

# Bemessen mit numerischen Methoden in der Geotechnik – Möglichkeiten und Grenzen

Prof. Dr.-Ing. habil. P.-A. von Wolffersdorff, BAUGRUND DRESDEN, Dresden  
Dr.-Ing. habil. S. Henke, BBI Geo- und Umwelttechnik, Hamburg

*Numerische Methoden werden für die Lösung schwieriger geotechnischer Aufgaben zunehmend verwendet und sind somit mittlerweile gängige Praxis geworden. Insbesondere für die Prognose von Verformungen im Rahmen von Untersuchungen und Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit hat sich der Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder Finite-Differenzen-Methode (FDM) in der Praxis bewährt.*

*Neben diesem klassischen Anwendungsgebiet der FEM in der Geotechnik wird nunmehr aber vermehrt auch die Anwendung numerischer Methoden für die Bemessung geotechnischer Konstruktionen propagiert und ausprobiert. Es wird europaweit angestrebt, die FEM oder FDM in Verbindung mit erweiterten Stoffmodellen für Boden und Fels auch für die Bemessung von geotechnischen Konstruktionen verstärkt zu verwenden und im Ergebnis, ein gesellschaftlich akzeptables Sicherheitsniveau zu gewährleisten. Dabei wird zurzeit das in den Eurocodes verankerte Teilsicherheitskonzept zugrunde gelegt.*

*In dem Beitrag werden diesbezüglich Möglichkeiten aber auch Anwendungsgrenzen aufgezeigt. Schließlich wird dargestellt, wie die Anwendung numerischer Methoden für die Bemessung einerseits durch Verankerung in Regelwerken zum Stand der Technik erhoben werden kann und andererseits welche Anforderungen sich daraus für den spezialisierten Anwender ergeben.*

## 1. Einleitung

Nachfolgende Zitate sind keine Seltenheit, zeigen aber deutlich, dass es auf dem Gebiet der Anwendung numerischer Methoden in der Geotechnik nach wie vor einen hohen Aufklärungs- und Schulungsbedarf gibt:

*„Es ist nicht wirtschaftlich, wenn wir alles zweimal rechnen müssen ...“*

*„In der Praxis wird eh nur mit elastischen Stoffmodellen gerechnet, also brauchen wir den Schubmodul  $G_0$  nicht zu bestimmen ...“*

*„Warum sollen wir einmal charakteristisch und einmal mit Teilsicherheitsbeiwerten rechnen? Wir wollen nur einmal die Design-*

*berechnung durchlaufen, mehr wird uns nicht bezahlt ...“*

*„Die Laborversuche für die Parameterbestimmung sind viel zu aufwändig und teuer, also nehmen wir lieber Mohr-Coulomb, da bekomme ich alle Parameter direkt aus dem Baugrundgutachten ...“*

Erfahrene Anwender numerischer Methoden werden insbesondere bei Bemessung geotechnischer Konstruktionen oft mit solchen oder ähnlichen „Weisheiten“ oder „gut gemeinten Ratschlägen“ konfrontiert.

In den genannten Zitaten spiegeln sich auch mangelnde Kenntnisse der zahlreichen Besonderheiten bei der Anwendung numerischer Methoden in der Geotechnik wider.

So ist zum Beispiel Folgendes zu beachten:

- Der Modellierungsvorgang vom realen Baugrund bis zu einem möglichst adäquaten Finite-Elemente-Modell erfordert einen hohen Abstrahierungsgrad verbunden mit vielen Annahmen und Vereinfachungen aufgrund der immer unvollständigen Informationen über die Zusammensetzung und die Eigenschaften des betreffenden Baugrundbereiches.
- Die in der Regel räumlich unendlich weite Ausdehnung des realen Baugrundes muss im Modell begrenzt werden. Bei der Festlegung eines geeigneten Berechnungsausschnittes sind somit Randbedingungen erforderlich, die die Berechnungsergebnisse nicht bzw. nur unwesentlich beeinflussen dürfen. Dies ist bei der Festlegung der Modelldimensionen zu beachten.
- Das Materialverhalten des Baugrundes ist hoch komplex und hängt von zahlreichen Faktoren ab. Dies muss durch eine ausreichend exakte stoffliche Beschreibung in Form von Stoffmodellen erfolgen.
- Baugrund ist mehr oder weniger inhomogen und kann in der Regel nicht durch entsprechend örtlich streuende Stoffparameter, die durch das jeweils verwendete Stoffmodell definiert sind, beschrieben werden. Somit sind abhängig vom Boden ausreichende und auf die Fragestellung und Bodenart abgestimmte Untersuchungen zur Parameterermittlung erforderlich.

Die Berücksichtigung dieser Besonderheiten und die Beherrschung der damit verbundenen Modellierungsaufgaben sind notwendige Voraussetzungen, um zu zuverlässigen Berechnungsergebnissen gelangen zu können.

Natürlich sind auch „klassische“ Anforderungen an die numerische Modellierung, d. h. z. B. die Einhaltung eines ausreichenden Diskretisierungsgrades etc. zu beachten.

Wenn zudem angestrebt wird, die numerischen Methoden zur Bemessung geotechnischer Konstruktionen zu verwenden, kommen noch weitere Anforderungen hinzu.

Gegenwärtig muss der Umgang mit dem für die Bemessung von Konstruktionen anzuwendenden Teilsicherheitskonzept kritisch beleuchtet werden. Hierzu werden im Rahmen dieses Beitrages einige Überlegungen niedergeschrieben.

## 2. Ausgewählte Besonderheiten bei Erstellung von geotechnischen Finite-Elemente-Modellen

### 2.1 Modelldimensionen

In der Realität ist der Baugrund um die zu bemessende geotechnische Konstruktion anders als bei Modellierungen im Bereich des Hochbaus oder in anderen Ingenieursdisziplinen „unendlich“ weit ausgedehnt.

Das numerische Modell muss hingegen allein schon, um ein lösbares Randwertproblem zu liefern, räumlich durch Randbedingungen begrenzt sein. Die Modellgröße ist so zu dimensionieren, dass keine störenden Randeinflüsse entstehen und somit die Ergebnisse beeinflusst werden.

Für die Berechnung von z. B. Baugruben werden in den Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ [1] Hinweise zu den erforderlichen Modelldimensionen gegeben. Es ist aber in jedem Fall erforderlich, dass der Berechnungsingenieur nach erfolgter Berechnung überprüft, ob die Modellränder ausreichend weit entfernt gewählt wurden, sodass hierdurch kein Einfluss auf die relevanten Berechnungsergebnisse resultiert. Dies kann beispielsweise anhand einer Kontrolle der Verformungen und Hauptspannungsrichtungen an den Modellrändern erfolgen.

### 2.2 Stoffliche Modellierung

Stoffmodelle für Boden und Fels gibt es so zahlreich wie „Sand am Meer“. Forscher weltweit entwickelten und entwickeln Modelle zur Beschreibung des stofflichen bzw. mechanischen Verhaltens auf der Grundlage unterschiedlicher Theorien (z. B. Elastoplastizität, Hypoplastizität). Doch leider sind diese Modelle oftmals hoch-komplex, aber gleichzeitig nicht umfassend dokumentiert und somit für den praktischen Anwender wenig geeignet. Teilweise sind sie ggf. gar nicht zugänglich, sodass nur vergleichsweise wenige Stoffmodelle in der Praxis Anwendung finden.

Ein weiterer maßgeblicher Grund für eine breitere Anwendung von Stoffmodellen ist ihre Verfügbarkeit in professioneller Finite-Elemente-Software. Nicht immer sind in diesen Software-Paketen auch moderne, erweiterte Stoffmodelle, die dem gegenwärtigen Entwicklungsstand der Stoffmodellforschung entsprechen implementiert.

Zur Überwindung der unbefriedigenden Situation hinsichtlich der Verfügbarkeit von validierten bodenmechanischen Stoffmodellen wurde im Jahr 2008 das Projekt „soilmodels.info“ ins Leben gerufen [4], bei dem Forscher aus aller Welt aufgerufen sind, ihre Entwicklungen in der Stoffmodellforschung der Fachwelt zur Anwendung zur Verfügung zu stellen. Leider war die Resonanz trotz der guten und allseits befürworteten Idee bisher nicht sehr groß.

Die Auswahl der für die jeweilige FE-Analyse geeigneten boden- bzw. felsmechanischen Stoffmodelle hat eine herausragende Bedeutung, weil einerseits das Baugrundverhalten sehr komplex und von Fall zu Fall auch unterschiedlich ist und andererseits die Stoffmodelle unterschiedliche Möglichkeiten und Grenzen hinsichtlich der realitätsnahen Abbildung des Materialverhaltens besitzen.

Leider wird in der Praxis immer noch auf das einfache elasto-plastische Mohr-Coulomb-Stoffmodell (MC-Modell) zurückgegriffen. Die Gründe hierfür sind:

- Das MC-Modell ist in der Regel in den FE-Programmen verfügbar.
- Das MC-Modell erfordert wenige und bekannte Stoffkennwerte, die in Regel in üblichen Baugrundgutachten angegeben sind.

Aufgrund dieser oben genannten „Vorteile“ wird von Anwendern oft „vergessen“, welche Einschränkungen mit diesem Stoffmodell einhergehen, wie z. B. die fehlende Unterscheidung von Be- und Entlastungssteifigkeit oder die Nichtberücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit. Ist sich jedoch ein Anwender dieser Einschränkungen bewusst, so weiß er, dass z. B. die Berechnung eines Baugrubenaushubs mit dem MC-Modell keine realitätsnahen Ergebnisse liefern kann. Dennoch gibt es immer wieder mehr oder weniger untaugliche Versuche, das MC-Modell über seine Grenzen hinaus anzuwenden.

Interessante Abhandlungen zu den verschiedenen verfügbaren Stoffmodellen und zu deren Möglichkeiten und Grenzen sind z. B. in [5] und [6] zu finden.

### 2.3 Stoffparameter und charakteristische Werte

Die Auswahl geeigneter Stoffmodelle kann nicht losgelöst von der Ermittlung der

für das jeweilige Stoffmodell erforderlichen Parameter vorgenommen werden.

Insbesondere im Falle, dass erweiterte Stoffmodelle für den Baugrund verwendet werden sollen, ist es für den Anwender eine schwierige Aufgabe, die erforderlichen Stoffparameter in ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Die in den üblichen Baugrundgutachten angegebenen Bodenkennwerte erlauben es in der Regel nicht, Stoffparameter für erweiterte Stoffmodelle direkt abzuleiten. Anhand von Empfehlungen von Softwareanbietern [8] oder entsprechender Fachliteratur gibt es Hinweise, wie die Stoffparameter ermittelt werden können. In Ergänzung dazu kann auch auf Korrelationen zwischen den Stoffparametern oder vergleichbaren Kennwerten und den Ergebnissen von Baugrunduntersuchungen in situ zurückgegriffen werden. Leider stehen die Ergebnisse von geeigneten Laborversuchen (Elementversuchen) nur in sehr wenigen Fällen für die Ermittlung der Stoffparameter zur Verfügung.

Für die Bemessung gemäß EC 7 sind charakteristische Kennwerte aus den Baugrundgutachten als vorsichtige Schätzwerte festzulegen. Der Begriff „vorsichtige Schätzung“ ist unscharf und soll verdeutlichen, dass in den Bodenkenngrößen eine versteckte Sicherheitsreserve enthalten ist. Die vorsichtige Schätzung der charakteristischen Werte erfolgt in der Regel hinsichtlich der Belange für Bemessungen geotechnischer Konstruktionen mit konventionellen Nachweisverfahren.

Im Zusammenhang mit der Anwendung numerischer Methoden sollte der Begriff „charakteristischer Wert“ als realistischer bzw. wahrscheinlicher Wert verstanden werden, weil eine „vorsichtige Schätzung“ gemäß Baugrundgutachten nicht zwingend als „auf der sicheren Seite liegend“ angesehen werden kann. Ein Grund dafür ist z. B., dass bei numerischen Berechnungen in der Regel die Belastungsgeschichte je nach Aufgabenstellung möglichst detailliert berücksichtigt wird und dabei sich das Materialverhalten des Baugrundes bei unterschiedlicher Belastungsrichtung auch bei gleichen Stoffparametern ändern kann, ohne dass es dabei eine „sichere Seite“ gibt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass ein Stoffmodell, bei dem nicht explizit das Vorgehen zur Herleitung der Stoffpara-

meter beschrieben wird, nicht für die praktische Anwendung geeignet ist.

### 3. Bemessung anhand numerischer Methoden mit Teilsicherheiten

#### 3.1 Initiativen zu normativen Regelungen

Im Zuge der Überarbeitung und Neuorganisation der Eurocodes gibt es zahlreiche Initiativen, um die Anwendung numerischer Methoden zur Bemessung von geotechnischen Konstruktionen normativ zu regeln. Bisher ist hierzu in der aktuell gültigen Norm [2] nur geregelt, dass numerische Methoden grundsätzlich angewendet werden dürfen.

In diesem Abschnitt werden die Grundsätze der zurzeit hierzu geführten Diskussionen kurz dargestellt.

#### 3.2 Kompetenzen des Anwenders

In den zurzeit diskutierten Grundlagen für die Normung von numerischen Methoden für die Bemessung geotechnischer Konstruktionen wird vor der eigentlichen Regelung des Vorgehens bei der numerischen Berechnung ein wesentliches Augenmerk auf die Kompetenz der Anwender gelegt.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass aufgrund der hohen Komplexität numerischer Berechnungen ausschließlich hierfür ausreichend geschultes bzw. qualifiziertes Personal eingesetzt werden sollte. Hierbei wird jedoch der Mangel offensichtlich, dass zurzeit keine allgemeingültigen Methoden zur Sicherstellung bzw. zum Nachweis der Kompetenz der Anwender existieren. Ein erster Ansatz wurde im Rahmen des europäischen COGAN-Projektes (Competency in Geotechnical Analysis, [www.cogan.eu.com](http://www.cogan.eu.com)) mit dem COGAN-scheme entworfen. Dieser ist jedoch zurzeit noch in der Erprobung und es ist nicht sichergestellt, inwieweit dieser Ansatz eine realistisch einsetzbare Qualitätssicherung für die Kompetenz der Anwender numerischer Berechnungssoftware in der Geotechnik werden kann.

#### 3.3 Bemessungsphilosophien

Ziel der aktuellen Normungsarbeit ist es, ein allgemeingültiges Vorgehen zu definieren, um die Bemessung geotechnischer Konstruktionen mit numerischen Methoden zu ermöglichen. Hierbei muss berücksichtigt

werden, dass ein Sicherheitsniveau, das in Anlehnung an die bisherige Bemessungspraxis plausibel ist, erreicht wird.

Im Zuge der aktuellen Diskussionen hat sich herauskristallisiert, dass prinzipiell zwei unterschiedliche „Philosophien“ verfolgt werden. Diese werden *input factoring (IFA)* und *output factoring (OFA)* genannt.

#### *Input factoring (IFA)*

Beim IFA werden vor Beginn der numerischen Berechnung die als *Input* erforderlichen Festigkeitsparameter des Bodens ( $\tan\phi$ ,  $c$ ,  $c_u$ ) durch Teilsicherheitsbeiwerte abgemindert und die ebenfalls als *Input* erforderlichen Einwirkungen um entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte erhöht. Als Ergebnis ergeben sich aus der numerischen Berechnung entsprechend die bemessungsrelevanten Bemessungswerte der Beanspruchungen.

#### *Output factoring (OFA)*

Beim OFA werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Ausgabegrößen (*Output*) der numerischen Berechnung angesetzt. Dies bedeutet, die numerische Berechnung wird mit charakteristischen Eingabegrößen ohne den Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten durchgeführt. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden dann auf die im Ergebnis der numerischen Berechnungen erhaltenen bemessungsrelevanten charakteristischen Werte der Beanspruchungen angesetzt.

#### *Vorgehensweisen*

Soll eine geotechnische Konstruktion mit numerischen Methoden bemessen werden, so sind folgende beiden Vorgehensweisen möglich:

- **Variante A:** Es sind zwei getrennte numerische Berechnungen nach OFA und IFA für alle Berechnungsphasen in fortlaufender Reihenfolge durchzuführen. Das sich aus dem Vergleich von OFA und IFA ergebende ungünstigere Bemessungsergebnis ist maßgebend
- **Variante B:** Es ist eine numerische Berechnung nach OFA für alle Berechnungsphasen in fortlaufender Reihenfolge durchzuführen. Für die bemessungsrelevanten Berechnungsphasen ist eine abzweigende Berechnung nach IFA anzuschließen. Das sich aus dem Vergleich von OFA und IFA ergebende ungünstigere

stigere Bemessungsergebnis ist maßgebend.

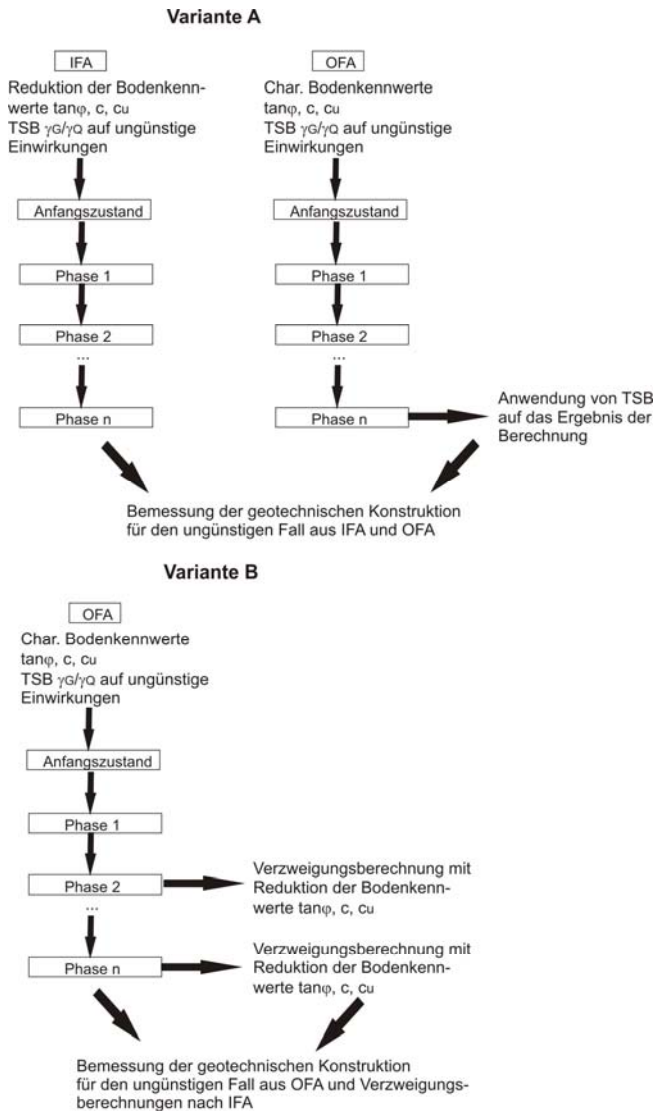


Bild 1: Darstellung der unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Bemessung nach IFA und OFA

Zur Verdeutlichung der beiden unterschiedlichen Varianten sind diese schematisch in Bild 1 dargestellt.

Bei der Bemessung von geotechnischen Konstruktionen nach OFA ist es auch möglich, Bodenwiderstände (z. B. Erdwiderstand, Grundbruchwiderstand), die anhand von konventionellen Verfahren ermittelt werden, zu verwenden.

### 3.4 Bewertung der Vorgehensweisen

Der Arbeitskreis 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ hat sich bisher eindeutig dafür ausgesprochen, bei der Bemessung von geotechnischen Konstruktionen mit numerischen Methoden nur nach OFA vorzugehen

und dabei auch anhand konventioneller Verfahren ermittelte Bodenwiderstände anzuwenden. Diese Vorgehensweise entspricht der bisherigen Bemessungspraxis mit konventionellen Methoden in Deutschland gemäß EC7, d. h. Anwendung des Nachweisverfahrens DA2\* für die Grenzzustände der Tragfähigkeit STR und GEO-2. Siehe auch [10] und [11].

Anhand ihrer Erfahrungen sehen die Autoren die vorgeschlagenen Vorgehensweisen insbesondere dahin gehend als kritisch an, dass nunmehr „zweimal“ gerechnet werden muss. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Randbedingungen kann aber nicht a priori gesagt werden, ob die IFA- oder aber die OFA-Berechnung den maßgebenden Bemessungslastfall liefert.

Zudem muss festgehalten werden, dass insbesondere das Vorgehen nach Variante B die Möglichkeit eröffnet, dass alle notwendigen Berechnungsschritte in einem Berechnungsgang erfolgen können, sodass der notwendige Zusatzaufwand gering ist.

Es sind jedoch weitere Dinge aus Sicht der Autoren zu beachten:

- Beim Vorgehen nach IFA muss eine Abminderung der Scherparameter  $\tan\varphi$ ,  $c$  und  $c_u$  erfolgen. Dies bedingt, dass das verwendete Stoffmodell eine für den Benutzer verständliche Möglichkeit der Abminderung dieser Parameter anbieten muss. Bislang ist dies nur mit Stoffmodellen praktikabel, die eindeutig die oben genannten Scherparameter als Eingabe Größen aufweisen. Andere in der Literatur diskutierte Vorgehensweisen, bei denen die Abminderung der Scherparameter indirekt über die im Stoffmodell implementierte Grenzbedingung erfolgt, entsprechen noch nicht dem Stand der Technik, siehe z. B. Potts und Zdravkovic [9].
- Für die Abminderung der Scherparameter sind Teilsicherheitsbeiwerte erforderlich. Ebenso sind Teilsicherheitsbeiwerte für die Ermittlung der Bemessungsgrößen bei der Berechnung nach OFA erforderlich. Hierbei stellt sich die Frage, ob für diese Aufgabenstellung die für die konventionellen Nachweisverfahren im Eurocode festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte ebenfalls Anwendung finden dürfen. Es ist zu beachten, dass die Teil-

sicherheitsbeiwerte für die konventionellen Nachweise in der Regel die jeweils den Nachweisverfahren anhängigen Unsicherheiten und Erfordernisse berücksichtigen, um ein Ergebnis mit einem vorgegebenen Sicherheitsniveau zu erreichen.

Insbesondere die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte wird zurzeit in den Normungsgremien intensiv diskutiert. Denn es sollten Beiwerte vorgegeben werden, die ein den konventionellen Nachweisen entsprechendes Sicherheitsniveau auch bei der Bemessung mit numerischen Methoden gewährleisten.

#### 4. Ausblick

Es sei an dieser Stelle aus Sicht der Autoren dargelegt, dass Regelungen für die Bemessung geotechnischer Konstruktionen anhand numerischer Methoden sicher in einem gewissen Umfang wünschenswert und auch erforderlich sind [3]. Dies sollte jedoch nicht in einer ausufernden „Überregelung“ enden.

Da die Aufgaben, die mit numerischen Methoden untersucht werden sollen, vielfältig sind und die Randbedingungen hierbei jedes Mal stark variieren, sollte aus Sicht der Autoren nur wie zuvor beschrieben die allgemeine Vorgehensweise festgelegt werden. Darüber hinausgehende Reglementierungen könnten schnell zu Einschränkungen und somit zu einer immensen Reduktion der Flexibilität numerischer Methoden führen. Dies sollte jedoch nicht das Ziel sein, damit das wertvolle Hilfsmittel der numerischen Methoden auch zukünftig erfolgreich Anwendung in der geotechnischen Praxis insbesondere bei Fragestellungen, die mit konventionellen Methoden nur schwer bzw. nicht zu lösen sind, finden kann.

Die Anwendung moderner numerischer Methoden, wie z. B. der FEM, in Verbindung mit fortgeschrittenen Stoffmodellen für den Baugrund eröffnet Möglichkeiten, die den bisherigen Rahmen, in dem Bemessungen von geotechnischen Konstruktionen vorgenommen werden, sprengen.

Kolymbas et. al. [7] weisen darauf hin, dass eine an sich nicht notwendige Trennung (griech. Dichotomie) zwischen Standsicherheits- und Verformungsproblemen historisch

bedingt entstanden ist und eine lange Tradition hat. Die von den Autoren erwähnte Dichotomie zwischen Tragfähigkeits- und Verformungsbetrachtungen gilt nicht nur für die Geotechnik sondern streng genommen auch für Tragstrukturen des Hochbaus. Die Dichotomie zwischen Standsicherheits- und Verformungsproblemen war früher zweckmäßig, weil darauf aufbauend einfache Berechnungsansätze insbesondere für Tragfähigkeits- bzw. Standsicherheitsnachweise entwickelt werden konnten. Letztendlich fußt die Einführung des Teilsicherheitskonzeptes anhand konventioneller Berechnungsmethoden auch auf der getrennten Betrachtung zwischen Standsicherheits- und Verformungsproblemen. Bei Anwendung numerischer Methoden in Verbindung mit modernen Stoffmodellen für den Baugrund ist die o. g. Dichotomie entbehrlich und es eröffnen sich völlig neue Betrachtungsweisen sowohl für die Bemessung von geotechnischen Konstruktionen als auch für geotechnische Standsicherheitsuntersuchungen.

In Anlehnung an die bisher mit der FEM praktizierte Phi-c-Reduktion zur Herbeiführung des Grenzgleichgewichtes einer Böschung ist es z. B. denkbar, analoge Reduktionen wahlweise für die Festigkeiten der Bauteile einer geotechnischen Konstruktion vorzunehmen. Auf dieser Basis könnte ebenso eine Bemessung erfolgen. Entsprechende Sicherheiten sind zu definieren, die nicht den bisherigen Teilsicherheiten entsprechen müssen.

Ebenso kann insbesondere bei schwierigen geotechnischen Verhältnissen nicht nur ein Versagenszustand, sondern ein sich allmählich entwickelnder Prozess bis zum Versagen hin in eine Bemessung einfließen.

Auch im Hinblick auf die o. g. neuen Betrachtungsmöglichkeiten wären übereilte und insbesondere zu restriktive normative Regelungen kontraproduktiv.

Es sei aber auch darauf hingewiesen, dass zurzeit auch bei der Anwendung numerischer Methoden in der Geotechnik noch Grenzen gesetzt sind, wie z. B. für den Stabilitätsverlust des Baugrundes in Verbindung mit Bodenverflüssigung. Hierzu gibt es noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Es ist selbstverständlich, dass es hierzu in nächster Zukunft keine normativen Regelungen geben wird.

Abschließend möchten die Autoren sich dafür einsetzen, dass nicht zu viel Aufwand für zu detaillierte Regelungen für die Bemessung von geotechnischen Konstruktionen mit numerischen Methoden betrieben werden sollte und dementsprechend finanzielle Mittel maßvoll zur Verfügung gestellt werden sollten. Vielmehr ist es vorrangig, Rahmenbedingungen zu schaffen, dass nur hochqualifiziertes Personal zukünftig numerische Analysen durchführen wird. Für Schulungs- und Qualifizierungsprojekte sollten ausreichende finanzielle Mittel bereitgestellt werden.

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrages wurden Möglichkeiten und Grenzen bei der Bemessung geotechnischer Konstruktionen mit numerischen Methoden aufgezeigt. Es wurde deutlich, dass die Anwendung numerischer Methoden ein hohes Maß an Fachkenntnis des Anwenders erfordert. Dieses ist offensichtlich nur dann gewährleistet, wenn das Ingenieurpersonal entsprechend ausgebildet wird.

Weiterhin wurde auf den aktuellen Stand der Normungstätigkeit eingegangen. Es wurde das aktuell vorgeschlagene Vorgehen vorgestellt. Hierbei ist es erforderlich, dass zwei unabhängige Rechenläufe mit den beiden diskutierten Verfahren IFA und OFA durchgeführt werden, um ein abgesichertes Ergebnis zu erzielen. Es wurden aber auch offene Fragen angesprochen, wie z. B. die Frage der anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte.

Numerische Methoden sind ein wertvolles Hilfsmittel zur Lösung komplexer geotechnischer Aufgaben und haben sich vielfach bewährt. Hinsichtlich Ihrer Anwendung zur Bemessung von geotechnischen Konstruktion eröffnen sie neue Betrachtungsweisen.

## 6. Literatur

- [1] Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ (EANG) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, DGGT. 1. Auflage, Ernst & Sohn, 2013.
- [2] Handbuch Eurocode 7, Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regeln, 2., aktualisierte Auflage (2015). Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH.
- [3] Grabe, J.; Hettler, A.; Drewsen G.-F (2010): Zwischenruf: Entspricht die Anwendung der FEM in der Geotechnik dem Stand der Technik. Vorträge der Baugrundtagung 2010 in München, Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), S. 241-246.
- [4] Gudehus, G. et al. (2008): The soilmodels.info project. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32(12): 1571-1572.
- [5] Kolymbas, D. (2000): The misery of constitutive modelling. In: Constitutive Modelling of Granular Materials, 11-24.
- [6] Kolymbas, D.; Herle, I. (2016): Stoffgesetze für Böden. In: Grundbautaschenbuch, 8. Auflage (in Vorbereitung).
- [7] Kolymbas, D.; Fellin, W.; Schneider-Muntau, B.; Medicus, G., Schwarz, F. (2016): Zur Rolle der Materialmodelle beim Standsicherheitsnachweis. geotechnik 39(2), erscheint demnächst.
- [8] Plaxis. Reference Manual, 2012.
- [9] Potts, D.M; Zdravkovic, L. (2012): Accounting for partial material factors in numerical analysis. Géotechnique 62(12): 1053-1065.
- [10] von Wolffersdorff, P.-A. (2007): Wie soll die FEM in geotechnische Bemessungsvorschriften einfließen? Workshop: Bemessen mit Finite-Elemente-Methode, TU Hamburg-Harburg, Veröffentl. Inst. Geotechnik Nr. 14, Hrsg. J. Grabe, S. 133-144.
- [11] von Wolffersdorff, P.-A. (2009): Wie sind zukünftig moderne numerische Berechnungsverfahren in das Sicherheitskonzept der neuen Normengeneration eingebettet? 4. Symposium UMWELTGEOTECHNIK und 5. Freiburger GEOTECHNIK-Kolloquium, CiF e.V. publication 7, S. 50-65.