



### **Baugruben** Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 3

**Professor Dr.-Ing. Helmut Meißner,**  
Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau,  
Universität Kaiserslautern, Obmann des  
Arbeitskreises 1.6 der DGGT „Numerik in  
der Geotechnik“

#### **3. Baugruben**

##### **3.1 Vorbemerkungen**

Baugruben weisen aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Ausnutzung der Baugrundstücke sowie zur Berücksichtigung ökologischer Randbedingungen, wie beispielsweise zum Grundwasserschutz, häufig sehr komplexe Strukturen auf. Es handelt sich vielfach um räumlich gegliederte Konstruktionen, die Aufgaben der Bestandsicherung übernehmen und ausreichend dicht gegen Grundwasserzufluß sein müssen. Die Bemessung der aus Wand- und gegebenenfalls Sohlelementen bestehenden Baugrubensicherung erfolgt heute noch überwiegend mit einfachen Rechenmodellen, in die der Boden zum Beispiel in Form des aktiven und passiven Erddrucks eingeht. Für den Baugrubenverbau werden vielfach Stabwerksmodelle verwendet. Die Lastansätze und Bemessungsregeln orientieren sich dann überwiegend an den „Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben der DGGT (EAB)“. Dabei wird der Boden im Grenzzustand betrachtet. Verschiebungen zum Beispiel an der Geländeoberfläche oder

**Vom Arbeitskreis „Numerik in der Geotechnik“ werden Empfehlungen zur Durchführung numerischer Berechnungen erarbeitet. Der Abschnitt 1, der in der Ausgabe 1991/1 der *geotechnik* veröffentlicht wurde, enthält allgemeingültige Angaben, der Abschnitt 2 (*geotechnik*, Ausgabe 1996/2) behandelt Berechnungen für den Tunnelbau unter Tage. Mit dem vorliegenden Abschnitt 3 „Baugruben“ werden die Empfehlungen fortgesetzt. Mitglieder des Arbeitskreises sind zur Zeit Professor Dr. Borm, Dipl.-Ing. Gollub (Gast), Dr. J.-M. Hohberg, Dr.-Ing. Klein, Professor Dr.-Ing. Krajewski, Dr.-Ing. Langhagen, Dr.-Ing. Liedtke, Dr.-Ing. Mayer, Professor Dr.-Ing. Meißner (Obmann), Professor Dr.sc.techn. Schanz, Dipl.-Ing. Schuck, Professor Dr.-Ing. Schweiger, Dr.-Ing. Stahlmann und Dr.-Ing. Winselmann.**

an benachbarten baulichen Anlagen werden, wenn überhaupt, überschlägig abgeschätzt.

Der bisher üblichen Bemessung von Baugrubensicherungen liegt die Erfahrung zugrunde, daß bei Einhaltung der einschlägigen Bemessungs- und Konstruktionsregeln, zum Beispiel Erddruckansätze, verformungsarmer Verbau, in der Regel Verschiebungen auftreten, die für benachbarte Bauwerke verträglich sind. Diese vereinfachende Betrachtungsweise hat sich jedoch nur für Baugruben mit einfachem bis mittlerem Schwierigkeitsgrad bewährt.

In schwierigen und komplexen Fällen wird ein rechnerischer Nachweis der Gebrauchstauglichkeit notwendig. In solchen Fällen bietet die Finite-Elemente-Methode (FEM) die Möglichkeit, die zu erwartenden Formänderungen wirklichkeitsnäher zu erfassen als dies mit herkömmlichen Berechnungsansätzen der Fall ist. So kann die Interaktion von Baugrubensicherung und Baugrund erfaßt und im Rechenmodell abgebildet werden. Die Vorteile der Methode werden dabei insbesondere dann deutlich, wenn besondere geometrische Randbedingungen vorliegen, zum Beispiel mehrere nebeneinander liegende Baugruben oder Höhenversprünge zwischen Teilbaugruben. Ein wesentliches Einsatzgebiet liegt ferner dann vor, wenn zum Beispiel setzungsempfindliche Altbauungen oder konzentrierte hohe Einwirkungen vorhanden sind, die mit den idealisierten Ansätzen herkömmlicher Berechnungsmodelle nicht erfaßt werden können.

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und damit zur Ermittlung der auftretenden Verformungen werden bevorzugt numerische Modelle nach der Finite-Element-Methode eingesetzt. Darüber hinaus stellt die Berechnungsmethode für verschiedene Planungsaufgaben eine wertvolle Hilfe dar. So können bei komplexen Strukturen, die mit klassischen Ansätzen nicht mehr erfaßbar sind, beispielsweise die Größe und die Verteilung des aktiven Erddrucks ermittelt werden. Diese Einwirkungen können dann anschließend gemeinsam mit Stabwerksmodellen zur Bemessung des Baugrubenverbau herangezogen werden. Die Bemessungsschnittgrößen können auch alternativ mit der FEM ermittelt werden. In der Praxis hat sich diese Vorgehensweise beim derzeitigen Stand der Technik jedoch noch nicht durchgesetzt und ist häufig auf herausragende, schwierige Fragestellungen beschränkt.

Mit zunehmender Komplexität des Systems und steigendem Anspruch an die Erfassung einzelner Tragwirkungen oder von Bauzuständen steigt der numerische Bearbeitungsaufwand. Um die Vorteile der FEM zu nutzen, muß daher eine den jeweiligen Aufgaben angepaßte numerische Modellierung gewählt werden. Mit stark verein-

fachten Annahmen, zum Beispiel zum Materialverhalten des Baugrunds, können häufig bereits grundsätzliche Zusammenhänge und Besonderheiten des Kraftflusses und der Beanspruchung des Baugrunds aufgezeigt werden, die bei herkömmlichen Berechnungen nicht deutlich werden. Auf der Basis konventioneller Berechnungsmodelle entworfene Baugrubensicherungen können durch Heranziehen der FEM auch optimiert werden.

Die vorliegende Empfehlung befaßt sich vorwiegend mit der Ermittlung von Verformungen im Untergrund, die durch einen Baugrubenausgrab und abgestützten Verbau sowie gegebenenfalls eine zusätzlich abgedichtete Baugrubensohle entstehen. Für die verschiedenen Verbausysteme werden numerische Modellbildungen empfohlen sowie Bauzustände genannt, die sich signifikant auf die Baugrundverformungen auswirken. Entsprechend dem Vorgehen in der Praxis werden dabei überwiegend Simulationen durch ebene Verformungsmodelle behandelt. Durch Gewichtungen müssen tatsächlich räumlich wirkende Konstruktionselemente wie Anker, Träger und Nägel sinnvoll adaptiert werden.

Auch bei Vorgabe gleicher numerischer Modelle sowie Werte für Materialparameter werden je nach Anwender sowie verwendetem Programm häufig stärker voneinander abweichende Ergebnisse erhalten. Im Anhang zu dieser Empfehlung sind für ein Beispiel die Ergebnisse von Sensitivitätsstudien zusammengestellt (Dieser Anhang wird in einer späteren Ausgabe der *geotechnik* veröffentlicht). Es werden die Einflüsse unterschiedlicher Modellannahmen auf die Ergebnisse ermittelt, und die verschiedenen Parameter werden in die Klassen wichtig oder weniger wichtig für die Ergebnisse eingestuft. Die Werte von Parametern mit größerem Einfluß auf die Ergebnisse sollten in den Berechnungen variiert werden.

### 3.2 Numerisches Modell, Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen, Diskretisierung

Zur Durchführung rechnerischer Untersuchungen mit der FEM muß die vorhandene Situation, bestehend aus der Baugrube, dem Untergrund und eventuell vorhandenen Nachbarbebauungen und technischen Einrichtungen, in einem Modell nachgebildet werden.

Baugrubensicherungen sind häufig lotrechte flächige Tragwerke, bei denen in Stützwandlängsrichtung aufgrund gleichförmiger Geometrie und nahezu gleichmäßiger äußerer Einwirkung keine nennenswerten Verformungen auftreten. Aufgrund dieser Randbedingungen kann für die rechnerischen Untersuchungen in vielen Fällen vereinfachend ein ebener Verformungszustand angenommen und die Berechnung näherungsweise an einem zweidimensionalen Berechnungsausschnitt durchgeführt werden. Ausnahmen stellen bei-

spielsweise Baugrubenecken oder Bereiche mit örtlich konzentrierten Bauwerkslasten dar, für die gesonderte Betrachtungen notwendig werden.

Durch die Annahme eines zweidimensionalen Systems wird vernachlässigt, daß bei Herstellung verschiedener Verbausysteme temporär auch Verformungen in Baugrubenlängsrichtung stattfinden können. Darüber hinaus bleibt unberücksichtigt, daß zum Beispiel Anker und Steifen singular angeordnete und somit räumlich wirkende Stützelemente sind. Die Annahme eines ebenen Berechnungssystems ist dennoch auch dann im allgemeinen noch zutreffend, wenn mit den Berechnungen die Schnittgrößen zur Dimensionierung des Verbaus und der zugehörigen Sicherungsmittel sowie die globalen aushubbedingten Verformungen erfaßt werden sollen. Besteht darüber hinaus noch die Aufgabe, die Verformungen detailliert zu berechnen, und ist aus dem Bauverfahren selbst ein nennenswerter Verformungszuwachs zu erwarten, sind gegebenenfalls bestehende räumliche Effekte im Berechnungsmodell zu berücksichtigen. Zu Beginn der numerischen Untersuchungen sollte daher stets geprüft werden, ob für die vorliegende Fragestellung die vereinfach-

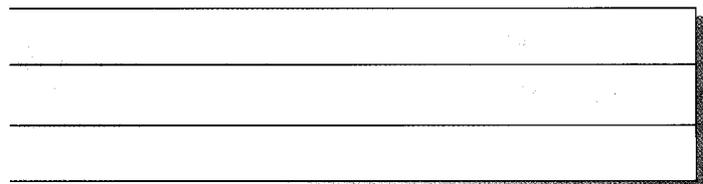


invest Herne

Internationale Fachmesse

22. - 25. Mai 2002

Freigelände Westring 303 in Herne



Infos unter [www.terrainvest.de](http://www.terrainvest.de)



WFG Herne  
Westring 303, 44629 Herne

Telefon (0 23 23) 9 25-100  
Fax (0 23 23) 9 25-120  
e-mail [info@wfg-herne.de](mailto:info@wfg-herne.de)

terra

invest  
Herne

1. **Empfehlungen zur Durchführung numerischer Berechnungen**
  - 1.1 Geometrisches Modell
  - 1.2 Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen
  - 1.3 Diskretisierung
  - 1.4 Primärspannungszustand
  - 1.5 Bauzustände
  - 1.6 Stoffgesetze für Boden und Fels
    - 1.6.1 Fels
    - 1.6.2 Boden unter dränierten Bedingungen
    - 1.6.3 Gesättigte kohäsive Böden unter undrännierten Bedingungen
    - 1.6.4 Materialien mit zeitabhängigem Verhalten
  - 1.7 Iterationstechnik
  - 1.8 Dokumentation der numerischen Berechnung
2. **Tunnelbau unter Tage**
  - 2.1 Vorbemerkungen
  - 2.2 Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen, Diskretisierung
  - 2.3 Simulation von Bauverfahren
    - 2.3.1 Bauverfahren
    - 2.3.2 Spritzbetonbauweise
    - 2.3.3 Schildvortrieb und Rohrvorpressungen
    - 2.3.4 Gefrierverfahren
  - 2.4 Auswertung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse
  - 2.5 Rückkopplung zwischen Berechnung und Messung
3. **Baugruben**
  - 3.1 Vorbemerkungen
  - 3.2 Numerisches Modell, Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen, Diskretisierung
  - 3.3 Hinweise zur Wahl des Stoffmodells
    - 3.3.1 Allgemeines
    - 3.3.2 Dränierte/undrännierte Analyse – Berücksichtigung von Konsolidierungsvorgängen
  - 3.4 Einfluß des Grundwassers
    - 3.4.1 Allgemeines
    - 3.4.2 Simulation der Grundwasserabsenkung im numerischen Modell
    - 3.4.3 Sonstiges
  - 3.5 Numerische Simulation des Baugrubenverbaus
    - 3.5.1 Spundwände, Bohrpfehl- und Schlitzwände sowie im Düsenstrahlverfahren hergestellte Verbauwände
    - 3.5.2 Frostwände
    - 3.5.3 Trägerverbau
    - 3.5.4 Bodenvernagelung
    - 3.5.5 Verpreßanker und Steifen
  - 3.6 Sicherung der Baugrubensohle
    - 3.6.1 Allgemeines
    - 3.6.2 Tiefliegende Dichtsohlen
    - 3.6.3 Hochliegende Sohlen
  - 3.7 Auswertung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse
    - 3.7.1 Plausibilitätskontrollen
    - 3.7.2 Verformungsprognosen
  - 3.8 Ausblick

Gesamtgliederung der Empfehlung des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“.

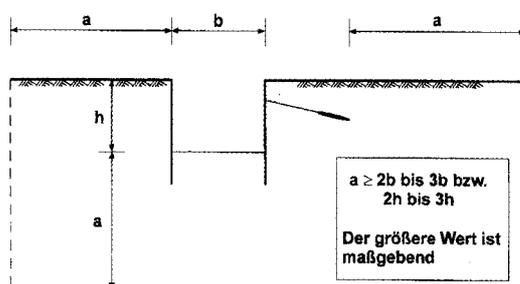


Bild 1. Größe des Berechnungsausschnitts.

chende Annahme eines zweidimensionalen Systems zulässig ist oder ob räumliche Betrachtungen notwendig sind.

In Anlehnung an den Abschnitt 1.2 der Empfehlungen soll der Berechnungsausschnitt so gewählt werden, daß die auf den Primärzustand folgenden Rechenschritte an den Brandungen keine nennenswerten Änderungen der Spannungen beziehungsweise Verformungen bewirken. Dies ist in der Regel dann der Fall (Bild 1), wenn die Abstände vom seitlichen und unteren Rand mindestens dem Zwei- bis Dreifachen der Baugrubentiefe beziehungsweise der Baugrubenbreite entsprechen. Der größere Wert ist jeweils maßgebend. Der seitliche Randabstand ist bei ausgesteiften Baugruben auf die Verbauwand und bei verankerten Systemen auf das erdseitige Ende der Krafteintragungslänge der Anker zu beziehen.

Baugruben in geneigtem Gelände oder eine zu berücksichtigende Grundwasserströmung können erheblich größere Berechnungsausschnitte erfordern. Gleiches gilt auch für Fälle mit besonderen geotechnischen und bautechnischen Gegebenheiten. So können Abweichungen von den empfohlenen Randabständen erforderlich werden, wenn die Steifigkeit einer vorhandenen Nachbarbebauung für die Ermittlung der aushubbedingten Verformungen wesentlich ist und das vorhandene Gebäude vergleichsweise große Abmessungen aufweist. Der Berechnungsausschnitt muß in der Regel vertieft werden, wenn in dem zu untersuchenden System Pfahlgründungen oder Auftriebsicherungen mit Pfählen oder Ankern zu berücksichtigen sind.

Besteht bezüglich des Baugrundaufbaus und der Einwirkungen Symmetrie zur Baugrubenachse, ist es ausreichend, lediglich eine Symmetriehälfte des Berechnungsausschnitts zu diskretisieren. Die gleiche Vereinfachung kann bei breiten Baugruben mit ungleichmäßigen seitlichen Einwirkungen eingeführt werden, wenn eine gegenseitige Beeinflussung der Baugrubenwände ausgeschlossen werden kann.

Hinsichtlich der Diskretisierung des Berechnungsausschnitts wird auf die allgemeingültigen Hinweise des Abschnitts 1.3 verwiesen. Aufgabenspezifisch sind bei der Diskretisierung von Baugruben neben signifikanten Baugrundsichten die temporären Aushubgrenzen, die es nachzubilden gilt. Bereiche mit hohen Spannungsgradienten, in denen die Diskretisierung entsprechend Abschnitt 1.3 verfeinert werden muß, treten bei Baugruben vor allem im erdseitigen Nahbereich der Wand und unterhalb der Baugrubensohle am Fußauflager des Verbaus auf.

Der Verbau und die Sicherungselemente haben einen entscheidenden Einfluß auf die Verformungen und sind im Berechnungsmodell zutreffend nachzubilden (vgl. Abschnitt 3.5). Der Schubverbund zwischen Baugrund und Verbau ist dabei wirklichkeitsnah zu berücksichtigen. Die hierfür

erforderlichen Diskretisierungen sind systemspezifisch zu wählen.

Benachbarte bauliche Einrichtungen sind unter Berücksichtigung deren Steifigkeit in das FE-Modell einzubeziehen. Auf eine Nachbildung von Konstruktionen mit geringer Steifigkeit kann dabei in der Regel verzichtet werden. Der Berechnungsausschnitt endet in diesem Fall in Höhe der Gründungssohle beziehungsweise in Geländehöhe, und die Bauwerkslast wird durch äquivalente Knotenkräfte simuliert. Biegesteife beziehungsweise starke Konstruktionen sind in den Berechnungsausschnitt mit einzubeziehen. Dabei reicht es vielfach aus, lediglich die Gründungsplatte zu diskretisieren und dieser eine fiktive, dem Gesamtbauwerk entsprechende Steifigkeit zuzuweisen.

### 3.3 Hinweise zur Wahl des Stoffmodells

#### 3.3.1 Allgemeines

Allgemeine Ausführungen zu Stoffmodellen enthält Abschnitt 1.6 der Empfehlungen. In diesem Abschnitt wird vor allem auf die speziellen Anforderungen an Materialmodelle bei der Verformungsberechnung von Baugruben eingegangen.

Einfache Stoffmodelle in FE-Programmen sind linear-elastisch-ideal-plastische Ansätze. Neben den Scherfestigkeitsparametern Reibungswinkel und Kohäsion werden Werte für den Elastizitätsmodul und die Querdehnungszahl benötigt, die häufig als Konstante angenommen werden. Diese Ansätze sind zur Beschreibung von Grenzzuständen zwar im allgemeinen noch ausreichend, für Verformungsberechnungen aber im allgemeinen nur bedingt geeignet. Dafür muß vielmehr das nichtlineare, plastische Materialverhalten einschließlich des Volumenänderungsverhaltens von Boden berücksichtigt werden.

Werden dennoch auch für Verformungsberechnungen linear-elastisch-ideal-plastische Modelle verwendet, sollte wenigstens die unterschiedliche Bodensteifigkeit bei Erst- sowie Ent- und Wiederbelastung berücksichtigt werden. Entlastungen entstehen zwar auch durch die Mobilisierung des aktiven Zustands (Verringerung der Horizontalspannungen), werden aber üblicherweise nur im Bereich der Baugrubensohle betrachtet. Hier führt der Aushub zu einer starken Reduzierung der lotrechten Spannungen. Berechnungen mit einem festen Erstbelastungsmodul ergeben gegenüber denen mit einem Ent- und Wiederbelastungsmodul unrealistisch große Sohlhebungen.

Weitergehend sind Ansätze, die das vorhandene, ausgeprägt nichtlineare Stoffverhalten von Böden bei Erstbelastungen zusätzlich durch ein pseudoelastisches Verhalten beschreiben. Es ist dann ein vom Spannungsniveau abhängiger E-Modul zu verwenden.

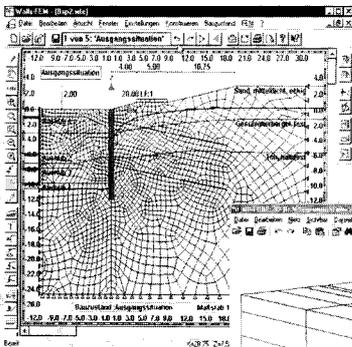
Mit Meßergebnissen im allgemeinen gut übereinstimmende numerische Ergebnisse werden dann erhalten, wenn ein elasto-plastisches oder ein hypoplastisches Stoffgesetz für Boden verwen-

det wird. Durch das elasto-plastische Modell (strain hardening) läßt sich zum Beispiel das Verfestigungs- und Entfestigungsverhalten sowie auch das Dilatationsverhalten zutreffend erfassen. Beide Stoffmodelle enthalten unter anderem auch die Porenzahl und damit die Dichte des Bodens als Einflußparameter.

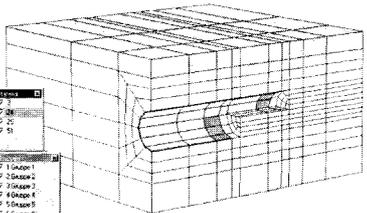
#### 3.3.2 Dränierete/undrännierte Analyse – Berücksichtigung von Konsolidierungsvorgängen

Sind keine nennenswerten Porenwasserüber-(unter)drücke (kurz: Porenwasserdrücke) infolge des Baugrubenaushubs zu erwarten, kann mit totalen Spannungen gerechnet werden.

Bei gesättigten, wenig durchlässigen Böden und zeitlich befristeten Bauzuständen ändern sich bestehende Porenwasserdrücke nur wenig. Konsolidierungsvorgänge können dann vernachlässigt werden. Die Berechnungen sind für den undrännierten Zustand (Anfangszustand) durchzuführen. Diese können entweder mit totalen Spannungen unter Berücksichtigung der undrännierten Scherfestigkeit und somit ohne explizite Berechnung von Porenwasserdrücken oder aber mit effektiven Spannungen und Porenwasserdrücken als Variablen erfolgen.



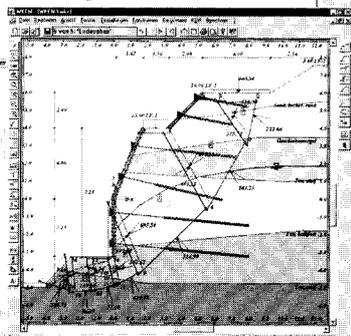
**WALLS-FEM**  
Baugruben-Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente



**WinTUBE**  
Grafische Eingabe von Tunnelgeometrien



**FIDES-KEM**  
Berechnung der Standsicherheit mit der Methode der Kinematischen Elemente



**FIDES DV-PARTNER**  
SOF-STK SYSTEMHAUS

**FIDES DV-Partner GmbH**  
Pettenkoferstrasse 4b  
10247 Berlin  
Tel.: 030 / 4 21 57 90-0  
Fax.: 030 / 4 21 57 90-2  
<http://www.fides-dvp.de>

**FIDES DV-Partner GmbH**  
Dessauerstrasse 9  
80992 München  
Tel.: 089 / 14 38 29-0  
Fax.: 089 / 14 38 29-11

**FIDES DV-Partner GmbH**  
Alte Mainzer Strasse 46  
55129 Mainz  
Tel.: 06131 / 91 35 46-0  
Fax.: 06131 / 91 35 46-11  
[info@fides-dvp.de](mailto:info@fides-dvp.de)

Letzteres ist vorzuziehen, da aus den ermittelten Porenwasserdruckverteilungen gegebenenfalls zusätzliche Hinweise auf kritische Bauphasen abgeleitet werden können. Für den Endzustand ist in der Regel eine Berechnung mit Annahme des vollständig dränierten Zustands erforderlich.

Porenwasserdruckänderungen wirken sich auf die Bemessung von Stützbauwerken üblicherweise nennenswert aus. Ergänzend zum Abschnitt 1.6 der Empfehlungen ist nachfolgend eine Vorgehensweise zur Ermittlung von Porenwasserdruckverteilungen durch einen Baugrubenaushub dargestellt:

- ⇨ Ermittlung der effektiven Spannungs- und Porenwasserdruckverteilungen eines Aushubzustands unter Annahme des undränierten Zustands.
- ⇨ Für die Dauer des Aushubzustands wird die Konsolidierung berechnet. Die effektiven Spannungen sowie die Porenwasserdrücke ändern sich.
- ⇨ Wiederholung der Vorgehensweise für die nächsten Aushubzustände.
- ⇨ Falls für die Baumaßnahme relevant, sind in einer abschließenden Konsolidierungsberechnung die noch verbliebenen Porenwasserdrücke abzubauen.

### 3.4 Berücksichtigung des Grundwassers

#### 3.4.1 Allgemeines

Die Grundwassersituation hat einen dominierenden Einfluß für Baugruben. Sie wirkt sich sowohl auf das Verformungsverhalten des Baugrunds (Auftrieb) als auch auf die horizontalen Einwirkungen des Verbaus nachhaltig aus. In der numerischen Analyse ist zwischen dem Berechnungsschritt „Grundwasserabsenkung“, der die Auswirkungen einer Grundwasserabsenkung vor beziehungsweise während des Baugrubenaushubs erfassen soll und einem Berechnungsschritt „Konsolidierung“, der den Einfluß des Abbaus von Porenwasserdrücken berücksichtigt, zu unterscheiden.

Vereinfachend können die Maßnahmen zur Grundwasserhaltung bei der Herstellung von Baugruben in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- ⇨ Weiträumige Grundwasserabsenkung (außerhalb und innerhalb der Baugrube). Dies ist für tiefe Baugruben im innerstädtischen Bereich im allgemeinen nicht möglich und spielt daher nur eine untergeordnete Rolle.
- ⇨ Grundwasserabsenkung nur innerhalb der Baugrube.
- ⇨ Aushub unter Wasser.

Die konstruktiven Maßnahmen der entsprechenden Wasserhaltung hängen von den geologischen Bedingungen ab. Ist eine Einbindung der Baugrubenumschließung in wenig durchlässige Bodenschichten nicht möglich, so wird im allgemeinen die Anordnung einer Dichtsohle erforderlich. Je nach bautechnischer Ausführung ist diese nur als hydraulische Barriere in der Strömungsbe-

rechnung beziehungsweise zusätzlich als wirksame Abstützung in der Verformungsberechnung zu berücksichtigen.

#### 3.4.2 Simulation der Grundwasserabsenkung im numerischen Modell

Im allgemeinen können die Berechnungsschritte zur Simulation der Grundwasserabsenkung beziehungsweise von Konsolidierungsvorgängen als eigene „Lastfälle“ betrachtet werden. Nur in Ausnahmesituationen wird man Grundwasserabsenkung und Aushubsimulation in einem Berechnungsschritt in einer gekoppelten, instationären Berechnung erfassen müssen. Einige Hinweise zur Modellierung der Grundwasserabsenkung sind:

- ⇨ Weiträumige Grundwasserabsenkung in durchlässigen Böden, keine zeitliche beziehungsweise räumliche Überschneidung mit den Aushubphasen (offene Wasserhaltung). Die Bodenverformungen infolge der Grundwasserabsenkung können durch eine stationäre beziehungsweise instationäre Strömungsberechnung mit anschließender Verformungsanalyse ermittelt werden, in der auch die Strömungskräfte zu berücksichtigen sind. In einer vereinfachten Berechnung wird ein Grundwasserspiegel angenommen, und es werden die Bodenverformungen durch Änderung der Bodenwichte ermittelt. Im Bereich von Bodenwiderständen müssen Strömungswiderstände stets dann berücksichtigt werden, wenn sie eine Reduzierung der Bodenwichte bewirken.
- ⇨ Grundwasserabsenkung nur innerhalb der Baugrube (Einbindung der Baugrubenumschließung in eine dichte Bodenschicht beziehungsweise Herstellung einer künstlichen Dichtsohle). Der Grundwasserspiegel außerhalb der Baugrube bleibt dann weitgehend unverändert. Entstehen im Boden keine nennenswerten hydraulischen Gradienten, können die Verformungen durch Berücksichtigung sich ergebender Änderungen von Bodenwichten ermittelt werden. Zusätzlich ist der Differenzwasserdruck auf die Baugrubenumschließung als externe Last anzusetzen.
- ⇨ Aushub unter Wasser mit hochliegender Dichtsohle, zum Beispiel Unterwasserbetonsohle. Das Abpumpen des Wassers aus der Baugrube (Lenzen) ist als gesonderter Lastfall zu untersuchen.

#### 3.4.3 Sonstiges

Wird die Entwässerung durch Vakuumburgen durchgeführt, können die dabei auftretenden Unterdrücke im Regelfall in der numerischen Simulation unberücksichtigt bleiben. Gegebenenfalls vorhandene gespannte Grundwasserhorizonte sind durch Vorgabe der entsprechenden Porenwasserdruckverteilungen zu berücksichtigen.

Die Beurteilung der Auftriebsicherheit für den Endzustand unter Berücksichtigung der endgülti-

gen Grundwasserverhältnisse ist gesondert nachzuweisen. Alternativ kann dieser Nachweis als abschließender Berechnungsschritt in die FE-Berechnung integriert werden.

### 3.5 Numerische Simulation des Baugrubenverbau

#### 3.5.1 Spundwände, Bohrpfahl- und Schlitzwände sowie im Düsenstrahlverfahren hergestellte Verbauwände

##### Spundwände

Durch das Einbringen von Spundbohlen wird das Gefüge des Baugrunds im Nahbereich der Wand zum Teil stark verändert. Die Veränderungen der Festigkeits- und Verformungseigenschaften der beeinflussten Böden hängen je nach Zustand (Lagerungsdichte, Konsistenz, geologische Vorgesichte) ab von

- ◊ Dem gewählten Einbringverfahren (Rammen, Einvibrieren, Drücken),
- ◊ Etwaigen Einbringhilfen (Spülhilfe, Lockerungsbohrungen).

Auf das Tragverhalten von ausschließlich durch Erddruck belasteten Spundwänden wirken sich Herstellungseinflüsse allerdings nur verhältnismäßig gering aus und können daher häufig vernachlässigt werden. Soll jedoch bei zusätzlich wirksamen vertikalen Einwirkungen das Setzungsverhalten der Wand zutreffend erfaßt werden, sind die aufgeführten Effekte in der Berechnung zu berücksichtigen. Dies kann dadurch erfolgen, daß nach Simulation des Spundwandeinbaus den benachbarten Bodenelementen modifizierte bodenmechanische Kennwerte zugewiesen werden, die das veränderte Tragverhalten der Böden charakterisieren (Interface-Elemente, Kontaktflächen).

Die Spundwand sollte mit speziellen ebenen Balkenelementen diskretisiert werden, denen eine den Spundbohlen entsprechende, idealisierte Biege- und Normalsteifigkeit zugewiesen wird. Im Übergang von der Spundwand zum Baugrund sollten schmale Übergangselemente eingeschaltet werden. Vorteilhaft ist der Einsatz von Kontaktelementen oder Interface-Elementen, mit denen das Verhalten der Kontaktfläche durch definierte Stoffgesetze unter Berücksichtigung von Schlupf und Restscherfestigkeit beschrieben werden kann. Sind für die aktive beziehungsweise passive Wandseite unterschiedliche Wandreibungen zu erwarten, ist dies durch Zuordnung differenzierter Materialeigenschaften an die Übergangselemente zu berücksichtigen. Die Wahl dieser Kennwerte beeinflusst das Verformungsverhalten des Systems und insbesondere die Vertikalverschiebungen von Wand und gestütztem Baugrund signifikant. Es wird empfohlen, hierzu Parameterstudien und Plausibilitätskontrollen, gegebenenfalls unter Verwendung von Meßergebnissen im Sinn der Beobachtungsmethode durchzuführen.

##### Bohrpfahlwände

Für Bohrpfahlwände aus überschnittenen oder tangierenden Pfählen, die mit verrohrten Bohrungen beziehungsweise mit einem Schneckenbohrgerät hergestellt werden, kann näherungsweise angenommen werden, daß sich der primäre Spannungs- und Verformungszustand durch das Herstellungsverfahren nicht signifikant ändert. Mit dieser Voraussetzung treten in allen Vor- und Rückbauzuständen quasi-ebene Verformungszustände auf. Die für Spundwände geltenden Hinweise sind dementsprechend sinngemäß anzuwenden. Die kreisförmigen Pfähle können in den Berechnungen vereinfachend durch Rechteckquerschnitte mit äquivalenter Dehn- und Biegesteifigkeit ersetzt werden.

Abweichend von den Spundwandberechnungen sind die vergleichsweise größere Dicke der Bohrpfahlwände und die daraus resultierenden Anforderungen an die Diskretisierung der Wand zu berücksichtigen. Grundsätzlich sollten für die Simulation der Pfähle Flächen- beziehungsweise Volumenelemente verwendet werden. Die Elemente sollten dabei einen quadratischen oder höherwertigen Verformungssatz aufweisen.

Wenn bei Bohrpfählen von einem vollständigen Scherverbund zwischen Tragwerk und Boden ausgegangen werden kann, ist die Modellierung einer definierten Wandreibung mit Hilfe von Übergangs- beziehungsweise Kontaktelementen in der Regel nicht erforderlich. Falls in Einzelfällen jedoch durch technische Maßnahmen, zum Beispiel Einsatz eines Hüllrohrs, die Mantelreibung am Pfahlschaft reduziert wird, sind in den relevanten Bereichen spezielle Elemente einzufügen, denen entsprechende mechanische Eigenschaften zuzuordnen sind.

Bei aufgelösten Bohrpfahlwänden stellt sich im Boden ein räumliches Traggewölbe ein. In Abhängigkeit vom Verbaugrad der Wand entspannt sich der Baugrund zwischen den Pfählen, wobei in die Baugrubengerichtete Verformungen auftreten. Dieses Verhalten kann bei der globalen Untersuchung von Verbauwänden in der Regel vernachlässigt werden, sofern der Wandbereich zwischen den Pfählen ausreichend standsicher ist. Aufgelöste Bohrpfahlwände können daher im allgemeinen vereinfachend wie durchgehende Wände behandelt werden. Die Wandsteifigkeit ist unter Berücksichtigung des Verbaugrads anzusetzen.

### Umrüstung Plattendruckgeräte auf aktuelle Norm

Wir bieten an:

- Seriöse Beratung
- schnelle Abwicklung inkl. Transport
- Kostengünstig
- Umbau der Geräte aller Hersteller möglich
- Neugeräte ab Lager verfügbar

INFO bei:

#### Dernbach

- Alles für Geotechnik -  
Mermicherhof 8  
56283 Halsenbach  
Tel.: 06742-94783  
Fax: 06742-94784

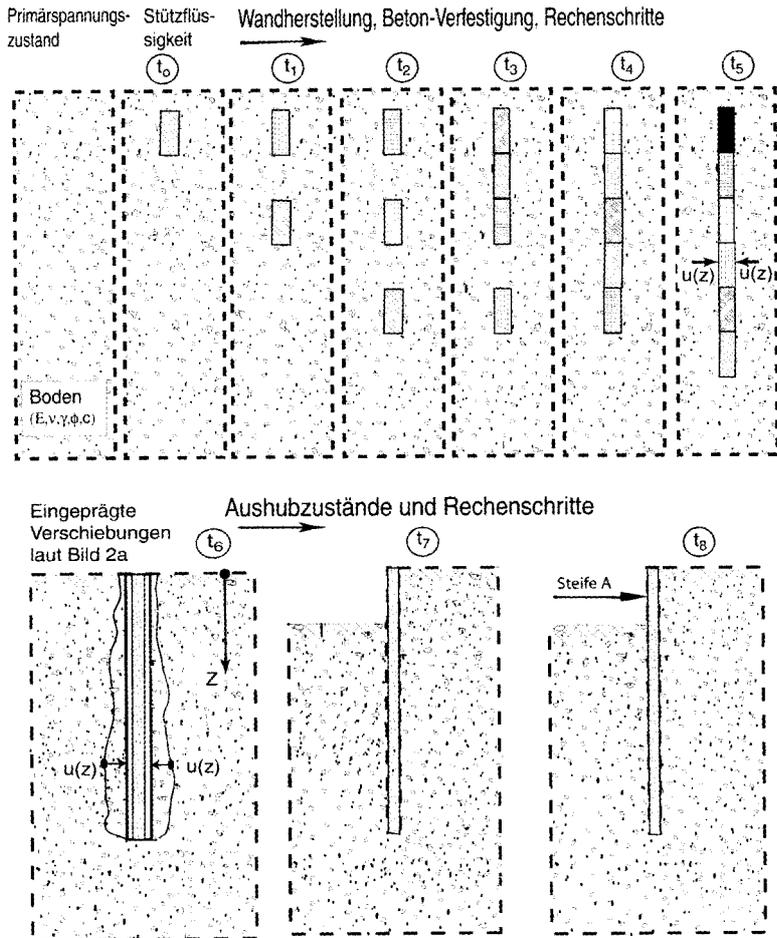


Bild 2. Simulation der Schlitzwandherstellung in einer Ebene (oben) und Verformungen des Schlitzes und Simulation des Baugrubenaushubs (unten).

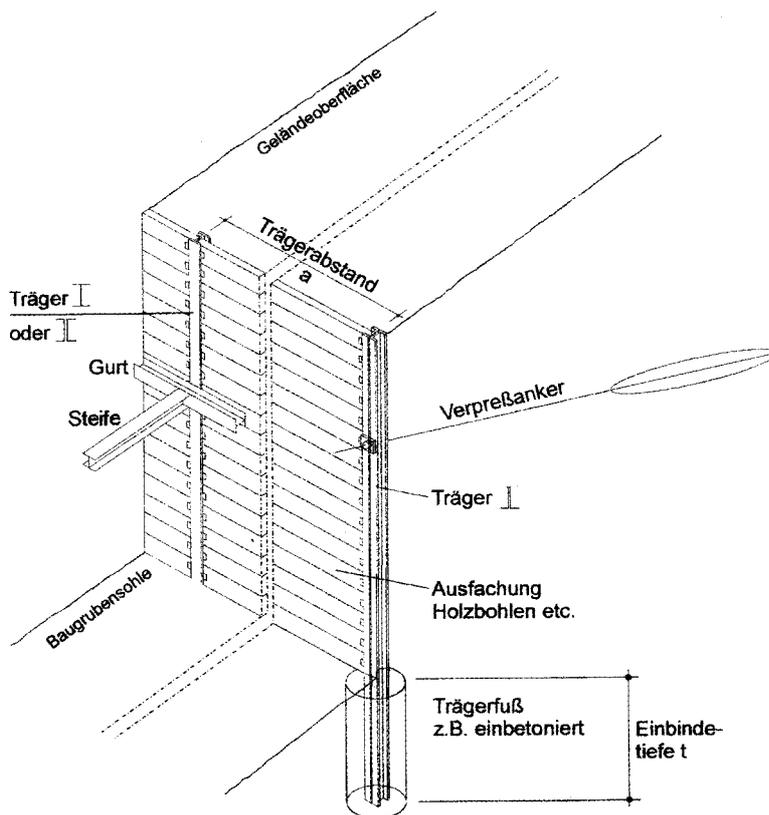


Bild 3. Trägerverbau – System.

Die Standsicherheit des Traggewölbes zwischen den Bohrpfählen kann näherungsweise mit ebenen Modellen untersucht werden. Als Berechnungsausschnitt wird hierzu eine horizontale Scheibe gewählt, deren Spannweite dem Abstand zwischen den Symmetrieachsen zweier benachbarter Pfähle entspricht. Orthogonal dazu soll der Berechnungsausschnitt mindestens zehn Pfahldurchmesser betragen. Die Berechnungen erfolgen für unterschiedlich tiefe Horizonte. Der in der jeweiligen Tiefe wirksame Primärspannungszustand ist vorab zu ermitteln und wird der Scheibe im Primärfall eingepreßt.

### Schlitzwände

Für die Ausführung von Schlitzwänden stehen in der Praxis unterschiedliche Techniken zur Verfügung. Für Baugruben werden überwiegend das Zweiphasenverfahren mit Herstellung der Schlitzlamelle im Pilgerschrittverfahren sowie das Einphasenverfahren mit eingestellter Spundwand und kontinuierlicher Arbeitsweise eingesetzt. Beide Verfahren haben gemeinsam, daß eine temporäre Schlitzwandlamelle hergestellt wird, die zunächst durch eine verhältnismäßig niedrigviskose Suspension gestützt wird. Es stellt sich um diese Lamelle ein räumliches Traggewölbe ein, das sich am Baugrund und den bereits erhärteten Wandlamellen abstützt. Die vollständig fertiggestellte und erhärtete Wand bildet im Unterschied hierzu ein linienförmiges Tragwerk, bei dem in Bauwerkslängsrichtung keine nennenswerten Beanspruchungen auftreten.

Schlitzwände werden im allgemeinen für den Endzustand untersucht, in dem ein Linienbauwerk mit quasi-ebenem Verformungszustand besteht. Die FE-Berechnungen können mit dieser Voraussetzung dann wie für Bohrpfehlwände durchgeführt werden.

Eine detaillierte Simulation räumlicher Bauzustände erfolgt üblicherweise nicht. Es ist aber zu beachten, daß im Bauzustand infolge der großen Nachgiebigkeit der Suspension in den Schlitzern größere Verformungen auftreten können, die gegebenenfalls zu Schäden an benachbarten Gebäuden führen können. Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob die zuvor empfohlene Vereinfachung zulässig oder eine detaillierte Untersuchung erforderlich ist.

In genaueren Untersuchungen sind das räumliche Tragverhalten sowie die sich zeitlich ändernden Festigkeiten und Steifigkeiten der Schlitzwandmasse zu berücksichtigen. Dies erfordert ein zeitabhängiges, dreidimensionales Berechnungsmodell mit variablen Parametern für die Wandelemente. Der Rechenaufwand für derartige Untersuchungen ist außerordentlich hoch und nur im Einzelfall zu vertreten. Eine nennenswerte Reduzierung des Aufwands ergibt sich, wenn die Schlitz- und die Wandherstellung in verschiedenen Niveaus simuliert und für die Niveau-Ebenen jeweils ein ebener Verformungszustand angenommen wird (Bild 2,

oben). Es werden von der Tiefe abhängige Verschiebungen der Schlitzwandränder erhalten, die in den folgenden 2D-Rechenschritten zur Simulation des Baugrubenaushubs als eingeprägte Bodenverschiebungen einzusetzen sind (Bild 2, unten).

*Im Düsenstrahlverfahren hergestellte Verbauwände*

Das Düsenstrahlverfahren wird bei der Herstellung von Baugrubenwänden in der Regel im Zusammenhang mit Unterfangungs- beziehungsweise Abfangungsmaßnahmen ausgeführt. In den Berechnungen sind die zu sichernde Gebäudesubstanz und die wesentlichen Gründungs- sowie gegebenenfalls Tragelemente zu erfassen.

Die Verbauwände setzen sich aus einzelnen zylindrischen Säulen zusammen, die unmittelbar nach der Herstellung eine geringe Festigkeit und eine hohe Verformbarkeit aufweisen. Die endgültige Tragfähigkeit erhalten die Säulen erst durch Erhärten der Masse. Die zeitliche Abfolge bei der Herstellung der einzelnen Säulen wird bauwerkspezifisch festgelegt und kann im allgemeinen nicht schematisiert werden. Es können nennenswerte Verformungen im Bereich der frischen Säulen auftreten, die wie bei der Herstellung von Schlitzwänden erfaßt werden können.

Sind mit dem Düsenstrahlverfahren auch nennenswerte lotrechte Einwirkungen auf das abzufangende Bauwerk verbunden, kann dieser Effekt durch eingeprägte Volumenänderungen für Säulenelemente berücksichtigt werden. Die Volumenänderungen müssen anhand der Herstellungskriterien abgeschätzt werden.

**3.5.2 Frostwände**

Durch das Gefrieren von Bodenwasser erreicht der abgekühlte Boden ähnliche Eigenschaften wie eine Betonwand. Die Frostwand hat eine Sperrwirkung gegenüber Wasser und widersteht bei ausreichender Dimensionierung sowohl Wasser als auch Erddrücken.

Das Gefrieren des Untergrunds erfolgt in der Regel vor Beginn des Baugrubenaushubs. Von der Geländeoberfläche aus werden Bohrungen hergestellt und Gefrierrohre darin abgelassen. Durch die Gefrierrohre zirkuliert das Kühlmedium. Am Rand des Frostkörpers entstehende Eislinsen und damit verbundene Volumenvergrößerungen können den Primärzustand vor Gefrierbeginn bereits nennenswert verändern. Ob derartige Eigenspannungszustände für das Bauwerk von Bedeutung sind, sollte vorab abgeschätzt werden.

Gefrorener Boden weist ein ausgeprägtes temperatur- sowie zeitabhängiges Materialverhalten auf (vergl. auch Abschnitt 1.6 und Abschnitt 2.3.4 der Empfehlungen). Das Stoffmodell für gefrorenen Boden muß temperaturabhängige Kriechverformungen beschreiben können. Bei Bemessungen auf der Basis zulässiger Spannungen ist zu beachten, daß letztere signifikant von der Zeit

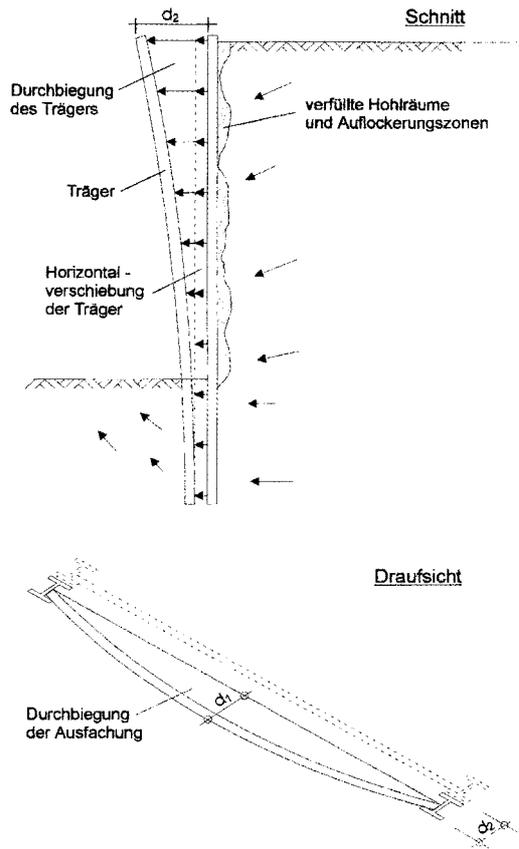


Bild 4. Trägerverbau – Verschiebungsanteile.

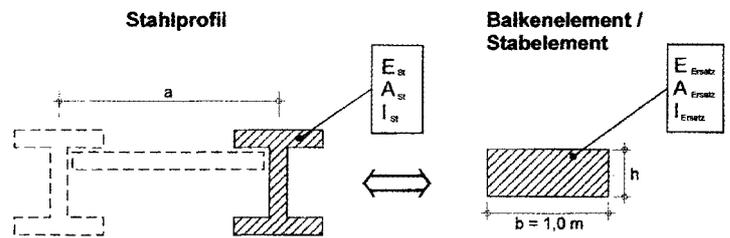


Bild 5. Ersatzsteifigkeit am Beispiel eines Stahlprofils.

**Die Biegesteifigkeit (E I) und die Normalsteifigkeit (EA) des Ersatzbalkens bzw. Stabelementes entsprechen den vorhandenen Steifigkeiten des Stahlprofils.**

Daraus folgt:

$$(1) \quad \frac{E_{St} \times I_{St}}{a} \stackrel{!}{=} E_{Ersatz} \times I_{Ersatz} = E_{Ersatz} \times \frac{b \times h^3}{12}$$

$$(2) \quad \frac{E_{St} \times A_{St}}{a} \stackrel{!}{=} E_{Ersatz} \times A_{Ersatz} = E_{Ersatz} \times b \times h$$

**Ermittlung der Ersatzgrößen des Trägerverbau:**  
Nach Gleichung (2) gilt:

$$(3) \quad h = \frac{E_{St} \times A_{St}}{a \times E_{Ersatz}}$$

Gleichung (3) in (1) eingesetzt und nach E<sub>Ersatz</sub> umgestellt:

$$(4) \quad E_{Ersatz} = \sqrt{\frac{E_{St}^2 \times A_{St}^3}{12 a^2 \times I_{St}}}$$

abhängen. Bevorzugt sind Verformungskriterien zu verwenden.

Frostkörper werden nach den gleichen Regeln diskretisiert wie Bohrpfahlwände (vergl. Abschnitt 3.5.1). Üblicherweise wird in einer Vorberechnung zunächst die Verteilung der Frosttemperatur im Untergrund ermittelt. Von Interesse sind die „Schließzeiten“ der einzelnen Frostkörper sowie relevante Zwischenbauzustände und der Zustand „ausgehobene Baugrube“. Die thermophysikalischen Berechnungen können auch gemeinsam mit den Festigkeitsberechnungen durch eine gekoppelte FE-Berechnung erfolgen.

Der Nachweis zum Verformungs- und Tragverhalten einer Frostwand kann im allgemeinen auf den Endzustand „ausgehobene Baugrube“ bezogen werden. Die Zeit des Baugrubenaushubs ist dann so kurz angenommen, daß innerhalb dieses Zeitraums auftretende Verschiebungen nur gering sind. Außer von den Sofortverschiebungen, die bei Verwendung eines elasto-viskosen Stoffmodells elastische Anteile sind, hängen die gesamten Wandverschiebungen dominierend von der Standzeit der Verbauwand und damit von den Kriechverformungen ab.

Bild 6. Trägerverbau – FE-Netz für eine 2D-Simulation.

### 3.5.3 Trägerverbau

Der Trägerverbau (Bild 3) wird insbesondere dort eingesetzt, wo keine erhöhten Anforderungen an

die Verschiebungen des Verbaus beziehungsweise an die Setzungen der Geländeoberfläche gestellt werden. Das Tragverhalten wird entscheidend vom räumlichen Erdwiderstand vor den Trägerfüßen bestimmt. Eine numerische Simulation, welche die vorhandene Situation zutreffend beschreibt, muß daher als räumliche Berechnung und mit speziellen Elementen zwischen der Verbauwand und dem Boden durchgeführt werden.

Zur Prognose auftretender Verschiebungen beziehungsweise Setzungen an der Geländeoberkante werden jedoch üblicherweise vereinfachend Berechnungen an einem ebenen System unter Vernachlässigung der Verschiebungsanteile aus der Durchbiegung der Ausfachung zwischen den Trägern durchgeführt (Bild 4). Die folgenden Erläuterungen zur Simulation des Trägerverbaus beschränken sich auf diese ebenen Berechnungen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß die Ergebnisse der ebenen Berechnung um so mehr von der Realität abweichen, je größer die Träger- und gegebenenfalls Ankerabstände sind und je größer die punktförmig wirkenden Gleichgewichtskräfte wie Anker- oder Steifenkräfte sind.

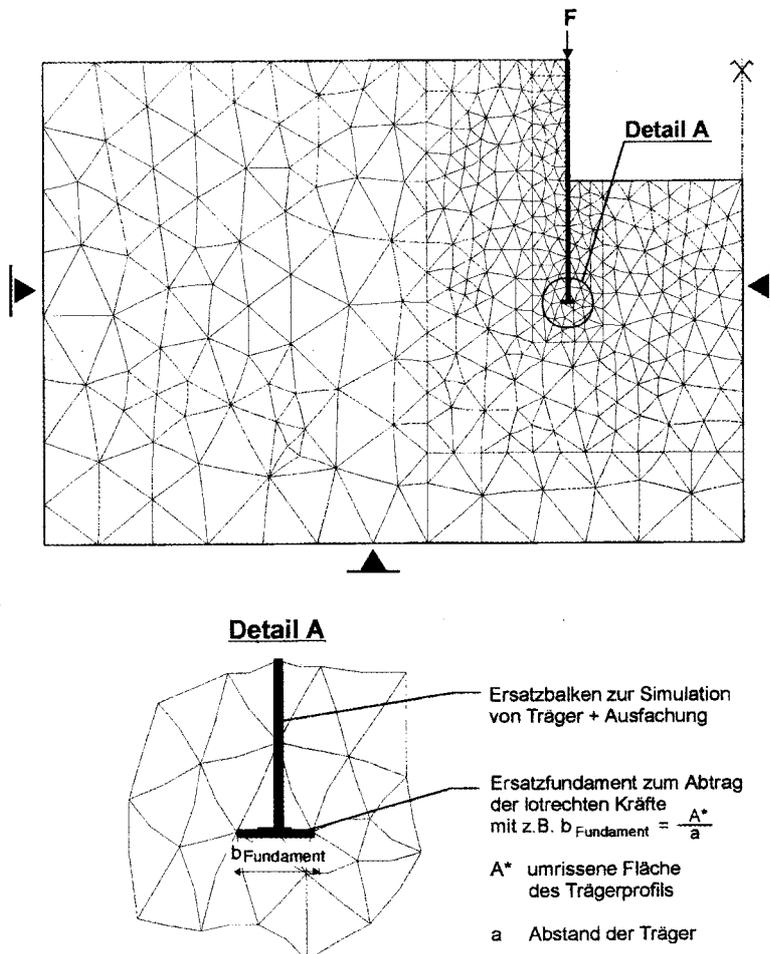
Bei einer ebenen Simulation eines Trägerverbaus sollte das System aus Trägern und Ausfachung durch einen ebenen Ersatzbalken mit Rechteckprofil abgebildet werden. Die Biegesteifigkeit dieses Balkenelements sollte dabei äquivalent der Biegesteifigkeit des Trägers unter Berücksichtigung des Trägerabstands sein (Bild 5). Durch diese Simulation wird der Erdwiderstand vor dem Träger bei großen Trägerabständen überschätzt. Es ist daher zu überprüfen, ob der vor dem Trägerfuß wirkende räumliche Erdwiderstand überschritten wird. Gegebenenfalls ist eine Abminderung der Kennwerte des Bodens im Bereich des Erdauf-lagers erforderlich.

Zur Berücksichtigung der vertikalen Lastabtragung muß die Fußfläche des zur Simulation der Trägerbohlwand verwendeten Ersatzbalkens erforderlichenfalls vergrößert werden. Die reale Aufstandsfläche des Trägers kann zum Beispiel durch ein zusätzliches horizontales Balkenelement am Trägerfuß simuliert werden (Bild 6).

Bei eingespannten, unverankerten Wänden ist es häufig ausreichend, nur den Bauzustand „Voll-aushub“ zu berücksichtigen. Hingegen sind bei ausgesteiften oder verankerten Baugrubenwänden auch stets Teilaushubzustände zu betrachten. Vereinfachend darf bei diesen Zuständen wie für durchgehende Wände verfahren werden (vgl. Abschnitt 3.5.1).

### 3.5.4 Bodenvernagelung

Die Bodenvernagelung wird sukzessive mit dem Baugrubenaushub hergestellt. Von einer Arbeitsebene werden Löcher gebohrt, in die Stahlstäbe eingeschoben werden. Durch Verfüllen oder Verpressen des Ringraums mit Zementmörtel entsteht ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Na-



gel und Boden. Auf die Nagelköpfe können Endplatten aufgeschraubt werden. Der Wandabschnitt bis zur vorausgegangenen Arbeitsebene wird anschließend durch Spritzbeton gesichert. Die Stahlstäbe oder Nägel sind im allgemeinen nicht vorgespannt. Nagelkräfte werden erst durch Bodenverschiebungen mobilisiert.

Das Tragwerk aus Spritzbeton, Nägeln und Boden ist dreidimensional. Wegen der Vielzahl der Nägel würde sich bei einer räumlichen Berechnung eine große Anzahl von Elementen sowie Unbekannten ergeben. Im allgemeinen wird das Tragwerk daher als ebenes Verformungsproblem betrachtet, bei dem dann Näherungen für die Nagelwiderstände getroffen werden müssen.

Bei einem ebenen Modell ist das System Nagel-Verpreßmörtel durch eine Nagelbahn, eingebettet in zwei dünnen Mörtelschichten, approximiert. Sowohl die Normalsteifigkeit als auch der Herauszieh Widerstand der Nagelbahn muß den zugehörigen Werten der Nägel entsprechen. Weiter ist zu beachten, daß im 2D-Modell eine mehr oder weniger steife Nagel-Mörtel-Bahn besteht, die eine gewisse Abschirmwirkung für tiefer gelegene Horizonte hat. Es sollte daher eine den Nägeln vergleichbare Biegesteifigkeit gewählt werden, wobei allerdings die Abmessungen des Ersatzsystems so zu wählen sind, daß noch eine vernünftige Diskretisierung möglich ist. Zur Wahl der Abmessungen im 2D-Modell siehe Punkt 3.5.5, Verpreßanker und Steifen. In beiden Fällen liegt eine vergleichbare Situation vor.

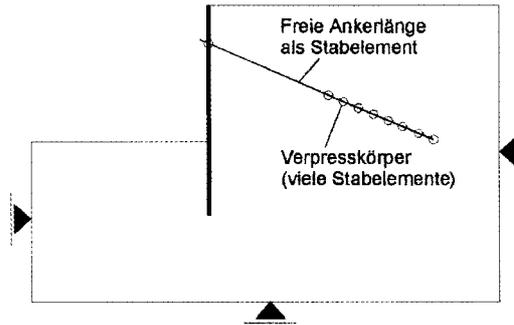
Auf der Ober- sowie Unterfläche des Systems Nagelbahn-Mörtelschichten sollten Interface- oder Kontaktelemente angeordnet werden. Die Scherfestigkeitswerte dieser Elemente müssen dem Tragverhalten der Nägel angepaßt sein. Ist zum Beispiel in den obligatorischen Eignungsversuchen für die Nägel ein Herauszieh Widerstand  $F_p$  ermittelt, kann bei gleicher Länge  $l_0$  der Nägel und der Nagelbahn näherungsweise für die Scherfestigkeitswerte angenommen werden:

$$c + \sigma_z \cdot \tan \varphi = \frac{F_p}{2a \cdot l_0}$$

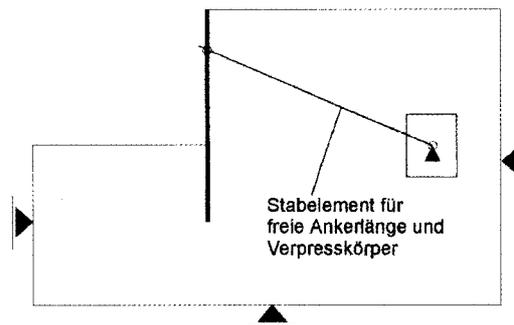
Hierbei ist  $a$  der Nagelabstand in einer Ebene, und  $\sigma_z$  ist die Überlagerungsspannung im Ausgangs- oder Ruhedruckzustand ( $\sigma_z = z \cdot \gamma$ ). Entweder  $c$  oder  $\varphi$  müssen gewählt werden.

### 3.5.5 Verpreßanker und Steifen

Verpreßanker bestehen aus freier Ankerlänge und Verpreßkörper. Die Diskretisierung der freien Ankerlänge erfolgt durch ein



a) Anker mit Verpreßkörper



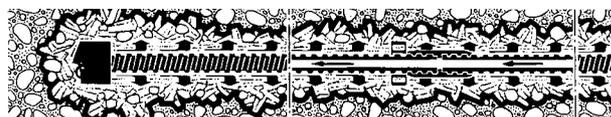
b) Anker als einzelnes Stabelement

Bild 7. Diskretisierung von Verpreßankern.

Stabelement, das den Ankerkopf und den Verpreßkörperkopf miteinander verbindet. Die Ersatzsteifigkeit des Stabs kann nach Bild 5 ermittelt werden. Entsprechend ergibt sich die Vorspannkraft des Ankers aus der Division durch den Ankerabstand, die somit in eine Linienlast umgerechnet wird.

Die Abmessungen des Verpreßkörpers sind gleichfalls auf die 2D-Situation abzustimmen. Es kann wiederum nach Bild 5 verfahren werden,

## Der Anker. Der Bodennagel. Die Injektionslanze. Der Pfahl.

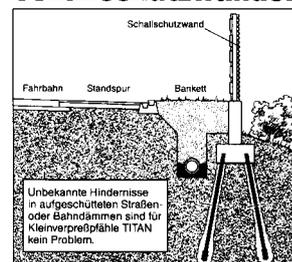


FRIEDR. ISCHEBECK GMBH · POSTFACH 13 41 · D-58242 ENNEPETAL  
 ☎ (0 23 33) 8 30 50 · FAX (0 23 33) 83 05 55  
 E-MAIL: info@ischebeck.de · INTERNET: http://www.ischebeck.de

### Auftriebsicherung

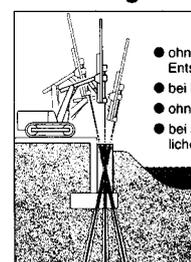


### Gründung von Schallschutzwänden



## Injektionsanker ISCHEBECK TITAN

### Fundament-Verstärkung und Nachgründung



- ohne Aushub- und Entsorgungsprobleme
- bei laufendem Betrieb
- ohne Wasserhaltung
- bei schwer zugänglichen Baustellen

wobei zu beachten ist, daß die Ankerbahn in zwei Mörtelbahnen eingebettet ist.

Der Verpreßkörper kann durch eine Reihe kurzer Stabelemente mit geringen Knotenpunktabständen diskretisiert werden (Bild 7a). Ziel dieser feinen Vernetzung ist eine kontinuierliche Eintragung der Vorspannkraft in den umgebenden Boden. Die unmittelbar vor dem Verpreßkörperkopf liegenden Kontinuumselemente erhalten geringere Steifigkeiten, damit eine axiale Verschiebung des Verpreßkörpers und somit die Aktivierung der umgebenden Bodenelemente ermöglicht wird.

Wenn eine Verschiebung des Verpreßkörpers ausgeschlossen ist, kann das oben beschriebene Modell auf ein einzelnes Stabelement reduziert werden (Bild 7b). Das Stabelement wird dann am Ankerkopf und an einem festen Auflager im Bereich des Verpreßkörpers angebunden. Das Element wirkt als Feder. Weitere Vereinfachungen, wie das Anbringen eines Kräftepaars oder die Verbindung eines einzelnen Stabs mit dem Elementnetz dienen zur Abschätzung des Tragverhaltens des Gesamtmodells, sind aber für Verformungsberechnungen nur in Ausnahmefällen empfehlenswert.

Bei der Verwendung ebener Modelle wird das tatsächliche Tragverhalten des Verpreßankers, der einen räumlich begrenzten Einflußbereich besitzt, vereinfacht. Dies wirkt sich auf das Gesamttragverhalten des Ankers aus. Mit zunehmendem kleinerem horizontalen Ankerabstand ( $a < 2$  m) verringert sich dieser Einfluß allerdings. Falls notwendig, ist ein räumliches Modell zu verwenden.

Da ausgesteifte Baugruben in der Regel geringe Breiten aufweisen und somit in der Regel auch das miteinander gekoppelte Verformungsverhalten der gegenüberliegenden Verbauwände zu untersuchen ist, werden Steifen durch Stabelemente simuliert. Federelemente sind bezüglich des Tragverhaltens gleichwertig. Ein starres Auflager ist nur dann sinnvoll und zulässig, wenn die Abstützung sehr steif ist, zum Beispiel Betonsteifen mit großen

Querschnitten und geringer Länge, und somit elastische Verformungen vernachlässigt werden können und wenn für die gegenüberliegenden Verbauwände symmetrische Zustände bestehen.

Wenn vorhandene Bodenplatten, Unterwasser-Betonsohlen oder im Düsenstrahlverfahren hergestellte Sohlen als Steifen genutzt werden, können diese entweder diskretisiert oder durch seitlich unverschiebliche Auflager idealisiert werden. Der Anschluß der Sohle (gelenkig oder eingespannt) ist problemspezifisch zu wählen. Der Schubverbund zwischen Verbauwand und der Betonsohle oder dem verfestigten Bodenbereich wird dabei näherungsweise vernachlässigt. Dies ist aufgrund der stark unterschiedlichen Steifigkeiten in der Regel ohne Einfluß auf die Berechnungsergebnisse.

### 3.6 Sicherung der Baugrubensohle

#### 3.6.1 Allgemeines

Ist ein Absenken von Grundwasser außerhalb der Baugrube nicht zugelassen, werden die Baugruben in der Wand-Sohle-Bauweise ausgeführt. Dabei werden zunächst die Baugrubenwände erstellt, und anschließend wird entweder eine tiefliegende Dichtsohle in Form einer Injektionssohle eingebracht oder aber, es wird nach dem Aushub eine verankerte Unterwasser-Betonsohle beziehungsweise eine Schwergewichtsohle hergestellt.

#### 3.6.2 Tiefliegende Dichtsohlen

Die Berechnung von Baugruben mit tiefliegender Dichtsohle ist mit der FEM ohne größeren numerischen Zusatzaufwand möglich. Der Boden einschließlich des Bereichs unterhalb des Aushubniveaus wird als Kontinuum diskretisiert. Fußverformungen der Baugrubenwände sowie Hebungen durch den Aushub sind möglich. Da Gelinjektionen die Steifigkeit des Untergrunds in der Regel nur unwesentlich beeinflussen, braucht die Sohle in diesem Fall nur als dichtende Schicht in der entsprechenden Höhenlage berücksichtigt zu wer-



**Zeitschrift für Bodenmechanik, Erd- und Grundbau, Felsmechanik, Ingenieurgeologie, Geokunststoffe, Deponien und Altlasten**

Erscheint viermal jährlich

**Herausgeber:**  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)

**Jahresabonnement:**  
36 EUR einschließlich Versandkosten

Einzig deutschsprachige Fachzeitschrift, die das gesamte Gebiet der Geotechnik abdeckt. Sie enthält Fachbeiträge aus Forschung und Praxis aus den benachbarten Fachgebieten, Berichte der Arbeitskreise der DGGT und über Fachtagungen.

Ich möchte geotechnik abonnieren. Bitte senden Sie mir die Fachzeitschrift regelmäßig ab nächster Ausgabe zum Abopreis von 36 EUR.

zum Studentenpreis von 18 EUR (Immatrikulationsbescheinigung ist beigelegt).

Ich bin an Anzeigenwerbung in geotechnik interessiert. Bitte senden Sie mir Ihre Medieninformationen.

**Bitte faxen an**  
**+49 (0) 20 54/92 41 29**

Postfach 18 56 20 D-45206 Essen  
Tel. +49 (0) 20 54/92 41 21  
Fax +49 (0) 20 54/92 41 29  
E-Mail: [vertrieb@vge.de](mailto:vertrieb@vge.de)  
Internet: [www.vge.de](http://www.vge.de)

**VGE**  
Verlag GNückauf Essen

Meine Anschrift \_\_\_\_\_

Datum, Unterschrift \_\_\_\_\_

im Abonnement

den. Zu den Sohlhebungen durch Aushubentlastung addieren sich dann noch diejenigen durch die Auftriebskraft auf die dichtende Schicht.

Wird eine Sohlinjektion so ausgeführt, daß sich auch die Steifigkeit des Bodens nennenswert verändert, hat sie neben der abdichtenden Funktion auch eine – im wesentlichen horizontale – Tragwirkung, die zum Teil gezielt zur rechnerischen Reduktion der Fußverformungen der Baugrubenwände eingesetzt wird. In einem solchen Fall muß die Schicht so diskretisiert werden, daß verschiedene Lagen entstehen, und es müssen die entsprechenden Steifigkeiten in die Berechnung eingeführt werden.

Die Tragwirkung der tiefliegenden Dichtsohle wird in der Regel ohne weitere Näherungen durch ebene Berechnungsschnitte zutreffend erfaßt. Die Trageigenschaften der Dichtsohle können als gleichmäßig über die gesamte Baugrubenfläche angenommen werden.

### 3.6.3 Hochliegende Sohlen

Hochliegende Baugrubensohlen sind in der Regel Unterwasser-Betonsohlen, die nach dem Aushub eingebracht werden und bei Bedarf durch Zugpfähle verankert sind. Die Abbildung dieser Sohlen in FE-Berechnungen erfordert eine Näherung im Hinblick auf das räumliche Tragverhalten der Pfähle.

Zur Simulation der realen Verformungen ist es erforderlich, neben den Stahldehnungen selbst sowohl die Verformungen am Übergang zwischen Pfahl und Boden als auch die Bodenverformungen zu erfassen. Die lokalen Verformungen des Bodens hängen sehr stark vom räumlichen Spannungszustand um den Pfahl herum und von der Art der Pfähle (nackte Stahlpfähle, injizierte Pfähle, Kleinbohrpfähle) ab. Diese Einflüsse können zutreffend nur in einer dreidimensionalen Berechnung erfaßt werden. Im Hinblick auf die Abhängigkeit sowohl der Pfahlhebungen als auch des Pfahltragverhaltens von den horizontalen Bodenspannungen ist es auch erforderlich, das Herstellungsverfahren der Pfähle sowie im Stoffgesetz die Dilatanz des Bodens zu erfassen.

Angesichts der im allgemeinen zahlreichen Verankerungspfähle und der komplexen oben genannten Einflüsse ist zur Bestimmung des globalen Verformungsverhaltens der gesamten Baugrube eine räumliche Berechnung mit der Erfassung der Einzelpfähle für praktische Ausführungen zu aufwendig. Alternativ wird empfohlen, das System durch vereinfachte Modelle in mehreren Schritten abzubilden. Zur Kalibrierung des Einzelpfahl-Tragverhaltens können Zugversuche mit einem Pfahl unter Zugrundelegung eines rotationssymmetrischen Spannungs- und Verformungsverhaltens nachgerechnet werden. Hierbei ist eine feine Diskretisierung entlang der Pfahlumfangsfläche und eine detaillierte Abbildung des Materialverhaltens von Boden notwendig. Aus den Einzelberechnungen ergibt sich das Tragverhalten der Zugpfähle.

Das globale Verformungsverhalten der gesamten Baugrube einschließlich Beanspruchung der Unterwasser-Betonsohle kann näherungsweise in weiteren Rechenschritten an ebenen Systemen bestimmt werden. Für die Pfähle, die in der ebenen Berechnung durch Scheiben simuliert sind, muß dann das zuvor ermittelte Tragverhalten der Einzelpfähle eingesetzt werden, wobei der Gruppeneffekt zu berücksichtigen ist.

Unabhängig vom Tragverhalten der Sohle ist häufig beobachtet worden, daß beim Einbringen der Zuelemente für die Sohlensicherung (speziell bei eingerammten oder eingerüttelten Pfählen) größere Verformungen des Fußes der Baugrubenwände eintreten. In einer numerischen Berechnung kann ein solcher Effekt durch zusätzliche Rechenschritte nach dem endgültigen Bodenaushub simuliert werden, in denen die Scherparameter des Bodens vor dem Wandfuß herabgesetzt werden. Dadurch vergrößern sich die plastischen Bodendeformationen nennenswert.

## 3.7 Auswertung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse

### 3.7.1 Plausibilitätskontrollen

Für die Berechnungsergebnisse sind stets Plausibilitätskontrollen durchzuführen. Hierbei ist vor allem folgendes zu überprüfen:

- ◇ Besteht zwischen den lotrechten Spannungen und Überlagerungen eine plausible Relation?
- ◇ Liegt die Größenordnung der Verformungen im Erfahrungsbereich?
- ◇ Treten innerhalb des berechneten Bauablaufs unerwartete Spannungs-, Schnittgrößen- oder Verformungsergebnisse auf?
- ◇ Erhalten konstruktive Teile Schnittgrößen, für die sie nicht vorgesehen sind (zum Beispiel Zugbeanspruchung unbewehrter Konstruktionen)?
- ◇ Haben plastifizierte Zonen infolge Scherversagens – mit Ausnahme der oberflächennahen Plastifizierung infolge Aushubentlastung – einen ausreichenden Abstand zu den Rändern des Netzes?

Außerdem sind häufig Sensibilitätsstudien zu empfehlen. Durch Variation von einzelnen maßgeblichen Parametern wie Netzgröße, Diskretisierung, Stoffparameterwerten, Stoffmodell und Erfassung der Bauzustände muß der Einfluß angenommener oder stark streuender Größen auf die Rechenergebnisse dargelegt werden.

### 3.7.2 Verformungsprognosen

Die Prognosequalität einer numerischen Baugrubenberechnung läßt sich nennenswert steigern, wenn das verwendete Modell an einer bereits ausgeführten Baugrube mit vergleichbaren Verhältnissen und vorliegenden Meßergebnissen kalibriert werden kann. Gleiches gilt für Bauzustände.

Bereits die rechnerischen Verformungen der ersten Bauzustände sollten mit Meßwerten verglichen werden. Bestehen signifikante Abweichun-

gen, sind getroffene Annahmen oder Bodenparameterwerte innerhalb der Grenzen möglicher Streubreiten so zu modifizieren, daß eine ausreichende Übereinstimmung erzielt wird.

### 3.8 Ausblick

Die Nachweise für die Sicherung von Baugruben und vor allem der Abstützung von Baugrubenwänden erfolgt heute überwiegend nach den Empfehlungen des Arbeitskreises für Baugruben der DGGT (EAB), die zu den anerkannten Regeln der Bautechnik zählen. Numerische Berechnungen, zum Beispiel nach der FEM, sollten immer dann zusätzlich mit herangezogen werden, wenn komplexe geometrische Verhältnisse oder Bodensituationen vorliegen oder aber Aussagen zu Bodenverformungen von Bedeutung sind. Einige Beispiele sind:

- ◇ Der Baugrubenverbau besteht aus gekoppelten Systemen.
- ◇ Zwischen dem Verbau und benachbarten unterirdischen Bauwerken besteht eine nennenswerte Interaktion.
- ◇ Der Baugrubenaushub und die Wandabstützungen wirken sich auf Verschiebungen von benachbarten Gebäuden oder Verkehrsflächen aus. In diesen Fällen ist in der Regel das nicht-lineare Materialverhalten von Boden zu berücksichtigen.
- ◇ Baugruben mit hochliegenden Dichtungssohlen.

- ◇ Ermittlung von Erddruckverteilungen.
- ◇ 3D-Berechnungen für komplexe räumliche Baugrubengeometrien, zum Beispiel für einspringende Baugrubenecken.

Die dominierenden weiteren Entwicklungstendenzen für den Einsatz der FEM bei Baugrubenberechnungen sind in der zutreffenden Abbildung räumlicher Strukturen wie Anker oder Verbausträger sowie in der zutreffenden Beschreibung von Grenzzuständen zu sehen. Die immer leistungsfähiger werdenden Rechner lassen bereits in naher Zukunft erwarten, daß 3D-Berechnungen wie heute 2D-Berechnungen zu Standardnachweisen gehören.

2D-Berechnungen mit Näherungsansätzen für räumliche Strukturen werden in dem Maß eine zunehmend untergeordnetere Rolle spielen, in dem sich der Aufwand beider Berechnungsarten einander annähert.

Der Nachweis der Standsicherheit mit der FEM ist möglich und erfolgt vor allem bei komplexen Strukturen. Für den Grenzzustand wird dabei häufig das für analytische Verfahren bewährte Sicherheitskonzept herangezogen.

Die vorliegenden Empfehlungen sind mit dem Arbeitskreis für Baugruben der DGGT (EAB) abgestimmt. Dieser Arbeitskreis befaßt sich derzeit unter anderem mit einer Abstimmung der eigenen Empfehlungen und Ergebnissen von FE-Berechnungen nach den vorliegenden Empfehlungen.

Wir sind eine der großen deutschen Planungsgesellschaften für Bau, Umwelt, Verkehr und Technische Ausrüstung.

Unser Unternehmen hat seinen Hauptsitz in München, elf Niederlassungen in Deutschland sowie mehrere Beteiligungsunternehmen im In- und Ausland.

Die Übernahme der Gesamtverantwortung auf der Grundlage von Einzelkompetenz für die Realisierung von Vorhaben und Anlagen weltweit ist unser Unternehmensziel.

Für unser **Institut für Grundbau und Bodenmechanik im Hauptsitz München** suchen wir einen/eine

## Bauingenieur/in

(Dipl.-Ing. Univ./FH)

mit mehrjähriger Berufserfahrung im Bereich Bodenmechanik, Erd- und Grundbau.

Ihr Aufgabengebiet umfasst alle Leistungen, die in der HOAI Teil XII beschrieben sind. Besonderen Schwerpunkt legen wir auf die Beratung unserer Kunden sowie unserer Planer und Konstrukteure in Fragen der Gründung von Bauwerken, der Wasserhaltung und des Wasserrechts. Der sichere Umgang mit Boden- und Grundwasserkontaminationen wäre von Vorteil. Die Kenntnis des Marktes in Bayern ist wünschenswert.

Aufgrund der internationalen Ausrichtung unseres Unternehmens erwarten wir gute Englischkenntnisse. Die Anwendung moderner Kommunikationsmittel/EDV sollte für Sie selbstverständlich sein.

Wir bieten Ihnen ein vielseitiges Aufgabengebiet, eine angemessene Vergütung und die Sozialleistungen eines modernen Unternehmens.

Wenn Sie diese Herausforderung interessiert, dann freuen wir uns auf Ihre schriftliche Bewerbung mit vollständigen Unterlagen unter Angabe Ihres möglichen Eintrittstermins und Ihrer Gehaltsvorstellung.



**OBERMEYER**  
PLANEN + BERATEN

Hansastraße 40  
80686 München  
Tel. 089/57 99-630

Internet: <http://www.opb.de>