

Standardisierte Vorgehensweise zur Parametrisierung von sandigen Böden für das hypoplastische Stoffgesetz – ein Beitrag zur Wiedernutzbarmachung der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier

Vanessa Fock^{1*}, Rosa Elena Ocaña Atencio¹ und Ralf Thiele¹

¹ Gruppe Geotechnik an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

* Korrespondenz: vanessa.fock@htwk-leipzig.de

Kurzfassung. Numerische Simulationen leisten einen elementaren Beitrag zur Optimierung von geotechnischen Verdichtungsverfahren, die zur Stabilisierung von Böden zum Einsatz kommen. In solchen Simulationen ist es möglich, das komplexe Materialverhalten von Sanden mit dem hypoplastischen Stoffgesetz beschreiben zu können. Trotz des enormen Einschusses der Stoffparameter auf die Berechnungsergebnisse ist die Parametrisierung von Sanden für das hypopl. Stoffgesetz bisher nicht einheitlich geregelt. In diesem Beitrag werden verschiedene Parametrisierungsansätze an einem Sand erprobt und deren Simulationsergebnisse einander gegenübergestellt. Anschließend wird ein Vorschlag zur Standardisierung der Parametrisierung von Sanden für das hypopl. Stoffgesetz abgeleitet.

1 Einführung

Die G² Gruppe Geotechnik an der HTWK Leipzig beschäftigt sich im Projekt *RoDyCom* seit 2019 mit der Verdichtungswirkung von Walzenverdichtern mit unrunder Bandangeometrien (Rolling Dynamic Compaction) im Hinblick auf die Kippenbödenverdichtung des Lausitzer Braunkohlereviers. Nach dem Abbau der Braunkohle werden die abgeräumten Erdmassen im Bereich des Tagebaus wieder locker verkippt und neigen bei Belastung zu großen Verformungen bzw. zum Versagen. Die Verbesserung der Stabilität der Böden durch Verdichtung ist essenziell für die Renaturierung und Rekultivierung dieser Gebiete.

Im Rahmen des Projekts werden numerische Studien zur Verdichtungswirkung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Mit dem hypopl. Stoffgesetz mit intergranularen Dehnungen [1; 2] ist es gelungen, die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von Sanden, wie sie vor allem in der Lausitz vorzufinden sind, beschreiben zu können.

FEM-Berechnungen werden erheblich vom quantitativen Wert der Stoffparameter beeinflusst. Eine einheitliche Empfehlung für die Festlegung dieser existiert jedoch nicht. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Stoffparameter aus bodenmechanischen Standardversuchen vorgestellt, die anschließend an einem Sand geprüft und validiert werden. Aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse der unterschiedlichen Parametersätze (PS) wird ein Vorschlag einer standardisierten Vorgehensweise zur Parametrisierung von Sanden für das hypopl. Grundmodell nach von Wolffersdorff [1] abgeleitet.

2 Parametrisierung der hypoplastischen Stoffparameter

2.1 Stoffparameter des Stoffgesetzes

Das hypopl. Stoffgesetz setzt sich aus dem Grundmodell (von Wolfersdorff [1] und der Erweiterung der intergranularen Dehnungen [2] zusammen und beinhaltet insg. 13 Stoffparameter. Acht dieser Parameter gehen in das Grundmodell ein und können wie folgt beschrieben werden:

- φ_c ist der Reibungswinkel im kritischen Zustand.
- Die Granulathärte h_s und der Exponent n beeinflussen das Kompressionsverhalten.
- e_{c0} , e_{d0} und e_{i0} sind die Grenzporozahlen bei einer Spannung von Null.
- Der Exponent α steuert die Abhängigkeit des Peak-Reibungswinkels von der Dichte.
- Der Exponent β steuert die Abhängigkeit der Bodensteifigkeit von der Dichte.

Die folgenden Untersuchungen konzentrieren sich auf die Parametrisierung der genannten acht Stoffparameter des Grundmodells. Für die zusätzlichen fünf Parameter der Erweiterung der intergranularen Dehnungen wurden die Werte aus Mašin [3: 132] angenommen.

2.2 Ermittlung der Parametersätze

Zum Vergleich der unterschiedlichen Parametrisierungsansätze wurde ein bereits gut dokumentierter Sand mit seinen vielfach erfolgreich verwendeten Stoffparametern ausgewählt (Tab. 1).

Tab. 1: Stoffparameter des sog. Karlsruhe-Sands [4]

φ_c [°]	h_s [MPa]	n	e_{c0}	e_{d0}	e_{i0}	α	β
30	0,28	5.800	0,84	0,53	1,00	0,13	1,0

Neben der ursprünglichen *Methode von Herle* [4; 5] wurden das *Minimalistic Experimental Programme* (MEP) von Mašin [3: 100], das *Online-Kalibrierungs-Tool ExCalibre* [6] und die rein *num. Kalibrierung* der Stoffparameter angewandt. Die hierfür notwendigen Versuche können Tab. 2 entnommen werden.

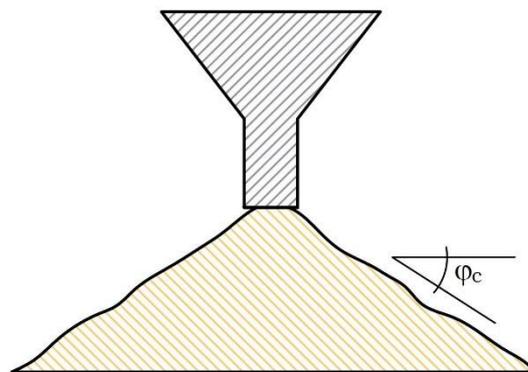


Abb. 1: Prinzip Schüttkegelversuch

Tab. 2: Versuche der Parametrisierungsansätze

Ansatz	Herle	MEP	Numerisch	ExCalibre
φ_c	Schüttkegelversuch			Autom. Kalibrierung
h_s	Rechnerisch aus Ödometerversuch an sehr lockerer Probe	Numerisch aus Ödometerversuch an sehr lockerer Probe		
n				
e_{c0}, e_{d0}, e_{i0}	Dichtebestimmung			
α	Rechnerisch (HR) o. grafisch (HG) aus Triaxialversuch an dichter Probe	Numerisch aus Triaxialversuch an dichter Probe		
β	Rechnerisch aus Ödometerversuch an dichter und lockerer Probe	Numerisch aus Triaxialversuch an dichter Probe → Trial & Error (N2, N4)	Numerisch aus Ödometerversuch an dichter Probe → Trial & Error (N1, N3)	

Die automatische Kalibrierung mittels ExCalibre erfolgte unter Angabe der Körnungslinie, des Schüttwinkels (Abb. 1) sowie der Ergebnisse eines Ödometer- (OEDO) und dreier Triaxialversuche (TRIAX).

Die num. Simulationen erfolgten mit dem FEM-Programm ABAQUS. Zur Bestimmung von h_s , n und β wurden sowohl kraft- (KOEDO) als auch weggesteuerte Ödometerversuche (WOEDO) durchgeführt. Aus den vier Ansätzen zur Bestimmung der Stoffparameter ergeben sich insg. acht PS (Tab. 3).

Tab. 3: Parametersätze (PS)

Methode	Kürzel*	φ_c [°]	h_s [MPa]	n	e_{c0}	e_{d0}	e_{i0}	α	β
Herle	HR**	32,9°	5.300	0,28	0,84	0,53	1,0	0,12	1,0
Herle	HG**	32,9°	5.300	0,28	0,84	0,53	1,0	0,06	1,35
MEP	MEP**	32,9°	2.400	0,36	0,76	0,38	0,91	0,28	1,75
Numerisch	N1***	32,9°	8.000	0,23	0,84	0,53	1,0	0,155	1,0
Numerisch	N2***	32,9°	8.000	0,23	0,84	0,53	1,0	0,155	1,2
Numerisch	N3**	32,9°	5.300	0,27	0,84	0,53	1,0	0,13	1,8
Numerisch	N4**	32,9°	5.300	0,27	0,811	0,405	0,973	0,15	1,2
ExCalibre	ExC**	32,9°	5.900	0,21	0,84	0,53	1,0	0,13	4,6

*siehe Tab. 2

** Die Bestimmung der Parameter erfolgte an WOEDO.

*** Die Bestimmung der Parameter erfolgte an KOEDO.

3 Validierung der Parametersätze

Die Validierung der PS erfolgte durch Simulationen eines zusätzl. KOEDO, wOEDO und TRIAX an Sandproben bei mitteldichter Lagerung. In Abb. 2 sind die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Versuchsdaten und den Berechnungen mittels Referenz-PS (Tab. 1) dargestellt.

Die Simulationsergebnisse wurden hinsichtlich ihrer Reproduktion der Versuchsdaten miteinander verglichen. Die besten Ergebnisse konnten hierbei durch die num. kalibrierten PS N1, N2, N3 und dem MEP-PS erzielt werden. Die größten Abweichungen bei der Simulation der OEDO traten bei den nach Herle ermittelten PS HR und HG (Abb. 2 a) und b)) und beim TRIAX beim PS ExC (Abb. 2 c)) auf. Mit PS ExC wird die Peak-Spannung im TRIAX deutlich überschätzt. Die restlichen PS (ausgenommen MEP) geben den qualitativen Verlauf des TRIAX gut wieder, unterschätzen die Spannungsentwicklung jedoch über den kompletten Versuch hinweg um mind. 50 kPa, was auf einen zu geringen Reibungswinkel φ_c hindeutet.

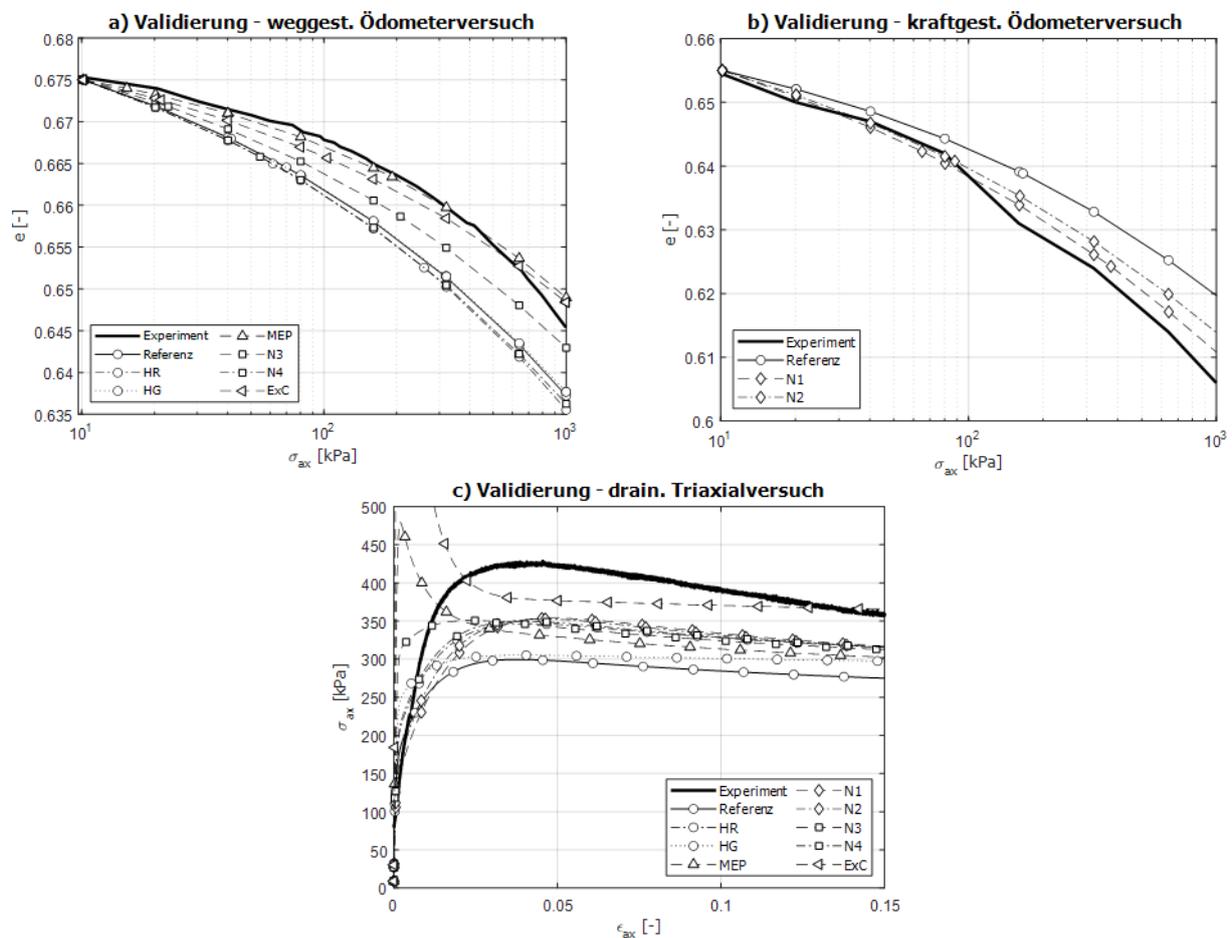


Abb. 2: FEM-Simulationen zur Validierung der PS: a) wOEDO, b) KOEDO und c) TRIAX

4 Vorschlag einer standardisierten Vorgehensweise zur Parametrisierung der Stoffparameter

In Abb. 3 ist der Vorschlag einer standardisierten Vorgehensweise zur Parametrisierung der acht Stoffparameter des Grundmodells dargestellt. Er kombiniert die untersuchten vier Ansätze hinsichtlich eines möglichst kleinen Prüfprogramms bei bestmöglichen Simulationsergebnissen. Besonderer Fokus muss auf die Durchführung der bodenmechanischen Versuche und damit auf die Güte der Versuchsdaten gelegt werden. Bei sehr lockerer Lagerung lieferten

weggest. im Vergleich zu kraftgest. Ödometerversuchen deutlich regelmäßigere Kompressionskurven und sind daher zu bevorzugen. Hinweise zur Optimierung der Schüttkegelversuche werden in Mašín [3: 90-91] gegeben und sollten zur Bestimmung von φ_c berücksichtigt werden. Die Parameter h_s , n , α und β sollten durch die Reproduktion der Versuchsdaten in num. Simulationen kalibriert werden. Startwerte für h_s und n können hierfür mittels MEP oder ExCalibre ermittelt werden.

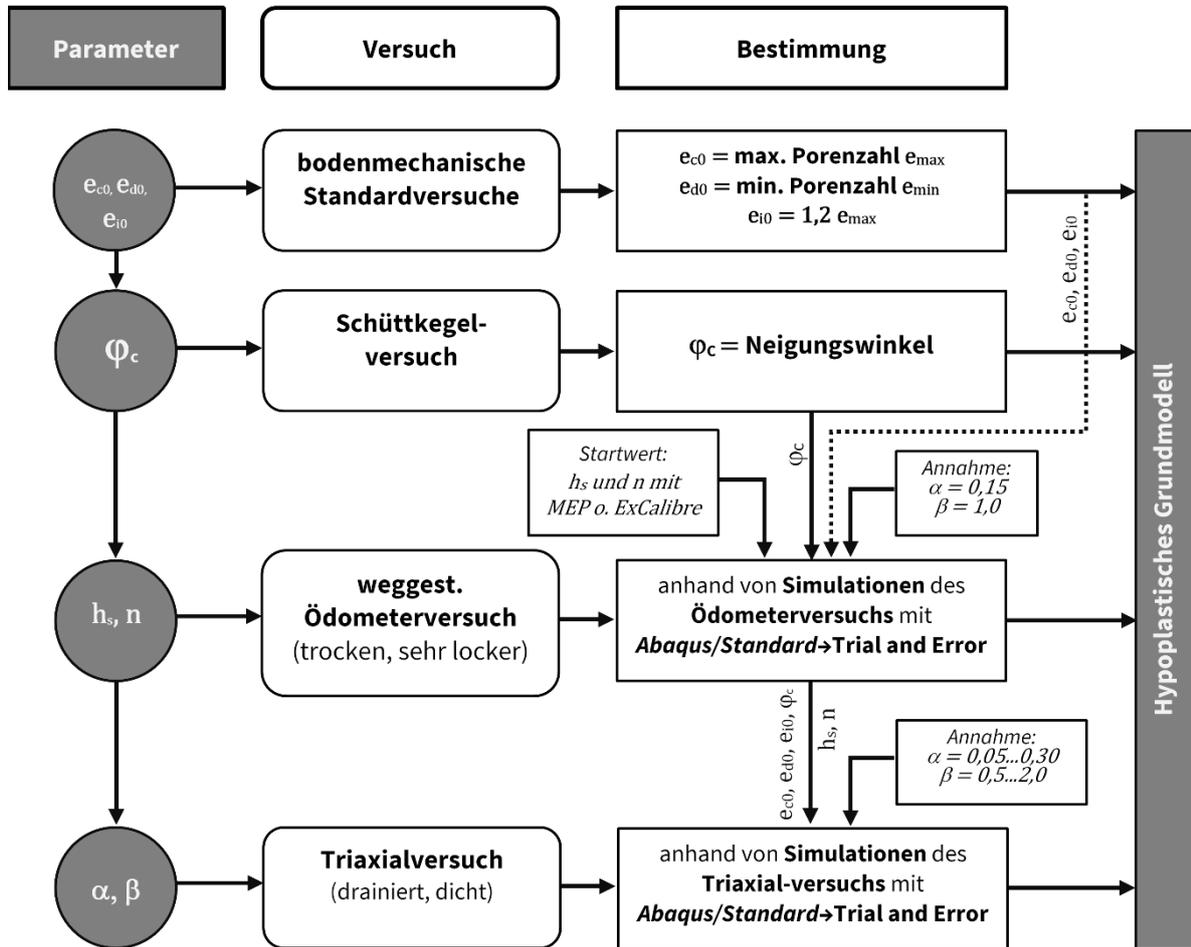


Abb. 3: Standardisierte Vorgehensweise zur Parametrisierung der Stoffparameter

5 Fazit und Ausblick

Für den Vorschlag zur Standardisierung des Vorgehens zur Parametrisierung von Sanden für das hypopl. Stoffgesetz wurden insg. vier Parametrisierungsansätze geprüft. Die Ermittlung der Stoffparameter erfolgte auf Grundlage gleicher Versuchsdaten. Mit dem Vorschlag wird im Wesentlichen den aktuellen Empfehlungen von Mašín [3] entsprochen. Der Fokus zukünftiger Untersuchungen liegt auf der Erweiterung des Vorgehens um die Bestimmung der Stoffparameter der intergranularen Dehnungen, um das volle Potential des Stoffgesetzes nutzen zu können.

Datenverfügbarkeit

Daten auf Anfrage bei der Autorin [Fock] erhältlich.

Beiträge der Autor*innen

Vanessa Fock: Methodik, Software, Validierung, Formale Analyse, Untersuchung, Datenküratierung, Schreiben – Originalentwurf, Schreiben - Überprüfung und Bearbeitung, Visualisierung. **Rosa Elena Ocaña Atencio:** Konzeptualisierung, Software, Schreiben – Überprüfung, Betreuung, Einwerbung von Finanzmitteln, Projektverwaltung. **Ralf Thiele:** Ressourcen, Betreuung, Einwerbung von Finanzmitteln, Projektverwaltung.

Interessenskonflikte

Die Autor*innen erklären, dass sie keine bekannten konkurrierenden finanziellen Interessen oder persönlichen Beziehungen haben, die die vorgestellte Arbeit beeinflusst haben könnten.

Literaturverzeichnis

1. Wolffersdorff, P.-A. von (1996): *A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface*. In: Mech. Cohes.-Fric. Mater. 1 (3), S. 251–271. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199607\)1:3<251::AID-CFM13>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199607)1:3<251::AID-CFM13>3.0.CO;2-3).
2. Niemunis, A.; Herle, I. (1997): *Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range*. In: Mech. Cohes.-Fric. Mater. 2 (4), S. 279–299. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199710\)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199710)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8)
3. Mašín, D. (2019): *Modelling of soil behaviour with hypoplasticity. Another approach to soil constitutive modelling*. 1st edition 2019. Cham: Springer International Publishing (Springer Series in Geomechanics and Geoengineering Ser). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03976-9>.
4. Herle, I. (1997): *Hypoplastizität und Granulargeometrie einfacher Korngerüste. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe*. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe.
5. Herle, I.; Gudehus, G. (1999): *Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies*. In: Mech. Cohes.-Fric. Mater. 4 (5), S. 461–486. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199909\)4:5<461::AID-CFM71>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199909)4:5<461::AID-CFM71>3.0.CO;2-P)
6. SoilModels (2018): *ExCalibre - SoilModels Automatic Calibration*. Online verfügbar unter <https://soilmodels.com/excalibre-en/>, zuletzt aktualisiert am 15.02.2018 [08.02.2022].