

## Untersuchungen zu neuen Referenzdichten in Sanden

(Investigation of different reference densities in sands)

Theo Zschernig

### Einleitung

In der Bodenmechanik gibt es verschiedene Referenzrockendichten, um Lagerungszustände von grobkörnigen Böden zu beschreiben. Die lockerste Lagerung mit Trichter und die dichteste Lagerung mit Schlaggabel oder Rütteltisch werden dazu standardmäßig verwendet. Auch die Proctordichte spielt bei Untersuchungen oftmals eine Rolle. Bestimmte Lagerungszustände können mit den existierenden Referenzdichten jedoch gar nicht beschrieben werden, beispielsweise die Verkipfung von feuchten Böden. Auch das Bodenverhalten bei Flutung und die sich dadurch einstellenden Veränderungen der Dichte eines locker gelagerten Bodens werden durch die bestehenden Versuche nicht berücksichtigt. Daher wurden drei neuartige Referenzversuche (RV) zur Bestimmung von Referenzrockendichten entwickelt, die ebendiese Situationen berücksichtigen. Ziel der Arbeit soll es sein, die Grundideen dieser Versuche weiterzuentwickeln, standardisierte Versuchsaufbauten und -abläufe zu entwerfen und die Ergebnisse aus diesen Versuchen auf Abhängigkeiten von bestimmten Einflussfaktoren zu überprüfen. Dafür werden neun verschiedene Sandböden verwendet, von denen fünf aus dem rheinischen Tagebau Garzweiler stammen.

### Lockerste Lagerung mit Makroporen (RV1)

In diesem Versuch wird feuchter Sand durch ein Sieb in einen Versuchszylinder eingebaut. Dadurch entstehen kleine Bodenklumpen, die sich sehr locker aufeinanderlegen und somit eine Makroporen-Struktur ausbilden. Die Dichten, die dabei erzielt werden, liegen meist unterhalb von  $1,0 \text{ g/cm}^3$  und sind deutlich kleiner als die herkömmliche lockerste Lagerung. Nach dem Siebeinbau erfolgt eine Flutung der Probe von unten. Das bewirkt, dass die Makroporen kollabieren und die Probe zusammensackt. Durch die Verringerung des Volumens steigt folglich die Trockendichte der Probe.



Abb. 1: Probe mit Makroporen nach Siebeinbau (li.) und geflutete, zusammengesackte Probe (re.)

In verschiedenen Vorversuchs-Reihen konnte keine Abhängigkeit vom Lochdurchmesser des verwendeten Siebes auf die Versuchsergebnisse festgestellt werden. Der Anfangswassergehalt der eingebauten Probe hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Dichte nach dem Siebeinbau. Aufgrund von Saugspannungen im Korngerüst ist die Makroporen-Struktur bei einem bestimmten Wassergehalt, der für jeden Boden unterschiedlich ist, am stabilsten. Je stabiler diese Struktur ist, desto lockerer ist die Probe gelagert. Eine serienmäßige Untersuchung aller Versuchsböden erfolgte also in Abhängigkeit des Anfangswassergehaltes (Abb.2).

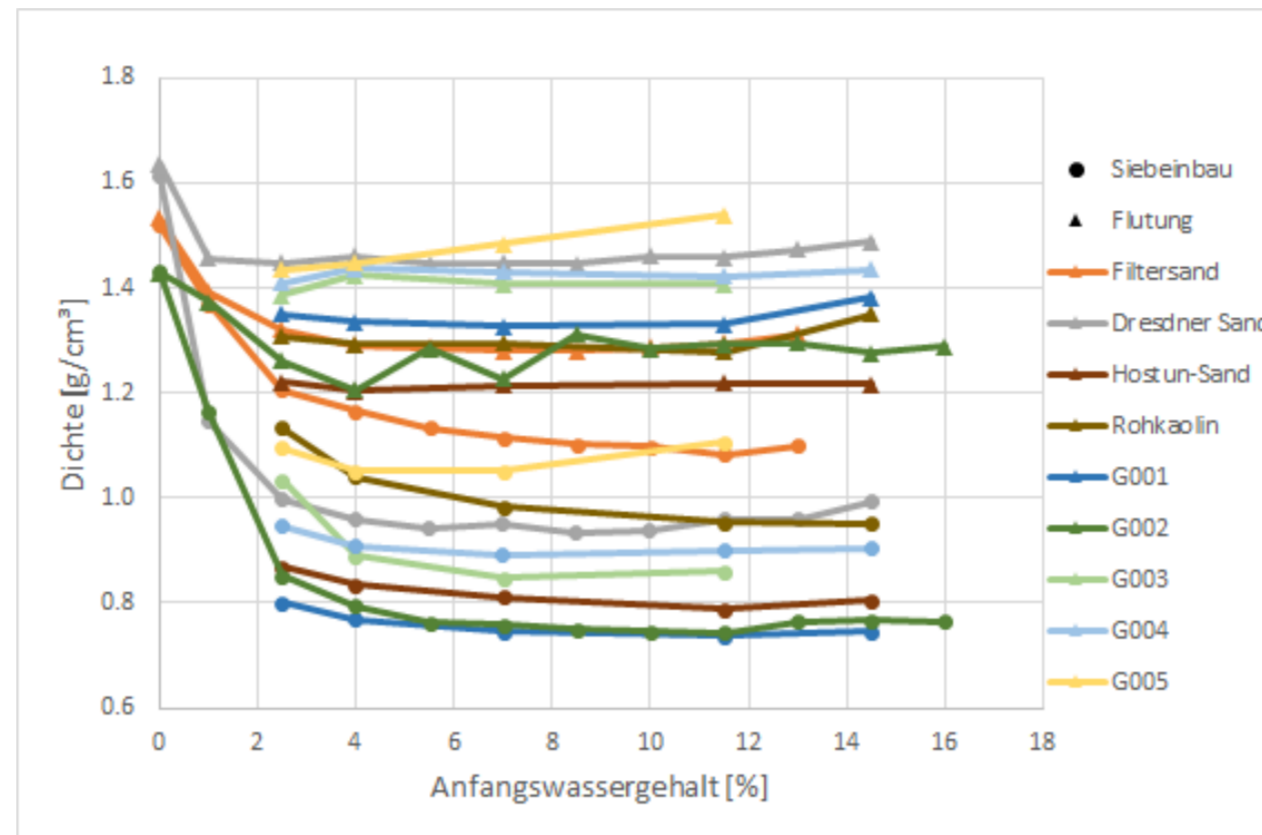


Abb. 2: Ergebnisse der Siebversuche in Abhängigkeit des Wassergehaltes

### Lockerste Lagerung nach Freifall (RV2)

Grundidee dieses Versuches ist es, eine feuchte Bodenprobe aus einer bestimmten Höhe ohne zusätzliche Verdichtung in den Versuchszylinder hineinfallen zu lassen. Damit soll im weitesten Sinne der Strahl eines Absetzers aus dem Tagebau nachgestellt werden. Mit einem neu angefertigten Versuchsstand wurden vier verschiedene Versuchsanordnungen aus Höhen zwischen 1m und 5 m untersucht. Auch hier erfolgte eine anschließende Flutung der Proben.

Bei der Untersuchung der Einflüsse der verschiedenen Randbedingungen konnte eine eindeutige Abhängigkeit von der Fallhöhe festgestellt werden. Je größer die Fallhöhe, desto größer ist auch die erzielte Dichte. Weiterhin spielt auch die Wahl der Versuchsanordnung eine Rolle. Mit Versuchsaufbauten, bei denen auf Fallrohre und Einfülltrichter verzichtet wird, lassen sich aufgrund ausbleibender Reibungsverluste größere Dichten erzielen. Auch die verwendete Probenmasse hat einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Mit größerer Masse steigt die erzielte Dichte zunächst an, bleibt dann aber auf einem konstanten Level.

Nach Abschluss der Versuche zu den Einflussfaktoren wurde eine serienmäßige Untersuchung aller Versuchsböden vorgenommen. Um keine Ergebnisse in Abhängigkeit einer Variable zu erhalten, wurde ein einheitlicher Versuchsaufbau (kurzes Rohrstück mit Trichter, 4 m Fallhöhe, 6 kg Gesamtmasse) gewählt. Die erzielten Dichten lagen deutlich über der lockersten Lagerung und waren bereits so groß, dass sich bei einer Flutung keine Setzungen mehr einstellen konnten.



Abb. 3: Versuchsstand RV2 (li.) und Versuchsaufbau RV3 (re.)

### Lockerste Lagerung unter Wasser (RV3)

Bei diesem Versuch wird eine fließfähige Wasser-Sand-Mischung durch einen speziellen Trichter in einen Versuchszylinder eingefüllt. Damit soll ein Sedimentationsprozess nachgestellt werden. Eine serienmäßige Untersuchung aller Versuchsböden produzierte Dichten, die fast ausnahmslos deutlich oberhalb der lockersten Lagerung lagen. Lediglich der Filtersand wies eine negative bezogene Lagerungsdichte auf.

### Zusammenfassung

Beim Vergleich der in dieser Arbeit bestimmten Referenzdichten aller neun Versuchssande lassen sich bereits einige Tendenzen dafür erkennen, in welcher Reihenfolge sich diese Werte anordnen lassen. Die kleinste Referenzdichte für alle Böden stellt die Dichte nach Siebeinbau dar. Darauf folgen die Siebdichte nach Flutung und die standardmäßige lockerste Lagerung als nächstgrößte Werte. Viertkleinste Dichte ist für die meisten Böden die Referenzdichte nach Freifall, fünftkleinste die lockerste Lagerung unter Wasser. Proctor-, Schlaggabel- und Rütteltisch-Versuch liefern ausnahmslos die drei höchsten Werte für jeden Boden. Es lässt sich jedoch keine Reihenfolge für diese Versuche identifizieren.

Die Differenz zwischen größter und kleinster Referenzdichte kann für jeden Boden in Abhängigkeit verschiedener Kornparameter dargestellt werden. Daraus lässt sich zum Beispiel ableiten, dass sich mit größerem Korndurchmesser auch eine kleinere Spannweite zwischen maximalem und minimalem Wert einstellt. Weitere Tendenzen, beispielsweise in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit der Böden, konnten ebenfalls festgestellt werden.

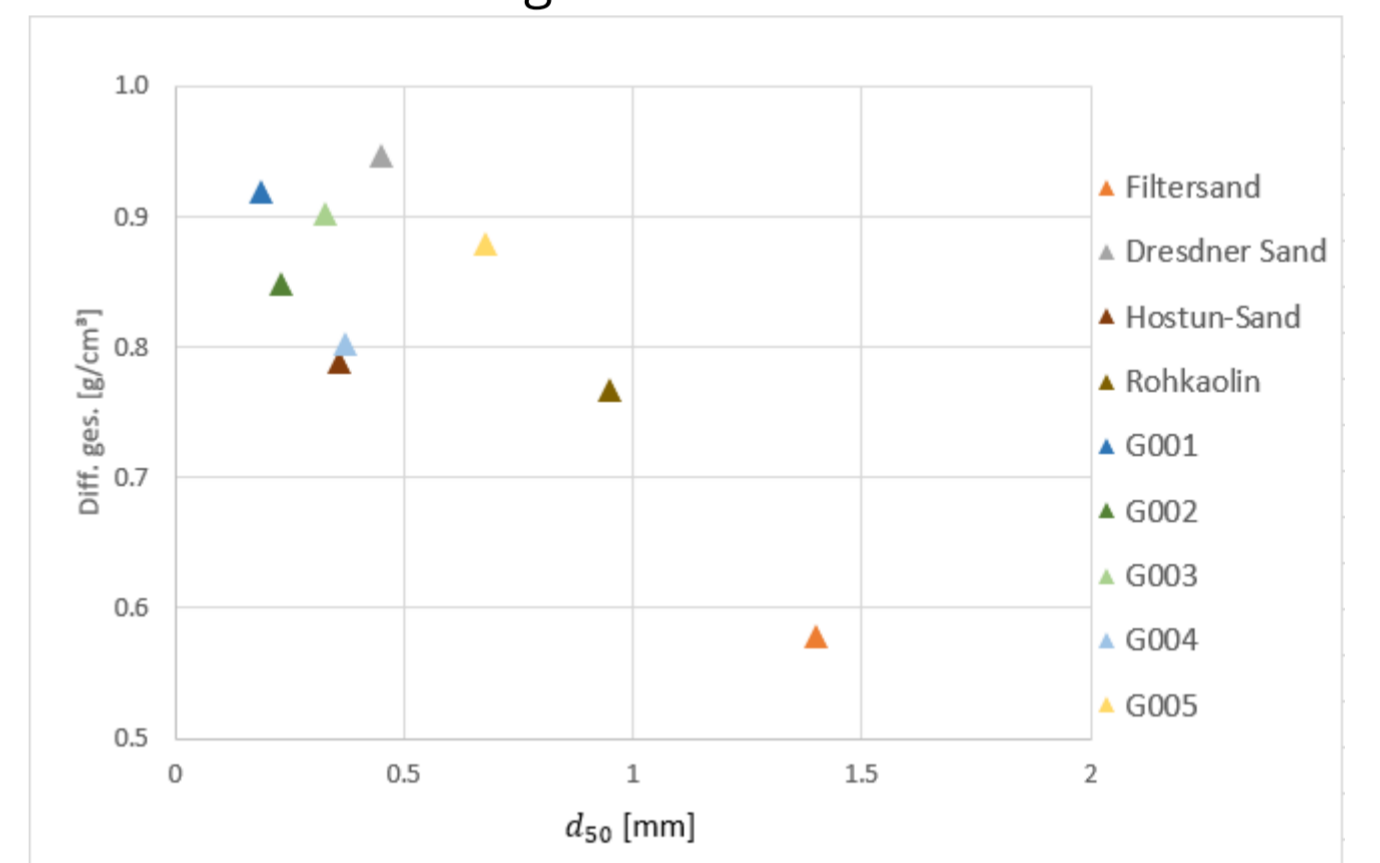


Abb. 4: Differenzen zwischen max. und min. Referenzdichte in Abh. des mittleren Korndurchmessers

Weiterhin wurden Streubreiten berechnet, die als Maß dafür dienen, wie zuverlässig und reproduzierbar die jeweiligen Versuchsergebnisse sind. Diese statistische Auswertung brachte hervor, dass die Streubreiten für die neuen, nicht genormten, Referenzversuche ( $0,016 - 0,040 \text{ g/cm}^3$ ) nicht viel größer sind als für die bereits bestehenden Versuche ( $0,011 - 0,023 \text{ g/cm}^3$ ). Besonders die Dichte nach Siebeinbau sticht dabei heraus, denn die Ergebnisse aus diesem Versuch streuen sogar weniger als jene aus Schlaggabel- und Rütteltisch-Versuch.

Die neuen Referenzversuche bergen großes Potential und liefern bereits zu Beginn ihrer Entwicklung durchaus zufriedenstellende Ergebnisse. Mit einer Weiterentwicklung der Versuchsutensilien und einer noch breiter aufgestellten statistischen Auswertung (weitere Versuche, Versuchsböden mit noch mehr unterschiedlichen Eigenschaften) können weitere Erkenntnisse über das Verhalten der Böden in diesen Versuchen gewonnen werden. Die hier produzierten Ergebnisse liefern dafür eine gute Basis.

Projekt  
Diplomarbeit

Hochschullehrer  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, TU Dresden

Wissenschaftliche Betreuung  
Božana Bačić M. Sc.

Dr.-Ing. Markus Uhlig, TU Dresden

Abgabe  
11/2023