

# Zustandsindex für gemischtkörnige Böden

C. Lauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrbereich Geotechnik, HTW Dresden, Dresden, <carsten.lauer@htw-dresden.de>

---

## KURZFASSUNG

---

In der Baupraxis werden gemischtkörnige Böden oft als Baustoff für Erdbauwerke oder als Baugrund angetroffen. Die Klassifizierung dieser Böden erfolgt gemäß DIN 18196 nach der Korngrößenverteilung. Es fehlt ein Verfahren zur zahlenmäßigen Beschreibung des Zustands auf der Grundlage von definierten experimentellen Grenzwerten. Für Sand-Schluff-Gemische wurden Verfahren zur Modellierung der Grenzporozahlen entwickelt. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Beschreibung des Zustands gemischtkörniger Böden mit plastischem Feinkorn mit dem Bodenzustandsindex vorgestellt. Diese beruhen u. a. auf experimentellen Untersuchungen zur Verdichtbarkeit von zwei Modellmischungen mit unterschiedlichem Feinkorngehalt.

*Schlagerworte: Bodenzustandsindex, gemischtkörnige Böden, Proctordichte, Beschreibung*

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Inventar und Zustand

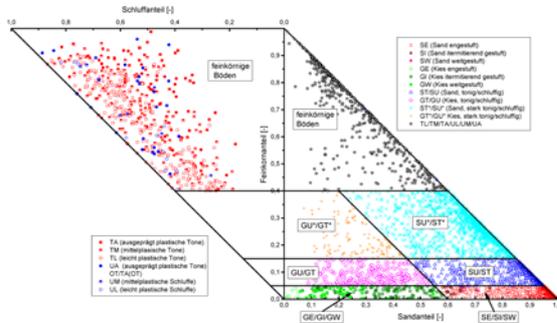
Die DIN 18196 teilt Bodenarten mit annähernd gleichen stofflichen Aufbau und ähnlichen Eigenschaften in 29 Bodengruppen ein. Der stoffliche Zustand der Böden (Beschreibung) wird dabei nicht beachtet. Es wird eine Unterteilung in bindige, nichtbindige und gemischtkörnige Böden hinsichtlich des Feinkornanteils ( $FK$  bei  $d < 0,063\text{mm}$ ) vorgenommen. Die bindigen Böden werden nach ihren plastischen Eigenschaften (Plastizitätsdiagramm) und die nichtbindigen Böden ( $FK < 5\%$ ) mittels ihrer Körnungslinie klassifiziert. Bei gemischtkörnigen Böden erfolgt die Klassifizierung durch die Kombination der Informationen aus der Kornverteilungskurve mit denen der 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. In diesem Beitrag wird ein möglicher Lösungsansatz vorgestellt.

### 1.2 Bautechnische Bedeutung gemischtkörniger Böden

Gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil  $FK$  ( $d < 0,063\text{mm}$ ) zwischen 5 bis 40% stehen in der Baupraxis als Baugrund in situ an oder werden als Baustoffe im Erd- und Dammbau eingesetzt. Einen ersten Hinweis auf deren Relevanz ist die Auswertung eigener Klassifizierungsversuche im Geotechnik Labor der HTW Dresden für den Zeitraum zwischen 2014-2018. Von den 4101 untersuchten Proben mit einem Größtkorn kleiner 63mm waren 12,8% feinkörnige Böden, 34,3% grobkörnige Böden und 51,2% gemischtkörnige Böden. Die zwei Dreiecksdiagramme der **Abbildung 1** zeigen die Ergebnisse der Klassifizierungsversuche. Das rechte Diagramm stellt die Ergebnisse der Kornverteilung in Abhängigkeit vom Feinkorn- und vom Sandkornanteil dar. Zusätzlich sind die Bereiche der Bodengruppen nach DIN 18196 markiert. Im linken Dreiecksdiagramm

sind für feinkörnige Böden, deren Plastizitätsgrenzen und Kornverteilung bekannt waren, der Feinkorn- und der Schluffkornanteil sowie die dazugehörige Bodenart dargestellt.

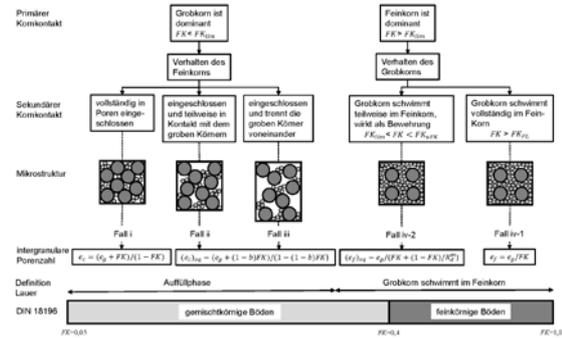


**Abbildung 1** Klassifizierte Bodenproben des Geotechnik Labors der HTW-Dresden in Dreiecksdiagrammen

Die Auswertung von Gutachten zu den Deichzustandsanalysen der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) bestätigen die bautechnische Relevanz der gemischt-körnigen Böden. Dies steht in Übereinstimmung mit Untersuchungen von (Haselsteiner 2007) und (Pohl et al. 1999) hinsichtlich des Vorkommens von gemischt-körnigen Böden in Flussdeichen in Süddeutschland bzw. an der Oder. Die baupraktische Relevanz von gemischt-körnigen Böden zeigt sich auch bei der Auswertung von Literaturquellen bezüglich des Vorkommens von Bodenarten in Seedeichen, Verkehrsdämmen und in den deutschen Tagebaufolgelandschaften.

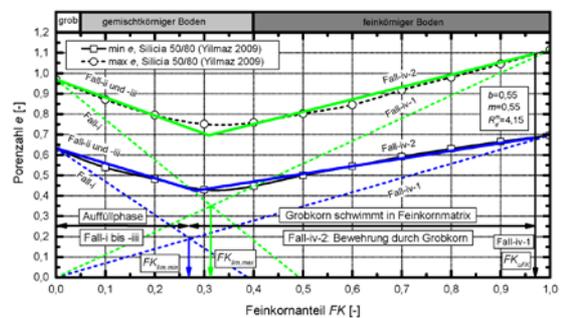
## 2 ANSÄTZE FÜR SAND-SCHLUFF-MISCHUNGEN

Die Ansätze für die Herleitung des Bodenzustandsindex beruhen teilweise auf Modellen, die sich aus systematischen Untersuchungen von Sand-Schluff-Mischungen ergaben. Schwerpunkt war oft die Beurteilung der Verflüssigungsfähigkeit. 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. Theoretisch basieren die Modelle auf Überlegungen zur Packung von binären Mischungen (Lade et al. 1998). Wesentlicher Bestandteil der Modelle von (Thevanayagam 2007) und



**Abbildung 2** Intergranuläre Klassifizierung von Sand-Schluff-Mischungen (verändert dargestellt nach (Thevanayagam 2007))

(Chang et al. 2016) ist die Festlegung eines Grenzfine Kornanteils. Über diesen wird zwischen den vom Grobkorn dominierten Bereich (Auffüllphase) und den vom Feinkorn dominierten Bereich unterschieden. Grundlegende Annahmen sind in **Abbildung 2** dargestellt. Der Verlauf der Porenzahlen für die dichteste und lockerste Lagerung in Abhängigkeit des Feinkornanteils lässt sich mathematisch beschreiben. Beispielhaft ist dies in **Abbildung 3** gezeigt.



**Abbildung 3** Modell zur Beschreibung der Grenz-porenzahlen nach (Thevanayagam 2007)

## 3 KONZEPT ZUR ZUSTANDSBESCHREIBUNG GEMISCHT-KÖRNI-GER BÖDEN

### 3.1 Grundlagen

Voraussetzung für das entwickelte Modell zur Beschreibung des Zustands gemischt-körniger Böden mit plastischem Feinkorn, ist die Modellierung der Porenzahlen für eine lockerste und eine dichte Lagerung in Abhängigkeit des Feinkornanteils. Für die dichte Lagerung wird die zur Proctordichte zugehörige Porenzahl als Referenzwert verwendet. Die obere Begrenzung

entspricht der lockersten Lagerung. Dieser werden näherungsweise die Porenzahlen bei einer Verdichtungsenergie  $W=2 \text{ kNm/m}^3$  zugeordnet. Für die Grenzfälle  $FK=0,0$  und  $FK=1,0$  sind dies ungefähr die Porenzahlen  $\max e_c^* = 1,25 \max e_c$  und  $e_L^* = 1,25 e_L$ , wobei  $e_L$  die Porenzahl an der Fließgrenze bezeichnet. Mit Hilfe des Grenzfeinkornanteils wird zwischen den vom Grob- und Feinkorn dominierten Bereich unterschieden (siehe Gl. 1 und Gl. 2). Dieser ergibt sich als Mittelwert aus den Grenzfeinkornanteilen für die lockerste und dichte Lagerung (siehe Gl. 3).

$$FK_{lim}^l = \frac{\max e_c}{e_L^* + \max e_c + \frac{\rho_{S,c}}{\rho_{S,f}}} \quad (1)$$

$$FK_{lim}^{Pr} = \frac{\max e_c}{e_{Pr,f} + e_{Pr,c} + \frac{\rho_{S,c}}{\rho_{S,f}}} \quad (2)$$

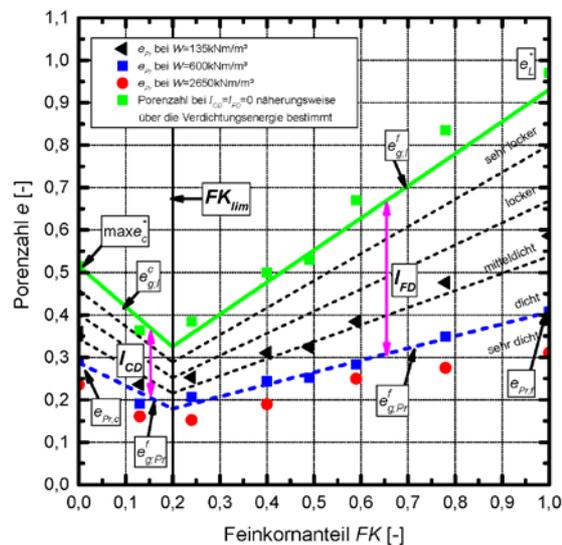
$$FK_{lim} = \frac{FK_{lim}^l + FK_{lim}^{Pr}}{2} \quad (3)$$

Der Verlauf der oberen und unteren Grenze der Porenzahl in Abhängigkeit vom Feinkornanteil lässt sich mathematisch beschreiben und in Porenzahl-Feinkorn-Diagrammen (siehe **Abbildung 4**) darstellen.

### 3.2 Bodenzustandsindex

Aus den gefundenen Ansätzen wurde ein Bodenzustandsindex gemischtkörniger Böden abgeleitet. Referenzzustände sind die globale Porenzahl im verdichteten Zustand und die globale Porenzahl bei lockerster Lagerung. Diese obere und untere Begrenzung lässt sich in Abhängigkeit vom Feinkornanteil mathematisch beschreiben. Die Porenzahl  $e_{g,Pr}^c$  bzw.  $e_{g,Pr}^f$  ergibt sich aus dem Ergebnis eines Proctorversuchs am gemischtkörnigen Boden. Die Porenzahl  $e_{g,l}^c$  bzw.  $e_{g,l}^f$  lässt sich in Abhängigkeit des Feinkornanteils durch einsetzen in die entsprechenden Gleichungen berechnen.

Bezugsgröße für die Ermittlung des Bodenzustandsindex ist die globale Porenzahl  $e_g$  des gemischtkörnigen Bodens (siehe Gl. 4 und Gl. 5). Damit steht ein Zustandsparameter zur Verfügung, der sowohl für Böden im Erdbau zur Beurteilung der Verdichtung als auch für die Beschreibung von Boden als Baugrund gilt. Die Zusammenhänge sind in **Abbildung 4** dargestellt.



**Abbildung 4** Konzept des Bodenzustandsindex am Beispiel von Kies/Ton-Mischungen

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

$$I_{CD} = \frac{e_{g,l}^c - e_g}{e_{g,l}^c - e_{g,Pr}^c} \quad (4)$$

Feinkorn dominant ( $FK > FK_{lim}$ ):

$$I_{FD} = \frac{e_{g,l}^f - e_g}{e_{g,l}^f - e_{g,Pr}^f} \quad (5)$$

Für den Bodenzustandsindex einer mit Standardenergie verdichteten Probe ist  $I_{CD}=1$  bzw.  $I_{FD}=1$ . Bodenmechanisch betrachtet ist davon auszugehen, dass dieser Bereich dicht gelagert ist bzw. analog zu den feinkörnigen Böden eine halbfeste Konsistenz aufweist. Die einfache Durchführung und die weite Verbreitung im Erdbau führte zur Auswahl des Proctorversuchs als Referenzwert. Erfolgt die Verdichtung mit erhöhter Energie, z. B. mit der modifizierten Verdichtungsenergie, erhält man kleinere Porenzahlen. Für den Bodenzustandsindex ergeben sich Werte  $I_{CD} > 1$  bzw.  $I_{FD} > 1$ . Dieser Bereich wird begrifflich mit sehr dicht beschrieben. Versuche an fein- und grobkörnigen Böden mit reduzierter Verdichtungsenergie zeigen, dass noch eine mitteldichte bis dichte Lagerung bzw. mindestens steife Konsistenz bei dem zugehörigen optimalen Wassergehalt vorliegt. Vorläufig wird dem Zahlenbereich  $0,50 \leq I_{CD} < 0,75$  bzw.  $0,50 \leq I_{FD} < 0,75$  begrifflich der mitteldichte Bodenzustandsindex zugeordnet. Ein lockerer Bodenzustandsindex liegt vor, wenn

gilt  $I_{CD} < 0,5$  bzw.  $I_{FD} < 0,5$ . Dieser Bereich unterteilt sich in den sehr lockeren Bodenzustandsindex ( $I_{CD} < 0,25$  bzw.  $I_{FD} < 0,25$ ) und den lockeren Bodenzustandsindex ( $0,25 \leq I_{CD} < 0,50$  bzw.  $0,25 \leq I_{FD} < 0,50$ ). Als sehr lockerer Bodenzustandsindex wurde der Bereich festgelegt, der sich unter der Annahme eines mit dem 1,25-fachen Wassergehalt der Fließgrenze aufbereiteten feinkörnigen Materials ergibt. Die dazugehörigen Porenzahlen lassen sich durch luftblasenfreies Einstreichen experimentell ermitteln, über die Verdichtungsenergie bei  $W=2\text{kNm/m}^3$  festlegen oder mit der Annahme  $S_R=1$  berechnen. Eine experimentelle Bestimmung ist erst ab einem gewissen Feinkornanteil möglich. Abgegrenzt wird der sehr lockere Bodenzustandsindex durch den lockeren Bodenzustandsindex. Dies gilt für das Vermischen des trockenen grobkörnigen Bodens mit dem an der Fließgrenze aufbereiteten Feinkorn. Rechnerisch lassen sich die globalen Porenzahlen für diese Lagerung unter der Annahme einer vollständigen Sättigung mittels der Beziehung  $e_g^f = e_L FK$  ermitteln.

Die hier definierten Wertebereiche und die begriffliche Zuordnung des Bodenzustandsindex für gemischtkörnige Böden sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

**Tabelle 1** Definierte Bereiche des Bodenzustandsindex.

Zustand	$I_{CD}$ [-]	$I_{FD}$ [-]
sehr locker	$I_{CD} < 0,25$	$I_{FD} < 0,25$
locker	$0,25 \leq I_{CD} < 0,50$	$0,25 \leq I_{FD} < 0,50$
mitteldicht	$0,50 \leq I_{CD} < 0,75$	$0,50 \leq I_{FD} < 0,75$
dicht	$0,75 \leq I_{CD} < 1,00$	$0,75 \leq I_{FD} < 1,00$
sehr dicht	$I_{CD} \geq 1,00$	$I_{FD} \geq 1,00$

Sie basieren auf den bestehenden Definitionen für die Bereiche der bezogenen Lagerungsdichte für die grobkörnigen Böden und der Konsistenz bei den feinkörnigen Böden. Empfohlen wird die Verwendung der Begriffe sehr locker, locker, mitteldicht, dicht und sehr dicht für den vom Grob- und den vom Feinkorn dominierten Bereich. Es handelt sich um ein Vorschlag, der durch die praktische Anwendung zu prüfen ist.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Für gemischtkörnige Böden wird ein neuer Ansatz zur Beschreibung des Zustands vorgestellt. Dies erfolgt mit dem neu eingeführten Bodenzustandsindex. Dieser basiert auf der Festlegung einer dichten und einer lockersten Lagerung als untere und obere Begrenzung. Der dichten Lagerung ist die zur Proctordichte zugehörige Porenzahl zugeordnet. Für die lockerste Lagerung wird die Porenzahl vorgeschlagen, die sich bei einer Verdichtungsenergie bei  $W=2\text{kNm/m}^3$  ergibt. Der Bodenzustandsindex gilt sowohl für Boden als Baustoff als auch für Boden als Baugrund. Neben der Beschreibung des Zustands liefert der Bodenzustandsindex ebenfalls Informationen zur Verdichtung der Böden. Der Bodenzustandsindex ist auch für grob- und feinkörnige Böden gültig.

Das vorgeschlagene Konzept muss durch die praktische Anwendung erprobt werden.

#### LITERATUR

- Chang, C.; Wang, J.; Ge, L. (2016) Maximum and minimum void ratios for sand-silt mixtures. In: *Engineering Geology* 211: 7–18.
- Haselsteiner, R. (2007) *Hochwasserschutz-deiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung*. Dissertation Technische Universität München.
- Lade, P.; Liggió, C., JR.; Yamamuro, J. (1998) Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand. In: *Geotechnical Testing Journal* 21(4): 336–347.
- Pohl, R.; Franke, D.; Engel, J.; Niesche, H.; Krüger, F. (1999) Ursachen von Deichschäden. In: *Wasserwirtschaft Wassertechnik* (1): 49–54.
- Thevanayagam, S. (2007) Intergrain Contact Density Indices for Granular Mixes- I: Framework. In: *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 6(2): 123–134.