

3.1 Erfordernis

Genügt ein Baugrund nicht den Anforderungen, um die einwirkenden Lasten einer geplanten Baumaßnahme unter Berücksichtigung tolerierbarer Absolut- und Differenzsetzungsbeträge abzutragen, ist es erforderlich, eine **Tiefgründung** herzustellen oder **geeignete Bodenverbesserungsmaßnahmen** durchzuführen.

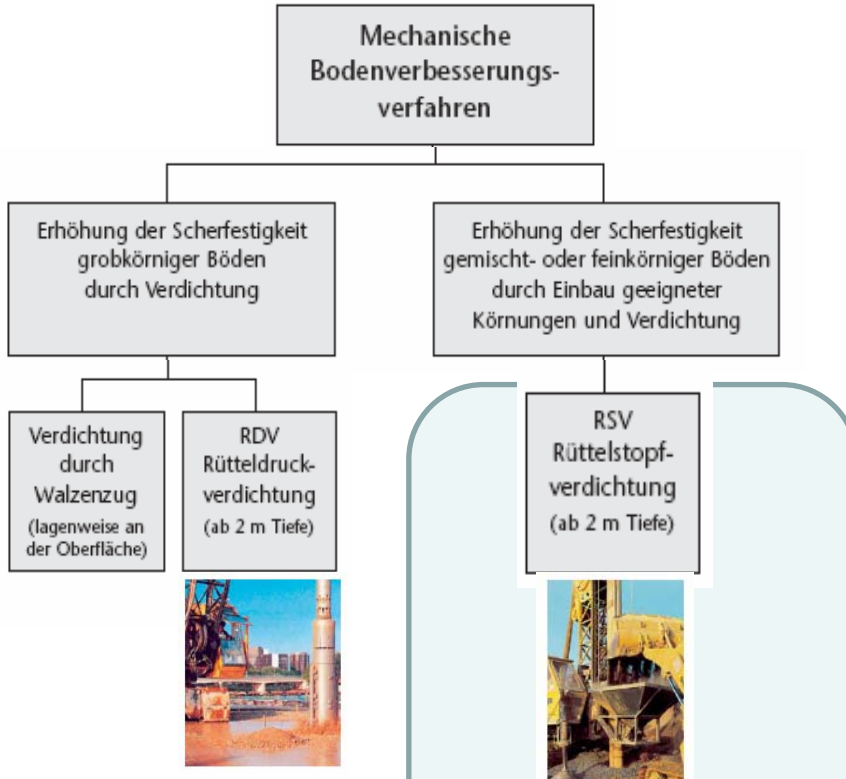
Eine Tiefgründung (Pfahlgründung, Brunnengründung) gewährleistet in der Regel die gewünschte Lastabtragung auf einem hohen Sicherheitsniveau, stellt aber häufig nicht die wirtschaftlichste Lösung dar.

Eine Baugrundverbesserung ist immer dann vorzusehen, wenn der anstehende Baugrund mit Hilfe entsprechender Methoden und vertretbarem Aufwand in einen Zustand versetzt werden kann, der den Anforderungen genügt.

Es steht eine große Anzahl technischer Verfahren zur Verfügung, mit denen in Abhängigkeit von der Ausgangssituation eine zielführende Baugrundverbesserung erreicht werden kann.

Im Allgemeinen erfolgt eine solche Maßnahme durch Austausch, Verfestigung oder Verdichtung des anstehenden Baugrundes.

3.2 Verfahren



Das vorhandene Porenvolumen eines anstehenden, nichtbindigen Bodens wird durch die Vibration eines Tiefenrüttlers von unten nach oben vermindert. Dadurch entsteht eine dichtere Lagerung des Bodens. Das Versenken bzw. Verdichten kann durch Wasserspülung unterstützt werden.

Der anstehende, gemischt- und feinkörnige Boden wird durch einen Tiefenrüttler bis zur planmäßigen Tiefe durchteuft. Beim Ziehen wird über die Spitze des Rüttlers grobkörniges Material zugegeben, welches nachlaufend durch erneutes Absenken des Rüttlers verdichtet und seitlich in den Boden verdrängt wird. Zusätzlich erfolgt eine Aktivie-

Bodenverbesserungsverfahren mit Bindemitteln

Vermischung durch Fräsen oder Zwangsmischer

Bodenverbesserung im Erd- und Verkehrswegebau

Qualifizierte Bodenverbesserung im Erd- und Verkehrswegebau

Bodenverfestigung im Erd- und Verkehrswegebau

Auf dem anstehenden Boden wird mittels Streuwagen Bindemittel ausgebracht. Durch Fräsen entsteht eine Lage eines Boden-Bindemittel-Gemisches, welches verdichtet wird. (mixed in place). Alternativ ist der Einbau eines im Zwangsmischer erstellten Boden-Bindemittel-Gemisches möglich (mixed in plant).



3.3 Tiefenrüttelverfahren

Rüttelstopfverfahren

Bodenmechanische Aspekte

Soweit in gemischt- und feinkörnigen Böden durch horizontale Schwingungen und seitliche Verdrängung noch eine Verdichtung erreicht werden kann, was in erster Linie vom Grad der Wassersättigung abhängt, ist dieser Verbesserungsanteil wie beim Rütteldruckverfahren zu bewerten.

Das Rüttelstopfverfahren in seiner reinen Form geht dagegen davon aus, daß der umgebende Boden selbst nicht verdichtet wird. Die Verbesserung beruht auf der höheren Steifigkeit und dem größeren Scherwiderstand der eingebrachten Rüttelstopfsäule.

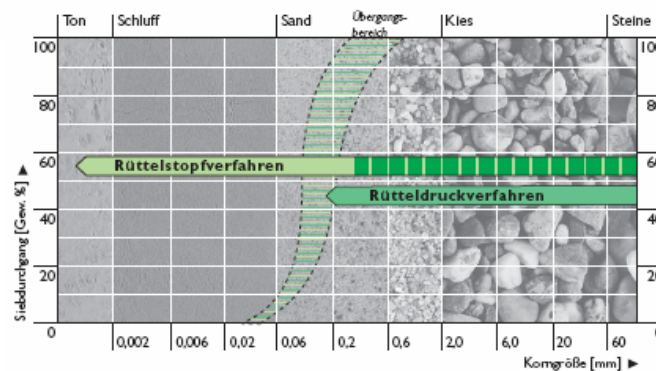


Aushubsohle nach Rüttelstopfverdichtung

Ziele:

- Erhöhung der Tragfähigkeit (Vergrößerung des Reibungswinkels)
- Verminderung von Setzungen (Vergrößerung der Steifezahl)

Anwendungsgrenzen der Tiefenrüttelverfahren

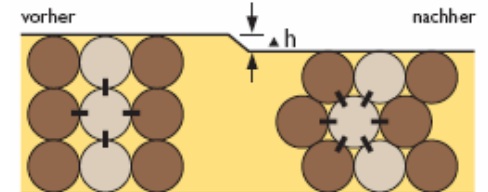


Rütteldruckverfahren

Bodenmechanische Aspekte

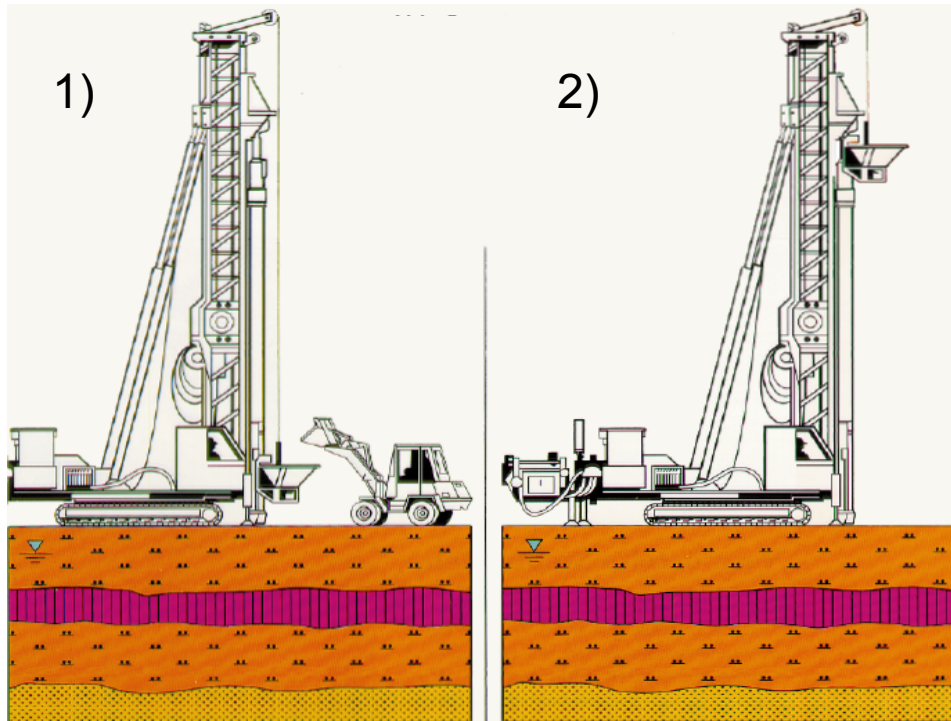
Unter dem Einfluß der Schwingungen des Rüttlers werden die Bodenkörner in einem Einflußbereich, der von Boden, Gerät und Verfahrensweise abhängt, in eine dichtere Lagerung gebracht. Je nach Bodenbeschaffenheit und Verdichtungsaufwand tritt eine Volumenverminderung ein, die bis zu 10% betragen kann.

Lagerungsdichte des Bodens



Rüttler mit Absenktrichter

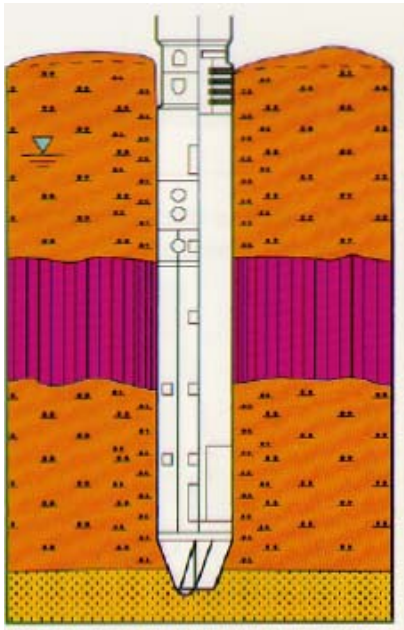
3.4 Rüttelstopfverdichtung (RSV)



Zugabematerial: Schotter (gebrochenes Material) oder Kies.
Korngrößen zwischen 10 mm und 40 mm

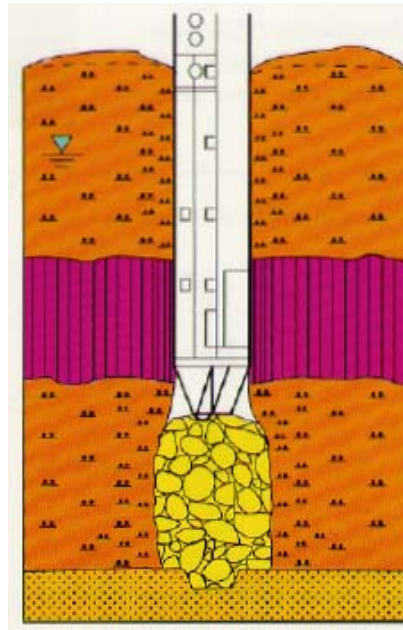
Zugabematerial wird durch wiederholtes Absenken des Rüttlers bestmöglich verdrängt und verdichtet.

- 1) Vorbereiten**
Mit der Rüttlertragraupe wird der zwangsgeführte Schleusenrüttler über dem abgesteckten Punkt ausgerichtet und das Gerät hydraulisch abgestützt. Ein Frontlader belädt den Materialkübels.
- 2) Füllen**
Der Materialkübels wird am Mast hochgefahren und entleert seinen Inhalt in die Schleuse. Nach Schließen der Schleusenklappe unterstützt Pressluft den Materialfluß zur Austrittsstelle an der Rüttlerspitze.



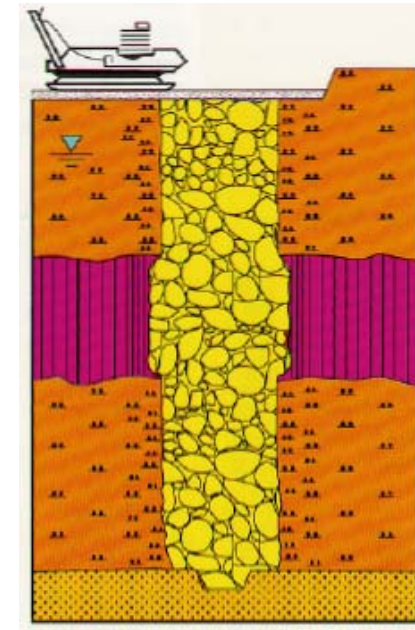
Einfahren

Der Rüttler verdrängt und durchfährt den Boden bis zur geplanten Tiefe, unterstützt von Druckluft und der abwärts gerichteten Kraft der Mastwinden.



Verdichten

Nach Erreichen der Endtiefe wird das Zugabematerial im Pilgerschritt verfüllt, seitlich in den Boden gedrückt und verdichtet.



Abschließen

Die Rüttelstopfsäule wird bis zur geplanten Höhe aufgebaut. Beim Herrichten des Feinplanums wird eine Nachverdichtung der Sohle erforderlich.

3.5 Bemessung der Rüttelstopfverdichtung (RSV)

Rütteldruckverdichtung:

Verdichtungsfähiger rolliger Boden
wird mit Hilfe der Rüttelvibrationen
in sich verdichtet
und somit verbessert.
(innerer Reibungswinkel,
Steifemodul)



Gründungstechnisch wird
ein durch
Rüttelstopfverdichtung
verbesserter Boden wie
„normaler“ Baugrund
behandelt.

≠

Rüttelstopfverdichtung:

Verdichtungsunwilliger kohäsiver Boden
wird durch die Herstellung
lastabtragender Stopfsäulen
aus verdichtetem grobkörnigen
Zugabematerial verbessert.



Das Einbringen lotrechter Schottersäulen im
Vollverdrängungsverfahren erzeugt zusätzlich zur
Lastumlagerung vom Boden auf die Säulen eine Erhöhung
der Horizontalspannungen im Boden bis in größere Tiefen.

Anordnung der Säulen in einem engen Raster:

→ Verdichtungs- und Verspannungseffekt

→ Erhöhung der Kohäsion und

→ Erhöhung der Steifigkeit des Bodens zwischen den Säulen

Der Verbesserungsgrad des Steifemoduls gegenüber seinem
Ausgangszustand hat maßgeblichen Einfluss auf das
Setzungsverhalten der Bodenschichten.



Nach PRIEBE ist eine verhältnismäßig zuverlässige Prognose über den **Grad der Verbesserung** möglich, der sich für einen bestimmten Boden ohne Änderung von dessen Lagerungsdichte **allein aus der Existenz der Stopfsäulen** ergibt.

Zunächst wird dabei ein Faktor ermittelt, um den die Stopfsäulen den Boden gegenüber dem Ausgangszustand verbessern.

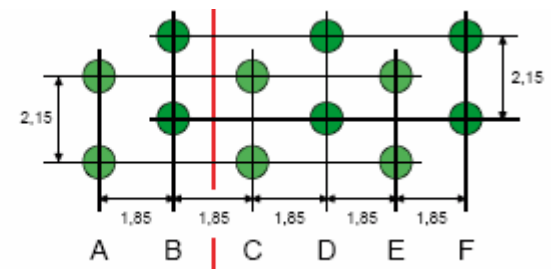
Um diesen **Verbesserungswert** erhöht sich z.B. rein rechnerisch die Steifezahl des unbehandelten Bodens oder vermindert sich eine für den unbehandelten Boden ermittelte Setzung.

Das komplexe System der Stopfverdichtung lässt sich nur für den eindeutig definierbaren Grenzfall einer unbegrenzten Lastfläche auf einem unbegrenzten Säulenraster rechnerisch erfassen.

Bei der Untersuchung dieses Grenzfalles wird eine **einzelne Zelle mit der Fläche A** betrachtet, die aus **einer Säule des Querschnitts A_s** und dem zugehörigen Boden besteht.

Einer Stopfsäule werden in Abhängigkeit von Überbau und Boden in der Regel Flächen von ca. **$0,8 \text{ m}^2$ bis ca. $4,0 \text{ m}^2$** zugeordnet, was einem **Säulenraster von ca. $0,9 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$ bis ca. $2,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$** entspricht.

Rüttelstopfverdichtung,
Raster $1,85 \times 2,15 \text{ m}$
Zugeordnete Fläche 4 m^2



3 Bodenverbesserung

Nach PRIEBE ergibt sich der Grundwert der Verbesserung n_0 zu:

$$n_0 = 1 + \frac{A_s}{A} \cdot \left[\frac{5 - A_s/A}{4 \cdot K_{a_s} \cdot (1 - A_s/A)} - 1 \right]$$

Die Beziehung zwischen dem Verbesserungswert n_0 , dem reziproken Flächenverhältnis A/A_s und dem in die Formel eingehenden inneren Reibungswinkel des Zugabematerials φ_s zeigt folgendes Diagramm:

Beispiel:

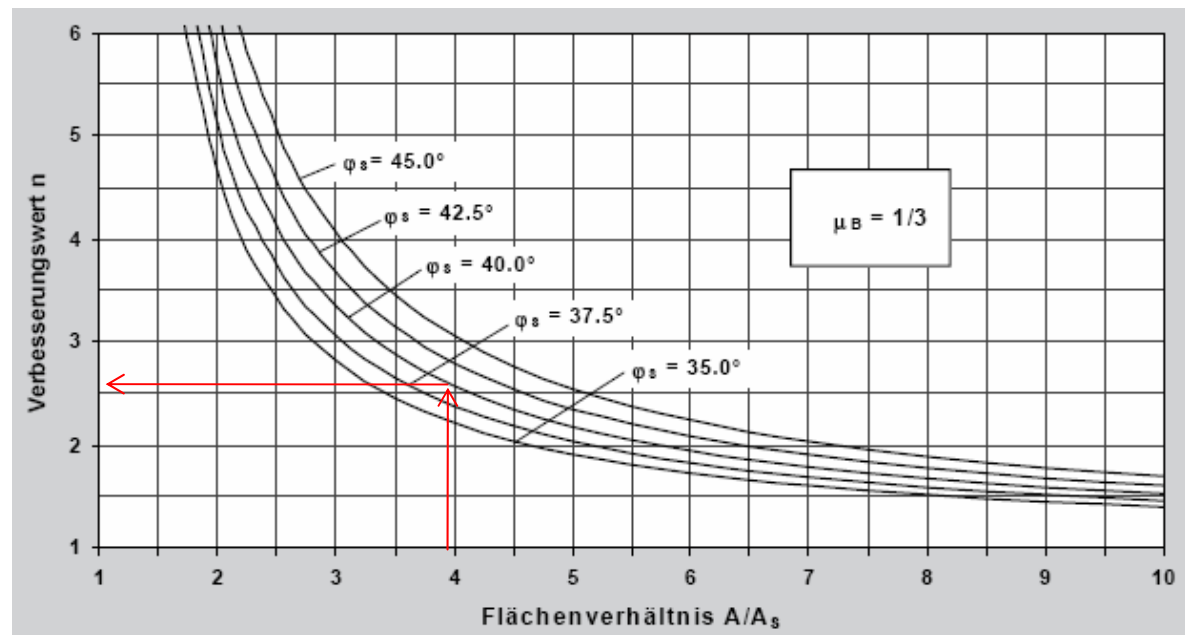
Säulenraster: 1,4 x 1,4 m

Säulendurchmesser: 0,8 m

→ $A/A_s = 1,96/0,5 = 3,9$

Säulenmaterial: $\varphi_s = 40^\circ$

→ Grundwert $n_0 = 2,6$



3 Bodenverbesserung

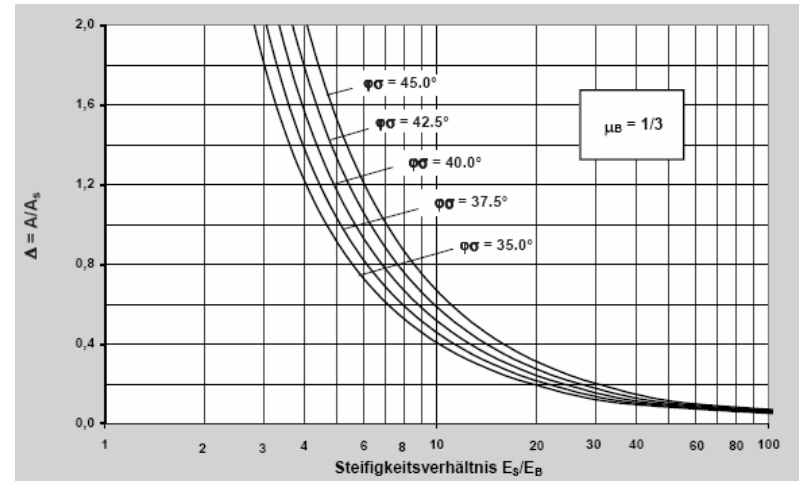
Ausgehend vom Grundwert n_0 werden in weiteren Berechnungsschritten berücksichtigt:

- **Kompressibilität des Säulenmaterials** → **reduzierter Verbesserungswert n_1**

$$n_1 = 1 + \frac{\overline{A_S}}{A} \cdot \left[\frac{1/2 + f(\mu_B \cdot \overline{A_S}/A)}{K_{aS} \cdot f(\mu_B \cdot \overline{A_S}/A)} - 1 \right]$$

$$\frac{\overline{A_S}}{A} = \frac{1}{A/A_S + \Delta(A/A_S)}$$

$$\Delta(A/A_S) = \frac{1}{(A_S/A)_1} - 1$$



- **Berücksichtigung des Überlagerungsdruckes** → **endgültiger Verbesserungswert $n_2 = f_t \times n_1$**

Mit zunehmendem Überlagerungsdruck wird die Säule auch zunehmend besser seitlich gestützt und kann dementsprechend mehr Last aufnehmen:

→ Tiefenbeiwert f_t :

$$f_t = \frac{1}{1 + \frac{K_{0S} - G_B/G_S}{K_{0S}} \cdot \frac{G_S}{p_S}}$$

$$p_S = \frac{p}{\frac{A_S}{A} + \frac{1 - A_S/A}{p_S/p_B}}$$

$$\frac{p_S}{p_B} = \frac{1/2 + f(\mu_B \cdot \overline{A_S}/A)}{K_{aS} \cdot f(\mu_B \cdot \overline{A_S}/A)}$$

$$G_S = \Sigma(\gamma_S \cdot \Delta t), G_B = \Sigma(\gamma_B \cdot \Delta t)$$

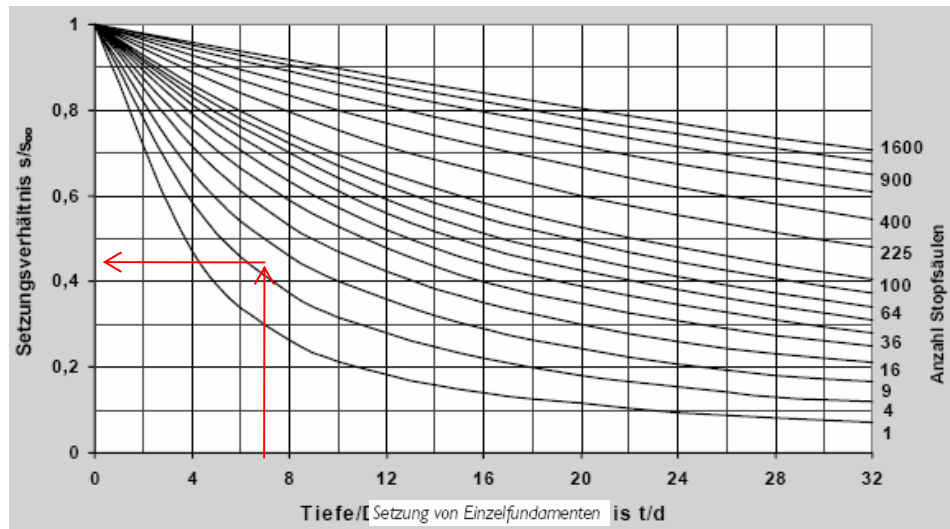
$$K_{0S} = 1 - \sin \varphi_S$$

Einzelfundamente auf RSV-verbessertem Baugrund:

Die Bemessung einer Stopfverdichtung für Einzel- oder Streifenfundamente ist in direkter Weise (noch) nicht möglich, sondern erfolgt näherungsweise über den **Grenzfall einer unbegrenzten Last auf einem unbegrenzten Säulenraster**. Die Gesamtsetzung s_{∞} , die sich bei homogenen Verhältnissen für diesen Grenzfall ergibt, ist nach der vorhergehenden Beschreibung wie folgt zu bestimmen:

$$s_{\infty} = p \cdot \frac{t}{E_B \cdot n_2}$$

Von dieser Setzung kann über **Diagramme** auf die Setzung von Einzel- oder Streifenfundamenten auf Säulengruppen geschlossen werden.



Bemessungsbeispiel:

- Stütze mit $V = 1000 \text{ kN}$ soll mittels Einzelfundament gegründet werden.
- Vorgabe seitens des Tragwerksplaners: maximal zulässige Setzung: $s_{zul} = 2,5 \text{ cm}$
- Baugrunderkundung: Weicher Lehm mit Steifemodul $E_B = 5 \text{ MN/m}^2$ bis in eine Tiefe von $t = 5 \text{ m}$.
 - Setzungsberechnung: $s < 2,5 \text{ cm}$ erfordert Fundamentabmessungen von $4,0 \times 4,0 \text{ m}$.
 - daraus ergibt sich die zulässige Bodenpressung zu $1000 \text{ kN} / (4\text{m} \times 4\text{m}) = 62,5 \text{ kN/m}^2$.
- Baugrundverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen, so dass zulässige Bodenpressung 250 kN/m^2 erreicht wird und die Fundamentgröße somit auf $1000/250 = 4 \text{ m}^2 = 2,0 \times 2,0 \text{ m}$ reduziert werden kann.

Säulendurchmesser: 70 cm

5 Säulen unter dem Fundament:

Tiefe der Säulen:

Reibungswinkel Säulenmaterial:

Aus Diagramm 1:

$$\rightarrow A_s = 0,385 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow A = 4 \text{ m}^2 / 5 = 0,8$$

$$\rightarrow A/A_s = 2,0$$

$$t = 5 \text{ m}$$

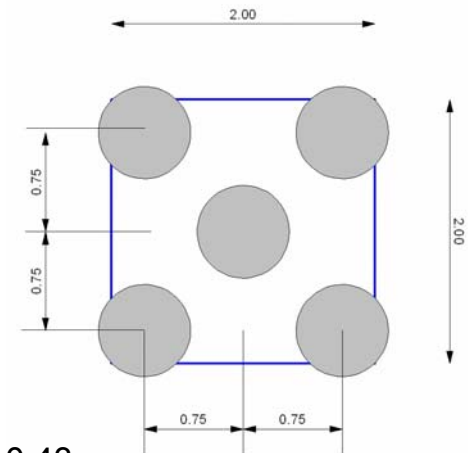
$$\varphi_s = 37,5^\circ$$

$$\text{Verbesserungsfaktor: } n_0 = 5 \approx n_2$$

$$\rightarrow s^\infty = (250 \text{ kN/m}^2 \times 5 \text{ m}) / (5000 \text{ kN/m}^2 \times 5) = 5,0 \text{ cm}$$

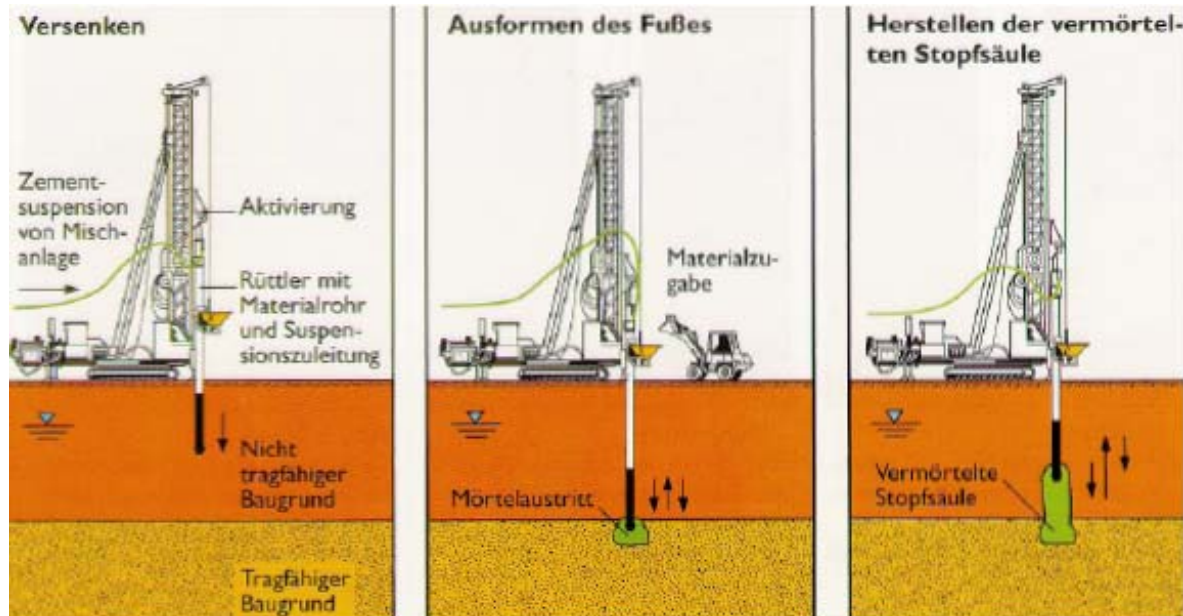
Aus Diagramm 3:

Mit $t/d = 500 \text{ cm} / 70 \text{ cm} = 7$ und Säulenanzahl = 5 ergibt sich $s/s^\infty \approx 0,43$



$$\rightarrow s \approx 0,43 \times 5,0 \text{ cm} = 2,2 \text{ cm} < 2,5 \text{ cm} = s_{zul}$$

3.6 Vermörtelte Stopfsäulen (VSS) und Fertigmörtelstopfsäulen (FSS)



Ausgegrabene Vermörtelte Stopfsäule

Organische Zwischenschichten oder **sehr weiche Böden**: → keine seitliche Stützung !

→ Ersetzen der erforderlichen äußeren Stützung des Säulenmaterials durch **innere Bindung des Stopfmateri- als**.

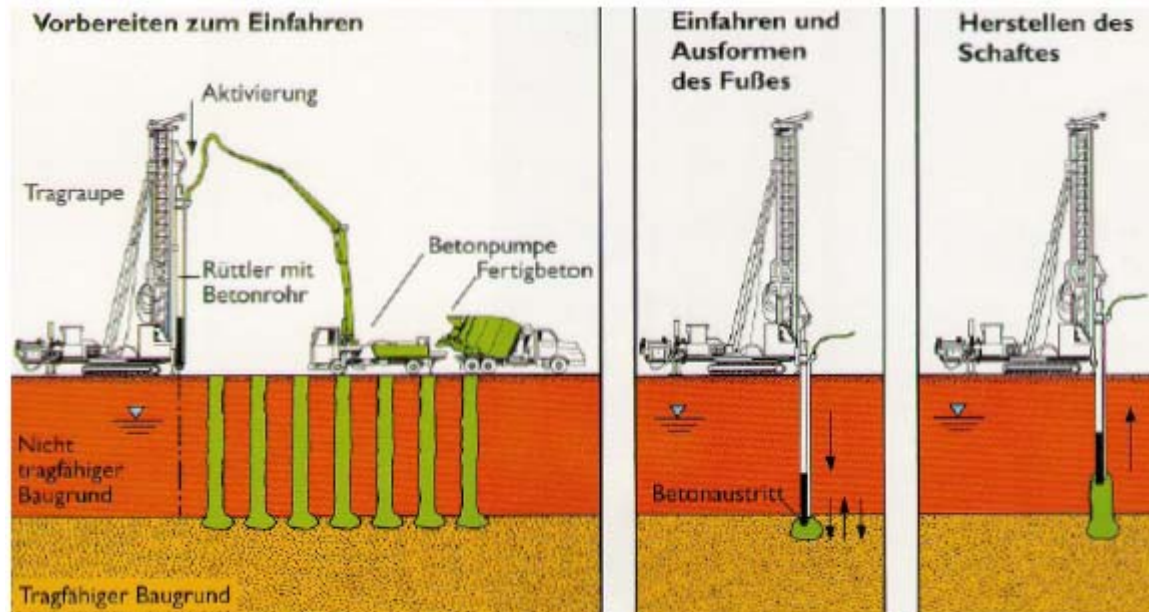
→ VSS = Zugabe einer Zementsuspension zum Zuschlagstoff während der Herstellung.

→ FSS = Verstopfung eines **vorgefertigten Mörtels (Beton B15 bis B20)**.

Die Bemessung der äußeren Tragfähigkeit vermörtelter Stopfsäulen erfolgt wie bei einem pfahlartigen Tragelement (→ Bemessung in Anlehnung an DIN 4014 und DIN 1054).

Die **vertikale zulässige Einzellast** liegt im **allgemeinen** zwischen **ca. 400 kN bis ca. 600 kN** und wird entscheidend von der Ausbildung eines verdichteten Kiesfußes beeinflusst.

3.7 Betonrüttelsäulen (BRS)



Sie werden angewendet, wenn feinkörnige Böden keinen tragfähigen Verbund mit Stopfsäulen bilden können. Ebenso bei Vorhandensein erheblicher organischer Bodenbestandteile, die sich zersetzen oder schrumpfen können, oder bei höheren Belastungen.

Anstelle von Zugabematerial und Suspension wird **pumpfähiger Beton der Güte B25** in den vom Rüttler erzeugten Raum verpumpt und so ein pfahlartiger Gründungskörper ($\varnothing 40-60$ cm) erstellt.

Anordnung der Betonrüttelsäulen: unmittelbar unter den Lastbereichen (Fundamente).
Zulässige Belastung je nach Baugrund und Fußausbildung (Fußverbreiterung) bis ca. 800 kN.

3.8 Kombinierte Verfahren – „Teilvermörtelte Stopfsäulen“

= Kombination von

Rüttelstopfsäulen (RSV) im Tiefenbereich der grobkörnigen Böden und
Fertigmörtelstopfsäulen (FSS) im Tiefenbereich der Weichschichten.

Anwendung bei schichtweise unzureichender Stützkraft des umgebenden Bodens
(z.B. organischen Weichschichten):

→ Rüttelstopfsäule verformt sich unter Auflast und weicht in den umgebenden Boden aus
→ Gefahr von Setzungen !!

→ „Teilvermörtelte Stopfsäule“:

Rüttelstopfsäule wird in vorhandenen Weichschichten verfestigt, indem während des Einbaus des Kiesel entweder eine Zementsuspension zugegeben oder ein stampffähiger Beton als Zugabematerial (Fertigmörtelstopfsäulen) eingebaut wird.

Oberhalb der Weichschichten: Fortsetzung der Rüttelstopfsäule bis zur Arbeitsebene.

3.9 Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen mit Bindemitteln



Bodenverbesserung =
Verfahren zur Verbesserung der **Einbaufähigkeit, Verdichtbarkeit und Befahrbarkeit** von Böden. Dabei stehen die Reduktion des Wassergehaltes und die Strukturverbesserung des Bodens im Vordergrund. Die bodenverbesserten Schichten sind aber nicht Teil des frostsicheren Oberbaus.

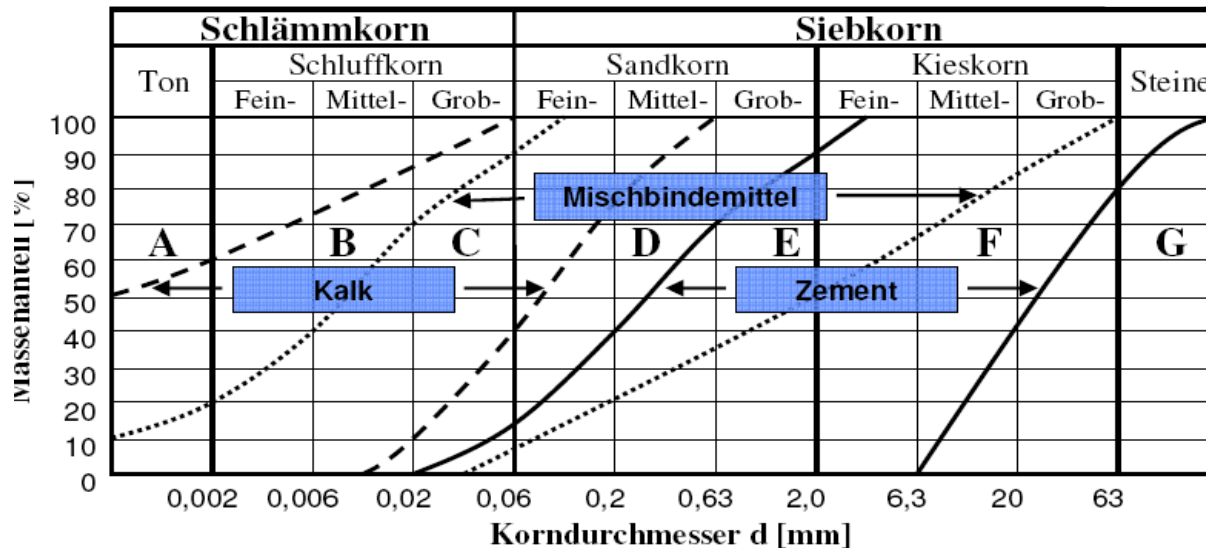
Qualifizierte Bodenverbesserung =
Bodenverbesserung, mit **erhöhten Anforderungen hinsichtlich des Frost-, Tragfähigkeits- und Setzungsverhaltens**.
Böden der Frostempfindlichkeitsklasse F3 können hierdurch z.B. die Eigenschaften eines Bodens der Frostempfindlichkeitsklasse F2 erreichen.

Bodenverfestigung =
Verfahren, in dem zusätzlich zu den Effekten der Bodenverbesserung die Widerstandsfähigkeit des Bodens oder Baustoffs gegen Beanspruchungen durch Verkehr und Klima langfristig erhöht wird. Der Boden wird hierdurch im Sinne der ZTVE.StB **dauerhaft tragfähig, wasserunempfindlich und frostbeständig**.
Verfestigungen werden im Straßenbau **für die komplette oder teilweise Herstellung des frostsicheren Oberbaues verwendet**.

3 Bodenverbesserung

Bei der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung kommen hydraulische Bindemittel, beispielsweise **Zement, hochhydraulischer Kalk, Kalkhydrat** oder **Feinkalk** sowie **Mischbindemittel** (Kombinationen aus genormten hydraulischen Bindemitteln und Baukalken) zum Einsatz. Die **Verwendung anderer Bindemittel** kann, **wenn ihre Eignung nachgewiesen ist**, zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer vereinbart werden.

Eignung der Bindemittel



wassergehaltsreduzierende
Komponenten (z.B. Kalk):

→ Verbesserung der
Einbaubarkeit/Verdichtbarkeit

hydraulisch wirkende
Stoffe (z.B. Zement):

→ Verbesserung der
Tragfähigkeit, Steifigkeit

Bereich A	ungeeignet, nicht zerkleinerbar
Bereich G	ungeeignet, zu grob

Bereich B	TA:	nur Kalk
Bereich C	TM, TL, UM:	Kalk und MB 50/50
Bereich D	GU*, SU*:	MB 30/70 und MB 50/50
Bereich E	GU, SU:	MB 30/70 und CEM
Bereich F	GW, GI:	nur CEM

3 Bodenverbesserung

Richtwerte für die erforderliche Bindemittelzugabemenge bei Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen:

Anwendungsart	Kalkmenge (Gew.-%, bezogen auf das Trockengewicht d. Bodens)			
	Kalkart	Feinkalk	Kalkhydrat	hochhydraulischer Kalk
Bodenverbesserung (Hauptziel: Sofortwirkung)		2 bis 4	2 bis 5	2 bis 8
Bodenverfestigung (Hauptziel: Langzeitwirkung)		4 bis 6	4 bis 8	4 bis 12

Bodengruppe nach DIN 18 196	Zementanteil (Gew.-%, bezogen auf den getrockneten Boden)	Zementmenge	
		15 cm Verfestigung (kg/m ²)	20 cm Verfestigung (kg/m ²)
GW, GI, GE, SW, SI	4 bis 7	12 bis 18	16 bis 24
SE	8 bis 12	23 bis 30	31 bis 40
GU, GT, SU, ST	6 bis 10	18 bis 24	24 bis 32
GU*, GT*, SU*, ST*	7 bis 12	18 bis 30	24 bis 40
UL, TL	7 bis 12	18 bis 30	24 bis 40
UM, TM, TA	10 bis 16	27 bis 36	36 bis 48

Anwendungsbereiche:

Feinkalk:

Bei fein- und gemischtkörnigen Böden $w > w_{Pr}$

Kalkhydrat:

Bei fein- und gemischtkörnigen Böden $w \leq w_{Pr}$

Hochhydraulische Kalke:

Bei grob-gemischtkörnigen Böden

⇒ **Eignungsprüfung nach TP BF-StB, Teil B 11.5**
(Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen mit Feinkalk und Kalkhydrat, Technische Prüfvorschriften).

⇒ **Eignungsprüfung nach TP BF-StB, Teil B 11.1**
(Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigungen mit Zement, Technische Prüfvorschriften).

Wahl der Bindemittelmenge bei der Eignungsprüfung in M.-%

	Bodengruppe	Feinkalk nach DIN EN 459-1	Kalkhydrat nach DIN EN 459-1	Zement nach DIN EN 197-1 DIN-11 64	Hydr. Boden- und Tragschichtbinder nach DIN 18506	Mischbindemittel
Bodenverfestigung	Grobkörnige Böden (GE, GW, GI, SE, SW, SD)	-	-	3 – 7	3 – 7	3 – 7
	Gemischtkörnige Böden (GU, GT, SU, ST, GU*, GT*, SU*, ST*)	4 – 6	4 – 8	4 – 12	4 – 12	4 – 12
	Feinkörnige Böden (UL, TL, UM, UA, TM, TA)	4 – 6	4 – 8	7 – 16	7 – 16	4 – 16
	Künstliche Gesteinskörnungen	-	-	5 – 12	5 – 12	5 – 12
	RC-Baustoffe	-	-	4 – 10	4 – 10	4 – 10
Bodenverbesserung (Qz.V.b.)	Grobkörnige Böden (GE, GW, GI, SE, SW, SD)	-	-	3 – 6	3 – 6	3 – 6
	Gemischtkörnige Böden (GU, GT, SU, ST, GU*, GT*, SU*, ST*)	2(3) – 4	2(3) – 5	3 – 6	3 – 6	2(3) – 6
	Feinkörnige Böden (UL, TL, UM, UA, TM, TA)	2(3) – 4	2(3) – 5	3 – 6	3 – 6	2(3) – 6

3.9.1 Bodenverbesserung

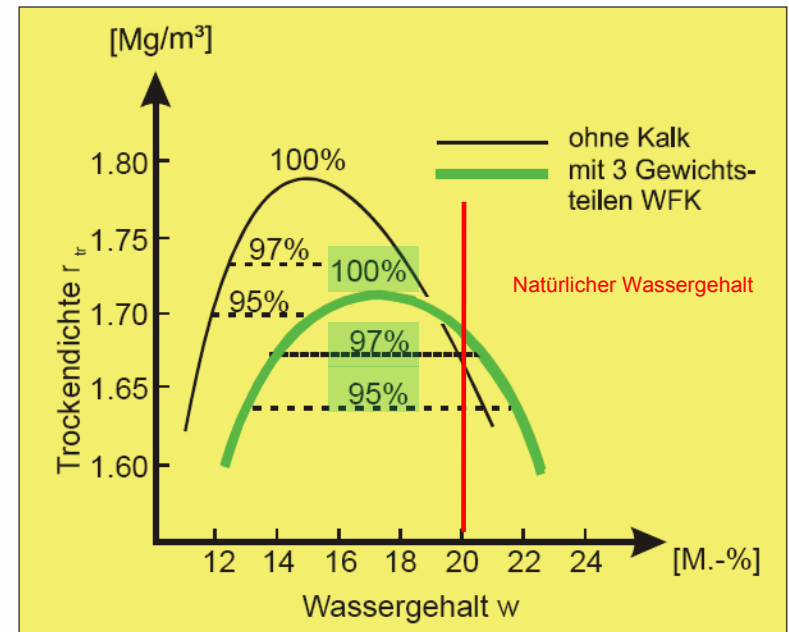
Fein- und gemischtkörnige Böden enthalten meistens so viel Wasser, dass sie nicht bzw. nur ungenügend verdichtet werden können.

Der Vergleich des natürlichen Wassergehaltes eines überfeuchten Bodens mit dem optimalen Wassergehalt beim Proctorversuch zeigt, dass der Boden nicht auf den geforderten Verdichtungsgrad der einfachen Proctordichte zu bringen ist.

Der Proctorversuch am Boden-Kalk-Gemisch zeigt eine Erhöhung des optimalen Wassergehalts.

Die Wassergehaltsspannen für den gemäß ZTVE bei bindigen Böden geforderten Verdichtungsgrad von 97 % bzw. 95 % werden größer.

Die Abstände zu hohen natürlichen Wassergehalten werden geringer.



→ Effekte der Bodenverbesserung: Gewährleistung der Einbaufähigkeit, Verdichtbarkeit u. Verbesserung der Tragfähigkeit ($E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$).

3.9.2 Qualifizierte Bodenverbesserung

Für die sog. „qualifizierte Bodenverbesserung“ **im Straßenbau** werden im Entwurf der neuen ZTVE (ZTVE-StB07) folgende Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge vorgegeben:

Im **qualifizierten Straßenbau** ist die Bindemittelmenge wie folgt zu bemessen:

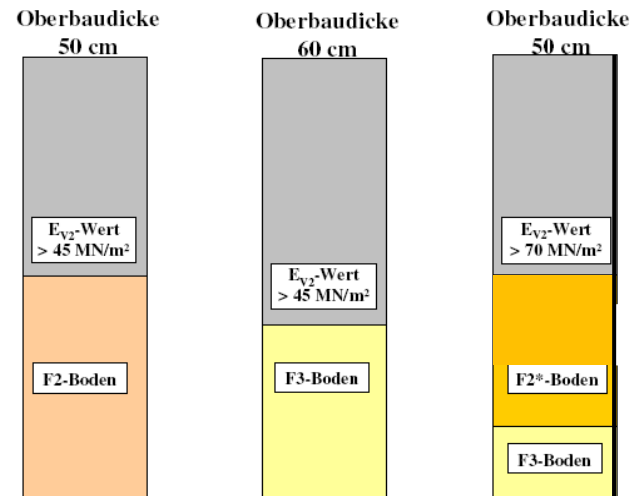
- Bindemittelmenge muss $\geq 3 \text{ M.-%}$ sein.
- einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen muss $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ sein.
- Festigkeitsabfall nach 24 h Wasserlagerung darf nicht größer als 50 % sein.

Bei einer qualifizierten Verbesserung mit einer **Schichtdicke von mindestens 25 cm** kann der Untergrund in die **Frostempfindlichkeitsklasse F 2** eingestuft werden.

Als Ausgangswerte für die Bemessung der Mindestdicke des frostsicheren Straßenaufbaus können die Angaben für F2-Böden gemäß RStO 01, Tab. 6 verwendet werden, wenn auf dem Planum ein **$E_{v2} \geq 70 \text{ MN/m}^2$** nachgewiesen wird.

Zelle	Frostempfindlichkeitsklasse	Dicke in cm bei Bauklasse		
		SV / I / II	III / IV	V / VI
1	F2	55	50	40
2	F3	65	60	50

Dicke des frostsicheren Oberbaus nach RStO 01 Bauklasse III bis IV



3 Bodenverbesserung

Bei **anderen Anwendungen** der qualifizierten Bodenverbesserung, z.B.

- Geländeauffüllungen unter Hallenbodenplatten,
- Herstellung von „Gründungspolstern“ unter Einzel- und Streifenfundamenten

Folgen die **Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge aus erdstatische Berechnungen** :

- **Mindestanforderung an das Verformungsmodul E_{v2}** auf OK Erdplanum Hallenboden.
- **Mindestanforderung an das Steifemodul E_s** der verbesserten Böden zur Minimierung der Setzungen von Geländeauffüllungen.



Beispiel Gründungspolster:

Annahmen (vgl. Beispiel RSV, Seite 33):

Fundamentabmessungen **2,0 x 2,0 m**

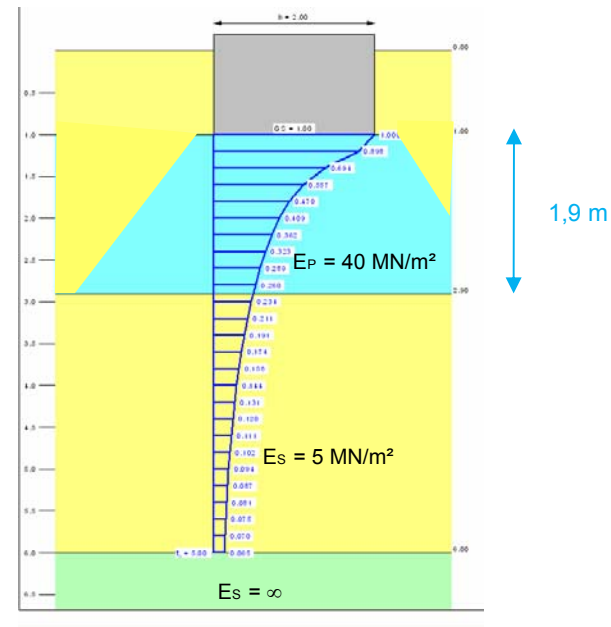
Belastung 1000 kN → Bodenpressung **250 kN/m²**

Baugrund: Lehm, Steifemodul **$E_s = 5 \text{ MN/m}^2$**
bis in eine Tiefe von **$t = 5 \text{ m}$** unter Fundament.

Rechnerische Setzung: **$s = 6,6 \text{ cm} > 2,5 \text{ cm} = s_{zul.}$**

Gründungspolster aus verbessertem Boden: $E_P = 40 \text{ MN/m}^2$

→ Rechnerische Setzung: **$s = 2,5 \text{ cm}$** bei **$d_{\text{Polster}} = 1,9 \text{ m}$**



Gründungspolster müssen grundsätzlich im Lastausbreitungswinkel von 45° über die Fundamentränder hinaus hergestellt werden.

Der Einbau muss in Schüttlagen von maximal 30 cm erfolgen, welche materialspezifisch wie folgt zu verdichten sind:

- Nichtbindige Erdstoffe (z.B. Lieferkörnung 0/56): Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 98 \%$
- Bindige Erdstoffe (verbessert mit Bindemittel): Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 100 \%$

Der bei der Setzungsberechnung in Ansatz gebrachte Wert des Steifemoduls E_s ist mittels statischen Plattendruckversuchen nach DIN 18134 zu kontrollieren und nachzuweisen.

Hierbei ermittelt sich das Steifemodul E_s nach MUHS („Die Prüfung des Baugrundes und der Böden“, 1957) aus der **Normalspannung σ_0 [MN/m²] bei maximaler Laststufe der Erstbelastung**, der zugehörigen **Setzung der Lastplatte s [mm]** und dem **Durchmesser der Lastplatte d [m]** gemäß nachfolgender Beziehung:

$$E_s \approx 1000 \cdot \frac{\sigma_0}{s} \cdot d$$

Folgender Zusammenhang besteht zwischen Steifemodul E_s und Verformungsmodul E_{v1} :

$$E_s \geq E_{v1}$$

3.9.3 Bodenverfestigung

Zusätzlich zu den Effekten der Bodenverbesserung wird bei der Bodenverfestigung die **Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen Beanspruchungen durch Verkehr und Klima durch Zugabe von Bindemitteln langfristig erhöht.** Der Boden wird hierdurch im Sinne der ZTV E-StB dauerhaft tragfähig, wasserunempfindlich und frostbeständig.

Bodenverfestigungen werden gemäß FLOSS-Kommentar zur ZTVE-StB für folgende Zwecke ausgeführt:

Bauweise 1: Verfestigen der Planumsschicht als gleichmäßig hochtragfähige Unterlage der Oberbauschichten

Bauweise 2: Voll- oder Teilersatz der mineralischen Frostschutzschicht des Oberbaus durch frostsicheres Verfestigen des in der Planumsschicht anstehenden oder eingebauten Bodens

Bauweise 3: Verfestigen der mineralischen Frostschutzschicht im Oberbau

Bauweise 4: Befestigen von untergeordneten Straßen, Erdstraßen und Wegen Bauverfahren

Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge (Zement, Tragschichtbinder, hydraulischer Kalk) bei der Eignungsprüfung für eine frostbeständige Bodenverfestigung Grob- fein- und gemischtkörniger Böden nach ZTVE-StB:

Zeile	Bodengruppe	Frostwiderstand ²⁾	Druckfestigkeit ¹⁾
1	SW-SI-SE GW-GI-GE	–	Zement und Tragschichtbinder HT 35 4,0 N/mm ² im Alter von 7 Tagen oder 6,0 N/mm ² im Alter von 28 Tagen
2	SU-ST-GU-GT ³⁾ und die Böden der Zeile 1, die brüchiges, poröses oder angewittertes Korn enthalten	$\frac{\Delta l}{l} \leq 1\text{‰}$	wie Zeile 1 oder Hydraulischer Kalk HL 5, Tragschichtbinder HT 15 6,0 N/mm ² im Alter von 28 Tagen
3	SU*-GU*-UL-UM ST*-GT*-TL-TM-TA	$\frac{\Delta l}{l} \leq 1\text{‰}$	–
4	industrielle Nebenprodukte	$\frac{\Delta l}{l} \leq 1\text{‰}$ ⁴⁾	6,0 N/mm ² im Alter von 28 Tagen

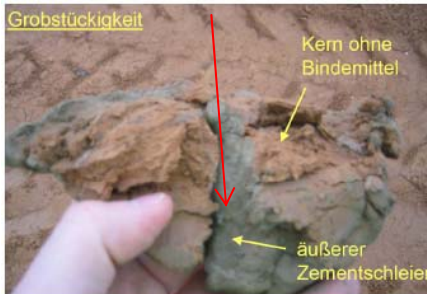
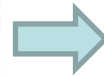
¹⁾ Diese Druckfestigkeiten dienen nur zur Festlegung des Bindemittelgehaltes und beziehen sich auf einen Probendurchmesser von 10 cm

²⁾ Hebung der Probe

³⁾ Anforderung an den Frostwiderstand nur, wenn Bodenklassen F2 vorliegen. Sonst nur Prüfung der Druckfestigkeit

⁴⁾ Wenn die Frostbeständigkeit des industriellen Nebenprodukts nicht außer Zweifel steht.

**Auf eine besonders sorgfältige Einarbeitung des Bindemittels und Homogenisierung des Boden-Bindemittel-Gemisches ist unbedingt zu achten.
Dabei ist der Boden so aufzureißen und zu zerkleinern, dass abgesehen von Kies- bzw. Steinanteilen augenscheinlich $\geq 80\%$ der Bodenklumpen $< 8\text{ mm}$ sind
(\rightarrow ggf. mehrere Fräsübergänge!):**



Verfestigungen sind im frischen Zustand in Querrichtung und bei Einbaubreiten über 8 m auch in Längsrichtung durch mindestens eine Kerbe zu unterteilen.

Die Kerbtiefe muss **mindestens 35 % der Einbaudicke** betragen.

Wenn die Verfestigung unmittelbare Unterlage einer Betondecke ist, muss sie entsprechend dem Fugenplan der Decke gekerbt werden.

Wurde eine Verfestigung im frischen Zustand nicht gekerbt, ist eine Trennung der Konstruktionsschichten, z.B. über ein **Geotextil (Trennvlies)**, herbeizuführen.

Verfestigungen unter Asphaltsschichten sind wie folgt zu kerben:

- Gesamteinbaudicke der Asphaltsschichten > 14 cm \rightarrow in Querrichtung mit einem Abstand max. 5 m
- Gesamtdicke der Asphaltsschichten ≤ 14 cm \rightarrow in Querrichtung mit einem Abstand max. 2,5 m

4.1 Konstruktion

Die Grundkonstruktion eines Betonbodens ergibt sich im Wesentlichen aus 3 Teilen:

- **Betonbodenplatte**
- **Tragschicht**
- **Untergrund**

Die Wahl der Tragschicht in Art und Dicke ist abhängig von der Beschaffenheit des Untergrundes, bezogen auf die **maßgebende Beanspruchung max Q** des Betonbodens:



Erdplanum:

Belastung max. Einzellast Q in kN
≤ 32,5
≤ 60
≤ 100
≤ 150
≤ 200

Verformungsmodul E_{v2} in MN/m ²
≥ 30
≥ 45
≥ 60
≥ 80
≥ 100

Tragschicht:

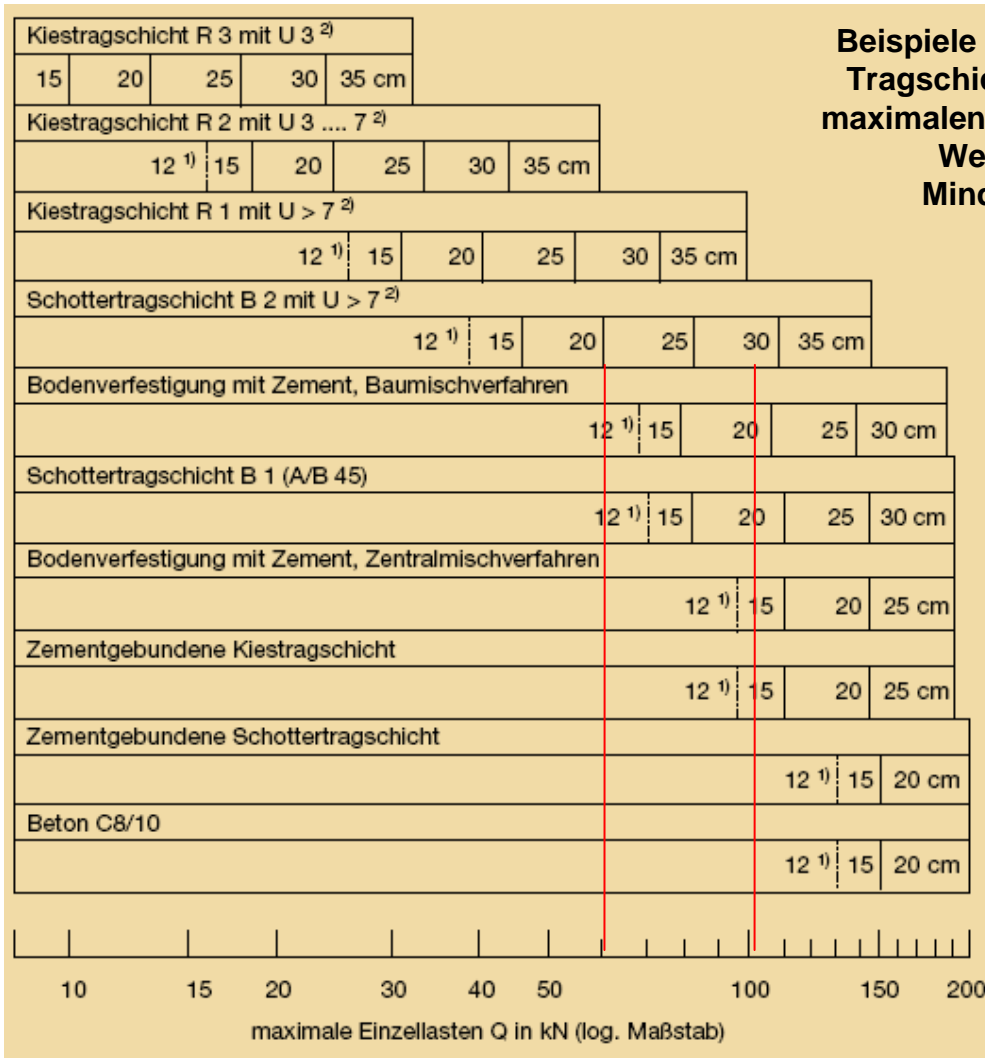
Belastung max. Einzellast Q in kN
≤ 32,5
≤ 60
≤ 100
≤ 150
≤ 200

Verformungsmodul E_{v2} in MN/m ²
≥ 80
≥ 100
≥ 120
≥ 150
≥ 180

Dabei soll das Verhältnis der Verformungsmoduln $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ sein.
Höhere Verhältniswerte sind zulässig, wenn $E_{v1} \geq 0,6 \times E_{v2}$

Üblicherweise werden Tragschichten in Dicken von **20 bis 30 cm** hergestellt.
Ihre **Mindestdicke beträgt 15 cm**.

4 Betonböden für Produktions- und Lagerhallen



Beispiele für Tragschichten mit Angabe der Tragschichtdicke in cm, abhängig von der maximalen Einzellast Q (Voraussetzung: Ev2-Wert auf Erdplanum erfüllt die Mindestanforderung → Seite 48)

¹⁾ Geplante Mindestdicke der Tragschicht 15 cm; tatsächlich ausgeführte Dicke der Tragschicht auch an der ungünstigsten Stelle durch Baustellenungenauigkeiten nicht weniger als 12 cm.

²⁾ Die Kornzusammensetzung wird durch die Ungleichförmigkeitszahl U gekennzeichnet. Sie errechnet sich aus dem Verhältnis der Korngrößen des Siebdurchganges d_{60} bei 60 M.-% und d_{10} bei 10 M.-% des gesamten Siebgutes: $U = d_{60}/d_{10}$.

4.2 Tragschicht

Für den Einbau unter Betonbodenplatte stehen verschiedene Tragschichtmaterialien zur Verfügung. Kiestragschichten und Schottertragschichten als Tragschichten ohne Bindemittel sind in der ZTV SoB-StB 04 geregelt (→ Körnung 0/32, 0/45 oder 0/56).

Hydraulisch gebundene Kies- oder Schottertragschichten (HGT) sind insbesondere dann vorzusehen, wenn höhere Tragfähigkeiten erforderlich sind.

Im Hinblick auf einen reibungslosen (witterungsunabhängigen) Bauablauf sind sie jedoch auch



Nach LOHMEYER (2008) kann die Tragschicht entfallen, wenn der Untergrund allein schon ausreichend tragfähig und erforderlichenfalls frostsicher ist, bzw. diese Anforderungen durch eine Verfestigung der anstehenden Böden erreicht werden können.

4.3 Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit

Betonbodenplatten werden bei gleicher Beanspruchung durch Lasteinwirkungen umso mehr auf Biegung beansprucht, je nachgiebiger der Untergrund ist.

Für die dauerhafte Funktionsfähigkeit der Bodenplatte muss daher eine hinreichende Tragfähigkeit des Untergrundes gewährleistet sein, und zwar bis in größere Tiefe des Baugrundes.

Die alleinige Überprüfung der Verformungsmoduln E_{v2} auf OK Tragschicht und OK Erdplanum ist wegen der auf 60-90 cm begrenzten Einwirktiefe des Lastplattendruckversuchs daher kein ausreichendes Bemessungskriterium !

→ Setzungsberechnungen zum Nachweis der zu erwartenden Verformungen

→ Festlegung erforderlicher Maßnahmen zur Reduzierung der Verformungen (z.B. Bodenaustausch oder qualifizierte Bodenverbesserung mit definierten Vorgaben der zu gewährleistenden Steifigkeitseigenschaften der verbesserten Schichten).

4.4 Abdichtung

Nach DIN18195-4 sind Bodenplatten grundsätzlich gegen aufsteigende Feuchtigkeit abzudichten.
Bei von außen drückendem Wasser sind Abdichtungen nach DIN 18195-6 erforderlich.

Zu verwendende Abdichtungsstoffe sind in DIN 18195-2 geregelt.

Bei Raumnutzungen mit **geringen Anforderungen an die Trockenheit der Raumluf**t kann die Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit entfallen, wenn durch eine **mindestens 15 cm dicke kapillarbrechende Schüttung** ($k_f > 10^{-4}$ m/s) unter der Bodenplatte der Wassertransport durch die Bodenplatte hinreichend vermindert wird.

Kies-/Schottertragschichten sowie HGT = in der Regel kapillarbrechende Schicht
Verfestigungen (Boden+ Kalk/Zement) = in der Regel keine kapillarbrechende Schicht.