

Dreidimensionale Finite-Element-Baugrundmodelle für Ingenieurprobleme

Michael Burghardt, Udo F. Meißner, Lutz Lämmer

1 Einleitung

Die Interaktion zwischen Tragwerk und Baugrund wird in der Regel durch Reaktionen des Baugrundes auf die Einwirkung des Tragwerks hervorgerufen. Die Auswirkungen dieser Interaktion sind in praxisrelevanten Fällen für die Standsicherheit wichtig. Mit der Methode der finiten Elemente steht ein Verfahren zur Verfügung, mit welchem die Interaktion zwischen Baugrund und Tragwerk hinreichend gut simuliert werden kann. Die hier vorgestellte Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung und Netzgenerierung der Baugrund-Tragwerk-Struktur für die Finite-Element-Simulation. Für die räumliche Diskretisierung komplexer Baugrund-Tragwerk-Strukturen mit finiten Elementen unter Berücksichtigung der geotechnischen Konstruktion, des Bauablaufes sowie der zugehörigen Lasten und Randbedingungen sind fachspezifische Software-Werkzeuge notwendig. Die Abbildung der Baugrund-Tragwerk-Struktur in einem Rechnermodell erfordert eine ganzheitliche Vorgehensweise. Der Baugrund muss in diesem Modell mit all seinen Eigenschaften (z.B. Geländeoberfläche, Bodenschichten, Bohrprofile und Bodeneigenschaften) beschrieben werden. Des Weiteren sind die Gründungskonstruktion und die Einwirkungen des Tragwerks zu berücksichtigen. Die wesentlichen Bauzustände müssen von dem Modell in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt werden können, um eine komplette Simulationsrechnung der Baugrund-Tragwerk-Struktur in Abhängigkeit des Bauablaufes durchführen zu können.

2 Baugrundmodell

An den geotechnischen Entwurf der Gründung und des Baugrubenverbaus von Ingenieurbauwerken werden hohe Anforderungen gestellt. Vorhersagen über das Setzungsverhalten des Bauwerkes und der Umgebung müssen sehr zuverlässig sein. Dreidimensionale und zeitabhängige Effekte komplexer Gründungen lassen sich mittels der Finite-Element-Methode erfassen. Der Entwurf der Gründung und des Baugrubenverbaus ist unter Zuhilfenahme von CAD-Software möglich. [Meißner u. a. 1996], [Diaz 1998] und [Schönenborn 1999] beschreiben die Vorgehensweise für den ganzheitlichen Entwurf. Ein zeitabhängiges Baugrundmodell wurde mit den Methoden der objektorientierten Modellierung spezifiziert, entworfen und implementiert. Die Konsistenz des Modells wurde durch den Einsatz von objektorientierter Analyse, Entwurf und Programmierung erreicht. Das Baugrundmodell besteht bisher aus den Teilmodellen Bodenmodell, Konstruktionsmodell und Bauablaufmodell.

2.1 Bodenmodell

Das Bodenmodell dient der rechnergestützten Abbildung des Baugrunds. Alle Informationen, die den Baugrund beschreiben, werden hierin verwaltet. Diese sind zum einen geometrische Daten, wie die Höhen der Geländeoberfläche und die Lage von vorgegebenen Fixpunkten im Gelände, zum anderen werden in diesem Partialmodell die Schichtinformationen und Bodenkennwerte des Baugrunds auf der Basis von Bohrprofilen verwaltet. Modellierungsgrenzen des Gebietes, die auch als Berechnungsgrenzen für die Finite-Element-Simulation genutzt werden können, sind ebenfalls ein Bestandteil des Bodenmodells.

2.2 Konstruktionsmodell

Das Konstruktionsmodell dient zur Modellierung der Baugrube und ihrer Verbauung und zur Verwaltung der geotechnischen Gründungselemente. Gründungselemente sind unter anderem die Bodenplatte, Pfähle, Streifen- und Einzelfundamente. Die Baugrube besteht aus den Verbauelementen wie Spundwänden, Pfahlwänden, Schlitzwänden und Ankern sowie aus Bodenelementen, die den Aushub repräsentieren. Das Partialmodell verwaltet auch Lasten aus dem Bauwerk, die immer einzelnen Bauteilen zugeordnet sind.

2.3 Bauablaufmodell

Der Bauablauf stellt eine Reihe von nacheinander auftretenden Zuständen der Baugrund-Tragwerk-Struktur dar. Jedem Bauzustand sind diejenigen Konstruktionselemente zugeordnet, die zu dem Zeitpunkt vorhanden sind. Bauvorgänge zwischen den Zuständen bewirken die Veränderungen des Systems. Alle Zustände und Vorgänge sind in Netzplänen abgebildet. Zu jedem Zeitpunkt können mit Hilfe des Bauablaufmodells Sichten auf das Modell generiert werden.

3 Finite-Element-Modell

Der Nachweis der Standsicherheit ist für die im Bauablauf relevanten Zustände des Tragwerkes und des Baugrundes erforderlich. Die Methode der finiten Elemente bietet die Möglichkeit, den Baugrund sowie das Tragwerk ganzheitlich in einem numerischen Modell abzubilden. Der Baugrund besteht in der Regel aus drei Phasen: Korngerüst, Fluid und Gas. Die Theorie der Porösen Medien ermöglicht die Interaktion der drei Phasen unter Verwendung der „Mischungstheorie“ und des „Konzept der Volumenanteile“ [Hartmann und Meißner 1987], [Ehlers 1998]. Die Übergangszone zwischen Bodenplatte und Baugrund oder entlang des Pfahlmantels erfordert eine spezielle Modellierung unter Berücksichtigung der Reib- und Kontaktvorgänge.

An die Diskretisierung der Baugrund-Tragwerk-Struktur mit Finiten Elementen sind aus Sicht der Forschungsziele die folgenden Anforderungen zu stellen:

- Der Nachweis der Standsicherheit für verschiedene Zustände des Tragwerkes ist durchzuführen. Bei der Diskretisierung sind diese Zustände zu erstellen und zu verwalten.
- Entsprechend dem Bauablauf sollen dem FE-Netz die entsprechenden Randbedingungen und Lasten möglichst automatisch zugewiesen werden.
- Für die Implementierung der Mehrphasentheorie wurden vorwiegend Hexaederelemente verwendet. Daher sind bei der Diskretisierung 20-Knoten-Serendipity-Hexaederelemente zu erzeugen.
- Bei der Diskretisierung sind spezielle Kontaktflächen im Übergangsbereich zwischen Baugrund und Tragwerk zu berücksichtigen.
- Verfeinerungen der Elementdichte müssen wegen der Konvergenz der Finite-Elemente-Methode an kritischen Stellen möglich sein. Zur Realisierung der Dichteverteilung können Fehlerindikatoren, wie in [Meißner und Wibbeler 1990] vorgeschlagen und in [Olden 1998] verwendet, eingesetzt werden.
- Bei der Diskretisierung ist die geometrisch exakte Abbildung des Tragwerks sowie der Schichtung des Bodens erforderlich. Entsprechende Fixlinien, Fixpunkte und Fixflächen mit zugeordneten Attributen müssen vorgegeben werden können.

Die Komplexität der räumlichen Baugrund-Tragwerk-Struktur schließt die vollständige Anwendung von strukturierten Netzen aus. Die Generierung von unstrukturierten Netzen aus Dreiecken, Vierecken und Tetraedern ist mit einer Reihe von Algorithmen, wie dem Advancing-Front-Verfahren [Schöberl 1997] und der Delaunay Triangulierung [Shewchuk 1997] möglich. Für die hier benötigten Hexaederelemente gibt es bisher noch keinen Algorithmus, bei dem man die Diskretisierung am an der Geländeoberfläche vorgeben kann und bei dem im Inneren des Baugrundes komplizierte Schichtungen und Konstruktionsbereiche berücksichtigen werden. Dies liegt darin begründet, dass es Geometrien gibt, bei denen die Oberfläche mit Vierecken vernetzbar ist, das Innere aber nicht mit Hexaedern vernetzt werden kann [Schneiders 1996].

3.1 Projektionstechnik

Für die Diskretisierung des Baugrundes wurde die Projektionstechnik gewählt, da alle anderen Verfahren zur Generierung von Hexaedernetzen für Geometrien mit vorgegebener Randskretisierung und komplizierten inneren Gegebenheiten nur in Ausnahmefällen eine Lösung liefern. Die Projektionstechnik ist eine Vorgehensweise zur Generierung von Prisma-Netzen, die auf einer $2\frac{1}{2}D$ -Darstellung der Geometrie basiert und aus den im folgenden beschriebenen Schritten besteht:

Projektion auf eine Ebene: Alle geometrischen Attribute des Geländes, wie z.B. die Berandung und DGM-Punkte werden auf einer Ebenen bereitgestellt. Für alle Kon-

struktions-elemente der Tragwerkes, wie z.B. Scheiben und Platten, wird ein zweidimensionales Kantenmodell durch Projektion auf die Ebene zu erzeugt.

Generierung des Basisnetzes: Auf dieser Ebene befinden sich nach der Projektion nur noch Polygonzüge, Linien und Punkte. Auf Basis dieser zweidimensionalen Beschreibung wird zunächst eine Diskretisierung mit Dreieckelementen vorgenommen. Hierfür werden zum einen das Programm Triangle von Shewchuk [Shewchuk 1997] verwendet, welches eine Delaunay-Triangulierung realisiert, sowie das Programm Mesh von Olden [Olden 1998], welches ein Advancing-Front-Verfahren anwendet. Dreiecknetze lassen sich durch Zusammenfassen von jeweils zwei Dreiecken zu vier Vierecken in Vierecknetze umwandeln. Hierfür sind neue Knoten auf den Mitten aller Kanten in das Netz einzufügen.

3D-Elemente: Durch Projektion der zweidimensionalen Viereckelemente in die Tiefe werden Hexaederelemente erzeugt. Zuerst muss hierfür die Anzahl der zu berücksichtigenden Schichten ermittelt werden, die sich aus der Anzahl der Bodenschichten, einer notwendigen Unterteilung der Bodenschichten sowie den Tiefeninformationen der Gründungselemente ergibt. An jedem Knoten des 2D-Netzes werden die untereinander liegenden Knoten mit den jeweiligen z-Koordinaten erzeugt. Unter Berücksichtigung des jeweils vorhandenen Materials werden Hexaederelemente erstellt (Abbildung 1).

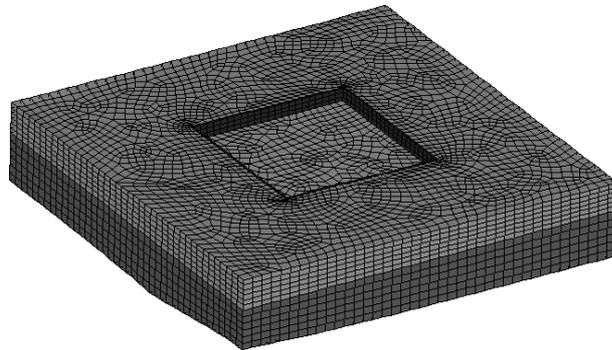


Abbildung 1: Hexaeder-Element-Netz

3.2 Oberflächenmodell (Boundary-Representation-Technik)

Am Beispiel des Pfahls wurde untersucht, wie zusätzliche Konstruktionselemente in das Netz integriert werden können. Dazu wurde die Isomorph-Technik benutzt, die auf einer Oberflächenbeschreibung der Körper basiert. Hierbei wird in das mit der Projektionstechnik erstellte Baugrundnetz entsprechend Abbildung 2 b) ein Loch geschnitten. Als nächstes wird eine Elementschicht, die die Hülle des vorher erstellten Loches mit der Randgeometrie des Bauteils verbindet, erstellt (Abbildung 2c). Hierfür dienen vordefinierte Elementnetze, die den Übergang schließen und eine konforme Vernetzung von Baugrund und Pfahl ermöglichen.

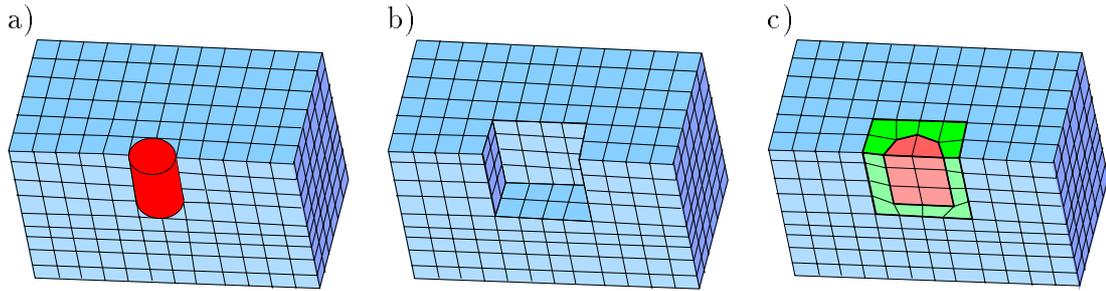


Abbildung 2: Oberflächenmodell: a) Hintergrundnetz und Pfahlgeometrie, b) Herausgeschnittenes Loch, c) Eingebauter Pfahl

3.3 Kontaktflächen

Im Kontaktbereich zwischen Baugrund und Bauteilen können Relativbewegungen der Oberflächen auftreten, wobei Reibkräfte zwischen Baugrund und Bauteil wirken. Für die Koppelung der finiten Elemente im Bereich der Kontaktzone sind Kontaktflächen vorgesehen, deren Beschreibung sowohl für den Baugrund, als auch für das Bauteil erforderlich ist.

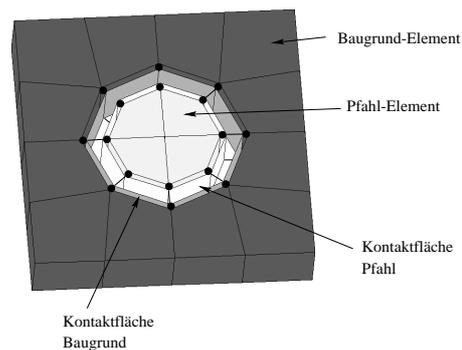


Abbildung 3: Kontaktfläche am Pfahl

Für den Pfahl (Abbildung 3) wurde die Berücksichtigung der Reib- und Kontaktgesetze durch die Generierung von Kontaktflächen automatisiert. Bei der Einarbeitung der Kontaktfläche wird das Netz entlang des Pfahlmantels aufgeschnitten. Danach sind an den geometrisch gleichen Stellen jeweils Knoten für den Pfahl und den Baugrund vorhanden. Die dazwischen liegenden Kontaktflächen des Baugrundes verweisen auf die Knoten des Baugrundes und die Kontaktflächen des Pfahls auf die Knoten des Pfahls. Die Normalenvektoren der Kontaktflächen zeigen jeweils zur anderen Kontaktfläche.

Literatur

[Diaz 1998] DIAZ, J.: Objektorientierte Modellierung geotechnischer Systeme. In: *Dissertation, TU-Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bericht 2/98 des Insti-*

tuts für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt (1998)

- [Ehlers 1998] EHLERS, W.: Ein Mehrphasen-Stoffmodell für Böden mit Übergang auf Interface-Gesetze. In: *Arbeitsbericht der DFG-Forschergruppe Baugrund-Tragwerk-Interaktion der Technischen Universität Darmstadt für den Zeitraum vom 1.7.96 bis 31.12.97* (1998)
- [Hartmann und Meißner 1987] HARTMANN, T. ; MEISSNER, U.: About the Numerical Analysis of Dynamics in Multi-Component-Continua. In: REICHEL, D. (Hrsg.): *Groundwater Flow and Quality Modelling Series C* Bd. 224, Pup. Comp. Dodrecht, 1987
- [Meißner u. a. 1996] MEISSNER, U. ; DIAZ, J. ; SCHÖNENBORN, I. ; KRÜGER, R.: Object-oriented modelling of three-dimensional hydro-geotechnical systems. In: ALDAMA, A.A. (Hrsg.) ; APARICIO, J. (Hrsg.) ; BREBBIA, C.A. (Hrsg.) ; W.G.GRA AND, I.Herrera (Hrsg.) ; PINDER, G.F. (Hrsg.): *Computational Methods in Subsurface Flow and Transport Problems* Bd. 1, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 1996, S. 709–716
- [Meißner und Wibbeler 1990] MEISSNER, U. ; WIBBELER, H.: A-Posteriori Errors of Finite Element Models in Groundwater and Seepage Flow. In: *VIII International Conference on Computational Methods in Water Resources, Venedig* (1990)
- [Olden 1998] OLDEN, J.: Finite-Element-Analyse von Plattentragwerken durch adaptive Software-Techniken. In: *Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen* (1998)
- [Schneiders 1996] SCHNEIDERS, R.: A grid-based algorithm for the generation of hexahedral element meshes. In: *Engineering with Computers 12* (1996), S. 168–177
- [Schöberl 1997] SCHÖBERL, J.: NETGEN - An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules. In: *Comput. Visual.Sci* 1 (1997), S. 41–52
- [Schönenborn 1999] SCHÖNENBORN, Ingo: Prozeßorientierter Entwurf einer Boden-Tragwerk-Struktur. In: *Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bericht 1/99 des Instituts für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt* (1999)
- [Shewchuk 1997] SHEWCHUK, J. R.: *Delaunay Refinement Mesh Generation*. School of Computer Science, Pittsburgh, Phd-Thesis, 1997