

Finite-Elemente-Berechnungen in der Geotechnik – Gedanken und Vorschläge zur Qualitätssicherung

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff
BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft

1 Einführung

Seit den 1980er Jahren zählen numerische Berechnungsverfahren, wie z. B. die Finite-Elemente-Methode (FEM) oder die Finite-Differenzen-Methode (FDM), zu den unverzichtbaren Werkzeugen im Ingenieurwesen. Die modernen, nutzerfreundlichen Programmsysteme ermöglichen eine einfache Handhabung, um Finite-Elemente-Modelle zu erstellen, die Finite-Elemente-Berechnungen durchzuführen und die Aufbereitung der Ergebnisse vorzunehmen. Somit sind die numerischen Methoden auch in der Geotechnik nicht mehr wegzudenken und haben zunehmend ihre Verbreitung gefunden.

Die Anwendung der Finite-Elemente-Methode oder anderer numerischer Berechnungsmethoden ermöglicht es nunmehr, komplexe, geotechnische Aufgaben, bei denen die Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund eine maßgebliche Rolle spielt und für die konventionelle Methoden der Boden- und Felsmechanik nicht mehr anwendbar sind, realitätsnah zu lösen. Der Einsatz moderner Software für die Finite-Elemente-Methode und die Finite-Differenzen-Methode umfasst folgende Anwendungsbereiche in der Geotechnik:

- Berechnungen von Spannungen und Verformungen
- Berechnungen von Grundwasserströmungen
- Standsicherheitsberechnungen
- Bemessungen von Grundbauwerken

Insbesondere bei der Ermittlung von Spannungen und Verformungen von Grundbauwerken und des umgebenden Baugrundes haben sich die numerischen Methoden als ein nützliches Werkzeug erwiesen. In Bild 1 sind das verformte Finite-Elemente-Netz einer

3-fach verankerten Verbaukonstruktion¹ im Endaushubzustand sowie die dazugehörigen Scherspannungen dargestellt.

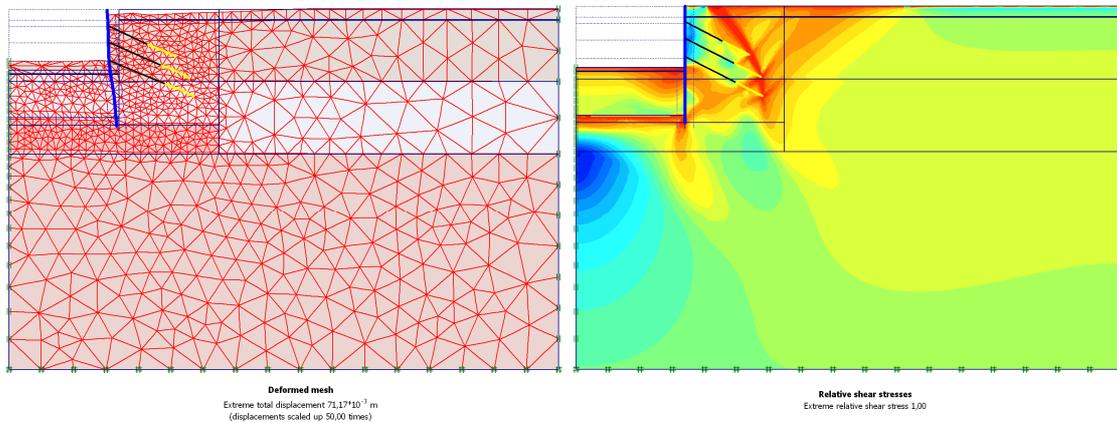


Bild 1 3-fach verankerte Schlitzwand: verformtes Finite-Elemente-Netz (links) und relative Scherspannungen (rechts)

Grundwasserströmungsberechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode sind in Verbindung mit Standsicherheitsuntersuchungen für wasserbauliche Anlagen ein weiteres, wichtiges und verbreitetes Anwendungsgebiet. Gekoppelte Grundwasserströmungs-Spannungs-Verformungs-Berechnungen sind zwar mittlerweile möglich, jedoch steht ihre praktische Anwendung noch am Anfang.

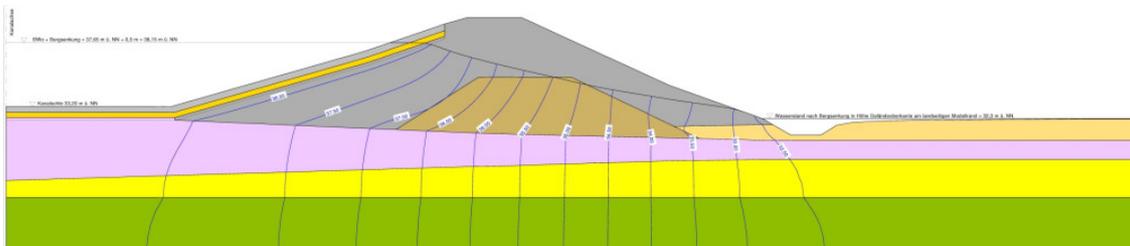


Bild 2 Durchströmungsberechnung eines Dammes: Sickerlinie mit Potenziallinien als Ergebnis einer stationären Strömungsberechnung mit FEM

In Bild 2 ist das Ergebnis einer stationären Grundwasserströmungsberechnung am Beispiel eines durchströmten Dammbauwerkes dargestellt.

Bei Standsicherheitsberechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode werden auf der Grundlage des einfachen elastoplastischen Mohr-Coulomb-Modells die Scherparameter $\tan \phi$ und c so lange reduziert (Phi-c-Reduktion), bis sich der Grenzzustand im Berech-

¹ Das gezeigte Beispiel wurde als Benchmark Test Nr. 3 des Arbeitskreises Numerik der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (Schweiger 2000) für umfangreiche Vergleichsberechnungen verwendet.

nungsmodell einstellt. Mit dieser Vorgehensweise können insbesondere komplexe Versagensmechanismen in Verbindung mit der maßgeblichen Sicherheit ermittelt werden. In Bild 3 ist ein solcher nicht kreisförmiger, zusammengesetzter Versagensmechanismus für ein Dammbauwerk gezeigt. Die Anwendung der FEM für Standsicherheitsuntersuchungen mit Hilfe der Phi-c-Reduktion ist besonders geeignet, um maßgebende komplexe Versagensmechanismen, die mit konventionellen Standsicherheitsberechnungsmethoden (z. B. Lammellenverfahren mit kreisförmigen Gleitflächen) nicht gefunden werden können, aufzuzeigen.

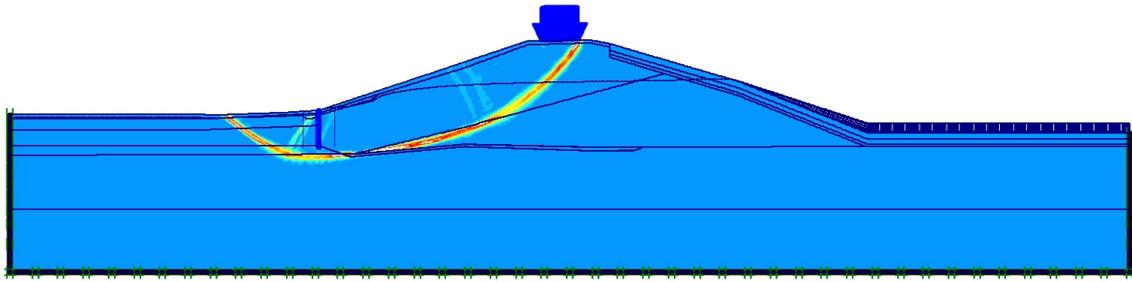


Bild 3 Versagensmechanismus in einem Dammbauwerk, Ergebnis einer Standsicherheitsberechnung mit FEM

In (von Wolffersdorff 2007, 2009) wurden Wege aufgezeigt, wie auf der Grundlage des derzeit gültigen Teilsicherheitskonzeptes für die Grenzzustände der Tragfähigkeit GZ 1B² die Beanspruchungen mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen ermittelt werden kann (siehe Bild 4). Die Anwendungsmöglichkeiten von numerischen Methoden für die Bemessung von Grundbauwerken sind noch in der Diskussion. Erste Anwendungen haben jedoch gezeigt, dass die in (von Wolffersdorff 2007, 2009) beschriebenen Wege zweckmäßig sind.

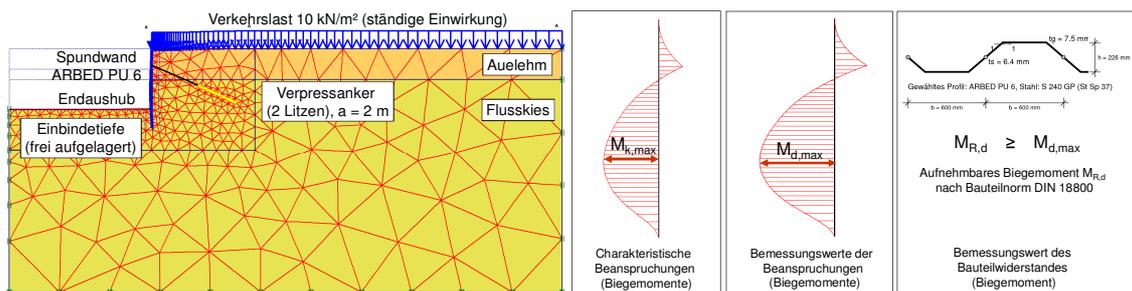


Bild 4 Bemessung einer einfach verankerten Spundwand anhand einer Finite-Elemente-Berechnung: Finite-Elemente-Modell (links), Nachweis des erforderlichen Spundwandprofils (rechts)

² Ab 2011 wird die neue Normgeneration auf der Grundlage der Europäischen Dachnorm DIN EN 1997-1 in Verbindung mit der Ergänzungsnorm DIN 1054:2010-12 eingeführt. Danach werden diese Grenzzustände bei Versagen des Bauwerks bzw. Bauteils als STR oder bei Versagen des umgebenden Baugrundes als GEO-2 bezeichnet.

Die Anwendung der FEM oder FDM für dreidimensionale geotechnische Aufgabenstellungen ist im Vergleich zu 2D-Anwendungen viel komplexer und erfordert einen erheblich höheren Aufwand. Dennoch haben auch 3D-Anwendungen – insbesondere durch die breitere Verfügbarkeit von 64-Bit-Software – zunehmend Eingang in die geotechnische Ingenieurpraxis gefunden.

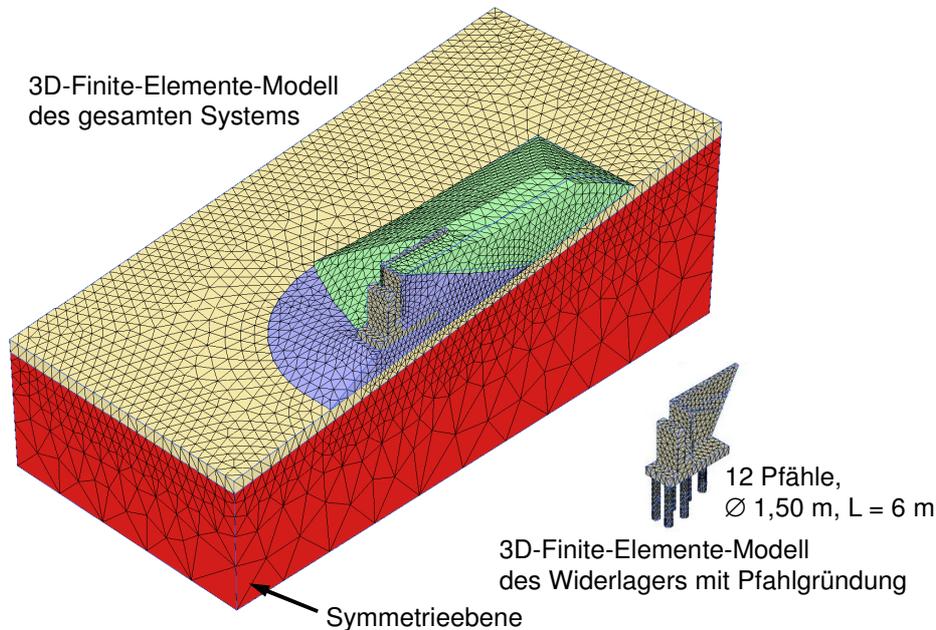


Bild 5 3D-Finite-Elemente-Modell eines Brückenwiderlagers

In Bild 5 ist das 3D-Finite-Elemente-Modell eines auf Pfählen gegründeten Brückenwiderlagers dargestellt. Trotz Ausnutzung der Symmetrie besitzt dieses FE-Modell 108 787 Elemente bzw. 155 790 Knoten.

In dem vorliegenden Beitrag wird aufgezeigt, dass die gegenwärtigen Anwendungsmöglichkeiten von numerischen Methoden, die auch immer komplexere Modellierungen einschließen, neue Herausforderungen im Umgang mit den zur Verfügung stehenden Finite-Elemente-Programmen nach sich ziehen. Dabei wird zunächst auf die Besonderheiten und Schwierigkeiten bei der Anwendung der numerischen Methoden in der Geotechnik hingewiesen. Darauf aufbauend werden die Grundzüge eines modernen effizienten Qualitätsmanagements für numerische Berechnungen aufgezeigt, wobei die Qualifizierung des ausführenden Ingenieurpersonals im Mittelpunkt steht.

2 Besonderheiten der Finite-Elemente-Modellierung in der Geotechnik

Bei vielen Anwendungsgebieten der FEM, wie z. B. Automobilbau, Flugzeugbau, Maschinenbau oder Medizintechnik, kann die reale Geometrie einschließlich des strukturellen Aufbaus weitgehend adäquat in ein Finite-Elemente-Modell überführt werden.

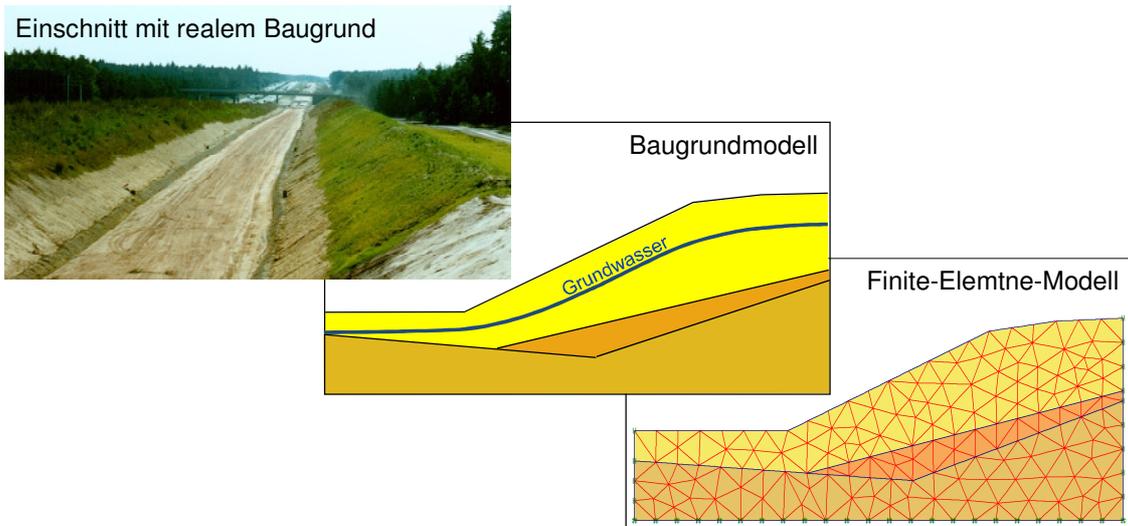


Bild 6 Phasen der Modellierung vom realen Baugrund bis zum Finite-Elemente-Modell

In der Geotechnik jedoch ist der Vorgang der Modellierung vom realen Baugrund über die Erstellung eines Baugrundmodells bis hin zur Entwicklung eines numerischen Modells viel komplizierter und erfordert einen viel höheren Abstrahierungsgrad. Bild 6 zeigt die 3 Phasen der Modellierung am Beispiel eines Einschnittes. Da auch im Falle umfangreicher geotechnischer Erkundung nur unvollständige Informationen zur Geometrie des Schichtenaufbaus, zu den Grundwasserverhältnissen und den Eigenschaften der Baugrundsichtung vorliegen, können im Vergleich zu den Modellen in anderen Zweigen des Ingenieurwesens nur sehr unvollkommene Baugrundmodelle erstellt werden.

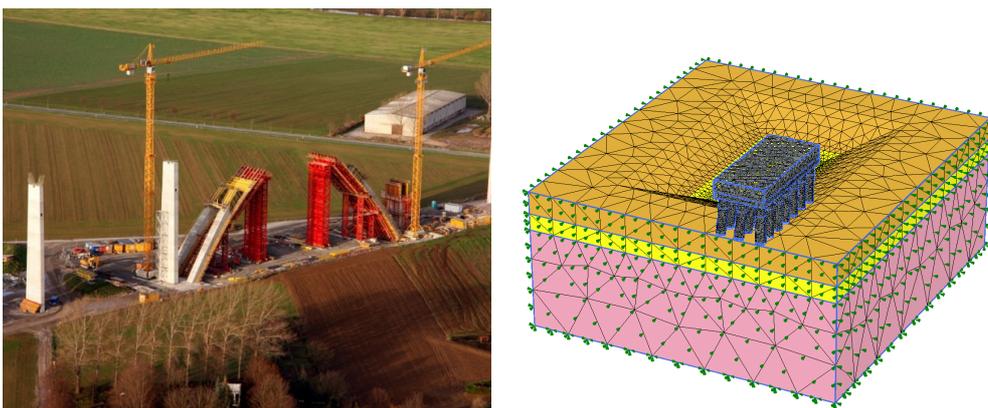


Bild 7 Festlegung des Berechnungsausschnittes: umgebender, realer Baugrund (links), Finite-Elemente-Modell für Pfahlgründung des Brückenbogens (rechts)

Eine weitere Schwierigkeit bei der Anwendung der FEM bzw. FDM in der Geotechnik ergibt sich dadurch, dass ein endlicher Berechnungsausschnitt festgelegt werden muss (siehe Bild 7). Obwohl in (Meißner et al. 2002, von Wolffersdorff Schweiger 2008) Empfehlungen zur Wahl der Größe des Ausschnittes gegeben werden, muss davon ausgegangen werden, dass die Lage der Modellränder in der Regel die Berechnungsergebnisse beeinflussen. Durch die Verwendung der neuartigen Stoffmodelle (Benz 2007, Niemunis Herle 1997), die auch eine erhöhte Steifigkeit bei sehr kleinen Dehnungen berücksichtigen, kann der Einfluss der Modellränder auf die Berechnungsergebnisse der FE-Berechnungen zwar reduziert, jedoch nicht völlig unterdrückt werden.

Schließlich bereitet bei geotechnischen Aufgabenstellungen das komplexe Materialverhalten des Baugrundes die hauptsächlichen Schwierigkeiten. Das Schema in Bild 8 zeigt, dass in Abhängigkeit von der Baugrundsituation geeignete Stoffmodelle für Boden oder Fels auszuwählen sind. Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass das Materialverhalten von Boden oder Fels infolge des Zusammenwirkens von Feststoff, Wasser und Luft bestimmt wird und auch zeitabhängiges Verhalten einschließt. Schließlich liegt nur eine unvollständige Datenbasis oder sogar keine Datenbasis für die Bestimmung der Materialparameter vor.

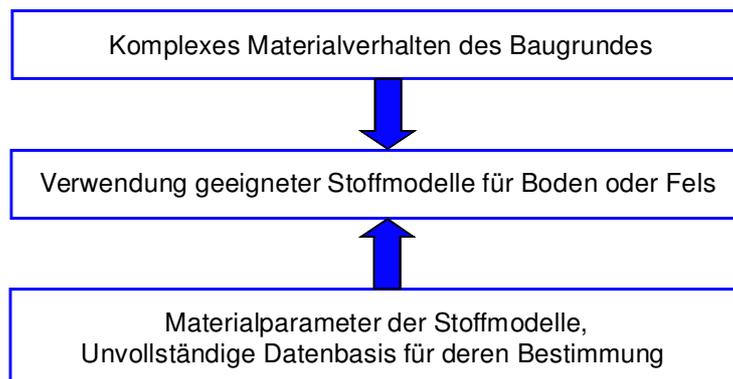


Bild 8 Schema für den Umgang mit Stoffmodellen für Boden und Fels

Die maßgeblichen Besonderheiten und Schwierigkeiten bei der Anwendung numerischer Methoden in der Geotechnik können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Unabhängig von der Nutzerfreundlichkeit und der Leistungsfähigkeit der verwendeten Finite-Elemente-Programme können in der Geotechnik im Unterschied zu vielen anderen Anwendungsgebieten nur weitgehend unvollkommene Finite-Elemente-Modelle, die mehr oder weniger bedingt realitätsnah sind, erstellt werden.
2. Im Unterschied zu anderen Anwendungsgebieten, bei denen Prototypen verfügbar sind, mit denen Modelle kalibriert und Simulationen durchgeführt werden können, sind Simulationen für die in den meisten Fällen ein-

zigartigen, geotechnischen Aufgabenstellungen nicht möglich. Stattdessen können nur rechnerische Vorhersagen, die gegebenenfalls durch baubegleitende Messungen überprüft und ertüchtigt werden können, vorgenommen werden.

3. In Folge der unzureichenden Datenbasis für die Bestimmung der Materialparameter der Stoffmodelle und der sich zwangsläufig daraus ergebenden Anfechtbarkeit der Berechnungsergebnisse entsprechen Finite-Elemente-Berechnungen nicht den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ und nur in Einzelfällen dem „Stand der Technik“ (Grabe et al. 2010).

Jeder Ersteller von Finite-Elemente-Berechnungen muss sich mit diesen Besonderheiten und Schwierigkeiten auseinandersetzen, unabhängig von seiner Qualifikation und seinen Erfahrungen bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode.

3 Aktuelle Probleme des Qualitätsmanagements numerischer Berechnungen in der Geotechnik

Die komfortablen Nutzeroberflächen zur Ein- und Ausgabe vieler Finite-Elemente-Programme ermöglichen es, unerfahrenen und nicht ausreichend qualifizierten Programm Nutzern Finite-Elemente-Modelle zu erstellen, FE-Berechnungen durchzuführen und Ergebnisse auszuwerten.

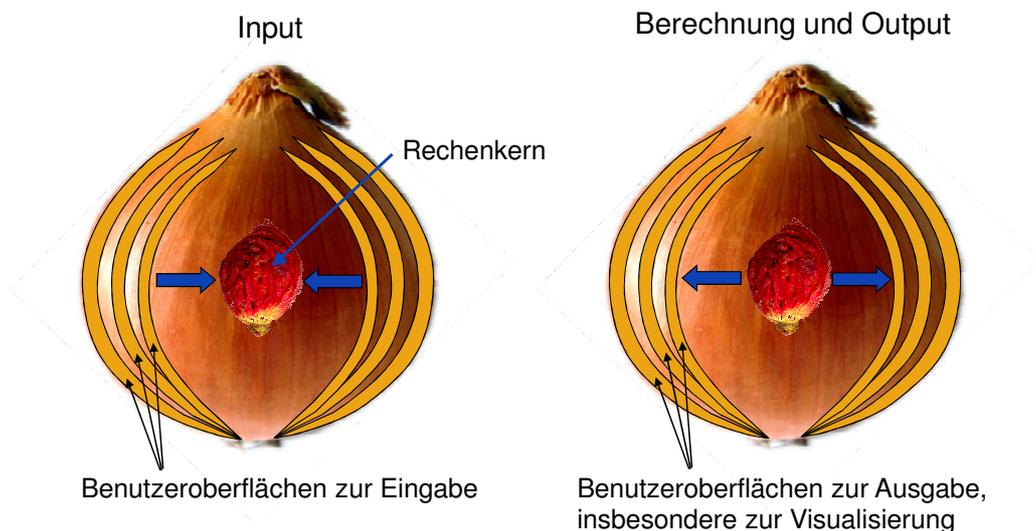


Bild 9 Anwendung moderner, nutzerfreundlicher Finite-Elemente-Programme – Analogie zu einer Zwiebel

Wie in Bild 9 anhand eines Zwiebelaschenmodells veranschaulicht ist, hat der Nutzer in der Regel keinen direkten Zugriff mehr auf den eigentlichen Rechenkern des Programms, d. h. er kann die Berechnung durchführen ohne über ausreichende Kenntnisse

der Finiten-Elemente-Methode, insbesondere der Stoffmodelle für Boden und Fels sowie über nichtlineare Berechnungsalgorithmen verfügen.

Gerade komplexe 3D-Finite-Elemente-Berechnungen liefern so viele Output-Daten, dass sie trotz der üblichen grafischen Aufbereitung und Darstellung einen beträchtlichen Umfang erlangen können. Eine vollständige Dokumentation einer Finite-Elemente-Berechnung ist hinsichtlich der Modellerstellung, der verwendeten Materialparameter und des Berechnungsablaufes nach wie vor möglich. Die Berechnungsergebnisse können jedoch auch in aufbereiteter grafischer Form nur noch gezielt entsprechend der Vorgaben der Aufgabenstellung dokumentiert werden, da sonst vor allem bei 3D-Berechnungen ein „Information Overflow“ eintreten kann.

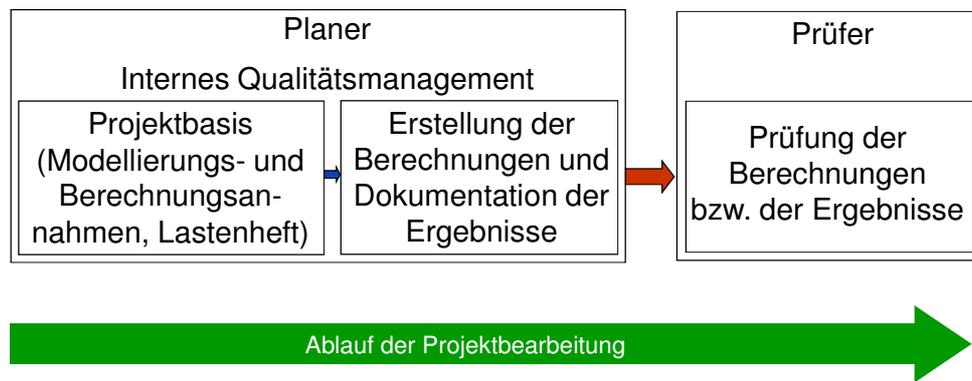


Bild 10 Herkömmlicher Projekttablauf mit nachfolgender Prüfung

Diese genannten Probleme können durch ein herkömmliches internes Qualitätsmanagement, d.h. „4- oder 6-Augen-Prinzip“ einschließlich sorgfältiger Überprüfung der Berechnung durch Dritte nicht überwunden werden. Es ist außerdem festzustellen, dass komplexe Berechnungen, wie z. B. umfangreiche 3D-Finite-Elemente-Berechnungen, im strengen Sinne nicht mehr prüfbar sind. Das bedeutet, dass die herkömmliche Projektbearbeitung (siehe Bild 10), bei der der Planer die Finite-Elemente-Berechnung und Dokumentation der Ergebnisse mit internem Qualitätsmanagement durchführt und erst nachfolgend die Prüfung durch einen Prüferingenieur oder einen Prüfsachverständigen für Erd- und Grundbau vorgenommen wird, nicht mehr geeignet ist.

4 Vorschläge für ein verbessertes Qualitätsmanagement bei numerischen Berechnungen in der Geotechnik

Um auch zukünftig komplexe numerische Berechnungen effizient und zuverlässig in geotechnische Projekte einzubinden, ist es notwendig, dass alle am Projekt Beteiligten, z. B. Auftraggeber, Prüferingenieur, Genehmigungsbehörde sowie Planer bzw. Ersteller der numerischen Berechnungen vor Beginn der Projektbearbeitung und während der Projektbearbeitung zusammenarbeiten. Insbesondere wird es unerlässlich sein, dass der Prüfer vor Beginn der Erstellung der Berechnungen in das Projekt eingebunden wird.

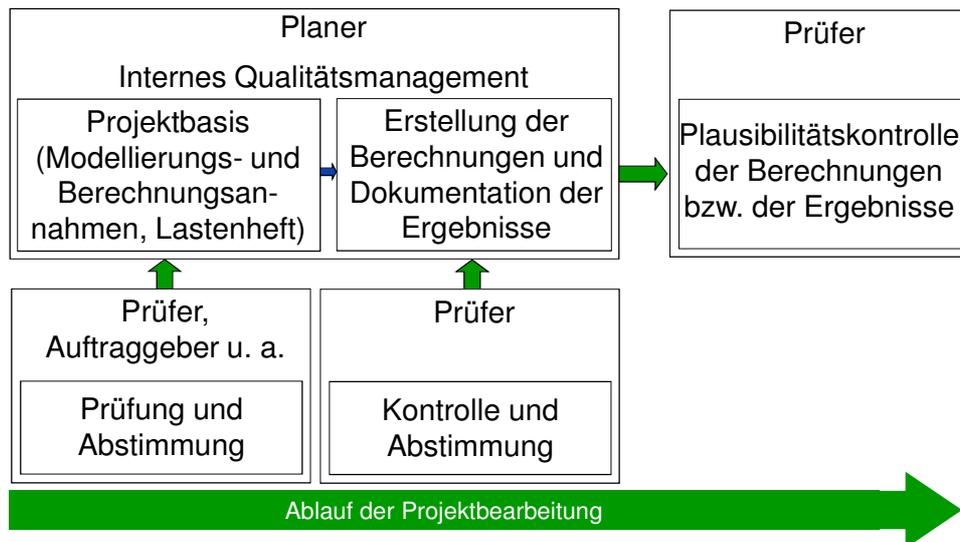


Bild 11 Neuer Projektablauf mit begleitender Prüfung bzw. Plausibilitätskontrolle

In Bild 11 ist ein Vorschlag für einen verbesserten Projektablauf dargestellt. Im Unterschied zu dem bisherigen Projektablauf (siehe Bild 10) wird der Prüfer bereits bei der Entwicklung der Projektbasis, in der die wesentlichen Modellierungs- und Berechnungsannahmen festgelegt werden, zur Abstimmung mit eingebunden. Da es aus Zeit- und Kostengründen in der Regel nicht möglich sein wird, dass der Prüfer im Rahmen seiner anschließenden Prüfung eine vergleichende numerische Berechnung durchführen kann und er nicht in allen Fällen vergleichende Berechnungen oder Abschätzungen mit einfachen konventionellen Methoden vornehmen kann, wird es ebenfalls notwendig sein, ihn bei der Festlegung des Umfangs der Ergebnisdokumentation zu beteiligen. Die anschließende Prüfung kann dann im Wesentlichen auf Plausibilitätskontrollen beschränkt bleiben, da ohnehin komplexe numerische Berechnungen nachträglich nicht mehr prüfbar sind.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung des neuen Projektablaufes ist jedoch, dass der Modellierungsingenieur oder das Ingenieurteam über überdurchschnittliche Qualifikationen auf dem Gebiet der Numerik in der Geotechnik verfügt. Die in der Geotechnik tätigen Modellierungsingenieure sind meistens nicht in kontinuierlich tätigen Teams oder Abteilungen mit zum Teil selbst organisierender Weiterbildung wie z. B. im Maschinenbau, in der Autoindustrie oder in der Flugzeugindustrie eingebunden. In vielen Fällen sind sie als Einzelarbeiter tätig. Studienkenntnisse reichen zwar in der Regel für eine sichere Beherrschung der Nutzeroberflächen und den Umgang mit den Programmen auf dem Niveau der Handbücher aus, jedoch genügen sie nicht, um souverän mit den komplexen Finite-Elemente-Programmen umzugehen und die Ergebnisse sicher bewerten und interpretieren zu können.

Es wird daher empfohlen, ein qualifiziertes Weiterbildungssystem mit einem einheitlichen Anforderungsprofil und gegebenenfalls zertifiziertem Abschluss zu entwickeln und einzuführen. Dabei sollten die erforderlichen Erkenntnisse auf folgenden Gebieten vermittelt werden:

- Moderne, theoretische Bodenmechanik
- Kontinuumsmechanik
- Theorie der Finiten-Elemente
- Numerische Mathematik
- Stoffmodelle für Boden und Fels

Darüber hinaus wird für größere, in der Geotechnik tätige Firmen empfohlen, Teams von Modellierungsingenieuren, die sich durch ihre Zusammenarbeit und Kommunikation weiterentwickeln können, zu bilden.

Literatur

Benz. Th. (2007)

Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences, Universität Stuttgart, Mitteilungen des Institutes für Geotechnik Nr. 55, Herausg. P.A. Vermeer, 2007

Grabe J., Hettler, A. Drewsen G.-F (2011)

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

Meißner, H. et al. (2002)

Baugruben – Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 3, Geotechnik 25(2002)1, S. 44 – 50

Niemunis, A., Herle, I. (1997)

Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 2(1997)1, S. 279 – 299

Schweiger, H. F. (2000)

Ergebnisse des Berechnungsbeispiels Nr. 3 „3-fach verankerte Baugrube“ (Gegenüberstellung der eingesandten Berechnungsergebnisse), Workshop Verformungsprognose für Tiefe Baugruben, AK 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2000, S. 1 – 67

von Wolffersdorff, P.-A., Schweiger, H. F. (2008)

Numerische Verfahren in der Geotechnik, Kap. 1.9, Grundbautaschenbuch Teil 1, 7. Aufl., Hrsg. WITT, K.J, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2008, S. 501 – 557

von Wolffersdorff, P.-A. (2007)

Wie soll die FEM in geotechnische Bemessungsvorschriften einfließen? Workshop Bemessen mit Finite-Elemente-Methode, Technische Universität Hamburg-Harburg, Veröffentl. Inst. Geotechnik Nr. 14, Hrsg. J. Grabe, S. 133 – 144, Hamburg 2007

von Wolffersdorff, P.-A. (2009)

Wie sind zukünftig moderne numerische Berechnungsverfahren in das Sicherheitskonzept der neuen Normengeneration eingebettet?, 4. Symposium UMWELTGEOTECHNIK & 5. Freiburger GEOTECHNIK-Kolloquium 2009, CiF e.V. publication 7, S. 50 – 65