steifigkeit  $k$  steigt mit der Bandagenbreite und dem Bandagendurchmesser an. Ferner besteht eine Abhängigkeit von der schwingenden Masse, der Obermasse und der installierten Unwucht. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Steifigkeit  $k$  im Gegensatz zu den in der Vergangenheit üblichen indirekten Kenngrößen (z.B. Omega-Anzeige beim Terrameter) zwar eine physikalisch verifizierbare Kenngröße handelt, die Messwerte jedoch nicht direkt von einem Walzentyp auf den anderen übertragbar sind.

Die hier neu vorgestellte Methode zur Beurteilung der Steifigkeit verwendet nicht die Steifigkeit  $k$  des Untergrundes, sondern geht von der Definition des E-Moduls aus. Als Bezeichnung wird später der Begriff Vibrationsmodul  $E_{\text{Vib}}$  eingeführt.

Zum besseren Verständnis seien zunächst die Zusammenhänge zur Bestimmung des Verformungsmoduls  $E_V$  erläutert. Beim Plattendruckversuch handelt es sich um ein Prüfverfahren, bei dem eine kreisförmige Lastplatte stufenweise be- und entlastet wird. Der Verformungsmodul selbst wird aus dem Belastungszyklus bzw. den Belastungszyklen gewonnen. Ausgangspunkt ist hier die Gleichung für die Setzung der Oberfläche des Halbraumes einer kreisrunden Platte:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{4 \cdot G \cdot r}{1 - \nu}$$

G Schubmodul  
r Radius Platte  
ν Poissonzahl

Diese Gleichung basiert auf einer geschlossenen Lösung für den linear, elastisch, isotropen Halbraum und kann wie folgt interpretiert werden: Aufgrund eines gemessenen Kraft-Weg-Zusammenhanges ( $\Delta F$ ,  $\Delta s$ ) kann bei einer bestimmten Geometrie ( $r$ ) auf die Eigenschaften des Bodens geschlossen werden ( $G$ ,  $\nu$ ).

In dieser Gleichung sind folgende Größen zu ersetzen:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \Delta F = \Delta \sigma \cdot \pi \cdot r^2$$

Mit  $(1 - \nu) \cdot (1 + \nu) = 1 - \nu^2$  erhält man nach Auflösen nach  $E$  folgende Gleichung:

$$E = \frac{\pi \cdot (1 - \nu^2)}{2} \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$$

Daraus lässt sich die Formel für das Auswerteverfahren des Plattendruckversuches ablesen:

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s} \quad (\text{siehe DIN 18134, /5/})$$

Für die genaue historische Herleitung der Formel und weitergehende Erläuterungen wird auf /3/ verwiesen.

Gewiss lässt sich der Boden in Wirklichkeit nicht als linear, elastisch und isotrop ansehen. Würde er diese Bedingung jedoch erfüllen, dann konvergiert der Verformungsmodul gegen den E-Modul.

Gegenüber der kreisrunden Lastplatte ändert sich bei der Vibrationswalze die Form des Belastungskörpers von einer kreisrunden Platte in einen liegenden Zylinder. Die Berechnung der Kontaktbreite des Zylinders geht auf Hertz (1895, /1/) zurück. Die Kontaktbreite lässt sich in Abhängigkeit von Kraft, Geometrie und Materialeigenschaften bestimmen. Vielfach wird darauf hingewiesen, dass die Abplattung mit Hilfe der Hertz'schen Formeln nicht zu berechnen ist. Die Fragestellung der Abplattung bzw. der Einsenkung wurde 1939 von Lundberg /2/ veröffentlicht. Damit ist es möglich, ähnlich wie für die kreisrunde Platte auch für den liegenden Zylinder einen Kraft-Weg-Zusammenhang zu berechnen.

Die Formeln nach Lundberg können bei gegebener Kraft, Geometrie und Materialeigenschaften nach dem Weg der Einsenkung  $\delta$  explizit aufgelöst werden. Im ersten Schritt erfolgt die Bestimmung der Kontaktbreite, danach erfolgt die Berechnung der Einsenkung.

$$b = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R(1 - \nu^2)}{E} \cdot \frac{F_B}{l}}$$

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot \frac{F_B}{l} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1,8864 + \ln \frac{l}{b}\right)$$

b Kontaktbreite  
R Radius Bandage  
ν Querzahl  
E E-Modul  
F<sub>B</sub> Bodenkontaktkraft  
l Breite Bandage  
δ Einsenkung

Zur Vollständigkeit sei bemerkt, dass bei den Formeln eine parabelförmige Flächenlast über die Kontaktbreite zugrunde liegt, die Kontaktbreite stets klein gegenüber der Breite der Bandage sein muss und dass der zylindrische Walzenkörper eine leicht ballige Form besitzen muss. Diese ballige Form erhält der Walzenkörper im Laufe der Zeit bei Verschleiß in den Randbereichen bzw. ist bei verschiedenen Walzentypen schon durch einen gezielten Herstellungsprozess so vorgegeben. Diese Idealisierungen sind für praktische Fälle unbedeutend.

Bei bekannter Geometrie ( $R, l$ ) liefern die Formeln den Zusammenhang  $\delta = f(F_B, E)$ . Dabei kann die Poissonzahl  $\nu$  konstant mit 0,25 angesetzt werden. In den Termen  $(1-\nu^2)$  können geringfügige Änderungen der Querszahl  $\nu$  vernachlässigt werden. Im Prinzip liefert die Gleichung  $\delta = f(F_B, E)$  das in Bild 5 abgebildete Ergebnis. Im Hinblick auf die gewohnte Darstellung im Indikatorgramm wird die abhängige Größe  $\delta$  auf der Abszisse und  $F_B$  auf der Ordinate aufgetragen. Parameter ist der gesuchte E-Modul.

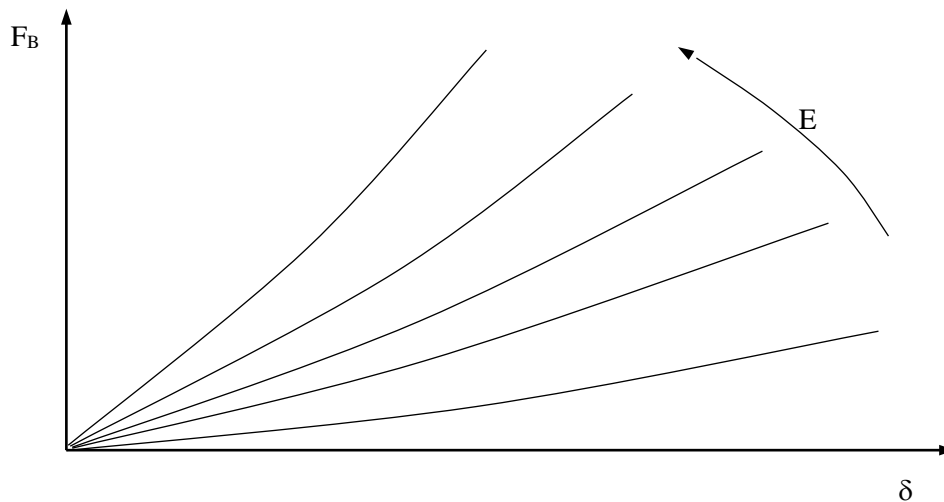


Bild 5: Abhängigkeit der Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit der Einsenkung (Parameter E-Modul) nach Lundberg

Der leicht progressive Kurvenverlauf kann so gedeutet werden, dass ab einer bestimmten Einsenkung die erforderliche Kraft bei weiterer Einsenkung überproportional anwächst, da mit wachsender Kontaktbreite ein größeres Bodenvolumen angekoppelt wird.

Beim Plattendruckversuch wird zur Auswertung die Belastungskurve herangezogen. In Analogie dazu geht auch hier der Verlauf der Kompressionskurve aus dem Indikatorgramm in die weitere Rechnung ein. Aus der Kurvenschar aus Bild 5 gibt es nur einen Kraft-Einsenkungs-Verlauf, der mit dem Verlauf der Kompressionskurve aus dem Indikatorgramm am besten übereinstimmt (Summe der Fehlerquadrate wird zum Minimum). Das Ergebnis dieser Rechnung liefert den gesuchten E-Modul.

Da der Untergrund sich nicht linear, elastisch und isotrop verhält, wird zur Unterscheidung ähnlich wie beim Plattendruckversuch für die praktische Auswertung nicht der Begriff des E-Moduls verwendet, sondern im Hinblick auf die verwendete Schwingungsanregung der Modul als Vibrationsmodul " $E_{vib}$ " bezeichnet.

Da im Ansatz die Geometrie der Walze (Breite, Durchmesser) und bereits bei der Bestimmung der Bodenkontaktkraft die statische Achslast, die Maschinenmasse und die Unwucht berücksichtigt sind, kann der ermittelte Vibrationsmodul  $E_{vib}$  als unabhängig von der Maschine angesehen werden. Es handelt sich nicht mehr um eine dimensionslose Kenngröße, deren Übertragbarkeit auf verschiedene Maschinentypen nur durch gesonderte Kalibrierung möglich wird. Hier kann mit verschiedenen Maschinen und Maschinentypen der Vibrationsmodul des Untergrundes bestimmt werden.

Die zugrunde gelegten Zusammenhänge für die Kraft-Einsenkung basieren auf der Lösung für vertikal wirkende Kräfte. Deshalb wird bei gerichteten Schwingern nur die Vertikalkomponente zur Berechnung verwendet. Messungen zeigen, dass dies möglich ist, wenn die Schwingrichtung um mehr als 12-15 Grad von der Horizontalen abweicht.

### 3. Messungen

#### 3.1. Abhängigkeit bzw. Unabhängigkeit der Messergebnisse von der Amplitude

Die folgenden Messungen sind so geordnet, damit anhand einer systematischen Betrachtungsweise das Funktionsprinzip auch im Hinblick auf Vergleich mit anderen Messverfahren schlüssig nachvollzogen werden kann.

Um die Abhängigkeit bzw. die Unabhängigkeit von der Amplitude zu untersuchen, muss im Hinblick auf den Einsatz bei gerichteten Schwingungserregern zunächst deren Tiefenwirkung untersucht werden. Bild 6 zeigt den grundsätzlich unterschiedlichen Verlauf der Dichte über der Messtiefe für Kreisschwinger und gerichtete Schwinger am Beispiel einer BW 213 Versuchswalze auf Grubenkies. Um den Einfluss deutlich herauszustellen, wurde eine Schütthöhe von 1m gewählt. Als Maß für die Verdichtung werden hier die Ergebnisse einer Rammsondierung sowie die Setzung der Schüttoberfläche herangezogen.

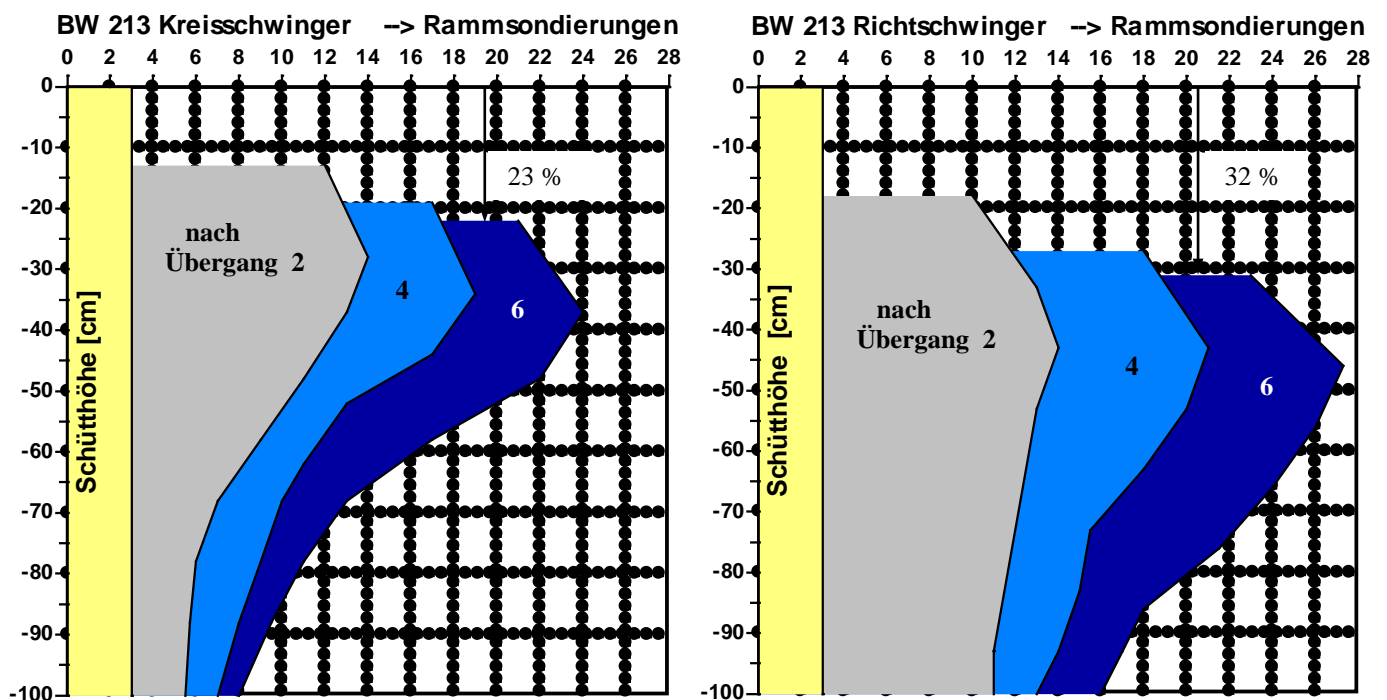


Bild 6: Tiefenprofil und Setzung der Oberfläche (Schlagzahl pro 10 cm) im Bodenquerschnitt nach Verdichtungsübergängen

Schon beim ersten Übergang zeigt sich beim Richtschwinger bei höherer Messtiefe ein wesentlich höherer Dichteanstieg als bei einem Kreisschwinger mit gleicher Frequenz, Linienlast und Amplitude. Dieser Trend wird bei weiteren Überfahrten bestätigt. Neben den höheren Schlagzahlen bei der Rammsondierung wird die höhere Dichte auch durch die höhere Setzung zum Ausdruck gebracht. Bodendruckmessungen bestätigen ebenfalls diesen Sachverhalt.

Bei einem so ausgebildetem Tiefenprofil zeigt der Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  bei kleiner Vertikalamplitude eine hohe Steifigkeit an, weil im Wesentlichen nur die oberen Schichten von der Vibration erfasst werden. Bei einer größeren Vertikalamplitude geht die Steifigkeitsanzeige zurück. Hier werden durch die größere Vertikalamplitude die tiefer liegenden weichen Schichten mit erfasst.

Im Folgenden sollte jedoch ein Nachweis erbracht werden, dass das Messergebnis des Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  auch wegen der gewünschten Vergleichbarkeit verschiedener Walzentypen unabhängig von der Amplitude bzw. Vertikalamplitude und damit des Schwingwinkels des Richtschwingers ist. Zu diesem Zweck wurden auf verschiedenen Baustellen Probeschüttfelder mit einer Schütthöhe von 40 cm angelegt. Diese wurden lagenweise verdichtet, um eine homogene Schüttung über der Tiefe sicherzustellen. Im Anschluss an die Verdichtung wurde das Probefeld dann mit verschiedenen Richtschwingerstellungen überfahren.

In Bild 7 ist die Steifigkeit  $k$  [MN/m] bei unterschiedlichen Schwingwinkeln (Schwingwinkel stets gemessen gegenüber der Horizontalen) des Schwingungserregers über der untersuchten Fahrstrecke dargestellt. Die Abbildung zeigt eine gleichmäßige Steifigkeit über die hier abgebildete Messbahn von 25 m. Das Ergebnis der Steifigkeitsanzeige ist praktisch unabhängig vom Schwingwinkel. Die Unabhängigkeit vom Schwingwinkel und damit von der Amplitude wird auch beim geregelten Vario-Control-Regelsystem bestätigt. Für jeden Messpunkt, der in Bild 7 dargestellt ist, wird im Rechner ein Indikatordiagramm ermittelt. Stellvertretend sind 3 Indikatordiagramme (Bodenkontaktkraft [KN] über Vertikalschwingweg [mm]) abgebildet.

Bei der hier durchgeführten Messung wurde noch die Steifigkeit  $k$  anstatt des Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  ausgewertet. Bei der Steifigkeit  $k$  handelt es sich um die Steigung der Kompressionskurve im Indikatordiagramm.

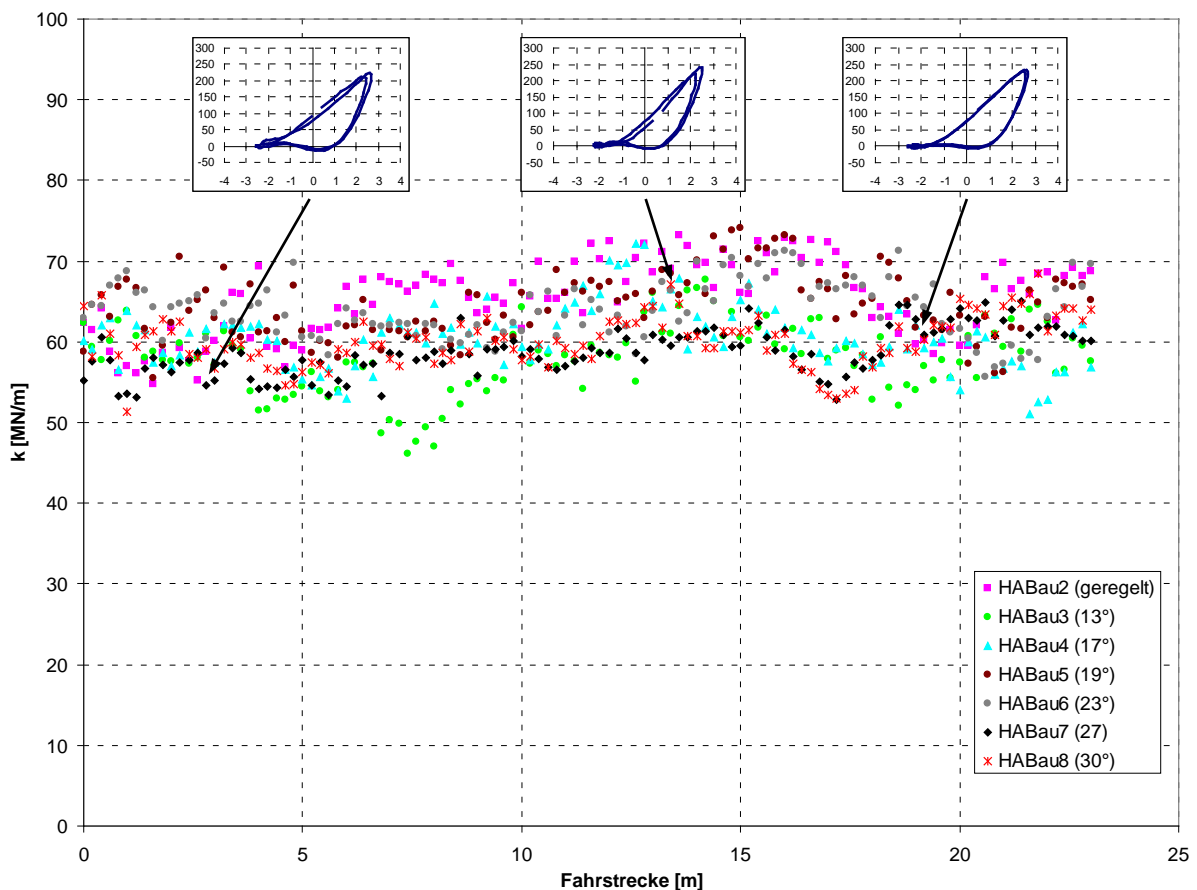


Bild 7: Steifigkeit  $k$  [MN/m] über einer Fahrstrecke, aufgenommen auf der NBS Köln-Rhein/Main, Los A, Bodenart: Tonstein, schluffig, sandig

Auf einer weiteren Baustelle (Bild 8) wurden wie zuvor beschrieben auf einer schichtenweise verdichteten über der Tiefe weitgehend homogenen Schüttung nach Abschluss der eigentlichen Verdichtung Versuchsmessfahrten durchgeführt. Diese erfolgten wieder bei festeingestellten Schwingwinkel, als auch im Vario-Regelbetrieb. Am Beispiel einer entdeckten Weichstelle, die sich über eine Fahrstrecke von etwa 10m erstreckte, wurde ebenfalls eine Unabhängigkeit der Messwerte vom momentanen Schwingwinkel festgestellt.

Als Untergrenze des Schwingwinkels wurde ein Wert von etwa 12-15 Grad ermittelt. Bei flacheren Schwingwinkeln stört der hohe horizontale Oszillationsanteil bei gleichzeitig verschwindendem Vertikalanteil eine Ermittlung des Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  aus dem vertikalem Schwingungsanteil.

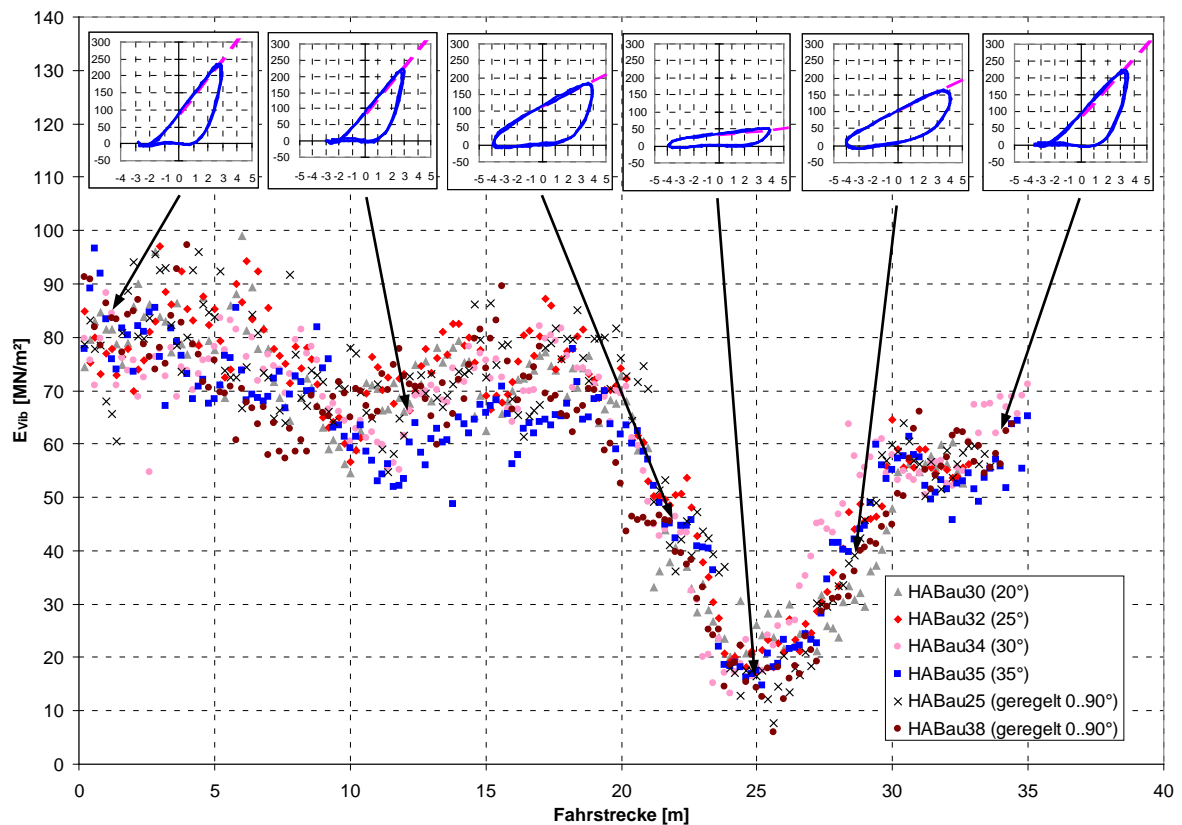


Bild 8: Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  [ $MN/m^2$ ] über einer Fahrstrecke, aufgenommen auf der NBS Köln-Rhein/Main, PFA 52, EÜ Wehl, Boden: gießig, sandig

### 3.2. Verdichtungsversuche und Vergleich mit dem Plattendruckversuch

Neben der Untersuchung der Richtungsunabhängigkeit wurden auch Versuche zum Vergleich mit dem Plattendruckversuch durchgeführt. Als Material wurde ein schluffiger Kies verwendet. Der Verdichtungsfortschritt in Abhängigkeit der Übergänge lässt sich anhand des permanent angezeigten Vibrationsmoduls sofort erkennen und beurteilen (Bild 9). An den exemplarisch abgebildeten Indikatordiagrammen kann die steigende Steifigkeit ebenfalls abgelesen werden.

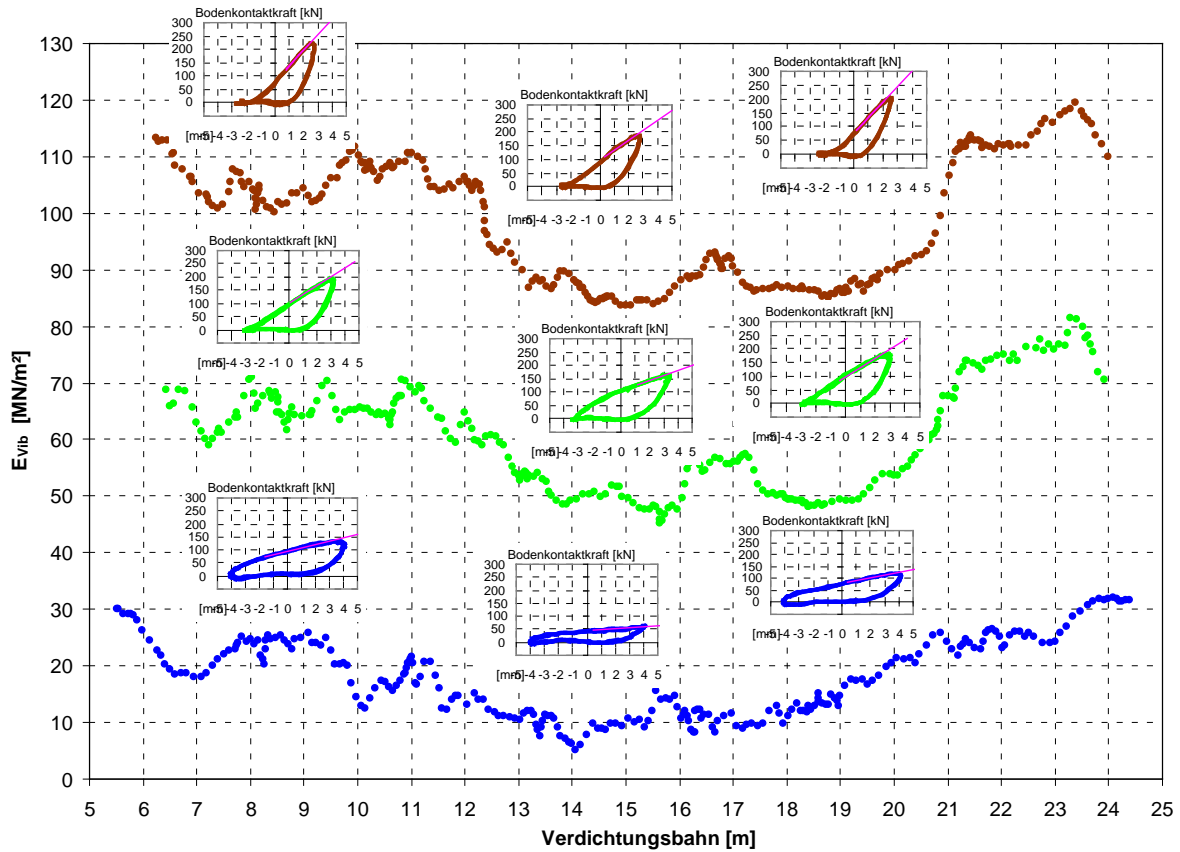


Bild 9: Darstellung des Verdichtungszuwachses anhand des dynamischen Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  beim Verdichten von schluffigem Kies bei verschiedenen Übergängen

Zum Vergleich des Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  mit dem klassischen Verformungsmodul  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  sind beide Messergebnisse in Abhängigkeit der Übergänge in Bild 10 aufgetragen. Insbesondere beim ersten Übergang ist der Wert  $E_{v2}$  im Verhältnis zum  $E_{Vib}$  relativ hoch, da die Lastplatte bei der Erstbelastung eine örtliche Nachverdichtung bewirkt. Da bei der Vibration durch die Fahrgeschwindigkeit stets neuer unverdichteter Boden überfahren wird, konvergiert der Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  zunächst gegen den Wert des  $E_{v1}$ . Bei zunehmender Übergangszahl verschwindet dieser Effekt und der Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  konvergiert gegen den Wert  $E_{v2}$ . Die steilere Kennlinie des Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  ist aus messtechnischer Sicht zu begrüßen, da dieser Sachverhalt dem Verfahren eine höhere Empfindlichkeit verleiht. Im Gegensatz dazu besitzt die Dichte (Trockendichte im Erdbau oder Marshall-dichte bei Asphalt) zur Beurteilung des Verdichtungszustandes eine geringe Empfindlichkeit, da vor dem ersten Übergang bereits ca. 80% der Enddichte erreicht sind. Der daraus abgeleitete Zusammenhang (Kalibrierkurven) zwischen dem Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  und dem Verformungsmodul  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  ist in Bild 11 dargestellt.

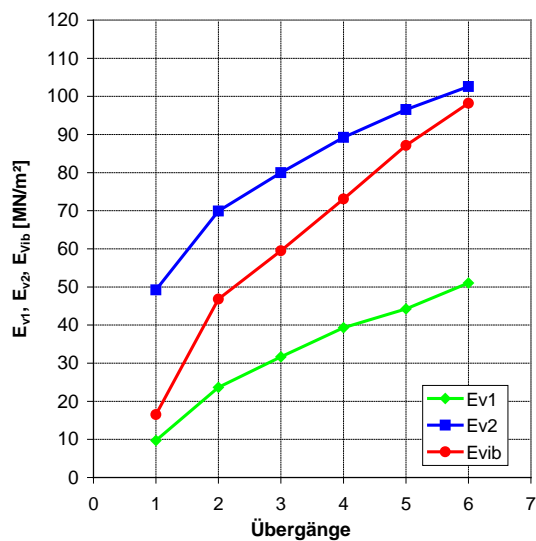


Bild 10: Vibrationsmodul  $E_{Vib}$ , Verformungsmodul  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  beim Verdichten von schluffigem Kies in Abhängigkeit der Übergänge

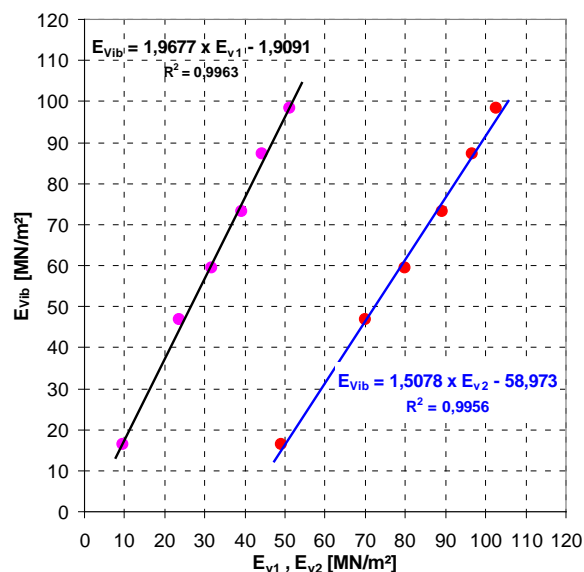


Bild 11: Kalibrierkurven zwischen dem Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  und dem Verformungsmodul  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  beim Verdichten von schluffigem Kies

### 3.3. Messungen auf Asphalt

Neben den bisher beschriebenen Versuchen im Erdbau wurden auf einer Baustelle an der A3 (Erneuerung der Autobahn A3 von Nürnberg Richtung Regensburg) Messungen auf Splittmastix durchgeführt. Die Splittmastix-Schicht wird auf eine vorhandene Betonfahrbahn mit Tragschicht und Binderschicht eingebaut. Die Verdichtungsanforderung lag bei 97% Marshall-dichte. Die Messungen des Vibrationsmoduls wurden mit einer BW 174 VARIOMATIC-2 durchgeführt.

Die Ergebnisse (Bild 12 und Bild 13) zeigen, dass der Verdichtungsfortschritt im Vergleich zur ermittelten Marshall-dichte auch mit dem Vibrationsmodul beurteilt werden kann.

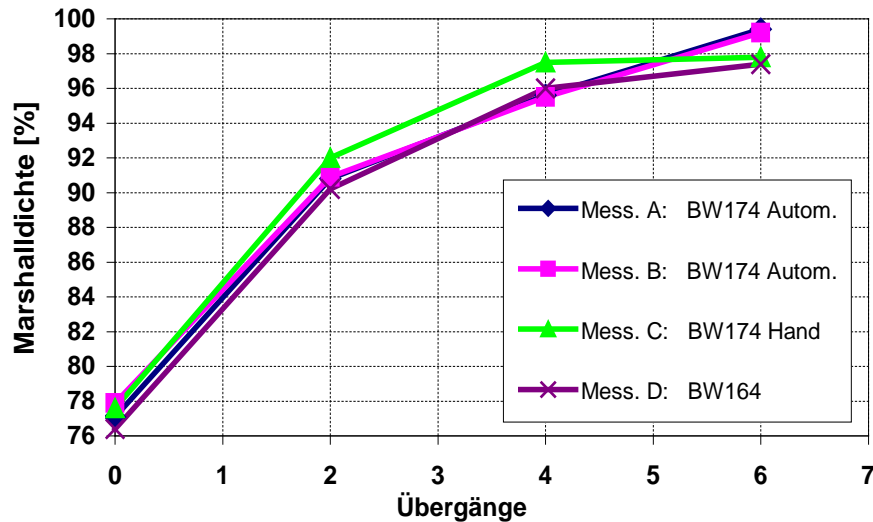


Bild 12: Verlauf der Marshall-dichte bei Verdichtung einer Splittmastix-Schicht in Abhängigkeit der Übergänge

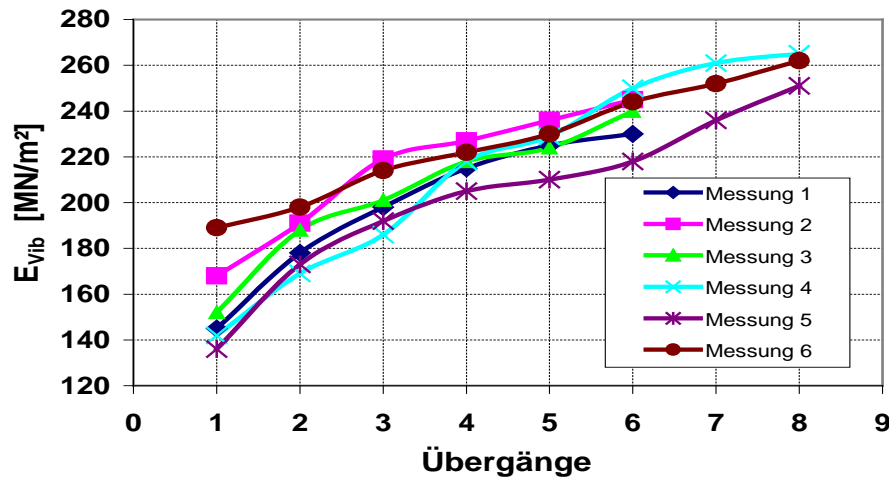


Bild 13: Verlauf des Vibrationsmodul  $E_{vib}$  bei Verdichtung einer Splittmastix-Schicht in Abhängigkeit der Übergänge

### 3.4. Ausblick

Zur Einführung des Vibrationsmoduls  $E_{\text{vib}}$  werden in naher Zukunft noch viele Untersuchungen durchgeführt werden müssen. Die hier vorgestellten Messergebnisse sind jedoch vielversprechend und zeigen, dass der Vibrationsmodul bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt als gute Alternative zum Verformungsmodul angesehen werden kann.

Durchgeführte Vergleiche mit der dynamischen Lastplatte zeigen ebenfalls auch in der quantitativen Höhe vergleichbare Messergebnisse.

In neuen VARIOCONTROL-Erdbauwalzen wird die Vorwahl fester  $E_{\text{vib}}$ -Werte möglich sein, die den typischen Verdichtungsanforderungen im Erdbau entsprechen. Durch den geregelten Vibrationsmodul werden somit geforderte Endwerte effizient in minimaler Übergangszahl erreicht und eine gleichmäßig gute Verdichtung erzeugt.

#### Vorteile des neuen Messwertes $E_{\text{vib}}$

- Direkte Ermittlung der Steifigkeit als Vibrationsmoduls  $E_{\text{vib}}$  mit physikalischer Einheit [MN/m<sup>2</sup>] während des Verdichtungsvorganges
- $E_{\text{vib}}$  steht in direkter Beziehung zu  $E_{\text{v1}}$  bzw.  $E_{\text{v2}}$  (statischer Plattendruckversuch)
- $E_{\text{vib}}$  ist weitgehend unabhängig von Amplitude, Frequenz und Arbeitsgeschwindigkeit der Walze
- Flächendeckende Kontrolle und arbeitsintegriertes Lokalisieren von Schwachstellen
- Bei VARIOCONTROL- und VARIOMATIC2- Walzen kann auch im Automatikmodus gemessen werden

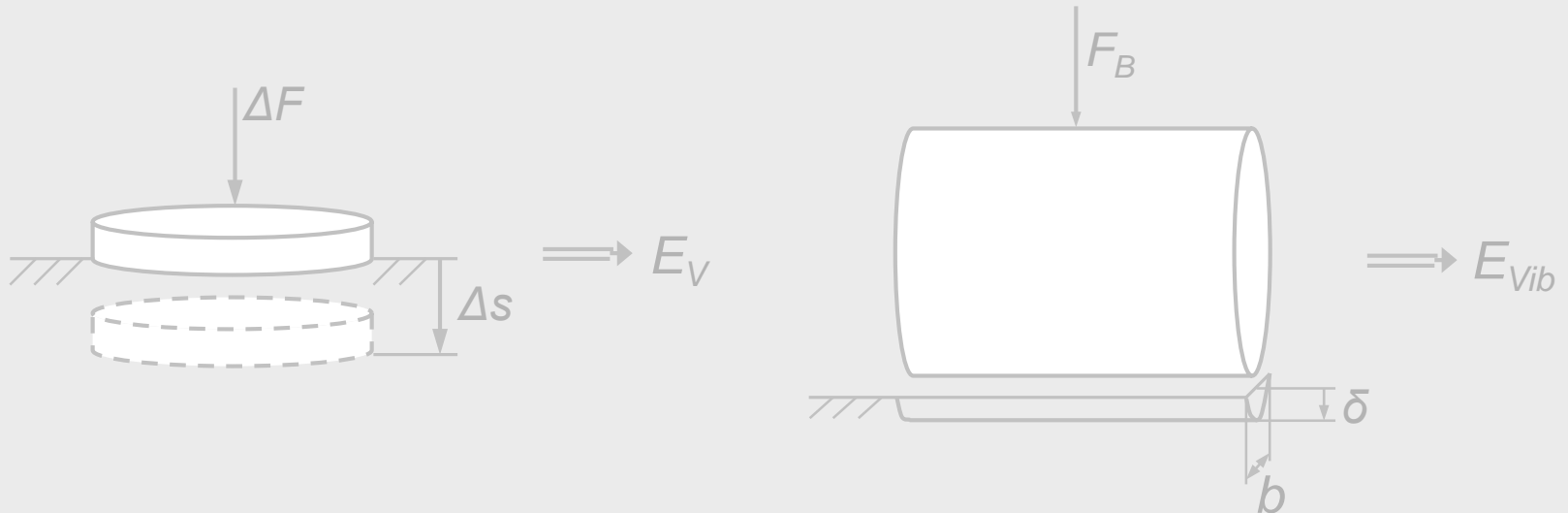
### 4. Literatur

- /1/ H. Hertz, Über die Berührung fester elastischer Körper, Gesammelte Werke, Bd. 1, Leipzig 1895
- /2/ G. Lundberg, Elastische Berührung zweier Halbräume, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Band 10, Seite 201-211, Göteborg 1939
- /3/ Handbuch des Straßenbaus, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1977, Siedek P., Floss.R. : Boden als Baustoff
- /4/ W. Kröber, Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden, Dissertation, München 1988, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Schriftenreihe Heft 11
- /5/ Plattendruckversuch, DIN 18 134, Beuth-Verlag 1993
- /6/ Messergebnisse und Messprotokolle der Firma Bomag, unveröffentlicht, 1999-2000

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kröber, FH Koblenz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Rudolf Floss, TU München

# Dynamische Bodensteifigkeit als Qualitätskriterium für die Bodenverdichtung

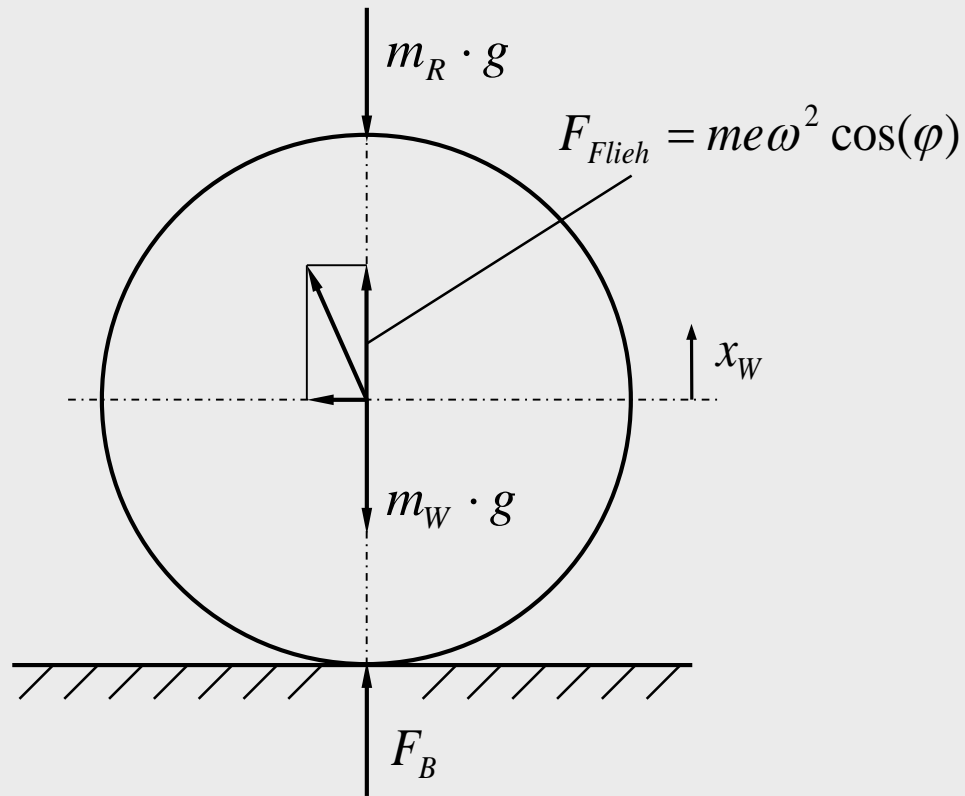


# Historisches:

- Messungen am Verdichtungswerkzeug während der Verdichtung
- Ergebnis: Indirekte Kenngrößen
- Vergleich und Rückführung durch Kalibrierung mit klassischen Messgrößen

# Neu:

- Messergebnis unmittelbar physikalisch verifizierbar



$$m_W \cdot \ddot{x}_W = \underbrace{m \cdot e \cdot \omega^2 \cos(\varphi)}_{F_{Flieh}} - \underbrace{m_W \cdot g - m_R \cdot g}_{-F_{Stat}} + F_B$$

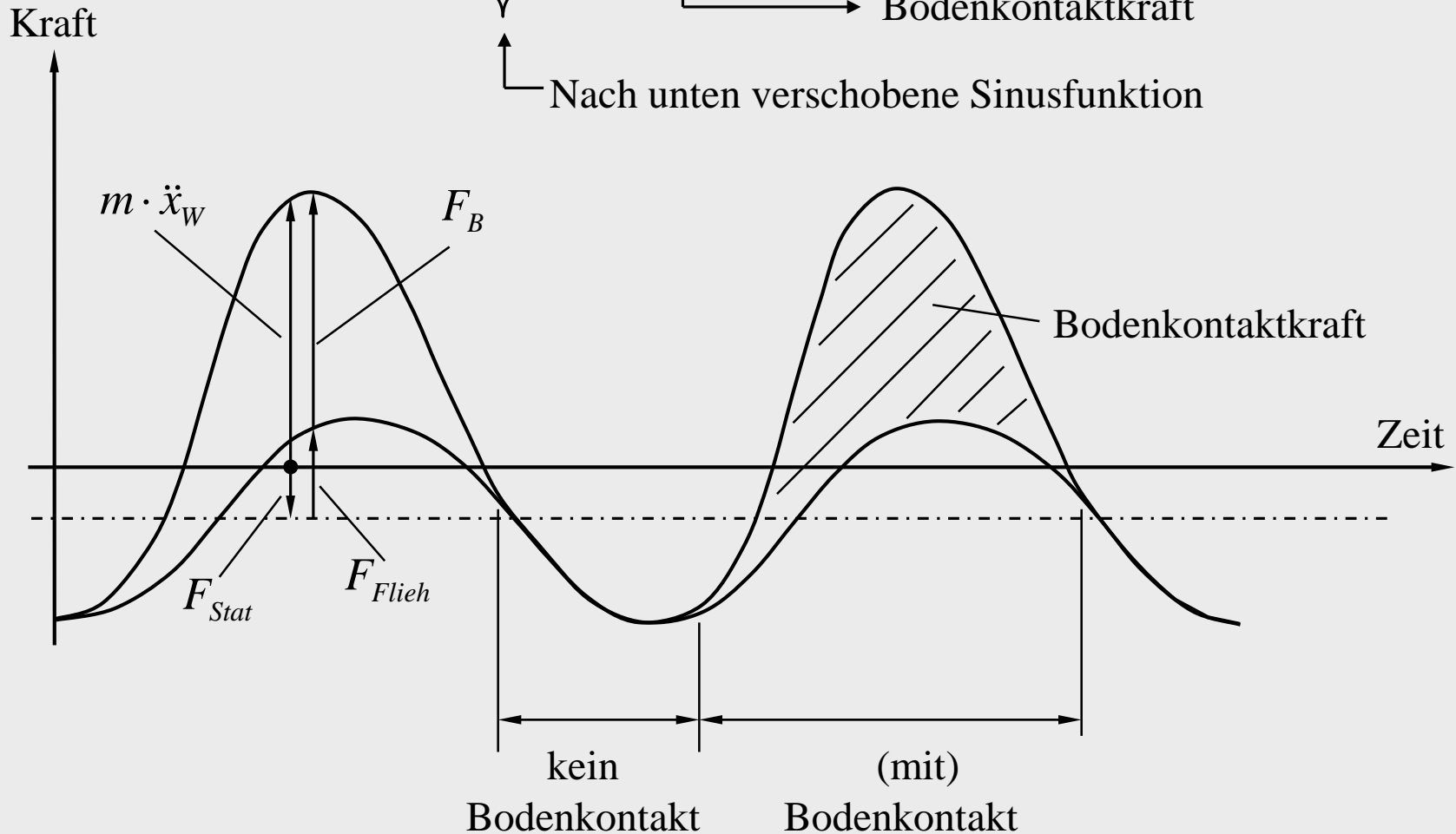
$$m_W \cdot \ddot{x}_W = \underbrace{F_{Flieh} - F_{Stat}}_{\text{Nach unten verschobene Sinusfunktion}} + \underbrace{F_B}_{\text{Bodenkontaktkraft}}$$

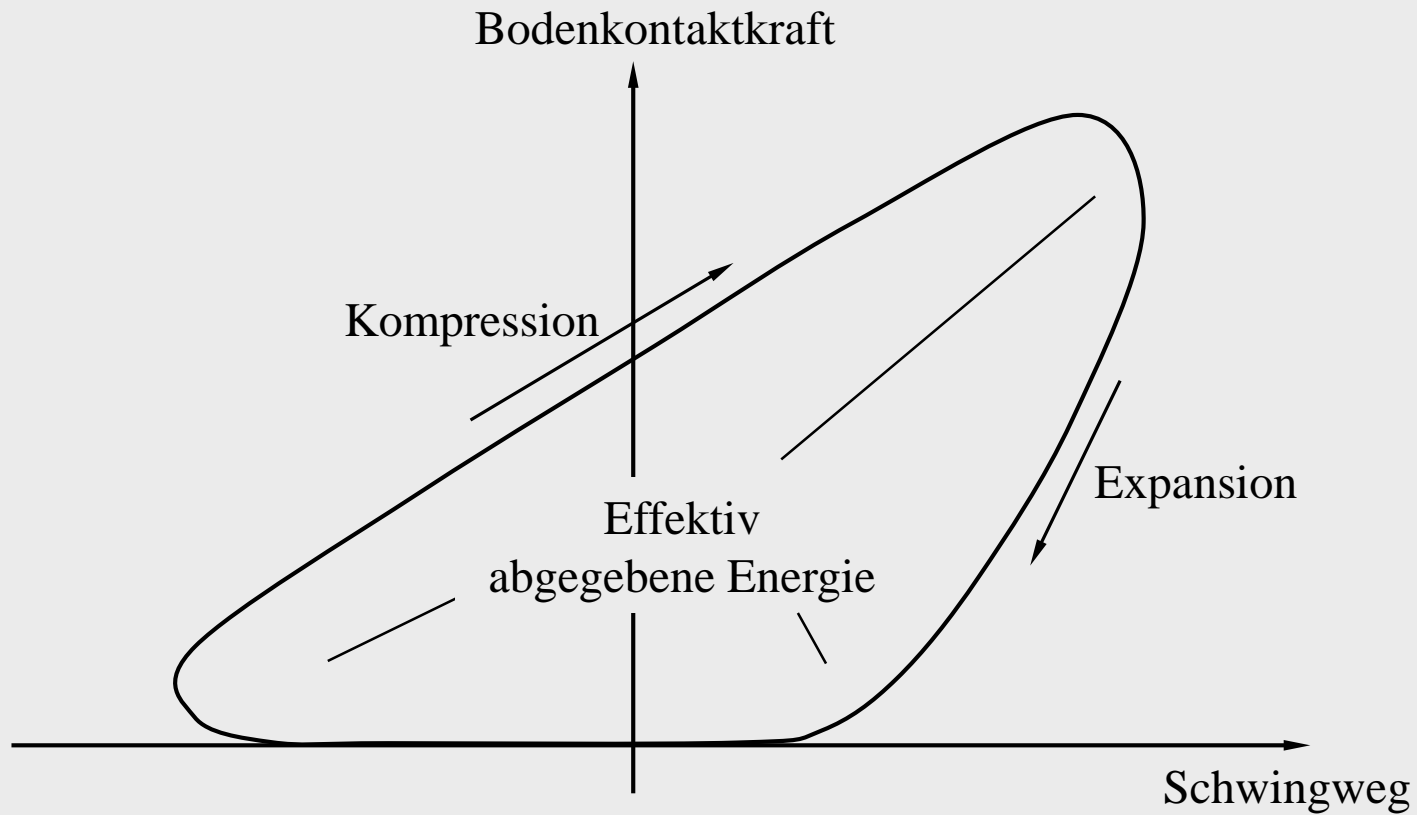
$$m_W \cdot \ddot{x}_W = \underbrace{m \cdot e \cdot \omega^2 \cos(\varphi)}_{F_{Flieh}} - \underbrace{m_W \cdot g - m_R \cdot g}_{-F_{Stat}} + F_B$$

$$m_W \cdot \ddot{x}_W = F_{Flieh} - F_{Stat} + F_B$$

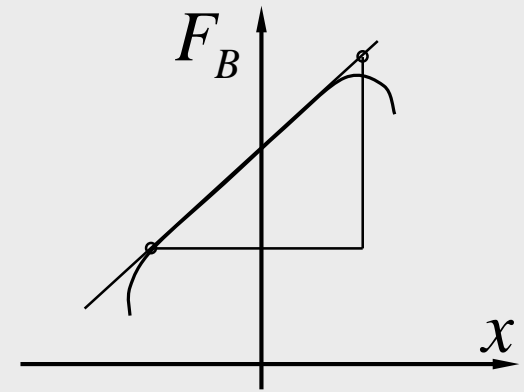
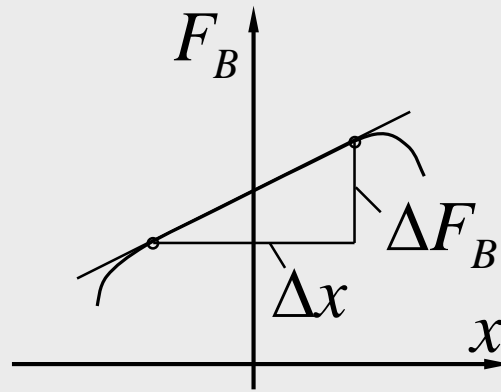
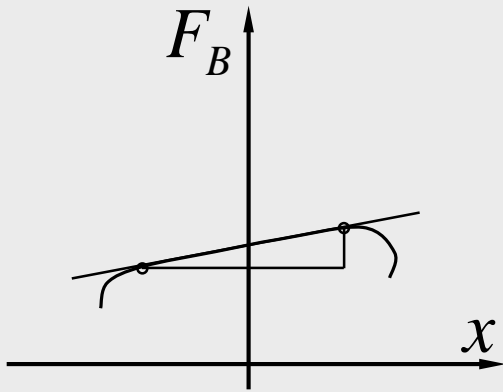
Bodenkontaktkraft

Nach unten verschobene Sinusfunktion

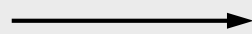




Indikatordiagramm, Darstellung von Kompressions- und Expansionsphase, effektiv abgegebene Verdichtungsenergie



höhere Steigung



zunehmende Steifigkeit

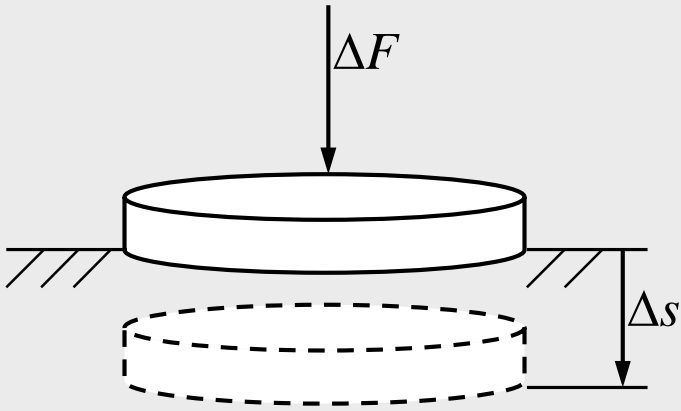
Kenngröße:

$$k = \frac{\Delta F_B}{\Delta x}$$

in

$$\frac{[MN]}{[m]}$$

# Plattendruckversuch



$$\Delta F = \Delta \sigma \cdot \pi \cdot r^2$$

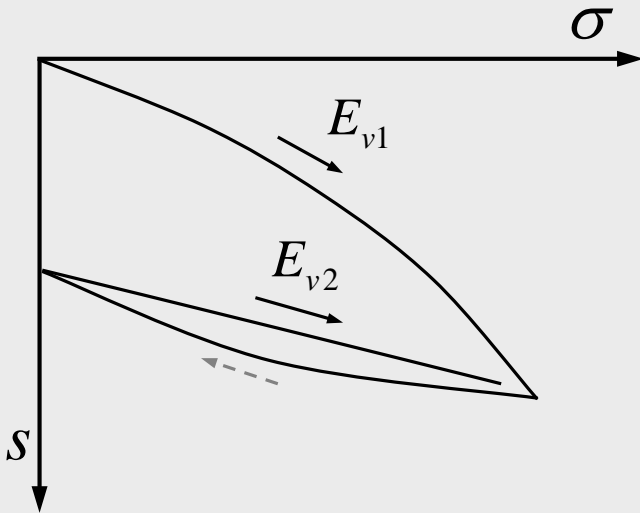
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

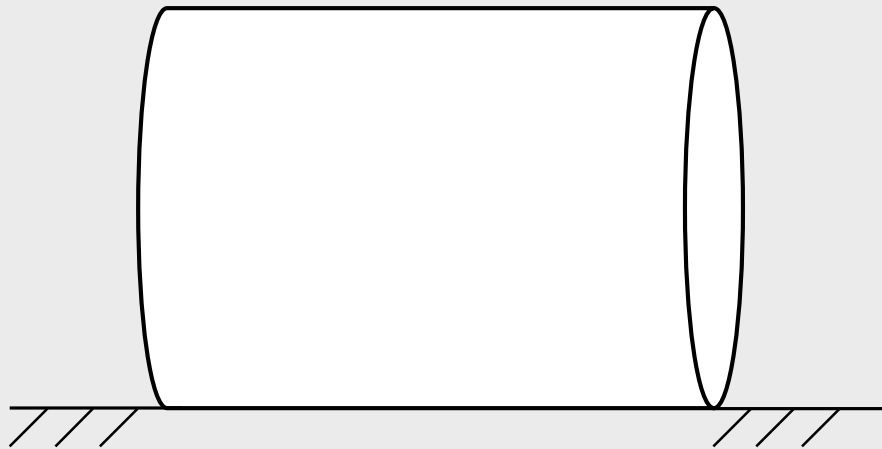
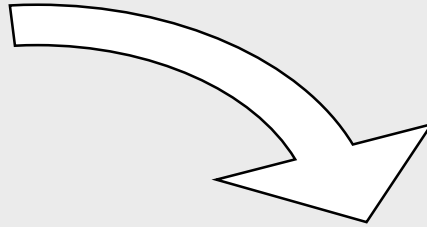
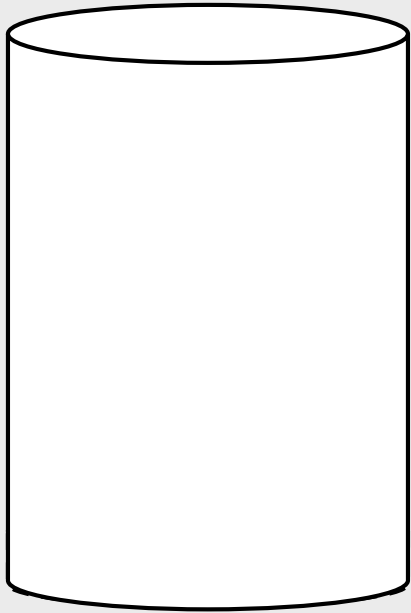
$$k = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{4 \cdot G \cdot r}{1-\nu}$$

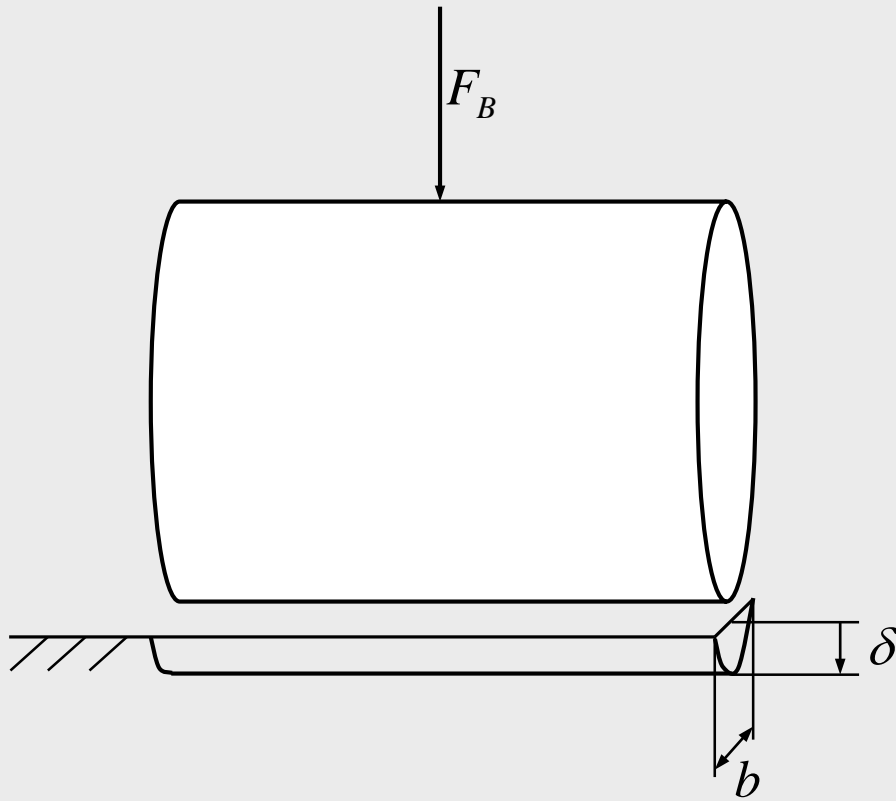
$$E = \underbrace{\frac{\pi \cdot (1-\nu^2)}{2}}_{\approx 1,5} \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$$

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$$

DIN 18134





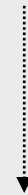


H. Hertz, 1895 :

$$b = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R(1-\nu^2)}{E} \frac{F_B}{l}}$$

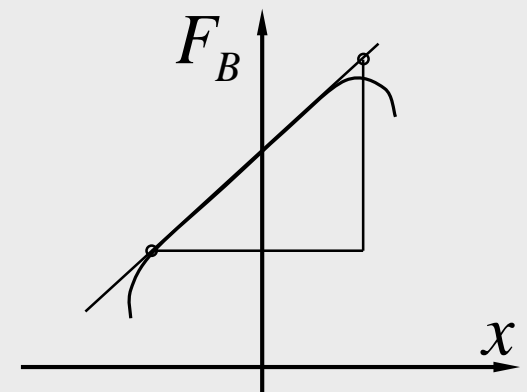
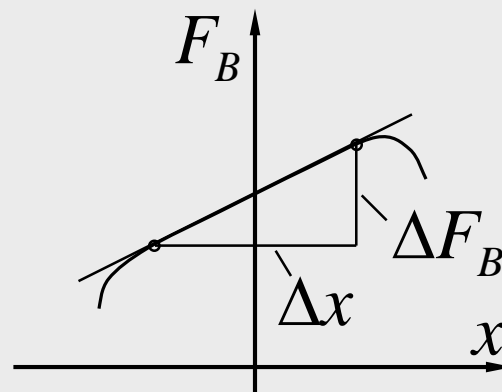
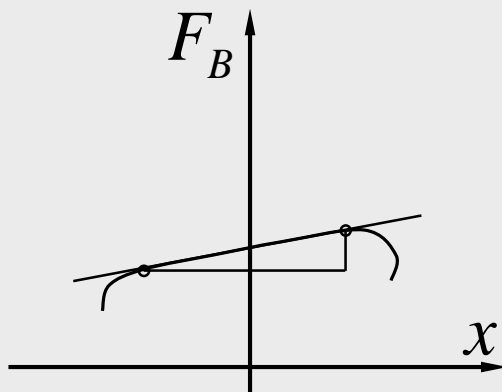
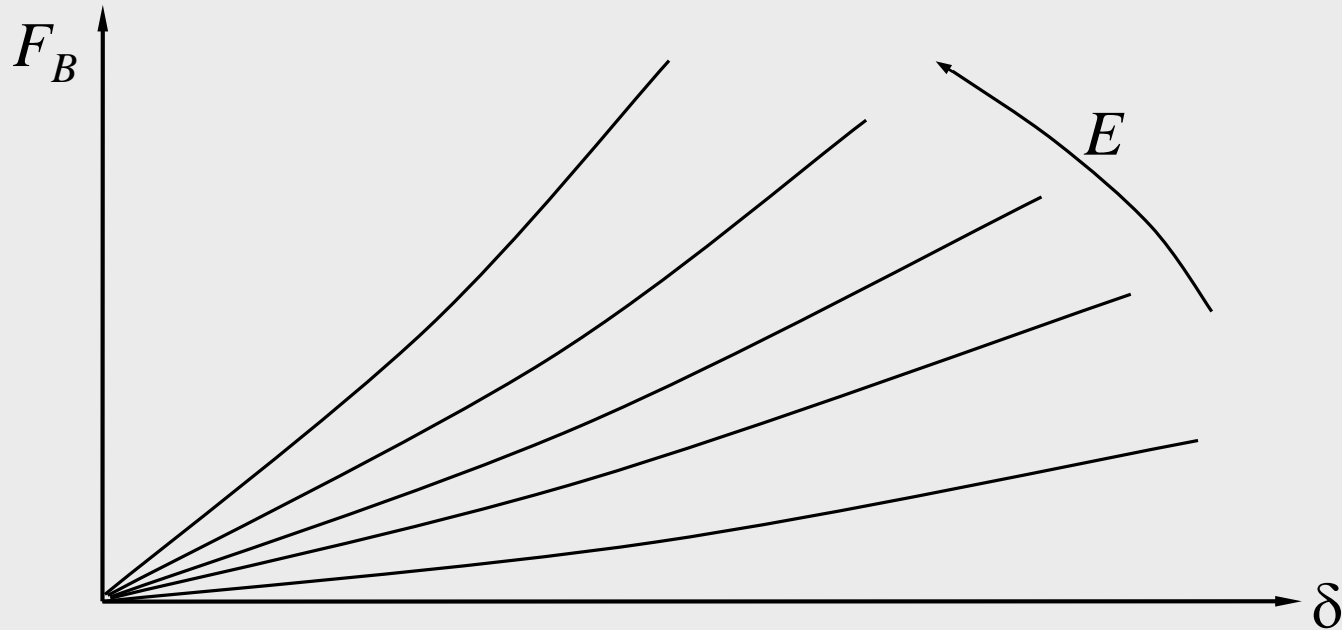
G. Lundberg, 1939 :

$$\delta = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{F_B}{l} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot (1,8864 + \ln \frac{l}{b})$$

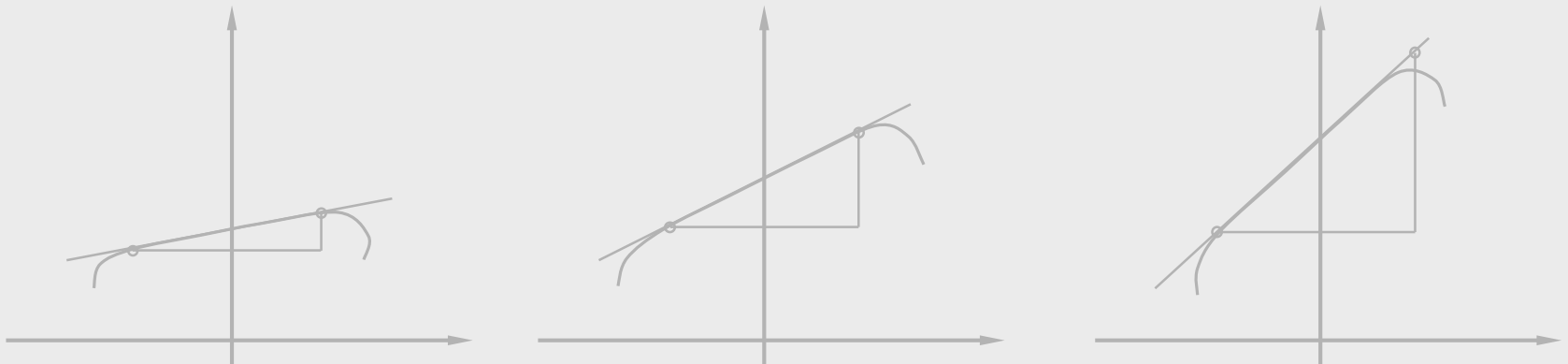
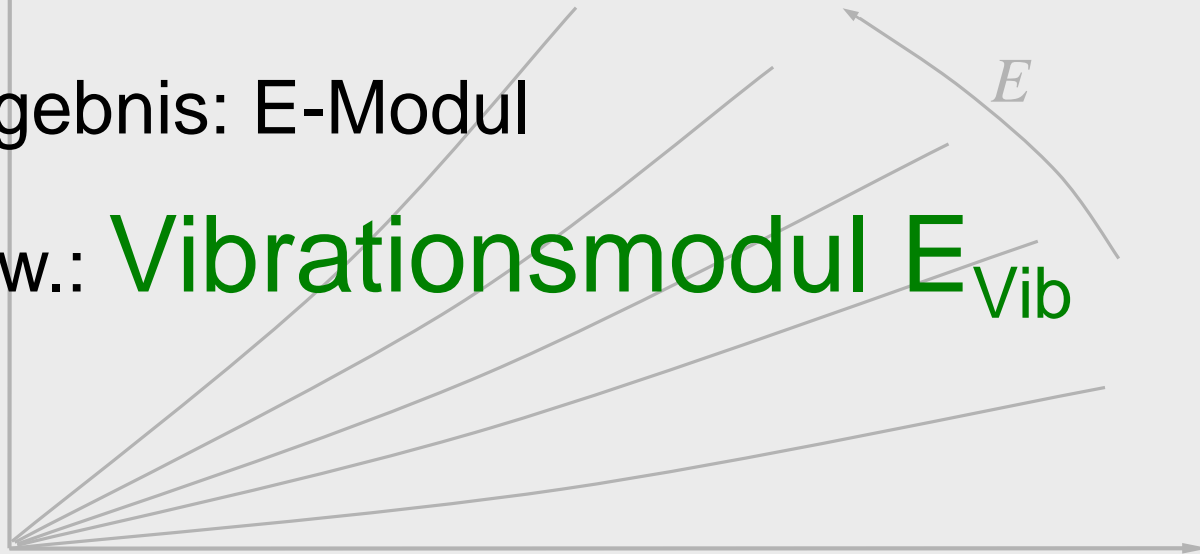


$$\delta = f(F_B, E)$$

# Bodenkraft in Abhängigkeit der Einsenkung (Parameter: E-Modul)



- ➔ nur eine Kompressionskurve passt genau
- ➔ genau eine Kompressionskurve passt genau
- ➔ Ergebnis: E-Modul
- ➔ bzw.: **Vibrationsmodul  $E_{Vib}$**



- nur eine Kompressionskurve passt genau
  - genau eine Kompressionskurve passt genau
  - Ergebnis: E-Modul
  - bzw.: **Vibrationsmodul  $E_{Vib}$**
- 

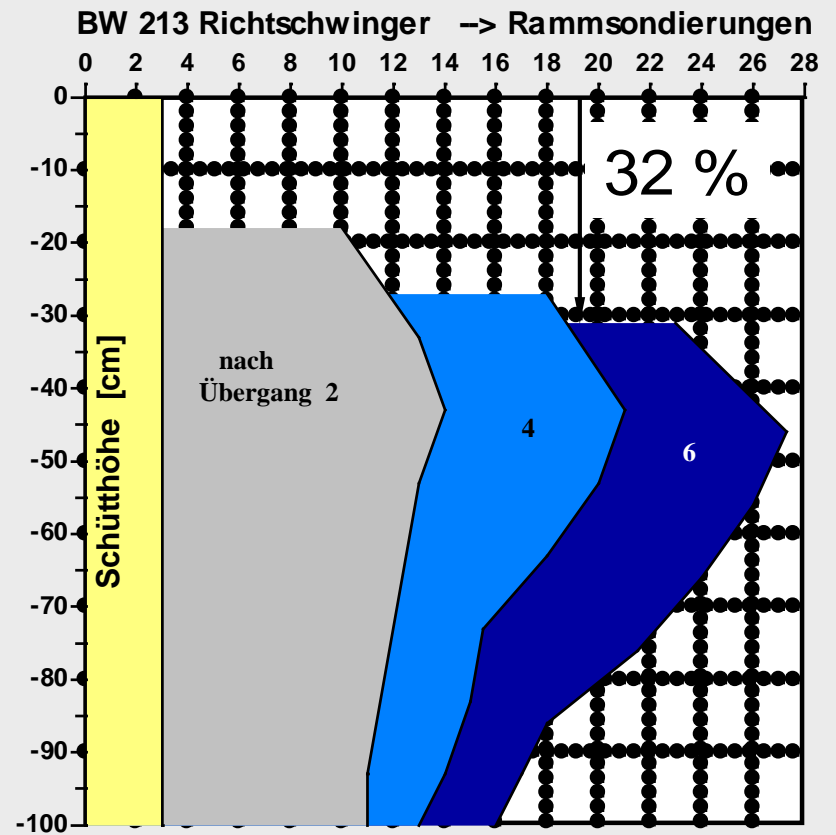
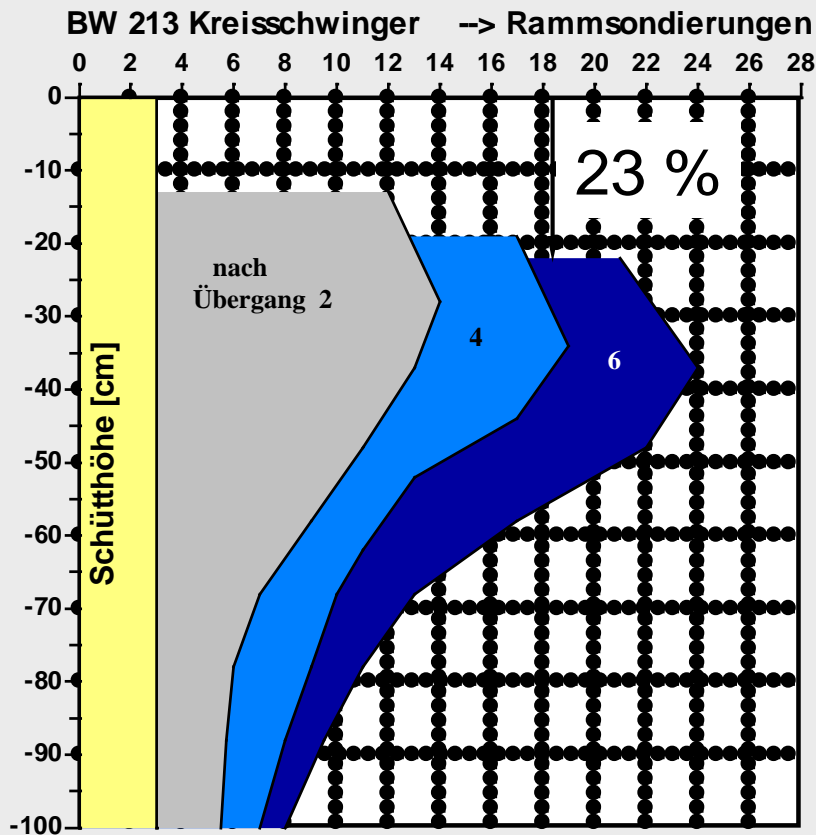
## Nochmaliger Hinweis auf Analogie:

Plattendruckversuch → Drucksetzungslinie  
→ Verformungsmodul  $E_V$

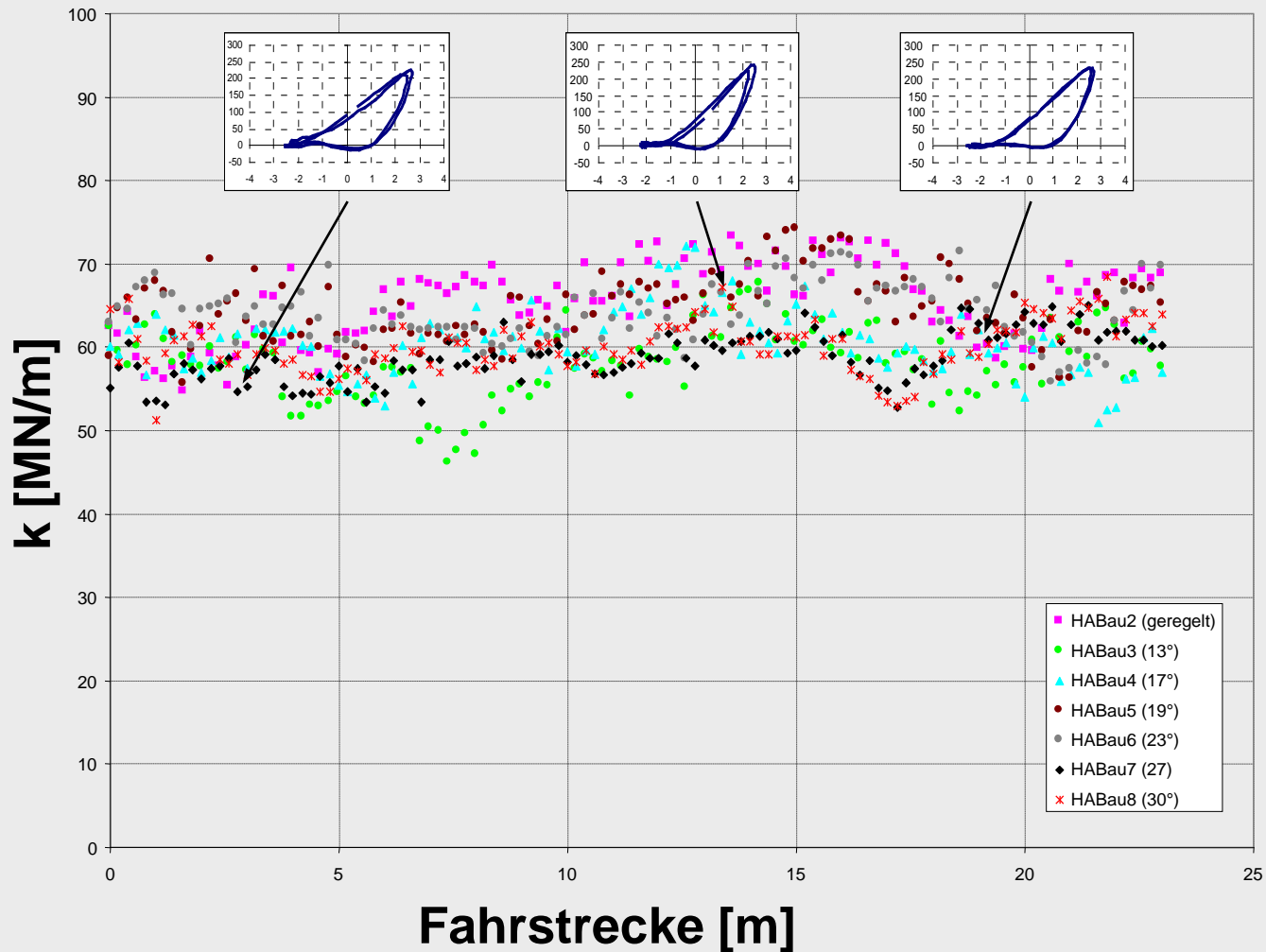
Walze/Indikatorgramm → Kompressionskurve  
→ Vibrationsmodul  $E_{Vib}$

# Messergebnisse

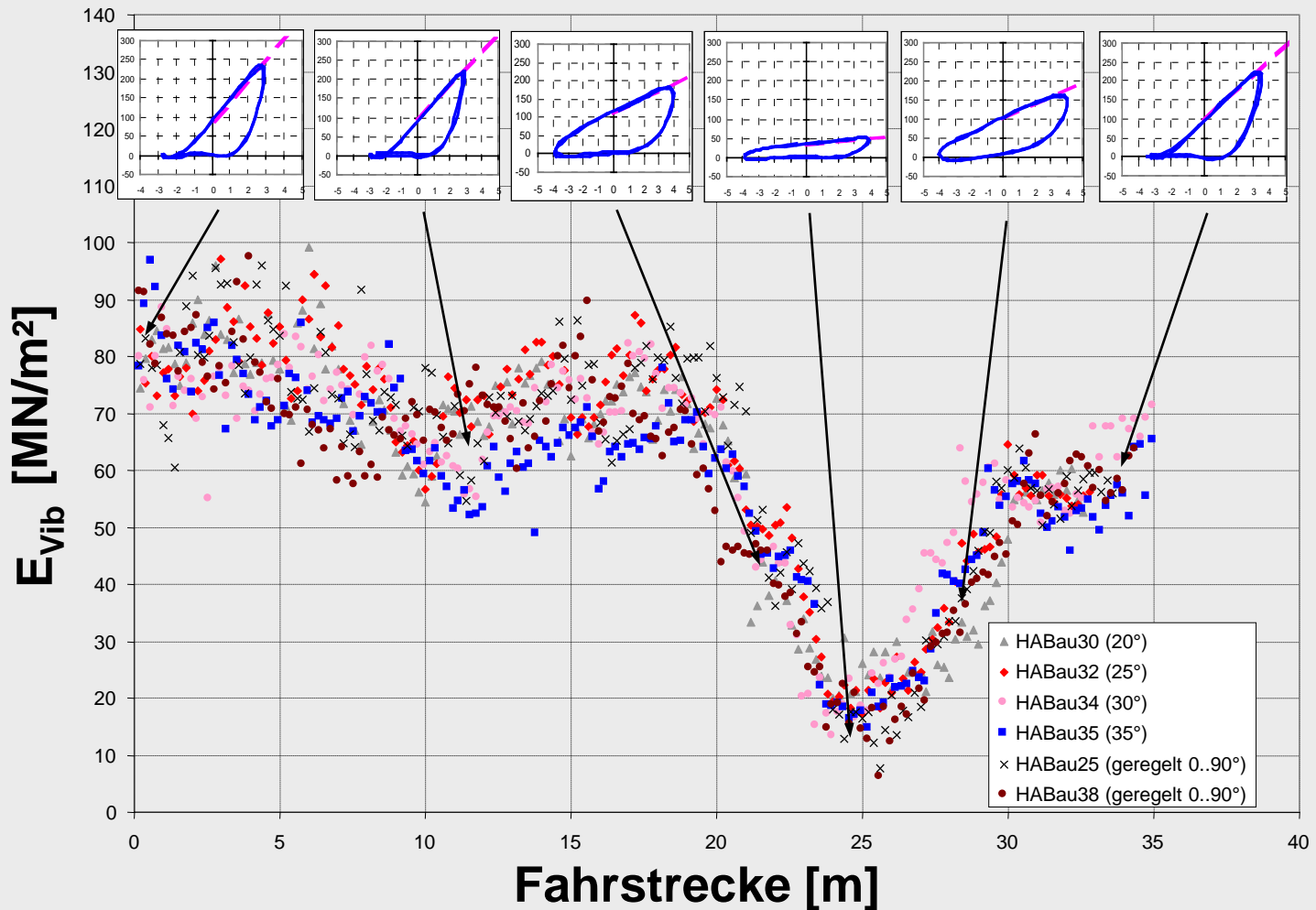
- Abhängigkeit bzw. Unabhängigkeit der Messergebnisse von der Amplitude
- Verdichtungsversuche und Vergleich mit dem Plattendruckversuch
- Messungen auf Asphalt



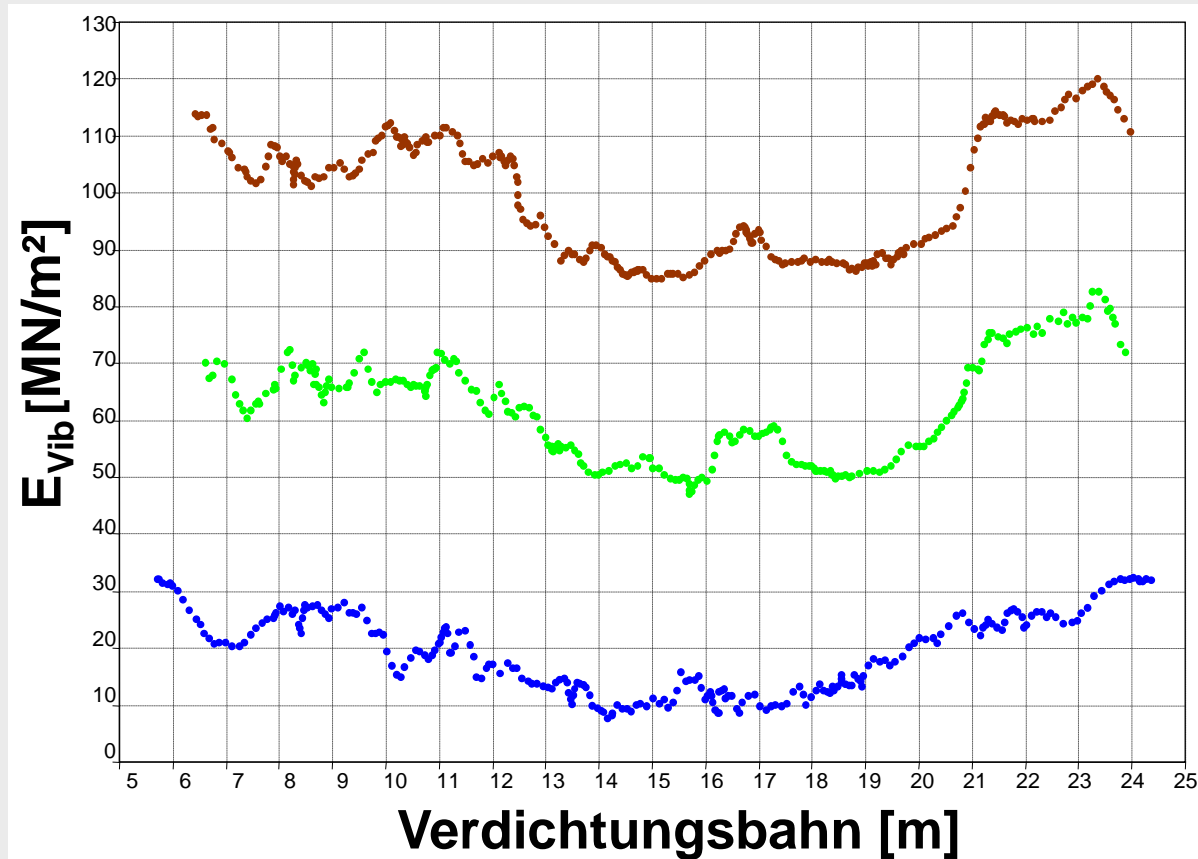
Tiefenprofil und Setzung der Oberfläche (Schlagzahl pro 10 cm) im Bodenquerschnitt nach Verdichtungsübergängen



Steifigkeit  $k$  [MN/m] über einer Fahrstrecke, aufgenommen auf der NBS Köln-Rhein/Main, Los A, Bodenart: Tonstein, schluffig, sandig

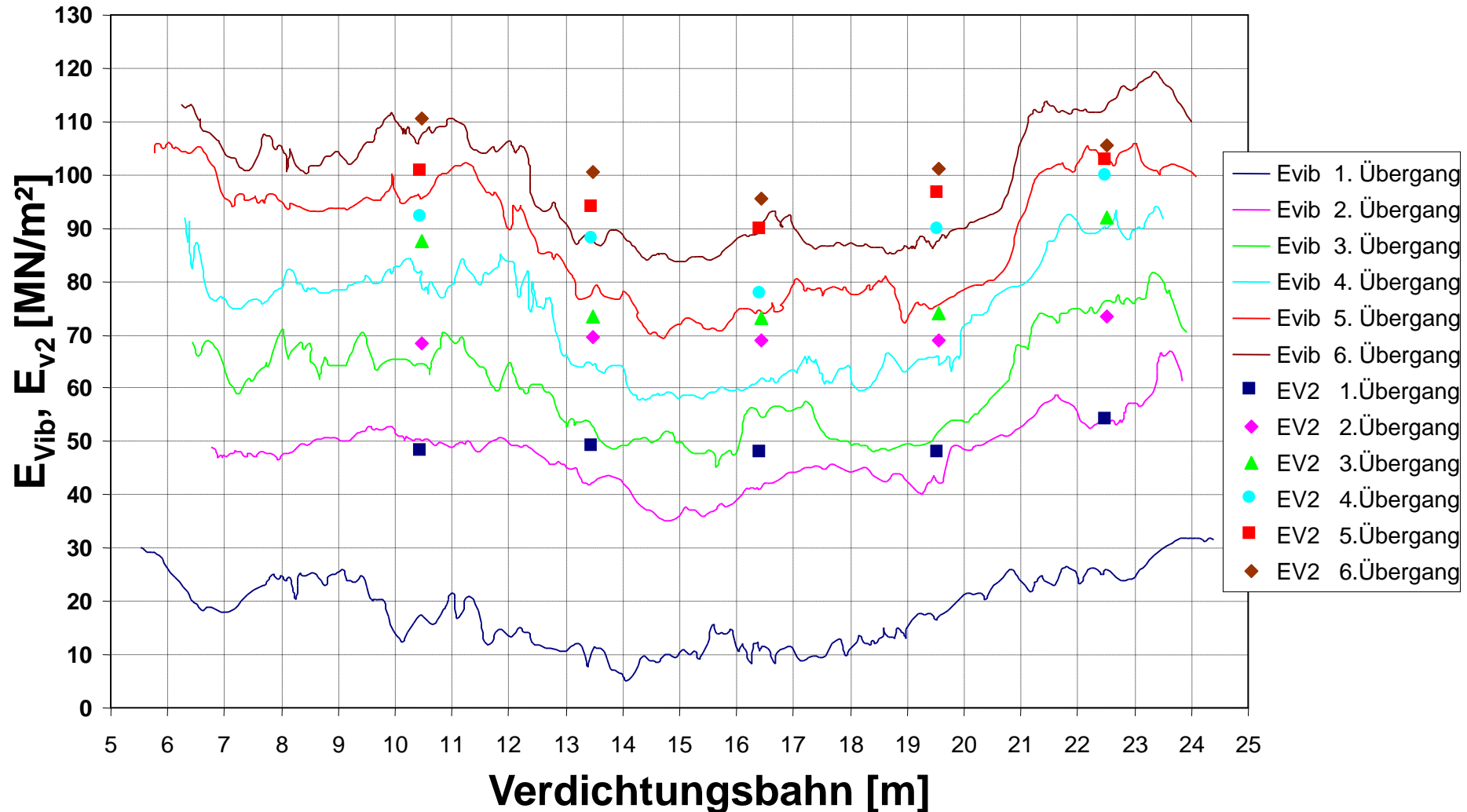


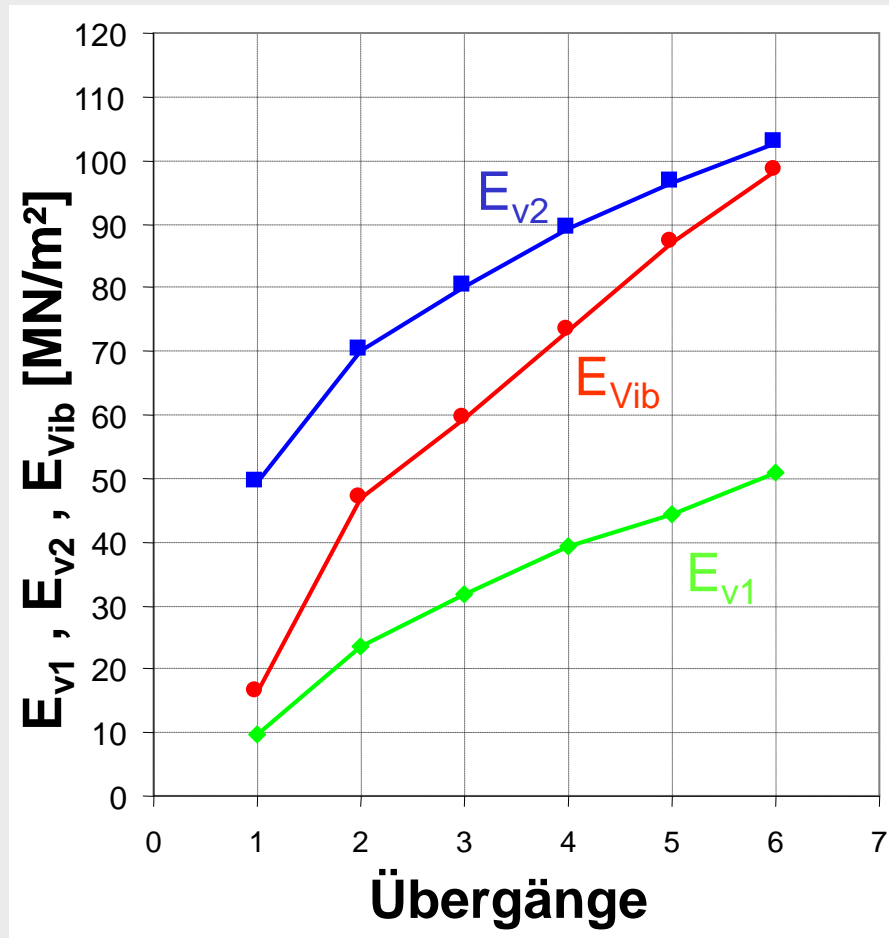
Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  [MN/m<sup>2</sup>] über einer Fahrstrecke, aufgenommen auf der NBS Köln-Rhein/Main, PFA 52, EÜ Wehll, Boden: gießig, sandig



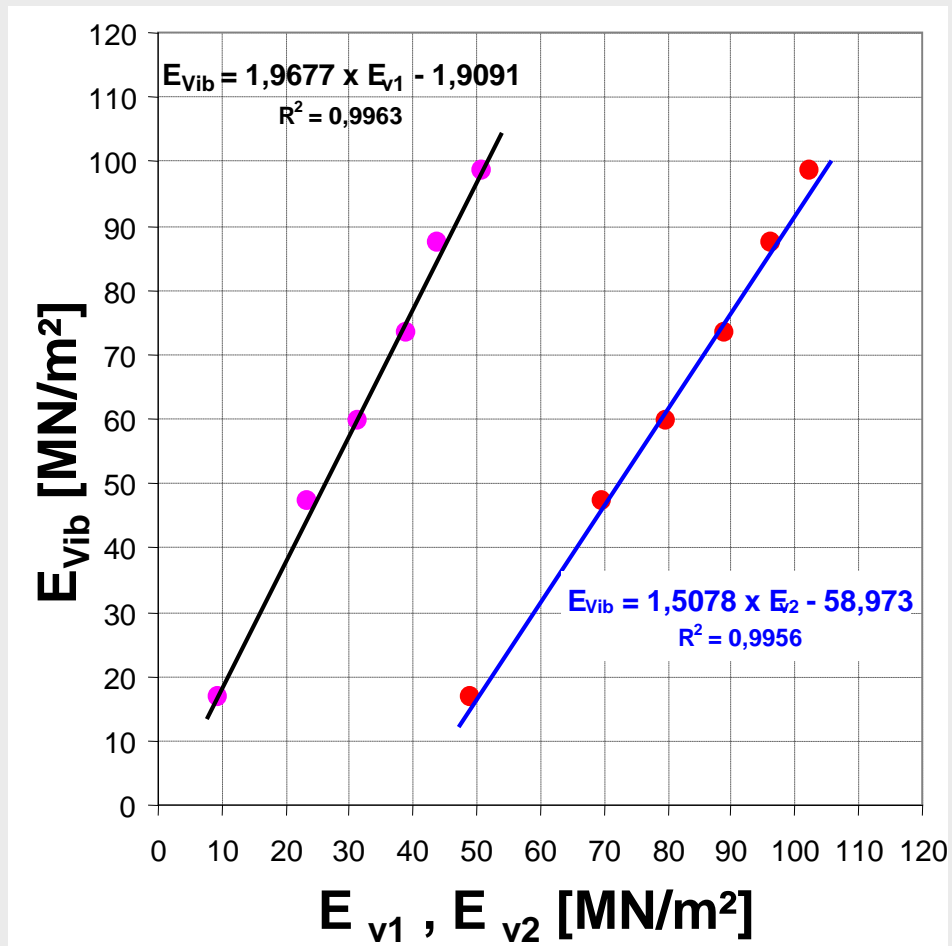
Darstellung des Verdichtungszuwachses anhand des dynamischen Vibrationsmoduls  $E_{Vib}$  beim Verdichten von schluffigem Kies bei verschiedenen Übergängen

# $E_{Vib}$ , $E_{v2}$ in Abhängigkeit der Übergangszahl

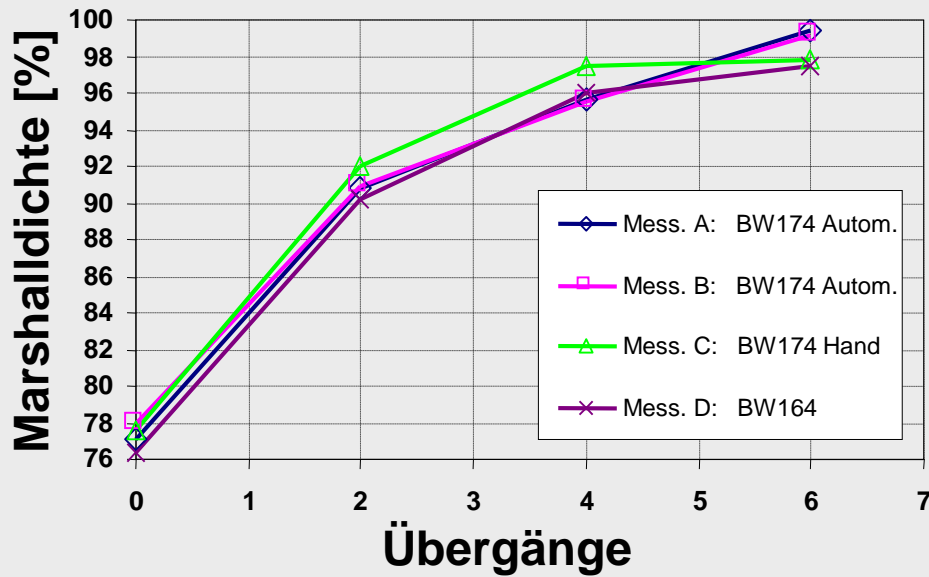




Vibrationsmodul  $E_{vib}$ , Verformungsmodul  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  beim Verdichten von schluffigem Kies in Abhängigkeit der Übergänge

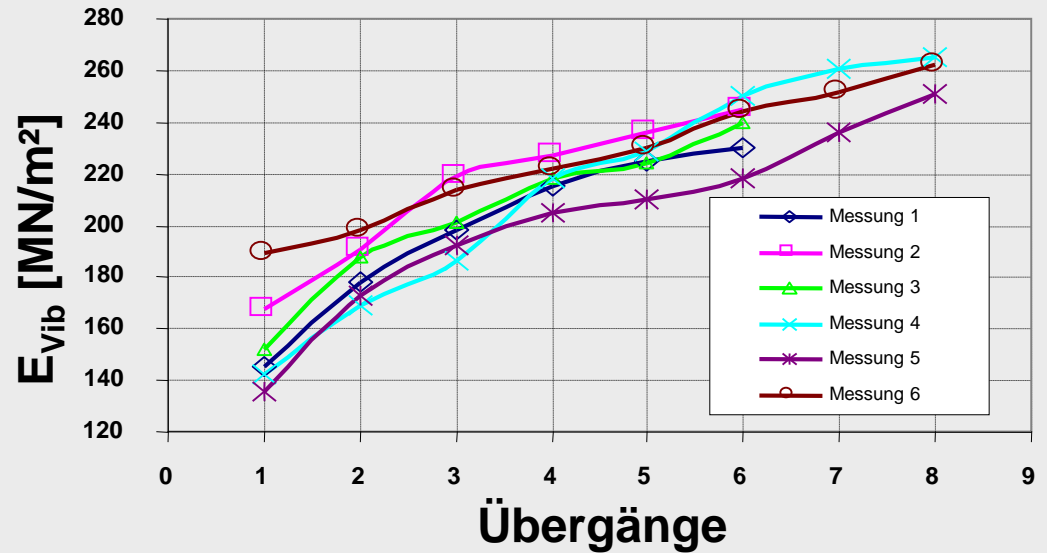


Kalibrierkurven zwischen dem Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  und dem Verformungsmodul  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  beim Verdichten von schluffigem Kies



Marshall density at the compaction of a split mastix layer in dependence of the passes

Vibrationsmodul  $E_{Vib}$  bei Verdichtung einer Splittmastix-Schicht in Abhängigkeit der Übergänge



# Ausblick

- ➔ Alternative zum Plattendruckversuch  
... oder gar Ersatz ...
- ➔ Vergleich mit dynamischer Lastplatte  
... auch in der quantitativen Höhe  
vergleichbare Ergebnisse
- ➔ Vorgabe fester Sollwerte für  $E_{\text{Vib}}$   
... flächendeckende gleichmäßige Verdichtung  
in Verbindung mit VARIOCONTROL-System

# Vorteile des neuen Messwertes $E_{vib}$

- Direkte Ermittlung der Steifigkeit als Vibrationsmoduls  $E_{vib}$  mit physikalischer Einheit [MN/m<sup>2</sup>] während des Verdichtungsvorganges
- $E_{vib}$  steht in direkter Beziehung zu  $E_{v1}$  bzw.  $E_{v2}$  (statischer Plattendruckversuch)
- $E_{vib}$  ist weitgehend unabhängig von Amplitude, Frequenz und Arbeitsgeschwindigkeit der Walze
- Flächendeckende Kontrolle und arbeitsintegriertes Lokalisieren von Schwachstellen
- Bei VARIOCONTROL- und VARIOMATIC2- Walzen kann auch im Automatikmodus gemessen werden

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kröber, FH Koblenz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Rudolf Floss, TU München

# Dynamische Bodensteifigkeit als Qualitätskriterium für die Bodenverdichtung

