



**AUSBAU
EISENBAHNACHSE
MÜNCHEN - VERONA**

**POTENZIAMENTO
ASSE FERROVIARIO
MONACO - VERONA**

**BRENNER
BASISTUNNEL**

**GALLERIA DI BASE
DEL BRENNERO**

REGELPLANUNG

PROGETTAZIONE DI SISTEMA

Fachbereich

Grundlagen für die Planung

Thema

Bemessung und konstruktive
Durchbildung der Bauwerke

Dokumentenart

Technischer Bericht

Dokumenteninhalt

Leitfaden für die Modellierung und Festle-
gung der Berechnungsgrundsätze

Settore

Dati di base per la progettazione

Tema



Dimensionamento e configurazione strutturale
delle opere

Tipo Documento

Relazione Tecnica

Contenuto documento

Linee guida per la modellazione e la definizione
dei principi di calcolo

	Bearbeitet / elaborato		Datum / data 31.05.2013		Name / nome E. Saurer																														
	Geprüft / verificato		Datum / data 31.05.2013		Name / nome T. Marcher																														
	Freigegeben / autorizzato		Datum / data 31.05.2013		Name / nome G. Fischnaller																														
			Datum / data 31.05.2013		Datum / data 31.05.2013																														
			Name / nome K. Bergmeister		Name / nome R. Zurlo																														
Masstab / scala 1 : -		Projektkilometer / progressiva di progetto		von / da 2,100		bis / a 56,400		bei / al																											
		Kilometer / progressiva		von / da		bis / a		bei / al																											
Staat Stato		Los Lotto		Einheit Unità		Nummer Numero		Vertrag Contratto		Fachb. Settore		Thema Tema		Dokumentenart Tipo Documento		Nummer Codice		Revision Revisione																	
00		-		Ü01		-		GD		-		001		D0616		-		III		-		08		-		TB		-		3601		-		25	

Bearbeitungsstand

Stato di elaborazione

Revision Revisione	Änderungen / Cambiamenti	Verantwortlicher Änderung Responsabile modifica	Datum Data
25	Abgabeexemplar (keine inhaltlichen Änderungen) / Copia di consegna (nessuna modifica di contenuto)	Saurer	31.05.2013
04	Dokumentennummer angepasst	Saurer	09.01.2013
03	Überarbeitete Version	Saurer / Marcher	27.08.2012
02	Überarbeitete Version	Saurer / Marcher	24.08.2012
01	Überarbeitete Version	Saurer / Marcher	17.08.2012
00	Erstversion / Prima Versione	Saurer / Marcher	20.07.2012

INHALTSVERZEICHNIS INDICE

1. ALLGEMEINES.....	6
1. GENERALITÀ	6
1.1. Zweck und Struktur des Dokuments	6
1.1. Obiettivo e struttura del documento	6
1.2. Anwendungsgrenzen.....	6
1.2. Limiti di applicabilità	6
2. LASTERMITTLUNG AUF BAUWERK (ACTIONS)	8
2. ANALISI DEI CARICHI SULL'OPERA (ACTIONS)	8
2.1. Allgemeine Festlegungen	8
2.1. Definizioni generali	8
2.2. Modellierung	8
2.2. Modellazione	8
2.2.1. Netzteilung / Elementtypen für Gebirge (Kontinuum / Diskontinuum)	8
2.2.1. Rete / Tipi di elementi per ammasso (continuo / discontinuo)	8
2.2.2. Elementtypen für Bauwerk	9
2.2.2. Tipi di elementi per le opere	9
2.2.3. Bruchbedingungen, Stoffgesetze Baugrund	9
2.2.3. Condizioni di rottura, relazione costitutiva del terreno di fondazione	9
2.2.3.1. Kontinuumsansätze / Stoffgesetze	9
2.2.3.1. Principi di continuità / relazioni costitutive	9
2.2.3.2. Diskontinuumsansätze / Stoffgesetze	11
2.2.3.2. Principi di discontinuità / relazioni costitutive	11
2.2.4. Stoffgesetze Bauwerk	12
2.2.4. Relazioni costitutive dell'opera	12
2.2.4.1. Konventioneller Ausbau	12
2.2.4.1. Rivestimento tradizionale	12
2.2.4.2. Tübbingausbau	12
2.2.4.2. Rivestimento in conci	12
2.2.5. Berücksichtigung Primärspannungszustand, Vorentspannung und Verbesserungsmaßnahmen im Gebirge	12
2.2.5. Presa in considerazione dello stato tensionale primario, del rilascio tensionale e delle misure migliorative nell'ammasso	12
2.2.5.1. Primärspannungszustand	12
2.2.5.1. Stato tensionale primario	12
2.2.5.2. Ermittlung Vorentspannung	13
2.2.5.2. Calcolo del rilascio tensionale	13
2.2.5.3. Berücksichtigung von Verbesserungsmaßnahmen des Gebirges	14
2.2.5.3. Presa in considerazione delle misure di miglioramento dell'ammasso	14
2.2.6. Empfohlene Softwarepakete	14

2.2.6.	Pacchetti software consigliati	14
2.3.	Methodik zur Ermittlung der Gebirgslast	15
2.3.	Metodologia di calcolo del carico dell'ammasso	15
2.3.1.	Allgemeines.....	15
2.3.1.	Generalità.....	15
2.3.2.	Ermittlung der Gebirgslasten bei konventionellem Vortrieb und bei Vortrieb mit offener Gripper TBM und konventionellem Ausbau	15
2.3.2.	Calcolo dei carichi dell'ammasso nello scavo tradizionale e nello scavo con TBM aperta con gripper e rivestimento tradizionale	15
2.3.2.1.	Gebirgslast bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten.....	16
2.3.2.1.	Carico dell'ammasso con comportamento spingente.....	16
2.3.2.2.	Abschätzung der Erhöhung der Gebirgslast auf die Innenschale in Kreuzungsbereichen	18
2.3.2.2.	Valutazione dell'aumento del carico dell'ammasso sul rivestimento interno nelle zone di raccordo	18
2.3.2.3.	Gebirgslast bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten	19
2.3.2.3.	Carico dell'ammasso altamente fratturato	19
2.3.3.	Ermittlung der Gebirgslast bei Vortrieb mittels geschlossener TBM mit Tübbingausbau.....	20
2.3.3.	Calcolo del carico dell'ammasso con avanzamento con TBM chiusa e rivestimento in conci	20
2.3.3.1.	Gebirgslast bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten.....	20
2.3.3.1.	Carico dell'ammasso con comportamento spingente.....	20
2.3.3.2.	Gebirgslast bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten	21
2.3.3.2.	Carico dell'ammasso altamente fratturato	21
3.	ERMITTLUNG DER BEANSPRUCHUNGEN DER TUNNELSCHALEN (EFFECTS OF ACTIONS)	22
3.	CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI DEI RIVESTIMENTI DELLA GALLERIA (EFFECTS OF ACTIONS)	22
3.1.	FEM-/FDM-Berechnungsmodelle	22
3.1.	Modelli di calcolo ad elementi finiti (FEM) e differenze finite (FDM)	22
3.2.	Modellierung Ausbaumittel	22
3.2.	Modellazione del mezzo utilizzato per il rivestimento	22
3.3.	Stabwerksmodelle	22
3.3.	Metodo delle reazioni iperstatiche.....	22
3.3.1.	Netzteilung	22
3.3.1.	Divisione della maglia	22
3.3.2.	Elementtypen	23
3.3.2.	Tipi di elementi	23
3.3.3.	Stoffgesetze Bauwerk	23
3.3.3.	Relazioni costitutive dell'opera.....	23
3.3.4.	Modellierung der Bettung	23
3.3.4.	Modellazione del letto di molle.....	23
3.3.4.1.	Radiale Bettung	23
3.3.4.1.	Rigidità radiale	23
3.3.4.2.	Federkonstanten Auflagerbereich/Sohle	24
3.3.4.2.	Costante della molla nelle zone di appoggio / fondo.....	24
3.3.5.	Empfohlene Softwarepakete	24

3.3.5.	Pacchetti software consigliati	24
4.	HILFSMITTEL ZUR ANALYSE DES AUSBAUWIDERSTANDES	26
4.	SUPPORTO ALL'ANALISI DELLA RESISTENZA DEL RIVESTIMENTO ESTERNO	26
4.1.	Kennlinienverfahren	26
4.1.	Metodo delle curve caratteristiche.....	26
4.1.1.	Allgemeines.....	26
4.1.1.	Generalità.....	26
4.1.2.	Gebirgskennlinie	26
4.1.2.	Curve caratteristiche dell'ammasso	26
4.1.3.	Berücksichtigung von Ausbaumaßnahmen	27
4.1.3.	Analisi delle misure di sostegno.....	27
4.1.3.1.	Berücksichtigung der Vorverformung	27
4.1.3.1.	Analisi della deformazione.....	27
4.1.3.2.	Berücksichtigung der Systemankerung	27
4.1.3.2.	Analisi degli ancoraggi sistematici.....	27
4.1.3.3.	Berücksichtigung des Spritzbetons	27
4.1.3.3.	Analisi dello spritzbeton	27
4.1.3.4.	Berücksichtigung von Deformationsschlitzten ohne/mit Stauchelementen.....	28
4.1.3.4.	Analisi delle fessure di deformazione con e senza elementi deformabili	28
4.2.	Grundbruch.....	29
4.2.	Rottura del terreno	29
4.3.	Nachweise zur Stabilität der Ortsbrust.....	29
4.3.	Prove di stabilità del fronte di scavo.....	29
5.	VEREINFACHTE MODELLIERUNG IN KREUZUNGSBEREICHEN (NÄHERUNGSVERFAHREN).....	30
5.	MODELLAZIONE SEMPLIFICATA NELLE AREE DI INCROCIO (APPROCCIO).....	30
5.1.	Vereinfachte Modellbildung	30
5.1.	Modellazione semplificata	30
6.	VERZEICHNISSE.....	31
6.	ELENCHI.....	31
6.2.	Abbildungsverzeichnis.....	31
6.2.	Elenco delle illustrazioni	31
6.3.	Literatur und Quellen	32
6.3.	Bibliografia e fonti	32
6.3.4.	Literatur	32
6.3.4.	Bibliografia.....	32
6.4.	Anhangverzeichnis	34
6.4.	Elenco delle allegati	34

1. ALLGEMEINES

1.1. Zweck und Struktur des Dokuments

Das vorliegende Dokument beinhaltet Empfehlungen, welche der Harmonisierung und Vereinheitlichung der verwendeten Berechnungsverfahren für die geomechanische numerische Modellierung des Brenner-Basistunnels (BBT) innerhalb der nachfolgend definierten Anwendungsgrenzen dient. Im Dokument sind Festlegungen der Berechnungsgrundsätze definiert und es werden Empfehlungen zu den zu verwendenden Softwarepaketen angegeben.

Diese Leitlinie gliedert sich wie folgt:

- In Kap. 2 werden die Modellierung der Interaktion Gebirge-Bauwerk und die Ableitung der Gebirgslast auf das Bauwerk beschrieben (actions). Zudem werden Möglichkeiten der anzusetzenden Stoffgesetze und Rechenansätze aufgezeigt.
- In Kap. 3 wird auf die auf die Innenschale wirkenden Kräfte, die Modellierung und anschließende Berechnung der Schnittgrößen eingegangen (effects of actions).
- In Kap. 4 werden analytische Verfahren zur Ermittlung und Dimensionierung des Ausbauwiderstandes angegeben.
- In Kap. 5 wird auf weitere Details der Modellbildung eingegangen.

Zur Übersicht ist in Anlage 1 ein Ablaufdiagramm für die Ermittlung der Einwirkung „Gebirgslast“ auf die Außen- und Innenschale dargestellt.

Die vorliegenden Angaben beziehen sich in erster Linie auf einen zweischaligen Ausbau mit einer Spritzbetonaußenschale und einer Ortbetoninnenschale, sind aber auch im Falle eines Ausbaus mit Tübbing heranzuziehen. Sofern zusätzlich zu berücksichtigende Besonderheiten in Bezug auf einen Tübbingausbau vorliegen, sind diese am Ende der jeweiligen Abschnitte angefügt.

1.2. Anwendungsgrenzen

Der vorliegende Bericht dient als Leitlinie für die geomechanische numerische Modellierung und zur Festlegung von Berechnungsgrundsätzen für die statischen Berechnungen des BBT. Die im Folgenden beschriebenen Berechnungsverfahren sind sowohl für die Haupttröhre als auch für die Querschläge her-

1. GENERALITÀ

1.1. Obiettivo e struttura del documento

Il presente documento contiene raccomandazioni utili per armonizzare e unificare le procedure di calcolo utilizzate per il modello numerico geomeccanico della Galleria di Base del Brennero (BBT), nei limiti di applicabilità in seguito definiti. Nel documento si definiscono i principi di calcolo e si consigliano i pacchetti di software da utilizzare.

Le linee guida sono strutturate come segue:

- Nel cap. 2 si descrivono il modello di interazione ammasso-opera e il trasferimento del carico dell'ammasso sull'opera (actions). Si presentano inoltre le possibili relazioni costitutive e i principi di calcolo.
- Nel cap. 3 si trattano le forze agenti sul rivestimento definitivo, il modello e il correlato calcolo delle forze di taglio (effects of actions).
- Nel cap. 4 si trattano le procedure analitiche per il calcolo e il dimensionamento della resistenza del rivestimento.
- Nel cap. 5 si trattano ulteriori dettagli della modellazione di calcolo.

Una panoramica è data dal diagramma di flusso riguardante i calcoli dell'effetto "carico dell'ammasso" sul rivestimento esterno e definitivo, che si trova nell'allegato 1.

Le specificazioni si riferiscono principalmente a un rivestimento a due strati con rivestimento esterno in spritzbeton e con un rivestimento interno gettato in opera, ma possono anche essere utilizzate in caso di rivestimenti in conci. Se per i rivestimenti in conci sono da considerare addizionali caratteristiche sono state aggiunte alla fine delle sezioni rispettive.

1.2. Limiti di applicabilità

La presente relazione contiene le linee guida per il modello numerico geomeccanico e determina i principi per i calcoli statici della Galleria di Base del Brennero. Le procedure di calcolo descritte in seguito valgono sia per le canne principali sia per i cunicoli trasversali di collegamento.

anzuziehen.

Die Anwendbarkeit auf Kavernenbauwerke (d.h. Bereiche mit großen Ausbruchquerschnitten) beschränkt sich auf den Fall, dass die Kraftableitung hauptsächlich durch eine Umlagerung in Normalkräfte im Gebirge und Ausbau erfolgt. Kavernen mit sehr großen Radien bzw. flachen Decken oder vertikalen Seitenwänden sind nicht Teil des Gültigkeitsbereiches des vorliegenden Dokuments. Aufgrund der geringen Überlagerung ist dieser Leitfaden nicht auf Portalbereiche anwendbar. Hinweise zu Lastannahmen und Berechnungsverfahren in Portalbereichen können [20] entnommen werden.

Tali principi possono essere utilizzati sui cameroni (vale a dire aree con sezione di scavo più ampie) soltanto nel caso in cui l'introduzione delle forze nell'ammasso roccioso e sul rivestimento avvenga principalmente attraverso una ridistribuzione in sforzi normali. Cameroni con raggi molto ampi, soffitti piatti o pareti laterali verticali non sono oggetto della presente relazione. A causa delle condizioni di bassa copertura le linee guida non possono essere utilizzate per il progetto dei portali alle zone di imbocco. Indicazioni sulle ipotesi di carico e le procedure di calcolo alle zone di imbocco si trovano in [20].

2. LASTERMITTLUNG AUF BAUWERK (ACTIONS)

2.1. Allgemeine Festlegungen

Die Ermittlung der Gebirgsbeanspruchungen und Gebirgslasten hat in der Regel an Hand von zweidimensionalen FEM-/FDM-Berechnungsmodellen zu erfolgen. Besonderes Augenmerk gilt der Berücksichtigung einer realitätsnahen Modellierung der Lastgeschichte sowie einer zeitabhängigen Modellierung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Ausbaumittel im Vortrieb. Dies bedingt auch, dass Bauabläufe und Bauzeiten (inklusive Vortriebsunterbrechungen, wie z.B. Weihnachtsferien) bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Für die Berechnungen sind international anerkannte Rechenprogramme zu verwenden, die vom zuständigen Fachbereich der BBT SE vorab genehmigt werden müssen. Empfohlene Softwarepakete sind in Kap. 2.2.6 & 3.3.5 aufgeführt.

2.2. Modellierung

2.2.1. Netzteilung / Elementtypen für Gebirge (Kontinuum / Diskontinuum)

Die Netzgüte für die Modellierung mittels FEM und FDM soll gewährleisten, dass die nachfolgend aufgelisteten Ziele erreicht werden können:

1. Eine genaue geometrische Abbildung von Gebirge und Bauwerk sowie von deren Interaktion.
2. Die Genauigkeit der numerischen Berechnung wird erreicht. Hierzu sind Sensitivitätsuntersuchungen zur Prüfung der Netzgrößenabhängigkeit durchzuführen, um auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse ausschließen zu können.
3. Realistische Darstellung der Spannungs- und Deformationszustände in jedem Bauzustand.
4. Die Ergebnisse werden durch die Modellgröße und den Randabstand nicht beeinflusst (der Einfluss ist vernachlässigbar gering).
5. Die Seitenverhältnisse der einzelnen Elemente sind innerhalb der zulässigen Bereiche, welche vom Programmhersteller empfohlen werden.

2. ANALISI DEI CARICHI SULL'OPERA (ACTIONS)

2.1. Definizioni generali

Il calcolo delle sollecitazioni e dei carichi sull'ammasso si esegue generalmente con i metodi bidimensionali agli modelli ad elementi finiti e differenze finite. Particolare attenzione va dedicata all'analisi di un modello realistico della storia dei carichi e a un modello temporale delle caratteristiche di resistenza e rigidità del materiale di rivestimento in fase di avanzamento. Ciò consente anche di considerare nella modellazione l'andamento e i tempi di costruzione (comprese interruzioni dei lavori di avanzamento, ad es. per le ferie natalizie).

Per i calcoli si devono utilizzare programmi riconosciuti a livello internazionale, previa autorizzazione del reparto competente della BBT SE. I pacchetti di software consigliati si trovano al cap. 2.2.6 e al cap. 3.3.5.

2.2. Modellazione

2.2.1. Rete / Tipi di elementi per ammasso (continuo / discontinuo)

La qualità della mesh per il modello ad elementi finiti e differenze finite deve garantire il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

1. Precisa rappresentazione geometrica dell'ammasso e dell'opera e dell'interazione fra di esse
2. Raggiungimento della precisione del calcolo numerico. Allo scopo di controllare la relazione dei risultati dalla dimensione della griglia deve essere fatta un'analisi di sensibilità, per poter scartare i risultati incerti
3. Rappresentazione realistica dello stato tenso-deformativo in ogni condizione costruttiva
4. I risultati non vengono influenzati dalla dimensione del modello e dalla distanza dal bordo (l'influenza è trascurabile)
5. Le proporzioni e dimensioni dei singoli elementi si trovano entro le aree consentite, raccomandate dal produttore del programma
6. Le maglie delle aree nelle immediate vicinanze dei punti di applicazione dei carichi

6. Netze in Bereichen in unmittelbarer Nähe zu Angriffspunkten von Einzellasten sind soweit verfeinert, dass die geforderte Genauigkeit der Ergebnisse erreicht wird. Bereiche, in welchen Änderungen der Spannungszustände infolge der Baumaßnahme nur unwahrscheinlich sind, können entsprechend gröber vernetzt werden.

sono tanto fitte da raggiungere la precisione richiesta dei risultati. Aree in cui è improbabile che lo stato tensionale venga modificato dai lavori di costruzione possono avere maglie più larghe.

2.2.2. Elementtypen für Bauwerk

Es gelten die gleichen Ziele wie unter Kap. 2.2.1 aufgelistet.

Für die Modellierung von Bauwerksteilen (Spritzbeton, Anker, Stauchelemente bzw. Tübbingring) sind Elemente zu verwenden, welche das Materialverhalten und die Interaktion mit dem Gebirge realistisch modellieren können und welche zudem die Möglichkeit bieten, die erforderlichen Ergebnisse (Schnittgrößen und Spannungen) mit der ausreichenden Genauigkeit auszugeben.

In Abhängigkeit der Erfordernisse sind Stabelemente oder Kontinuums-elemente, welche die Anforderungen erfüllen, zulässig.

2.2.2. Tipi di elementi per le opere

Sono validi gli stessi obiettivi di cui al cap. 2.2.1.

Per la modellazione di elementi strutturali (spritzbeton, ancoraggi, elementi di compressione) sono da utilizzare elementi in grado di modellare il comportamento realistico del materiale e l'interazione con l'ammasso roccioso. Inoltre questi devono dare la possibilità di rappresentare i risultati necessari (azioni e tensioni) con sufficiente precisione.

In base alle esigenze sono ammessi elementi trave o elementi continui, che soddisfano le richieste.

2.2.3. Bruchbedingungen, Stoffgesetze Baugrund

2.2.3. Condizioni di rottura, relazione costitutiva del terreno di fondazione

2.2.3.1. Kontinuumsansätze / Stoffgesetze

2.2.3.1. Principi di continuità / relazioni costitutive

Eine Übersicht der empfohlenen Stoffgesetze ist in nachfolgender Abbildung dargestellt:

Il seguente grafico mostra una panoramica delle relazioni costitutive raccomandate:

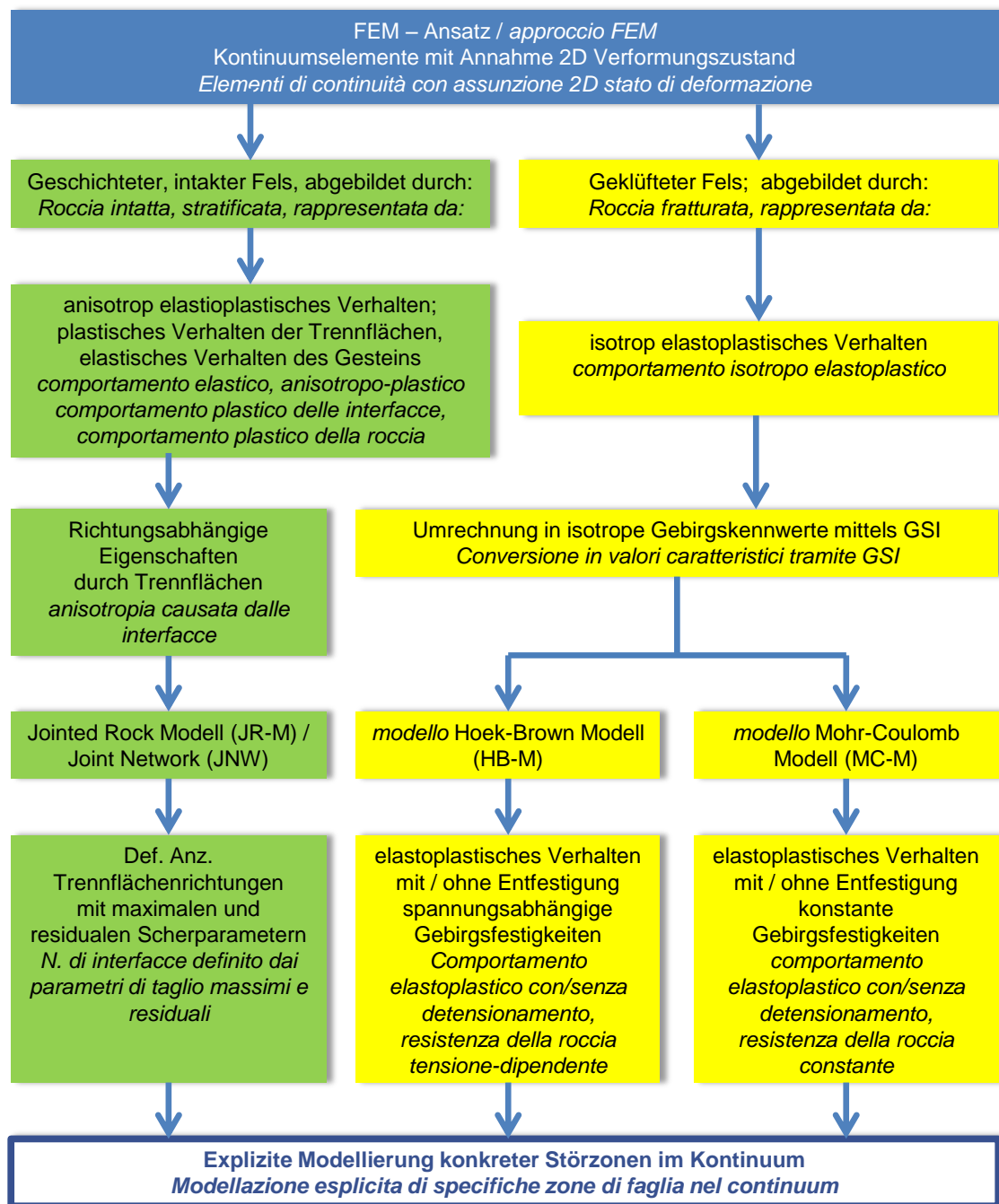


Abbildung 1: Empfohlene FEM-Ansätze und Stoffgesetze bei Kontinuumsmodellierungen. Gelb: verschmiertes Gebirgsverhalten; grün: Gebirgsverhalten unter Berücksichtigung der Trennflächenanisotropie

Illustrazione 1: Principi FEM e relazioni costitutive consigliati nella modellazione di continuità. Giallo: comportamento spalmato dell'ammasso roccioso; verde: comportamento dell'ammasso in considerazione dell'anisotropia delle superfici di discontinuità

Für Sonderbereiche werden zudem folgende Stoffgesetze bzw. Modellierungsansätze empfohlen (vgl. Abbildung 2):

- für schwere Schicht (vgl. Kap. 2.2.5.1): elas-

Per aree particolari si consigliano inoltre le seguenti relazioni costitutive ovvero i seguenti principi di modellazione (cfr. Illustrazione 2):

- Per strato pesante (cfr. cap. 2.2.5.1) compor-

tisches Materialverhalten

- Klüfte: elastisches Gesteinsverhalten, anisotrop elastoplastisches Materialverhalten in Kluftrichtung (vgl. gelbe Linien in Abbildung 2)
- Störzonen: elastoplastische Kontinuumsmodellierung (blauer Balken in Abbildung 2)
- Diskrete Störung (kartiert, rot): Scherzonenmodellierung mit elastoplastischem Materialverhalten (joints / Interfaces, rote Linien)

tamento elastico del materiale

- Fratture: comportamento elastico dell'ammasso, comportamento anisotropo elastoplastico del materiale in direzione della frattura (cfr. linea gialla nella Illustrazione 2)
- Faglie: modellazione continua elastoplastica (colonna blu nella Illustrazione 2)
- Faglia discreta (mappata, rossa): modellazione della zona di taglio con comportamento elastoplastico del materiale (joints / interfaces, linee rosse)

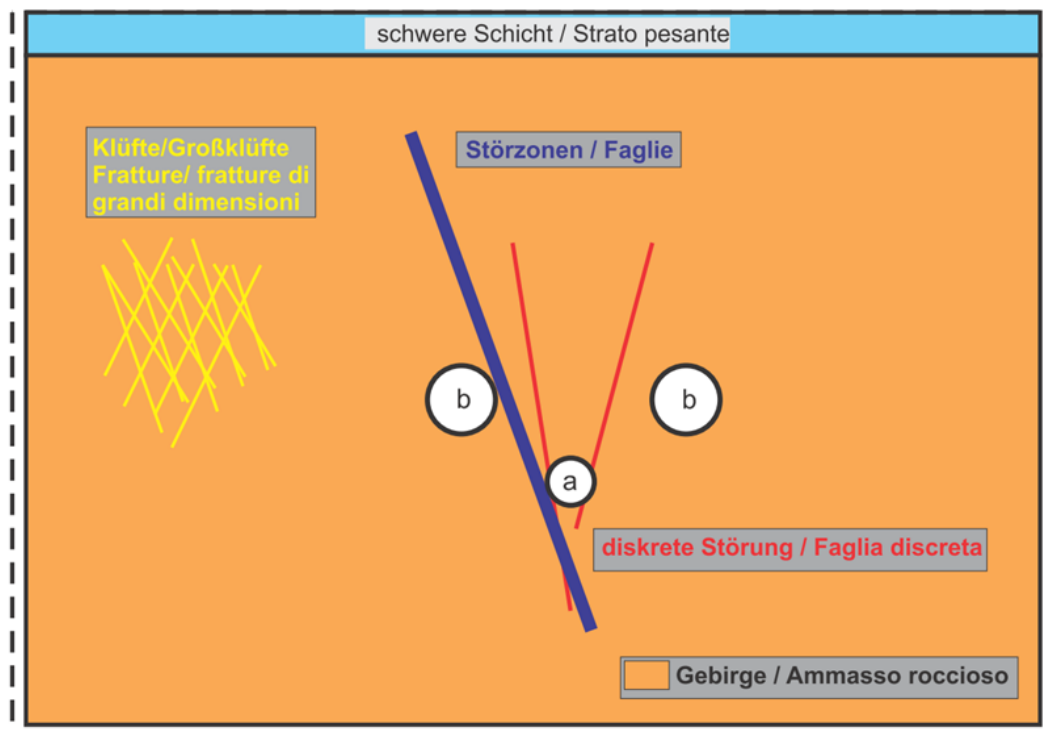


Abbildung 2: Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Störungen, Klüften und Scherzonen (a – Erkundungsstollen; b – Haupttunnel)

Illustrazione 2: Possibilità di analisi di faglie, fratture e zone di taglio (a – cunicolo di drenaggio; b – galleria principale)

Bei der gemeinsamen Berücksichtigung von Gebirge (vgl. Abbildung 2, orange) und Klüften/Großklüften (gelb) unter Berücksichtigung des resultierenden GSI erfolgt somit die Modellierung gemäß dem in Abbildung 1 dargestellten gelben Pfad, bei getrennter Modellierung dieser Elemente erfolgt die Modellierung gemäß dem grünen Pfad in Abbildung 1.

Die anzusetzenden Rechenparameter sind mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE abzustimmen

2.2.3.2. Diskontinuumsansätze / Stoffgesetze

In stark geklüftetem Fels wird der Ansatz eines Diskontinuumsmodells zur Berücksichtigung der Diskon-

Quando si analizzano insieme ammasso (cfr. Illustrazione 2, arancione) e fratture/fratture di grandi dimensioni (giallo), in considerazione del GSI risultante, la modellazione segue i blocchi gialli nella Illustrazione 1. In caso di modellazione separata degli elementi segue invece i blocchi verdi della Illustrazione 1.

I parametri di calcolo da impiegare devono essere concertati con il reparto competente di BBT SE.

2.2.3.2. Principi di discontinuità / relazioni costitutive

In caso di roccia fortemente fratturata si consiglia un principio di modellazione discontinua per tenere con-

tinuitäten empfohlen:

- UDEC: ubiquitous joint model

Die anzusetzenden Rechenparameter sind mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE abzustimmen.

2.2.4. Stoffgesetze Bauwerk

Die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des Ausbaus sind den einzelnen Bauzuständen und Bauphasen anzupassen und entsprechend differenziert zu modellieren.

2.2.4.1. Konventioneller Ausbau

Wenn keine Vorgaben seitens BBT SE vorliegen, wird für die Modellierung des Spritzbetons empfohlen, den zu Beginn weichen Spritzbeton mit einem ideellen Elastizitätsmodul von 5 GPa zu berücksichtigen. Mit zunehmender Aushärtung wird der Elastizitätsmodul des Materials auf 15 GPa erhöht. Dies entspricht ca. 50% der Steifigkeit eines ausgehärteten Betons üblicher Güte. Damit wird dem ausgeprägten Kriechverhalten und dem Schwinden des Spritzbetons Rechnung getragen (vgl. [11]). Eine weitere Erhöhung der Spritzbetonsteifigkeit erfolgt nicht.

Zur Ermittlung der langfristig auf die Innenschale wirkenden Gebirgslasten ist der Ausfall der Spritzbeton-Außenschale zu simulieren. Es wird empfohlen, den Elementen in diesem Bereich die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Gebirges zuzuweisen. Im Modell berücksichtigte temporäre Anker für den Bauzustand werden für den langfristigen Lastfall ebenfalls vernachlässigt.

2.2.4.2. Tübbingausbau

Beim Ausbau mit Tübbing sind die Effekte infolge Koppelung in Ring- und Längsfugen zu berücksichtigen. Hinweise zu den anzusetzenden Modellen sind im Dokument D0616-3604 "Bemessungskonzept Tübbingring" angegeben.

2.2.5. Berücksichtigung Primärspannungszustand, Vorentspannung und Verbesserungsmaßnahmen im Gebirge

2.2.5.1. Primärspannungszustand

Die Überlagerungsspannungen sowie die anzusetzenden Seitendruckbeiwerte für die Berechnung des Primärspannungszustandes des Gebirges sind dem geologisch/geotechnischen Modell der BBT SE zu entnehmen und dem gewählten numerischen Modell

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

to delle discontinuità:

- UDEC: ubiquitous joint model

I parametri di calcolo da impiegare devono essere concertati con il reparto competente di BBT SE.

2.2.4. Relazioni costitutive dell'opera

Le caratteristiche di rigidezza e resistenza del rivestimento devono essere adattate a ogni condizione e fase costruttiva, con modelli differenziati in base alle condizioni.

2.2.4.1. Rivestimento tradizionale

In assenza d'indicazioni da parte di BBT, per la modellazione numerica dello spritzbeton si assumerà inizialmente un modulo elastico pari a 5 GPa, quando lo spritzbeton è ancora in fase di maturazione. Con l'aumento della durezza il modulo elastico del materiale sarà aumentato a 15 GPa, che corrisponde a circa il 50% della rigidezza di un calcestruzzo indurito con caratteristiche medie. In questo modo è possibile considerare il caratteristico comportamento di deformazione viscosa e il ritiro (cfr. [11]). La rigidezza del calcestruzzo non viene aumentata ulteriormente.

Per l'analisi dei carichi dell'ammasso con effetto a lungo termine sul rivestimento definitivo si deve simulare il collasso del rivestimento esterno in spritzbeton. Si consiglia di assegnare agli elementi della presente relazione le caratteristiche di resistenza e rigidezza dell'ammasso. Anche gli ancoraggi provvisori di cui il modello tiene conto possono essere omessi nel caso di carico a lungo termine.

2.2.4.2. Rivestimento in conci

In caso di rivestimento in conci gli effetti della connessione tra i giunti radiali e i giunti longitudinali dei conci. Indicazioni per i modelli da utilizzare sono specificate nel documento D0616-3604 "Standard per il dimensionamento strutturale dei rivestimenti in conci".

2.2.5. Presa in considerazione dello stato tensionale primario, del rilascio tensionale e delle misure migliorative nell'ammasso

2.2.5.1. Stato tensionale primario

Le tensioni primarie e i coefficienti della pressione laterale per il calcolo dello stato tensionale primario dell'ammasso devono essere presi dal modello geologico/geotecnico di BBT SE e fungono da base per il

zugrunde zu legen.

Zur Modellierung hoher Überlagerungsspannungen wird empfohlen, die gesamte Überlagerung durch die Modellierung eines Netzausschnitts mit begrenzter Überlagerung und einer darüber liegenden Schicht mit entsprechender Wichte abzubilden. Alternativ kann der Primärspannungszustand dem Modell durch numerische Eingabe eingeprägt werden. (Die Güteanforderung an das Modell ist gemäß Kap. 2.2.1 einzuhalten.)

Bei entsprechend gegebener Lithologie wird empfohlen, die Verformungen an den Rändern des numerischen Modells infolge der Modellierung des Baufortschritts zu begrenzen. Dies kann beispielsweise durch die Berücksichtigung eines steifen Rahmens erfolgen, welcher gemäß Abbildung 3 die Verformungsrandbedingungen vorgibt.

Die Hinweise zur Modellgröße in Abbildung 3 und zur Netzgüte gemäß Kap. 2.2.1 sind zu berücksichtigen.

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

modello numerico scelto.

Per la modellazione delle tensioni primarie si consiglia di utilizzare come rappresentazione dell'intera sovrapposizione un tratto di maglia con copertura limitata e uno strato aggiuntivo con il peso specifico adeguato. In alternativa, lo stato tensionale primario può essere predefinito nel modello tramite indicazioni numeriche. (Le esigenze di qualità del modello sono da rispettare ai sensi di cap. 2.2.1).

Se la litologia lo consente, si consiglia di limitare le deformazioni ai margini del modello numerico a seguito della modellazione dell'avanzamento dei lavori. Si può ad esempio considerare un contorno rigido che presenti una deformazione ai margini come nella Illustrazione 3.

Si deve tenere conto delle indicazioni sulle dimensioni del modello alla Illustrazione 3 e della qualità della griglia di cui al cap. 2.2.1.

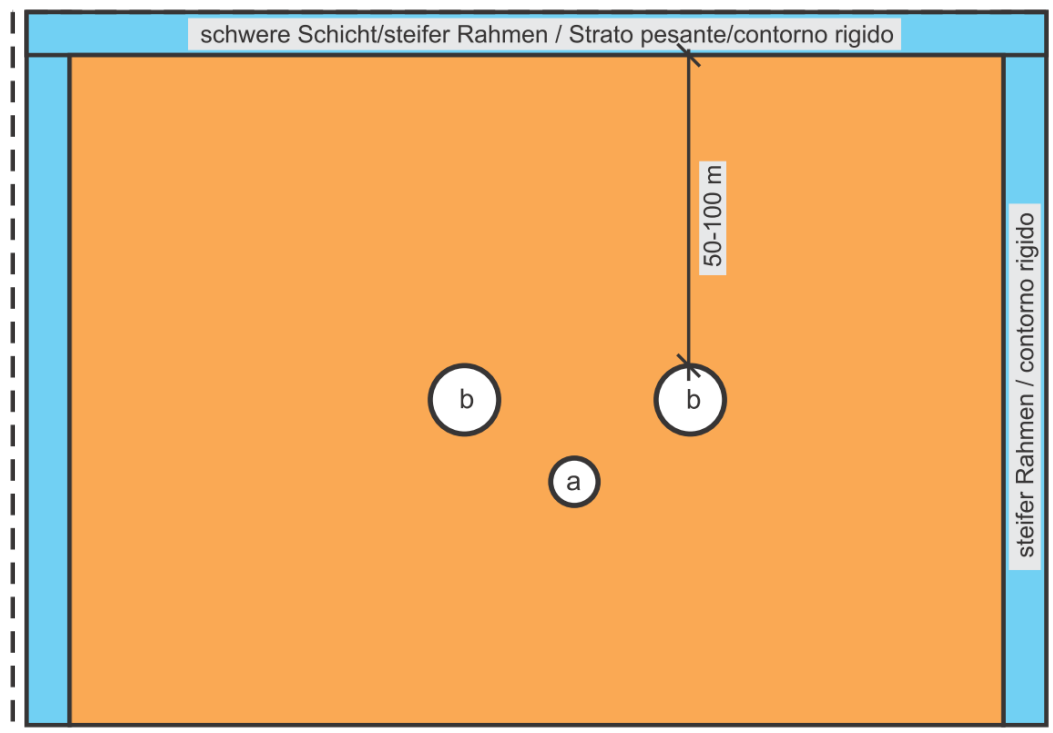


Abbildung 3: Modellbildung mit schwerer Schicht und steifem Rahmen (a – Erkundungsstollen; b – Haupttunnel)

Illustrazione 3: Modellazione con strato pesante e margini rigidi (a – cunicolo di drenaggio; b – galleria principale)

2.2.5.2. Ermittlung Vorentspannung

Die Vorentspannung/Vorentlastung bis zum Einbau der Spritzbetonschale und Messpunkte ist unter Berücksichtigung des Gebirgsverhaltens, der Baumethode und der Bauabfolge zu ermitteln.

2.2.5.2. Calcolo del rilascio tensionale

Il rilascio tensionale, fino alla messa in opera del rivestimento in spritzbeton e dei punti di misurazione, deve essere calcolato tenendo conto del comportamento dell'ammasso, del metodo costruttivo e della

Wenn keine Vorgaben seitens BBT SE vorliegen, wird empfohlen, die Vorentspannung durch iterative Rückrechnung (nach Vlachopoulos [27]) zu ermitteln. Eigene Festlegungen sind vom zuständigen Fachbereich der BBT SE vorab zu genehmigen.

Für eine analytische Abschätzung der Vorentspannung werden die Ansätze von Kavvadas [14], Panet [17] oder Kielbassa & Duddeck [15] empfohlen. Diese Ansätze können mit erfahrungsbasierten Überlegungen oder ingenieurtechnischen Einschätzungen (beispielsweise zum plastischen Verhalten innerhalb der Vorverformung) ergänzt werden.

Bei der Festlegung des Vorentspannungsfaktors in Tunnelbereichen, welche in druckhaften Abschnitten liegen, ist der Einfluss der plastischen Vorverformung zu berücksichtigen (Erfahrungswerte).

Beim Ausbau mit Tübbingen ist die Vorentspannung unter Berücksichtigung der Effekte infolge Überschneidmaß, Geometrie des Schildes und des Ringspaltes sowie des Zeitpunkts des Einbaus sowie der Eigenschaften des Hinterfüllmaterials zu bestimmen. Die Festlegungen sind mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE abzustimmen.

Weitere Hinweise zur Bestimmung des Vorentlastungsfaktors beim Tübbingausbau sind in Gruebl [6] angegeben.

2.2.5.3. Berücksichtigung von Verbesserungsmaßnahmen des Gebirges

Es wird empfohlen, Maßnahmen zur Verbesserung der Festigkeit und Steifigkeit des Gebirges zu berücksichtigen. Die Größe und Art der Berücksichtigung ist mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE abzustimmen.

2.2.6. Empfohlene Softwarepakete

In Abhängigkeit der Komplexität des anstehenden Gebirges sind für die Berechnung von Ausbruch und Sicherung des Hohlraumes entsprechend angepasste Methoden anzusetzen. Folgende numerische Softwarepakete (in alphabetischer Reihenfolge) werden für die Berechnung von Ausbruch und Sicherung empfohlen:

2D - Modelle

- Kontinuum: FLAC (Itasca)
Midas GTS (Midas IT)
PHASE² (Rockscience)
PLAXIS (Plaxis)
Sofistik (Sofistik)
ZSOIL (Zace)
- Diskontinuum: UDEC (Itasca)

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

successione costruttiva.

In assenza di istruzioni di BBT SE, si consiglia di calcolare il rilascio tensionale secondo un calcolo iterativo (secondo Vlachopoulos [27]). Le decisioni devono essere concertate con il reparto competente di BBT SE.

Per la valutazione analitica del rilascio tensionale si consigliano i principi di Kavvadas [14], Panet [17] o Kielbassa & Duddeck [15]. Tali principi possono essere completati tenendo conto dell'esperienza o delle valutazioni tecniche (per es. riguardo al comportamento plastico nell'ambito della deformazione).

Nella definizione del fattore di rilascio tensionale in tratti di galleria che si trovano in zone con copertura spingente si deve tenere conto dell'influenza delle deformazioni plastiche (dati derivanti dall'esperienza).

In caso di rivestimento in conci il rilascio tensionale deve essere determinato tenendo conto degli effetti dovuti allo sovrataglio, alla geometria dello scudo e dello spazio anulare e alla data dell'installazione e le proprietà del materiale di riempimento. Le decisioni devono essere concertate con il reparto competente di BBT SE.

Ulteriori indicazioni sulla determinazione del fattore del rilascio tensionale per rivestimenti in conci sono specificati in Gruebl [6].

2.2.5.3. Presa in considerazione delle misure di miglioramento dell'ammasso

Si consiglia di considerare misure per il miglioramento della resistenza e della rigidità dell'ammasso. Dimensioni e tipo delle misure saranno concertate con BBT SE.

2.2.6. Pacchetti software consigliati

Per il calcolo dello scavo di avanzamento e delle misure di consolidamento della cavità si utilizzano diversi metodi, scelti in base alla complessità dell'ammasso roccioso interessato. Allo scopo si consigliano i seguenti pacchetti di software numerici (in ordine alfabetico):

Modelli 2-D

- Continuo: FLAC (Itasca),
Midas GTS (Midas IT),
PHASE² (Rockscience),
PLAXIS (Plaxis),
Sofistik (Sofistik),
ZSOIL (Zace),
- Discontinuo: UDEC (Itasca)

Hinweise zu den empfohlenen Stoffgesetzen sind in Kap. 2.2.3 angegeben.

3D – Modelle

In besonderen geologischen Situationen oder bei komplexen Bauwerken kann es erforderlich werden, 3-dimensionale FEM-/FDM-Berechnungsmodelle anzuwenden.

Folgende Softwarepakete werden für dreidimensionale numerische Modellierung empfohlen:

- FLAC
- Midas GTS
- PLAXIS
- ZSOIL

Zur Berechnung von maßgebenden Blöcken aufgrund der Orientierung und Festigkeiten der Trennflächen wird für die Blockanalyse folgende Software empfohlen:

- Unwedge (Rocscience)

2.3. Methodik zur Ermittlung der Gebirgslast

2.3.1. Allgemeines

Die Ermittlung der Gebirgslast sowie die Ermittlung der Lastableitung von der Außen- auf die Innenschale erfolgt in Abhängigkeit des Gebirgsverhaltens:

- Bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten werden die Gebirgslasten durch die numerische Modellierung der Interaktion zwischen Gebirge und Ausbau ermittelt.
- Bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten ermitteln sich die Gebirgslasten in erster Linie aus Blockanalysen.

Sofern seitens BBT SE keine konkreten Vorgaben vorliegen, wird empfohlen, zur Einschätzung des Gebirgsverhaltens und zur Differenzierung zwischen den beiden Gebirgsverhalten eine Einschätzung der Druckhaftigkeit nach Hoek (2000) [8] und das Kennlinienverfahren (vgl. Kap. 4.1) anzuwenden. Das Ergebnis und die resultierenden Konsequenzen sind mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE abzustimmen.

2.3.2. Ermittlung der Gebirgslasten bei konventionellem Vortrieb und bei Vortrieb mit offener

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

Al cap. 2.2.3 si trovano le istruzioni per le relazioni costitutive consigliate.

Modelli 3D

In particolari condizioni geologiche, o in caso di opere complesse, può rendersi necessario l'impiego di modelli di calcolo tridimensionali ad elementi finiti (FEM) o a differenze finite (FDM).

Per la modellazione numerica tridimensionale si consigliano i seguenti software:

- FLAC
- Midas GTS
- PLAXIS
- ZSOIL

Per il calcolo di blocchi importanti, basato sull'orientamento e la resistenza delle superfici di discontinuità, si consiglia il seguente software per l'analisi dei blocchi:

- Unwedge (Rockscience)

2.3. Metodologia di calcolo del carico dell'ammasso

2.3.1. Generalità

Il calcolo del carico dell'ammasso e il calcolo del trasferimento del carico dal rivestimento esterno al rivestimento definitivo dipendono dal comportamento dell'ammasso:

- In caso di comportamenti dell'ammasso di tipo spingente, i carichi si calcolano tramite modellazione numerica dell'interazione fra ammasso e rivestimento
- In caso di ammasso altamente fratturato, i carichi si calcolano in primo luogo mediante l'analisi dei blocchi

In assenza di istruzioni da parte di BBT SE si consiglia di utilizzare, per la valutazione del comportamento dell'ammasso e per la differenziazione tra i due comportamenti, la valutazione del comportamento spingente della roccia secondo Hoek (2000) [8] e il metodo delle curve caratteristiche (cfr. cap. 4.1). Gli esiti e le risultanti conseguenze devono essere concertate con il reparto competente di BBT SE.

2.3.2. Calcolo dei carichi dell'ammasso nello scavo tradizionale e nello scavo con TBM aperta con

Gripper TBM und konventionellem Ausbau

2.3.2.1. Gebirgslast bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten

Bei diesem Gebirgsverhalten wird empfohlen, die Ermittlung der Gebirgslasten auf Außen- und Innenschale direkt in einem numerischen FEM/FDM Modell durchzuführen. Dabei werden sowohl die Außenschale als auch die Innenschale in das numerische Modell integriert.

Zur Ermittlung der charakteristischen Schnittgrößen der Außenschale werden sämtliche Bauphasen unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Eigenschaften des Ausbaus modelliert. Für die Modellierung der Außenschale ist ein Element zu verwenden, welches in jedem Bauzustand die direkte Ausgabe der Schnittgrößen des Ausbaus zur Weiterverwendung für die Bemessung erlaubt.

Die Ermittlung der Lasten auf die Innenschale erfolgt durch die Modellierung der Innenschale und dem nachfolgend modellierten Ausfall der Außenschale sowie dem Ausfall der Anker. Besonderes Augenmerk gilt in diesem Berechnungsschritt einer möglichst realitätsnahen Modellierung der Kontaktfläche zwischen Außen- und Innenschale. Insbesondere Steifigkeitseigenschaften der Trennschichten in der Kontaktfläche sind hinsichtlich des verformungsabhängigen radialen Bettungsverhaltens zu berücksichtigen (beispielsweise durch bi- oder trilineare Federansätze).

Die nach diesem Modellierungsschritt auf die Innenschale wirkenden charakteristischen Einwirkungen werden für die nachfolgende Ermittlung der Schnittgrößen der Innenschale herangezogen.

Da es in den meisten FEM-Programmen nicht möglich ist, alle Einwirkungen und somit alle Einwirkungskombinationen zu berücksichtigen, wird empfohlen, die Ermittlung der Schnittgrößen in der Innenschale mittels gebetteten Stabmodellen (vgl. Kap. 3.3) durchzuführen.

Bei den numerisch ermittelten Normalspannungen (beispielsweise effektive Radialspannungen am Interface zwischen Außen- und Innenschale) auf die Innenschale handelt es sich um die Superposition von aktiver Gebirgslast und passiver Bettungsreaktion des Gebirges. Daher ist es erforderlich, aus dieser Superposition das für die im Stabmodell als effektive Gebirgslast anzusetzende Spannungsbild abzuleiten.

Es wird empfohlen, für die Gebirgslast im Firstbereich den gesamten Anteil der aus dem numerischen Modell herangezogenen vertikalen Normalspannung p_v anzusetzen. In horizontale Richtung kann als erste Näherung der Wert $p_h = p_v \times K_0$ angesetzt werden (vgl. Abbildung 4).

Zur Prüfung der Richtigkeit der angesetzten effekti-

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

gripper e rivestimento tradizionale

2.3.2.1. Carico dell'ammasso con comportamento spingente

Con questo comportamento dell'ammasso si consiglia di calcolare il carico dell'ammasso sul rivestimento esterno e definitivo direttamente in un modello numerico FEM o delle differenze finite (FDM). Nel modello numerico vengono integrati sia il rivestimento definitivo che esterno.

Per il calcolo delle forze di taglio caratteristiche del rivestimento esterno, tutte le fasi costruttive vengono modellate in considerazione delle caratteristiche temporali del rivestimento. Per la modellazione del rivestimento esterno deve essere utilizzato un elemento che consenta che in ogni fase costruttiva le forze di taglio del rivestimento vengano direttamente distribuite, per essere poi utilizzate per il dimensionamento.

I carichi sul rivestimento definitivo si calcolano mediante modellazione del rivestimento interno e del successivo collasso del rivestimento esterno e del cedimento degli ancoraggi. In questa fase del calcolo bisogna dedicare particolare attenzione a ottenere una modellazione quanto più possibile realistica della superficie di contatto tra rivestimento esterno e definitivo. In particolare, si deve tenere conto delle caratteristiche di rigidità delle membrane di separazione sulla superficie di contatto in relazione al comportamento radiale del letto di molle dovuto alle deformazioni (per es. dovuto a principi delle molle bilineari o trilineari).

I carichi che secondo questa fase della modellazione agiscono caratteristicamente sul rivestimento definitivo vengono utilizzati per il successivo calcolo delle forze di taglio del rivestimento definitivo.

Poiché la maggior parte dei programmi FEM non consente di analizzare tutti i carichi, e quindi tutte le combinazioni di carico, si consiglia di eseguire il calcolo delle azioni sul rivestimento definitivo tramite elementi su molle (cfr. cap. 3.3).

Le tensioni normali ottenute con calcolo numerico (ad es. tensione radiale effettiva sull'interfaccia tra rivestimento esterno ed definitivo) sul rivestimento definitivo rappresentano la superposizione del carico attivo dell'ammasso e la reazione dell'ammasso. Perciò è necessario dedurre dalla superposizione il quadro di tensione da applicare come carico effettivo dell'ammasso sugli elementi.

Per il carico dell'ammasso nell'area della calotta si consiglia di impiegare l'intera frazione della tensione assiale verticale p_v dedotta dal modello numerico. In direzione orizzontale si può utilizzare come primo approccio il valore $p_h = p_v \times K_0$ (cfr. Illustrazione 4).

Per verificare la correttezza del carico effettivo

ven Gebirgslast wird empfohlen, die im Stabmodell resultierende Superposition von Einwirkungen infolge aktiver Gebirgslast und der passiven Bettungsreaktion wiederum mit den aus dem zweidimensionalen Modell extrahierten numerischen Normalspannungen zu vergleichen.

Eine schematische Darstellung der Ansätze ist nachfolgend dargestellt:

dell'ammasso applicato, si consiglia di confrontare la superposizione di carichi nel modello statico causati dal carico attivo dell'ammasso e dalla reazione del terreno con le tensioni assiali numeriche estratte dal modello bidimensionale.

Segue una rappresentazione schematica dei principi:

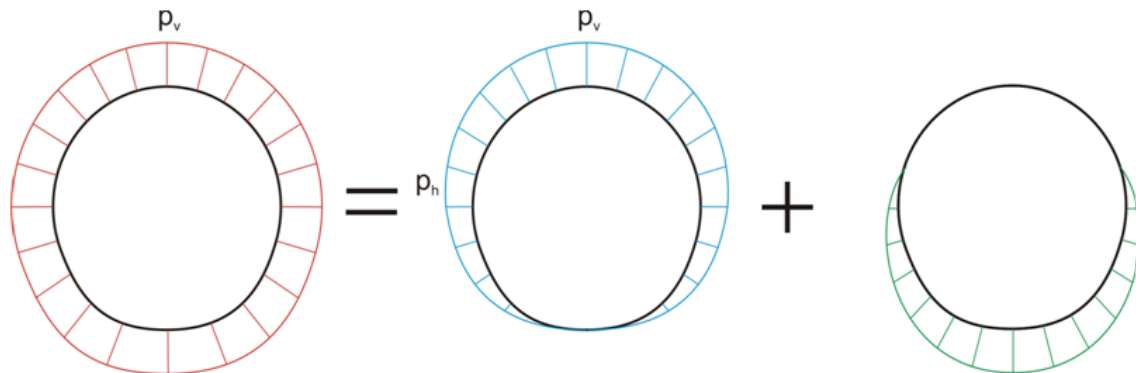


Abbildung 4: Qualitative Darstellung der numerisch ermittelten Normalspannungen (rot), der aktiven Gebirgslast (blau) und der passiven Bettungsreaktion (grün)

Illustrazione 4: Rappresentazione qualitativa delle tensioni normali (rosso), ottenute dal calcolo numerico, del carico attivo dell'ammasso (blu) e della reazione assestamento del terreno (verde)

Nachfolgend sind typische aktive Gebirgslastverteilungen auf die Innenschalen beschrieben.

Die Einwirkung aus dem spannungsdominierten Gebirge kann in der Regel aufgrund der Auflockerung des Gebirges als symmetrische Last angesetzt werden. Asymmetrien aus spezifischen Verhältnissen sind zu adaptieren. Unter Voraussetzung symmetrischer Lasten werden diese als radial am Querschnitt wirkend angesetzt. Ihre Verteilung auf die Innenschale variiert in Abhängigkeit vom Seitendruckbeiwert K_0 im Bereich der Ulme und nimmt zum Sohl tiefsten (Sohlgewölbe) linear auf null ab. Folgende Gebirgslastverteilung ist zu berücksichtigen:

Di seguito si descrivono le tipiche applicazioni del carico dell'ammasso sul rivestimento interno.

Il carico, nel caso di massiccio roccioso con problematiche di carattere tensionale, può essere distribuito come un carico simmetrico a causa dell'allentamento della roccia. Asimmetrie da comportamenti locali dovranno essere adattate. In condizioni di carico simmetrico la distribuzione delle pressioni sull'anello interno è ortogonale alla superficie. In funzione del coefficiente di spinta laterale, la distribuzione è variabile e diminuisce in modo lineare dall'alto verso il basso fino ad annullarsi al di sotto dell'arco rovescio. Il carico tensionale viene applicato secondo lo schema seguente:

Regelquerschnitt Haupttunnel NÖT
Sezione tipo galleria principale NÖT

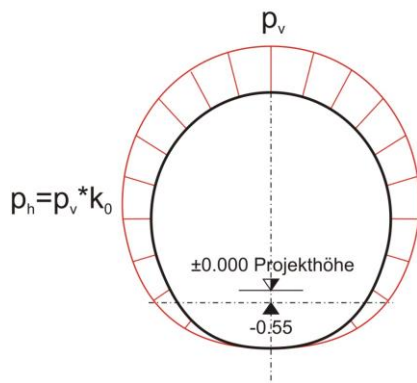


Abbildung 5: Qualitative Darstellung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Innenschale mit Sohlgewölbe bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten

Bei Querschnitten mit Sohlplatte/offener Sohle wird analog ein radialer Restdruck p_{hF} auf Widerlagerhöhe in Abhängigkeit von der Gewölbegeometrie (Öffnungswinkel α der Tangente im Fußpunkt zur Vertikalen) angesetzt. Bei Schichtwechseln im Bereich des Tunnelquerschnittes sind die Lastbilder anzupassen.

Regelquerschnitt Haupttunnel TBM
Sezione tipo galleria principale TBM

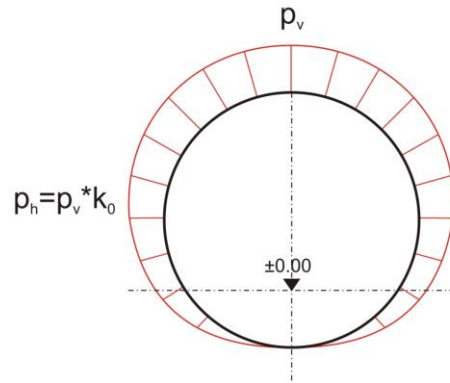


Illustrazione 5: Rappresentazione qualitativa dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento definitivo con arco rovescio in presenza di comportamento spingente

Per sezioni con platea di fondo o senza arco rovescio viene considerata una pressione residua p_{hF} sulla muretta dipendente dalla geometria (angolo di apertura α della tangente nella piede della verticale). Tali carichi devono essere modificati nelle zone dove le condizioni geologiche riscontrate per la sezione di galleria sono diverse.

Regelquerschnitt Querschlag Typ 2 mit Sohlgewölbe
Sezione tipo cunicolo trasversale tipo 2 con arco rovescio

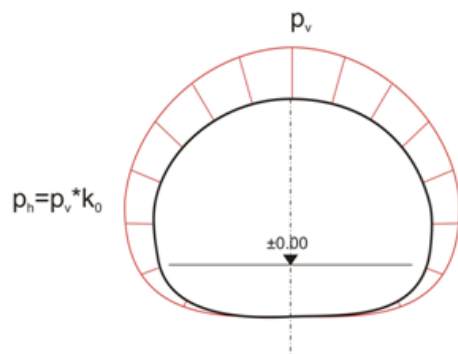


Abbildung 6: Qualitative Darstellung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Innenschale bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten

Regelquerschnitt Querschlag Typ 2 mit offener Sohle
Sezione tipo cunicolo trasversale tipo 2 senza arccevescio

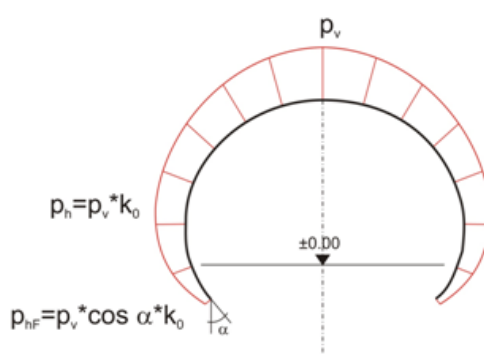


Illustrazione 6: Rappresentazione qualitativa dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento definitivo senza arco rovescio in presenza di comportamento spingente dell'ammasso

2.3.2.2. Abschätzung der Erhöhung der Gebirgs- last auf die Innenschale in Kreuzungsbereichen

In Kreuzungsbereichen (z.B. Haupttröhre – Quer-

2.3.2.2. Valutazione dell'aumento del carico dell'ammasso sul rivestimento interno nelle zone di raccordo

Il carico per il dimensionamento della zona di raccor-

schlag) sind die Einwirkungen aus dem Gebirge für die Dimensionierung des Kreuzungsbereiches, aufgrund der vergrößerten Lastangriffsfläche, zu erhöhen. Hierfür wird empfohlen, nachfolgenden vereinfachten geometrisch abgeleiteten Ansatz zu verwenden:

do della galleria principale con il cunicolo trasversale deve essere aumentato a causa dell'allargamento dell'area di applicazione del carico. Riguardo a questo problema, è possibile utilizzare il seguente principio geometrico semplificato:

Kreuzungsbereich Haupttunnel / Querschlag Typ 2 und 3
Incrocia galleria principale / cunicolo trasversale tipo 2 e 3

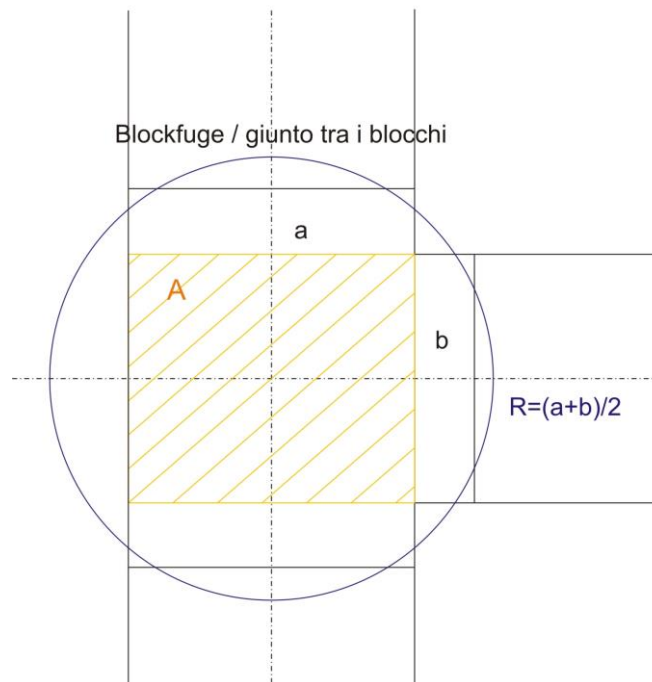


Abbildung 7: Ermittlung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Innenschale im Kreuzungsbereich bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten

Illustrazione 7: Calcolo dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento interno nell'area di raccordo con comportamento spingente

Der Erhöhungsfaktor F zur Berücksichtigung der erhöhten Gebirgsbelastung im Kreuzungsbereich ermittelt sich wie folgt:

Il fattore di incremento del carico F per la zona di incrocio si calcola come segue:

$$F = 1 + A / (\pi \cdot R^2 - A)$$

Hierbei ist:

$A = a \cdot b$ Fläche Kreuzung
 $R = (a+b)/2$ Radius erhöhter Gebirgsbelastung
 F Erhöhungsfaktor

Dove:

$A = a \cdot b$ Area della zona di incrocio
 $R = (a+b)/2$ Raggio del carico aumentato
 F Fattore di incremento del carico

2.3.2.3. Gebirgslast bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten

Im trennflächendominierten Gebirgsverhalten erfolgt die Lastermittlung mittels Blockanalyse.

Bei der Ermittlung der Lasten auf die bauzeitlichen Stützelemente (Außenschale und Anker) sind zwei

2.3.2.3. Carico dell'ammasso altamente fratturato

In condizioni di ammasso altamente fratturato, il calcolo dei carichi deve basarsi sull'analisi dei blocchi instabili. Nel calcolo dei carichi sugli elementi di sostegno (rivestimento esterno e ancoraggi) si devono esaminare due aree:

Bereiche zu untersuchen:

- Für die Ermittlung der maßgebenden Blöcke für den ungesicherten Bereich (Bereich L1) ist die Blockgröße in Tunnellängsrichtung mit der ungesicherten Länge (ungestützter Bereich) zu begrenzen.
- Für die Ermittlung der maßgebenden Blöcke im mit Spritzbeton gesicherten Bereich (Bereich L2) darf die betrachtete Tunnellänge nicht begrenzt werden.

Für die Lastableitung der Einwirkungen aus dem Gebirge auf die Innenschale sind die im Bereich L2 ermittelten maßgebenden Blöcke anzusetzen. Eine beispielhafte Ableitung der im Modell des gebetteten Stabmodells anzusetzenden Last ist nachfolgend dargestellt. Diese Last ist für die Dimensionierung der Innenschale zu berücksichtigen.

- Nel calcolo dei blocchi instabili che si trovano nell'area priva di sostegni (area L1) la dimensione del blocco deve essere limitata in direzione longitudinale della galleria con la lunghezza senza sostegni (area priva di sostegni).
- Nel calcolo dei blocchi instabili nell'area consolidata con spritzbeton (area L2), la lunghezza della galleria considerata non può essere limitata.

Per la deviazione dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento devono essere impiegati i blocchi instabili calcolati nell'area L2. La seguente figura illustra l'esempio di una trasposizione del carico da applicare al modello statico appoggiato su un letto di molle. Questo carico deve essere incluso anche nel dimensionamento del rivestimento interno.

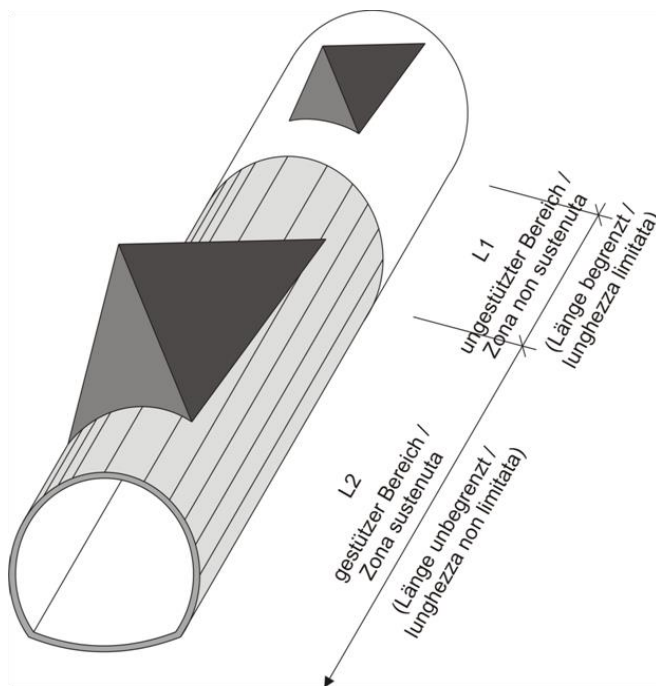


Abbildung 8: Qualitative Darstellung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Schale bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten

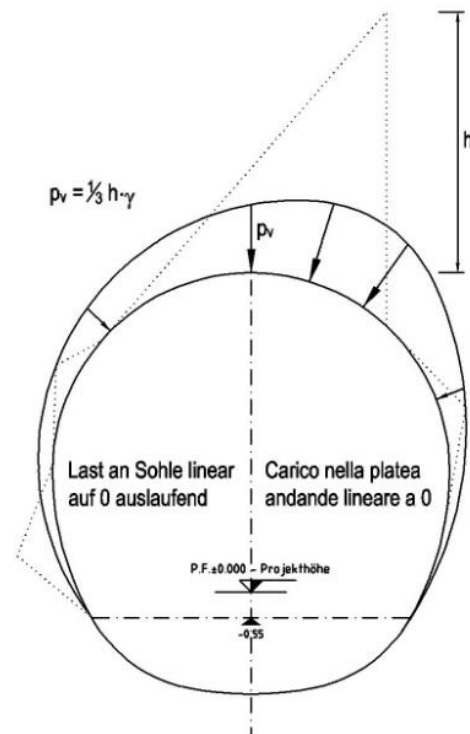


Illustrazione 8: Rappresentazione qualitativa degli effetti dell'ammasso sul rivestimento, in caso di ammasso altamente fratturato

2.3.3. Ermittlung der Gebirgslast bei Vortrieb mittels geschlossener TBM mit Tübbingausbau

2.3.3. Calcolo del carico dell'ammasso con avanzamento con TBM chiusa e rivestimento in conci

2.3.3.1. Gebirgslast bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten

2.3.3.1. Carico dell'ammasso con comportamento spingente

Die Einwirkung aus dem spannungsdominierten Ge-

Il carico nel caso di massicci rocciosi con problemati-

birge kann in der Regel gemäß Abbildung 9 (rechts) als symmetrische Last angesetzt werden. Asymmetrien aus spezifischen Verhältnissen sind zu adaptieren. Unter Voraussetzung symmetrischer Lasten werden diese als gleichmäßige First-, Sohl- und Seitendruckbelastung definiert.

Der Seitendruck setzt eine kraftschlüssige Verfüllung des Ringspaltes voraus.

Auflast, Sohl- und Seitendruck können dabei als rechteckförmige Belastung angesetzt werden.

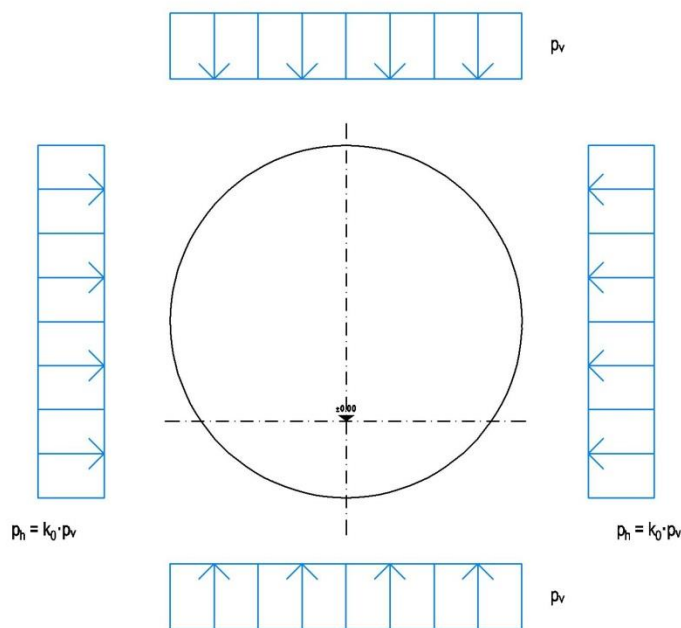


Abbildung 9: Darstellung Lastverteilung spannungsdominiertes Gebirge (links) und Auflockerungslastfall (rechts)

Im Lockermaterial bzw. lockermaterialähnlichen Verhältnissen sowie in Störungszonen oder druckhaften Gebirgsbereichen ist der Einfluss (Spannungsumlagerungen im Gebirge) der mit einem Achsabstand von 70m parallelverlaufenden Nachbarröhre in der Dimensionierung der Tübbingschale zu berücksichtigen.

2.3.3.2. Gebirgslast bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten

Bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten ermitteln sich die Gebirgslasten analog zu den Angaben in Kap. 2.3.2.3. Bei dieser Betrachtung ist bauzeitlich von einem teilgebetteten Zustand auszugehen (vgl. Abbildung 9, rechts).

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

che di carattere tensionale può essere distribuito come un carico simmetrico secondo illustrazione 9 (destra). In presenza di asimmetrie da comportamenti locali queste dovranno essere adattate. In condizioni di carichi simmetrici, la distribuzione delle pressioni su volta, platea e piedritti viene definita come proporzionata.

La pressione laterale è assunta in base alla pressione esercitata dalle iniezioni di contatto.

Le pressioni in calotta, in platea e laterali possono essere applicate in forma rettangolare.

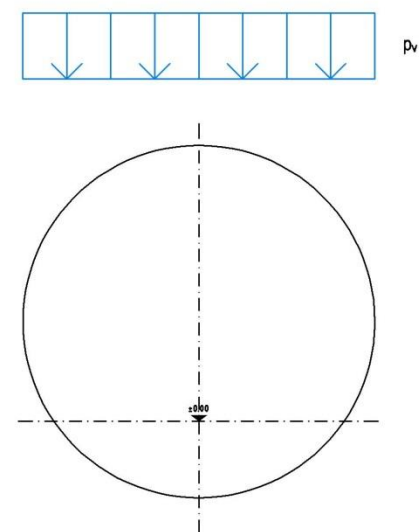


Illustrazione 9: Esempio schema di applicazione del carico dell'ammasso con comportamento spingente (sinistra) e allentamento della roccia (destra)

In materiale sciolto oppure simile e anche nelle zone disturbate o zone con elevato carico, l'effetto causato dalla realizzazione della seconda canna a distanza di 70m deve essere considerato per il dimensionamento del rivestimento in conci.

2.3.3.2. Carico dell'ammasso altamente fratturato

In caso di ammassi altamente fratturati i carichi dell'ammasso si calcolano secondo le indicazioni nel cap. 2.3.2.3. Durante la fase di costruzione bisogna tenere in conto un anello parzialmente poggiato sul letto di molle (vedi Illustrazione 9, destra).

3. ERMITTLUNG DER BEANSPRUCHUNGEN DER TUNNELSCHALEN (EFFECTS OF ACTIONS)

3.1. FEM-/FDM-Berechnungsmodelle

Mit den FEM-/FDM-Berechnungsmodellen bzw. -hilfsmitteln gemäß Kap. 2 können in der Regel auch die Beanspruchungen der Tunnelschalen infolge Gebirgslast ermittelt werden.

Bei Verwendung derartiger Berechnungsmodelle / -hilfsmittel sind jedenfalls neben den Spannungen und Verformungen auch die Schnittgrößen der Tunnelschalen explizit darzustellen.

3.2. Modellierung Ausbaumittel

Hinweise zur Modellierung von Spritzbeton sind in Kap. 2.2.4 angegeben. Es wird empfohlen, Anker und bei Erfordernis Stauchelemente im numerischen Modell zu berücksichtigen. Weitere Ausbaumittel (wie z. B. Spieße oder Rohrschirme) können bei Bedarf berücksichtigt werden.

3.3. Stabwerksmodelle

Die Ermittlung der Beanspruchungen der Tunnelschalen (Schnittgrößen, Spannungen, Verformungen, Bettungsreaktionen) hat in der Regel an Hand von zweidimensionalen Stabwerksmodellen zu erfolgen.

Für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Innenschale (bzw. einer Tübbingschale bei Schildvortrieb) wird im Allgemeinen zur Erfassung aller maßgebenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen ein Stabwerksmodell BBM (Bedded Beam Model) verwendet. Die Schale kann damit als ebener Stabzug mit gebetteten Balkenelementen berechnet werden. Es wird empfohlen, die Anzahl der Stabelemente so zu wählen, dass Innenschalen mit variabler Stärke modelliert werden können.

3.3.1. Netzteilung

Bei Softwarepaketen, welche die Eingabe eines Federabstandes fordern, wird für übliche Tunnelquer-

3. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI DEI RIVESTIMENTI DELLA GALLERIA (EFFECTS OF ACTIONS)

3.1. Modelli di calcolo ad elementi finiti (FEM) e differenze finite (FDM)

Con i modelli FEM e FDM, ovvero gli strumenti di cui al cap. 2, si possono generalmente calcolare anche le sollecitazioni dei rivestimenti della galleria risultanti dal carico dell'ammasso.

Anche con tali modelli di calcolo è necessario rappresentare esplicitamente, oltre alle tensioni e deformazioni, anche le forze di taglio del rivestimento della galleria.

3.2. Modellazione del mezzo utilizzato per il rivestimento

Le istruzioni relative alla modellazione dello spritzbeton si trovano al cap. 2.2.4. Si consiglia di includere nel modello numerico ancoraggi e, se necessario, sostegni deformabili. In caso di necessità si possono considerare altri tipi di rivestimento (come ad esempio elementi in acciaio o ombrelli di infilaggi).

3.3. Metodo delle reazioni iperstatiche

Le sollecitazioni sul rivestimento della galleria (forze di taglio, tensioni, deformazioni, reazione delle molle) si calcolano generalmente con il modello bidimensionale del metodo delle reazioni iperstatiche.

Per il calcolo statico nel limite della capacità di carico e allo stato limite di esercizio del rivestimento definitivo (o del rivestimento in conci in caso di avanzamento con scudo) viene utilizzato un modello BBM (Bedded Beam Model) per determinare i carichi e le combinazioni di carichi. Si consiglia di ponderare la quantità degli elementi trave in modo da ottenere diversi spessori per la modellazione del rivestimento definitivo.

3.3.1. Divisione della maglia

Nei pacchetti di software che richiedono di indicare l'interasse tra le molle si consiglia per le normali se-

schnitte ein Federabstand von $\leq 0,5\text{m}$ empfohlen.

3.3.2. Elementtypen

Es wird empfohlen, drei- oder viereckige Elemente mit mindestens quadratischen Ansatzfunktionen zu verwenden. Die Ergebnisse sind mittels geeigneten Sensitivitätsuntersuchungen betreffend Netzfeinheit und Ansatzfunktion zu prüfen.

3.3.3. Stoffgesetze Bauwerk

Softwarepakete, welche die Modellierung von Spannungsumlagerungen durch den Ansatz von nichtlinearem Materialverhalten erlauben, werden empfohlen. In der Regel ist für die Modellierung von bewehrten Stahlbetonelementen der Ansatz der Steifigkeit des ungerissenen Querschnitts (Zustand I) ausreichend. Die statische Steifigkeit der Balkenelemente wird mit $E_c \times I_g$ berechnet, wobei das Trägheitsmoment I_g auf die Achse des Betonquerschnitts unter Vernachlässigung des Stahlanteils berechnet wird. Für die Modellierung von unbewehrtem oder faserbewehrtem Beton sind nichtlineare Materialmodelle (Zustand II) zu verwenden (vgl. [18][19][22][23]).

3.3.4. Modellierung der Bettung

Bei der Modellierung der Federn ist eine Bettungsreaktion nur in Richtung Gebirge zulässig (Zugauschaltung).

In Bereichen mit einer Trennschicht zwischen Innenschale und Außenschale, ist die Bettung in Querrichtung (tangentielle Bettung) zu vernachlässigen.

Wenn zwischen Außenschale und Innenschale keine Trennschicht vorgesehen ist, kann vereinfacht eine tangentielle Bettung K_T mit $K_R/3$ berücksichtigt werden. Hierbei ist der Nachweis zu erbringen, dass die berücksichtigte tangentielle Bettung vom Gebirge aufgenommen werden kann.

Bei der Modellierung eines Tübbingringes kann für die tangentielle Bettung K_T vereinfacht

$$K_T = 20\% \times K_R$$

angesetzt werden. Hierbei ist der Nachweis zu erbringen, dass die berücksichtigte tangentielle Bettung vom Gebirge aufgenommen werden kann.

3.3.4.1. Radiale Bettung

Die radiale Bettung der Innenschale im Gebirge/Boden ermittelt sich in der Regel unter Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls E und der Querdehnzahl ν des Gebirges/Bodens sowie der System-

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

zioni di galleria un interasse $\leq 0,5\text{m}$.

3.3.2. Tipi di elementi

Si consiglia di utilizzare elementi triangolari o quadrati con funzioni di forma almeno quadrate. I risultati devono essere verificati per mezzo di analisi di sensibilità circa la precisione della maglia e dell'approccio.

3.3.3. Relazioni costitutive dell'opera

Si consiglia l'utilizzo di pacchetti software che consentono la modellazione della trasposizione delle tensioni sul principio di un comportamento del materiale non lineare. In genere per la modellazione di elementi in cemento armato è sufficiente il principio della rigidità della sezione non fessurata (condizione I). La rigidità strutturale degli elementi trave è calcolata come $E_c \times I_g$. Il momento d'inerzia I_g è calcolato rispetto all'asse della sezione in calcestruzzo trascurando la presenza dell'acciaio. Per la modellazione di calcestruzzo non armato o fibrorinforzato si devono utilizzare modelli di materiale non lineare (condizione II) (cfr. [18][19][22][23]).

3.3.4. Modellazione del letto di molle

La modellazione delle molle deve consentire che il letto di molle reagisca solo in direzione dell'ammasso, senza resistenza a trazione.

In aree in cui tra il rivestimento definitivo ed esterno si trova uno strato di separazione non si prende in considerazione il letto di molle in direzione trasversale (letto di molle tangenziale).

Se tra il rivestimento definitivo ed esterno non si trova alcuna membrana di separazione, si può prendere in considerazione per semplicità una reazione tangenziale del terreno $K_T = K_R/3$. In questo caso si deve provare che questo possa essere assorbito dall'ammasso.

Per il modello di un anello di conci si può considerare, con un approccio semplificato, una rigidità trasversale delle molle K_T pari a

$$K_T = 20\% \times K_R.$$

Si deve, quindi, verificare che la resistenza tangenziale possa essere assorbita dalla roccia.

3.3.4.1. Rigidità radiale

Per la definizione della rigidità del letto di molle radiali in materiale sciolto, normalmente si tiene conto del modulo elastico E , del coefficiente di Poisson ν dell'ammasso roccioso e del raggio interno R della

linie des entsprechenden Innenschalenradius R wie folgt:

galleria.

$$K_R = E \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu) \times R} = \frac{E_S}{R}$$

Hierbei ist:

Dove:

K_R = radiale Bettung Innenschale – Gebirge [MN/m³]
E = Elastizitätsmodul des umliegenden Bodens/Gebirges
 E_S = Steifemodul des umliegenden Bodens/Gebirges
 ν = Querdehnzahl des Bodens/Gebirges
R = Tunnelradius Systemlinie

K_R = rigidezza del letto di molle radiali a contatto con l'anello interno [MN/m³]
E = modulo elastico dell'ammasso roccioso
 E_S = modulo edometrico dell'ammasso roccioso
 ν = coeff. di Poisson dell'ammasso roccioso
R = raggio della galleria – linea di riferimento

Bei lokalen Radien $R_{\text{lokal}} < 3\text{m}$ (z.B. im Übergangsbereich Ulme/Sohle) ist die Bettung in diesem Bereich mit $R=3\text{m}$ zu berechnen.

In presenza di raggi locali $R_{\text{lokal}} < 3\text{m}$ (per es. nell'area di passaggio dal piedritto al fondo) il calcolo del letto di molle deve essere basato su $R=3$.

Bei einem Tübbingausbau ist zudem ein teilgebetteter Zustand infolge Ringspaltverpressung (gemäß Angaben in Dokument D0616-3604 „Bemessungskonzept Tübbingring“) zu berücksichtigen.

In caso di rivestimenti in conci si deve anche tenere conto di un anello parzialmente poggiato sul letto di molle (secondo indicazioni nel documento D0616-3604 “Standard per il dimensionamento strutturale dei rivestimenti in conci”).

In begründeten Ausnahmefällen sind in Abstimmung mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE weitere Ansätze zulässig.

In casi giustificati e in accordo con BBT SE è possibile usare altri approcci per il calcolo della rigidezza delle molle.

3.3.4.2. Federkonstanten Auflagerbereich/Sohle

3.3.4.2. Costante della molla nelle zone di appoggio / fondo

Das Widerlager der Konstruktion mit Sohlplatte bzw. offener Sohle (Querschläge) wird durch Federn mit zugehöriger Steifigkeit in Abhängigkeit der dazugehörigen Einflussbreite „b“ modelliert. Die Federkonstanten sind wie folgt zu ermitteln:

L'appoggio della costruzione con platea oppure con fondo aperto viene modellato con molla con rigidezza relativa all'area di influenza della singola molla “b”. La costante della molla si calcola come segue:

Federkonstante c_v – vertikal

Costante della molla c_v – verticale

- $c_v = E_{\text{Geb.}} \cdot 0,5 \cdot b$

- $c_v = E_{\text{Geb.}} \cdot 0,5 \cdot b$

Federkonstante c_h – horizontal

Costante della molla c_h – orizzontale

- $c_h = 0,5 \cdot c_v$

- $c_h = 0,5 \cdot c_v$

Für die Ermittlung des Bettungsmoduls für das Widerlager und die Sohlplatte ist eine Setzungsberechnung durchzuführen.

Per la determinazione del modulo elastico dell'appoggio e della platea viene fatto un calcolo del cedimento.

3.3.5. Empfohlene Softwarepakete

3.3.5. Pacchetti software consigliati

Folgende Softwarepakete (alphabetisch geordnet) werden für die numerische Modellierung der Innenschalen empfohlen:

Per la modellazione numerica del rivestimento definitivo si consigliano i seguenti pacchetti di software (in ordine alfabetico):

- D.I.E. (D.I.E. CAD und Statik Software GmbH)
- Infograph (Infocad)
- GTS Midas
- RIBTEC
- SAP2000 (CSI)
- SCIA (Nemetschek)
- Sofistik

- D.I.E. (D.I.E. CAD und Statik Software GmbH)
- Infograph (Infocad)
- GTS Midas
- RIBTEC
- SAP2000 (CSI)
- SCIA (Nemetschek)
- Sofistik

In speziellen Bereichen, z.B. in Kreuzungsbereichen oder anderen komplexeren Tunnelschalengeometrien, kann eine räumliche Betrachtung des Spannungszustandes erforderlich sein. Hierzu wird empfohlen, dreidimensionale gebettete Schalenelemente anzuwenden.

Details sind mit dem zuständigen Fachbereich der BBT SE abzustimmen.

In zone particolari, per es. incroci o altre zone dove la geometria della galleria è complessa, può essere necessario analizzare lo stato tensionale nello spazio tridimensionale. Allo scopo si consiglia di utilizzare elementi a guscio tridimensionali su letto di molle.

I dettagli devono essere concertati con il reparto competente di BBT SE.

4. HILFSMITTEL ZUR ANALYSE DES AUSBAUWIDERSTANDES

4.1. Kennlinienverfahren

4.1.1. Allgemeines

Das Kennlinienverfahren ist ein Hilfsmittel zur Abschätzung des Gebirgsverhaltens und des Systemverhaltens. Für das Kennlinienverfahren werden zwei Kennlinien, Gebirgskennlinie und Ausbaukennlinie, sowie radiale Hohlraumverschiebungen im Längsprofil verwendet.

Das Kennlinienverfahren verwendet zahlreiche vereinfachende Annahmen und beruht auf der Theorie einer isotropen elastischen Scheibe mit einem kreisrunden Loch im ebenen Verformungszustand unter homogenem initialem Spannungszustand.

Es existieren verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Kennlinien [7]. Sofern seitens BBT SE keine spezifischeren Vorgaben vorliegen, werden die nachfolgend aufgeführten Ansätze empfohlen.

4.1.2. Gebirgskennlinie

Für die Bestimmung der Gebirgskennlinie (vgl. Abbildung 10) werden folgende Ansätze empfohlen:

- Feder (1976) [4], [5]
- Carranza-Torres (2004) [2]
- Sulem & Panet (1987) [24]

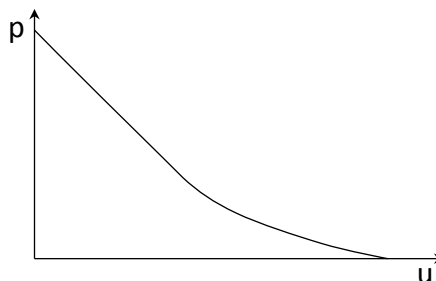


Abbildung 10: Qualitative Darstellung der Gebirgskennlinie

4. SUPPORTO ALL'ANALISI DELLA RESISTENZA DEL RIVESTIMENTO ESTERNO

4.1. Metodo delle curve caratteristiche

4.1.1. Generalità

Il metodo delle curve caratteristiche consente di valutare il comportamento dell'ammasso roccioso e del sistema. Per la procedura vengono utilizzate due curve caratteristiche, una per l'ammasso e una per il rivestimento esterno, nonché per i movimenti radiali della cavità sul profilo longitudinale.

Il metodo delle curve caratteristiche utilizza numerose ipotesi semplificate e si basa sulla teoria di una parete elastica isotropa e un rivestimento circolare chiuso in condizioni di deformazione piana e stato tensionale iniziale omogeneo.

Esistono vari principi per la definizione delle curve caratteristiche [7]. In assenza di istruzioni specifiche da parte di BBT SE verranno utilizzati i principi descritti in seguito.

4.1.2. Curve caratteristiche dell'ammasso

Per la definizione delle curve caratteristiche dell'ammasso (cfr. Illustrazione 10) si consigliano i seguenti principi:

- Feder (1976) [4], [5]
- Carranza-Torres (2004) [2]
- Sulem & Panet (1987) [24]

Illustrazione 10: Rappresentazione qualitativa delle curve caratteristiche

4.1.3. Berücksichtigung von Ausbaumaßnahmen

4.1.3.1. Berücksichtigung der Vorverformung

Für die Berechnung der Vorverformung werden folgende analytischen Ansätze empfohlen:

- nach Vlachopoulos [27]
- nach Panet [17]
- nach Hoek [8]

4.1.3.2. Berücksichtigung der Systemankerung

Es wird empfohlen, für die Berücksichtigung der Systemankerung den Ansatz der passiven Kohäsionserhöhung, d.h. über eine Erhöhung der Gebirgsfestigkeiten, z.B. gemäß [7], qualitativ dargestellt in Abbildung 11, zu berücksichtigen.

Der obere Grenzwert der kleinsten Hauptspannung σ_3 kann durch den Ansatz

$$\sigma_3 = \frac{F_y}{a \cdot b}$$

abgeschätzt werden, wobei F_y die Fließspannung des Ankers, a und b die Ankerrasterabstände in Tangential- und Längsrichtung sind.

In Längsrichtung geneigte Anker können bis zu einer Neigung von $\alpha > 40^\circ$ zur Längsachse vereinfacht mit einer abgeminderten Hauptspannung $\sigma_3 = F_y \sin \alpha / (a \times b)$ berücksichtigt werden. Bei Ankerneigungen mit einem Winkel $\alpha < 40^\circ$ zur Längsachse des Tunnels ist die radiale Kohäsionserhöhung zu vernachlässigen.

4.1.3. Analisi delle misure di sostegno

4.1.3.1. Analisi della deformazione

Per il calcolo delle deformazioni si consigliano i seguenti principi analitici:

- secondo Vlachopoulos [27]
- secondo Panet [17]
- secondo Hoek [8]

4.1.3.2. Analisi degli ancoraggi sistematici

Per l'analisi degli ancoraggi sistematici si consiglia il principio dell'aumento passivo della coesione, cioè l'analisi di un aumento della resistenza dell'ammasso, per es. secondo [7], come illustrato nella Illustrazione 11.

Il valore superiore della tensione principale minore σ_3 può essere valutato secondo il principio

dove F_y è la tensione di snervamento dell'ancoraggio, a e b l'interasse tra gli ancoraggi in direzione tangenziale e longitudinale.

Gli ancoraggi inclinati in direzione longitudinale fino a un'inclinazione di $\alpha > 40^\circ$ possono essere considerati per semplicità con una tensione principale ridotta $\sigma_3 = F_y \sin \alpha / (a \times b)$. Se gli ancoraggi presentano un'inclinazione $\alpha < 40^\circ$ rispetto all'asse longitudinale della galleria, l'aumento radiale della coesione è trascurabile.

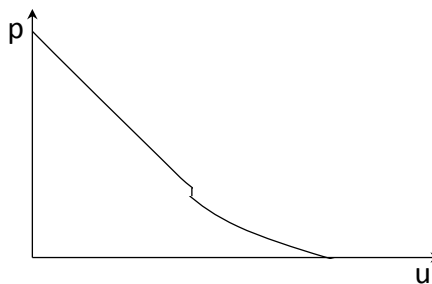


Abbildung 11: Gebirgskennlinie mit Kohäsionserhöhung infolge Systemankerung

Illustrazione 11: Curva caratteristica con aumento della coesione a seguito dell'ancoraggio sistematico

4.1.3.3. Berücksichtigung des Spritzbetons

Im Kennlinienverfahren wird der Spritzbeton vereinfachend als kreisrunder Ring konstanter Dicke be-

4.1.3.3. Analisi dello spritzbeton

Nel metodo delle curve caratteristiche per semplicità lo spritzbeton viene considerato come un anello

trachtet.

Die Tragwirkung des Spritzbetons wird vereinfacht über die Kesselformel aus der Steifigkeitsentwicklung des Spritzbetons nach seinem Einbau und der gewählten Schalenstärke ermittelt, wobei der Tunnel als achsensymmetrischer Zylinder berücksichtigt wird.

Eine qualitative Darstellung der Gebirgs- und Ausbaukennlinie ist nachfolgend dargestellt.

chiuso di spessore costante.

La capacità portante dello spritzbeton viene calcolata in maniera semplificata tramite la formula di Mariotte, dallo sviluppo della rigidezza dello spritzbeton dopo la sua messa in opera e lo spessore scelto per il rivestimento, considerando la galleria come un cilindro assialsimmetrico.

Segue una rappresentazione della curva caratteristica dell'ammasso e del rivestimento esterno.

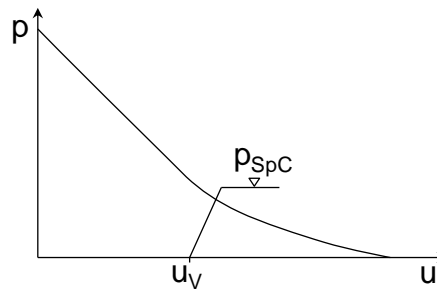


Abbildung 12: Kennlinien für Gebirge und Spritzbetonausbau mit Berücksichtigung der Vorverformung u_v gemäß Kap. 2.2.5.2 und dem maximalen Stützdruck des Spritzbetons p_{SpC}

Illustrazione 12: Curve caratteristiche per l'ammasso e il rivestimento in spritzbeton considerate la deformazione u_v secondo il cap. 2.2.5.2 e la sollecitazione massima dello spritzbeton p_{SpC} .

4.1.3.4. Berücksichtigung von Deformationsschlitten ohne/mit Stauchelementen

Stahlprofile mit Gleitelementen erlauben es, unter Anwendung des Ausweichprinzips während der Ausweichphase einen konstanten Stützdruck aufrecht zu erhalten. Es wird empfohlen, bei Stahlprofilen mit Gleitelementen die Gleitstrecke zu berücksichtigen. Eine qualitative Darstellung des Effektes der Gleitelemente ist in Abbildung 13 dargestellt.

4.1.3.4. Analisi delle fessure di deformazione con e senza elementi deformabili

Le centine in acciaio telescopiche consentono, utilizzando il principio di allentamento, di mantenere una sollecitazione costante nella fase di allentamento delle tensioni. In caso di centine telescopiche si consiglia di tenere conto della lunghezza di scorrimento. Nella Illustrazione 13 è rappresentato l'effetto dell'elemento scorrevole.

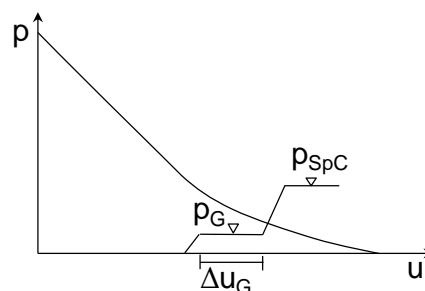


Abbildung 13: Kennlinien für Gebirge und Ausbau inkl. Berücksichtigung der Gleitstrecke Δu_G und dem Stützdruck während der Gleitphase p_G

Illustrazione 13: Curve caratteristiche dell'ammasso e del rivestimento considerando il tratto di scorrimento Δu_G e la sollecitazione in fase di flessione p_G

Stauchelemente in Deformationsschlitten bewirken eine anfänglich geringere Steifigkeit der Ausbaukennlinie. Dadurch kann der Ausbau zusätzliche Ra-

L'effetto iniziale degli elementi deformabili nelle fessure di deformazione è una riduzione della rigidezza della curva caratteristica del rivestimento. In questo

dialverschiebungen aufnehmen. Die Festigkeit der Stauchelemente ist so zu begrenzen, dass diese unterhalb der Spritzbetonschalenfestigkeit liegt. Die Steifigkeit ist gemäß den Herstellerangaben anzusetzen. In Abbildung 14 ist der resultierende Effekt auf die Ausbaukennlinie qualitativ dargestellt.

modo il rivestimento può assorbire più deformazioni radiali. La resistenza degli elementi deformabili deve essere limitata al di sotto della resistenza dello spritzbeton. La rigidezza deve essere applicata seguendo le istruzioni del costruttore. Alla Illustrazione 14 è rappresentato l'effetto delle curve caratteristiche del rivestimento.

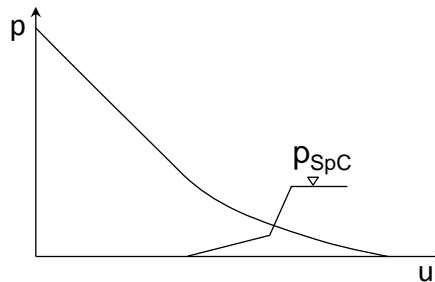


Abbildung 14: Kennlinien für Gebirge und Spritzbetonausbau mit Stauchelementen geringer Steifigkeit

Illustrazione 14: Curve caratteristiche dell'ammasso e del rivestimento in spritzbeton con elementi deformabili con bassa rigidezza

4.2. Grundbruch

In der Regel reicht innerhalb der Nachweisführung die Konvergenz der numerischen Berechnung unter Einhaltung vertretbarer Verformungen aus.

Dennoch ist in der Regel ein Nachweis der Tragfähigkeit der Spritzbetonaufstandsfläche oder des Bogenengerüsts (wenn eingebaut) zu führen. Bei diesem Nachweis sind die entsprechenden Bauphasen zu berücksichtigen (Ausbruch Kalotte, Ausbruch Strosse).

Das Nachweisverfahren ist in Dokument D0616-III-08-TB-3602 angegeben.

4.2. Rottura del terreno

Generalmente nel corso della verifica la convergenza dei calcoli numerici è sufficiente a garantire il soddisfacimento della verifica di capacità portante, se le deformazioni riscontrate sono tollerabili.

Tuttavia, potrebbe rendersi necessaria una verifica della capacità portante della superficie di appoggio dello spritzbeton e/o della centina (se presente). Tale verifica deve tenere conto delle fasi costruttive (scavo calotta, scavo strozzo).

La procedura di verifica si trova nel documento D0616-III-08-TB-3602.

4.3. Nachweise zur Stabilität der Ortsbrust

Für die Nachweise der Ortsbruststabilität in geklüftetem Fels werden die Ansätze der Silotheorie nach Terzaghi [25] und Tamez [26] empfohlen.

4.3. Prove di stabilità del fronte di scavo

Per la prova della stabilità del fronte di scavo in roccia fessurata si consigliano i principi della teoria dei silos secondo Terzaghi [25] e Tamez [26].

5. VEREINFACHTE MODELLIERUNG IN KREUZUNGSBEREICHEN (NÄHERUNGS-VERFAHREN)

Kreuzungsbauwerke sind gesondert zu untersuchen. Die Modellbildung zur Analyse der Kreuzungsbauwerke erfolgt in Abhängigkeit des Gebirgsverhaltens und der Projektphase.

5.1. Vereinfachte Modellbildung

In einer frühen Projektphase sowie bei unproblematischen Gebirgsverhältnissen sind vereinfachte Methoden, wie zum Beispiel das Verfahren „Scheibe mit Loch“, zulässig. Bei Ansatz der Methode Scheibe mit Loch gilt jedoch das Kriterium, dass der die Hauptröhre tangierende Tunnelquerschnitt maximal $\frac{2}{3}$ der Höhe des Haupttunnels haben und den Firstbereich nicht tangieren darf. Bei einem größeren Verhältnis als $\frac{2}{3}$ darf diese Methode nicht angewendet werden.

Für die Abschätzung des Gebirgs- und Ausbruchverhaltens in Kreuzungsbereichen kann das Kennlinienverfahren unter Berücksichtigung einer äquivalenten Tunnelgeometrie verwendet werden. Hierbei wird empfohlen, den erforderlichen Ausbau mittels Kennlinienverfahren für beide Regelquerschnitte außerhalb des Einflussbereiches der Kreuzung zu ermitteln (Schnitte 1a und 1b). Die größere resultierende Last aus Schnitt 1a und 1b wird mit dem gemäß Kap. 2.3.2.2 ermittelten Lasterhöhungsfaktor multipliziert und in einem zweidimensionalen Stabwerksmodell mit der Geometrie in der Diagonale (Schnitt 2) angesetzt (vereinfachte 2D-Berechnung).

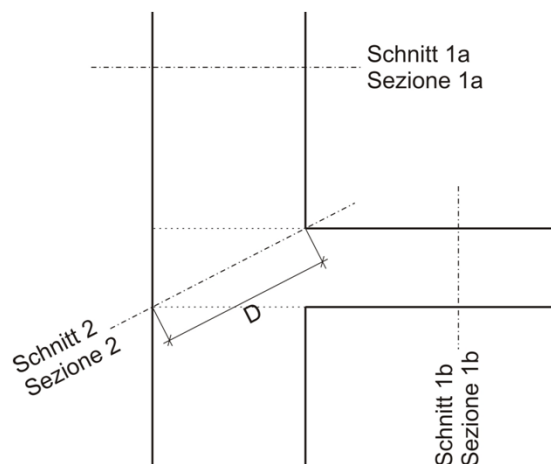


Abbildung 15: Vereinfachte Berechnung Tunneldurchmesser im Kreuzungsbereich

5. MODELLAZIONE SEMPLIFICATA NELLE AREE DI INCROCIO (APPROCCIO)

Gli incroci devono essere analizzati separatamente. La modellazione per l'analisi delle opere di incrocio dipende dal comportamento dell'ammasso e dalla fase progettuale.

5.1. Modellazione semplificata

In una fase progettuale preliminare e in caso di comportamento dell'ammasso non problematico è consentito l'utilizzo di metodi semplificati come quello della "piastra con foro". Se si utilizza un metodo semplificato vale comunque il criterio che la sezione che attraversa la canna principale può avere una lunghezza corrispondente massima ai $\frac{2}{3}$ dell'altezza della galleria principale. Se la relazione supera i $\frac{2}{3}$ non può essere utilizzato un metodo semplificato.

Per valutare il comportamento dell'ammasso e del rivestimento nelle aree di incrocio si può utilizzare il metodo delle curve caratteristiche basato su una geometria equivalente della galleria. In questo caso si consiglia di calcolare il rivestimento necessario per mezzo del metodo delle curve caratteristiche per entrambe le sezioni tipo al di fuori dell'area di influsso dell'incrocio (sezioni 1a e 1b). Il carico maggiore risultante dalle sezioni 1a e 1b viene moltiplicato per il fattore di incremento del carico al cap. 2.3.2.2 e viene impiegato il metodo bidimensionale delle reazioni iperstatiche con la geometria nella diagonale (sezione 2) (calcolo semplificato 2D).

Illustrazione 15: Calcolo semplificato del diametro della galleria in aree di incrocio

6. VERZEICHNISSE

6.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Empfohlene FEM-Ansätze und Stoffgesetze bei Kontinuumsmodellierungen. Gelb: verschmiertes Gebirgsverhalten; grün: Gebirgsverhalten unter Berücksichtigung der Trennflächenanisotropie	10
Abbildung 2:	Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Störungen, Klüften und Scherzonen (a – Erkundungsstollen; b – Haupttunnel)	11
Abbildung 3:	Modellbildung mit schwerer Schicht und steifem Rahmen (a – Erkundungsstollen; b – Haupttunnel)	13
Abbildung 4:	Qualitative Darstellung der numerisch ermittelten Normalspannungen (rot), der aktiven Gebirgslast (blau) und der passiven Bettungsreaktion (grün)	17
Abbildung 5:	Qualitative Darstellung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Innenschale mit Sohlgewölbe bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten.....	18
Abbildung 6:	Qualitative Darstellung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Innenschale bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten.....	18
Abbildung 7:	Ermittlung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Innenschale im Kreuzungsbereich bei spannungsdominiertem Gebirgsverhalten.....	19
Abbildung 8:	Qualitative Darstellung der Einwirkung aus dem Gebirge auf die Schale bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten.....	20
Abbildung 9:	Darstellung Lastverteilung spannungsdominiertes Gebirge (links) und Auflockerungslastfall (rechts)	21
Abbildung 10:	Qualitative Darstellung der Gebirgskennlinie	26
Abbildung 11:	Gebirgskennlinie mit	

6. ELENCHI

6.2. Elenco delle illustrazioni

Illustrazione 1:	Principi FEM e relazioni costitutive consigliati nella modellazione di continuità. Giallo: comportamento spalmato dell'ammasso roccioso; verde: comportamento dell'ammasso in considerazione dell'anisotropia delle superfici di discontinuità	10
Illustrazione 2:	Possibilità di analisi di faglie, fratture e zone di taglio (a – cunicolo di drenaggio; b – galleria principale)..	11
Illustrazione 3:	Modellazione con strato pesante e margini rigidi (a – cunicolo di drenaggio; b – galleria principale)..	13
Illustrazione 4:	Rappresentazione qualitativa delle tensioni normali (rosso), ottenute dal calcolo numerico, del carico attivo dell'ammasso (blu) e della reazione assestamento del terreno (verde)..	17
Illustrazione 5:	Rappresentazione qualitativa dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento definitivo con arco rovescio in presenza di comportamento spingente	18
Illustrazione 6:	Rappresentazione qualitativa dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento definitivo senza arco rovescio in presenza di comportamento spingente dell'ammasso	18
Illustrazione 7:	Calcolo dei carichi provenienti dall'ammasso sul rivestimento interno nell'area di raccordo con comportamento spingente	19
Illustrazione 8:	Rappresentazione qualitativa degli effetti dell'ammasso sul rivestimento, in caso di ammasso altamente fratturato.....	20
Illustrazione 9:	Esempio schema di applicazione del carico dell'ammasso con comportamento spingente (sinistra) e allentamento della roccia (destra)..	21
Illustrazione 10:	Rappresentazione qualitativa delle curve caratteristiche.....	26
Illustrazione 11:	Curva caratteristica con aumento della coesione a seguito dell'ancoraggio sistematico.....	27

Progettazione di sistema

Settore: III Dati di base per la progettazione

	Kohäsionserhöhung infolge Systemankerung	27
Abbildung 12:	Kennlinien für Gebirge und Spritzbetonausbau mit Berücksichtigung der Vorverformung u_v gemäß Kap. 2.2.5.2 und dem maximalen Stützdruck des Spritzbetons p_{SpC}	28
Abbildung 13:	Kennlinien für Gebirge und Ausbau inkl. Berücksichtigung der Gleitstrecke Δu_G und dem Stützdruck während der Gleitphase p_G	28
Abbildung 14:	Kennlinien für Gebirge und Spritzbetonausbau mit Stauchelementen geringer Steifigkeit	29
Abbildung 15:	Vereinfachte Berechnung Tunneldurchmesser im Kreuzungsbereich	30
	Illustrazione 12: Curve caratteristiche per l'ammasso e il rivestimento in spritzbeton considerate la deformazione u_v secondo il cap. 2.2.5.2 e la sollecitazione massima dello spritzbeton p_{SpC}	28
	Illustrazione 13: Curve caratteristiche dell'ammasso e del rivestimento considerando il tratto di scorrimento s Δu_G e la sollecitazione in fase di flessione p_G	28
	Illustrazione 14: Curve caratteristiche dell'ammasso e del rivestimento in spritzbeton con elementi deformabili con bassa rigidità	29
	Illustrazione 15: Calcolo semplificato del diametro della galleria in aree di incrocio	30

6.3. Literatur und Quellen

6.3.4. Literatur

- [1]. Cantieni, L., Anagnostou, G. & Hug, R. (2011) Interpretation of Core Extrusion Measurements When Tunnelling Through Squeezing Ground. Rock Mech. Rock Eng. 44, 641-670.
- [2]. Carranza-Torres, C. (2004) Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. International journal of rock mechanics and mining sciences 41; 629-639 (suppl. 1).
- [3]. DAUB Arbeitskreis Schildstatik (2005) Empfehlungen für statische Berechnungen von Schildvortriebsmaschinen. Tunnel 7/2005.
- [4]. Feder G. & Arwanitakis M. (1976) Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche tiefliegender Hohlraumbauten, BHM 121(4), 103-117.
- [5]. Feder, G. (1978) Versuchsergebnisse und analytische Ansätze zum Scherbruchmechanismus im Bereich tiefliegender Tunnel. Rock Mechanics Suppl. 6, 71-102.
- [6]. Gruebl, F. (2012) Segmental Ring Design – New Challenges with High Tunnel Diameters. Muir Wood Lecture 2012, ITA.
- [7]. Gschwandtner, G. (2010) Analytische Berechnungsansätze zum Kennlinienverfahren Masterarbeit, Montanuniversität Leoben.
- [8]. Hoek, E., & Marinos, P. (2000) Predicting tunnel

6.3. Bibliografia e fonti

6.3.4. Bibliografia

- [1]. Cantieni, L., Anagnostou, G. & Hug, R. (2011) Interpretation of Core Extrusion Measurements When Tunnelling Through Squeezing Ground. Rock Mech. Rock Eng. 44, 641-670.
- [2]. Carranza-Torres, C. (2004) Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. International journal of rock mechanics and mining sciences 41; 629-639 (suppl. 1).
- [3]. DAUB Shield Statics Worling Group (2005) Recommendations for static Analysis of Shield Tunneling Machines. Tunnel 7/2005.
- [4]. Feder G. & Arwanitakis M. (1976) Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche tiefliegender Hohlraumbauten, BHM 121(4), 103-117.
- [5]. Feder, G. (1978) Versuchsergebnisse und analytische Ansätze zum Scherbruchmechanismus im Bereich tiefliegender Tunnel. Rock Mechanics Suppl. 6, 71-102.
- [6]. Gruebl, F. (2012) Segmental Ring Design – New Challenges with High Tunnel Diameters. Muir Wood Lecture 2012, ITA.
- [7]. Gschwandtner, G. (2010) Analytische Berechnungsansätze zum Kennlinienverfahren Masterarbeit, Montanuniversität Leoben.
- [8]. Hoek, E., & Marinos, P. (2000) Predicting tunnel

- squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunneling Int., 11/2000, 12/2000
- [9]. Hoek, E. et al. (2008) The Kersten Lecture: Integration of geotechnical and structural design in tunneling.
- [10]. Italferr: Linee guida per la progettazione, la costruzione ed il collaudo di nuove opere ferroviarie in sotterraneo – Allegato 3.3 - Manuale di progettazione Italferr elab. RFI-DINIC-MA-GA-GN-00-01-A
- [11]. John, M. & Mattle, B. (2003) Shotcrete Lining Design: Factors of Influence. RETC.
- [12]. Kainrath-Reumayer, S. (2008) Ankerung im Untertagebau– Geomechanik und Tunnelbau – S. 345-351
- [13]. Kainrath-Reumayer S., Gschwandtner, G. & Galler R. (2009) Das Kennlinienverfahren als Hilfsmittel für die Bemessung von tiefliegenden Tunnelbauwerken. Geomechanik und Tunnelbau 553-560.
- [14]. Kavvadas, M. 2004. Computational methods in the design of tunnels. Department of civil engineering. National Technical University of Athens. 255 pp. (In Greek)
- [15]. Kielbassa S., Duddeck H. (1991): Stress-strain fields at the tunnelling face – three-dimensional analysis for two-dimensional technical approach; Rock Mech. Rock Eng. 24, 115-132.
- [16]. Marcher, Th., John, M. & Ristic, M. (2011) Determination of Load-Sharing Effects in Sprayed Concrete Tunnel Linings. Underground Construction 2011, London.
- [17]. Panet M et al. (2001) The convergence-confinement method. AFTES Recommendations.
- [18]. Pöttler, R. Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau - Standsicherheit und Verformung im Reißbereich, Beton und Stahlbetonbau Heft 6, 1993
- [19]. Pöttler, R. Standsicherheitsnachweis unbewehrter Innenschalen, Bautechnik 67, 1990
- [20]. RVS 09.01.42 Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung.
- [21]. Radonicic, N.; Schubert, W. (2011) Neues Verfahren zur Vorbemessung eines duktilen Ausbaus; Geomechanics and Tunnelling 4, No. 3
- [22]. Saurer, E.; Höser, S., Mattle, B. - Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 6, 2011
- [23]. Städing, A., Brem, G., Denzer, G., Harpf, R., Kirschke, D., Maidl, B., Schuck, W. Empfehlun-
- squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunneling Int., 11/2000, 12/2000
- [9]. Hoek, E. et al. (2008) The Kersten Lecture: Integration of geotechnical and structural design in tunneling.
- [10]. Italferr: Linee guida per la progettazione, la costruzione ed il collaudo di nuove opere ferroviarie in sotterraneo – Allegato 3.3 - Manuale di progettazione Italferr elab. RFI-DINIC-MA-GA-GN-00-01-A
- [11]. John, M. & Mattle, B. (2003) Shotcrete Lining Design: Factors of Influence. RETC.
- [12]. Kainrath-Reumayer, S. (2008) Ankerung im Untertagebau– Geomechanik und Tunnelbau – S. 345-351
- [13]. Kainrath-Reumayer S., Gschwandtner, G. & Galler R. (2009) Das Kennlinienverfahren als Hilfsmittel für die Bemessung von tiefliegenden Tunnelbauwerken. Geomechanik und Tunnelbau 553-560.
- [14]. Kavvadas, M. 2004. Computational methods in the design of tunnels. Department of civil engineering. National Technical University of Athens. 255 pp. (In Greek)
- [15]. Kielbassa S., Duddeck H. (1991): Stress-strain fields at the tunnelling face – three-dimensional analysis for two-dimensional technical approach; Rock Mech. Rock Eng. 24, 115-132.
- [16]. Marcher, Th., John, M. & Ristic, M. (2011) Determination of Load-Sharing Effects in Sprayed Concrete Tunnel Linings. Underground Construction 2011, London.
- [17]. Panet M et al. (2001) The convergence-confinement method. AFTES Recommendations.
- [18]. Pöttler, R. Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau - Standsicherheit und Verformung im Reißbereich, Beton und Stahlbetonbau Heft 6, 1993
- [19]. Pöttler, R. Standsicherheitsnachweis unbewehrter Innenschalen, Bautechnik 67, 1990
- [20]. RVS 09.01.42 Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung.
- [21]. Radonicic, N.; Schubert, W. (2011) Neues Verfahren zur Vorbemessung eines duktilen Ausbaus; Geomechanics and Tunnelling 4, No. 3
- [22]. Saurer, E.; Höser, S., Mattle, B. - Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 6, 2011
- [23]. Städing, A., Brem, G., Denzer, G., Harpf, R., Kirschke, D., Maidl, B., Schuck, W. Empfehlun-

lungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen, Tunnel 5/2007

- [24]. Sulem, J., Panet, M. & Guenot, A. (1987) An Analytical Solution for Time-dependent Displacements in a Circular Tunnel. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 24, No. 3, pp. 155-164.
- [25]. Terzaghi, K. (1946) Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- [26]. Tamez (1985) in Tanzini, M. (2006) Gallerie. Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione. 583 pg.
- [27]. Vlachopoulos, N. & Diederichs, M.S. (2009) Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnel. Rock Mechanics and Rock Engineering 42; 131-146.

6.4. Anhangverzeichnis

Anhang 1: Ablaufdiagramm

gen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen, Tunnel 5/2007

- [24]. Sulem, J., Panet, M. & Guenot, A. (1987) An Analytical Solution for Time-dependent Displacements in a Circular Tunnel. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 24, No. 3, pp. 155-164.
- [25]. Terzaghi, K. (1946) Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- [26]. Tamez (1985) in Tanzini, M. (2006) Gallerie. Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione. 583 pg.
- [27]. Vlachopoulos, N. & Diederichs, M.S. (2009) Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnel. Rock Mechanics and Rock Engineering 42; 131-146.

6.4. Elenco delle allegati

Allegato 1: Diagramma di flusso

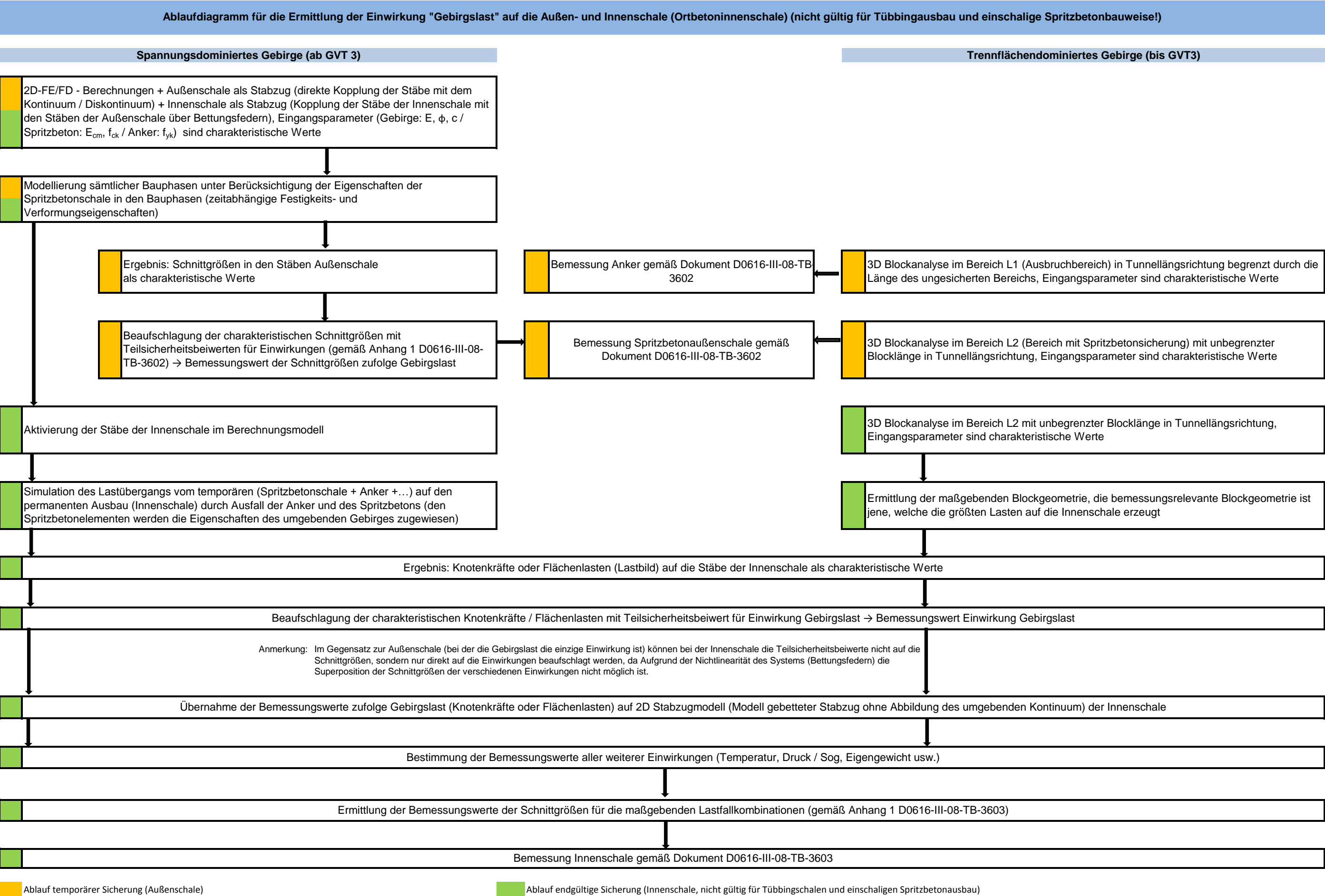


Diagramma di flusso per la determinazione della sollecitazione di "carico roccioso" sul rivestimento esterno e definitivo (rivestimento definitivo in calcestruzzo) (non valido per rivestimento con conci prefabbricati e metodo di costruzione con spritzbeton a rivestimento singolo!)

