

# Verdichtung und Zustandsbeschreibung gemischtkörniger Böden

**C. Lauer, J. Engel**

*HTW-Dresden, Lehrgebiet Geotechnik*

---

*In der Baupraxis werden gemischtkörnige Böden oft als Baustoff in historischen Erd-  
bauwerken oder als Baugrund angetroffen. Die Klassifizierung dieser Böden erfolgt  
zuverlässig gemäß DIN 18196. Es fehlt ein Verfahren zur zahlenmäßigen Beschrei-  
bung des Zustands auf der Grundlage von definierten experimentellen Grenzwerten.  
Für Sand-Schluff-Gemische sind Verfahren zur Modellierung der Grenzspannungen  
und des Zustands entwickelt worden. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Beschrei-  
bung des Zustands gemischtkörniger Böden mit plastischem Feinkorn mittels einer  
modifizierten relativen Lagerungsdichte vorgestellt. Diese beruhen auf experimentel-  
len Untersuchungen zur Verdichtbarkeit von zwei Modellmischungen mit unterschied-  
lichem Feinkorngehalt.*

## 1 Einleitung

### 1.1 Inventar und Zustand

Die DIN 18196 teilt Bodenarten mit annähernd gleichen stofflichen Aufbau und ähn-  
lichen Eigenschaften in 29 Bodengruppen ein. Der stoffliche Zustand der Böden (Be-  
schreibung) wird dabei nicht beachtet. Es wird eine Unterteilung in bindige, nichtbin-  
dige und gemischtkörnige Böden hinsichtlich des Feinkornanteils ( $FK$  bei  
 $d < 0,063$  mm) vorgenommen. Die bindigen Böden werden nach ihren plastischen Ei-  
genschaften (Plastizitätsdiagramm) und die nichtbindigen Böden ( $FK < 5\%$ ) mittels  
ihrer Körnungslinie klassifiziert. Bei gemischtkörnigen Böden erfolgt die Klassifizie-  
rung durch die Kombination der Informationen aus der Kornverteilungskurve mit den-  
nen zu den plastischen Eigenschaften des Feinkorns. Die Zustandsbeschreibung ist  
für bindige Böden über die Konsistenzzahl  $I_C$  und für nichtbindige Böden über die  
bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  bzw. Lagerungsdichte  $D$  geregelt. Für gemischtkörnige  
Böden ist eine Beschreibung des Zustands mit den bekannten Konzepten nicht möglich.

## 1.2 Bautechnische Bedeutung gemischtkörniger Böden

In der Baupraxis sind gemischtkörnige Böden historisch bedingt häufig als Baumaterial genutzt worden. Einen Beleg dafür liefert das Dreiecksdiagramm in der Abb. 1. Es wurde die Auswertung von 1557 Bodenproben zugrunde gelegt. Im rechten Diagramm sind die Ergebnisse der Kornverteilung in Abhängigkeit des Feinkorn- und des Sandkornanteils dargestellt. Die Bereiche der Bodengruppen gemäß DIN 18196 sind in das Diagramm eingezeichnet. Im linken Diagramm sind die feinkörnigen Böden detaillierter mit Hilfe der Kornverteilung und den plastischen Eigenschaften dargestellt. Von den 1557 untersuchten Proben waren ca. 25% bindige Böden (TL, TM, TA, UL, UA/OT, UM/OU), 25% nichtbindige Böden (SE, SI, SW, GE, GI, GW) und 50% gemischtkörnige Böden (GU/GT, GU\*/GT\*, SU/ST, SU\*/ST\*). Räumlich können die untersuchten Böden hauptsächlich den Regionen Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Baden-Württemberg zu geordnet werden.

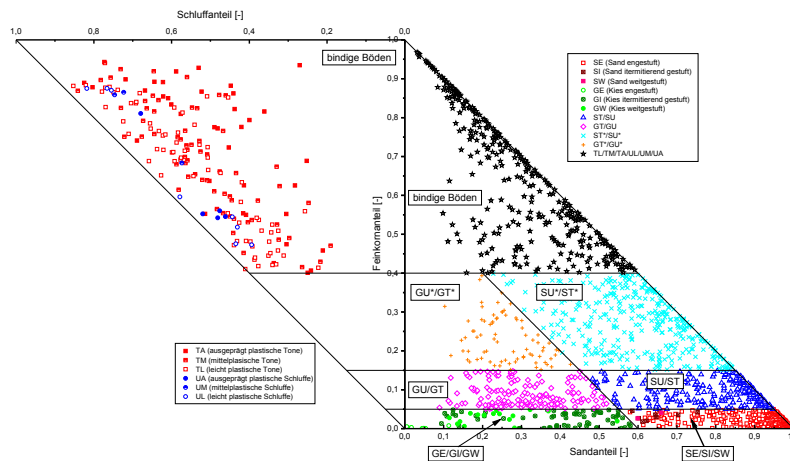


Abbildung 1: Darstellung der Ergebnisse von Klassifizierungsversuchen an 1557 Bodenproben in Dreiecksdiagrammen (Feinkorn-Sandanteil und Feinkorn-Schluffanteil)

Auch die Auswertung von Gutachten zu den Deichzustandsanalysen der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) bestätigen die bautechnische Relevanz der gemischtkörnigen Böden. Es sind nur Berichte beachtet worden, die eine klare und eindeutige Zuordnung von Bodengruppen und Deichkilometern zuließen. In der Tab. 1 sind die Ergebnisse der Auswertung für die Betriebe der LTV zusammenfassend dargestellt.

Die Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit Untersuchungen von [Has07] und [PFE+99] hinsichtlich des Vorkommens von Böden in Flussdeichen in Süddeutschland

Tabelle 1: Ergebnis der Auswertung der Gutachten zu den Deichzustandsanalysen für die Betriebe der Landestalsperrenverwaltung Sachsen.

Betrieb	ausgewertete Deichkilometer [km]	Anteil der gemischt- körnigen Böden [%]
Oberes Elbtal	58,3	35,1
Elbaue/Mulde/Untere Weiße Elster	73,2	25,6
Freiberger Mulde/Zschopau	17,1	60,2
Spree/Neiße	99,1	48,3
Zwickauer Mulde/Obere Weiße Elster	57,9	42,7

bzw. an der Oder. Die baupraktische Relevanz von gemischtkörnigen Böden zeigt sich auch bei der Auswertung von Literaturquellen bezüglich des Vorkommens von Bodenarten in Seedeichen, Verkehrsdämmen und in den deutschen Tagebaulandschaften.

Es fehlt bisher ein praxistauglicher Ansatz zur Zustandsbeschreibung von gemischtkörnigen Böden. Dieser kann auch für die Festlegung von Bemessungskennwerten z.B. im Zuge der Beurteilung bestehender Erdbauwerke, genutzt werden. Hierzu sind umfangreiche Untersuchungen zur Verdichtung gemischtkörniger Böden in Abhängigkeit des Feinkornanteils und der Verdichtungsenergie durchgeführt worden.

## 2 Ansätze für Sand-Schluff-Mischungen

Die nachfolgend zusammengestellten Ansätze basieren auf systematische Untersuchungen von Sand-Schluff-Mischungen. Schwerpunkt war oft die Beurteilung der Verflüssigungsgefährdung. Das als Feinkorn verwendete Material wies typischerweise keine plastischen Eigenschaften auf, sodass die Bestimmung der Grenzlagerungsdichten ( $\max e$  und  $\min e$ ) für die Modell-Mischungen mit unterschiedlichem Feinkornanteilen möglich war. Im Folgenden wird der Begriff „nichtplastisches“ Feinkorn für bindige Böden verwendet, die keine plastischen Eigenschaften aufweisen (nicht zu Kneten, Zerfall unter Wasser, keine Trockenfestigkeit, Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze nicht möglich). Der Begriff „plastisches“ Feinkorn wird verwendet, wenn die experimentelle Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze möglich ist und das Feinkorn plastische Eigenschaften aufweist. Theoretisch basieren die Modelle auf Überlegungen zur Packung von binären Mischungen [Lad98]. Im Folgenden werden die Modelle von THEVANAYAGAM (siehe u.a. [The07]) und CHANG et al. (siehe u.a. [CWG16]) kurz vorgestellt. Zur besseren Verständlichkeit erfolgte für die Darstellung dieser Ansätze eine einheitliche Anpassung der Indizes und Symbole, die im Einklang mit den Bezeichnungen des im Abschnitt 3 vorgestellten entwickelten Modells stehen. Diese sind in der Tab. 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Verwendete Symbole und Indizes.

Begriff	Symbol	Erläuterung
Feinkornanteil	$FK$	Massenanteil $a$ bei $d \leq 0,063$ mm bzw. 0,075 mm
Grobkornanteil	$1 - FK$	Massenanteil $a$ bei $d > 0,063$ mm bzw. 0,075 mm
Grenzwert des Feinkornanteils	$FK_{lim}$	Grenze zwischen dem vom Grob- bzw. Feinkorn dominiertem Bereich
Grenzwert zwischen Fall iv-1 und iv-2	$FK_{uFK}$	Grobkorn behindert nicht mehr das Feinkorn, unbewehrtes Feinkorn
Auffüllphase Grobkorn schwimmt im Feinkorn	$\max e_c$	maximale Porenzahl des Grobkorns
	$e_{Pr,c}$	Proctordichte des Grobkorns
	$\min e_c$	minimale Porenzahl des Grobkorns
	$e_{Pr,f}$	Proctordichte des Feinkorns
	$c$	Grobkorn, bzw. Grobkorn dominant
Proctor verdichtet locker global	$f$	Feinkorn, bzw. Feinkorn dominant
	$Pr$	Proctordichte, untere Grenzbedingung
	$l$	lockerste Lagerung, obere Grenzbedingung
	$g$	z.B. Hinweis auf die Gesamtprobe
	$L$	an der Fließgrenze aufbereitetes Feinkorn
	$L^*$	bei $1,25 \cdot w_L$ aufbereitetes Feinkorn

Nach THEVANAYAGAM wird eine Unterteilung von Sand-Schluff-Mischungen in die in der Abb. 2 dargestellten Fälle vorgenommen. Sofern das Feinkorn ( $FK$ ) in den Poren des Grobkorns eingeschlossen ist, wird die Porenzahl des Grobkorns ( $e_c$ ) zur Beschreibung genutzt (Fall i). Das Feinkorn beteiligt sich dabei nicht an der Lastabtragung ( $b = 0$ ) und der Feinkornanteil liegt unterhalb des definierten Grenzwerts für den Feinkornanteil ( $FK < FK_{lim}$ ). Für den Fall des vollständig im Feinkorn schwimmenden Grobkorns (Fall iv-1) erfolgt die Beschreibung mittels der Porenzahl des Feinkorns ( $e_f$ ). Diese beiden Fälle bilden die untere Grenze für die möglichen Porenzahlen der Mischungen. In den Zwischenbereichen ergeben sich äquivalente Porenzahlen des Fein- und des Grobkorns ( $(e_c)_{eq}$ ,  $(e_c)_{eq}$ ). Im Fall ii trägt ein Teil des Feinkorns das gröbere Korngerüst und nimmt passiv an der internen Kraftkette teil ( $b \neq 0$ ). Durch die Bildung von Brücken aus Feinkorn zwischen den groben Körnern zeichnet sich der Fall iii aus. Das Feinkorn trägt aktiv Kräfte mit ab ( $b \neq 0$ ). Von Fall i bis iii nimmt die globale Porenzahl stetig zu.

Im Fall iv-2 wirkt das Grobkorn in der Feinkornmatrix als Bewehrung und kann hinsichtlich des mechanischen Verhaltens nicht vernachlässigt werden (Fall iv-2,  $FK_{lim} < FK < FK_{uFK}$ ). Die entsprechenden Grenzwerte des Feinkornanteils lassen sich mit Hilfe der Gl. 4 und Gl. 5 bestimmen.

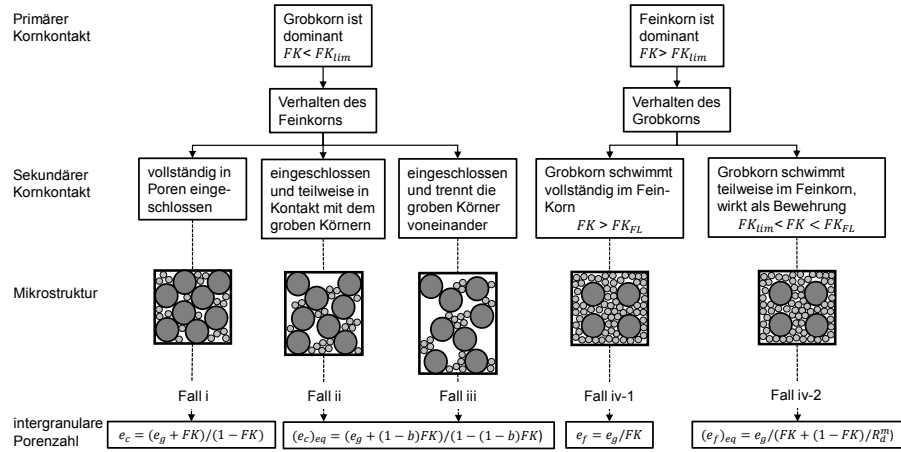


Abbildung 2: Intergranulare Klassifizierung von Sand-Schluff-Mischungen (verändert dargestellt nach [The07])

Unter Beachtung der Fälle ii, iii und iv-2 ergeben sich für die dichteste Lagerung die Zusammenhänge gemäß die Gl. 1 und Gl. 3.

$$\min e_g = \min e_c(1 - (1 - b)FK) - (1 - b)FK \quad FK < FK_{lim} \quad (1)$$

$$\min e_g = \min e_f \left( FK + \frac{1 - FK}{R_d^a} \right) \quad FK_{lim} < FK < FK_{uFK} \quad (2)$$

$$\min e_g = \min e_f FK \quad FK > FK_{uFK} \quad (3)$$

Analog erhält man die Zusammenhänge für die lockerste Lagerung durch das Austauschen von  $\min e$  mit  $\max e$ .

$$FK_{lim} = \frac{e_c}{1 + e_c + \max e_f} = \frac{e_g}{\max e_f} \quad (4)$$

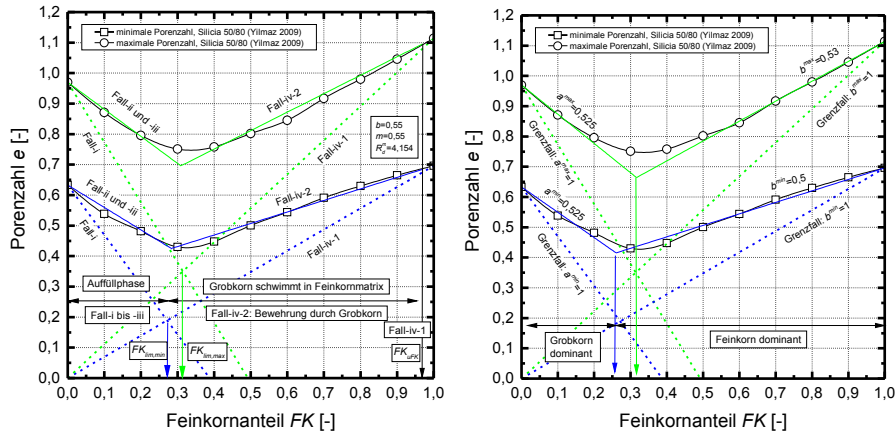
$$FK_{uFK} = \frac{1 - \pi(1 + e_g)}{6s^3} \quad (5)$$

$$s = 1 + \frac{a}{R_d} \quad (6)$$

$$R_{d50} = \frac{D_{50}}{d_{50}} \quad (7)$$

Der Wert  $R_{d50}$  ist das Verhältnis des mittleren Korndurchmesser vom Grob- ( $D_{50}$ ) zum mittleren Korndurchmesser des Feinkorns ( $d_{50}$ ). Für den Faktor  $a$  wird der Wert 10 angenommen.

In der Abb. 3a sind die Ansätze gemeinsam mit Versuchsergebnissen von [Yil09] dargestellt. Der Wert für  $R_d^m$  ergab sich aus den Angaben zu den Korndurchmessern der verwendeten Ausgangsmaterialien. Durch die visuelle Anpassung der Ausgleichsgeraden mit den Versuchspunkten sind der Faktor  $b$  und der Exponent  $m$  festgelegt worden.



(a) Darstellung der Ansätze nach THEVANAYAGAM an Versuchsergebnissen von [Yil09] (b) Darstellung der Ansätze nach CHANG et al. an Versuchsergebnissen von [Yil09]

Abbildung 3: Modelle zur Beschreibung der Grenzporozahlen von Sand-Schluff-Mischungen

Die eingeführte äquivalente relative Lagerungsdichte nach [The07] ergibt sich für den vom Grobkorn  $(D_{rc})_{eq}$  und vom Feinkorn  $(D_{rf})_{eq}$  dominierten Bereich gemäß der Gl. 8 und Gl. 9.

$$(D_{rc})_{eq} = \frac{\max e_c - (e_c)_{eq}}{\max e_c - \min e_c} \quad FK < FK_{lim} \quad (8)$$

$$(D_{rf})_{eq} = \frac{\max e_f - (e_f)_{eq}}{\max e_f - \min e_f} \quad FK > FK_{lim} \quad (9)$$

Ähnliche Ansätze zur Modellierung der maximalen und minimalen Porozahl von Sand-Schluff-Mischungen in Abhängigkeit des Grob-  $(1 - FK)$  bzw. Feinkornanteils  $(FK)$  wurden von [CWG16] vorgeschlagen. Durch die Faktoren  $a$  (Füllungsfaktor) und  $b$  (Einlagerungsfaktor) wird eine Volumenzunahme bzw. eine Störung der Struktur der Mischung infolge der Zugabe von Feinkorn beschrieben. Es wird ebenfalls zwischen den vom Fein- und Grobkorn dominierten Bereich unterschieden. Für die Berechnung der Grenzporozahlen ergeben sich die Beziehungen gemäß Gl. 10 - Gl. 13.

Der Grenzwert zwischen den zwei Bereichen ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Geraden für die lockerste bzw. dichteste Lagerung. Eine Kopplung an eine Beschreibung des Zustands wird nicht vorgenommen. Die Ansätze sind beispielhaft in der Abb. 3b dargestellt.

$$\max e_g = \max e_c (1 - FK) + \max e_f FK - a(1 + \max e_f) FK \quad FK < FK_{lim} \quad (10)$$

$$\min e_g = \min e_c (1 - FK) + \min e_f FK - a(1 + \min e_f) FK \quad FK < FK_{lim} \quad (11)$$

$$\max e_g = \max e_c (1 - FK) + \max e_f FK - b \max e_c (1 - FK) \quad FK > FK_{lim} \quad (12)$$

$$\min e_g = \min e_c (1 - FK) + \min e_f FK - b \min e_c (1 - FK) \quad FK > FK_{lim} \quad (13)$$

### 3 Konzept zur Zustandsbeschreibung gemischtkörniger Böden

#### 3.1 Grundlagen

Die Ergebnisse von Proctorversuchen an bindigen bzw. nichtbindigen Böden lassen sich zusammen mit der Zustandsbeschreibung der Böden (Konsistenz bzw. bezogene Lagerungsdichte) darstellen (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Der Zustand der nichtbindigen Böden ist nur von der Trockendichte abhängig und lässt sich im Trockendichte-Wassergehalts-Diagramm an der Ordinate ablesen. Die Konsistenz der bindigen Böden ist nur vom Wassergehalt abhängig und kann auf der Abszisse dargestellt werden.

Bei geringer Verdichtungsenergie ( $W=135 \text{ kNm/m}^3$ ) erreichen nichtbindige Böden noch eine dichte und im modifizierten Proctorversuch ( $W=2700 \text{ kNm/m}^3$ ) eine sehr dichte bezogene Lagerungsdichte. Bei bindigen Böden entspricht der experimentell ermittelte Proctorwassergehalt bei geringer Verdichtungsenergie ( $W=135 \text{ kNm/m}^3$ ) einer steifen Konsistenz. Im modifizierten Proctorversuch ist dem Proctorwassergehalt eine feste Konsistenz zuzuordnen.

Zur Ableitung eines Verfahrens zur quantitativen Beschreibung des Zustands gemischtkörniger Böden werden hier die Ansätze aus Abschnitt 2 mit den Verdichtungseigenschaften verknüpft. Hierfür sind die nachfolgenden Annahmen getroffen worden. Die Porenzahl bei Proctordichte (Standard Verdichtungsenergie) soll einen Referenzwert zur Zustandsbeschreibung darstellen, da sich dieser Wert experimentell in nahezu jedem bodenmechanischen Labor mit einer hoher Reproduzierbarkeit ermitteln lässt. Dieser Referenzwert soll für eine dichte Lagerung stehen. Der zweite Referenzwert muss der lockeren Lagerung bzw. der breiigen Konsistenz entsprechen. Hierfür wird als Referenzwert die Porenzahl gewählt, die sich ergibt, wenn das Feinkorn der Modellmischungen mit dem 1,25-fachen Wassergehalt der Fließgrenze aufbereitet wird. Die getroffenen Annahmen gelten für gemischtkörnige Böden mit plastischem Feinkorn.

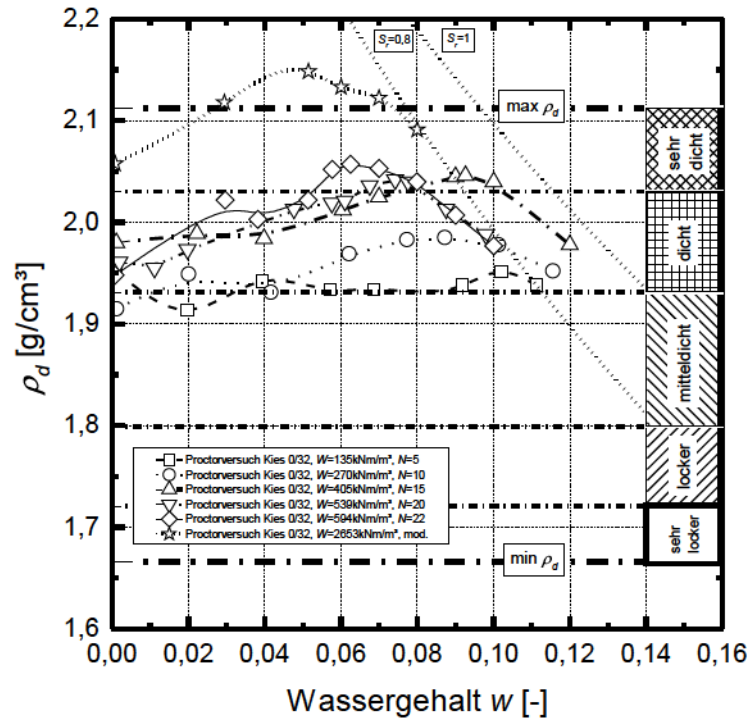


Abbildung 4: Ergebnisse von Proctorversuchen bei unterschiedlicher Verdichtungsenergie an einem Kies 0/32 (Bodengruppe GI)

### 3.2 Experimentelle Arbeiten

Für die systematischen Untersuchungen sind Modellmischungen mit unterschiedlich hohen Feinkornanteilen hergestellt worden. An diesen wurden Proctorversuche mit variierender Verdichtungsenergie durchgeführt. Nichtbindige Ausgangsböden (Grobkorn) waren ein enggestufter Sand 0/2 (Bodengruppe SE) und ein intermittierend gestufter Kies 0/32 (Bodengruppe GI). Die Klassifizierungskennwerte der nichtbindigen Ausgangsböden sind in der Tab. 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Klassifizierungskennwerte der nichtbindigen Versuchsböden.

	Benennung n. KV	FK [%]	Sand [%]	Kies [%]	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	maxe [-]	mine [-]
Kies 0/32	gr*Sa	3,5	54,9	41,6	2,653	0,587	0,252
Sand 0/2	fsa <sup>a</sup> MSa/CSa	0,8	96,7	2,44	2,654	0,870	0,484



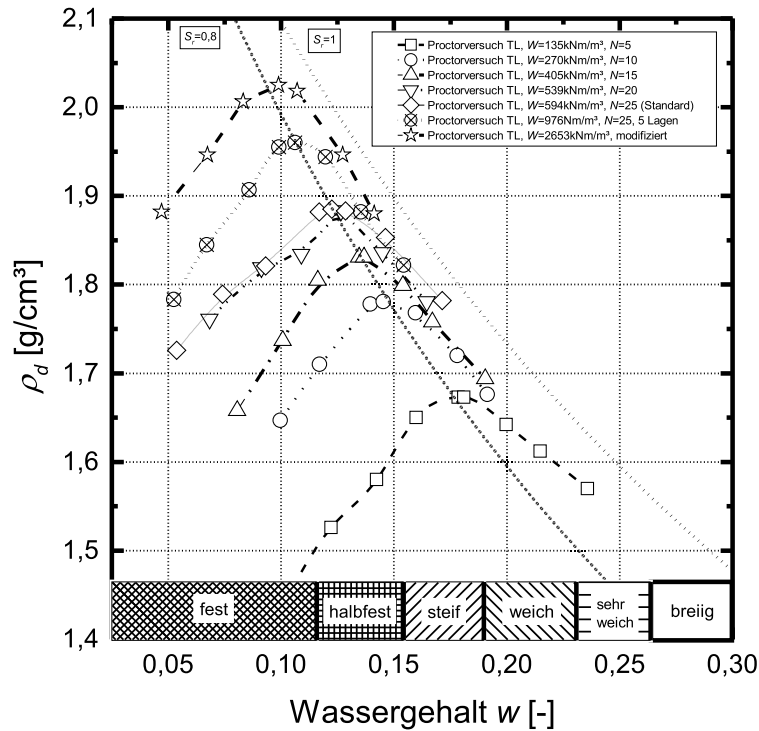


Abbildung 5: Ergebnisse von Proctorversuchen bei unterschiedlicher Verdichtungsenergie an einem Lößlehm (Bodengruppe TL)

Als Feinkorn (bindiger Ausgangsboden) wurde ein Lößlehm (Bodengruppe TL,  $w_L=0,299$ ,  $w_P=0,155$ ,  $I_P=0,144$ ) ohne nennenswerte Feinsandanteile ausgewählt. Den beiden nichtbindigen Böden ist der leichtplastische Ton gezielt mit unterschiedlichen Mengen zugemischt worden.

Typische Ergebnisse sind in der Abb. 6 für Proctorversuche ( $W=600\text{kNm/m}^3$ ) an den zwei Modellmischungen mit unterschiedlichen Feinkornanteilen dargestellt. Mit zunehmendem Feinkornanteil nimmt die Proctordichte zunächst zu. Nach dem Überschreiten des Maximalwertes nimmt die Proctordichte der Mischungen mit zunehmendem Feinkornanteil kontinuierlich ab, bis sie den Wert des bindigen Ausgangsbodens erreicht. Der Proctorwassergehalt nimmt zunächst mit zunehmendem Feinkornanteil ab und dann stetig bis zum Proctorwassergehalt des bindigen Ausgangsbodens zu. Diese festgestellten Zusammenhänge stehen im Einklang mit den Untersuchungen von [Ost79] an verschiedenen gemischt-körnigen Böden mit unterschiedlichen Ausgangsböden. Bei beiden Modellmischungen ist die Abhängigkeit der Proctordichte und des Proctorwassergehalts vom Feinkornanteil ersichtlich. Dies ist auch der Fall,

wenn der Feinkornanteil über 40% liegt und die Mischungen als bindiger Boden klassifiziert werden. Bei den gut abgestuften nichtbindigen Böden steht ein deutlich geringeres Porenvolumen zur Füllung mit Feinkorn zur Verfügung als bei den weitgestuften Materialien. Deshalb wird bei weitgestuften Böden ein geringerer Feinkornanteil für das Erreichen der maximalen Trockendichte benötigt.

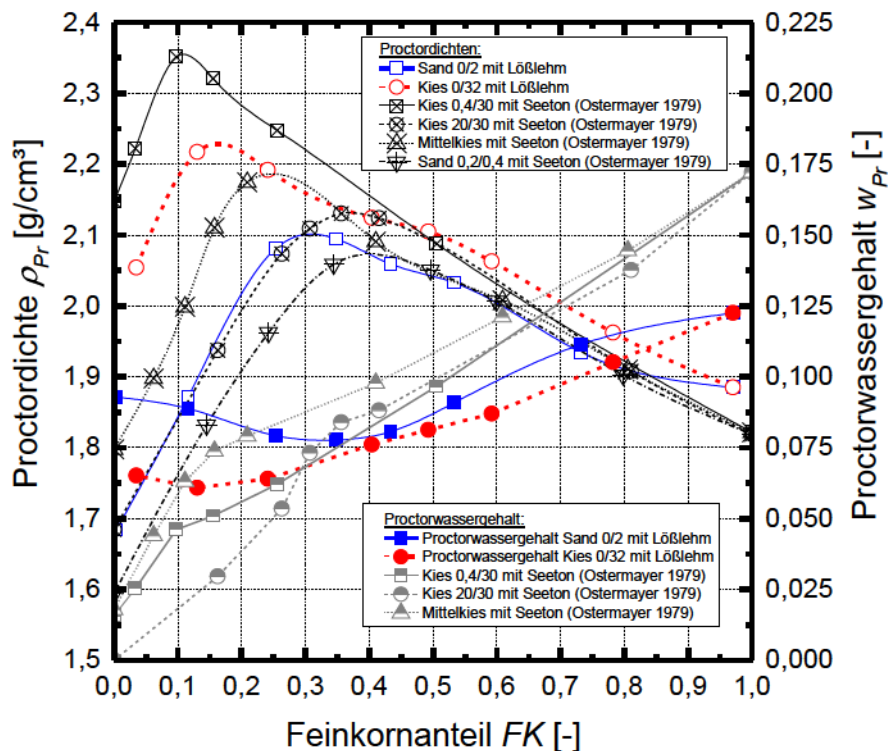


Abbildung 6: Proctordichte und Proctorwassergehalt in Abhängigkeit des Feinkornanteils für die Modellmischungen sowie Ergebnisse von [Ost79]

Für die weitere Auswertung sind die zur Proctordichte zugehörigen Porenzahlen  $e_{Pr}$ , gegen den Feinkornanteil aufgetragen worden (siehe Abb. 7 und Abb. 8). In einer weiteren Versuchsreihe wurde den nichtbindigen Ausgangsböden das bei dem 1,25-fachen Wassergehalt der Fließgrenze aufbereitete Feinkorn zugemischt. Der Boden wurde zur Bestimmung der Dichte luftblasenfrei in einen Zylinder eingestrichen. Die Ergebnisse sind ebenfalls in den Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt.

Man erkennt auch bei den Mischungen mit dem plastischen Feinkorn zunächst eine deutliche Abnahme der globalen Porenzahl mit zunehmendem Feinkornanteil. Nach dem Überschreiten eines Grenzwertes ( $FK_{lim}^{Pr}$ ) nimmt die globale Porenzahl wieder zu, bis sie die Porenzahl der proctorverdichteten feinkörnigen Probe ( $e_{Pr,f}$ ) erreicht.

Die Auswertung der Dichtebestimmung an den aufbereiteten Proben zeigt ebenfalls diese Zusammenhänge. Vergleicht man die Mischungen mit enggestuftem Sand mit den Kiesvarianten, ist festzustellen, dass das Ende der Auffüllphase deutlich früher erreicht wird.

Im nächsten Schritt erfolgte die Modellierung der Porenzahlen für die lockere und die verdichtete Lagerung auf der Grundlage der Phasenzusammensetzung in Abhängigkeit vom Feinkornanteil.

### 3.3 Ansätze zur Modellierung der Porenzahlen

In den Abb. 7 und Abb. 8 sind die dementsprechenden Bezeichnungen und Ansätze zusammen mit den experimentellen Ergebnissen dargestellt.

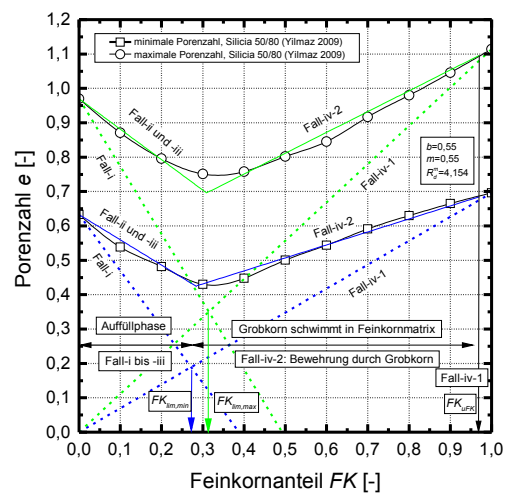


Abbildung 7: Darstellung des Konzepts zur Zustandsbeschreibung für die Modellmischungen Sand 0/2 mit Lößlehm

Die Grenzbedingungen für die globale Porenzahl (Index  $g$ ) für den mit Proctorenergie verdichteten Fall (Index  $Pr$ ) und der lockeren Lagerung (Feinkorn mit  $1,25 w_l$  aufbereitet, Index  $l$ ) ergeben sich für den vom Grobkorn (Index  $c$ ) bzw. vom Feinkorn dominierten Bereich (Index  $f$ ) gemäß der Gl. 14 bis Gl. 17.

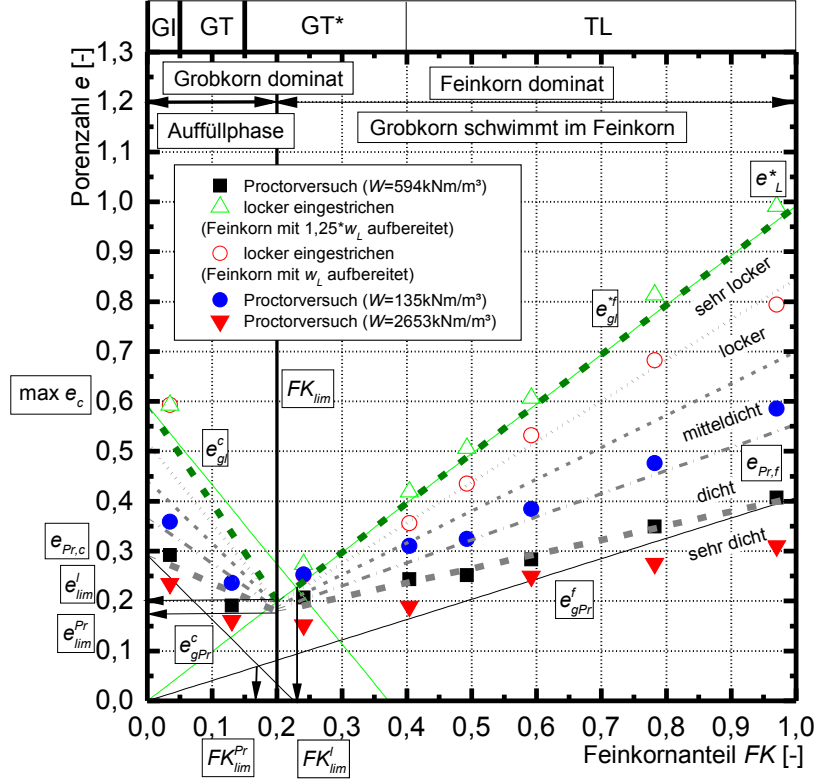


Abbildung 8: Darstellung des Konzepts zur Zustandsbeschreibung für die Modellmischungen Kies 0/32 mit Lößlehm

$$e_{g,l}^c = \max e_c - \left( \max e_c + \frac{\rho_{s,c}}{\rho_{s,f}} \right) FK \quad (14)$$

$$e_{g,Pr}^c = e_{Pr,c} - \left( e_{Pr,c} + \frac{\rho_{s,c}}{\rho_{s,f}} \right) FK \quad (15)$$

$$e_{g,l}^{*f} = e_{f,L}^* FK \quad (16)$$

$$e_{g,Pr}^f = e_{Pr,f} FK \quad (17)$$

Sofern für die Korndichte des Fein- und des Grobkorns gleiche Werte angenommen werden vereinfachen sich diese. Die dazugehörigen Grenzwerte des Feinkornanteils (Schnittpunkt der zugehörigen Geraden), die zur Unterscheidung zwischen der Auffüllphase der Poren des Grobkorns (Grobkorn dominiert) und der Phase des schwimmenden Grobkorns (Feinkorn dominiert) führen, ergeben sich gemäß der Gl. 18 und

Gl. 19. Für die weiteren Ansätze wird der Grenzwert des Feinkornanteils als Mittelwert verwendet (Gl. 20).

$$FK_{lim}^l = \frac{\max e_c}{e_c^* + \max e_c + \frac{\rho_{s,c}}{\rho_{s,f}}} \quad (18)$$

$$FK_{lim}^{Pr} = \frac{\max e_{Pr,c}}{e_{Pr,f} + e_{Pr,c} + \frac{\rho_{s,c}}{\rho_{s,f}}} \quad (19)$$

$$FK_{lim} = \frac{FK_{lim}^l + FK_{lim}^{Pr}}{2} \quad (20)$$

Mit Hilfe der Grenzbedingungen für die lockere Lagerung gemäß Gl. 14 und Gl. 16 werden die Ergebnisse der Dichtebestimmung an den aufbereiteten Bodenproben gut erfasst. Für die Erfassung der mit Proctorenergie verdichteten Böden ist wie bei den zuvor vorgestellten Modellen für Sand-Schluff-Mischungen eine weitere Anpassung erforderlich. Das Grob- und das Feinkorn behindern sich gegenseitig. Hierzu werden die Faktoren  $a$  (Auffüllphase, Grobkorn dominant) und  $b$  (Feinkorn dominant) eingeführt. Diesen Faktoren wird keine physikalische Bedeutung zugewiesen. Die Auswertung von in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen an systematischen Untersuchungen zum Einfluss von plastischen Feinkorn auf die Verdichtung grobkörniger Ausgangsböden (u.a. [Ost79]) lässt im ersten Schritt die Annahme  $a=0,75$  und  $b=0,70$  zu. Die ausgewerteten Versuche umfassen ein breites Spektrum von bindigen Böden mit unterschiedlichen Plastizitätsgrenzen. Der vom Feinkorn dominierte Bereich  $FK \geq FK_{lim}$  wird mittels der Gl. 23 und 24 beschrieben. Für den vom Grobkorn dominierten Bereich ergibt sich die globale Porenzahl gemäß der Gl. 21 und 22. Diese resultieren aus den Porenzahlen des reinen Grobkorns ( $FK=0$ ) im verdichteten Zustand ( $e_{Pr,c}$ ) und der lockersten Lagerung ( $\max e_c$ ) in Verbindung mit der globalen Porenzahl beim Grenzwert des Feinkornanteils ( $FK = FK_{lim}$ ).

$$e_{g,l}^c = \left( \frac{e_{lim}^l - \max e_c}{FK_{lim}} \right) FK + \max e_c \quad FK < FK_{lim} \quad (21)$$

$$e_{g,Pr}^c = \left( \frac{e_{lim}^l - \max e_c}{FK_{lim}} \right) FK + \max e_c \quad FK < FK_{lim} \quad (22)$$

$$e_{g,l}^f = e_L^* FK \quad FK \geq FK_{lim} \quad (23)$$

$$e_{g,Pr}^f = e_{Pr,f} b FK + (1-b) e_{Pr,f} \quad FK \geq FK_{lim} \quad (24)$$

### 3.4 Zustandsbeschreibung gemischtkörniger Böden

Aus den gefundenen Ansätzen lässt sich für die beiden Bereiche eine relative modifizierte Lagerungsdichte definieren. Referenzzustände sind dabei die Porenzahl im

verdichteten Zustand (Proctordichte bei Standardenergie) und die Porenzahl bei der lockeren Lagerung (Feinkorn mit  $1,25 \cdot w_L$  aufbereitet, luftblasenfrei eingestrichen).

Grobkorn dominant  $FK \leq FK_{lim}$ :

$$L_c = \frac{e_{g,l}^c - e_g}{e_{g,l}^c - e_{g,Pr}^c} \quad (25)$$

Feinkorn dominant  $FK > FK_{lim}$ :

$$L_f = \frac{e_{g,l}^f - e_g}{e_{g,l}^f - e_{g,Pr}^f} \quad (26)$$

Für die relative Lagerungsdichte einer verdichteten Probe ergibt sich der Wert  $L_c = 1$  bzw.  $L_f = 1$ . Bodenmechanisch betrachtet ist davon auszugehen, dass dieser Bereich dicht gelagert ist bzw. analog zu den bindigen Böden eine halbfeste Konsistenz aufweist (siehe Abb. 4). Für die Porenzahlen bei modifizierter Verdichtungsenergie ergibt sich  $L_c > 1$  bzw.  $L_f > 1$ . Dieser Bereich wird begrifflich mit sehr dicht beschrieben. Versuche an bindigen und nichtbindigen Böden bei reduzierter Verdichtungsenergie ( $W=135 \text{ kNm/m}^3$ ) haben gezeigt, dass noch eine mitteldichte bis dichte Lagerung bzw. mindestens eine steife Konsistenz für den Proctorwassergehalt erzielt wird. Bei der Zuweisung der mitteldichten relativen Lagerungsdichte zu den Zahlenbereich  $0,50 \leq L_c < 0,75$  bzw.  $0,50 \leq L_f < 0,75$  liegen diese experimentellen Ergebnisse im definierten Wertebereich. Für  $L_c < 0,5$  bzw.  $L_f < 0,5$  ergibt sich eine lockere relative Lagerungsdichte. Diese kann noch in die Bereiche sehr locker ( $L_c < 0,25$  bzw.  $L_f < 0,25$ ) und locker ( $0,25 \leq L_c < 0,50$  bzw.  $0,25 \leq L_f < 0,50$ ) unterteilt werden. Experimentell ergibt sich diese Unterscheidung durch lockeres, luftblasenfreies Einstreichen von aufbereiteten Boden (Feinkorn der Mischung mit einem Wassergehalt an der Fließgrenze) in einen Versuchszylinder. Dies ist erst ab einem gewissen Feinkornanteil möglich. Rechnerisch lässt sich dieser Ansatz auch durch die Beziehung  $e_g^{l,f} = e_L \cdot FK$  darstellen. Die Wertebereiche und die begriffliche Zuordnung der relativen Lagerungsdichte für gemischtkörnige Böden sind in der Tab. 4 zusammengestellt. Es wird vorgeschlagen, die Begriffe sehr locker, locker, mitteldicht, dicht und sehr dicht für den vom Grob- und den vom Feinkorn dominierten Bereich zu verwenden. Sofern Böden einen Feinkornanteil über 40% aufweisen, erfolgt die Klassifizierung als bindiger Boden über das Plastizitätsdiagramm und die Beschreibung ergibt sich über die Konsistenzzahl. Dabei ist die Korrektur des Wassergehalts in Abhängigkeit des Überkornanteils ( $\ddot{u} < 0,25$  bei  $d < 0,4 \text{ mm}$ ) zu beachten. Diese kann zu einer Fehleinschätzung der Konsistenz führen. Bei höheren Überkornanteilen ( $\ddot{u} \geq 0,25$ ) ist die Korrektur des Wassergehalts nicht mehr zulässig. Das vorgestellte Konzept und die Beurteilung gemäß Gl. 26 ist auch für diese Böden gültig.

Tabelle 4: Definierte Bereiche der relativen Lagerungsdichte.

Zustand	$L_c$	$L_f$
sehr locker	$L_c < 0,25$	$L_f < 0,25$
locker	$0,25 \leq L_c < 0,50$	$0,25 \leq L_f < 0,50$
mitteldicht	$0,50 \leq L_c < 0,75$	$0,50 \leq L_f < 0,75$
dicht	$0,75 \leq L_c < 1,00$	$0,75 \leq L_f < 1,00$
sehr dicht	$L_c \geq 1,00$	$L_f \geq 1,00$

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Für gemischtkörnige Böden mit plastischem Feinkorn ist ein Konzept zur Zustandsbeschreibung mittels einer modifizierten relativen Lagerungsdichte vorgestellt worden. Aus der Phasenzusammensetzung lässt sich der Grenzwert für den Feinkornanteil zur Unterscheidung dieser beiden Bereiche ermitteln. Der Proctorversuch dient als zuverlässiger Referenzwert für die dichte Lagerung. Für die lockerste Lagerung des nichtbindigen Ausgangsbodens wird auf  $\max e$  zurückgegriffen. Dem bindigen Ausgangsboden wird die Porenzahl  $e_L^*$  bei einem Wassergehalt vom 1,25-fachen der Fließgrenze zugewiesen. Verfahren zur reproduzierbaren Herstellung eines „lockeren“ bzw. „flüssigen“ Zustands der gemischtkörnigen Böden werden zurzeit getestet. Dazu wird das Ausbreitverhalten auf einem Ausbreittisch - in Anlehnung an das Ausbreitmaß zur Bestimmung der Konsistenz von Frischbeton - untersucht.

Mit Hilfe des vorgestellten Modells wird ein Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der Proctordichte gemischtkörniger Böden entwickelt. Dieses basiert auf der Trennung der gemischtkörnigen Böden in einen bindigen und einen nichtbindigen Anteil bei einem Korndurchmesser  $d = 0,063$  mm. Zunächst wird für den Feinkorn- und den Grobkornanteil die Proctordichte getrennt voneinander geschätzt. In Abhängigkeit des Feinkornanteils erfolgt die näherungsweise Angabe der Proctordichte des gemischtkörnigen Bodens mittels der vorgestellten Zusammenhänge. Es wird an Ansätzen gearbeitet, die eine näherungsweise Angabe von bodenmechanischen Kennwerten in Abhängigkeit des Feinkornanteils und des Zustands (relative Lagerungsdichte) von gemischtkörnigen Böden ermöglichen.

## 5 Danksagung

Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Herle für die vielen zielführenden Diskussionen und Hinweise.

## Literatur

- [CWG16] CHANG, C. S. ; WANG, J. Y. ; GE, L.: Maximum and Minimum Void Ratios for Sand-Silt Mixtures. In: *Engineering Geology* 211 (2016), S. 7–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.022>. – DOI 10.1016/j.enggeo.2016.06.022. – ISSN 0013–7952
- [Has07] HASELSTEINER, Ronald: *Wasserbau und Wasserwirtschaft*. Bd. 111: *Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung: Diss., Technische Universität München*. München : Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, 2007
- [Lad98] LADE P.V., LIGGIO C. D. JR., YAMAMURO, J.A.: Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand. In: *Geotechnical Testing Journal* 21 (1998), Nr. 4, S. 336–347
- [Ost79] OSTERMAYER, H.: Die Scherfestigkeit verdichteter Kies-Sand-Ton-Gemische. In: *Festschrift zum 65. Geburtstag von o. Prof. Dr.-Ing. Richard Jelinek*. München, 1979, S. 286–304
- [PFE<sup>+</sup>99] POHL, R. ; FRANKE, D. ; ENGEL, J. ; NIESCHE, H. ; KRÜGER, F.: Ursachen von Deichschäden. In: *Wasserwirtschaft Wassertechnik* (1999), Nr. 1, S. 49–54
- [The07] THEVANAYAGAM, S.: Intergrain Contact Density Indices for Granular Mixes- I: Framework. In: *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 6 (2007), Nr. 2, S. 123–134. <http://dx.doi.org/10.1007/s11803-007-0705-7>. – DOI 10.1007/s11803-007-0705-7. – ISSN 1671–3664
- [Yil09] YILMAZ, Y.: A study on the limit void ratio characteristics of medium to fine mixed graded sands. In: *Engineering Geology* 104 (2009), Nr. 3-4, S. 290–294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.11.009>. – DOI 10.1016/j.enggeo.2008.11.009. – ISSN 0013–7952