

Der Abschnitt 1 der Empfehlungen zur Durchführung numerischer Berechnungen in der Geotechnik wurde bereits in Ausgabe 1991/1 der geotechnik veröffentlicht. Mit dem vorliegenden Abschnitt 2 „Tunnelbau unter Tage“ werden die Empfehlungen fortgesetzt.

Der Abschnitt 2 der Empfehlungen baut auf den ersten Teil auf. Deshalb sei eine Gesamtgliederung vorangestellt.

- 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 drainierten Bedingungen
 - 1.6.3 Gesättigte kohäsive Böden unter undrainierten 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

Der Arbeitskreis 1.6 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik befaßt sich mit der Durchführung numerischer Berechnungen in der Geotechnik. In einem ersten, bereits publizierten Abschnitt sind allgemeine, nicht projektgebundene Empfehlungen zusammengestellt. Der vorliegende zweite Abschnitt befaßt sich mit dem Tunnelbau unter Tage. Für die Planung von Tunnelbauwerken werden heute überwiegend numerische Berechnungsverfahren herangezogen. Abgestimmt auf die Finite-Elemente-Methode sind in den vorliegenden Empfehlungen Details für das numerische Modell sowie zur Simulation verschiedener Bauverfahren genannt. Einen Schwerpunkt stellen dabei die Ausführungen zum näherungsweise Erfassen dreidimensionaler Zustände im Bereich der Ortsbrust durch zweidimensionale Berechnungen dar. Gegliederte Vortriebe sind erfaßt. Auf die im Tunnelbau allgemein geforderte Beobachtungsmethode wird eingegangen.

Tunnelbau unter Tage

Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 2

**Professor. Dr.-Ing. Helmut Meißner,
Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau,
Universität Kaiserslautern**

2. Tunnelbau unter Tage

2.1 Vorbemerkungen

Rechnerische Standsicherheitsuntersuchungen im untertägigen Tunnelbau haben nicht den gleichen Stellenwert wie zum Beispiel im Hochbau und werden häufig nur als Näherung betrachtet. Dies resultiert aus verschiedenen für den untertägigen Tunnelbau eigenen Gegebenheiten. Das den Hohlraum umgebende Gebirge (Fest- und Lockergestein) ist einerseits selbst Bestandteil des Tragwerks und hat in vielen Fällen (zum Beispiel im Felstunnelbau) sogar den größeren Anteil an der Lastabtragung, andererseits gehen auch die wesentlichen Einwirkungen auf den Ausbau vom Gebirge aus. Die Wahl eines realistischen Berechnungsmodells und zutreffender Eingangsgrößen für eine Berechnung wird zudem durch die Inhomogenität und zum Teil ausgeprägte Anisotropie des Gebirges erschwert. Die Beanspruchung von Ausbau und Gebirge wird außerdem vom Bauverfahren, von der räumlichen und zeitlichen Folge der einzelnen Bauzustände beim Ausbruch in Teilquerschnitten (Abschlagslängen und Geschwindigkeiten der Teilvortriebe, Ringschlußzeiten) und von der Qualität der Bauausführung insgesamt beeinflusst; dies sind Parameter, die nur näherungsweise in einer Berechnung zu erfassen sind. Trotz dieser Näherungen stellen numerische Berechnungen eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung der Standsicherheit eines Tunnels dar.

Die Berechnungen haben im Lauf der zeitlichen Bearbeitung eines Tunnelprojekts unterschiedliche Bedeutung. Aufgrund der üblichen Erkundungen und Untersuchungen (Bohrungen, Schürfe, boden- und felsmechanische Untersuchungen im Bohrloch und im Labor) kann das Gebirgsverhalten zunächst meist nur grob eingeschätzt werden, besonders wenn keine Erfahrungen von Erkundungsstollen oder aus vergleichbaren Projekten vorliegen. Dies gilt besonders für tiefliegende Tunnel aufgrund der vergleichsweise

Bild 1. Größe des Berechnungsausschnitts und Randbedingungen.

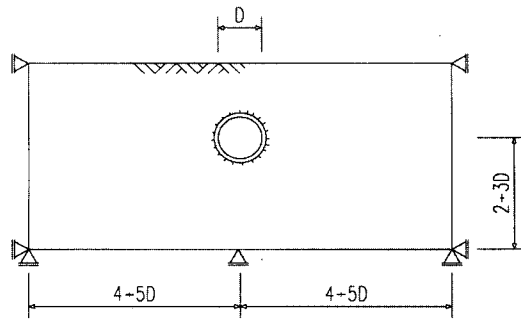


Bild 2. Berechnungsausschnitt im Fall eines unterhalb des Tunnels liegenden Schichtwechsels.

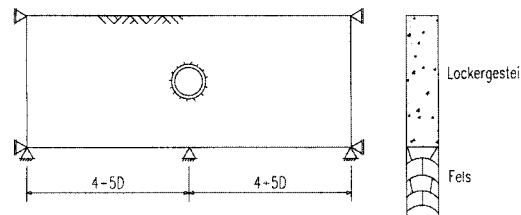
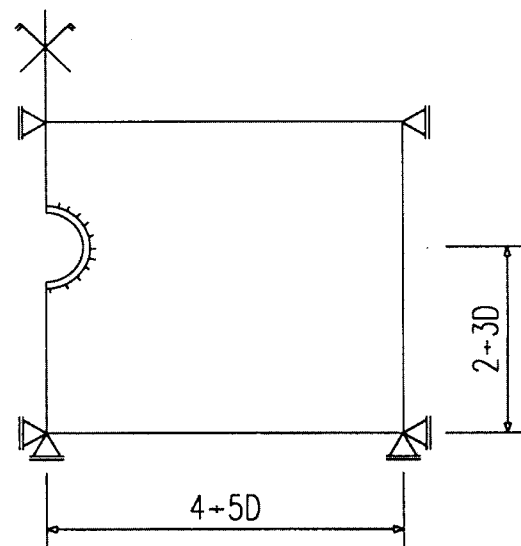


Bild 3. Berechnungsausschnitt bei symmetrischen Verhältnissen.



geringen Dichte der Aufschlüsse und dem häufig schwer abzuschätzenden primären Spannungszustand. Berechnungen in Form von Parameterstudien zeigen im Entwurfsstadium auf, welche Einflußgrößen maßgebend sind und wo kritische Beanspruchungen auftreten. Im Lauf eines Vortriebs können die Berechnungsmodelle und -annahmen durch zusätzliche Erkenntnisse verbessert werden. Die zur Standsicherheitsbeurteilung unverzichtbaren vortriebsbegleitenden Messungen und Beobachtungen vor Ort liefern die hierfür erforderlichen Informationen.

Auch für den Grundbau sehen neuere Normen (zum Beispiel Eurocode 7, DIN 1054-100) eine entsprechende Vorgehensweise unter dem Begriff Beobachtungsmethode vor. Dabei wird die Beobachtungsmethode als eine Rückkopplung der Berechnungen mit Ergebnissen aus laufenden messtechnischen Kontrollen bei der Herstellung des Bauwerks verstanden. Hierbei sollen kritische Situationen durch die Anwendung vorbereiteter technischer Maßnahmen beherrscht werden. Ein-

flüsse, die erst nach Ablauf der Baumaßnahme auftreten (zum Beispiel künftige Bebauung über einem Tunnel, zeitabhängiges Gebirgsverhalten) lassen sich dagegen nur rechnerisch prognostizieren.

Hinsichtlich der Bemessung und der Sicherheitsnachweise wird auf die Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“ der DGGT verwiesen.

Als vielseitiges Berechnungsverfahren hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Untersuchung der Standsicherheit eines Tunnels und zur Dimensionierung der Ausbruch- und Sicherungsmaßnahmen (vorläufiger Ausbau) sowie der Auskleidung (endgültiger Ausbau) bewährt. Die FEM ermöglicht unter anderem die Berücksichtigung realitätsnaher Stoffgesetze für Boden und Fels und die Erfassung hydromechanischer Einflüsse. Die bisher gesammelten Erfahrungen mit der FEM sind Basis für die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Hinweise. Alternative numerische Verfahren wie zum Beispiel die Finite-Differenzen-Methode (FDM) sind nicht Gegenstand dieser Empfehlungen.

Im Unterschied zu Berechnungen mit Stabwerkmodellen erhält man bei Anwendung ebener oder räumlicher FE-Modelle auch folgende Informationen:

- ◇ Beanspruchungen des Gebirges,
- ◇ Wechselwirkung von Gebirge und Tunnelausbau,
- ◇ Verschiebungen im Gebirge und an der Geländeoberfläche,
- ◇ Einflüsse auf benachbarte Bauwerke,
- ◇ Einflüsse auf den Tunnel durch Baumaßnahmen an der Geländeoberfläche oder benachbarte Bauwerke.

In den folgenden Abschnitten werden Empfehlungen zur rechnerischen Simulation der im Tunnelbau üblichen Bauverfahren und der zugehörigen Konstruktionselemente gegeben.

2.2 Berechnungsausschnitt, Anfangs- und Randbedingungen, Diskretisierung

Zur Durchführung der rechnerischen Untersuchungen mit der FEM muß das geotechnische Modell (Tunnel und umgebendes Gebirge) geeignet diskretisiert werden. Dabei wird im allgemeinen nur ein begrenzter Ausschnitt berücksichtigt.

In Anlehnung an den allgemeinen Teil der Empfehlungen (Abschnitt 1.2) sollen die Berechnungsausschnitte so gewählt werden, daß der Einfluß des Hohlraums an den Ausschnittsrändern abgeklungen ist. Bild 1 zeigt einen solchen Berechnungsausschnitt für einen im Tunnelbau häufig auftretenden Fall, bei dem die Hauptspannungen des Primärspannungszustands parallel und senkrecht zu den Rändern des Berechnungsausschnitts verlaufen. In solchen Fällen werden die Randbedingungen zweckmäßigerweise so ge-

wählt, daß an den seitlichen Rändern die Horizontalverschiebung und am unteren Rand die Vertikalverschiebung zu Null gesetzt werden. Der Randabstand von den Tunnelachsen sollte in horizontaler Richtung etwa vier bis fünf Tunneldurchmesser und unter dem Tunnel etwa zwei bis drei Tunneldurchmesser betragen.

Zur Überprüfung des seitlichen Randabstands kann auch eine ergänzende Berechnung mit Spannungsrandbedingungen sinnvoll sein. Bei tiefliegenden Tunneln können erheblich größere Berechnungsausschnitte erforderlich werden. Gleiches gilt für Fälle mit besonderen geotechnischen sowie bautechnischen Gegebenheiten.

Abweichungen von den empfohlenen Abständen ergeben sich auch, wenn zum Beispiel durch die In-situ-Verhältnisse eine Berandung mit bestimmten Eigenschaften vorgegeben ist. Bei der im Bild 2 vorliegenden Situation ist es zweckmäßig, den unterhalb des Tunnels liegenden Felshorizont als untere Ausschnittsberandung und als unverschieblich zu wählen.

Bei der Kombination mit infiniten Elementen oder Randelementen (boundary elements) kann der mit finiten Elementen diskretisierte Gebirgsbereich verkleinert werden.

Besteht bezüglich des Gebirgsverhaltens und der Einwirkungen Symmetrie zur Vertikalachse des Tunnelquerschnitts, ist nur die Diskretisierung einer Symmetriehälfte des Berechnungsausschnitts erforderlich (Bild 3).

Hinsichtlich der Diskretisierung des Berechnungsausschnitts wird auf Abschnitt 1.3 verwiesen. Bei der Diskretisierung von Hohlrumbauteen sind insbesondere signifikante Wechsel der Gebirgsverhältnisse, mechanisch wirksame Trennflächen und die einzelnen Bauzustände zu berücksichtigen.

Bereiche mit hohen Spannungsgradienten, in denen die Diskretisierung entsprechend Abschnitt 1.3 verfeinert werden muß, kommen im Tunnelbau vor allem in der Umgebung des Ausbaus und im Ausbau selbst vor. Extrem hohe Spannungsgradienten können im Auflagerbereich nicht geschlossener Schalen (zum Beispiel Kalottenfüße) auftreten.

Ein Beispiel für eine geeignete Diskretisierung eines Tunnels zeigt Bild 4. Der Ausbau kann mit speziellen Balken- beziehungsweise Schalenelementen oder mit Kontinuumelementen diskretisiert werden. Bei Verwendung von Kontinuumelementen mit quadratischem Verschiebungsansatz sollten über die Dicke des Ausbaus mindestens zwei, bei linearem Verschiebungsansatz mindestens drei Elementreihen angeordnet werden.

Wenn das zu berechnende Bauwerk keine Vereinfachungen durch ebene oder rotationssymmetrische Betrachtungen erlaubt, sind allgemein räumliche Berechnungsausschnitte zu wählen. Der Aufwand für die rechnerischen Untersu-

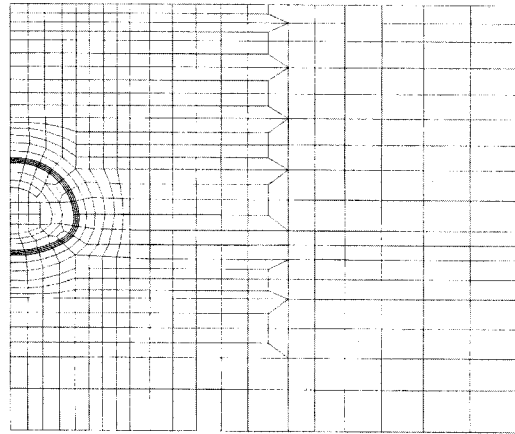


Bild 4. Beispiel für die Diskretisierung eines Tunnels.

chungen wird dann erheblich größer. Die Diskretisierung muß in diesem Fall zur Begrenzung des Aufwands meist gröber gewählt werden als bei vergleichbaren ebenen Systemen.

Bei der Berechnung von Tunneln entsteht durch die entfallenden Massen des Ausbruchs ein Auftrieb. Insbesondere bei oberflächennahen Tunneln können sich dadurch je nach geotechnischen Verhältnissen und verwendetem Stoffgesetz rechnerisch zu kleine Oberflächensetzungen oder sogar Hebungen ergeben. Um diesen Effekt zu kompensieren, kann unterhalb des Tunnels in Annä-



Sicherung und Sanierung von Bauschäden an

Mauerwerk + Beton
zur Erhaltung der Bausubstanz

- Spezialisiert auf den Standsicherheitsnachweis von
Stützmauern + Brücken, Böschungs- und Baugrubensicherung,
Fundament-Stützkörper, Fangedamm, Sandanker

- Lösungsvorschläge für Problemschäden
im Erd- und Grundbau

Gernsheim	Tel.: 0 62 58 /	93 39 0
	Fax: 0 62 58 /	93 39 33
Glauchau	Tel.: 0 37 63 /	1 53 64
	Fax: 0 37 63 /	1 53 41
Karlsruhe	Tel.: 07 21 /	4 44 90
	Fax: 07 21 /	40 53 91
Stuttgart	Tel.: 07 11 /	69 67 09
Erfurt	Tel.: 03 61 /	2 11 05 73
	Fax: 03 61 /	2 11 05 73

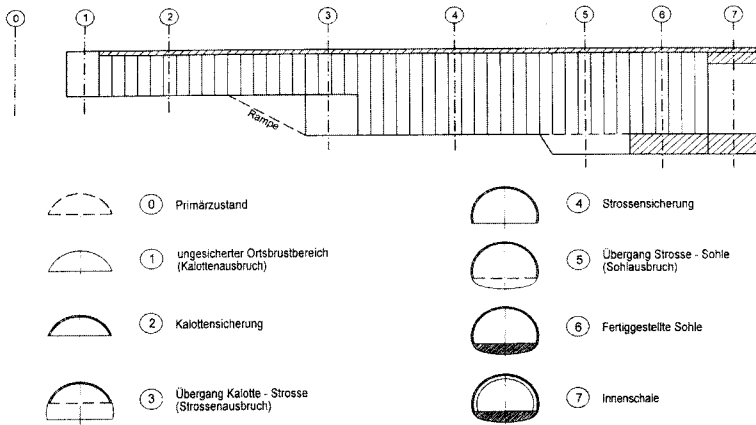


Bild 5. Spritzbetonbauweise – Charakteristische Bauzustände.

herung an die tatsächlichen geotechnischen Gegebenheiten (Ent- und Wiederbelastung) eine erhöhte Steifigkeit angesetzt werden. Hierfür ist bei der Diskretisierung gegebenenfalls eine Schichtgrenze vorzuschneiden.

2.3 Simulation von Bauverfahren

2.3.1 Bauverfahren

Bevor in den nachfolgenden Kapiteln Hinweise auf die rechen-technische Simulation verschiedener Bauverfahren im untertägigen Tunnelbau erfolgen, werden diese kurz beschrieben. Prinzipiell wird auf die zusammenfassende Darstellung der Bauverfahren in der einschlägigen Fachliteratur und auf die Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“ der DGGT verwiesen.

► Spritzbetonbauweise

Kennzeichnend für die Spritzbetonbauweise ist folgender Arbeitszyklus:

⇒ Je nach Festigkeit des Gebirges wird mit Hilfe eines Baggers, einer Teilschnitt- oder Vollschnittmaschine beziehungsweise unter Anwendung der Sprengtechnik abschnittsweise ausgebrochen und das Material abtransportiert. In Abhängigkeit vom Gebirgsverhalten ist eventuell ein Vorgehen in Teilausbrüchen erforderlich.

⇒ Die möglichst profilgerecht freigelegte Gebirgsoberfläche wird im allgemeinen zunächst mit einer nur wenige Zentimeter dicken Spritzbetonschicht versiegelt. Danach erfolgt die Sicherung mit (je nach Erfordernis) Stellen der Ausbaubögen, Einbau der Bewehrung, Aufbringen des Spritzbetons (Außenschale) und Setzen von Gebirgsankern.

Je nach Gebirgsverhältnissen (insbesondere Festigkeits- und Wasserverhältnisse) und den Anforderungen aufgrund der Nutzung des Bauwerkes ist der Einbau einer Innenschale aus Schalbeton erforderlich (zweischalige Bauweise).

Wenn auf die Innenschale verzichtet wird, muß die Spritzbetonschale auf Dauer die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Tunnels gewährleisten (einschalige Bauweise).

Die Gebirgsfestigkeit und die Größe des Ausbruchquerschnittes bestimmen im wesentlichen die Vorgehensweise beim Vortrieb:

⇒ Vollausbuch oder Teilausbrüche (zum Beispiel Kalotte, Strosse, Sohle beziehungsweise Ullmenstollen),

⇒ Abschlagslänge des Vollausbuchs beziehungsweise der Teilausbrüche,

⇒ Anordnung einer geschlossenen Kalottensohle,

⇒ Art und Umfang der Sicherungsmaßnahmen (Spritzbeton einschließlich Bewehrung, Gebirgsanker, Ausbaubögen),

⇒ Abstand zwischen Kalottenausbruch und Sohl-schluß (Ringschlußzeit),

⇒ Notwendigkeit von Zusatzmaßnahmen wie Belassen eines Stützkernes an der Ortsbrust, Vergütung des Gebirges durch vorausleitende Injektionen und Einbau vorausleitender Sicherungsmittel.

► Schildvortrieb und Rohrvorpressungen

Beim Schildvortrieb stützt der Schildmantel die Ausbruchlaibung. Im Schutz des Schildes wird der tragende Ausbau in der Regel aus Tübbing montiert. Der Ringraum zwischen Gebirge und Tübbingring (Schildspur) wird kontinuierlich kraftschlüssig mit Mörtel verpreßt.

Entsprechend den geotechnischen Randbedingungen und der vorgesehenen Nutzung des Bauwerkes ist eine Tübbingschale bereits der endgültige Ausbau (einschalige Bauweise), oder es wird noch eine Innenschale angeordnet (zweischalige Bauweise).

Rohrvorpressungen unterscheiden sich von Schildvortrieben im wesentlichen dadurch, daß der gesamte Tunnelausbau hinter dem Schild nachgeschoben wird.

► Gefrierverfahren

Beim Gefrierverfahren wird als Bauhilfsmaßnahme ein Frostkörper erzeugt, mit dessen Hilfe das Gebirge temporär wasserundurchlässig und standfest wird. Der weitere Ausbruch und die Sicherung erfolgen meist in Anlehnung an die Spritzbetonbauweise.

2.3.2 Spritzbetonbauweise

Die Spritzbetonbauweise kann unter sehr unterschiedlichen geotechnischen und bautechnischen Randbedingungen eingesetzt werden; dies führt zu entsprechend unterschiedlichen Lösungen bei der Unterteilung des Ausbruchquerschnitts und der Abfolge der Ausbruch- und Sicherungsphasen. Bei größeren Tunnelquerschnitten wird häufig eine Unterteilung des Ausbruchquerschnitts in Kalotte, Strosse und Sohle gewählt; die Berechnungsmöglichkeiten werden deshalb anhand dieses Beispiels aufgezeigt, die Ausführungen können aber sinngemäß auch auf andere Konstellationen übertragen werden.

Bei dem in Bild 5 dargestellten Vortrieb sind ausgehend vom Primärzustand 0 die Standsicherheiten für die Zustände 1 (ungesicherter Ortsbrustbereich) bis 7 (Einbau der Innenschale) nachzuweisen. Dabei sind verschiedene Vorgehensweisen möglich:

- ⇒ Simulation des gesamten Vortriebs durch räumliche Berechnungen,
- ⇒ Simulation des Vortriebs durch ebene Berechnungen,
- ⇒ Separates Betrachten der einzelnen Bauzustände durch ebene Berechnungen.

Selbstverständlich sind unabhängig von der gewählten Vorgehensweise nur dann brauchbare Ergebnisse zu erwarten, wenn die geotechnischen Verhältnisse durch geeignete Stoffgesetze und entsprechende Stoffparameter weitgehend zutreffend erfaßt werden.

► Räumliche Berechnungen

Eine räumliche Simulation des Vortriebs wird den tatsächlichen Verhältnissen am besten gerecht, da die bei jedem Tunnelvortrieb auftretenden räumlichen Lastumlagerungen direkt durch das Modell erfaßt werden können.

Berechnungen dieser Art unterliegen aber auch gewissen Einschränkungen. Eine zuverlässige Beurteilung der direkt im Bereich der räumlichen Lastumlagerungen liegenden Bauzustände (Bauzustände 1, 3 und 5) setzt voraus, daß das zeitabhängige Gebirgsverhalten richtig abgebildet werden kann. Dies gilt insbesondere für eine nur temporär standsichere Kalottenortsbrust. Räumliche Berechnungen sind außerdem hinsichtlich Netzerstellung, Berechnungsdurchführung und -auswertung relativ aufwendig; sie werden in der Praxis daher zur Zeit noch selten eingesetzt.

► Simulation des Vortriebs durch ebene Berechnungen

In vielen Fällen werden die einzelnen Bauzustände mittels ebener Berechnungen sukzessive aus dem Primärzustand entwickelt. Dabei wird bei jedem Teilausbruch der Anteil aus den Lastumlagerungen abgeschätzt, den das System vor Einbau der zusätzlichen Sicherung aufnehmen muß und der damit im wesentlichen dem Gebirge zugewiesen wird. Dies entspricht einer Vorentspannung dieses Systems. Der restliche Anteil aus den Lastumlagerungen wird anschließend dem vorläufigen Ausbau – einschließlich Gebirge – zugewiesen.

Die Vorentspannung wird in der FE-Berechnung durch einen Zwischenschritt simuliert, bei welchem die Stützwirkung des Gebirges im Ausbruchsbereich durch einen pauschalen Vorentspannungsfaktor reduziert wird. Die Vorentspannung kann dabei grundsätzlich durch eine

- ⇒ Verminderung der Stützkkräfte des Ausbruchsbereichs (Stützlastverfahren) oder
- ⇒ Verminderung der Steifigkeit des Ausbruchsbereichs (Stützkernverfahren)

realisiert werden. Zur rechentechnischen Umsetzung dieser Verfahren wird auf den Abschnitt 1.4 verwiesen.

Am Beispiel eines Vortriebs entsprechend Bild 5 wird die Simulation der Bauzustände mittels Stützlastverfahren im Bild 6 gezeigt.

Im Primärzustand (Zustand 0) sind neben den Spannungen auch die Knotenkräfte p_k zu ermit-

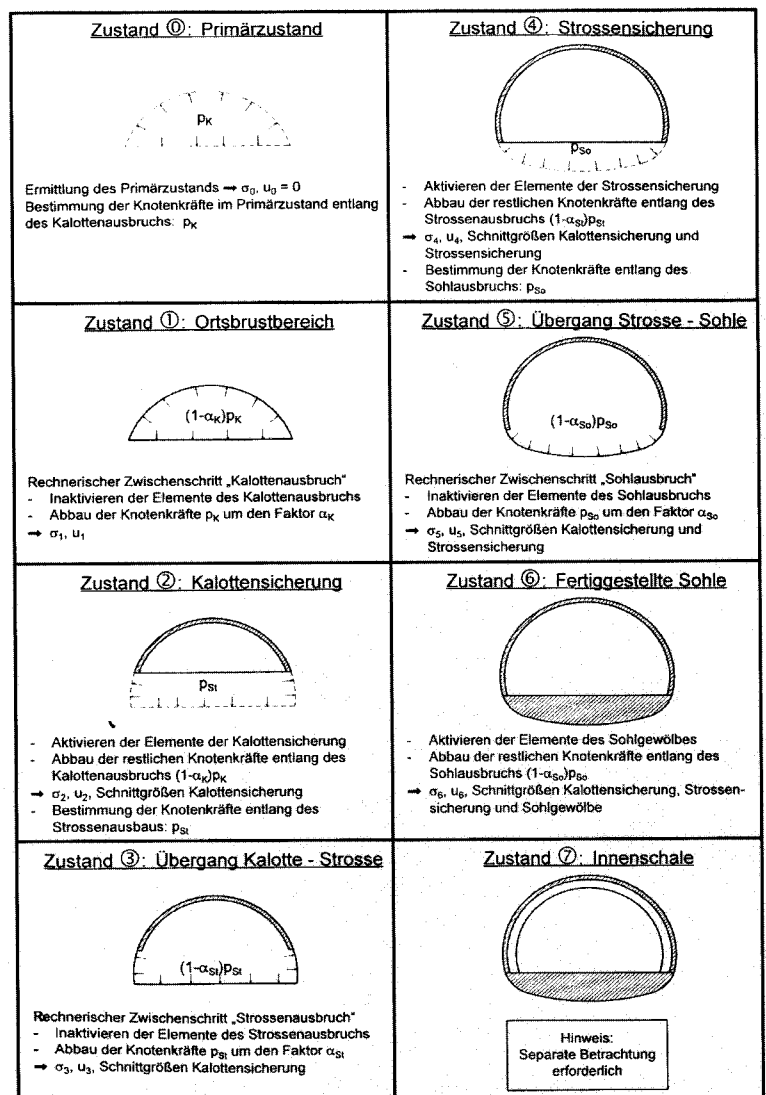
eln, die entlang des späteren Kalottenausbruchs stützend auf das umgebende Gebirge wirken. Diese Kräfte können aus den entsprechenden Elementknotenkräften entlang der Ausbruchkontur ermittelt werden.

Im folgenden Zwischenschritt »Kalottenausbruch« (Zustand 1) werden die Elemente des Kalottenausbruchs inaktiviert und die Knotenkräfte p_k um den Vorentspannungsfaktor α_k reduziert, das heißt als Stützkkräfte werden nur noch $(1 - \alpha_k) \cdot p_k$ angesetzt. Hieraus resultiert ein gegenüber dem Primärzustand veränderter Spannungs- und Verformungszustand (σ_1, u_1) .

Anschließend wird der Bauzustand »Fertiggestellte Kalottensicherung« (Zustand 2) berechnet, indem die Elemente der Kalottensicherung aktiviert und die Stützkkräfte des Kalottenausbruchs vollständig abgebaut werden. Hieraus resultieren ein neuer Spannungs- und Verformungszustand (σ_2, u_2) und eine Beanspruchung der Kalottensicherung.

Weiterhin werden in diesem Schritt die stützenden Knotenkräfte p_{st} des noch vorhandenen Strossenausbruchs wie bei der Kalotte ermittelt.

Bild 6. Spritzbetonbauweise – Simulation der Bauzustände mit dem Stützlastverfahren.



Die weiteren in Bild 6 dargestellten Schritte ergeben sich analog.

Zur Kontrolle der gewählten Vorentspannungsfaktoren wird empfohlen, anhand der Normalkraft die Lastanteile abzuschätzen, die nach dem Ringschluß (Zustand 6) von der Sicherung abgetragen werden.

Es wird darauf hingewiesen, daß die Bemessung der Innenschale gesondert durchzuführen ist (siehe Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“ der DGGT).

Die im Bild 6 erläuterte Simulation der Bauzustände kann sinngemäß auch mit dem Stützkernverfahren durchgeführt werden. Die Vorentspannungsfaktoren beziehen sich dann jedoch auf die Steifigkeit des Ausbruchsbereichs und sind deshalb anders zu wählen. Ein gewisser Nachteil gegenüber dem Stützlastverfahren ist, daß die Größe der Stützkräfte und ihre Verteilung entlang der Ausbruchskontur von dem Steifigkeitsverhältnis Ausbruchsbereich-Gebirge und vom Stoffverhalten im Ausbruchsbereich abhängen und sich erst durch die Berechnung selbst ergeben.

Unabhängig davon, ob das Stützlast- oder Stützkernverfahren gewählt wird, sind die Vorentspannungsfaktoren für die einzelnen Teilausbrüche im allgemeinen unterschiedlich zu wählen. Der Ansatz hängt von vielen projektspezifischen Einflüssen (Gebirgsverhältnisse, Abschlagslängen der Teilausbrüche, Geschwindigkeiten der Teilvortriebe, Umfang der Sicherungsmaßnahmen) ab, so daß hierzu keine allgemein gültigen Angaben gemacht werden können. Zur Abschätzung können Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten (zum Beispiel aus Messungen oder durchgeführten räumlichen Berechnungen) herangezogen werden. Hinweise auf die Güte der gewählten Ansätze können aus vortriebsbegleitenden Messungen abgeleitet werden (zum Beispiel vor dem Vortrieb eingebaute Extensometer, Oberflächennivellements, Messungen im Tunnel).

Allgemein hat die sukzessive Berechnung der Bauzustände an ebenen Modellen mit Vorentspannungsfaktoren den Vorteil, daß die räumlichen Lastumlagerungen zumindest näherungsweise

erfaßt werden und dadurch die Vorgeschichte jedes Bauzustands berücksichtigt wird. Auch diese Vorgehensweise unterliegt aber Einschränkungen:

- ⇒ Aufgrund der pauschalen Erfassung der räumlichen Lastumlagerungen und der ebenen Berechnungsweise werden zum Beispiel Lastkonzentrationen in den unmittelbar an die Teilausbrüche angrenzenden Tunnelbereichen nicht erfaßt.

- ⇨ Die Bauzustände in den Übergangsbereichen (Bauzustände 1, 3, und 5) können anhand der Berechnungsergebnisse nicht beurteilt werden.

- ⇒ Eine zutreffende Abschätzung der Vorentspannungsfaktoren ist oft schwierig.

- ⇨ Mit zunehmender Anzahl von Teilausbrüchen wird es immer schwieriger nachzuvollziehen, welche Lastanteile den Teilsystemen zugeordnet wurden.

- Separates Betrachten der einzelnen Bauzustände Eine bessere Durchschaubarkeit der Berechnungen kann durch weitere Vereinfachungen erreicht werden. Um für jeden Teilschritt eindeutig nachvollziehbare Belastungszustände zu erhalten, kann zum Beispiel jeder einzelne Bauzustand für sich mit einem spezifischen Vorentspannungsfaktor aus dem Primärzustand entwickelt werden. Während des Vortriebs sind dann einfachere Sicherheitsabschätzungen möglich, wenn zum Beispiel das Gebirge schlechter als erwartet ist. Dies gilt insbesondere dann, wenn zur Erhaltung der Standicherheit ein Stützdruck durch eine Spritzbetonschale erforderlich ist und die Bemessung der Schale ein wichtiges Berechnungsziel darstellt. Diese Situation liegt vor allem bei Tunneln mit geringer bis mäßiger Überlagerung und entsprechend geringer Gebirgsfestigkeit vor.

➤ Empfehlungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den erläuterten Vorgehensweisen folgende Empfehlungen:

- ⇨ Soweit nicht in Sonderfällen räumliche Berechnungen vorgesehen sind, sollte zumindest für signifikant unterschiedliche Gebirgsbereiche jeweils eine näherungsweise Entwicklung der Bauzustände durch Simulation der Vortriebe durch ebene Berechnungen durchgeführt werden.

- ⇨ Ergänzende Berechnungen mit separatem Betrachten der einzelnen Bauzustände werden insbesondere bei Tunneln mit geringer bis mäßiger Überlagerung empfohlen. Hierbei können auch örtlich variierende geotechnische Randbedingungen und beim Vortrieb festgestellte Veränderungen mit relativ geringem Aufwand berücksichtigt werden. Unerlässlich sind separate Untersuchungen für die Innenschale.

- Simulation von Konstruktionselementen Beim Vortrieb werden unterschiedliche Konstruktionselemente verwendet, deren Wirkungsweise realistisch erfaßt werden sollte.

Die Spritzbetonsicherung wird entsprechend den jeweiligen Teilausbrüchen abschnittsweise aufgebracht. Sie kann in der numerischen Berechnung durch Balken- oder Schalenelemente ent-

- ANZEIGE -

GEOPHYSIKALISCHE AUSRÜSTUNGEN

der Firmen

ABEM Instrument AB
GEM Systems
MALÅ GeoScience

beziehen Sie über

Hansa GeoMin Consult GmbH

Postfach 100622	Tel.: 0203-9924314
47006 Duisburg	Fax 0203-9924319

lang der Tunnelkontur erfaßt oder über mehrere Schichten von Kontinuumselementen diskretisiert werden. Wenn im Programm die Möglichkeit besteht, Balken- oder Schalenelemente zu verwenden, hat dies den Vorteil, daß die Berechnungsergebnisse sofort die Bemessungsschnittgrößen sind und weniger Unbekannte (Knotenfreiwerte) benötigt werden.

Da der Spritzbeton schon kurze Zeit nach dem Aufbringen belastet wird, ist sein Kriechen und seine Relaxation entsprechend hoch. Dieses Verhalten kann in der Berechnung durch spezielle Kriechgesetze oder näherungsweise durch reduzierte Elastizitätsmoduln (zum Beispiel 50% von E_{28}) berücksichtigt werden. Die Abminderungen können entsprechend dem zeitversetzten Einbau, der Vortriebsgeschwindigkeit und der Steifigkeitsentwicklung auch sukzessive verändert werden. Zwischen Spritzbetonschale und Gebirge kann in der Regel voller Verbund angenommen werden.

Ausbaubögen, die konstruktiv zur sofortigen Sicherung hinter der Ortsbrust dienen und im weiteren Bauablauf zusammen mit der Bewehrung eingespritzt werden, werden in der Berechnung in der Regel nicht gesondert erfaßt.

Zur Sicherung des Abschlags wird in Abhängigkeit von der Gebirgstragfähigkeit häufig eine Systemankerung eingesetzt. Sie besteht im allgemeinen aus vermörtelten Betonstahlankern. Die Anker können in der FE-Berechnung durch eine fiktive Kohäsionserhöhung des geankerten Gebirges berücksichtigt werden.

Einzelanker, die gezielt zur Verhinderung des Abgleitens oder Herausfallens von Kluftkörpern angeordnet werden, können in der FE-Berechnung als Stäbe mit ihrer genauen geometrischen Anordnung diskretisiert werden. Die Lage dieser Stäbe muß bereits bei der Netzstruktur berücksichtigt werden. Bei vorgespannten Freispiellankern ist die Vorspannkraft zu berücksichtigen. Problematisch kann die Lasteinleitung an den Endpunkten der Anker bei der nichtlinearen Berechnung aufgrund großer Spannungsspitzen werden, da hier lokal große Kräfte eingeleitet werden. Hier finden zum Teil Spezialelemente Anwendung, welche die Verankerungskräfte über Schubspannungen in den Endbereichen der Anker über eine definierte Länge einleiten.

Für die Diskretisierung einer Innenschale aus Schalbeton gelten die Ausführungen für die Spritzbetonsicherung sinngemäß. Weitere Angaben zur Berechnung und Bemessung finden sich in den Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“.

Abdichtungen aus Kunststoff-Dichtungsbahnen oder Trennschichten zwischen Außen- und Innenschale können dadurch berücksichtigt werden, daß der Schubverbund zwischen den beiden Schalen herabgesetzt wird oder ganz entfällt. Die Begrenzung der Schubübertragung kann durch Interface-Elemente erfolgen. Die völlige Ausschaltung des Schubverbunds kann auch durch kurze

Pendelstäbe zwischen den beiden Schalen realisiert werden.

2.3.3 Schildvortrieb und Rohrvorpressungen

Beim Schildvortrieb entsteht je nach Art der Stützung der Ortsbrust ein mehr oder weniger ausgeprägtes räumliches Tragverhalten mit Gewölbebildung in Längs- und Querrichtung. Da sich das Längsgewölbe auf den Schild abstützt, ist es mit seiner Lastumlagerung für die Berechnung des Tunnelausbaus von untergeordneter Bedeutung. Der Ausbau besteht üblicherweise aus vorgefertigten Stahlbetontübbing, die noch im Schutz des Schildes eingebaut werden. Für die Dimensionierung des Ausbaus ist in der Regel der Endzustand zugrunde zu legen. In Sonderfällen kann für die ersten Tübbingringe hinter dem Schild die Beanspruchung aus dem Verpressen des Schildschwanzes und gegebenenfalls aus den Lasten des ersten Nachläufers maßgebend werden.

Der Schildvortrieb wird häufig in wenig standfesten Böden und bei geringer Überdeckung angewendet. Für die Dimensionierung ist dann eine Berechnung als gebetteter Stabzug mit bettungsfreiem Firstbereich üblich. Modelle zur Abbildung des Tragverhaltens und zur Berücksichtigung dieses bettungsfreien Firstbereiches in einer FE-Berechnung sind in den Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln in Lockergestein der DGGT enthalten.

Seismische Instrumentierungen

Planung • Lieferung • Installation

- Erdbebenüberwachung von Kernkraftwerken und Staudämmen
- Schwingungsüberwachung von Brücken, Tunneln und Offshore-Plattformen
- Erdbebenerschlagüberwachung von Bergwerken

Kontaktieren Sie uns unter: 06172/77015

ADDITIVE GmbH
Max-Planck-Straße 9
D-61381 Friedrichsdorf
Telefon: 06172/77015
Telefax: 06172/77613

Bei weichen bindigen Böden oder locker gelagerten rolligen Böden ist die Kopplung benachbarter Tübbingringe zur gegenseitigen Aussteifung zu berücksichtigen.

Zwischen Tunnelschale und Gebirge sollten bei einer FE-Berechnung Interface-Elemente angeordnet werden, um das Verbundverhalten zu erfassen. Ist die Wirkung der Verpressung im Schildschwanz auf den Verbund nicht eindeutig zu beurteilen, sollten Rechnungen mit und ohne tangentialen Verbund durchgeführt werden, um das wahre Tragverhalten in seinen Auswirkungen auf die Beanspruchungen eingrenzen zu können.

Abschätzungen der Senkungen über dem Tunnel sind auch mit einer FE-Berechnung nur eingeschränkt möglich, da die Ringbiegung im Endzustand nur kleine Verschiebungsanteile erzeugt. Maßgebend ist der Bodenentzug im Rahmen des Vortriebs. In einer FE-Berechnung kann dies näherungsweise durch die Berechnung eines Vorentspannungszustandes ohne Ausbau abgebildet werden, bei welcher der Vorentspannungsgrad so gewählt wird, daß die Hohlraumkonvergenz der Erfahrung beim Vortrieb entspricht. Als Ergebnis der Berechnung kann dann der Einfluß des Vortriebs auf die Geländeoberfläche und auf Gebäude abgeschätzt werden.

Die Berechnungen für Rohrvorpressungen können analog zu den Untersuchungen für einen Tübbingausbau erfolgen. Die Schwierigkeit der Abbildung des Tragverhaltens der versetzten Fuge entfällt hierbei. Besonders für kleinere Durchmesser ist die Bemessung auf der Grundlage der Merkblätter der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV) üblich.

2.3.4 Gefrierverfahren

Das komplexe, zeitabhängige Verhalten von gefrorenem Boden läßt sich nur durch Heranziehen numerischer Methoden wirklichkeitsnah erfassen. Einen dominierenden Einfluß auf das Tragverhalten und damit auf die Parameter des Stoffgesetzes haben die Bodenart, der Wassergehalt oder der Sättigungsgrad, die Gefriertemperatur sowie die Standzeit des Frostkörpers. Sind diese Einflüsse nicht ausreichend berücksichtigt, müssen bei der Auswertung der Rechenergebnisse die Auswirkungen auf das Bauwerk ingenieurmäßig abgeschätzt werden. In die Gesamtbeurteilung muß gegebenenfalls mit einbezogen werden, daß in teilgesättigten, frostempfindlichen Böden größere Wasseranlagerungen an der Frostgrenze entstehen. Diese haben einerseits eine Festigkeitssteigerung des gefrorenen Bodens zur Folge, andererseits sind sie aber Ursache für Frosthebungen und nach dem Auftauen für Sackungen.

Die rechnerischen Nachweise bestehen üblicherweise aus getrennten Temperatur- sowie Festigkeitsberechnungen. Um die Rechenergebnisse nachvollziehen zu können, müssen die Eingabewerte der wesentlichen Einflußgrößen dokumentiert werden. Hierzu gehören neben den allgemeinen geotechnischen Daten die Wärmeleitahlen, die Gefrierrohrabstände, Annahmen zur Grundwasserströmung und zur Temperaturübertragung von den Gefrierrohren auf den Boden sowie sämtliche Parameter des verwendeten Stoffgesetzes.

Für das Stoffgesetz der Festigkeitsberechnungen hat sich eine Formulierung in Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeiten bewährt (Abschnitt 1.6.4). Eine Zeitintegration ist damit notwendig.

Der Frostkörper wird nach dem Ausbruch durch den Überlagerungsdruck sowie gegebenenfalls den Wasserdruck beansprucht. Für diesen Zustand sind die erdstatischen Nachweise zu führen. Entsprechend dem Stoffgesetz hängen die erforderlichen Abmessungen auch von der Gefriertemperatur und deren Verteilung im Frostkörper sowie von der Standzeit ab. Als Bemessungskriterien sollten wegen dieses komplexen Zusammenhanges daher Verformungskriterien gewählt werden. Diese können auf zulässigen Setzungen, Konvergenzen sowie auf Verschiebungsdifferenzen basieren. Letztere sind für die Beanspruchung der Gefrierrohre von Bedeutung. Werden hingegen zur Beurteilung der Standsicherheit sogenannte zu-

- ANZEIGE -

Fachtagung Do., 26. - Fr., 27. 9.1996

Altlastenmanagement für die Praxis:

Ausschreibung

und Auftragsvergabe

- * sach- und fachgerechte Ausschreibungen
- * Leistungsvorgaben und Bewertungsverfahren
- * Erfahrungsberichten zur Vergabepaxis der Städte München, Essen und Kiel

Zertifikatskurs Mo., 9. - Fr., 13. 12.1996

Sachkundige/r für die

Bearbeitung von Altlasten

Fortbildungsveranstaltung im Hinblick auf den Nachweis der erforderlichen Sachkunde nach § 18 des aktuellen Referentenentwurfs für das Bodenschutzgesetz

- Begrenzte Teilnehmerzahl! Anmeldungen laufen! -

Fordern Sie die ausführlichen Programme an!



UMWELTINSTITUT

OFFENBACH GmbH

Nordring 82 B

63067 Offenbach am Main

Telefon: (069) 81 06 79

Telefax: (069) 82 34 93

lässige Spannungen herangezogen, müssen diese unter Berücksichtigung sämtlicher Einflußparameter ermittelt werden.

Bei größeren Querschnitten wird üblicherweise ein Kalottenvortrieb gewählt, dem im Gefrier-tunnelbau im allgemeinen unmittelbar der Stros-senabbau folgt. Da der gesamte Vortrieb im Schutz der zuvor hergestellten Frostschale erfolgt, darf den rechnerischen Nachweisen im allgemeinen ein Vollausbuch zugrunde gelegt werden.

2.4 Auswertung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Die Auswertung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse hat bei numerischen Berechnungen besondere Bedeutung. Zu Beginn der Auswertung ist das gewählte Berechnungssystem mit allen signifikanten Annahmen und Kenngrößen gemäß Abschnitt 1.8 zu dokumentieren. Die Simulation der Bauzustände im Tunnel ist textlich und grafisch zu erläutern.

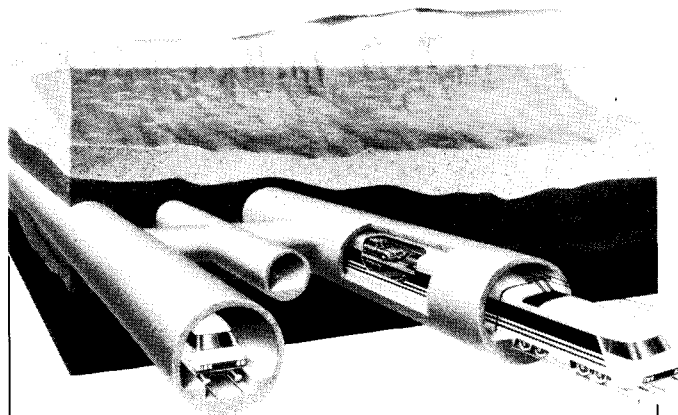
Zur Plausibilitätskontrolle ist es zweckmäßig, zunächst die errechneten Hauptspannungen und Verschiebungsvektoren zu plotten und die Abtragung der Vertikalspannungen im Gebirge mit Hilfe von Spannungstrajektorien zu veranschaulichen. Entlang ausgewählter Schnitte (zum Beispiel Horizontalschnitt durch die Ulmen, Vertikalschnitt durch die Tunnelachse) sollten die Normal- und Schubspannungen aufgetragen werden.

Insbesondere ist zu prüfen, ob

- ⇒ Die Berechnungsergebnisse den ingenieurtechnischen Erfahrungen nicht widersprechen,
- ⇒ Die Verformungen und Spannungen in den Randbereichen auf einen ausreichenden Berechnungsausschnitt schließen lassen und
- ⇒ Bei iterativer Berechnung das Verfahren konvergent ist.

Für Firste, Ulme und Sohle sind die absoluten Verschiebungen anzugeben und darzustellen. Bei Teilausbrüchen sind entsprechend signifikante Punkte auszuwählen. Bei oberflächennahen Tunneln ist an ausgewählten Schnitten zusätzlich die Setzungsmulde an der Geländeoberfläche über dem Tunnel darzustellen.

Ein wesentliches Ziel der Berechnung ist insbesondere bei Tunneln mit geringer bis mäßiger Überlagerung die Ermittlung der Beanspruchung des Tunnelausbaus. Werden zur Diskretisierung des Ausbaus Balken- oder Schalenelemente verwendet, folgen die Schnittgrößen unmittelbar aus der Berechnung. Bei Verwendung von Flächen- oder Volumenelementen für den Ausbau können die Schnittgrößen durch eine Nachlaufrechnung mit herkömmlichen statischen Methoden ermittelt werden. Die Plausibilität der errechneten Schnittgrößen für die Bemessung des Ausbaus ist durch Überschlagsrechnungen zu prüfen. So kann zum Beispiel aus der Normalkraft in den Ulmen die effektiv vom Ausbau abzutragende Vertikalbe-



Der Eurotunnel The Channel Tunnel

Von o. Professor Dr.-Ing. Bernhard Maidl,
Dr.-Ing. Ulrich Maidl
und Dipl.-Ing. Heinz-Bernd Einck.

Zweisprachig deutsch/englisch.
80 Seiten DIN A 4 mit zahlreichen Bildern.
Preis 35 DM. Glückauf Print.

Ein historischer Abriß über Planung und Bau des Tunnels unter dem Ärmelkanal, von den historischen Anfängen bis zur Bauausführung in den 80er und 90er Jahren.

Am 6. Mai 1994 wurde das Jahrhundertbauwerk, das Großbritannien mit dem europäischen Festland erstmals seit der Eiszeit verbindet, von der britischen Königin und dem französischen Staatspräsidenten feierlich eingeweiht.

Die Autoren verfolgen die Entwicklung dieses gigantischen Projekts, von dem schon Cäsar träumte, das aber erst Mitte der 70er Jahre unseres Jahrhunderts Gestalt annahm.

Detailliert beschrieben werden die Auffahrung im Gegenortsbetrieb mit Vortriebsmaschinen, der Ausbau, die Belüftung, die Transport-Systeme, die Anschlüsse an die öffentlichen Bahnnetze und schließlich der schwierigste Teil, die Finanzierung des Projekts Eurotunnel.



Bestellcoupon: Fax-Nr. (0 20 54) 92 41 29
oder einsenden an Verlag Glückauf GmbH
Postfach 18 56 20 · 45206 Essen

Ex. **Der Eurotunnel · The Channel Tunnel**
Preis 35 DM

Name, Anschrift

Unterschrift, Datum

lastung und hieraus die wirksame Überlagerung abgeschätzt werden.

Es wird empfohlen, Plots mit Ausnutzungsgraden der Scherfestigkeitsparameter zu erstellen. Bei Berechnungen mit Grenzbedingungen sind die Zonen, bei denen der Grenzzustand erreicht ist (plastifizierte Zonen), darzustellen. Dabei ist zu prüfen, ob die aus der Berechnung abgeleiteten Bruchvorgänge im Gebirge aus felsbeziehungsweise bodenmechanischer Sicht plausibel sind.

2.5 Rückkopplung zwischen Berechnung und Messung

Die Schwierigkeit einer rechnerischen Prognose im untertägigen Tunnelbau, die Notwendigkeit vortriebsbegleitender Messungen und die generelle Bedeutung der Rückkopplung zwischen Berechnung und Messung im Rahmen der Beobachtungsmethode sind im Abschnitt 2.1 erläutert.

In welchem Umfang Messungen durchgeführt werden beziehungsweise welche Meßverfahren zum Einsatz kommen, hängt vom jeweiligen Bauvorhaben ab. Bei tiefliegenden Tunneln werden in erster Linie Verformungsmessungen im Ausbruchquerschnitt durchgeführt, dazu kommen gegebenenfalls Meßdosen zur Ermittlung von Ankerkräften und Spritzbetonspannungen. Im oberflächennahen beziehungsweise städtischen Tunnelbau kommen als sehr wesentliche Elemente Oberflächennivellements, Extensometerbeziehungsweise Gleitmikrometermessungen und auch Inklinometermessungen hinzu.

Die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der einzelnen Meßergebnisse und damit auch ihre Bedeutung hinsichtlich der Kalibrierung numerischer Berechnungen ist unterschiedlich zu bewerten:

► Messungen im Tunnel

Am wenigsten mit Fehlern behaftet sind Messungen der Relativverschiebungen von Meßpunkten an der Tunnellaubung (Konvergenzmessungen). Mehr Informationen liefern geodätische Verschiebungsmessungen; hiermit können vollständige (zwei- oder dreidimensionale) Verschiebungsvektoren von Meßpunkten ermittelt und dadurch zum Beispiel auch unsymmetrische Bewegungen erkannt werden. Da mit den heutigen Meßverfahren im allgemeinen auch eine für tunnelbautechnische Zwecke ausreichende Genauigkeit erzielt wird, werden sie beim Vortrieb standardmäßig eingesetzt. Außer den Absolutverschiebungen der einzelnen Meßpunkte sollten auch Verschiebungsdifferenzen oder -verhältnisse (zum Beispiel Firste-Ulme, Ulme links-Ulme rechts) ausgewertet werden, da diese wesentliche Erkenntnisse über die Vorgänge im Gebirge liefern können. Am wenigsten zuverlässig sind Spannungsmessungen im Spritzbeton, da die Meßwerte erfahrungsgemäß stark streuen. Für einen Vergleich Messung-Rechnung liefern sie nur grobe Anhaltspunkte.

► Messungen im Gebirge und an der Geländeoberfläche

Oberflächennivellements sind bei Tunneln mit geringer Überlagerung – insbesondere unter bebautem Gebiet – fester Bestandteil des Meßprogramms. Die Zuverlässigkeit ist mindestens so hoch wie die der geodätischen Verschiebungsmessungen unter Tage. Ein Vergleich der berechneten Oberflächensetzungen mit den Meßwerten ist für eine Rückkopplung Messung-Rechnung unerlässlich. Werden die Setzungen eines Meßpunktes über dem Tunnel in Abhängigkeit vom Vortriebsgeschehen von Anfang an systematisch gemessen, liefert dies für die Rückrechnung zusätzliche Informationen. Das gleiche gilt für vor dem Vortrieb über dem Tunnel eingebaute Gleitmikrometerbeziehungsweise Extensometer mit Meßpunkten zwischen Firste und Geländeoberfläche. Generell stellen die Ergebnisse aus Extensometerbeziehungsweise Gleitmikrometermessungen und Inklinometermessungen eine wertvolle Ergänzung bei oberflächennahen Tunneln dar; sie müssen jedoch hinsichtlich der Annahme von Fixpunkten sorgfältig interpretiert werden.

Mit den interpretierten Meßergebnissen können die Rechenmodelle und die Eingangsparameter für die Berechnungen verbessert werden. In Abhängigkeit von den geotechnischen Verhältnissen und der Tiefenlage des Tunnels ist immer nur eine mehr oder weniger gute Annäherung an die Wirklichkeit zu erzielen.

Bei oberflächennahen und städtischen Tunneln wird man bei entsprechender meßtechnischer Ausrüstung bald nach Vortriebsbeginn ein umfassendes Verformungsbild des Baugrundes erhalten. Bei weitgehend ähnlichen Baugrundverhältnissen können so relativ gute Prognosen für geänderte geometrische Verhältnisse (zum Beispiel beim Übergang Streckentunnel-Station) erzielt werden, die wiederum Entscheidungshilfen für zu treffende Maßnahmen sein können.

Bei tiefliegenden Tunneln stehen in der Regel nur Werte aus Verschiebungsmessungen für den Ausbruchquerschnitt zur Verfügung. Zusätzlich können Informationen aus der geologischen Aufnahme vor Ort (zum Beispiel Lage von Trennflächen, Schichtwechsel) in eine Rückrechnung eingebracht werden. Die Berechnungsergebnisse können eine wertvolle Ergänzung bei der Interpretation der Meßergebnisse im Hinblick auf eine Prognose für unmittelbar bevorstehende Bauzustände darstellen. Das Ziel der Rückrechnung ist in diesem Fall weniger eine möglichst genaue zahlenmäßige Übereinstimmung mit den Meßergebnissen, zumal im tiefliegenden Tunnelbau den Verformungen nicht derselbe Stellenwert zukommt wie bei Vortrieben durch bebauten Gebiet. Die Rückrechnung soll vielmehr mit dazu beitragen, meßtechnisch beobachtete Phänomene wie unsymmetrische Verformungen erklären zu helfen.