

# Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG





# Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG

---

WILEY

 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

**DGGT**   
Deutsche Gesellschaft  
für Geotechnik e. V.  
German Geotechnical Society



# Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG

---

WILEY

 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

**DGGT**   
Deutsche Gesellschaft  
für Geotechnik e. V.  
German Geotechnical Society

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik  
vertr. durch den Vorsitzenden Prof. Georg Heerten  
Gutenbergstr. 43  
45128 Essen

Obmann bis 2001  
Prof. Helmut Meißner  
Elfenweg 24  
76199 Karlsruhe, Deutschland

Obmann bis 2012  
Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz  
Ruhr-Universität Bochum, Institut für Grundbau, Boden- und Felsmechanik  
Universitätsstr. 150  
44801 Bochum, Deutschland

Obmann (seit 2012)  
Prof. Dr.-Ing. Peter-Andreas von Wolffersdorff  
BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH  
Kleiststraße 10 a  
01129 Dresden, Deutschland

Titelbild: Unstruttalbrücke mit integriertem FE-Modell eines Brückenpfeilerfundamentes

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2014 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Bildrechte liegen beim Arbeitskreis „Numerik in der Geotechnik“ der DGGT.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung:  
Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin  
Satz: BELTZ Bad Langensalza GmbH  
Druck und Bindung: Strauss GmbH, Mörlenbach

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Print ISBN:** 978-3-433-03080-6  
**ePDF ISBN:** 978-3-433-60451-9  
**ePub ISBN:** 978-3-433-60449-6  
**eMobi ISBN:** 978-3-433-60450-2  
**oBook ISBN:** 978-3-433-60448-9

## **Mitglieder des Arbeitskreises AK 1.6 „Numerik in der Geotechnik“**

Zum Zeitpunkt der Herausgabe der vorliegenden Gesamtempfehlungen setzte sich der Arbeitskreis 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ wie folgt zusammen:

Prof. Dr.-Ing. habil. P.-A. von Wolffersdorff, Dresden (Obmann)  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle, Dresden (stellvertr. Obmann)  
ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. M.Sc. H. F. Schweiger, Graz  
(stellvertr. Obmann)  
Prof. Dr.-Ing. T. Benz, Stuttgart  
Dr. sc. techn. J.-M. Hohberg, Bern  
Dr.-Ing. S. Jung, Saarbrücken  
Dipl.-Ing. U. Just, Schrobenhausen  
Dr.-Ing. C. Karcher, Köln  
Prof. Dr.-Ing. W. Krajewski, Darmstadt  
Dr.-Ing. P.-M. Mayer, Stuttgart  
Dr.-Ing. H. Neher, Stuttgart  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Perau, Essen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Reul, Kassel  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. T. Schanz, Bochum (ehemaliger Obmann)  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann, Braunschweig  
Dipl.-Ing. O. Stelzer, Karlsruhe  
Dipl.-Ing. Dr. H. Walter, Salzburg  
Dr.-Ing. M.Sc. J. Wehr, Offenbach  
Dr.-Ing. D. Winselmann, Braunschweig

### **Gäste**

Dipl.-Ing. T. Barciaga, Bochum  
Dr.-Ing. S. Henke, Berlin

Dr.-Ing. T. Marcher, Rum/Innsbruck

Dipl.-Ing. C. Missal, Braunschweig

Dipl.-Ing. T. Pucker, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. C. Slominski, München

### **Ehemalige Mitglieder und Gäste**

Dr.-Ing. A. Becker, Kaiserslautern

Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Borm, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Engel, Dresden

Dipl.-Ing. P. Gollub, Schrobenhausen

Prof. Dr.-Ing. habil. P. Gußmann, Stuttgart

Dr.-Ing. U. Holzlöhner, Berlin

Prof. Dr.-Ing. M. Kany, Zirndorf †

Dipl.-Ing. U. Klask, Kamen

Dr.-Ing. J. Klein, Essen

Dr.-Ing. K. Langhagen, Dietzenbach

Dr.-Ing. L. Liedtke, Hannover

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Meißner, Kaiserslautern (ehemaliger Obmann)

Prof. Dr.-Ing. E.h. M. Nußbaumer, Leonberg, München

o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. O. Pregl, Wien †

Dr.-Ing. R. Schwab, Karlsruhe

Dipl.-Ing. W. Schuck, München

Prof. Dr.-Ing. S. Semprich, Mannheim, Graz

Prof. Dr.-Ing. M. Ziegler, Neu-Isenburg, Aachen



## Vorwort

Die vorliegende Gesamtempfehlung des Arbeitskreises 1.6 der DGGT, Numerik in der Geotechnik, hat die bisher über die Jahre erschienenen Empfehlungen als Ausgangspunkt. Diese wurden maßgeblich überarbeitet, neu gegliedert, den aktuellen Erkenntnissen angepasst und zusätzlich durch neue Themenbereiche (u. a. maschineller Tunnelvortrieb, Gefrierverfahren, Stoffmodelle für Fels sowie Dokumentation und Qualitätssicherung) ergänzt.

An der Erstellung der vorliegenden Empfehlung haben mitgewirkt:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Benz, Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, Dr. sc. techn. Martin Hohberg, Dr.-Ing. Stefan Jung, Dipl.-Ing. Uta Just, Dr.-Ing. Christian Karcher, Dipl.-Ing. Ulrich Klask, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krajewski, Dr.-Ing. Peter-Michael Mayer, Dr.-Ing. Heiko Neher, Prof. Dr.-Ing. habil. Eugen Perau, Prof. Dr.-Ing. Oliver Reul, Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz (Obmann), Dipl.-Ing. Winfried Schuck (Redaktion), Dr.-Ing. Radu Schwab, Prof. Dr. techn. Helmut Schweiger, Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann, Dipl.-Ing. Oliver Stelzer, Dr.-Ing. Herbert Walter, Dr.-Ing. Jimmy Wehr, Dr.-Ing. Dieter Winselmann, Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff.

Der erste Teil der Empfehlung widmet sich den Grundlagen der numerischen Modellbildung. Dabei werden zunächst Details der Diskretisierung, des Anfangszustandes und der Simulation von Bauzuständen behandelt. Ein wesentlicher Abschnitt befasst sich mit Stoffmodellen und deren Materialkennwerten. Dies betrifft sowohl Modelle für Lockergestein als auch für Festgestein. Bei Letzteren kommt der realistischen Berücksichtigung des Trennflächengefüges eine besondere Bedeutung zu. Abgeschlossen wird der erste Abschnitt durch Empfehlungen zur Berücksichtigung von Grundwasserströmung im Baugrund.

Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit Baugruben und Böschungen im Lockergestein. Die Anforderungen an numerische Modelle sowohl für Verformungs- als auch für Standsicherheitsberechnungen werden detailliert behandelt. Besondere Bedeutung hat hier die numerische Simulation der unterschiedlichen Varianten des Baugrubenverbaus unter Berücksichtigung der herstellungsbedingten Einflüsse. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Durchführung von Standsicherheitsberechnungen für Baugruben und Böschungen unter besonderer Berücksichtigung der konstitutiven Eigenschaften von Strukturelementen (Wand, Anker, Steifen).

Das dritte Kapitel ist der numerischen Modellierung von Gründungen und Baugrundverbesserungsmaßnahmen gewidmet. Im Bereich der Baugrundverbesserung wird auf die Herstellungsprozesse und die damit verbundenen Besonderheiten bei der Modellbildung eingegangen. Der Abschnitt zu den Gründungen beschäftigt sich neben den klassischen Flachgründungen auch mit den kombinierten Pfahl-Platten-Gründungen.

Im vierten Kapitel werden die Besonderheiten bei der Modellbildung im Rahmen des Tunnelbaus diskutiert. Auch hier stehen zunächst die verschiedenen Bauverfahren und ihre numerische Abbildung im Mittelpunkt. Hinzugekommen ist ein Abschnitt zum Thema Gefrierverfahren.

Das fünfte Kapitel wurde vollständig neu erarbeitet. Es befasst sich mit den wichtigen Fragen des Qualitätsmanagements und der angemessenen Dokumentation numerischer Berechnungen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der unterschiedliche Stellenwert von numerischen Berechnungen im Fortschreiten des jeweiligen Projektes. Besondere Relevanz für die Praxis haben die Empfehlungen für die Gewährleistung der Prüfbarkeit von numerischen Berechnungen durch Dritte.

Die Gesamtempfehlung wird ergänzt durch drei Beiblätter zum Thema Baugruben, Gründungen sowie zur Berechnungsdokumentation.

Die Autoren hoffen, dass die vorliegende Gesamtempfehlung denjenigen, die in ihrem Berufsalltag mit numerischen Berechnungen konfrontiert werden, ein wertvolles Arbeitsmittel werden wird.

Im Namen des Arbeitskreises

*Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz*

Der Obmann

Die vorliegenden Empfehlungen sind unter der Leitung meines Vorgängers Herrn Prof. Tom Schanz im Ergebnis seiner langjährigen Tätigkeit entstanden. Die redaktionelle Bearbeitung wurde nach Beendigung seiner Tätigkeit als Obmann vollendet, wofür insbesondere Frau Michaela Heider gedankt sei. Dabei wurden auch noch einige Aktualisierungen vorgenommen. Die vorliegende Gesamtempfehlung entspricht somit dem gegenwärtigen Erkenntnisstand.

*Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff*

Obmann seit 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>Mitglieder des Arbeitskreises AK 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ . . .</b>	<b>V</b>
<b>Vorwort . . . . .</b>	<b>VII</b>
<b>1      <b>Allgemeiner Teil . . . . .</b></b>	<b>1</b>
1.1     Allgemeine Berechnungsgrundlagen . . . . .	1
1.1.1   Numerisches Modell . . . . .	1
1.1.2   Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen .	1
1.1.3   Diskretisierung . . . . .	3
1.1.4   Anfangszustand . . . . .	5
1.1.5   Simulation von Bauzuständen. . . . .	6
1.1.6   Nichtlineare Berechnungen . . . . .	7
1.1.6.1   Vorbemerkungen. . . . .	7
1.1.6.2   Iterationsstrategien . . . . .	8
1.1.6.3   Konvergenzverhalten der numerischen Lösung . . . . .	9
1.1.6.4   Zeitabhängige Prozesse . . . . .	10
1.2     Stoffmodelle und Materialkennwerte für Lockergestein . .	11
1.2.1   Vorbemerkungen. . . . .	11
1.2.2   Häufig verwendete Stoffmodelle . . . . .	11
1.2.2.1   Linear-elastische Stoffmodelle . . . . .	11
1.2.2.2   Stoffmodelle mit veränderlichen Elastizitätsmodul . . . .	12
1.2.2.3   Elastisch-ideal-plastische Stoffmodelle . . . . .	13
1.2.2.4   Elasto-plastische Stoffmodelle mit isotroper Verfestigung .	15
1.2.2.5   Erweiterte Stoffmodelle. . . . .	16
1.2.3   Bestimmung der Materialparameter . . . . .	18
1.2.3.1   Allgemeines . . . . .	18
1.2.3.2   Festigkeitsparameter . . . . .	18
1.2.3.3   Steifigkeitsparameter . . . . .	19
1.3     Stoffmodelle und Materialkennwerte für Festgestein. . . .	20
1.3.1   Vorbemerkungen. . . . .	20
1.3.2   Diskretisierung von Trennflächen . . . . .	20
1.3.3   Spannungs-Dehnungsverhalten und Zeiteffekte. . . . .	22
1.3.4   Versagenskriterien . . . . .	23
1.3.4.1   Versagen auf Trennflächen . . . . .	24
1.3.4.2   Kontinuum . . . . .	25
1.3.5   Bestimmung der Materialparameter . . . . .	26

1.4	Berücksichtigung von Wasser im Baugrund . . . . .	27
1.4.1	Vorbemerkungen. . . . .	27
1.4.2	Grundwasserberechnungen (ungekoppelte Analyse) . . . .	28
1.4.2.1	Modellbildung . . . . .	28
1.4.2.2	Diskretisierung und Randbedingungen . . . . .	29
1.4.3	UndrÄnierte und drÄnierte Analyse . . . . .	32
1.4.4	Konsolidation (gekoppelte Analyse). . . . .	33
1.4.5	Kluftwasserströmung . . . . .	34
1.4.6	Bestimmung der DurchlÄssigkeit . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Baugruben und BÖschungen im Lockergestein. . . . .</b>	<b>37</b>
2.1	Vorbemerkungen. . . . .	37
2.2	Numerisches Modell, Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen, Diskretisierung. . . . .	38
2.3	Berücksichtigung des Grundwassers . . . . .	41
2.3.1	Allgemeines . . . . .	41
2.3.2	Simulation der Grundwasserabsenkung im numerischen Modell. . . . .	41
2.3.3	Sonstiges. . . . .	42
2.4	Numerische Simulation des Baugrubenverbaus . . . . .	43
2.4.1	SpundwÄnde, Bohrpfahl- und SchlitzwÄnde und im Düsenstrahlverfahren hergestellte VerbauwÄnde . . . . .	43
2.4.1.1	SpundwÄnde . . . . .	43
2.4.1.2	BohrpfahlwÄnde . . . . .	43
2.4.1.3	SchlitzwÄnde . . . . .	45
2.4.1.4	Im Düsenstrahlverfahren hergestellte VerbauwÄnde . . . .	47
2.4.2	FrostwÄnde . . . . .	47
2.4.3	TrÄgerverbau . . . . .	49
2.4.4	Bodenvernagelung. . . . .	52
2.4.5	Verpressanker und Steifen . . . . .	53
2.5	Sicherung der Baugrubensohle . . . . .	54
2.5.1	Allgemeines . . . . .	54
2.5.2	Tiefliegende Dichtsohlen . . . . .	54
2.5.3	Hochliegende Dichtsohlen . . . . .	55
2.6	Stand sicherheitsberechnungen . . . . .	56
2.6.1	Vorbemerkungen. . . . .	56
2.6.2	Vorgehensweise zur Bestimmung der Stand sicherheit . . .	57
2.6.3	Hinweise zur Modellbildung bei Stand sicherheitsberechnungen . . . . .	59
2.6.3.1	Allgemeines . . . . .	59

2.6.3.2	Stoffmodelle für Standsicherheitsberechnungen. . . . .	60
2.6.3.3	Bauteile (Strukturelemente) . . . . .	60
<b>3</b>	<b>Gründungen und Baugrundverbesserung . . . . .</b>	<b>61</b>
3.1	Gründungen . . . . .	61
3.1.1	Vorbemerkungen. . . . .	61
3.1.2	Berechnungsausschnitt, Diskretisierung. . . . .	63
3.1.3	Stoffmodell . . . . .	66
3.1.4	Simulation des Bauablaufs. . . . .	68
3.1.5	Auswerten und Beurteilen der Berechnungsergebnisse. . . . .	70
3.2	Baugrundverbesserung . . . . .	71
3.2.1	Vorbemerkungen. . . . .	71
3.2.2	Bodenaustausch . . . . .	71
3.2.3	Verbesserung durch Verdichten. . . . .	71
3.2.3.1	Statische Verfahren (Konsolidation). . . . .	71
3.2.3.2	Dynamische Verfahren . . . . .	72
3.2.4	Bewehren . . . . .	73
3.2.4.1	Baugrundverbesserung durch Materialzugabe mit Verdrängung. . . . .	73
3.2.4.2	Baugrundverbesserung durch Materialzugabe ohne Verdrängung. . . . .	75
<b>4</b>	<b>Tunnelbau unter Tage . . . . .</b>	<b>77</b>
4.1	Vorbemerkungen. . . . .	77
4.2	Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen, Diskretisierung . . . . .	78
4.3	Simulation der Bauverfahren . . . . .	82
4.3.1	Bauverfahren . . . . .	82
4.3.2	Spritzbetonbauweise . . . . .	83
4.3.3	Schildvortrieb und Rohrvorpressungen . . . . .	90
4.3.4	Gefrierverfahren . . . . .	92
4.4	Auswertung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse. . . . .	95
4.5	Rückkopplung zwischen Berechnung und Messung . . . . .	96
<b>5</b>	<b>Qualitätsmanagement und Dokumentation numerischer Berechnungen . . . . .</b>	<b>99</b>
5.1	Vorbemerkungen. . . . .	99
5.2	Stellenwert numerischer Berechnungen innerhalb des Projektablaufes . . . . .	100

5.2.1	Modellbildung . . . . .	100
5.2.2	Projektphasen und Verwendungszweck der numerischen Berechnungen . . . . .	102
5.2.3	Projektbasis . . . . .	103
5.2.4	Analyseplan . . . . .	104
5.2.5	Interpretation der Ergebnisse . . . . .	106
5.3	Prüfbarkeit numerischer Berechnungen . . . . .	106
5.4	Aufbau und Wahrung der Fachkompetenz. . . . .	107
5.5	Berechnungsdokumentation. . . . .	108
5.5.1	Externe Dokumentation . . . . .	108
5.5.2	Interne Dokumentation . . . . .	109
<b>6</b>	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>111</b>
	<b>Beiblatt 1: Baugruben . . . . .</b>	<b>115</b>
1	Einleitung . . . . .	115
2	Dicht gelagerter Sand . . . . .	116
2.1	Geometrie und Berechnungsphasen . . . . .	116
2.2	Materialkennwerte. . . . .	118
2.3	Ergebnisse. . . . .	120
3	Locker gelagerter Sand . . . . .	123
3.1	Geometrie und Berechnungsphasen . . . . .	123
3.2	Materialkennwerte. . . . .	123
3.3	Ergebnisse. . . . .	125
4	Weicher Boden – Klei. . . . .	127
4.1	Geometrie und Berechnungsphasen . . . . .	127
4.2	Materialkennwerte. . . . .	128
4.3	Ergebnisse. . . . .	132
5	Überkonsolidierter Boden – Mergel . . . . .	134
5.1	Geometrie und Berechnungsphasen . . . . .	134
5.2	Materialkennwerte. . . . .	135
5.3	Ergebnisse. . . . .	137
6	Ermittlung der Sicherheit gegen Geländebruch . . . . .	140
7	Zusammenfassung. . . . .	142
	<b>Beiblatt 2: Gründungen . . . . .</b>	<b>145</b>
1	Geometrie . . . . .	145
2	Berechnungsphasen . . . . .	148

3	Materialkennwerte. . . . .	149
4	Ergebnisse. . . . .	152
5	Bewertung. . . . .	169
<b>Beiblatt 3: Berechnungsdokumentation . . . . .</b>		<b>171</b>
Aufbau einer Berechnungsdokumentation . . . . .		171
Deckblatt. . . . .		171
Inhaltsverzeichnis. . . . .		171
Änderungschronik . . . . .		171
Erläuterungsbericht . . . . .		171
1	Aufgabenstellung . . . . .	172
2	Modellierung . . . . .	172
2.1	Hinweise zum Finite-Elemente-Modell . . . . .	172
2.2	Hinweise zu den verwendeten Stoffmodellen. . . . .	172
3	Berechnungsdurchführung. . . . .	173
3.1	Hinweise zu Berechnungsvarianten (falls vorhanden) . . . . .	173
3.2	Hinweise zu Berechnungsphasen . . . . .	173
4	Berechnungsergebnisse . . . . .	173
4.1	Vergleich und Bewertung der Berechnungsvarianten (falls vorhanden). . . . .	173
4.2	Ergebnisse einzelner Berechnungsphasen . . . . .	174
4.3	Maßgebliche Ergebnisse . . . . .	174
5	Zusammenfassung. . . . .	174
Anlagenteil (bei einer Berechnungsvariante) . . . . .		175
A1	Modellierung . . . . .	175
A1.1	Allgemeine Informationen (Mindestangaben). . . . .	175
A1.2	Modellgeometrie. . . . .	175
A1.3	Lasten und Randbedingungen . . . . .	176
A1.4	Materialdaten. . . . .	176
A1.5	Vernetzung . . . . .	177
A2	Berechnungen. . . . .	177
A2.1	Berechnungsablauf . . . . .	177
A2.2	Berechnungsphasen . . . . .	178
A3	Berechnungsergebnisse . . . . .	178
A3.i	Berechnungsergebnisse für jede (i-te) Berechnungsphase . . . . .	178
A3.n+1	Zusätzliche Berechnungsergebnisse . . . . .	179
Anlagenteil bei mehreren Berechnungsvarianten. . . . .		180

A2	Berechnungen. . . . .	180
A.2.1	Überblick über die Berechnungsvarianten . . . . .	180
A.2.2	Berechnungsabläufe. . . . .	180
A.2.i.1	Berechnungsablauf für i-te Berechnungsvariante . . . . .	180
A.2.i.2	Berechnungsphasen für i-te Berechnungsvariante. . . . .	180
A3	Berechnungsergebnisse . . . . .	180
A3.i	Berechnungsergebnisse für i-te Berechnungsvariante. . . . .	181
A3.i.j	Berechnungsergebnisse für jede (j-te) Berechnungsphase . . . . .	181
A3.i.m+1	Zusätzliche Berechnungsergebnisse . . . . .	181



# 1 Allgemeiner Teil

## 1.1 Allgemeine Berechnungsgrundlagen

### 1.1.1 Numerisches Modell

Der erste Schritt, ein geotechnisches System in einem numerischen Berechnungsmodell abzubilden, besteht in der Entscheidung, welche grundsätzlichen Phänomene in der Berechnung erfasst werden sollen, sowie in der Wahl des zugehörigen geometrischen Modells inklusive dessen Anfangs- und Randbedingungen. Im Sinne einer übersichtlichen, nachvollziehbaren und eindeutig interpretierbaren Berechnung muss zunächst untersucht werden, ob geometrische Vereinfachungen der i. A. räumlichen Aufgabenstellung möglich sind. Vor allem in Hinblick auf den Aufwand der Datenaufbereitung und der Datenkontrolle sowie auf die Übersichtlichkeit der Ein- und Ausgaben sollte angestrebt werden, nur die wesentlichen Einflüsse im Berechnungsmodell abzubilden. Insbesondere ist das System auf Symmetrien und auf ausgeprägte Hauptbeanspruchungsrichtungen zu untersuchen. In vielen Fällen ist es sinnvoller, trotz vorhandener großer Rechnerkapazitäten angesichts anderer Unwägbarkeiten, die eine komplexe Diskretisierung nach sich ziehen, ein übersichtliches ebenes oder rotationssymmetrisches Berechnungsmodell zu wählen.

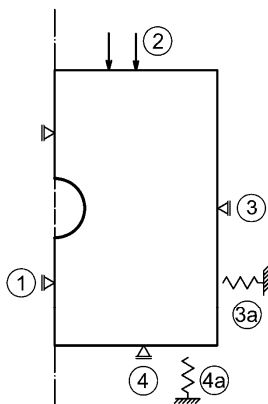
Bei ebenen Modellen wird davon ausgegangen, dass die Formänderungen senkrecht zur Ebene klein und ihre Auswirkungen auf die Spannungsverteilung vernachlässigbar sind (ebener Verformungszustand). Der Einfluss räumlicher Wirkungen muss bei solchen Berechnungen ggf. abgeschätzt werden. Für die Untersuchung von achsensymmetrischen Problemen – wie z. B. bei Schächten – kann oft die Rotationssymmetrie ausgenutzt werden, sofern das Baugrundmodell, die Strukturelemente und der Anfangszustand ebenfalls rotationssymmetrisch sind.

### 1.1.2 Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen

Die Anwendung der Methode der Finiten Elemente (FEM) für eine geotechnische Aufgabenstellung setzt voraus, dass ein Berechnungsausschnitt des geotechnischen Systems festgelegt wird. An den Grenzen dieses Ausschnittes muss die Wirkung der abgeschnittenen Außenbereiche durch Kraft- oder Verschiebungsrandbedingungen erfasst werden. In der Regel werden Komponenten der Verschiebungen an den freigeschnittenen Außenrändern des Berechnungsausschnittes zu Null angenommen. In Sonderfällen, wenn der Berechnungsausschnitt zum Beispiel ein Detail eines

größeren zu untersuchenden Berechnungsmodells ist, können an seinen Rändern auch die Verschiebungen eingepreßt werden, die sich bei einer Berechnung dieser größeren Struktur ergeben haben.

Die Größe des Berechnungsausschnittes muss so gewählt werden, dass die Berechnungsergebnisse dadurch nicht signifikant beeinflusst werden. Bild 1.1. zeigt eine zweckmäßige Formulierung der Randbedingungen für die Berechnung eines Tunnels.



**Bild 1.1.** Berechnungsausschnitt eines Tunnels mit Randbedingungen

- (1) Symmetrieachse: keine horizontalen Verschiebungen, vertikale Verschiebungen frei,
- (2) oberer Rand: Lasten aus Bauwerken, Verkehrslasten, Auflasten aus Gebirge (z. B. bei tiefliegenden Tunneln),
- (3) seitlicher Rand: keine horizontalen Verschiebungen (in Sonderfällen auch andere feste Werte), vertikale Verschiebungen frei,
- (3a) evtl. auch Federelemente, um die Wirkung angrenzender, nicht im Modell erfasster Bereiche näherungsweise zu berücksichtigen,
- (4) unterer Rand: keine vertikalen Verschiebungen, horizontale Verschiebungen frei,
- (4a) wie (3a).

Die Randbedingungen am oberen Rand des Kontinuums und auf der Symmetrieachse lassen sich üblicherweise eindeutig angeben. Schwieriger

ist dagegen die Formulierung der Randbedingungen an den anderen Begrenzungen des Berechnungsausschnittes. Mit zunehmender Größe des Berechnungsausschnittes nimmt der Einfluss von Änderungen der Verschiebungen oder Kräfte an den seitlichen Begrenzungen des Berechnungsausschnittes auf das rechnerische Tragverhalten des Bauwerkes ab. Von besonderer Bedeutung ist die Größe des Berechnungsausschnittes dann, wenn Lasten keine Gleichgewichtsgruppen darstellen, sondern Auflagerreaktionen an den Rändern des Berechnungsausschnittes hervorrufen. Dies ist z. B. in vertikaler Richtung, also für den unteren Rand, bei der Diskretisierung für eine tunnelbautechnische Aufgabenstellung oder für eine Baugrube der Fall.

Aufgrund des komplexen nichtlinearen Zusammenspiels von Einwirkungen, Struktur und gewählter Ausschnittsgröße können die gewählten Randbedingungen einen großen Einfluss auf die Rechenergebnisse haben.

Wenn keine Erfahrungen bei der Festlegung der Randbedingungen und vor allem der Größe des Berechnungsausschnittes vorliegen, sollten in ausreichendem Umfang Vorberechnungen mit nennenswert unterschiedlich großen Berechnungsausschnitten und ggf. auch mit veränderten Randbedingungen durchgeführt werden. Unterscheiden sich die Ergebnisse an allen maßgeblichen Stellen nur geringfügig, so kann der Berechnungsausschnitt als hinreichend groß angesehen werden. In Einzelfällen kann sich die Größe des Berechnungsausschnittes auch aus dem Baugrundaufbau ergeben, z. B. wenn stark verformbare Bodenschichten von anderen, die sehr steif sind, unterlagert werden.

Bei der Wahl immer tiefer reichender Berechnungsausschnitte muss jedoch beachtet werden, dass die Steifigkeit des Bodens in der Regel mit der Tiefe deutlich zunimmt. Wird dies bei der Wahl der Stoffgesetze und der Materialparameter nicht berücksichtigt, können sich unrealistisch große Verschiebungen ergeben (z. B. Hebungen einer Tunnelsohle oder Setzungen von Gründungen).

### **1.1.3 Diskretisierung**

Die Untersuchung eines Kontinuums mit der FEM stellt immer eine Näherung dar. Die Ergebnisse stimmen bei gleichen Stoffansätzen und Materialparametern mit der exakten Lösung umso besser überein, je feiner die Diskretisierung (Netzeinteilung) und/oder je höherwertiger die Ansatzfunktionen für die Verschiebungen oder Spannungen in den Elementen sind.

Wie groß die einzelnen Elemente sein dürfen, um noch ausreichend zutreffende Ergebnisse zu erhalten, hängt wesentlich von der Art der verwendete