

Wie soll die FEM in geotechnische Bemessungsvorschriften einfließen?

Priv. Doz. Dr.-Ing. Peter-Andreas von Wolffersdorff

1 Einführung

Durch die immer nutzerfreundlichere Software hat sich der Anwenderkreis der Finite-Elemente-Methode (FEM) in der Geotechnik, der in der Vergangenheit vorrangig durch die spezialisierten Modellingenieure geprägt war, auch zunehmend auf die vielfältig tätigen Geotechniker erweitert. Es ist daher notwendig geworden, dass die verstärkte Anwendung der FEM angemessen in den maßgebenden Bemessungsvorschriften berücksichtigt wird.

In der neuen DIN 1054:2005-01 [1], die ab 2008 als alleinige Leitnorm für die Sicherheit im Erd- und Grundbau verbindlich gelten wird, sind die Regelungen für die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, die prinzipiell auch die Anwendung der FEM einschließen, enthalten. In Ergänzung dazu finden sich Regelungen zur Anwendung der FEM in einigen Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), z.B. [2][3].

Das Grundprinzip für die Bemessung von Bauwerken und Bauteilen nach dem Teilsicherheitskonzept besteht gemäß DIN 1054:2005-01 darin, dass charakteristische Beanspruchungen in oder an einem geotechnischen Bauwerk mit charakteristischen Werten der auf das Bauwerk einwirkenden Größen berechnet werden und anschließend die Bemessungsbeanspruchungen, die sich aus den maßgebenden charakteristischen Beanspruchungen durch Multiplikation mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten ergeben, den Bemessungswerten der Widerstände zum Nachweis ausreichender Abmessungen gegenübergestellt werden, unabhängig davon, ob der Grenzzustand der Tragfähigkeit im Bauwerk oder im Baugrund auftritt. Diese Vorgehensweise, die im Rahmen der angestrebten Harmonisierung der europäischen Normen auch im Eurocode 7 als „Nachweisverfahren 2“ Eingang gefunden hat, ermöglicht es prinzipiell, Bemessungen von Bauwerken im Erd- und Grundbau unter Verwendung nichtlinearer Finite-Elemente-Berechnungen durchzuführen.

Da in der neuen DIN 1054:2005-01 nur wenige direkte Bezüge zur Anwendung der FEM enthalten sind, sind weiterführende Hinweise hilfreich. Die vorliegende Veröffentlichung soll hierzu einen Beitrag leisten.

2 Nachweiseverfahren zur Bemessung mit der Finite-Elemente-Methode

Die in der Einführung beschriebene Vorgehensweise zur Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept beschreibt das Nachweisverfahren für den „Grenzzustand des Versagens von Bauwerken und Bauteilen“, der auch als Grenzzustand 1B bezeichnet wird. Gemäß Eurocode 7 gibt es diese Bezeichnung nicht, stattdessen werden der Grenzzustand, der im Bauwerk eintritt, als „STR“ und der Grenzzustand, der im Baugrund eintritt, als „GEO“¹ bezeichnet.

Abb. 1 zeigt, wie eine Berechnung der charakteristischen Beanspruchungen mit der FEM in den Ablauf des Nachweisverfahrens für den Grenzzustand GZ 1B bzw. GEO-2/STR eingebunden ist.

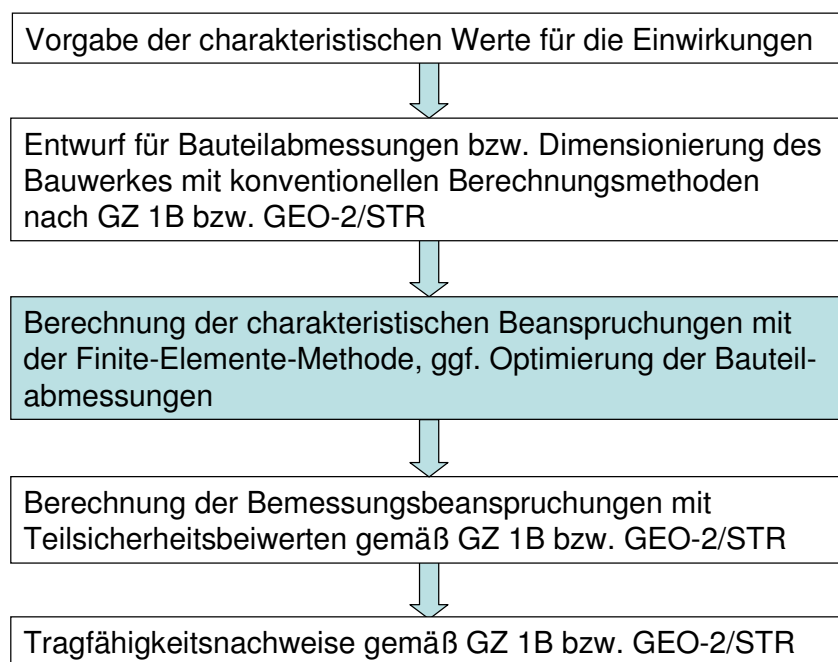


Abb. 1: Anwendung der FEM für Nachweise der Tragfähigkeit GZ 1B bzw. GEO-2/STR

¹ Die DIN 1054:2005-01 wird zukünftig durch den Eurocode 7 in Verbindung mit einem Nationalen Anhang sowie einer nationalen Ergänzungsnorm (DIN 1054:2008-01) ersetzt werden. In dieser neuen deutschen Vorschriftengeneration wird der im Zusammenhang mit dem „Nachweisverfahren 2“ auftretende geotechnische Grenzzustand „GEO-2“ genannt werden.

Da Finite-Elemente-Programme in der Regel keine Bemessungsoptionen bzw. Bemessungsstrategien enthalten, empfiehlt es sich, eine Vordimensionierung anhand konventioneller Berechnungsmethoden vorzunehmen oder Bauwerks- bzw. Bauteilabmessungen empirisch anzunehmen.

Die Anwendung der FEM ist vor allem bei Bemessungsaufgaben mit ausgeprägter Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund zweckmäßig. Eine möglichst realitätsnahe Finite-Elemente-Berechnung ist die zwingende Voraussetzung für eine optimierte Bemessung. Zu stark vereinfachte Annahmen bei der Erstellung des Finite-Elemente-Modells (Modellfehler) können dazu führen, dass bei der Optimierung das auf Erfahrung im Umgang mit konventionellen Bemessungsmethoden beruhende Sicherheitsniveau nicht erreicht wird. Zudem bedingt die Komplexität des Materialverhaltens des Baugrundes, dass bei geotechnischen Aufgaben immer nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Beanspruchungen im bzw. an dem Bauwerk/Bauteil durchgeführt werden müssen. Der die Finite-Elemente-Berechnungen durchführende Planungsingenieur oder Geotechnikingenieur muss über überdurchschnittliche Kenntnisse auf folgenden Fachgebieten verfügen: Finite-Elemente-Methode, Tragwerksstatik, Kontinuumsmechanik, Bodenmechanik, Felsmechanik, Geohydrologie.

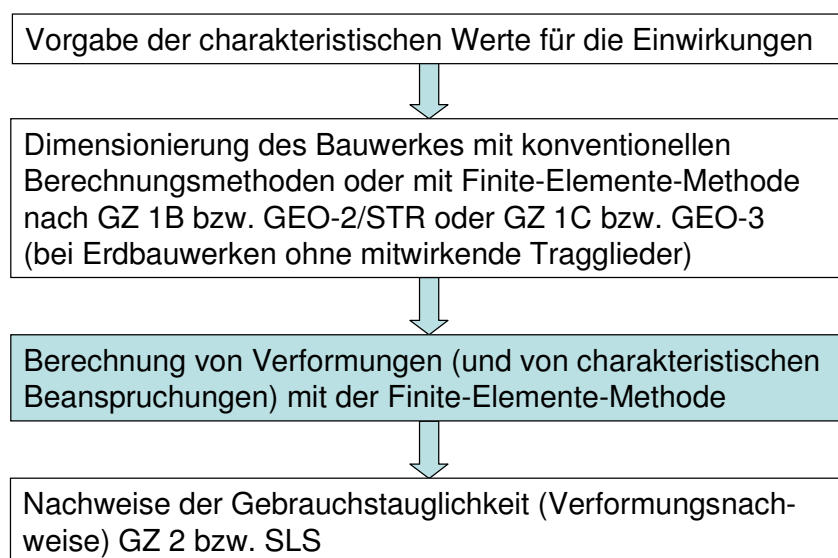


Abb. 2: Anwendung der FEM für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit GZ 2

Der große Vorteil der Anwendung der FEM bei Bemessungsaufgaben besteht gegenüber konventionellen Berechnungsverfahren, die meistens auf Grenzzustandsbe-

trachtungen beruhen, darin, dass gleichzeitig auch der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, der in der Regel sich auf einzuhaltende Verformungen bzw. Verschiebungen stützt, erbracht werden kann (siehe Abb. 2).

Die in Abb.1 und Abb. 2 dargestellten Abläufe für den Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand GZ 1B (bzw. GEO-2/STR) und für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zeigen, dass bei gleicher Bemessungssituation nur ein und dieselbe Finite-Elemente-Berechnung notwendig ist.

Bei Erdbauwerken, z.B. Dämmen, Deichen oder Deponien, kann zur Dimensionierung der Böschungen die FEM alternativ oder in Ergänzung zu den konventionellen Verfahren zur Berechnung der Gesamtstandsicherheit, z.B. dem Lamellenverfahren (kreisförmige oder polygonale Gleitflächen), dem Blockgleiten oder dem Verfahren mit Mehrkörpermechanismen, angewendet werden. Der dabei zugrunde liegende Grenzzustand des Verlustes der Gesamtstandsicherheit unterscheidet sich hinsichtlich der Einbindung der Berechnungsverfahren jedoch von dem Grenzzustand des Versagens von Bauwerken und Bauteilen darin, dass die Standsicherheitsberechnungen mit Bemessungswerten der Einwirkungen und Bemessungswerten für die Scherfestigkeit des Bodens durchgeführt werden. Dieser Grenzzustand heißt nach DIN 1054:2005-02 „GZ 1C“ und nach Eurocode 7 „GEO“².

Die Anwendung der FEM für Berechnungen der Gesamtstandsicherheit unterscheidet sich grundsätzlich von den nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnungen für Bemessungsaufgaben nach GZ 1B, da bei GZ 1C nur eine Grenzzustandsanalyse, bei der Verformungen eine vernachlässigbare Rolle spielen, durchzuführen ist. Während der Finite-Elemente-Berechnung, bei der das einfache linear-elastische idealplastische Mohr-Coulomb-Modell zur Erfassung des Materialverhaltens des Bodens ausreicht, werden die Scherparameter $\tan \varphi$ und c schrittweise so lange verkleinert (Phi-c-Reduktion) bis das Grenzgleichgewicht eintritt.

Die Grenzzustandsanalyse mit FEM kann nach 2 verschiedenen Varianten durchgeführt werden (siehe Abb. 3 und Abb. 4). In Abb. 3 ist der Ablauf für einen Standsicherheitsnachweis nach Variante 1 dargestellt. Dabei wird die Finite-Elemente-Berechnung mit Bemessungseinwirkungen und mit charakteristischen Werten für die Scherfestigkeit durchgeführt. Im Ergebnis ist nachzuweisen, dass die sich aus der

Phi-c-Reduktion ergebende Sicherheitsreserve größer als der Teilsicherheitsbeiwert für die Scherparameter $\tan \varphi$ und c ist ($\gamma_\varphi = \gamma_c$).

Variante 1

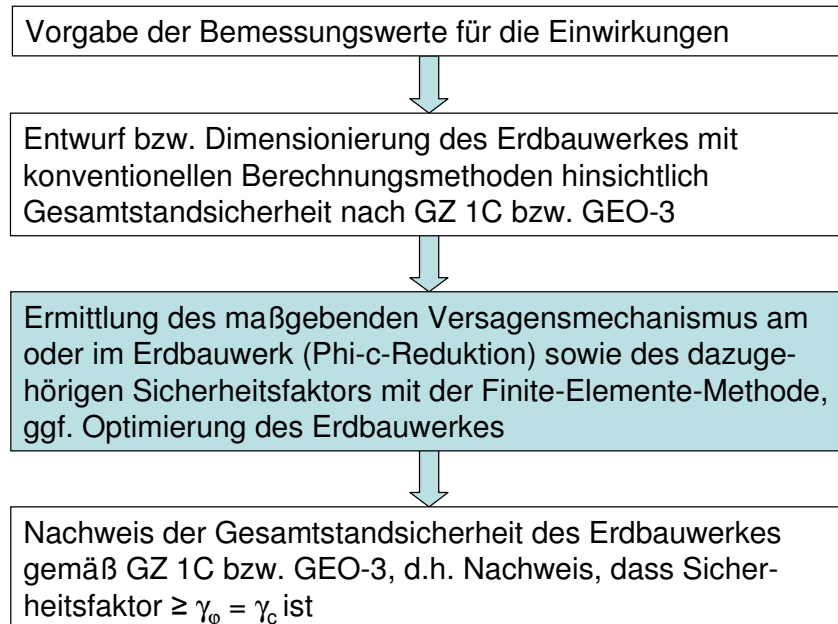


Abb. 3: Anwendung der FEM für Nachweise der Gesamtstandsicherheit GZ 1C bzw. GEO-3 (Variante 1)

Bei einer Grenzzustandsanalyse nach der Variante 2, die in Abb. 4 dargestellt ist, wird die Finite-Elemente-Berechnung mit Bemessungseinwirkungen und mit Bemessungswerten für die Scherfestigkeit durchgeführt. Im Ergebnis ist nachzuweisen, dass die sich aus der Phi-c-Reduktion ergebende Sicherheitsreserve ≥ 1 ist.

Die Anwendung der FEM für Bemessungsaufgaben nach den übrigen Grenzzuständen der Tragfähigkeit gemäß DIN 1054:2005-01 (GZ 1A) bzw. Eurocode 7 (EQU, UPL, HYD) ist nicht zielführend, da in der Regel nur einfache Grenzzustandsbedingungen für die Nachweisführung erforderlich sind.

In den Abschnitten 4.1 bis 4.3 werden Beispiele zur Anwendung der FEM für die Bemessung von geotechnischen Bauwerken bzw. Bauteilen vorgestellt.

² Das dem GZ 1C zugrunde liegende Prinzip wird im Eurocode 7 als „Nachweisverfahren 3“ bezeichnet. In der neuen deutschen Vorschriftengeneration wird der im Zusammenhang mit dem „Nachweisverfahren 3“ auftretende geotechnische Grenzzustand „GEO-3“ genannt werden.

Variante 2

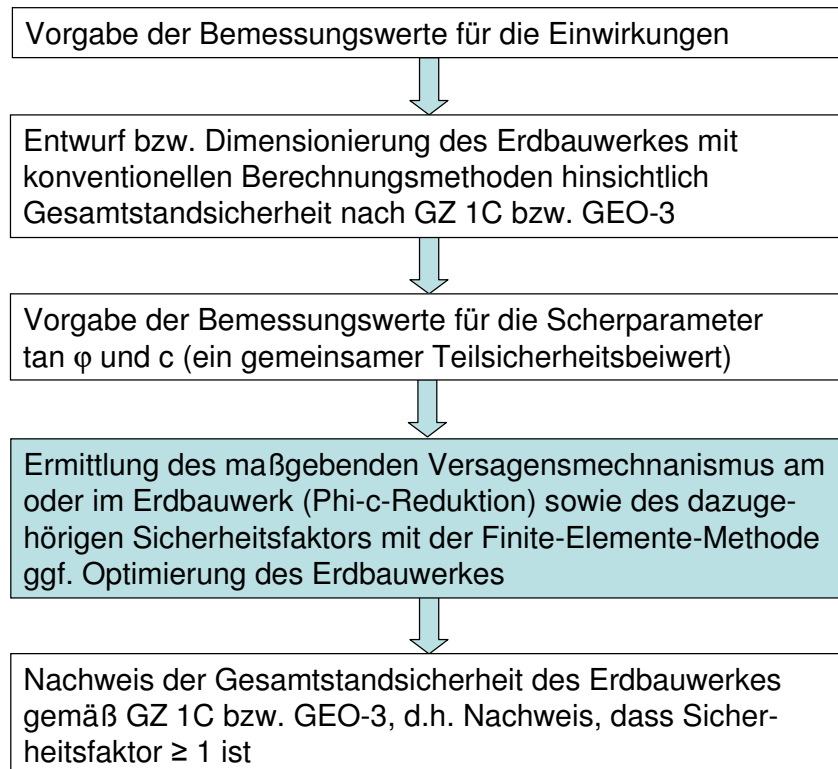


Abb. 4: Anwendung der FEM für Nachweise der Gesamtstandsicherheit GZ 1C bzw. GEO-3 (Variante 2)

3 Berechnungskennwerte für die Bemessung mit FEM

Die FEM sollte sowohl für die Bemessung als auch für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit immer mit dem Anspruch größerer Realitätsnähe im Vergleich zu konventionellen Berechnungsverfahren angewendet werden. Demzufolge gelten hohe Anforderungen an die Materialparameter für Bauwerk und Baugrund. Insbesondere die Materialparameter, die die Stoffmodelle für den Baugrund erfordern, sollten im Sinne wahrscheinlicher, charakteristischer Werte ohne Sicherheitszuschläge oder Sicherheitsabschläge bestimmt oder anhand von Erfahrungen angesetzt werden.

In [3] wird empfohlen, wirklichkeitsnahe untere und obere charakteristische Werte der Bodenkenngrößen anzugeben und ggf. die Bemessungsbeanspruchungen zum Nachweis der Tragfähigkeit mit den auf der sicheren Seite liegenden Werten durchzuführen.

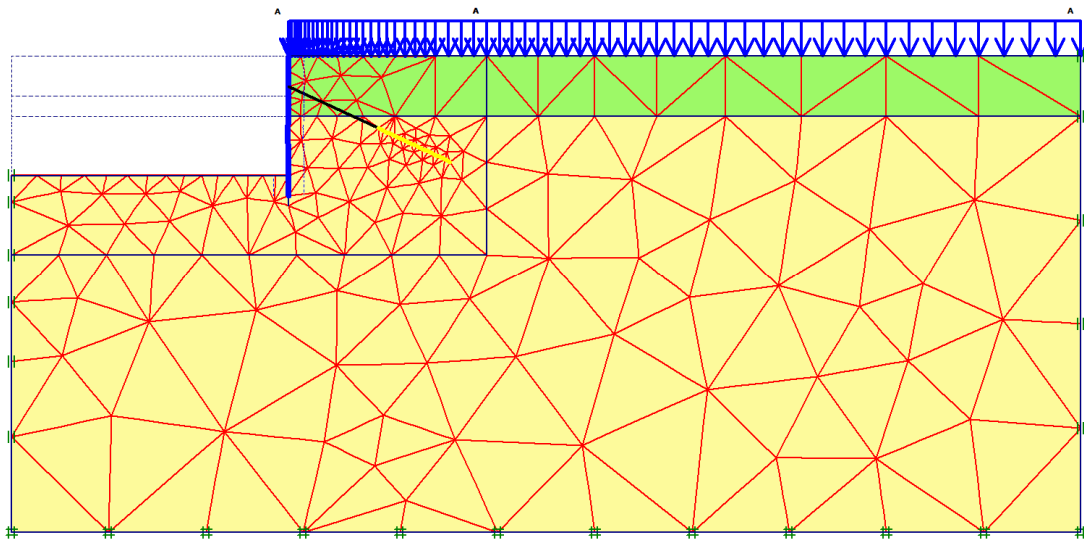


Abb. 5: Berechnungsbeispiel – einfach verankerte Spundwand

Da vor Beginn einer Finite-Elemente-Berechnung nicht immer absehbar ist, welche Parameter auf der sicheren Seite liegen, wird hier stattdessen vorgeschlagen, sowohl für die Bemessung als auch für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit die Parameter mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit zu verwenden.

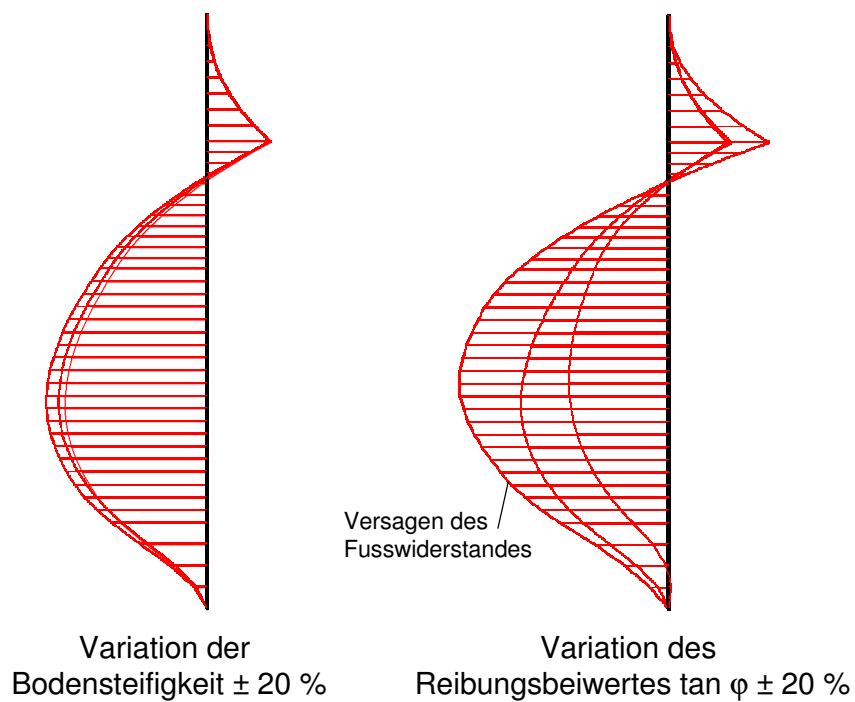


Abb. 6: Auswirkung von Parametervariationen auf die Größe der Biegemomente

In Fällen, in denen die Parameter nicht ausreichend im Sinne wahrscheinlicher, charakteristischer Parameter bestimmt werden können, sollten Parametervariationen mit vorgegebener Streubreite vorgenommen werden. Mit diesen Parametersätzen sind dementsprechend mehrere Finite-Elemente-Berechnungen im Sinne von Empfindlichkeitsstudien durchzuführen.

Abb. 5 zeigt das Berechnungsbeispiel einer einfach verankerten Spundwand, für die eine Empfindlichkeitsstudie durchgeführt worden ist. Es ist dabei unbedingt zu beachten, dass die Streuung der Steifigkeitsparameter auch die Größe der Bemessungsbeanspruchungen beeinflusst (siehe Abb. 6). Bei Empfindlichkeitsstudien sollten daher nicht nur die Variationen der Scherfestigkeitsparameter sondern auch die Variationen der Steifigkeitsparameter berücksichtigt werden.

4 Beispiele für die Anwendung der FEM für Bemessungsaufgaben

4.1 Plattengründung

Die Bemessung von Plattengründungen mit numerischen Methoden gehört seit Ende der 1970iger Jahre zum Stand der Technik. Dabei ist die Fundamentplatte oft das eigentliche Finite-Elemente-Modell und der Baugrund wird mit Bettungsmoduln oder nach dem auf der Elastizitätstheorie beruhenden Steifezahlverfahren modelliert, da dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle für das Gesamtsystem Fundamentplatte-Baugrund bzw. Bauwerk-Baugrund nach wie vor aufwendig sind. Es gelten die in Abschnitt 2 genannten Grundsätze gemäß der Abb. 1 und Abb. 2, unabhängig davon, ob der Baugrund nichtlinear mit FEM, mit Bettungsmoduln oder nach dem Steifezahlverfahren modelliert wird.

Abb. 7 zeigt die Sohldruckverteilung und die Setzungsmulde für ein Hochhaus in Moskau mit elliptischem Grundriss als Ergebnis einer Fundamentplattenberechnung, bei der die Fundamentplatte mit Finiten-Elementen (Plattenelemente) und der Baugrund mit Bettungsmoduln modelliert wurden. Diese Berechnung wurde im Rahmen einer Studie zur Bewertung der Machbarkeit einer in ca. 15 m Tiefe liegenden Plattengründung durchgeführt.

Die im Vergleich dazu durchgeführten Berechnungen mit Finite-Elemente-Modellen für das Gesamtsystem Fundamentplatte-Baugrund ergaben, dass es auch für Bemessungsaufgaben zweckmäßig ist, für den Baugrund entweder elasto-plastische

Stoffmodelle mit spannungsabhängiger Steifigkeit oder das einfache linear-elastische ideal-plastische Mohr-Coulomb-Modell zu verwenden. Zur Approximation einer spannungsabhängigen Steifigkeit sollte bei Anwendung des Mohr-Coulomb-Modells der Baugrund unabhängig von seinem geologischen Aufbau geschichtet angenommen werden. Den einzelnen Schichten ist jeweils eine konstante Steifigkeit, deren Größe jedoch mit der Tiefe zunimmt, zuzuordnen.

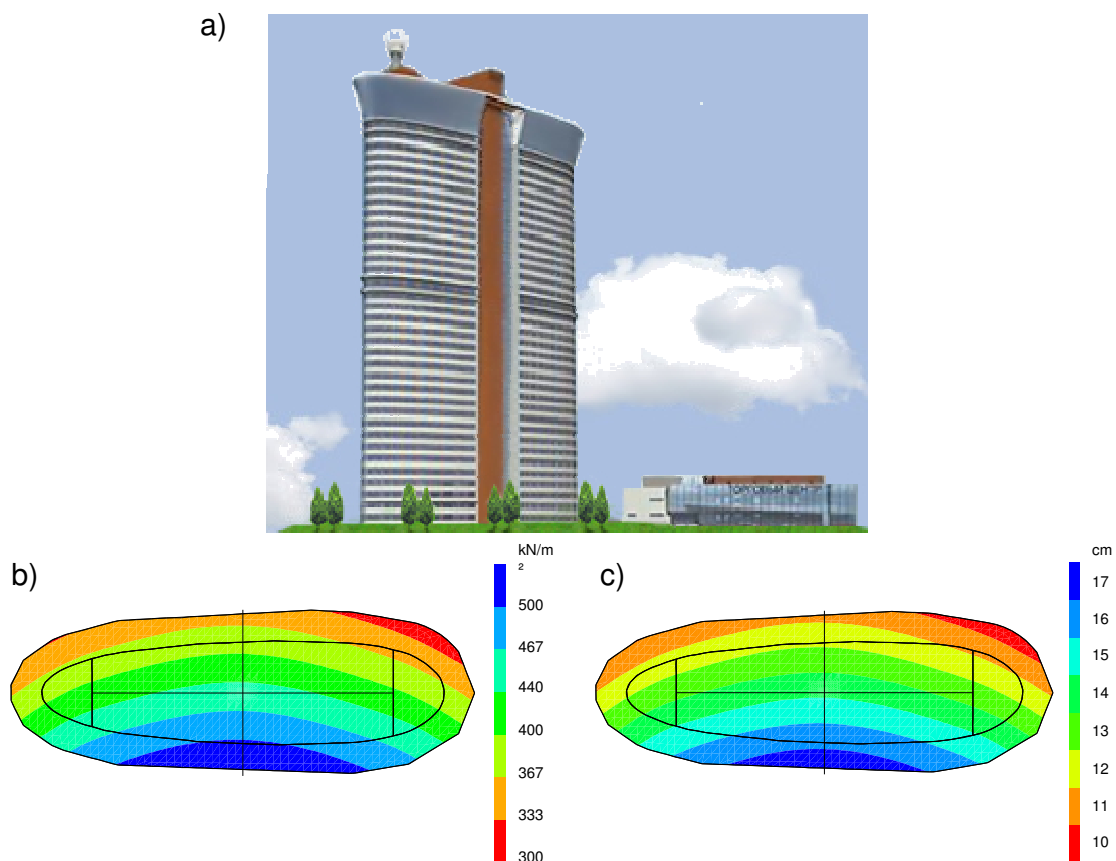


Abb. 7: Hochhausgründung mit FE-Plattenmodell und Bettungsmodell für Boden, a) Hochhausansicht (Tower in Moskau), b) Sohldruckverteilung, c) Setzungsmulde

4.2 Kombinierte Pfahl-Plattengründung

Die in [4] enthaltenen Bemessungsgrundsätze für die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) stützen sich auf das Teilsicherheitskonzept der DIN 1054:2005-01. Wie Abb. 8 zeigt, können die komplexen Interaktionen mit dreidimensionalen (3D) Finite-Elemente-Modellierungen grundsätzlich erfasst werden.

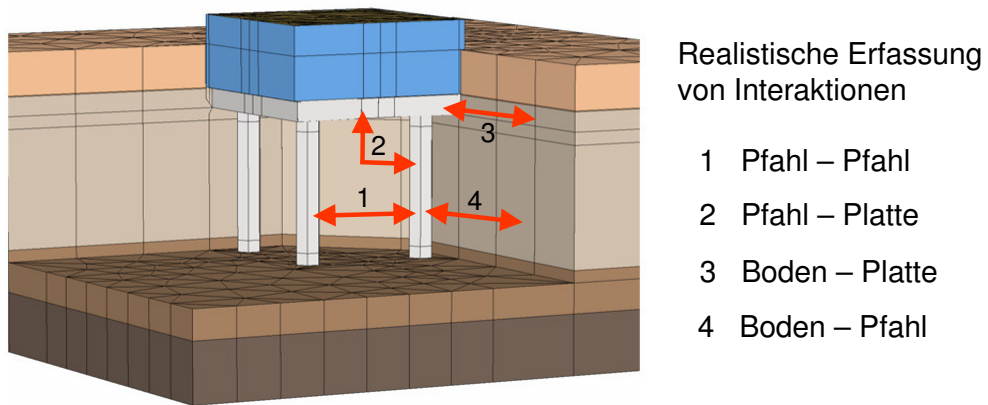


Abb. 8: Erfassung des komplexen Interaktionsverhaltens bei einer KPP mittels FEM

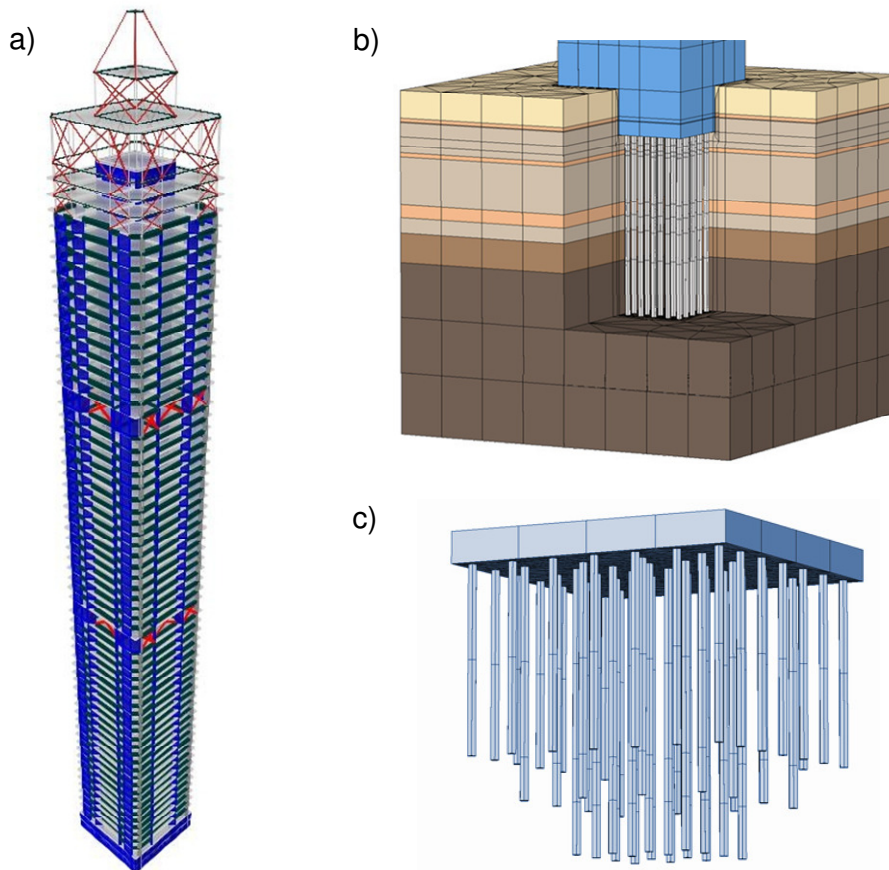


Abb. 9: Entwurf einer KPP mit FEM:

a) Hochhaus (Al Attar Tower in Dubai), b) Bodenmodell, c) optimierte KPP

Durch den stark verringerten Aufwand für die Erstellung von 3D-FE-Modellen und für 3D-Berechnungen werden Kombinierte Pfahl-Plattengründungen nicht mehr nur bei außergewöhnlichen Hochhäusern sondern auch bei Brücken oder Industriebauten,

wie z.B. Silos verwendet. Die Anwendung der FEM ist in der Regel die maßgebliche Voraussetzung, um eine KPP nach den Regelungen gemäß [4] optimieren zu können, so dass sie gegenüber einer herkömmlichen Pfahlgründung wirtschaftlicher wird. In Abb. 9 ist ein anhand von 3D-Finite-Elemente-Berechnungen optimierter Entwurf für ein Hochhaus dargestellt.

Durch das komplexe Interaktionsverhalten einer KPP sind ergänzende Regelungen zu denen, die in [4] und in der Leitnorm DIN 1054:2005-01 enthalten sind, vorerst nicht sinnvoll. Kombinierte Pfahl-Plattengründungen erfordern eine hohe Qualifikation des Fachplaners und gehören noch nicht zu den vollständig regelbaren Bemessungsaufgaben. Voraussetzung für realitätsnahe Berechnungen ist die Anwendung von nichtlinearen Stoffmodellen für den Baugrund, mit denen insbesondere die Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit berücksichtigt werden kann.

4.3 Baugrubenverbau

In [3] werden umfangreiche und nützliche Hinweise zur der Anwendung FEM für Verbaukonstruktion gegeben. Der Geltungsbereich einige dieser Empfehlungen beschränkt sich nur auf Verbaukonstruktionen. Sie finden sich zum Teil im Abschnitt 2 dieses Beitrages wieder. Es sei daraufhin gewiesen, dass es nicht nur für Gebrauchstauglichkeitsberechnungen sondern auch für die Bemessung von Stützkonstruktionen zwingend notwendig ist, Stoffmodelle, die unterschiedliche spannungsabhängige Steifigkeiten bei ödometrischer Be-, Ent- und Wiederbelastung berücksichtigen, für den Baugrund zu verwenden [5].

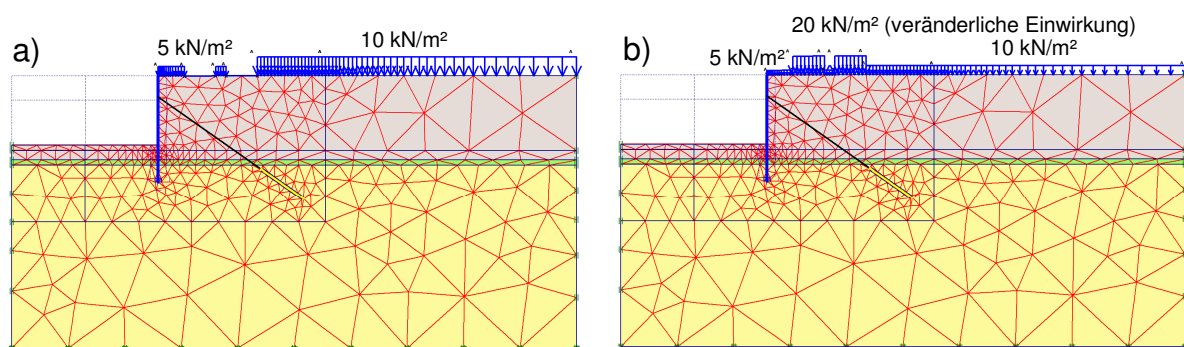


Abb. 10: Berechnungsbeispiel – einfach verankerte Trägerbohlwand

a) ständige Lasten, b) ständige und veränderliche Lasten

Anhand des in Abb. 10 dargestellten Berechnungsbeispiels einer einfach verankerten Trägerbohlwand soll verdeutlicht werden, dass die in [3] (EB 102) beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung der Bemessungsbeanspruchungen infolge veränderlicher Lasten realisierbar ist. Hierzu ist eine FE-Berechnung mit charakteristischen Werten der ständigen Lasten und eine FE-Berechnung mit charakteristischen Werten der ständigen und veränderlichen Lasten durchzuführen.

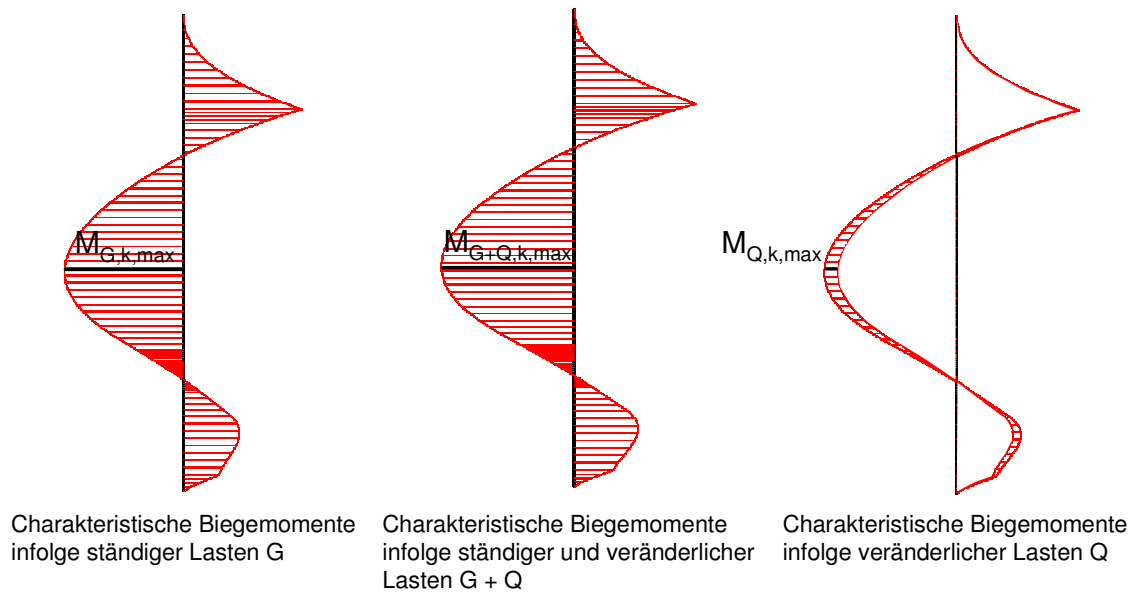


Abb. 11: Maximale charakteristische Biegemomente infolge ständiger Lasten, infolge ständiger und veränderlicher Lasten und infolge veränderlicher Lasten

Wie in Abb. 11 am Beispiel der maßgeblichen Biegemomente dargestellt ist, ist das maximale charakteristische Biegemoment infolge veränderlicher Lasten $M_{Q,k,max}$ das Ergebnis der Differenz aus dem charakteristischen Biegemoment infolge ständiger und veränderlicher Lasten $M_{G+Q,k,max}$ und dem charakteristischen Biegemoment infolge ständiger Lasten $M_{G,k,max}$. Der Bemessungswert des maximalen Biegemomentes $M_{d,max}$ ergibt sich schließlich aus der Summe von $\gamma_G \cdot M_{G,k,max}$ und $\gamma_Q \cdot M_{Q,k,max}$. Abb. 11 zeigt weiterhin, dass die 3 o.g. maximalen Biegemomente in etwa gleicher Tiefe liegen.

4.4 Deponieböschung

Abb. 12 zeigt den Bruchmechanismus in der Böschung einer Hausmülldeponie als Ergebnis einer FE-Berechnung mit Phi-c-Reduktion. Umfangreiche Vergleichsbe-

rechnungen haben gezeigt, dass die Form des Versagensmechanismus bzw. der Gleitfläche nicht davon beeinflusst wird, ob die Standsicherheitsberechnung nach Variante 1 oder nach Variante 2 durchgeführt worden ist. Es wird aber die Variante 1 als Vorzugsvariante empfohlen, da der Berechnungszustand vor Beginn der Phi-c-Reduktion noch ausreichend weit vom Grenzgleichgewicht entfernt ist und somit numerische Probleme während der Phi-c-Reduktion wenig wahrscheinlich sind.

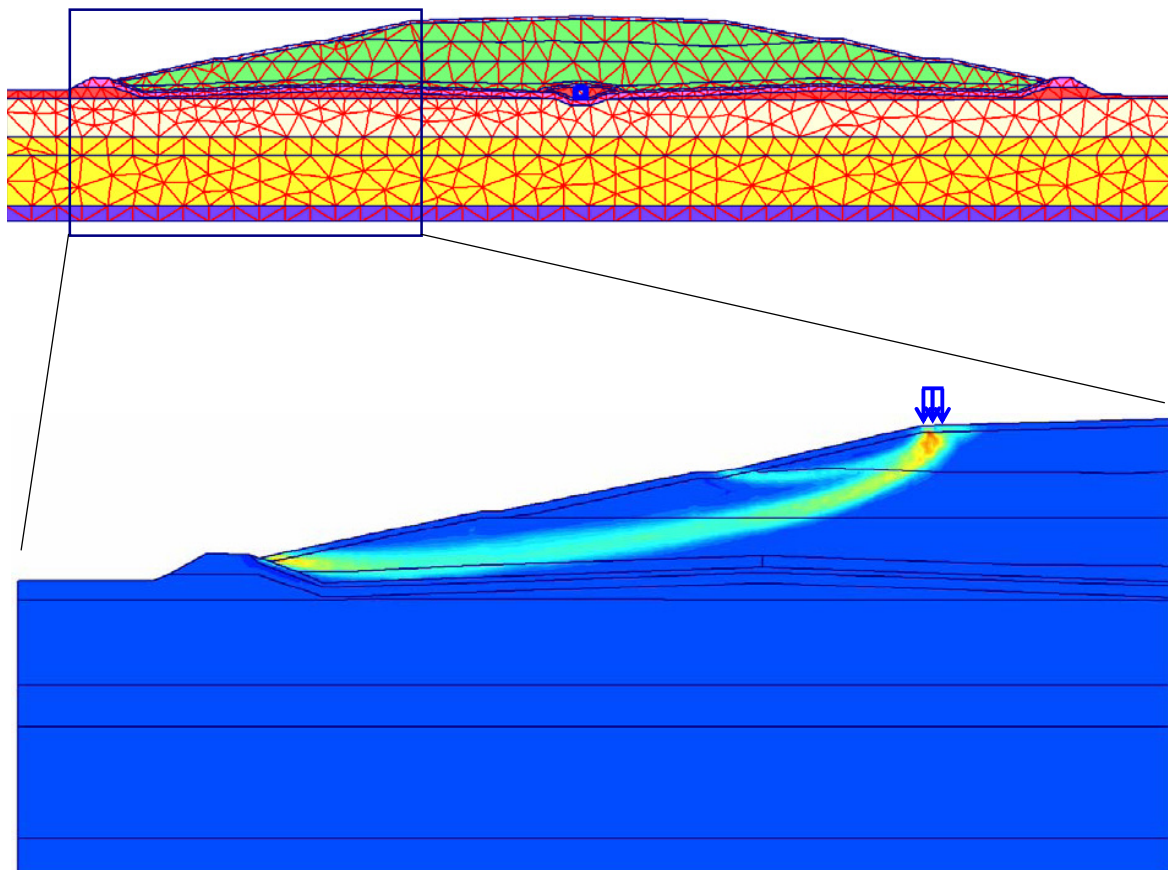


Abb. 12: Ergebnis einer Standsicherheitsberechnung für eine Böschung mit FEM

Abschließend sei erwähnt, dass mit der Phi-c-Reduktion immer nur die kleinste Standsicherheit bei maßgebendem Bruchmechanismus ermittelt wird. In einigen Fällen kann sich der maßgebende Bruchmechanismus nicht im Sinne der Gesamtstandsicherheit über die gesamte Böschung erstrecken, sondern sich nur lokal ausbilden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die neue DIN 1054:2005-01 und die zukünftige Leitnorm Eurocode 7, die die maßgeblichen Regelungen zur Bemessung von geotechnischen Bauwerken enthalten, sind geeignete Plattformen, um geotechnische Bauwerke mit der Finite-Elemente-Methode bemessen zu können. In beiden Normen fehlen jedoch in den Abschnitten, die die Regelungen zu den jeweiligen Bauteilen, Bauwerken und Gründungsarten enthalten, direkte Hinweise zur Anwendung der FEM.

Zurzeit werden die Dokumente der zukünftigen Vorschriftengeneration erarbeitet. Dabei nimmt der geplante DIN-Fachbericht, der die Handhabung des EC 7 in Verbindung mit den nationalen Regelungen (DIN 1054-2005-01 bzw. DIN 1054-2008-01) ermöglicht, eine zentrale Stellung ein. Es ist beabsichtigt, ergänzende Hinweise zur Anwendung der FEM sowohl in den DIN-Fachbericht als auch in der nationalen Ergänzungsnorm aufzunehmen.

5 Literatur

- [1] DIN 1054:2005-01, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Beuth Verlag, 2005
- [2] DIN EN 1997-1 (Eurocode 7) Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil 1: Allgemeine Regeln
- [3] Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB), 4. Auflage, 2006, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin
- [4] Kombinierte Pfahl-Plattengründungen, Herausg. J. Hanisch, R. Katzenbach, G. König in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis „Baugruben“ der DGGT, 2002, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin
- [5] von Wolffersdorff, P.-A.: Nachweis des Gebrauchszustandes nach DIN 1054 (neu), 2005, Vortrag zum Kolloquium FEM in der Geotechnik, TU Hamburg-Harburg

Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff
BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft,
01097 Dresden, Paul-Schwarze-Straße 2