

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Heibaum, Michael**

## **In Verformungen denken– Die Entwicklung der FEM zum Handwerkszeug für geotechnische Nachweise**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105339>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heibaum, Michael (2009): In Verformungen denken– Die Entwicklung der FEM zum Handwerkszeug für geotechnische Nachweise. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Verkehrswasserbau. S. 17-25.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## "In Verformungen denken" – Die Entwicklung der FEM zum Handwerkszeug für geotechnische Nachweise

BDir Dr.-Ing. Michael Heibaum, Bundesanstalt für Wasserbau, Abt. Geotechnik

### 1 Einleitung

In den 1960er Jahren zeigten Erddruckmessungen an Baugrubenwänden, dass die bislang angenommene lineare Zunahme des Erddrucks über die Tiefe nicht zutreffend war (Bild 1). Daraus erwuchs die Erkenntnis, dass Druckverteilungen im Baugrund und in der Wechselwirkung Baugrund-Bauwerk ganz wesentlich von den Verformungen abhängt. Zur Abschätzung war man zunächst auf Erfahrungen aus Messungen angewiesen bis in den 1970er Jahren die Methode der Finiten Elemente (FEM) so weit entwickelt war, dass sie für geotechnische Fragestellungen angewandt werden konnte. Nach einer ersten Euphorie zeigte sich bald, dass die Anwendung der FEM große Sorgfalt und ausreichendes Wissen über die Anwendungsgrenzen erfordert. Mit der Weiterentwicklung der Stoffgesetze konnte jedoch eine immer bessere Übereinstimmung von Prognose und Messung erreicht werden.

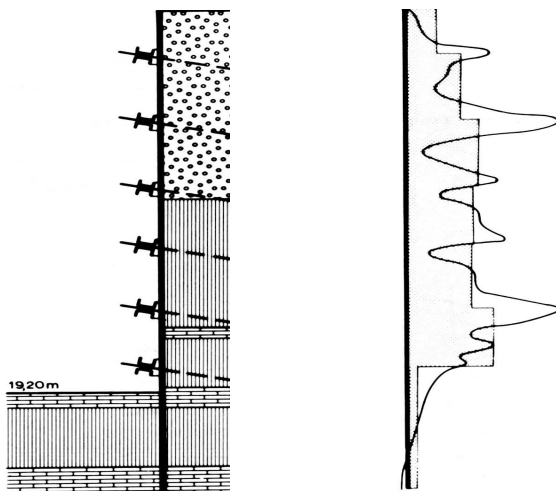


Bild 1: Gemessene Erddruckverteilung einer Trägerbohlwand im Frankfurter Ton (Romberg 1973)

Mit der FEM wurde es möglich, auch komplexe Bemessungssituationen zu meistern, seien es dreidimensionale Probleme oder instationäre Vorgänge. Mustern für die herkömmlichen Bemessungsverfahren noch erheblich vereinfachende Annahmen getroffen werden, konnten Struktur und Stoffverhalten mit der FEM wesentlich genauer erfasst werden. Daraus wiederum entstand die Idee, die Nachweise, die in der Geotechnik entsprechend der jeweiligen Normen zu führen sind, ebenfalls mit Hilfe der FEM zu erbringen. Die Normen jedoch und die in ihnen festgelegten Sicherheitswerte basieren auf jahrzehntelanger Erfahrung mit den klassischen Nachweisverfahren, wodurch die Frage gestellt werden muss, inwieweit erfahrungsbasierte Normung und erheblich verbesserte Erfassung des Spannungs-Verformungsverhaltens mit einem numerischen Verfahren wie der FEM in Einklang zu bringen sind. Die Sicherheiten wurden ja festgelegt, um die zum Teil wesentlich größeren Unsicherheiten in den klassischen Bemessungsverfahren abzudecken. Die Diskussion darüber wird vermutlich noch lange andauern.

### 2 Nachweise und Verformungsberechnungen mit klassischen Verfahren

Um Verformungen in der Geotechnik zu berechnen, bediente man sich üblicherweise Verfahren, die den Boden als elastisches Medium betrachten. Die beobachteten Abweichungen vom wirklichen Verhalten in situ kompensierte man durch erfahrungsgestützte Korrekturen mehr oder weniger erfolgreich. Beispiele sind die Begrenzung der Einflusstiefe bei der Setzungsberechnung oder die Annahme eines kennzeichnenden Punktes für die Ermittlung der Setzungen eines starren Fundamentes.

Um die Verformungen biegeweicher Flachgründungen zu ermitteln, wurden das Bettungsmodul- und das Steifzifferverfahren benutzt. Beide Verfahren dienen zur Verformungsberechnung aus der Wechselwirkung von Bauwerk und Baugrund, bleiben jedoch weiterhin im elastischen Bereich und lieferten, obwohl beide gut begründet, häufig widersprüchliche Ergebnisse. Das Steifzifferverfahren berücksichtigte die

seitliche Spannungsausbreitung im Boden, erforderte aber einen wesentlich höheren Rechenaufwand, der aber mithilfe der Computer vertretbar wurde.

Zur Berechnung der Verformungen einer ein- oder mehrfach gestützten Wand wurde ebenfalls unter der Annahme elastischen Verhaltens die Biegelinie der Wand errechnet (Bild 2). Der Erddruck wurde dabei linear mit der Tiefe zunehmend angenommen. Das am meisten benutzte Hilfsmittel für diese Berechnungen war vermutlich das Spundwandhandbuch (Hoesch), da ja die Computer noch ausschließlich in Rechenzentren standen und nicht für jedermann zugänglich waren. Damals vielleicht ahnend und heute (hoffentlich!) wissend, dass sich der Boden alles andere als elastisch verhält, mussten die Ergebnisse abgesichert werden. Das wiederum geschah durch ausreichende Sicherheiten, die in Normen und Empfehlungen zusammengetragen waren und auf jahrzehntelanger Erfahrung beruhten. Die EAU und später die EAB wurden zu unverzichtbaren Nachschlagewerken für die Aufstellung von erdstatischen Berechnungen.

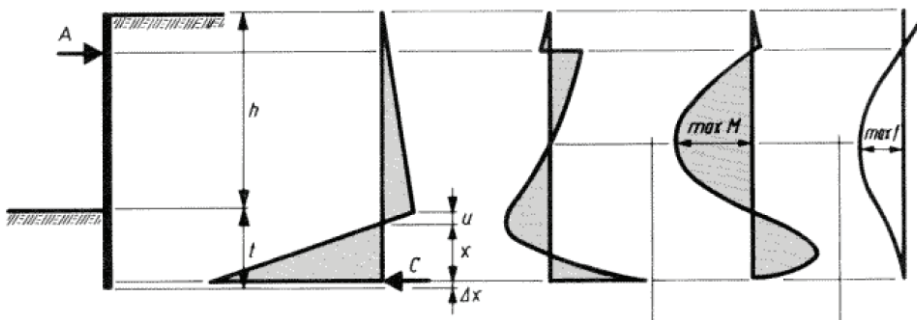
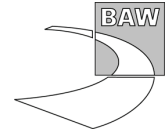


Bild 2: Belastungs-, Querkraft-, Momentenverlauf und Biegelinie einer eingespannten Wand (Spundwandhandbuch)

Die Normung und die ergänzenden Empfehlungen konzentrierten sich fast ausschließlich auf die Standsicherheit, die Verformungen wurden nur untergeordnet behandelt. In den Nachweisen der Tragfähigkeit wurde gezeigt, dass das Verhältnis von Bruchlast zu tatsächlich auftretender Belastung größer ist als die erforderliche globale Sicherheit. Diese Sicherheit wurde als "global" bezeichnet, weil sie alle Unsicherheiten von der Baugrunderkundung über die erdstatischen Nachweise bis hin zur Bauausführung abdecken soll. Die Konzentration auf die Grenzzustände der Tragfähigkeit ist wohl auch dadurch begründet, dass die rechnerischen Standsicherheitsnachweise für realistischer als die Verformungsberechnungen gehalten wurden. Bei Verformungsberechnungen wurde immer wieder betont, dass sie nur grobe Abschätzungen seien. Der Grund lag vermutlich darin, dass bei Überprüfung der Verformungsprognosen sehr häufig die Messungen zeigten, wie weit entfernt Messungen und Rechnungen liegen. Bei der rechnerischen Ermittlung der Standsicherheit ist ein solcher Vergleich zwischen rechnerischer Prognose und tatsächlichem Verhalten kaum möglich, dennoch wurde (und wird) die Treffsicherheit einer Standsicherheitsberechnung höher eingeschätzt als die einer Verformungsprognose.

Ein weiterer Grund liegt vermutlich in der höheren Akzeptanz der Modellvorstellungen, die in eine Standsicherheitsbetrachtung einfließen. Die Verformungen von Baugrund und Bauwerk wurden ermittelt unter der Annahme, dass das Verformungsverhalten unter den gegebenen Lasten zumindest bereichsweise linear elastisch sei – hier war man sich bewusst, dass es große Fehler geben kann. Der Versagensfall wird auf der Grundlage starrer Plastizität betrachtet. Erstaunlicherweise wurde diesen Modellen größeres Vertrauen geschenkt, obwohl eine Verifizierung höchstens im Modell möglich war, nicht in situ (außer in Schadensfällen, deren Randbedingungen eindeutig bekannt waren). Sofern es erforderlich ist, die Verformungen zu begrenzen, wurde dies sogar häufig durch einen entsprechenden Sicherheitsabstand vom Bruchzustand angestrebt und nicht durch Verformungsberechnungen.

Ein erster Schritt, die Verformungsabhängigkeit der Beanspruchung einer Stützwand zu berücksichtigen, war der Ansatz von umgelagerten Erddrücken anstelle des mit der Tiefe linear zunehmenden Erddrucks. Die entsprechenden Lastansätze beruhten auf Erfahrungen aus Messungen. Mit der Zeit entstand ein Gefühl für Verformungen bei der Wechselwirkung von Bauwerk und Boden. Professor Breth von der TH Darmstadt entließ in jenen Jahren die Studenten mit der Mahnung, bei erdstatischen Berechnungen stets "in Verformungen zu denken". Die sich in den folgenden Jahrzehnten entwickelnde Methode der Finiten



Elemente für geotechnische Verformungsberechnungen sollte und konnte das Denken nicht ersetzen, aber das Rechenverfahren entwickelte sich zu einem wertvollen Hilfsmittel zur Abschätzung des Kraft-Verformungsverhaltens von Baugrund und Bauwerk.

#### 4 Modellbildung und FEM

Alle geotechnischen Berechnungsverfahren basieren auf bestimmten Modellvorstellungen. Im Berechnungsmodell für den Erddruck sind z.B. Modelle über das Materialverhalten (Boden mit den Kennwerten  $\phi'$  und  $c'$ ), den Bruchvorgang (starrplastisch), die Bruchgeometrie (geradlinig begrenzter Körper) und die Belastungsverteilung (linear mit der Tiefe zunehmend) enthalten. Erst die Akzeptanz aller dieser Modelle erlaubt die Überzeugung, ein taugliches Berechnungsverfahren für den Erddruck zu haben.

Das Bewusstsein, dass hinter allen Nachweisen mehr oder weniger zutreffende Modelle stehen, hat sich stets in der Höhe der Sicherheitsbeiwerte niedergeschlagen oder es zeigt sich in der Forderung nach zwei Nachweisen, wie z. B. bei einer verankerten Spundwand sowohl den Nachweis der Standsicherheit auf der tiefen Gleitfuge zu führen, als auch eine ausreichende Sicherheit gegen Geländebruch nachzuweisen ist (siehe Abschnitt 10.6.7 in DIN 1054 (2005-01)).

Die Festlegung von Einwirkungen ist ein wesentlicher Punkt der Planung von Bauwerken. DIN 1055 - 100 "Einwirkungen auf Tragwerke – Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln" betont die zugehörige Modellbildung und behandelt im Einzelnen Modelle für ständige, veränderliche und dynamische Einwirkungen, Modelle bei Brandeinwirkungen und Modelle für Umwelteinflüsse.

Die klassischen Rechenmodelle in der Geotechnik beruhen auf der Annahme, dass das Verformungsverhalten unter den gegebenen Lasten im Wesentlichen linear elastisch sei. Die Grenzzustände der Tragfähigkeit werden auf der Grundlage starrer Plastizität ermittelt. Die dafür bekannten Modelle sind die Starrkörper-Bruchmechanismen. Darunter fallen die Erddruckermittlung (Annahme eines aktiven und passiven Gleitkeils), der Grundbruch, der Gelände- und Böschungsbruch und andere. Der Ansatz elastischen Verhaltens berücksichtigt jedoch nicht die begrenzte Festigkeit des Bodens und ggf. einsetzende Plastifizierung, die starrplastische Berechnung nicht die dem Bruch vorausgehende Verformung. Der eigentlich kontinuierliche Vorgang von einem Anfangszustand über Verformungen mit elastischen und plastischen Anteilen bis zu Fließerscheinungen und Bruch wird demnach als zwei getrennte Probleme mit jeweils getrennten Modellvorstellungen behandelt.

Numerische Methoden, wie z. B. diejenige der Finiten Elemente (FEM), bieten die Möglichkeit, die genannten Aspekte des Materialverhaltens bis zum Bruch (bzw. bis kurz davor) in einem Zug zu berücksichtigen. Bei Anwendung der FEM steht eine ganz andere Modellbildung im Vordergrund, die aber ebenfalls eine große Auswirkung auf die Ergebnisse haben kann. Der Boden wird zunächst als ein Kontinuum betrachtet (was eigentlich der Haufwerkstruktur des Bodens widerspricht) und dann in Elemente zerlegt, um eine numerische Lösung zu ermöglichen.

Ein besonderes Problem besteht nun darin, den Bruch im Boden zu definieren. In der klassischen Starrkörperanalyse ist dieser durch die Annahme festgelegt, dass in allen (vorab gewählten) Gleitflächen die Scherfestigkeit des Bodens erreicht ist. Im numerischen Verfahren wird der Boden jedoch als verformbares Material abgebildet. Gleitflächen können in einem Netz von Kontinuumelementen gar nicht auftreten. Um dennoch gute Abschätzungen zu erreichen, wird im einfachsten Fall das Verformungsbild herangezogen, um potenzielle Gleitflächen zu identifizieren. Dazu wird die Konzentration hoher Werte für Dehnung, Scherdehnungen oder Vergleichsdehnungen herangezogen. Diese Zonen hoher Dehnwerte können berechtigt als potenzielle Gleitflächen interpretiert werden (Bild 3). Eine Entkopplung von Bruchkörper und unbewegtem Boden erfolgt jedoch nicht. Außerdem wird – wie in situ – nicht überall gleichzeitig die Scherfestigkeit voll ausgenutzt sein. Durch diese Annäherung des Verformungszustandes an einen Bruchzustand ergibt sich bei Berechnungen mit der FEM der große Vorteil, dass eine Bruchgeometrie nicht a priori angenommen werden muss, sondern sich aus der Spannungs- und Verformungsgeschichte entwickelt. In jedem Einzelfall muss jedoch diskutiert werden, wie die Annäherung an den Grenzzustand im Boden erreicht wird. Übliche Vorgehensweisen sind die schrittweise Verminderung der Scherfestigkeit,

die Erhöhung von Auflasten oder das Aufbringen von Verschiebungen. Denkbar wären auch die Erhöhung oder Verminderung der Bodenwichte, Aufbringen von Porenwasserüberdrücken u. a. m.

Da das Elementnetz nur eine begrenzte Ausdehnung besitzen kann, haben die Randbedingungen einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Die Ränder müssen ausreichenden Abstand zum modellierten Bauwerk haben, um keinen verfälschenden Einfluss auszuüben. Die Berechnung von Grundwasserströmungen erweist sich in dieser Hinsicht oft als noch empfindlicher als die Verformungsanalyse.

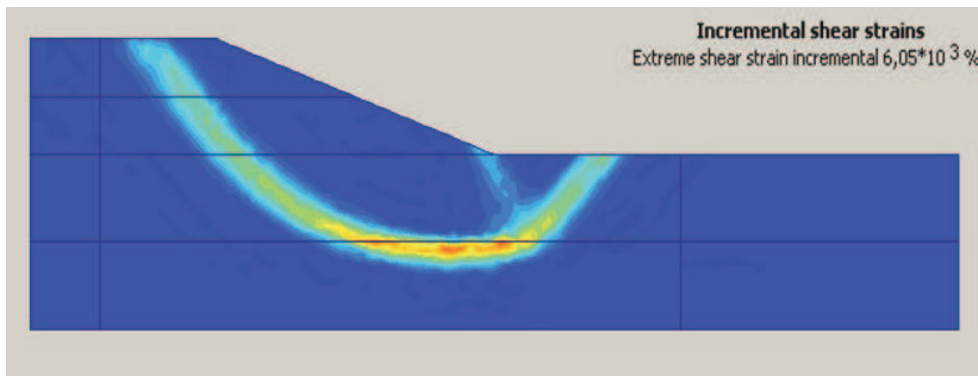


Bild 3: Konzentration der inkrementellen Scherdehnungen als Hinweis auf potenzielle Gleitfugen

Die Festlegung von Materialkennwerten erweist sich stets als besonders kritische Modellbildung. Da der Aufwand an Baugrunduntersuchungen häufig genug in keinem Verhältnis zum gesamten Bauvolumen steht, liegen oft nur eine begrenzte Zahl von Informationen über den Baugrund vor. Andererseits erfordert es wiederum Vereinfachungen und/oder Zusammenfassungen, um ein zutreffendes Baugrundmodell aufzustellen, da es baupraktisch nicht sinnvoll ist, Bauverfahren und Materialeinsatz in kurzen Abständen zu ändern.

Auch die Materialgesetze werden auf der Grundlage von Modellvorstellungen festgelegt, die das wirkliche Verhalten in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte mehr oder weniger gut abbilden. Die Entwicklung von Stoffgesetzen zur Implementierung in numerischen Modellen ist jedoch inzwischen soweit fortgeschritten, dass das Verhalten in situ in vielen Fällen sehr gut abgeschätzt werden kann. Die FEM bietet außerdem die Möglichkeit, geotechnische Laborversuche nachzurechnen und dadurch das Materialmodell zu kalibrieren, so dass die Wahrscheinlichkeit, das Verhalten in situ ausreichend gut zu beschreiben, wesentlich gesteigert werden kann. Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse erhält man durch die Beobachtungsmethode, d.h. die Bauabschnitte eines Vorhabens werden vorausberechnet und durch Messungen begleitet. Durch Nachrechnen der schon fertig gestellten Bauabschnitte ist eine Kalibrierung möglich, die es erlaubt, die Prognose für die nachfolgenden Schritte zu verbessern.

Auch für die Ermittlung von nicht hydrostatischen Wasserdrücken ist die FEM eine große Hilfe: Die aufgrund von Strömungsvorgängen zutreffende Wasserdruckverteilung lässt sich abhängig von den eingesetzten Randbedingungen im selben Programm vor der Verformungsberechnung berechnen oder als Zwischenrechnung einschalten. Meist genügt dabei die stationäre Betrachtung, also die Annahme eines Strömungszustandes der über die Zeit konstant bleibt. In Sonderfällen wird instationär zu rechnen sein, um den im Zuge einer Baumaßnahme ungünstigsten Zustand zu ermitteln, was bei entsprechenden Programmen auch möglich ist.

## 5 Normung und FEM

Die bestehenden Normen und Empfehlungen wurden auf der Grundlage der klassischen Nachweisverfahren aufgestellt. Numerische Verfahren bieten jedoch eine Reihe von Vorteilen bei geotechnischen Berechnungen. Einer der größten ist die Tatsache, dass vor der Berechnung keine Annahmen über Bruchmechanismen getroffen werden müssen. Der Bruchzustand ergibt sich aus der vorausgehenden Verformungsentwicklung. Bei klassischen Verfahren ist stets eine Vorauswahl der Bruchgeometrie erforderlich.

Die klassischen Berechnungsverfahren berücksichtigen alle nur den ebenen Verformungsfall. Diese Vereinfachung wird auch häufig bei numerischen Modellen genutzt, jedoch besteht nur mit diesen die Möglichkeit, im Bedarfsfall auch dreidimensional zu rechnen. In Bild 4 ist als Beispiel für die Notwendigkeit der Berücksichtigung der dritten Dimension die Draufsicht einer kombiniert gestützten Baugrube dargestellt. Zur Verformungsbegrenzung ist in Längs- und Querrichtung mittig ein Steifenbündel angeordnet, während daneben aus baubetrieblichen Gründen die Wände verankert sind. Eine klassische Bemessung des Baugrubenverbau und seiner Stützungen auf aktiven Erddruck würde selbst bei Berücksichtigung einer zutreffenden Erddruckumlagerung über die Wandhöhe ggf. katastrophale Folgen haben, da nicht berücksichtigt wird, dass die Steifenbündel Lasten auf sich konzentrieren und damit auch zu einer horizontalen Erddruckumlagerung führen

Hier wird nach wie vor vom Ingenieur verlangt, dass er solch ein mögliches Verformungsverhalten erkennt – weil er eben "in Verformungen denken" kann. Die FEM mit der Möglichkeit, dreidimensionales Verhalten zu modellieren, ist dann ein hervorragendes Handwerkszeug, genauere Informationen zu liefern.

Soll nun wegen der besseren Möglichkeiten ein geotechnischer Nachweis mit numerischen Verfahren erbracht werden, so stellt sich die Frage nach den anzusetzenden Sicherheiten. Obgleich es in keiner Norm ausdrücklich gesagt wird, bilden der Sicherheitsbeiwert, das Berechnungsverfahren und die Definition eines Bruchzustandes eine Einheit. Nur wenn die in der Norm angegebenen Berechnungsmodelle verwendet werden, gewährleistet der Sicherheitsbeiwert ein ausreichendes Sicherheitsniveau. Verschiedene Verfahren bedingen unterschiedliche Sicherheiten, wie z. B. in der alten DIN 4084 für das Lamellenverfahren und das lamellenfreie Verfahren unterschiedliche globale Sicherheiten vorgesehen waren.

Die Akzeptanz der Sicherheiten ist vor allem darin begründet, dass bisher keine Schadensfälle aufgetreten sind, die eine Erhöhung des Zahlenwerts der erforderlichen Sicherheit notwendig erscheinen ließen. Bei jedem Standsicherheitsnachweis vergleichen wir also den aktuellen Fall mit unseren Erfahrungen, aufgrund derer wir nur wissen, dass kein Versagen aufgetreten ist. Eine objektive Bewertung der tatsächlichen Sicherheit ist damit also nicht möglich.

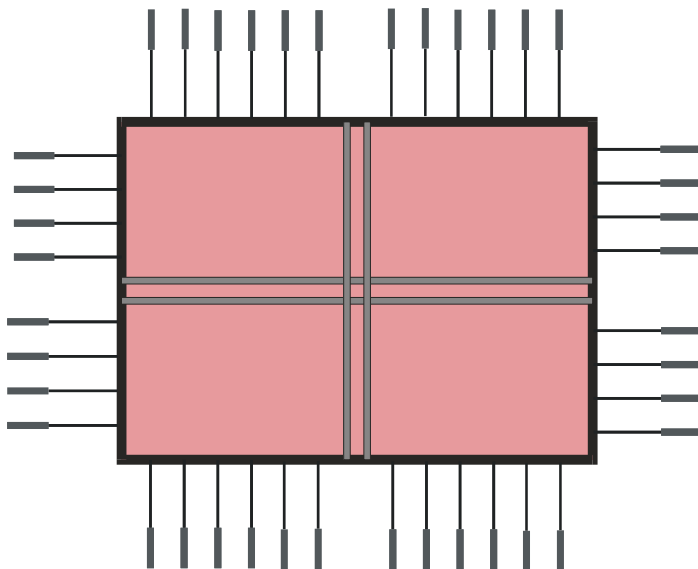
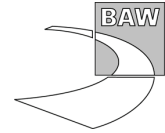


Bild 4: Verankerte und zentral ausgesteifte Baugrube

## 6 Neue Normung mit Teilsicherheitsbeiwerten

Mit der bauaufsichtlichen Einführung der neuen DIN 1054 von 2003 wurden die geotechnischen Tragfähigkeitsnachweise umgestellt auf das Konzept der Grenzzustände und der Teilsicherheitsbeiwerte, das von den Eurocodes übernommen wurde. Beim Nachweis der Tragfähigkeit muss gezeigt werden, dass der Bemessungswert  $E_d$  der Beanspruchungen nicht größer ist als der Bemessungswert  $R_d$  des Widerstands des Baugrunds. Bemessungswerte der Beanspruchungen ergeben sich dadurch, dass der charakteristische Wert der Beanspruchungen um einen Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchungen erhöht





wird, während für den Bemessungswert des Widerstands der charakteristische Wert eines Widerstands durch den Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände geteilt, also vermindert wird.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich die Zahlenwerte für die Sicherheiten  $\eta$  des alten Konzepts der globalen Sicherheiten bewährt haben, weil sie nicht nur eine wirtschaftliche, sondern auch ausreichend sichere Bemessung von Gründungen ermöglichen. Aus diesem Grund ist man bei der quantitativen Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte in Deutschland von dem Grundsatz ausgegangen, dass man nach der Umstellung auf das Nachweiskonzept des Eurocodes bei der Bemessung von Gründungen wieder etwa die gleichen Abmessungen erhält wie bei der Verwendung des globalen Sicherheitskonzepts.

Mit dem neuen Normenkonzept der Grenzzustände und der Teilsicherheitsbeiwerte wurden zwei vorteilhafte Wege eingeschlagen. Zum einen wurden wesentliche Fortschritte in der Vereinheitlichung der Nachweisverfahren im Bauwesen in Europa erzielt, auch wenn immer noch drei Bemessungsverfahren und national unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte existieren. Zum anderen erlauben die neuen Normen ausdrücklich die Verwendung von numerischen Berechnungsverfahren insbesondere dann, wenn die Wechselwirkung von Baugrund und Bauwerk zu berücksichtigen ist. Allerdings wurden über die dabei anzuwendenden Teilsicherheitsbeiwerte leider keine Festlegungen getroffen.

In der neuen Normung ist das Konzept der Grenzzustände mit Teilsicherheitsbeiwerten auch auf die Nachweise der Verformungen eines geotechnischen Bauwerks übertragen worden. Dafür wurde der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingeführt. Nach EN 1997-1 werden die Nachweise für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit formal mit Bemessungswerten durchgeführt, jedoch alle Teilsicherheitsbeiwerte zu 1,0 gesetzt. Damit wird de facto der Nachweis des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit mit charakteristischen Werten geführt. Die neue DIN 1054 enthält eine Reihe von Hinweisen, in welchen Fällen zu erwartende Verformungen so klein sind, dass ein Nachweis der Gebrauchstauglichkeit in der Regel entfallen kann. Damit bleibt einer der Grundsätze der alten globalen Normung erhalten, dass nämlich mit der Sicherheit gegen Versagen auch eine Sicherheit gegen zu große Verformungen gegeben ist. Andererseits besteht die grundsätzliche Verpflichtung zu einer Verformungsberechnung, was zwangsläufig auf eine numerische Simulation hinausläuft.

Basis der geotechnischen Nachweise der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit ist die Euronorm DIN EN 1997-1. Leider konnte in der Geotechnik Europas keine Einheitlichkeit erzielt werden, sodass für den Nachweis der Tragfähigkeit drei verschiedene Nachweisverfahren angeboten werden. Der Unterschied liegt im Wesentlichen in der Anwendung der Teilsicherheiten, nämlich im Verfahren 2 auf die Einwirkungen und Widerstände, im Verfahren 3 auf die Einwirkungen und die Scherparameter. Verfahren 1 ist eine Kombination aus 2 und 3, jedoch mit anderen Teilsicherheitsbeiwerten. Deutschland folgt weitgehend dem Verfahren 2 außer für den Nachweis der Geländebruchsicherheit, für den die Scherparameter faktorisiert werden (Verfahren 3)

Die Teilsicherheitsbeiwerte können im Verfahren 2 an unterschiedlichen Stellen in die Rechnung eingeführt werden. Die europäische Norm lässt den Weg offen: "Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen können entweder auf die Einwirkungen selbst ( $F_{rep}$ ) oder ihre Beanspruchungen (E) angewendet werden." (DIN EN 1997-1, 2.4.7.3.2). Im konstruktiven Ingenieurbau erfolgt der Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte zu Beginn auf die Einwirkungen und Widerstände und die weitere Berechnung mit Bemessungswerten ("Faktorisierung der Eingangsgrößen"). In der Geotechnik wird die Berechnung - wie im bisherigen Verfahren mit globalen Sicherheitsbeiwerten - mit den charakteristischen Belastungen durchgeführt und werden zunächst die für den jeweiligen Nachweis benötigten Beanspruchungen ("Beanspruchungen" sind die "Auswirkungen der Einwirkungen") ermittelt. Für den Nachweis werden dann die Teilsicherheitsbeiwerte auf die aus der Berechnung erhaltenen Beanspruchungen (z.B. Schnittkräfte, Momente, Spannungen, Dehnungen) angesetzt ("Faktorisierung der Beanspruchungen"). Letztere Vorgehensweise wird als "Verfahren DA 2\*" bezeichnet (Frank et al. 2004).

Die Entscheidung, das Nachweisverfahren DA 2\* einzuführen ist vorteilhaft für eine Bemessung mithilfe der FEM. Alle Beanspruchungen werden zunächst mit charakteristischen Werten ermittelt und erst dann mit den Teilsicherheiten des einzelnen Nachweises beaufschlagt und den reduzierten Widerständen gegenübergestellt. Dadurch entfallen auch zwei getrennte Berechnungen für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (Verformungen) und der Tragfähigkeit. In der FEM-Analyse mit charakteristischen Werten wird ein wirklichkeitsnahes Verhalten simuliert. Demgegenüber hätte eine Berechnung mit faktori-

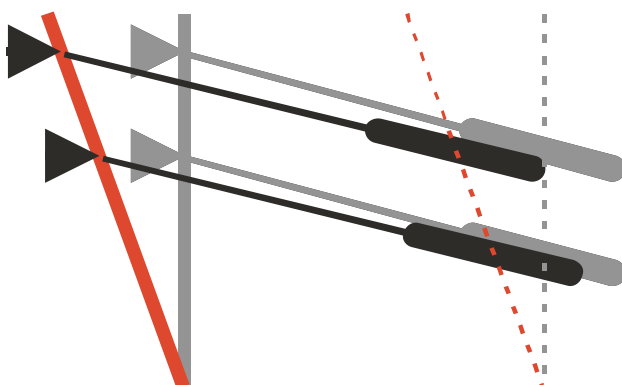
sierten Scherparametern (Nachweisverfahren 3) ein nur bedingt zutreffendes Materialverhalten zur Folge, da aufgrund der veränderten Parameter die Belastungs- und Verformungsgeschichte anders verläuft.

Die bisherige Erfahrung zeigt, dass Einwirkungen und Beanspruchungen mit der FEM zutreffend ermittelt werden können. Besonders bei schwieriger Geometrie und komplexen Bauabläufen liefert die FEM sicher besser zutreffende Ergebnisse als andere Modelle. Ein weiterer Vorteil von mit der FEM durchgeführten Berechnungen ist die Möglichkeit, dass die Ergebnisse für jeden Bauzustand durch Messungen kontrolliert werden können, da nur charakteristische Werte eingehen. Damit erweist sich die FEM als optimales Handwerkszeug für die Beobachtungsmethode.

Große Unsicherheiten sind jedoch mit dem Versuch verbunden, die Widerstände im Boden mithilfe der FEM zu ermitteln. Um diese zu berechnen müsste sichergestellt sein, dass die Verformungsberechnung verlässlich bis nahe an den Bruchzustand durchgeführt werden kann und nicht numerische Instabilitäten einen "Bruch" vortäuschen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, zum Beispiel den Grenzwert des Erdwiderstandes mit einer FE-Berechnung zu ermitteln, z.B. zur Ermittlung des Erdwiderstandes durch Verschieben der Wand bis zum Erreichen eines Zustandes, bei dem die Berechnung nur noch zunehmende Verformungen, aber keine Laststeigerung mehr liefert. Das Ergebnis kann mit einem der vorgenannten klassischen Verfahren übereinstimmen oder auch mehr oder weniger stark abweichen. Für Erdwiderstandsgrößen, die aus numerischen Verfahren erhalten wurden, fehlt bislang jedoch eine ausreichende Erfahrungsgrundlage.

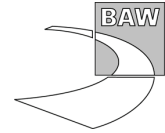
Grundsätzlich sollte Einigkeit erzielt werden über den Weg zum Bruchzustand: Es werden entweder die Scherparameter inkrementell reduziert oder eine zusätzliche Einwirkung aufgebracht, was jedoch zu unterschiedlichen numerischen Grenzzuständen führt. Die Auswirkungen zeigen sich besonders beim Nachweis der Standsicherheit auf der tiefen Gleitfuge. Möglich sind eine vorgegebene Verschiebung der Wand, eine zusätzliche externe Last auf den Anker, die Erhöhung der Wichte oder die Verringerung der Scherparameter. Die "Verschlechterung" des Bodens bis zum Eintreten eines Grenzzustandes, z.B. durch iterative Reduzierung von Reibungswinkel und Kohäsion, wäre eine Vorgehensweise nach Nachweisverfahren 3, was im Konflikt zu den Normen bzw. den EAU und EAB stünde. Bei Nachweis der Standsicherheit auf der tiefen Gleitfuge ist die Interpretation der Ergebnisse grundsätzlich schwierig, da ja der Nachweis über die "mögliche Ankerkraft" eine Stellvertreterfunktion für einen Bruch im Boden darstellt. Es ist also nicht klar, ob die mit der FEM errechnete Ankerkraft als die "mögliche Ankerkraft" nach Kranz interpretiert werden darf. Bisherige Vergleichsrechnungen konnten kein zufriedenstellendes Ergebnis liefern.

Grundsätzlich liefert die FEM aber die wirklichkeitsnäheren Ergebnisse, denn gerade beim Erdwiderstand und beim Bruch auf der tiefen Gleitfuge gehen dem Bruchzustand erhebliche Verformungen voraus (Bild 5), die in bestimmten Fällen bereits als kritisch für das Bauwerk eingeschätzt werden müssen, beim üblichen Nachweis jedoch überhaupt nicht berücksichtigt werden. Hier gilt es also, mit dem besseren Verfahren ausreichend Erfahrung zu sammeln, um eines Tages die bislang noch normgemäßen Verfahren abzulösen.



*Bild 5: Scherverformung (schematisch) des Bodens zwischen Wand und Kräfteinleitungsstrecken beim Bruch auf der tiefen Gleitfuge*





## 7 Zusammenfassung

Die Wechselwirkung Baugrund-Bauwerk hängt wesentlich von den Verformungen ab. Zur Berücksichtigung bei geotechnischen Bemessungsaufgaben war man zunächst auf Erfahrungen aus Messungen angewiesen. Seit den 1970er Jahren hat sich die Methode der Finiten Elemente (FEM) zu einem inzwischen unverzichtbaren Handwerkszeug für geotechnische Fragestellungen entwickelt. Mit ihr wurde es auch möglich, komplexe Bemessungssituationen wie dreidimensionale Probleme oder instationäre Vorgänge zu erfassen. Infolge der dabei erreichbaren Genauigkeit der Ergebnisse entstand die Idee, die Nachweise, die in der Geotechnik entsprechend der jeweiligen Normen zu führen sind, ebenfalls mit Hilfe der FEM zu erbringen.

Die Normen jedoch und die in ihnen verankerten Sicherheitswerte basieren auf jahrzehntelanger Erfahrung mit den klassischen Nachweisverfahren. Die Sicherheiten wurden festgelegt, um die zum Teil wesentlich größeren Unsicherheiten in den klassischen Bemessungsverfahren abzudecken. Numerische Methoden wie die FEM bieten die Möglichkeit, Randbedingungen wesentlich besser zu erfassen als in klassischen erdstatischen Verfahren und aus bruchnahen Verformungen auf zu erwartende Bruchfiguren zu schließen, anstatt sie für einen bestimmten Nachweis *a priori* annehmen zu müssen. Für eine Festlegung von Sicherheiten für Nachweise mit numerischen Methoden fehlt jedoch bislang die Erfahrungsbasis.

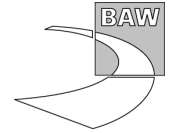
Auf der anderen Seite kommt die grundsätzliche Vorgehensweise nach der neuen DIN 1054, nämlich zunächst die Berechnung mit charakteristischen Werten komplett durchzuführen und erst dann Sicherheitsbetrachtungen anzustellen (Nachweisverfahren DA 2\*), der Berechnung mit finiten Elementen entgegen. Die Verwendung von Bemessungswerten würde das wirkliche Materialverhalten verfälschen und zu unrealistischen Ergebnissen führen. Einwirkungen und Beanspruchungen lassen sich mit der FEM besser zutreffend ermitteln. Die Nachweise des Grenzzustandes der Tragfähigkeit und diejenigen für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit lassen sich dadurch in einem Berechnungsgang führen.

Aufgrund der bisherigen Wissensbasis muss man sich noch darauf beschränken, Einwirkungen und Beanspruchungen aus Berechnungen mit der FEM in den Nachweis zu übernehmen und die Widerstände gemäß der klassischen Erdstatik anzusetzen. Da keine weiterreichenden Erfahrungen vorliegen, sind für den Vergleich von Beanspruchungen und Widerständen dieselben Sicherheitsbeiwerte anzusetzen wie sie die Norm für die klassische Erdstatik fordert, obwohl das Boden-Bauwerks-Verhalten wesentlich besser erfasst wird und damit ein Teil der Unsicherheit entfällt, die mit den derzeitigen Sicherheiten abgedeckt werden. Für die Zukunft sollte jedoch auch in den normgemäßen Nachweisen das Potenzial der FEM und anderer numerischer Verfahren genutzt werden, die Verformungen grundsätzlich besser ermitteln zu können und die einem Bruchzustand vorausgehenden Verformungen zu berücksichtigen.

In der Zukunft sollten wir die rein starrplastischen und rein elastischen Verfahren überwinden und "in Verformungen rechnen". Seit dem Appell "in Verformungen zu denken" aufgrund der ersten Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Kräften und Verformungen in der Wechselwirkung von Bauteil und Boden sind die Entwicklungen weit fortgeschritten. Mit den heute üblichen numerischen Verfahren lassen sich die dem Bruch vorausgehenden und ihn beeinflussenden Verformungen ermitteln, so dass dies auch für die Nachweise genutzt werden sollte. Die Beschränkung auf starrplastische Verfahren und die Verwendung großer Sicherheitsfaktoren, um gleichzeitig eine Verformungsbeschränkung zu erreichen war erforderlich durch die beschränkten rechnerischen Möglichkeiten zur Zeit der Normenerstellung. Um eine "normgerechte" Nutzung der numerischen Verfahren zu erreichen, bzw. um die Forderungen künftiger Normen auf der Grundlage der heutigen Möglichkeiten zu formulieren, bedarf es einer öffentlichen Erfahrungssammlung mit diesen modernen Verfahren, so wie es seinerzeit mit den damals üblichen Verfahren geschehen ist. Dies sollten wir uns alle für die kommenden Jahre als Aufgabe stellen.

## Literatur

- DIN 1054 (2005-01): Baugrund. Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau  
DIN 1055-100 (2001-03): Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Sicherheitskonzept, Grundlagen und Anwendungsregeln für Hochbauten  
EAB – Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben", Ernst & Sohn, Berlin, 2006.



EAU – Empfehlungen des Arbeitsausschusses “Ufereinfassungen“ Ernst & Sohn, Berlin, 2004

DIN EN 1997-1 (2005-10): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. - Teil 1:  
Allgemeine Regeln. Deutsche Fassung EN 1997-1: 2004

Frank, R.; Bauduin, C.; Driscoll, R.; Kavvas, M.; Krebs Ovesen, N.; Orr, T. and Schuppener, B.: De-  
signers' Guide to EN 1997 -1 Eurocode 7: Geotechnical Design - General Rules, Thomas Telford  
Ltd, London, 2004

Hoesch: Spundwand Handbuch - Berechnung

Romberg, W.: Messungen an einer verankerten Baugrubenwand. Mitteilungen der Versuchsanstalt für  
Bodenmechanik und Grundbau der TH Darmstadt, Heft 12, 1973

