

Zur Anwendung der Neohypoplastizität mit Generalisierter Intergranularer Dehnung

Luis Mugele, M.Sc., Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr.-Ing Hans Henning Stutz, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Karlsruher Institut für Technologie

Einleitung

Für die numerische Lösung geotechnischer Anfangsrandwertprobleme (z. B. Pfahlgründungen, Baugruben, Tunnel, etc.) sind konstitutive Modelle zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungsverhalten des betrachteten Baugrunds erforderlich. Das komplexe mechanische Verhalten granularer Böden ist dabei unter anderem durch Druck- und Dichteabhängigkeiten, Dilatanz- und Kontraktanzeffekte, asymptotische Zustände sowie hysteretische und akkumulative Effekte gekennzeichnet. Sowohl elastische als auch simple elasto-plastische Formulierungen können dieses charakteristische Verhalten von Boden oft nicht adäquat abbilden. Wenngleich solche einfachen konstitutiven Beziehungen in der Baupraxis teils bereits entscheidend zum Systemverständnis beitragen mögen, können sie ebenfalls zu fatalen Fehleinschätzungen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit führen. Zur zutreffenderen Modellierung des mechanischen Verhaltens von Boden wurden daher in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Stoffmodellen entwickelt. Neben fortgeschrittenen elasto-plastischen Formulierungen haben sich dabei besonders hypoplastische Stoffmodelle bewährt.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges hypoplastische Stoffmodell namens Neohypoplastizität (NHP), gekoppelt mit dem neuen Konzept der Generalisierten Intergranularen Dehnung (GIS) zur Simulation zyklischer Verformungen, vorgestellt. Dieses Stoffmodell adressiert dabei Defizite gegenwärtig weitverbreiteter hypoplastischer Stoffmodelle für Sand. Neben der konstitutiven Formulierung wird die Anwendung des Modells auf ein baupraktisch relevantes Anfangsrandwertproblem eines zweifach ausgesteiften Spundwandverbaus demonstriert.

Vorteilhafte hypoplastische Stoffmodelle und deren Defizite

In hypoplastischen Stoffmodellen lässt sich die Rate der effektiven Cauchy Spannung mittels einer einzigen tensoriellen Gleichung als Funktion der Dehnungsrate und der Zustandsvariablen ermitteln. Dabei findet keine Zerlegung der Dehnungsrate in einen elastischen und einen plastischen Teil statt. Historisch hat sich für hypoplastische Modelle die Schreibweise

$$\dot{\sigma} = f_s L : \dot{\epsilon} + f_s f_d N \parallel \dot{\epsilon} \parallel \quad (1)$$

mit einem linearen und einem nichtlinearen Term etabliert (Wu und Bauer 1994). Letztere kann mathematisch äquivalent zur sogenannten generalisierten Hypoplastizität (Niemunis 2003)

$$\dot{\sigma} = E : (\dot{\epsilon} - Y m \parallel \dot{\epsilon} \parallel) \quad (2)$$

umformuliert werden. Bei ideal plastischem Fließen (unter anderem in kritischen Zustand) gilt für den Grad der Nichtlinearität $Y = 1$. Bei geringeren Spannungsverhältnissen gilt hingegen $Y < 1$. Zur Simulation von monotonen Verformungen granularer Böden hat sich die Hypoplastizität nach von Wolffersdorff (1997) (HP) als geeignet erwiesen. Letztere zeigt jedoch infolge einer Belastungsrichtungsumkehr eine unrealistisch weiche Stoffantwort (sog. Ratcheting), weshalb von Niemunis und Herle (1997) die sogenannte Intergranulare Dehnung (IS) eingeführt wurde. Das resultierende gekoppelte Stoffmodell HP+IS stellt gegenwärtig das wohl weitverbreitetste hypoplastische Stoffmodell für granulare Böden dar. Es kann das genannte charakteristische Bodenverhalten qualitativ und quantitativ reproduzieren und wird zur Lösung geotechnischer Randwertprobleme sowohl unter monotoner als auch zyklischer Verformungen herangezogen. Allerdings weist sowohl die HP als auch die IS einige Defizite auf: (a) eine unzureichende Abbildung von Dilatanzeffekten, (b) ein mögliches Erreichen von Zugspannungszuständen unter dichten Bedingungen, (c) eine hypoelastische lineare Steifigkeit, welche zu künstlichen Akkumulationseffekten führen kann und (d) das Fehlen einer zusätzlichen Zustandsgröße zur Berücksichtigung der aktuellen Bodenstruktur (fabric) (Mugele et al. 2024a). Zu den Defiziten der IS gehören darüber hinaus (e) das sogenannte Overshooting (siehe Abbildung 1), (f) ein mögliches Erreichen von Zugspannungszuständen infolge eines sich akkumulierenden Overshootings und (g) eine unzureichende Reproduktion von Akkumulationseffekten durch eine fehlende Berücksichtigung der zyklischen Vorbelastung (siehe Abbildung 2) (Mugele et al. 2024b).

Neohypoplastizität mit Generalisierter Intergranularer Dehnung

Um den Problemen der HP zu begegnen, wurde die Neohypoplastizität (NHP) (Niemunis et al. 2016, Mugele et al. 2024a) entwickelt, in der für die Rate der effektiven Cauchy-Spannung gilt:

$$\dot{\sigma} = \bar{E} : (\dot{\epsilon} - \mathbf{m} Y \|\dot{\epsilon}\| - \omega \mathbf{m}^z \langle -\mathbf{z} : \dot{\epsilon} \rangle - \mathbf{m}^d Y_d \|\dot{\epsilon}\|) \quad (3)$$

Als zusätzliche Zustandsvariable wird dabei neben der effektiven Spannung σ und der Porenzahl e ein tensorieller, deviatorischer Strukturtenor \mathbf{z} (fabric) eingeführt. Darüber hinaus beinhaltet die NHP eine asymptotisch hyperelastische Steifigkeit E , verhindert durch eine zutreffende Formulierung des Grades der Nichtlinearität Y das Auftreten von Zugspannungszuständen und bildet mittels einer neuen Formulierung des hypoplastischen Äquivalents zur Fließregel \mathbf{m} Dilatanzeffekte adäquat ab.

Um die Defizite des originalen IS-Konzepts zu beheben, wurde zudem das Konzept der Generalisierten Intergranularen Dehnung (GIS) entwickelt (Mugele et al. 2024b). In Abhängigkeit von der Intergranularen Dehnung \mathbf{h} und der Richtung der Dehnungsrate $\vec{\hat{\epsilon}} = \dot{\epsilon} / \|\dot{\epsilon}\|$ wird dabei zunächst ein skalarer Faktor k interpoliert

$$k = [\rho^{X_R} m_T + (1 - \rho^{X_R}) m_R] + \begin{cases} \rho^{X_R} (1 - m_T) \vec{\mathbf{h}} : \vec{\hat{\epsilon}} & \text{falls } \vec{\mathbf{h}} : \dot{\epsilon} > 0 \\ -\rho^{X_R} (m_R - m_T) \vec{\mathbf{h}} : \vec{\hat{\epsilon}} & \text{falls } \vec{\mathbf{h}} : \dot{\epsilon} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

welcher auf die NHP, siehe Gl. (3), angewandt werden kann:

$$\dot{\sigma} = k \bar{E} : (\dot{\epsilon} - \mathbf{m} Y^{(k^Y)} \|\dot{\epsilon}\| - \frac{1}{k^Y} \omega \mathbf{m}^z \langle -\mathbf{z} : \dot{\epsilon} \rangle - \mathbf{m}^d Y_d \|\dot{\epsilon}\|) \quad (5)$$

Diese Modifikation führt zu einer erhöhten Steifigkeit ($k E$) und für den Fall $Y < 1$ zu reduzierten irreversiblen Verformungen ($Y^{(k\gamma)}$). Durch die von k nicht beeinflusste Bedingung $Y = 1$ wird zudem das Overshooting der Scherfestigkeit verhindert (siehe Abbildung 1). Der Exponent $\gamma = f(\Omega)$ ergibt sich in Abhängigkeit von der zusätzlich eingeführten skalaren Zustandsvariablen der zyklischen Vorbelastung Ω und verbessert die Modellierung von nichtlinearen Akkumulationseffekten deutlich. Für die Entwicklungsgleichung der zyklischen Vorbelastung Ω gilt (Mugele et al. 2024b):

$$\dot{\Omega} = C_{\Omega}(1 - \rho^{\gamma\Omega} - \Omega) \parallel \dot{\epsilon} \parallel \quad (6)$$

Im Falle einer zyklischen Verformung mit kleinen Dehnungsamplituden entwickelt sich Ω gegen Eins ($\Omega \rightarrow 1$). Bei hinreichend großer monotoner Verformung oder zyklischer Belastung mit großen Dehnungsamplituden tendiert Ω dagegen gegen Null ($\Omega \rightarrow 0$).

Das gekoppelte NHP+GIS Modell behebt die genannten Defizite der weitverbreiteten HP+IS Formulierung. Das neue Stoffmodell beruht auf 10 Stoffmodellparametern der NHP (welche mit geringem Aufwand ähnlich der Parameter der HP kalibriert werden können), 5 Stoffmodellparametern des originalen IS-Konzeptes (welche in das GIS-Konzept übernommen werden können) und weiteren 5 Parametern des GIS-Konzeptes zur Berücksichtigung der Effekte aus einer zyklischen Vorbelastung (Mugele et al. 2024c). Monotone drainierte (vgl. Abbildung 1) und zyklische undrainierte (vgl. Abbildung 2) Triaxialversuche zeigen, dass das Bodenverhalten sowohl unter monotoner als auch zyklischer Verformung mittels der NHP+GIS gut modelliert werden kann. Besonders hervorzuheben ist dabei im Vergleich zu Simulationen mittels der HP+IS die verbesserte Reproduktion von Dilatanz- und Akkumulationseffekten sowie das verhinderte Overshooting. Die Versuchsdaten und HP+IS Parameter von Karlsruher Feinsand (KFS) wurden Wichtmann et al. (2016) entnommen. Die NHP+GIS Parameter entstammen Mugele et al. (2024c).

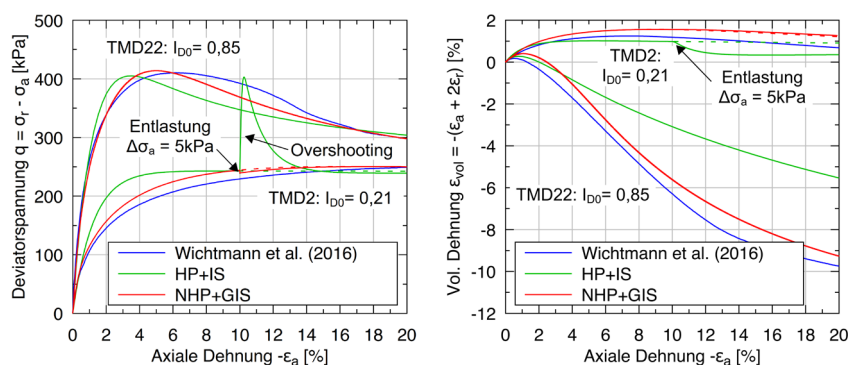


Abbildung 1: Versuchsdaten und Simulationen mittels der HP+IS und der NHP+GIS: a) Deviatorspannung und b) volumetrische Dehnung als Funktion der axialen Dehnung in zwei monotonen drainierten Triaxialversuchen unterschiedlicher initialer Dichte.

Der Anfangsspannungszustand ist anisotrop mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$. Die initialisierte Porenzahl reduziert sich mit zunehmendem mittlerem effektivem Druck entsprechend dem Kompressionsgesetz nach Bauer (1996), um eine homogene relative druckbezogene Lagerungsdichte $I_d = (e_c - e)/(e_c - e_d)$ zu erreichen. Die durch den Spundwandeinbau auftretende Veränderung des Zustandes im Boden wird durch die wished-in-place Annahme vernachlässigt und alle weiteren Zustandsvariablen ($\mathbf{z}, \mathbf{h}, \Omega$) sind zu Null initialisiert.

Gemäß der EAB 2021 ist bei der Bemessung von Verbauwänden der Einfluss von Temperaturschwankungen der Steifen zu berücksichtigen. Dieser Lastfall beeinflusst unmittelbar den Bauteilnachweis der Aussteifung. Die durch die zyklisch auftretenden Temperaturschwankungen in den Steifen induzierten zyklischen Verformungen im Boden und deren Einfluss auf die Verbaubemessung wird jedoch meist nicht detailliert betrachtet. In den Berechnungen dieser Arbeit wurde daher eine zusätzliche zyklischen Steifenlast (Besler 1994) von

$$\Delta S_T = f_t \alpha_T \Delta T E A = 0,15 \cdot 0,000012 \cdot 30 \cdot 21000 \cdot 197,78 = 224 \text{ kN} \rightarrow \Delta S_T \approx 40 \text{ kN/m}$$

in einem, auf die Aushubzustände folgendem, Berechnungsschritt berücksichtigt. Die Simulationen betrachten nur charakteristische Größen.

Abbildung 4 zeigt die sich einstellende horizontale Wandverschiebung und die Verteilung des Biegemoments in der Spundwand in einzelnen Bauphasen, im Vollaushub und nach aufgebracht 100 Temperaturzyklen. Die Entwicklung der Steifenlasten im Verlauf der Berechnung und die horizontalen Wandverschiebungen für eine Variation der initialen Lagerungsdichte und der Amplitude der zyklischen Belastung sind in Abbildung 5 dargestellt. Neben den Ergebnissen der NHP+GIS sind auch Ergebnisse mittels der HP+IS abgebildet.

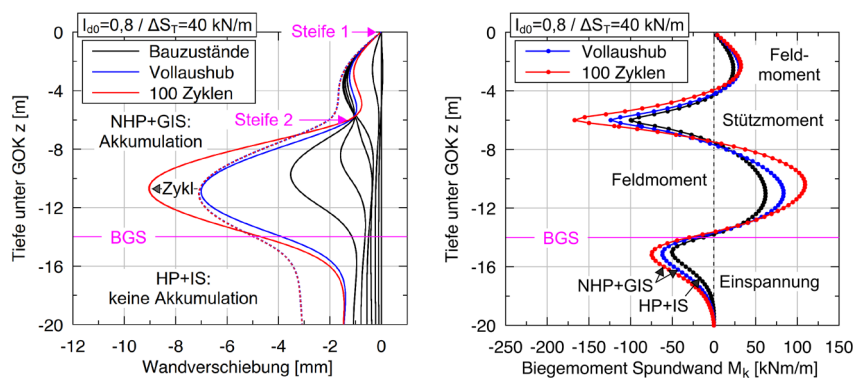


Abbildung 4: Horizontale Wandverschiebung und Biegemomentverteilung in der Spundwand zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Berechnung.

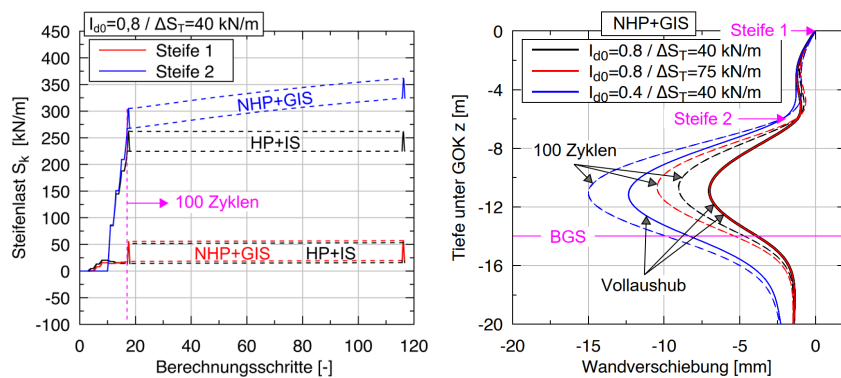


Abbildung 5: Entwicklung der Steifenkräfte für Simulationen mit der HP+IS und der NHP+GIS und horizontale Wandverschiebung für eine variierte initiale Dichte und Amplitude der zyklischen Belastung.

Zunächst zeigt sich mit fortschreitendem Aushub der Baugrube eine Zunahme der Verformungen, wobei die Verformungen an den Ansatzpunkten der Steifen begrenzt sind. Es zeigt sich darüber hinaus der erwartete Biegemomentverlauf, welcher durch Feldmomente und ein Stützmoment sowie ein Einspannmoment im Fußauflagers gekennzeichnet ist. Die Ergebnisse der NHP+GIS und der HP+IS unterscheiden sich im Endaushubzustand nur geringfügig und beide Stoffmodelle liefern ein qualitativ und quantitativ ähnliches Ergebnis. Infolge der zyklischen Belastung treten allerdings nur bei Verwendung der NHP+GIS die erwartbaren Akkumulationseffekte auf. Letztere zeigen sich in einer veränderten Biegelinie der Spundwand, erhöhten Feld- und Stützmomenten sowie einer akkumulativen Zunahme der Kraft in der Steife 2. Wenngleich die Ergebnisse quantitativ gegenwärtig nicht mit Messdaten verglichen werden können, erscheinen sie qualitativ zutreffend. Die Berechnung mittels der HP+IS zeigt keinerlei Akkumulationseffekte, was qualitativ nicht der Erwartung entspricht. Eine geringere initiale Dichte führt zu größeren Verformungen und Akkumulationseffekten. Letztere sind bei einer größeren zyklischen Einwirkung ebenfalls stärker ausgeprägt.

Das gezeigte Beispiel demonstriert die Anwendbarkeit der NHP+GIS unter Berücksichtigung monotoner und zyklischer Verformungen und zeigt zugleich Vorteile gegenüber der weitverbreiteten HP+IS auf. In Zukunft soll das neue Stoffmodell in weiteren Fragestellungen angewandt und mittels Messdaten weiter kalibriert werden.

Literatur

- Bauer, E. (1996): Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils and foundations*, 36(1), 13-26.
- Besler, D. (1994): Einfluss von Temperaturerhöhungen auf die Tragfähigkeit von Baugrubensteifen. *Bautechnik*, 71(9), 582-589.
- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik Arbeitskreis Baugruben. (2021). *Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben": EAB*. 6. Auflage, John Wiley & Sons.
- Mugele, L., Niemunis, A., & Stutz, H. H. (2024a): Neohypoplasticity revisited. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 48(1), 311-331.
- Mugele, L., Stutz, H. H., & Mašin, D. (2024b): Generalized intergranular strain concept and its application to hypoplastic models. *Computers and Geotechnics*, 173, 106480.

- Mugele, L., Stutz, H. H., & Mašín, D. (2024c): Neohypoplasticity for sand coupled with the generalized intergranular strain concept. (*eingereicht*).
- Niemunis, A. (2003): *Extended hypoplastic models for soils*. Habilitation. Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum. Heft 34.
- Niemunis, A., & Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 2(4), 279-299.
- Niemunis, A., Tavera, C. E. G., & Wichtmann, T. (2016): Peak stress obliquity in drained and undrained sands. Simulations with neohypoplasticity. *Holistic Simulation of Geotechnical Installation Processes: Benchmarks and Simulations*, 85-114.
- von Wolffersdorff, P. A. (1996): A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 1(3), 251-271.
- Wichtmann, T., & Triantafyllidis, T. (2016): An experimental database for the development, calibration and verification of constitutive models for sand with focus to cyclic loading: part I—tests with monotonic loading and stress cycles. *Acta Geotechnica*, 11, 739-761.
- Wu, W., & Bauer, E. (1994): A simple hypoplastic constitutive model for sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 18(12), 833-862.