Implizite Bemessung – sind die numerischen Verfahren reif dafür?

Von Herbert Walter

Einleitung

Moderne numerische Verfahren wie die Methode der Finiten Elemente (FEM) ermöglichen eine sehr ausgefeilte Simulation des Materialverhaltens von Baugrund und Bauwerk. Unter anderem ist es möglich, die Festigkeit der verwendeten Materialien auf Bemessungswerte oder charakteristische Werte zu beschränken. Das numerische Modell kann somit auch einen Aspekt der Bemessung – die Einhaltung eines ausreichenden Abstands von der Materialfestigkeit und somit von der Traglast – erfüllen. Dies wird im Folgenden mit dem Begriff „implizite Bemessung“ bezeichnet.

An Hand eines Beispiels – dem räumlichen Finite-Elemente-Modell einer U-Bahn-Station, die mit zyklischem Vortrieb im Lockergestein vorgetrieben wurde – wird untersucht, ob eine solche implizite Bemessung zu befriedigenden Ergebnissen führt. Es wird zunächst auf die Umsetzbarkeit des Konzepts der Teilsicherheitsbeiwerte der Eurocodes bei Verwendung nichtlinearer konstitutiver Gesetze für Boden und Spritzbeton eingegangen. Anschließend wird erörtert, ob die verwendeten konstitutiven Gesetze und die gewählte Diskretisierung in Raum und Zeit die Anforderungen der Normen erfüllen und welche zusätzlichen Untersuchungen erforderlich sind, um eine zufrieden stellende Norm-Konformität und damit Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks zu gewährleisten.

Konstitutive Gesetze für Boden und Spritzbeton

Boden

Für den Boden wird das klassische Mohr-Coulomb-Modell verwendet. Es ist ein linear elastisch – ideal plastisches Materialgesetz, bei dem die Fließfläche durch die zwei Kennwerte Reibungswinkel φ und Kohäsion c beschrieben wird.

Spritzbeton

Da die Spritzbetonschale das wesentlichste Stützmittel bei einem zyklischen Vortrieb im Lockergestein darstellt, wurde ein relativ aufwendiges Materialmodell gewählt:

Es handelt sich um ein viskoplastisches Modell, das zunächst von Meschke und Mang (1) entwickelt worden war und später durch zusätzliche Kriech- und Schwindterme erweitert wurde (2). Es enthält eine Drucker-Prager-Fließfläche mit einem zeitabhängigen Verfestigungsparameter im Druck-Bereich. Die Rissbildung bei Zug-Belastung wird im Rahmen eines Konzepts „verschmierter Risse“ mit Hilfe von drei Rankine-Versagensflächen simuliert. Die Zunahme der Steifigkeit, der Zug- und Druckfestigkeit und der Fließfläche mit der Zeit im Zuge der Erhärtung des Spritzbetons werden im Modell erfasst. Das Kriechen wird im erweiterten Modell durch einen viskosen Anteil, der bei Spannungsniveaus im Bereich der aktuel-

Implicit design – are there out-of-the-box solutions available?

Advanced constitutive laws allow for an implicit design, i. e. integration of strength limits and safety factors into the material model. The three-dimensional and time-dependent finite element model of the NATM-excavation of a metro station in Vienna, with focus on the design of the intersections of the primary sprayed concrete lining, serves as an example.

Differences between a visco-plastic and time-dependent shotcrete model and stress-strain-laws of Eurocode 2 are investigated, the compatibility of the applied soil model and the choice of the appropriate design approach of Eurocode 7 are discussed.

Some deficiencies of the numerical discretisation are highlighted, and measures are described which have been taken in order to guarantee a standard-conform level of safety of the ultimate limit state design.

Hochwertige Stoffgesetze in Berechnungsmodellen erlauben es, die Bemessung und den Tragsicherheitsnachweis in das numerische Modell zu integrieren („Implizite Bemessung“): Die Stoffgesetze begrenzen die Spannungen auf Werte, die das Material ertragen kann. Auch Teilsicherheitsbeiwerte auf Last- und Widerstandsseite können erfasst werden.

Am Beispiel des zeitabhängigen, räumlichen Rechenmodells für eine U-Bahn-Station mit Tunnelverschneidungen, die in bergmännischer Bauweise im Lockergestein hergestellt wird, wird untersucht, wie weit die Stoffgesetze und das Rechenmodell die in den Eurocodes festgelegten Anforderungen zum Nachweis der Tragsicherheit erfüllen.

Es werden einige Vereinfachungen und Schwächen des Rechenmodells beleuchtet, ihre Auswirkungen auf das Ergebnis untersucht und in Relation zu den Unsicherheiten bei den zur Verfügung stehenden Materialkennwerten bewertet.

Vorschläge werden unterbreitet, wie Auswirkungen von Modellfehlern auf der unsicheren Seite vermieden werden können.

len Fließfläche wirksam ist, sowie durch weitere Anteile, die linear in den Spannungen sind, simuliert.

Beispiel: U-Bahn-Station

Verschneidungen von Tunnelschalen können mit Standardwerkzeugen nur mit bescheidener Genauigkeit berechnet werden. Auch die Ergebnisse von Modellversuchen (3) sind nur beschränkt auf die Verhältnisse im Tunnel übertragbar. Dies liegt in erster Linie an den – durch das unterschiedliche Spritzbetonalter bedingten – unterschiedlichen Steifigkeiten und Festigkeiten der Spritzbetonschalen im Verschneidungsbereich. Grobe Abschätzungen führen in der Regel zu sehr ungünstigen Schalenbelastungen und in der Folge baupraktisch nur schwer realisierbaren Bauteilstärken und Bewehrungsgehalten.

Für die U-Bahn-Station Taborstraße in Wien wurde im Auftrag der Wiener Linien, die freundlicherweise die Erlaubnis zur Publikation der Ergebnisse erteilten, ein dreidimensionales Rechenmodell von Boden und Spritzbetonschale erstellt. Die Verwendung des oben beschriebenen hochwertigen konstitutiven Gesetzes für Spritzbeton erlaubte es, eine wirtschaftliche Dimensionierung der Tunnelschale auch für die Verschneidungsbereiche zu erzielen. Das Rechenmodell betrifft einen Ausschnitt mit den wesentlichen Verschneidungen, nämlich zwischen den beiden Stationsröhren und einem Verbindungstunnel und zwischen dem Verbindungstunnel und dem dort abzweigenden Fahrtreppentunnel, siehe Bild 1. Details zum Rechenmodell, Ergebnisse und Vergleiche mit Messungen können früheren Publikationen entnommen werden (4,5).

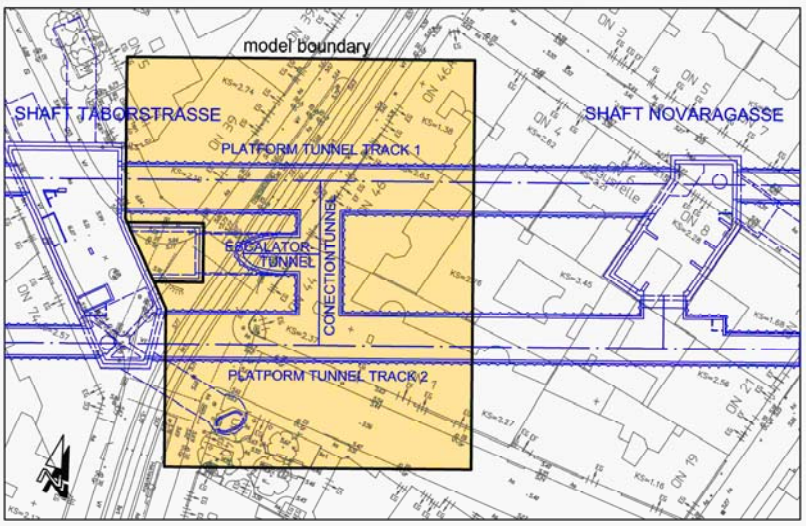

Bild 1 Stationslageplan mit Modellgrenzen

Fig. 1 Plan view of station and model boundaries

Das gewählte Rechenmodell besteht aus Volumselementen mit linearem Verschiebungsansatz für den Boden. Dickwandige Schalenelemente, ebenfalls mit linearem Verschiebungsansatz und Integration über die Dicke durch Unterteilung in fünf Lagen, werden für die Spritzbeton-Außenschale verwendet. Weitere Stützmittel wie Spieße, Anker etc. werden im Modell vernachlässigt; für die Abschätzung der Auswirkungen eines DSV-Schirms im Kalottenbereich wurde ein separates Rechenmodell erstellt (5).

Der zyklische Vortrieb wird durch eine Folge von Ausbruchsschritten simuliert, in denen jeweils Bodenelemente entfernt und Spritzbetonelemente spannungsfrei aktiviert werden. Somit werden Spannungs- und Laständerungen zufolge des Vortriebs automatisch erfasst. Die zeitliche Abfolge der Ausbruchsschritte entspricht im Wesentlichen dem geplanten Baufortschritt. Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, werden jeweils zwei Abschläge in Wirklichkeit zu einem fiktiven Ausbruchsschritt zusammengefasst. Es wird im Rechenmodell angenommen, dass pro Tag ein fiktiver Ausbruchsschritt erfolgt. Weiters wird angenommen, dass die zwei Stationsröhren um 16 m versetzt parallel vorgetrieben werden. Nach der Herstellung der Stationstunnel erfolgt der Ausbruch des Verbindungstunnels. Zuletzt wird der Fahrtreppentunnel (im Schutz eines Rohrschirms, der nicht modelliert wurde) vorgetrieben. Die Unterteilung in Kalotte einerseits und Strosse und Sohle andererseits wird bei allen Tunneln im Rechenmodell simuliert.

Die Bodenkennwerte für das Rechenmodell wurden gemäß den geotechnischen Unterlagen drei, jeweils als homogen angenommenen, Schichten zugeordnet.

Die Kennwerte des im zweiten Abschnitt beschriebenen Spritzbetonmodells wurden an die Daten des zunächst vorgesehenen Spritzbetons vom Typ SpB 25(56)/J2 (6) angepasst. Für das Kriechen wurden Kennwerte gewählt, die ein geringes Ausmaß an Kriechverzerrungen bzw. Relaxation bewirken und somit zu einer konservativen Abschätzung der Spannungen in der Spritzbetonschale führen. Später wurden auch die Auswirkungen eines rascher erhärtenden Spritzbetons der Type SpB 25(56)/J3 sowie der Effekt eines rascheren Vortriebs untersucht.

Die eingebaute Bewehrung wird indirekt im Spritzbetonmodell berücksichtigt: Die Zugfestigkeit des Spritzbetons wird so begrenzt, dass der vorhandene Bewehrungsstahl die Zugspannungen auch ohne Mittragen des Spritzbetons aufnehmen kann.

Die gewählten Kennwerte für Boden und Spritzbeton sind in (5) tabellarisch zusammengestellt.

Wahl des Nachweisverfahrens für den Tragsicherheitsnachweis

Beim vertrauten globalen Sicherheitskonzept werden in der Regel die Einwirkungen oder deren Auswirkungen (meist die Schnittgrößen) mit einem Sicherheitsbeiwert multipliziert und nominelle Festigkeitskennwerte verwendet. (Beispiel einer

Ausnahme ist der Gleitsicherheitsnachweis, der durch alleinige Faktorisierung der Beanspruchungen nicht funktionieren würde.) Dieses Konzept erwies sich für die Bemessung von Strukturen mit zeitabhängiger Festigkeit und Steifigkeit sowie dem Zusammenwirken von Boden und Stützmitteln als unzulänglich. Als geeignet haben sich das Nachweisverfahren 3 von Eurocode 7 (EN 1997-1 (7)), das weitgehend identisch mit Kombination 2 des Nachweisverfahrens 1 ist, und eine Variante des Nachweisverfahrens 2 erwiesen (5). Bei diesen beiden Nachweisverfahren ist der Teilsicherheitsbeiwert auf ständige Einwirkungen bzw. Beanspruchungen gleich eins. Beim Nachweisverfahren 3 werden die Scherparameter des Bodens und die Festigkeitskennwerte des Spritzbetons und der Bewehrung mit Teilsicherheitsbeiwerten gemäß Eurocode 7 und Eurocode 2 (EN 1992-1 (8)) abgemindert; bei der Variante von Nachweisverfahren 2 wird der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen bzw. Beanspruchungen indirekt in Form einer zusätzlichen Reduktion der Festigkeitskennwerte von Spritzbeton und Bewehrung berücksichtigt. Tabelle 1 enthält die für die beiden Berechnungsvarianten angesetzten Teilsicherheitsbeiwerte.

Tabelle 1 Teilsicherheitsbeiwerte
Table 1 Partial safety factors

Teilsicherheitsbeiwert für	Variante 1 (Nachweisverfahren 3)	Variante 2 (Nachweisverfahren 2)
Ständige Einwirkungen	1,0	1,0
Bodenscherparameter	1,25	1,0
Spritzbetonfestigkeit	1,5	1,5*1,35 ≈ 2,0
Bewehrungsstahl	1,15	1,15*1,35 ≈ 1,55

Bemessung

Spritzbeton

Bei der Bemessung eines Bauteils aus Stahlbeton werden mit Teilsicherheitsbeiwerten multiplizierte Schnittgrößen, so genannte Bemessungsschnittgrößen, Bemessungswiderständen gegenüber gestellt (8). Zur Bestimmung der Bemessungswiderstände (bei gegebener Stahlbewehrung) bzw. der erforderlichen Stahlfläche werden die Druckfestigkeit von Beton und die Fließgrenze des Bewehrungsstahls durch Teilsicherheitsfaktoren dividiert. Mit Hilfe von nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Linien, die auf den reduzierten Festigkeiten beruhen, werden dann daraus resultierende Schnittgrößen bestimmt, die größer oder gleich den einwirkenden Bemessungsschnittgrößen sein müssen.

Die Verwendung des oben beschriebenen nichtlinearen konstitutiven Gesetzes entspricht im Wesentlichen der Stahlbetonbemessung gemäß Eurocode 2. Im numerischen Modell werden allerdings direkt die Spannungen in den Integrationspunkten und nicht die daraus resultierenden Schnittgrößen der Einwirkungs- und der Widerstandsseite verglichen.

Die konstitutiven Gesetze beschränken die Spannungen auf Werte, die – laut Modell – dem Material zugemutet werden können. (Durch das Ansetzen von Teilsicherheitsbeiwerten auf die Festigkeitskennwerte können Sicherheitsreserven eingebaut werden.) Auf Überlastung wird im Modell zum Beispiel durch Fließen oder Bruch des Materials reagiert. Das äußert sich in Zunahme der Verzerrungen, nicht aber in unzulässigen Spannungswerten. Wenn in der Struktur noch Tragreserven vorhanden sind, kann Gleichgewicht durch Umlagerung der Spannungen auf noch nicht ausgelastete Bereiche erzielt werden. Sind die Umlagerungsmöglichkeiten ausgeschöpft, so versagt die Struktur, was im Rechenmodell durch progressive Verschiebungszunahme festgestellt werden kann.

Multiplikation der Schnittgrößen mit einem Teilsicherheitsbeiwert würde zu erhöhten und somit im konstitutiven Gesetz unzulässigen Spannungen führen. Deshalb erschienen nur die beiden beschriebenen Varianten des Tragsicherheitsnachweises, wo der Teilsicherheitsbeiwert für Beanspruchungen eins ist, für die implizite Bemessung geeignet.

Boden

Der Ausdruck Bemessung ist im Zusammenhang mit Boden nicht gebräuchlich. Bei Tragsicherheitsnachweisen in der Geotechnik werden in der Regel maßgebliche Schnitte geführt. An diesen Schnitten werden die einwirkenden Kräfte den möglichen Widerständen gegenübergestellt. Die Schnittführung erfolgt nach Möglichkeit so, dass von vornherein klar ist, ob der Boden als Einwirkung (z. B. an der Rückwand einer Stützmauer) oder als Widerstand (z. B. in der Sohlfuge eines Fundaments) fungiert.

Im kontinuumsmechanischen numerischen Modell werden keine Schnitte geführt. Die Fließfläche des Mohr-Coulomb-Modells zum Beispiel sorgt aber dafür, dass der Scherwiderstand des Bodens auf gleiche Weise erfasst wird wie bei konventionellen Modellen, wo die Gleitbedingung dem Mohr-Coulombschen Gesetz genügt. (Durch Nachrechnung der Rankineschen Sonderfälle oder von einfachen Geländebruchnachweisen kann ein kontinuumsmechanisches Modell überprüft werden. Im kontinuumsmechanischen Modell ergibt sich automatisch die ungünstigste Gleitfläche.)

Wie beim konventionellen Gleitsicherheitsnachweis oder Geländebruchnachweis können Sicherheitsreserven nicht durch Steigern der Belastung abgeschätzt werden, sondern durch Verringerung der Scherparameter (Kohäsion und Reibungswinkel).

Um Sicherheitsreserven gegen Versagen des Bodens zu erzielen, müssen also die Scherparameter durch Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände

dividiert werden. Eine Verringerung der Scherparameter garantiert sowohl vergrößerte Einwirkungen (z. B. aktiver Erddruck) als auch verringerte Widerstände (z. B. Erdwiderstand).

Bei der Berechnungsvariante 2 ist keine Sicherheit gegen Versagen des Bodens enthalten, siehe Tabelle 1.

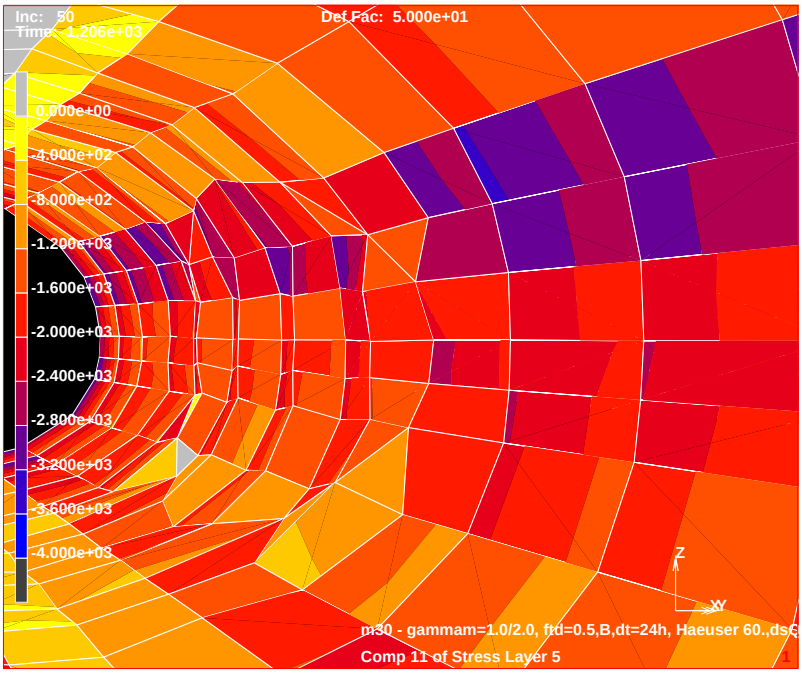

Bild 2 Spannungen in Umfangsrichtung auf der Innenseite – Einfluss der Diskretisierung

Fig. 2 Stresses in circumferential direction at the intrados of the station tunnel

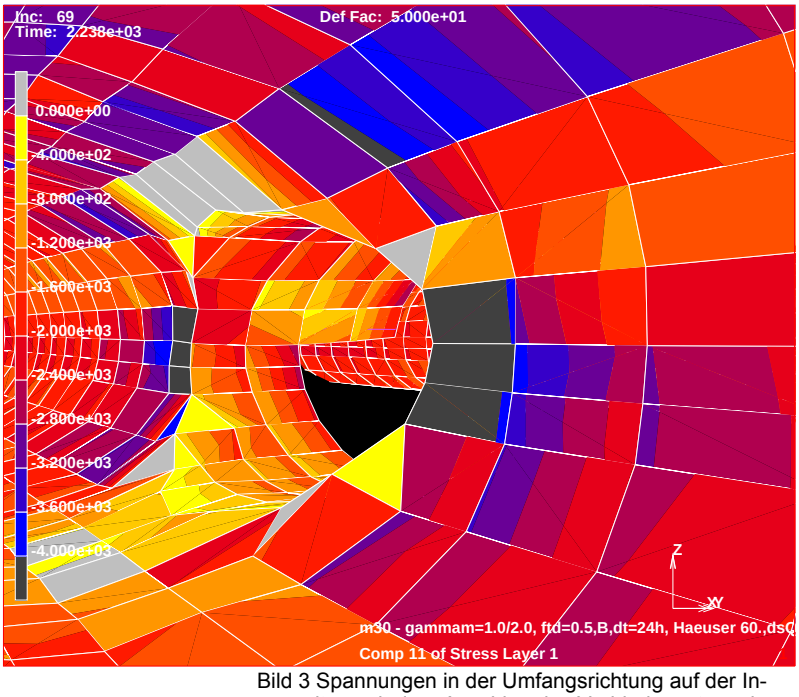

Bild 3 Spannungen in der Umfangsrichtung auf der Innenseite nach dem Anschlag des Verbindungstunnels

Fig 3 Stresses in circumferential direction at the intrados after start of excavation of connection tunnel

Einflüsse der numerischen Modellierung auf die Qualität der Ergebnisse – Bewertung

Geometrie des Modells, Randbedingungen

Das Rechenmodell enthält nur einen Ausschnitt aus der Station. An den seitlichen und der unteren Abschlussflächen ist jeweils die Verschiebung normal zur Abschlussfläche gesperrt. Die Auswirkungen der Abschlussflächen parallel zur Stationsachse sind nur von untergeordneter Bedeutung, was durch Beobachtung der Verschiebungen an diesen Randflächen und die Übereinstimmung der Spannungen nach dem Ausbruch mit dem Primärzustand leicht überprüft werden kann. Bei der Abschlussfläche, die dem Schacht Taborstraße zugewandt ist, wird die Steifigkeit der Schlitzwand nicht berücksichtigt, außerdem sind die Verschiebungen normal zur Abschlussfläche in Wirklichkeit nicht völlig behindert. Bei der gegenüberliegenden Abschlussfläche entsprechen die Randbedingungen speziell bei den ersten Abschlägen nicht der Wirklichkeit. Um numerische Probleme zu vermeiden, wurden in der ersten Schicht von Bodenelementen bessere Bodenkennwerte verwendet; die Berechnungsergebnisse für die ersten Abschläge sind für die Bemessung unbrauchbar. Auch bei der Interpretation der Ergebnisse beim Durchschlag zum Schacht ist Vorsicht geboten.

Streuungen der Kennwerte und Ungenauigkeiten der Geometrie haben gleichartige Auswirkungen wie bei konventionellen Berechnungen.

Genauigkeit der Diskretisierung in Raum und Zeit, Modellierung der Ausbruchsfolge

Bei räumlichen Modellen muss immer ein Kompromiss zwischen angestrebter Genauigkeit und Berechnungsaufwand gefunden werden. Beim hier beschriebenen Beispiel erforderte die zur Zeit der Modellerstellung verfügbare Hardware eine Beschränkung auf Bodenelemente mit linearem Verschiebungsansatz. Weiters wurde jedem fiktiven Ausbruchsschritt in der Regel nur eine Schicht Bodenelemente zugeordnet. Wie die Erfahrung mit Tragsicherheitsnachweisen mit Hilfe von ebenen Finite-Elemente-Modellen zeigt, ist eine ziemlich feine Diskretisierung erforderlich, um die Standsicherheit nicht zu überschätzen (9). Es ist daher fraglich, ob sich bei der gewählten groben Diskretisierung ein Scherversagen rechtzeitig ankündigen würde.

In den Verschneidungsbereichen, wo die Diskretisierung teilweise feiner ist, ist zu erkennen, dass bei einer einzelnen Elementreihe pro fiktivem Ausbruchsschritt die Verformungen der Spritzbetonschale im Bereich der Ortsbrust nur unzulänglich erfasst werden (Bild 2). Im Bereich der feineren Diskretisierung entsteht ein welliger Verschiebungsverlauf. Die Anzahl von fünf Lagen über die

Dicke erwies sich als ausreichend; die Ergebnisse unterschieden sich nur unwesentlich von denen, die bei einer Unterteilung in nur drei Lagen errechnet wurden.

Auch bei der Diskretisierung in der Zeit wurden starke Vereinfachungen getroffen: Jedem fiktiven Ausbruchsschritt wird nur ein Zeitschritt mit der Länge von einem Tag zugeordnet. Der Einbau der Spritzbetonschale erfolgt jeweils einen Ausbruchsschritt später, wobei zusätzlich der Zeitpunkt der Aktivierung des Spritzbetons noch um 6 Stunden verschoben wird. Dadurch ist der Spritzbeton noch jünger und weniger tragfähig beim Einbau; der Boden und – bei Verschneidungen – der Spritzbeton der bereits erhärteten Schale werden stärker belastet.

Das Rechenmodell reicht nicht bis zur Oberfläche, sondern nur bis auf die Höhe der Kellersohlen. Die Lasten oberhalb – Gebäudelasten bzw. Erdauflast und Verkehrslast – werden als Flächenlasten modelliert und als ständig wirksam betrachtet. Die Überlagerung ist im Bereich der Station Taborstraße hoch genug, dass die Schwankungen der Belastung (unterschiedliche Verkehrslasten, wechselnde Nutzung der Gebäude etc.) vernachlässigt werden können.

Das numerische Modell erfasst nur einen Teil der Stützmittel. Maßnahmen zur Voraussicherung, z. B. Dielen, Spieße, Rohrschirm etc., sind nicht berücksichtigt. Die Auswirkungen von Rohrschirmen und DSV-Schirmen können meist ausreichend genau durch Erhöhung der Kohäsion des Bodens in das Modell einfließen.

Bodenmodell

Das verwendete Mohr-Coulomb-Modell mit konstanter Steifigkeit innerhalb der einzelnen Bodenschichten ist ein sehr einfaches Bodenmodell. Nicht erfasst werden zum Beispiel

- unterschiedliche Steifigkeit bei Be- und Entlastung
- geschlossene Fließfläche bei allseitigem Druck
- Verfestigung und Softening
- Einflüsse des Porenwasserdrucks
- Kriechen

Bei den im Modellausschnitt vorhandenen tertiären Ablagerungen und der vorab durchgeführten Grundwasserabsenkung sind die angeführten Modellschwächen im Vergleich zu den anderen Unsicherheiten bei der Festlegung der Bodenkennwerte und Schichtgrenzen von untergeordneter Bedeutung. Unterhalb der Tunnelsohle wird der Elastizitätsmodul auf den fünffachen Wert erhöht, um unrealistische Hebungen zufolge der Gewichtsentnahme beim Ausbruch zu vermeiden. Die Auswirkungen der Grundwasserabsenkung wurden in einer separaten 2-D-FE-Rechnung untersucht und die Zulässigkeit einer Rechnung mit abgesenktem Grundwasserspiegel nachgewiesen.

Spritzbetonmodell

Das viskoplastische Konzept erlaubt kurzzeitiges Überschreiten der aktuellen Fließfläche. Es ist also nicht für jeden Zeitpunkt gesichert, dass die dem Betonalter entsprechende Druckfestigkeit nicht überschritten wird. Bei jungem Spritzbeton entspricht ein solches viskoses Verhalten weitgehend der Wirklichkeit; bei der Zusatzbelastung, die der bereits erhärtete Spritzbeton beim Ausbruch von Verschneidungen ertragen muss, können höhere Lasten als die nominelle Druckfestigkeit nur wenige Sekunden lang ertragen werden. Weiters sind im Rechenmodell die plastischen Verzerrungen nicht begrenzt, auch wird kein Softening simuliert. Es muss deshalb zusätzlich untersucht werden, ob die Verzerrungen mit dem Baustoffverhalten verträglich sind. Bild 3 zeigt für die Berechnungsvariante, bei der nur die Eigenschaften des Spritzbetons abgemindert sind, die Spannungen in der Innenlage der Spritzbetonschale für einen Zustand kurz nach dem Anschlagen des Verbindungstunnels für denselben Modellausschnitt wie bei Bild 2. Bild 4 zeigt die zugehörigen Verzerrungen. In Bild 5 sind die gleichen Verzerrungen im Endzustand für das gesamte Modell dargestellt. Die maximalen Verzerrungen betragen im Endzustand ca. 3,5 ‰ im Verschneidungsbereich von Stationsröhre und Verbindungstunnel. Dieser Wert ist gleich hoch wie der in der Stahlbetonnorm vorgesehene Wert von 3,5 ‰; allerdings enthalten die Verzerrungen sowohl einen Anteil vor dem Aufbringen des Spritzbetons und einen Kriechanteil. Zum im Bild 4 dargestellten Zeitpunkt betragen die Verzerrungen erst 2,9 ‰.

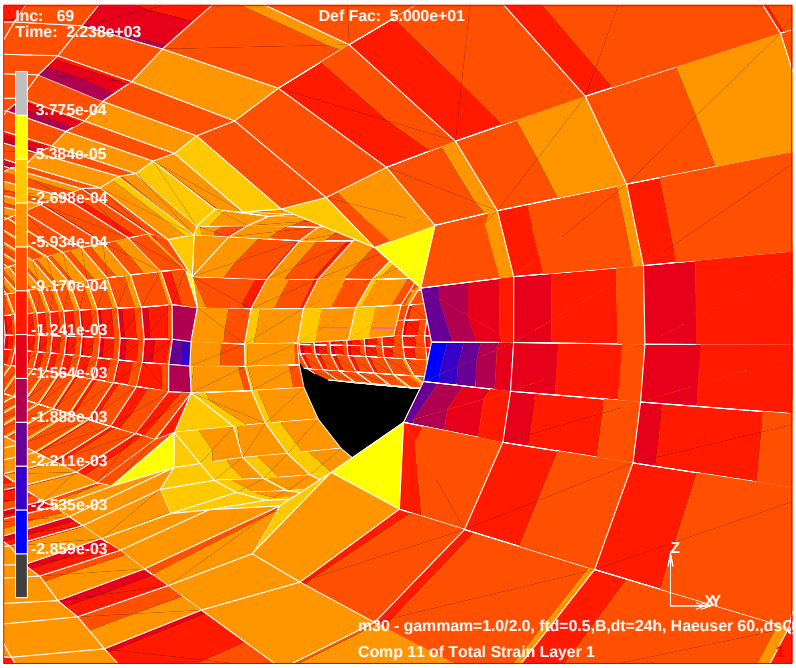

Bild 4 Verzerrungen an der Innenseite in Umfangsrichtung während des Ausbruchs des Verbindungstunnels

Fig 4 Strains at the intrados in circumferential direction during excavation of connection tunnel

Im Zugbereich ist nach Überschreiten der Zugfestigkeit ein Softening eingebaut; weiters wird die spezifizierte Zugfestigkeit zur Simulation der

Zugfestigkeit der Bewehrung verwendet. Die Zugfestigkeit des Spritzbetons selbst wird bei den Traglastuntersuchungen vernachlässigt. Hier sind also ausreichende Reserven gegeben bzw. durch vorsichtiges Ansetzen der Zugfestigkeit realisierbar.

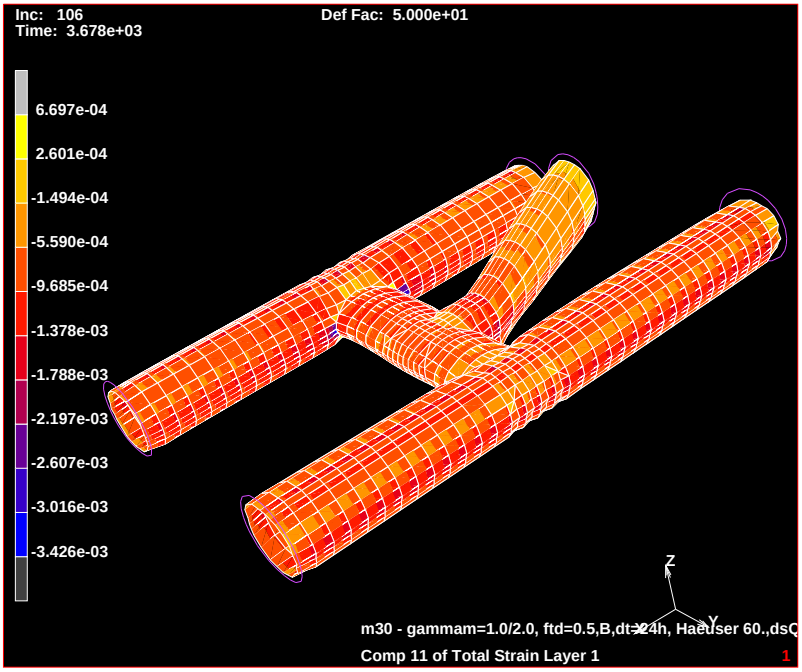

Bild 5 Verzerrungen an der Innenseite in Umfangsrichtung im Endzustand

Fig 5 Strains at the intrados in circumferential direction at the end of the analysis

Ob das Spritzbetonmodell die Spannungen ausreichend beschränkt, kann durch normgemäße Bemessung von stark beanspruchten Querschnitten leicht überprüft werden. Kleine Unterschiede können sich durch die numerische Integration und durch die Extrapolation beim Post-Processing ergeben.

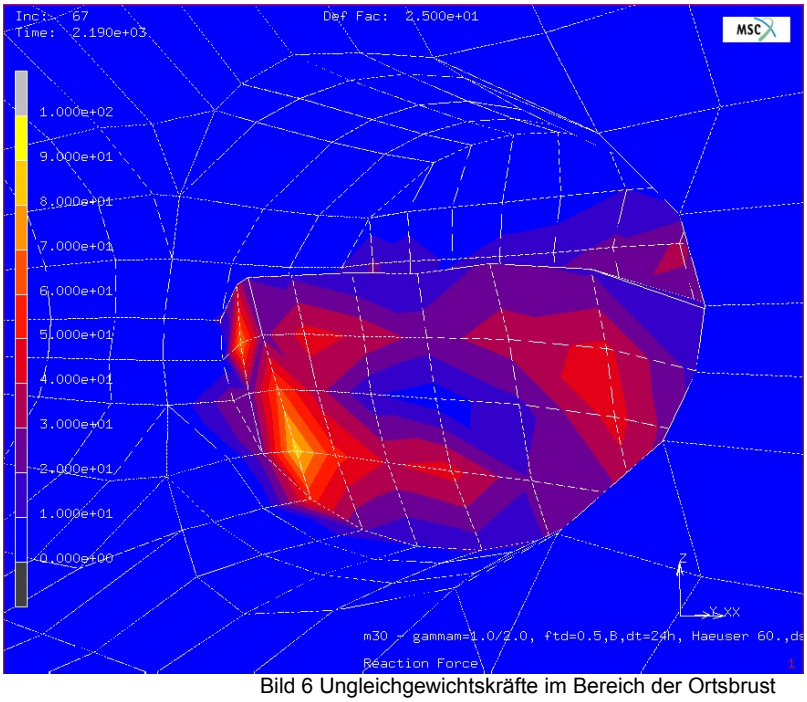

Bild 6 Ungleichgewichtskräfte im Bereich der Ortsbrust

Fig 6 Unbalanced forces at the face (connection tunnel)

Schubversagen wird im Lagenmodell nicht erfasst. Es wurde deshalb für kritische Querschnitte eine separate Schubbemessung durchgeführt.

Numerische Konvergenz

Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen sind Näherungsverfahren. Der Benutzer muss festlegen, welche Genauigkeitsansprüche er an die Berechnung hat, indem er Konvergenzkriterien festlegt. (Oft ist ein Teil der Konvergenzkriterien bereits vom Programmhersteller vorgegeben. Dies ist zum Beispiel meist bei den Algorithmen der Fall, die ein Überschreiten der Fließfläche bei plastischen Materialgesetzen verhindern.) Hohe Anforderungen an die Genauigkeit führen klarerweise zu einem erhöhten Rechenaufwand und können sogar zu numerischen Problemen mit algorithmusbedingter Divergenz führen. Zu geringe Anforderungen andererseits können bewirken, dass lokale oder kurzzeitig wirkende Überlastungen der Struktur nicht erkannt werden.

Beim hier präsentierten Beispiel ist zwar gut abgesichert, dass die mit Spritzbeton gestützte Röhre standfest ist. Wieweit die Sicherheit der Ortsbrust gegeben ist, ist zufolge der groben Diskretisierung in der Zeit nicht klar ersichtlich. Allfällig überlastete Bodenbereiche an der Ortsbrust werden im nächsten Zeitschritt entfernt – ein progressives Versagen bleibt unerkannt.

Es sind also zusätzliche Untersuchungen nötig: Die Ungleichgewichtskräfte in den Knoten des Finite-Elemente-Netzes am Ende des Iterationsverfahrens für die einzelnen Rechenschritte erlauben es festzustellen, in welchen Bereichen des Modells lokales Versagen zu befürchten ist. Bild 6 zeigt die Absolutbeträge der Ungleichgewichtskräfte im Bereich der Ortsbrust des Verbindungstunnels, Bild 7 zum Vergleich die plastischen Verzerrungen im Boden für den selben Modellausschnitt. Die Größenordnung der zur Luftseite gerichteten Ungleichgewichtskräfte entspricht den Gewichts- und Erddruckkräften und ist in stark plastizierten Bereichen am größten. Die Stabilität der Ortsbrust ist also nicht von vornherein gesichert. Zusätzliche Maßnahmen, wie das Öffnen der Brust in Teilflächen, die Versiegelung mit Spritzbeton, die Anordnung von Brustankern und eines Brustkeils sowie die Neigung der Ortsbrust sind im Rechenmodell vernachlässigt worden. Die Ungleichgewichtskräfte können wegen der vernachlässigten Stützmaßnahmen in diesem Fall toleriert werden.

Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis – in diesem Fall der Nachweis, dass die Setzungen an der Oberfläche keinen wesentlichen Schaden an der Bebauung verursachen – sind die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite gleich eins. Zusätzlich kann die Zugfestigkeit des Spritzbetons bei den Modellkennwerten berücksichtigt werden.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Hochwertige Stoffgesetze für Boden und Spritzbeton erlauben eine wirtschaftliche Dimensionierung von Tunnelverschneidungen. Konformität mit den Anforderungen der Eurocodes an den Tragsicherheitsnachweis kann weitgehend erzielt werden. Altersabhängige Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sowie Spannungsumlagerungen von stark beanspruchten Bereichen auf die Umgebung können nur mit entsprechenden Stoffgesetzen auf benutzerfreundliche Weise erfasst werden. Dies gilt analog auch für temperaturabhängige Materialfestigkeiten, die zum Beispiel bei Tragsicherheitsnachweisen im Brandfall benötigt werden (10). Abhängig von Details des jeweils eingesetzten bzw. verfügbaren Stoffgesetzes sind einzelne zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Es ist zu erwarten, dass sich die Qualität der Materialmodelle in dieser Hinsicht weiter verbessern wird. In den letzten Jahren hat auch die Benutzerfreundlichkeit der Softwarepakete ständig zugenommen; Expertensysteme helfen bei der Festlegung der Rechenparameter und bei der Vermeidung grober Fehler.

Die Erfahrung des Ingenieurs bei der Auswahl des Modellbereichs, bei der Einschätzung, welche Vereinfachungen getroffen werden können, bei der Festlegung der Eingangsparameter und bei der Interpretation der Ergebnisse ist nach wie vor der bestimmende Faktor für die Aussagekraft der Berechnungen.

Auf Diskretisierungsfehler und auf die Wahl geeigneter Konvergenzkriterien bei den numerischen Algorithmen muss besonders geachtet werden. Zufolge von relativ grober Netzteilung bei räumlichen Finite-Elemente-Netzen und grober Diskretisierung über die Zeit kann es leicht vorkommen, dass lokale Instabilitäten nicht erfasst werden oder die Tragfähigkeit des Bodens überschätzt wird.

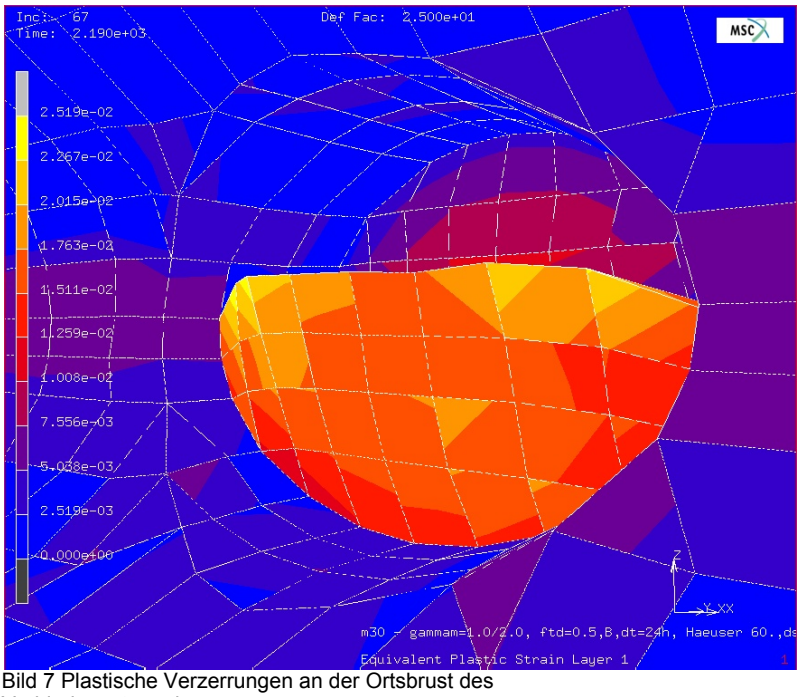

Bild 7 Plastische Verzerrungen an der Ortsbrust des Verbindungstunnels

Fig 7 Plastic strains at the face (connection tunnel)

Quellennachweis

1. Meschke, G.: Consideration of Ageing of Shotcrete in the Context of a 3-D Viscoplastic Material Model. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering 39, 1996, p. 3123-3143.
2. Walter, H.: Application of a new shotcrete model in a 3-D-FE-analysis of a tunnel excavation. In S. Pietruszczak, G. N. Pande (eds.), Numerical Models in Geomechanics, NUMOG 6; Proc. 6th intern. Symp. Montreal 2-4 July 1997. Rotterdam: Balkema.
3. H. Duddeck und H.-P. Gebel: Beanspruchung von Tunnelkreuzungen – Modellversuche. Berichtsreihe des Instituts für Statik der TU Braunschweig Nr. 72-2, Braunschweig 1972.
4. Walter, H.: Design of the shotcrete tunnel lining of a metro station – safety considerations. In N. Biçaniç, R. de Borst, H. Mang, G. Meschke (eds.), Computational Modelling of Concrete Structures; Proc. of the Euro-C Conference 2003, Austria. Lisse: Balkema.
5. Walter, H.: Design of the primary support of the NATM excavation of the metro station Taborstraße in Vienna based on a nonlinear 3-D-FE-model. Felsbau 24 (2006) Nr.2, p. 38-51.
6. Betonverein (ed.): Richtlinie Spritzbeton, Anwendung und Prüfung. Österreichische Vereinigung für Betonbau und Bautechnik, Vienna, 2003.
7. CEN / TC 250 (ed.): EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: general rules; European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
8. CEN / TC 250 (ed.): EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
9. DGGT (ed.): Empfehlungen des Arbeitskreises “Numerik in der Geotechnik”, Abschnitt 4: Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik. Geotechnik 29 (2006), No. 1, p. 13-27.
10. Grunicke, U.H., Walter, H.: Fire safety of the Unterinntalstrecke – Nonlinear FE analyses as a tool for ultimate limit state design. In J. Eberhardsteiner et.al. (eds.) Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), submitted for publication.

Autor

Dr. techn. Herbert Walter, IGT – Geotechnik und Tunnelbau ZT-GmbH, Mauracherstraße 9, A-5020 Salzburg, Austria, E-Mail h.walter@igt.co.at.