

**Bodenzustandsindex und zustandsabhängige
Kennwerte für gemischtkörnige Böden**

Soil state index and state dependent soil parameters for
coarse-fine mixtures

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

Vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Carsten Lauer

geboren am 3. September 1975 in Uelzen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Engel

Prof. Dr.-Ing. M.Sc. Wolfgang Wehr

Tag der Einreichung: 24.06.2020

Tag der Verteidigung: 18.12.2020

Zusammenfassung

Für die gemischtkörnigen Böden existieren momentan keine eigenen Klassifikationskennwerte zur Beschreibung des Zustands. Die Verfahren zur Zustandsbeschreibung fein- bzw. grobkörniger Böden sind dafür nicht uneingeschränkt nutzbar. Diese Arbeit stellt als Lösung ein Konzept für eine allgemeingültige Zustandsbeschreibung von Böden auf Basis des eingeführten Bodenzustandsindex vor. Grundlage dafür ist die Aufteilung der Korngrößen des gemischtkörnigen Bodens in Grob- und Feinkorn bei dem Korndurchmesser $d = 0,063 \text{ mm}$. Entsprechend der Anteile wird zwischen in vom Grob- oder vom Feinkorn dominierte Bereiche unterschieden. Die Abgrenzung erfolgt über einen neuen Kennwert, den Grenzfeinkornanteil, FK_{lim} . Der eingeführte Bodenzustandsindex (I_{CD} , I_{FD}) ermöglicht die zahlenmäßige Angabe des Zustands sowie die sprachliche Zuordnung zu definierten Bereichen.

$$\begin{aligned} \text{Grobkorn dominant } FK \leq FK_{lim} : \quad & I_{CD} = \frac{e_{g,l}^c - e_g}{e_{g,l}^c - e_{g,Pr}^c} \\ \text{Feinkorn dominant } FK > FK_{lim} : \quad & I_{FD} = \frac{e_{g,l}^f - e_g}{e_{g,l}^f - e_{g,Pr}^f} \end{aligned}$$

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	$I_{CD} \geq 1,00$	$I_{FD} \geq 1,00$

Grundlage bei der Herleitung waren Modelle und Klassifizierungssysteme, die eine Beschreibung der dichtesten und lockersten Lagerung von binären Mischungen ohne plastische Eigenschaften in Abhängigkeit des Feinkornanteils ermöglichen. Die Übertragung dieser Überlegungen auf gemischtkörnige Böden mit plastischen Eigenschaften erfolgte durch zwei wesentliche Annahmen.

1. Die Proctordichte ist der Referenzzustand für die dichte Lagerung, die eine untere Begrenzung im e - FK -Diagramm darstellt.
2. Die obere Begrenzung wird im e - FK -Diagramm durch die lockerste Lagerung des Grobkorns und nach dem Überschreiten des Grenzfeinkornanteils durch die Porenzahl bei dem 1,25-fachen Wassergehalt an der Fließgrenze e_l^* als Funktion des Feinkornanteils definiert.

Aufgrund der in dieser Arbeit getroffenen Annahmen und der Einteilung in einen vom Grob- und einen vom Feinkorn dominierten Bereich, wurde ein Verfahren zur näherungsweisen Angabe von bodenmechanischen Kennwerten gemischtkörniger Böden entwickelt. Die abgeleiteten Korrelationen ermöglichen sowohl die Abschätzung der Kennwerte in Abhängigkeit vom Feinkornanteil als auch in Abhängigkeit vom Zustand. Die Qualität der entwickelten Näherungen wird durch die Überprüfung mit eigenen Daten und publizierten Ergebnissen aufgezeigt.

Im Zuge der Kontrolle der vorgestellten Ansätze zur näherungsweisen Abschätzung der mechanischen und hydraulischen Kennwerte von gemischtkörnigen Böden erwiesen sich diese weitestgehend als zutreffend. Die Referenzwasserdurchlässigkeit und der Referenzsteifemodul lassen sich in Abhängigkeit vom Feinkornanteil und vom Bodenzustandsindex vorhersagen. Beide Kennwerte nehmen zunächst mit zunehmenden Feinkornanteil stark ab. Nach Überschreiten des Grenzfeinkornanteils wird der Kennwert des feinkörnigen Anteils erreicht. Diese Aussagen gelten sowohl für den Bodenzustandsindex $I_{CD} = 0$ bzw. $I_{FD} = 0$ als auch für $I_{CD} = 1$ bzw. $I_{FD} = 1$.

Der qualitative Verlauf der Referenzscherfestigkeit im τ_{ref} - FK -Diagramm ließ sich mit den entwickelten Ansätzen abbilden. Für die quantitative Erfassung ist durch weitere experimentelle Arbeiten eine Optimierung der Ansätze zu prüfen und vorzunehmen. Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass im verdichteten Zustand die Bewegungen des Grobkorns in der Auffüllphase ($FK \leq FK_{lim}$) durch das Feinkorn behindert werden. Im Bereich des in der Feinkornmatrix schwimmenden Grobkorns ($FK > FK_{lim}$) wirkt dieses als Verdübelung. Ersteres führt oft bis zum Erreichen des Grenzfeinkornanteils zu einer Zunahme der Scherfestigkeit. Dem folgt im Feinkorn dominierten Bereich ein kontinuierlicher Abfall der Scherfestigkeit bis zum Erreichen des Wertes des feinkörnigen Ausgangsbodens. Für den Bodenzustandsindex der sehr lockeren Lagerung gilt in dieser Arbeit die Annahme, dass sowohl das Feinkorn im vom Grobkorn dominierten Bereich als auch das Grobkorn im vom Feinkorn dominierten Bereich keinen Einfluss auf die Scherfestigkeit hat.

Durch die Erprobung des vorgeschlagenen Vorgehens an praxisnahen Beispielen konnte dessen Gültigkeit nachgewiesen werden. Für die Proctorkennwerte ergeben die Näherungen, im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen, eine sehr gute Übereinstimmung. Dies gilt sowohl für den vom Grob- als auch vom Feinkorn dominierten Bereich. Die Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass Unsicherheiten bei der Bestimmung der lockersten Lagerung bestehen. Offensichtlich wird dies bei nicht plausiblen Verläufen der oberen und unteren Begrenzung der Porenzahl im e - FK -Diagramm.

Die bodenmechanischen Kennwerte und der Verlauf in Abhängigkeit des Feinkornanteils lassen sich meist qualitativ und quantitativ zuverlässig wiedergeben. Die Zuverlässigkeit der abgeschätzten Kennwerte lässt sich erhöhen, wenn im Zuge der ingenieurmäßigen Beurteilung plausible Ergebnisse der Näherungen für das Fein- und Grobkorn verwendet werden.

Die neuen Ansätze eignen sich besonders für die Rezeptur gemischtkörniger Böden, die bestimmte Zielwerte hinsichtlich ihrer geplanten Funktion nach dem Einbau erreichen sollen. Zielführend ist hier die Bestimmung des bodenmechanischen Verhaltens der Ausgangsböden bei $I_{CD} = 0$ bzw. $I_{FD} = 0$ und $I_{CD} = 1$ bzw. $I_{FD} = 1$. Als Ergebnis lassen sich die Verläufe der Porenzahl und der bodenmechanischen Kennwerte in Abhängigkeit des Feinkornanteils angeben. Aus diesen lässt sich der optimale Feinkornanteil hinsichtlich der gestellten Anforderungen ableiten.

Summary

For the mixed-grained soils there are currently no separate classification parameters for the soil description. The concept of the relative density for coarse-grained soils and the concept of the consistency index for fine-grained soils cannot be applied to mixed-grained soils. This work presents a concept for a generally valid description of soils based on the introduced soil state index I_{CD} respectively I_{FC} . The basis for this is the separation of the mixed-grained soil in coarse and fine grain at the grain diameter of $d = 0.063$ mm. With regard to compaction and soil mechanical behaviour, there is a classification into coarse-dominant and fines-dominant mixtures. The differentiation is made by the threshold fines fraction FK_{lim} . The introduced soil state index allows the quantitative specification of the state as well as the qualitative classification to defined ranges. These are in accordance with the classification of the relative density and the consistency index.

$$\begin{aligned} \text{coarse dominant } (FK \leq FK_{lim}) : \quad & I_{CD} = \frac{e_{g,l}^c - e_g}{e_{g,l}^c - e_{g,Pr}^c} \\ \text{fines dominant } (FK > FK_{lim}) : \quad & I_{FD} = \frac{e_{g,l}^f - e_g}{e_{g,l}^f - e_{g,Pr}^f} \end{aligned}$$

Qualitative description of soil with the soil state index

Soil state	I_{CD}	I_{FD}
Very loose	$I_{CD} < 0.25$	$I_{FD} < 0.25$
Loose	$0.25 \leq I_{CD} < 0.50$	$0.25 \leq I_{FD} < 0.50$
Medium-dense	$0.50 \leq I_{CD} < 0.75$	$0.50 \leq I_{FD} < 0.75$
Dense	$0.75 \leq I_{CD} < 1.00$	$0.75 \leq I_{FD} < 1.00$
Very dense	$I_{CD} \geq 1.00$	$I_{FD} \geq 1.00$

The basis for the derivation were models and classification systems which allow a description of the densest and loosest density of binary mixtures without plastic properties as a function of the fines. The transfer of these considerations to mixed-grained soils with plastic properties was based on two fundamental theses.

- The Proctor density is the reference state for the dense density, which represents a lower limit in the e - FK -diagram.
- The upper limit is defined by the loosest density of the coarse grain and, after exceeding the threshold fines fraction, by the void ratio at 1.25 times of the liquid limit (e_l^*).

On the basis of the hypotheses made in this work and the division into a coarse-dominant and a fines-dominant area, a method for the approximate specification of soil mechanical parameters of mixed-grained soils was developed. The derived correlations make it possible to estimate the characteristic values both as a function of the fines content and as a function of its state. The quality of the developed approaches is shown by the verification with own results and published data.

The validation of the presented approaches for estimating the mechanical and hydraulic parameters of mixed-grained soils shows that they are largely applicable. The reference water permeability and the reference stiffness modulus can be predicted as a function of the fine-grain content and the soil state index. Both parameters initially decrease strongly with increasing fines content. After exceeding the threshold fines fraction, the characteristic value of the parent fine-grain fraction is reached. These statements are valid for $I_{CD} = 0$ or $I_{FD} = 0$ as well as for $I_{CD} = 1$ or $I_{FD} = 1$ respectively.

The qualitative trend of the reference shear strength in the $\tau_{ref}-FK$ -diagram could be reproduced with the developed approaches. For the quantitative determination an optimization of the approaches is to be checked by further experimental work. The results of this work indicate that in the compacted state, the movements of the coarse grain in the filling phase ($FK \leq FK_{lim}$) are restricted by the fine grain. In the fine-dominant area ($FK > FK_{lim}$) the coarse grains act like reinforcement. The former often leads to an increase in shear strength until the threshold fines fraction is reached. This is followed by a continuous decrease of the shear strength until the value of the fine-grained parent soil is obtained. In this work it is assumed that both the fine grain in the coarse-dominant area and the coarse grain in the fine-dominant area have no influence on the shear strength for the very loose soil state index.

By testing the proposed procedure on practical examples its validity could be proven. For the Proctor density, the approximations show a very good agreement in comparison with the experimental results. This applies to the coarse-dominant and fine-dominant area. The application examples have shown that there are uncertainties in the determination of the loosest density. This becomes obvious by implausible runs of the upper and lower limits of the void ratio in the $e-FK$ -diagram. A reproducible method for the experimental determination of the loosest density of mixed-grained soils must be developed. This classification parameter for the very loose density of mixed-grained soils would be a further step towards establishing the new method of describing the state in practice. The reliability of the estimated parameters can be increased if plausible results of the approximations for the fine grain and coarse grain are used in the process of the engineering assessment. Appropriate tools are provided in this thesis.

The new approaches are particularly suitable for the design of mixed-grained soils, which should achieve certain target values with regard to their intended function after installation. Here, the determination of the soil mechanical behaviour of the parent soils at $I_{CD} = 0$ or $I_{FD} = 0$ and $I_{CD} = 1$ or $I_{FD} = 1$ is considered. As a result, the void ratio and the soil mechanical parameters can be specified as a function of the fines. From these, the optimum fine grain content can be derived with regard to the requirements.