Vorerkundung und Prognose der Basistunnels, Löw & Wyss Hrsg. ©1999 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 480 5

Umsetzung der Geologie in technische Massnahmen im Tavetscher Zwischenmassiv Nord

H. Ehrbar & I. Pfenninger
Electrowatt Engineering AG, Zürich, Schweiz

ZUSAMMENFASSUNG: Nach heutigem Kenntnisstand sind das Tavetscher Zwischenmassiv Nord und die Clavaniev-Zone aufgrund ihrer Ausdehnung, Überlagerung und Materialeigenschaften die bautechnisch anspruchsvollsten Abschnitte im Projekt des Gotthard-Basistunnels. Aufgrund der Interpretation der geologischen Erkundungen und unter Berücksichtigung bisheriger Erfahrungen bei Tunnelbauten in ähnlichen Verhältnissen werden bauliche Massnahmen entwickelt, welche dem erwarteten Gebirgstragverhalten Rechnung tragen. Das resultierende Ausbaukonzept basiert auf der Kombination von Ausweich- und Widerstandsprinzip – einem anfänglichen Zulassen grosser Deformationen und dem späteren Aufbringen hoher Widerstände – zur Optimierung des Gesamtaufwandes an Sicherung. Als hauptsächliche Stützmittel kommen Stahleinbaubögen mit begrenzt nachgiebigen Gleitverbindungen und eine Systemankerung mit langen Selbstbohrinjektionsankern zur Anwendung. Das vorliegende Konzept der Ausbruchsicherung zeichnet sich dank der gewählten Kombination von provisorischen Sicherungsmitteln durch seine gute Beobachtbarkeit sowie Flexibilität und Modularität während der Ausführung aus. Diese Eigenschaften sind im Hinblick auf die stark wechselnden geologischen Verhältnisse von grosser Bedeutung. Zusätzlich zu diesen systematischen Massnahmen wird ein breiter Katalog an Besonderen Massnahmen definiert, welcher zur Bewältigung speziell schwieriger Verhältnisse beigezogen werden kann.

1 ANFORDERUNGEN AN DAS PROJEKT TUNNEL SEDRUN

1.1 *Generelle Projektanforderungen*

Erstes Ziel bei der generellen Trassierung des Gotthard-Basistunnels (GBT) war es, die bautechnisch schwierig zu durchörternden Abschnitte auf möglichst kurzem Weg und mit möglichst geringer Überlagerung zu durchqueren. Im Südabschnitt des Gotthard-Basistunnels handelt es sich dabei insbesondere um die Piora-Zone und das nördliche Tavetscher Zwischenmassiv (TZM-Nord) mit der Clavaniev-Zone (CZ).

Weitere Randbedingungen sind das Vermeiden einer direkten Unterfahrung von Talsperren, eine kurze Bauzeit und damit verbunden auch günstige Baukosten. Aus diesen generellen Anforderungen entstand die heute vorliegende Trassierung des Gotthard-Basistunnels und die Einteilung in fünf Teilabschnitte mit drei Zwischenangriffen.

Das Projekt für den Gotthard-Basistunnel sieht zwei Einspurtunnelröhren mit einem Nutzquerschnitt von je 41 m^2 vor. In den Teilabschnitten Sedrun und Faido werden Multifunktionsstellen mit Tunnelwechseln und Nothaltestellen erstellt.

1.2 *Spezielle Randbedingungen im Teilabschnitt Sedrun*

Der Teilabschnitt Sedrun stellt den mittleren der fünf Teilabschnitte des GBT dar. Aufgrund der topographischen und geologischen Gegebenheiten wird das Tunnelniveau im Teilabschnitt Sedrun über einen Zwischenangriff bestehend aus einem 1000 m langen Zugangsstollen und

einem 800 m tiefen Vertikalschacht erschlossen. Vom Schachtfuss aus werden der 4.2 km lange Südvortrieb in Richtung Faido / Bodio und der 2.2 km lange Nordvortrieb in Richtung Amsteg / Erstfeld aufgefahren.

Aus den generellen Projektanforderungen resultiert eine Linienführung, bei welcher das bautechnisch schwierige nördliche Tavetscher Zwischenmassiv und die sich im Norden anschliessende Clavaniev-Zone auf einer Länge von ca. 1150 m zu durchqueren sind.

2 BAUGRUND IM TZM-NORD

2.1 *Geologische Erkundungen*

Das nördliche Tavetscher Zwischenmassiv und die Clavaniev-Zone sind wegen der Lockermaterialüberdeckung oberflächlich schlecht aufgeschlossen. Für die ingenieurmässige Bearbeitung wurden die relevanten Informationen vorwiegend aus den Erkenntnissen von vier Sondierbohrungen aus drei verschiedenen Bohrkampagnen (1990, 1993 und 1997/98) gewonnen. Im geologischen Längsschnitt in Figur 1 sind die in diesem Bereich ausgeführten Sondierbohrungen dargestellt. Mit der Sondierbohrung SB 3.2 wurde das TZM-Nord im Sommer 1998 erstmals vollständig erbohrt. Die Bohrresultate und die zusätzlich durchgeführten In-situ- und Laborversuche bestätigen, dass mit stark heterogenen und bautechnisch anspruchsvollen Verhältnissen zu rechnen ist.

Die Auswertung der Sondierbohrungen ergab, dass das TZM-Nord aus einer engen Wechselfolge von verschiedensten Gesteinsserien aufgebaut ist, die zu ca. 60% aus kakiritisierten bis stark kataklastisch überprägten Schiefern, zu ca. 10% aus weichen Schiefern und Phylliten und zu ca. 30% aus mürben, jedoch mehr oder weniger intakten Gneisen besteht. Das über 1000 m zu durchörternde TZM-Nord lässt sich aufgrund seines hohen Kakiritanteiles strukturgeologisch vereinfachend als eine Art „Mega-Scherzone" zusammenfassen. Obwohl die Auswertung der Bohrung SB 3.2 keinen signifikanten bautechnischen Unterschied zwischen Clavaniev-Zone und TZM-Nord mehr erwarten lässt, hält man an deren Unterteilung fest. Die bautechnische Beurteilung erfolgt jedoch für beide gemeinsam nach demselben Konzept. Die vorliegende Abhandlung widmet sich dementsprechend diesen beiden tektonischen Einheiten, dem TZM-N und der Clavaniev-Zone.

2.2 *Felstypen*

Im Teilabschnitt Sedrun ist aufgrund der geologischen Gegebenheiten mit einer Vielzahl sehr unterschiedlicher Gesteine zu rechnen. Diese vielfältige Geologie soll felsmechanischen Überlegungen durch das Zusammenfassen gewisser lithologischer Einheiten in Felstypen mit zugeordneten Felskennwerten zugänglich gemacht werden. Im Projekt Tunnel Sedrun wurden 12 charakteristische Felstypen definiert. Davon treten im TZM Nord die in der Tabelle 1 aufgelisteten Felstypen auf.

Tabelle 1. Felstypenverteilung im nördlichen Tavetscher Zwischenmassiv inkl. Clavaniev-Zone (ohne Streubreiten).

Felstyp	Lithologie	Prozentualer Anteil [%]	entsprechende Länge [m]
harte Gesteinsformationen mit sprödem Bruchverhalten			
D	Quermuskovitgneise	29	334
weichere Gesteinsformationen mit duktilem Bruchverhalten			
F	Schiefer	8	97
G	Phyllit	1	10
Zwischensumme		9	107
Kakiritisierte Gesteinsformationen mit duktilem Bruchverhalten			
D*	kakiritisierter Gneis	24	273
F*	kakiritisierter Schiefer	14	159
G*	kakiritisierter Phyllit	1	12
H-J	Zonaler Kakirit- Plastischer Kakirit	23	260
Zwischensumme		62	704

* kakiritisierter Fels

3 BEURTEILUNG DER GEOLOGIE

3.1 *Generelles Vorgehen*

Auf Basis der geologischen Prognose des Projektgeologen erfolgt die bautechnische Beurteilung der Geologie durch den Projektingenieur. Im Rahmen dieser bautechnischen Beurteilung abstrahiert der Ingenieur die in der Natur vorkommenden, äusserst komplexen geologischen Verhältnisse in einfachen, transparenten Modellen. Diese Gebirgsmodelle dienen zur Erfassung des zu erwartenden Gebirgstragverhaltens und müssen die daraus resultierenden relevanten Gefährdungen während und nach der Erstellung des Hohlraums aufzeigen. Diese Beurteilung der Geologie erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Projektgeologen in den folgenden Schritten:

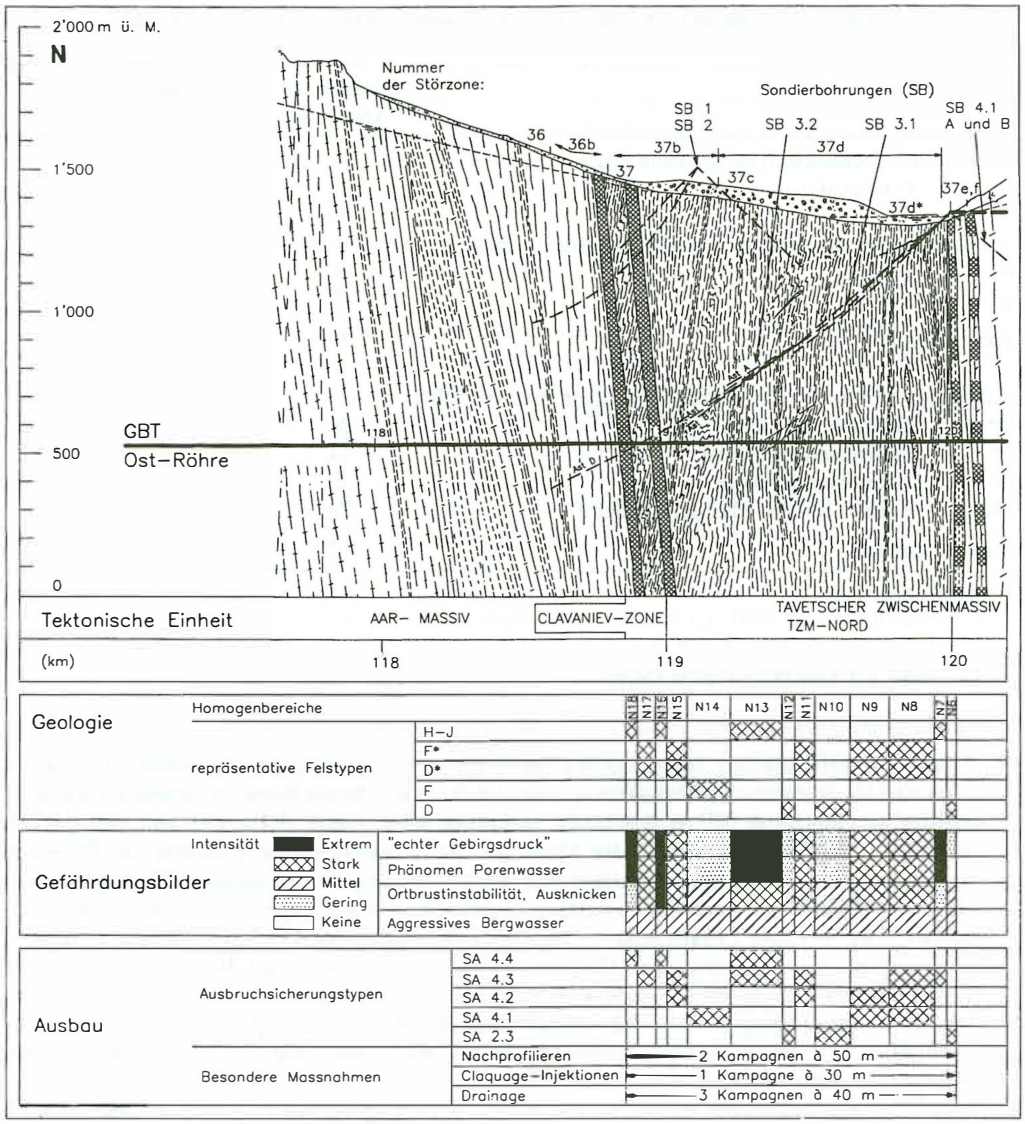
- Einteilung des zu durchörternden Gebirges in Homogenbereiche auf Basis des geologisch-geotechnischen Längsprofils (vgl. Kap. 3.2)
- Definition eines Gebirgsmodells für jeden Homogenbereich (vgl. Kap. 3.3)
- Bestimmung der massgebenden Gefährdungsbilder und Beurteilung deren Intensität für jeden Homogenbereich (vgl. Kap. 3.4)

Figur 1 zeigt schematisch einen Auszug aus dem geologisch-bautechnischen Längenprofil, welches diese Schritte, das Resultat der Beurteilung der Geologie und die bautechnische Umsetzung planlich erfasst.

3.2 *Homogenbereiche*

Unter einem Homogenbereich wird ein Abschnitt entlang des Bauwerks mit relevanter Längenausdehnung verstanden, in welchem die Felseigenschaften soweit homogen sind, als sie innerhalb einer charakteristischen Bandbreite liegen.

Für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone werden 13 Homogenbereiche ausgeschieden (vgl. Fig. 1). Sie weisen eine Längenausdehnung von mehreren Dekametern bis mehrere hundert Meter auf. Trotz stark wechselhafter Gesteinsfolge im TZM-Nord und in der Clavaniev-Zone erweist sich die Einteilung in Homogenbereiche als eine im Hinblick auf die Ausführung angemessene Vereinfachung.



Figur 1. Auszug aus dem geologisch-bautechnischen Längenprofil (schematisch).

3.3 *Gebirgsmodelle*

Zur felsmechanischen Erfassung und Beurteilung der verschiedenen Gefährdungen in den einzelnen Homogenbereichen werden sogenannte Gebirgsmodelle definiert. Diese Gebirgsmodelle sollen einfach und transparent gewählt werden, müssen jedoch die massgebenden Gefährdungen in den wesentlichen Zügen wirklichkeitsgetreu wiedergeben.

Als massgebende Modellparameter werden für den Tunnel Sedrun die Struktur des Gebirges, die Überlagerung, die Materialeigenschaften des Gebirges entsprechend den definierten Felstypen und allfällige Wasserein flüsse berücksichtigt.

Die Struktur des Gebirges wird für die felsmechanische Erfassung der Gefährdung aus dem druckhaften Gebirge stark vereinfacht. Die einzelnen Homogenbereiche werden alle als Kontinua mit homogen-isotropen felsmechanischen und hydraulischen Materialeigenschaften des Gebirges beschrieben. Das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone erfahren durch diese Strukturmodellierung eine starke Vereinfachung der prognostizierten Verhältnisse der stark wechselhaften Abfolge unterschiedlicher und teilweise geringmächtiger Schichten. Zur Erfassung der

Gefährdung aus dem druckhaften Gebirgsverhalten handelt es sich dabei jedoch um eine notwendige und angemessene Vereinfachung. Mit dieser Strukturmodellierung des TZM-Nord und der Clavaniev-Zone ergibt sich eine Abfolge von als Kontinua modellierten Homogenbereichen. Für die felsmechanische Erfassung spielen insbesondere die Ausdehnung der einzelnen Bereiche und allfällige angrenzende bessere (stützende) Bereiche eine Rolle.

Den mit der Strukturmodellierung definierten Kontinua werden repräsentative Felstypen zugeordnet. Für die felsmechanische Erfassung werden diesen Felstypen konkrete felsmechanische Eigenschaften, also Deformations- und Festigkeitseigenschaften zugeteilt (vgl. Tab. 2). Von grosser Bedeutung für die korrekte bautechnische Beurteilung ist dabei die Wahl einer genügend umfassenden Bandbreite der Felskennwerte.

Tabelle 2. Bandbreite der Felstypen im TZM-N (inkl. Clavaniev-Zone) mit charakteristischen Kennwerten (Mittelwerte, ohne Angabe der berücksichtigten Streumasse).

Felstyp	Lithologie	Raumgewicht	E-Modul small strain	Quer-dehnung	Reibungswinkel Spitze	Reibungswinkel Rest	Kohäsion Spitze	Kohäsion Rest
		kN/m3	GPa	-	°	°	kPa	kPa
harte Gesteinsformationen mit sprödem Bruchverhalten								
D	Quermuskovitgneise	26	25	0.20	36	34	2000	500
weichere Gesteinsformationen mit duktilem Bruchverhalten								
F	Schiefer	26	15	0.20	30	30	150	150
G	Phyllit	26	10	0.25	28	28	100	100
Kakiritisierte Gesteinsformationen mit duktilem Bruchverhalten								
D*	kakiritisierter Gneis	24 - 26	20	0.25	34	34	400	400
F*	kakiritisierter Schiefer	24 - 26	12	0.20	30	30	120	120
G*	kakiritisierter Phyllit	24 - 26	8	0.25	28	28	75	75
H	Zonaler Kakirit	24 - 26	7.5	0.30	26	26	75	75
J	Plastischer Kakirit	24 - 26	2	0.30	24	24	250	250

* kakiritisierter Fels

Die Erfassung anderer massgebender Gefährdungen insbesondere an der Ortbrust (vgl. Kap. 3.4) kann eine Verfeinerung der oben geschilderten Strukturmodellierung des TZM-Nord und der Clavaniev-Zone erfordern, welche die heterogene Abfolge verschiedener Gesteinsschichten differenzierter wiedergibt.

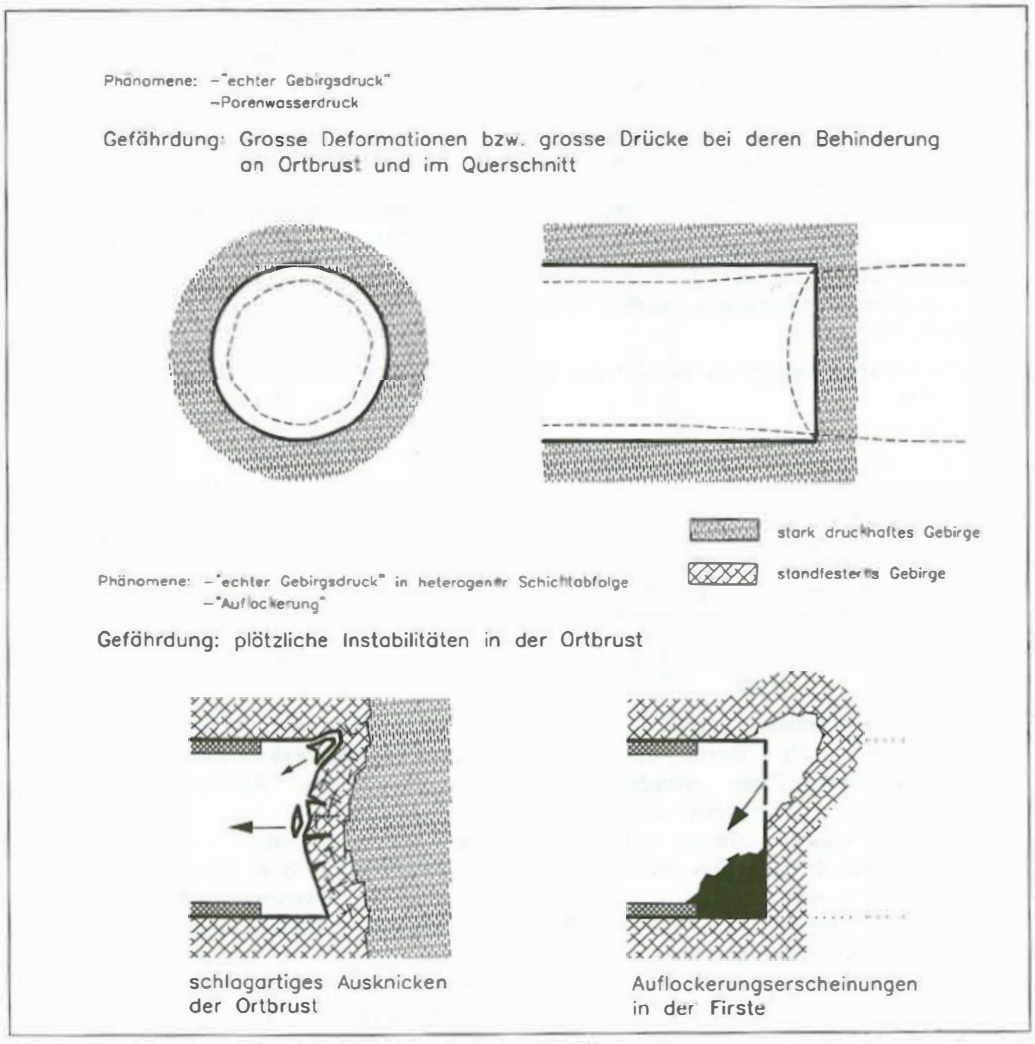
Hinsichtlich Wassereinflüssen gilt es, die Art der Wasserzirkulation (Klüfte/Poren), die Durchlässigkeiten des Gebirges und die initialen Bergwasserspiegel bzw. Bergwasserdrücke im Gebirgsmodell zu erfassen. Es ist grundsätzlich zwischen den Phänomenen Kluftwasser und Porenwasser zu unterscheiden. Für das TZM Nord und die Clavaniev-Zone ist in erster Linie das Phänomen Porenwasser von Bedeutung, da davon auszugehen ist, dass die lockermaterialähnlichen, wenig durchlässigen Gesteine wassergesättigt sind und der initiale Porenwasserdruck auf Tunnelniveau aufgrund des prognostizierten Bergwasserspiegels 800 m über Tunnelniveau einen Wert von ca. 8 MPa erreichen kann. Die Beobachtungen aus den Sondierbohrungen bestätigen diese Aussagen. Die weicheren und kakiritisierten Gesteine des TZM Nord weisen tiefe Durchlässigkeiten mit k-Werten zwischen 10^{-8} m/s und 10^{-10} m/s auf.

3.4 *Gefährdungsbilder*

Mit den definierten Gebirgsmodellen werden schliesslich die relevanten Gefährdungsbilder erfasst und beurteilt. Ein solches Gefährdungsbild umschreibt eine Kombination bestimmter Gefahren, welche die Sicherheit der Belegschaft und der Maschinen bzw. die Hohlraumstabilität beeinträchtigen können. Die Definition von Gefährdungsbildern ermöglicht eine logische Zuordnung der verschiedenen Ausbruchsicherungstypen an unterschiedliche geotechnische Verhältnisse bzw. an die einzelnen festgelegten Homogenbereiche (vgl. Fig. 1).

Die folgenden Gefährdungsbilder werden für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone mit teilweise hoher Intensität erwartet (vgl. Fig. 2):

- „echter Gebirgsdruck"
- Phänomen Porenwasserdruck
- Ortbrustinstabilitäten
- aggressives Bergwasser



Figur 2. Massgebende Gefährdungsbilder im TZM-Nord und in der Clavaniev-Zone.

Das Phänomen des echten Gebirgsdruckes hat grosse Gebirgsdeformationen (radial und in der Ortbrust) bzw. grosse Gebirgsdrücke bei deren Behinderung zur Folge. Die Gefährdungen daraus liegen konkret in:

- Unzulässigen Konvergenzen des Gebirges an der Ortbrust und im Querschnitt vor dem Einbringen der Ausbruchsicherung oder bei zu schwacher Ausbildung derselben und in der
- Zerstörung bzw. Überbeanspruchung der Ausbruchsicherung oder des definitiven Innengewölbes.

Diese Effekte erweisen sich als langsame Vorgänge, die keine akute Gefährdung der Arbeitssicherheit darstellen, solange der Ausbau nicht zu steif gewählt wird und geeignete Beobachtungsmethoden vorgesehen sind.

Der Einfluss eines Porenwasserdrucks auf die Erstellung des Tunnelhohlraums lässt sich bis heute nicht eindeutig quantifizieren. Entsprechend schwierig erweist sich dessen Interpretation und Gewichtung für die Dimensionierung des Ausbaus. Rein phänomenologisch kann festgehalten werden, dass sich das Phänomen Porenwasserdruck durch die folgenden zwei Effekte manifestiert:

- Reduktion der effektiven Normalspannungen im Gebirge,
- Strömungskräfte im Gebirge aufgrund der sich nach dem Ausbruch bzw. infolge Drainage einstellenden Gradienten.

Beide Effekte verstärken das Phänomen des druckhaften Gebirges bzw. führen zu grösseren Deformationen oder zu höheren Gebirgsdrücken bei der Behinderung der Deformationen. Im Modell wird zur Berücksichtigung des Phänomens Porenwasser deshalb der Ansatz eines entsprechend ausgeprägteren druckhaften Gebirges gewählt.

Ortbrustinstabilitäten, die ein akutes Problem der Arbeitssicherheit darstellen, können in folgenden Situationen im Vortriebsbereich auftreten:

- Plötzliches Versagen der Ortbrust in Form eines Ausknickens beim Durchfahren heterogener Schichtpakete bzw. beim Übergang von einer standfesteren Schicht in einen stark druckhaften Bereich,
- plötzliches Einbrechen der Ortbrust beim Übergang von einer kaum durchlässigen Schicht in eine durchlässigere durch den hohen Druckgradienten bei grossen initialen Wasserdrücken,
- Auflockerungserscheinungen in der Firste.

4 BAUTECHNISCHE UMSETZUNG

4.1 *Einleitung*

Unter Berücksichtigung der gesamten Bandbreite der abzudeckenden Gebirgsmodelle und der daraus resultierenden Gefährdungsbilder wird für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone ein Ausbaukonzept erarbeitet und in konkrete Ausbruchsicherungstypen umgesetzt. Dabei gilt es, jeweils die richtigen Kombinationen von Sicherungsmitteln für die verschiedenen Gefährdungsbilder zu wählen. Neben dem daraus entstehenden Katalog von Ausbruchsicherungstypen, die systematisch eingesetzt werden sollen, werden zusätzlich Besondere Massnahmen definiert. Die Zuteilung aller baulichen Massnahmen entlang des Tunnels wird im geologisch-bautechnischen Längenprofil festgehalten (vgl. Fig. 1).

4.2 *Profilform*

Als Profilform für die Einspurtunnelröhren im TZM-Nord und der Clavaniev-Zone wird ausschliesslich das Kreisprofil vorgesehen. Es erweist sich für die Beanspruchung der provisorischen Ausbruchsicherung und des Innengewölbes aus dem echten Gebirgsdruck als geeignetste Profilform.

4.3 *Vortriebsmethode*

Die Vortriebsmethode beschreibt die Art des Lösens des Gebirges. Die Erschliessung der Tunnelbaustellen über den Vertikalschacht und die erwarteten geologischen Randbedingungen schliessen einen TBM-Vortrieb aus. Für die stark plastischen Gesteine des TZM-Nord und der Clavaniev-Zone wird ein konventioneller Vortrieb mit einem Tunnelbagger (Schaufel, Abbauhammer, Ripperzahn etc.) vorgesehen. In standfesteren Formationen kann auch der Einsatz von Lockerungssprengungen notwendig sein.

4.4 *Ausbruchart*

Als Ausbruchart für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone wird ausschliesslich der Vollausbruch vorgesehen. Zur Bewältigung schlechter Gebirgsverhältnisse ist man in der Regel bestrebt, die Ausbruchfläche möglichst klein zu halten bzw. die Ausbruchfläche zu unterteilen. Insbesondere im stark druckhaften Gebirge wie im TZM-Nord und der Clavaniev Zone erweist sich jedoch auch ein rascher Ringschluss und damit das rasche Erreichen des optimalen Kreis-

profils als zwingend. Ein Kalottenvortrieb wird aufgrund der im Vortriebsbereich sehr ungünstigen geometrischen Profilform, die lokale Spannungskonzentrationen und grosse Deformationen zur Folge hat, ab einem gewissen Ausmass an Druckhaftigkeit des Gebirges als nicht mehr ausführbar beurteilt. Die Erkenntnisse aus der Sondierbohrung SB 3.2 lassen darauf schliessen, dass dieses Ausmass an Druckhaftigkeit für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone zu erwarten ist, weshalb der Kalottenvortrieb in diesem Bereich ausgeschlossen wird. Für den gesamten Nordvortrieb des Tunnel Sedrun wird ausschliesslich der Vollausbruch vorgesehen.

4.5 *Ausbaukonzept*

4.5.1 *Grundsätze des Ausbaukonzepts*

Die folgenden Nutzungsanforderungen sind durch den Bauherrn vorgegeben und dementsprechend im Projekt zu berücksichtigen:

- Zweischaliger Ausbau mit Schirmabdichtung,
- die provisorische Ausbruchsicherung gilt als nicht tragend im Betriebszustand.

Im folgenden werden der Ausbruchquerschnitt und die Ortbrust getrennt erläutert, da verschiedene Gefährdungsbilder für die Definition der Ausbruchsicherung massgebend werden.

4.5.2 *Provisorische Ausbruchsicherung im Querschnitt*

Für die provisorische Ausbruchsicherung im Querschnitt ergibt sich die massgebende Beanspruchung aus dem stark druckhaften Verhalten des Gebirges. Die enge Wechselbeziehung zwischen Ausmass der Deformationen und Ausmass an Gebirgsdruckäusserungen bei Behinderung der Deformationen durch den provisorischen oder definitiven Ausbau charakterisiert das Phänomen des druckhaften Gebirgsverhaltens. Dabei ist insbesondere die Erfahrung, dass der Gebirgsdruck und somit der aufzubringende Ausbauwiderstand mit zunehmenden Gebirgsdeformationen abnimmt, für die Definition der baulichen Massnahmen von grosser Bedeutung.

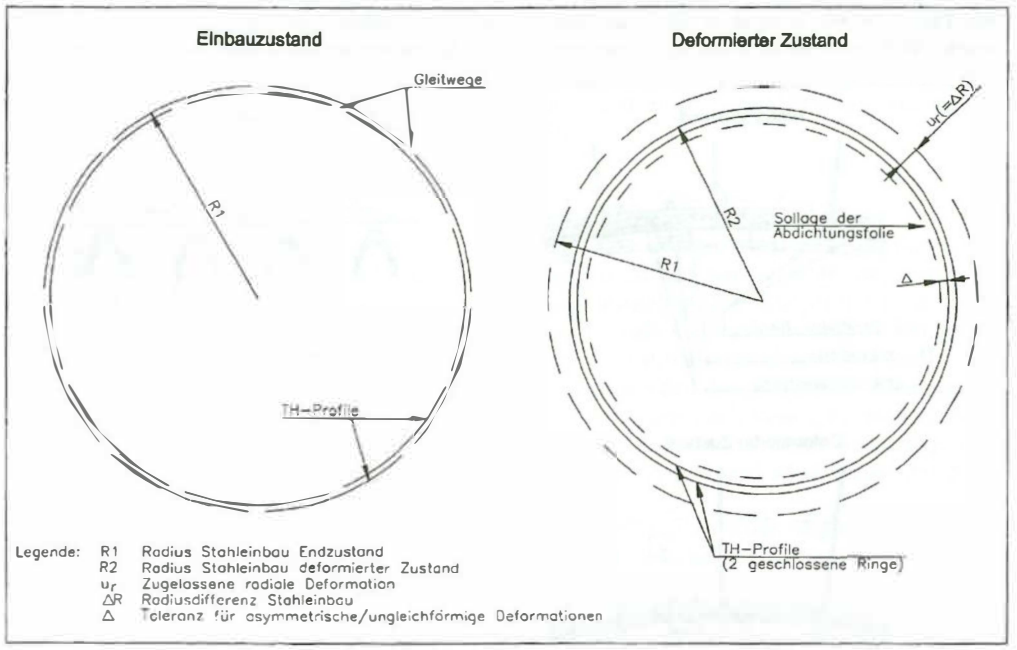
Gebirgskennlinien sind ein einfaches Hilfsmittel zur Wiedergabe dieses Zusammenhangs von radialen Deformationen und Ausbauwiderständen im Tunnelquerschnitt. Sie zeigen alle theoretisch möglichen Grenzgleichgewichtspunkte (radiale Deformationen vs. Ausbauwiderstand) für ein bestimmtes Gebirgsmodell auf. Mit Hilfe dieser Kennlinien werden die schlechtesten zu erwartenden Verhältnisse im TZM-Nord und der Clavaniev-Zone untersucht.

Diese schlechtesten zu erwartenden Verhältnisse werden mit folgendem Gebirgsmodell beschrieben: Felstyp J, 900 m Überlagerung, keine stützenden Effekte aus allfälligen angrenzenden besseren Gesteinsschichten. Die Gebirgskennlinie für dieses Gebirgsmodell zeigt, dass zur Gewährleistung eines Gleichgewichts bei sofortigem Einbau eines steifen Ausbaus ohne vorgängige Deformationen sehr grosse Ausbauwiderstände erforderlich werden. Diese können mit den bekannten und bewährten Sicherungsmitteln nicht aufgebracht werden.

Das gewählte Ausbaukonzept für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone sieht deshalb die Anwendung zweier verschiedener Ausbauprinzipien in zeitlicher Abfolge vor. In einer ersten Phase funktioniert das Ausbaukonzept nach dem Ausweichprinzip, das sich durch ein kontrolliertes Zulassen von Deformationen nach einem dafür vorgesehenen Mehrausbruch auszeichnet. Diese Phase wird durch die Phase des Widerstandsprinzips abgelöst. Ein ausreichend dimensionierter Ausbauwiderstand soll in dieser Phase jegliche weiteren Deformationen verhindern. Mit diesem Verfahren erfährt das Gebirge durch das anfängliche Zulassen von Deformationen eine gewisse Entlastung und der Sicherungsaufwand zur Gewährleistung eines Gleichgewichtszustandes wird reduziert. Dies kommt einer Optimierung des Gesamtaufwandes an Sicherung gleich.

Der Stahleinbau erweist sich aus konstruktiven und materialtechnischen Gründen als geeignetes Sicherungsmittel zur kontrollierten Aufnahme von Gebirgsdeformationen in Kombination mit einem hohen Ausbauwiderstand nach Ablauf des Deformationsvorganges, d.h. in der Phase des Widerstandsprinzips. Er stellt das Hauptelement der provisorischen Sicherung im Projekt für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone dar. Der vorgesehene Stahleinbau setzt sich aus zwei ineinandergelegten Glockenprofil-Ringen (TH-Profile) zusammen, die aus mehreren Segmenten bestehen. Diese werden unter Anwendung begrenzt nachgiebiger Verbindungen zusammengefügt, die über klar definierte Gleitwege ein gewisses Mass an radialen Deformationen zulassen. Nach erfolgter Deformation bzw. nach vollständigem Erschöpfen aller Gleit-

wege und Übergang auf das Widerstandsprinzip tragen zwei vollständige Stahlringe zum Ausbauwiderstand bei (vgl. Fig. 3 und 4).



Figur 3. Prinzipskizze zum Konzept des Stahleinbaus: doppelt geführter Stahlring aus zweimal 8 Segmenten; Einbauzustand und idealisierter Endzustand (nach Ablauf des Deformationsvorganges).

Zusätzlich zum Stahleinbau wird eine Systemankerung mit langen Selbstbohrankern vorgesehen. Die Erfahrungen mit Tunnelbauten in stark druckhaften Verhältnissen zeigen, dass früh versetzte lange Anker einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des Gebirgstragverhaltens leisten. Ihre Wirkung wird insbesondere in der Vergleichmässigung des Tragverhaltens im Querschnitt angenommen, was zur Verbesserung des Tragverhaltens des Stahleinbaus beiträgt.

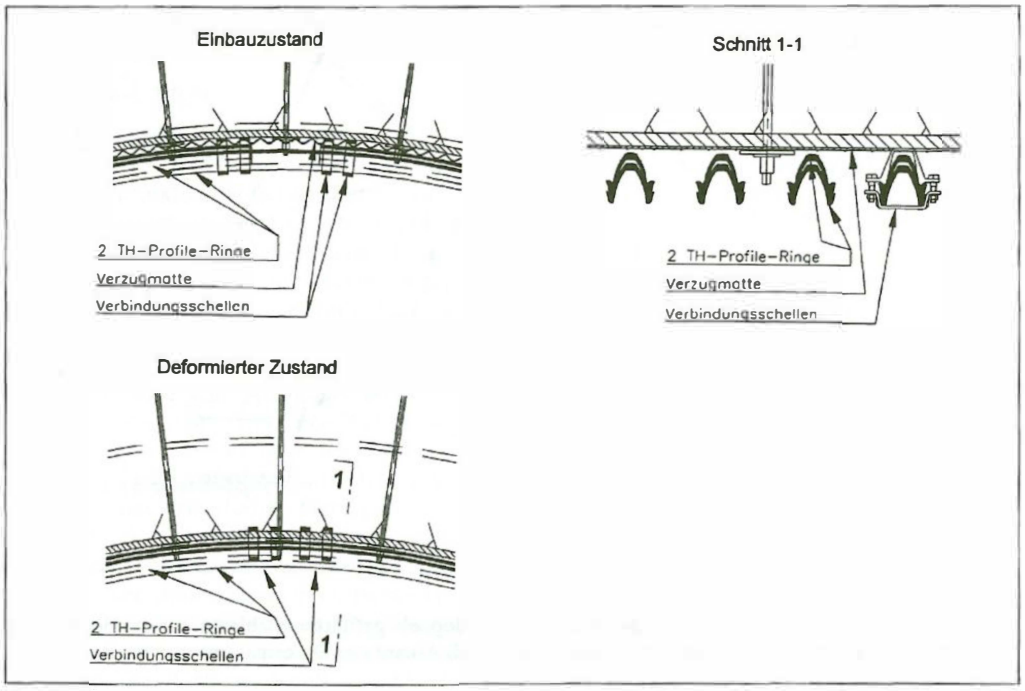
Mit dem Stahleinbau und der Systemankerung kommen während der Ausweichphase ausschliesslich miteinander verträgliche, deformierbare Sicherungsmittel zur Anwendung. Dabei ist in dieser Phase die Beobachtbarkeit des Deformationsverhaltens und die Anwendung eines ausführlichen baubegleitenden Messprogramms von grosser Bedeutung.

Nach dem Übergang zur Widerstandsphase, d.h. nach dem Erschöpfen aller Gleitwege des Stahleinbaus können auch steifere Sicherungsmittel wie Spritzbeton- oder Betonschalen zur Anwendung gelangen. Zur sauberen Bettung des Stahleinbaus und damit zur Gewährleistung deren vollen Tragkapazität werden die geschlossenen Stahlringe eingespritzt. Gewisse Abweichungen vom stark idealisierten Deformationsverhalten des Stahleinbaus gemäss Figur 3 werden mit Toleranzen berücksichtigt.

Die Wahl der Grösse der zugelassenen Deformationen bzw. des Mehrausbruchs und des damit zusammenhängenden erforderlichen Ausbauwiderstandes (mögliche Gleichgewichte gemäss Gebirgskennlinie) kann innerhalb einer gewissen Bandbreite frei erfolgen. Dabei müssen die konstruktiven und materialtechnischen Randbedingungen der baulichen Massnahmen und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

Entsprechend werden die konstruktiven und materialtechnischen Grenzen des Stahleinbaus, dem vorgesehenen Hauptelement der provisorischen Sicherung, bezüglich Deformationsvermögen und Ausbauwiderstand ermittelt. Die maximal aufnehmbaren radialen Deformationen ergeben sich aus der maximal zulässigen Radiusdifferenz von 10% des Biegeradius, die der Stahleinbau – wie die Erfahrungen mit den TH-Profilen zeigen – ohne Beeinträchtigung des Einschub- und Tragverhaltens bewältigen kann. Im Projekt entspricht dies etwa 65 cm radialer

Deformation. Als engster praktisch ausführbarer Bauabstand der Stahlbogen werden 33 cm betrachtet. Mit dem System zweier ineinander geschachtelter Stahlbogen ergeben sich damit maximal 6 Stahlbogen pro Tunnelmeter, die zum Ausbauwiderstand beitragen. Mit dem stärksten Profil TH44/70 wird in der Widerstandsphase ein Ausbauwiderstand von ca. 2.8 MPa erreicht. Während der Ausweichphase entspricht der Ausbauwiderstand ungefähr 10% davon.



Figur 4. Stahleinbau TH-Profile: begrenzt nachgiebige Verbindungen.

Zur Bewältigung des schlechtesten anzunehmenden Gebirgsmodells für das TZM-Nord und die Clavaniev-Zone müssen die oben erläuterten konstruktiven und materialtechnischen Möglichkeiten des Stahleinbaus voll ausgeschöpft werden. Um die Unsicherheiten aus der geologischen Prognose und aus der bautechnischen Beurteilung abdecken zu können, werden über dieses Ausbaukonzept hinaus zusätzlich sogenannte Besondere Massnahmen vorgesehen (vgl. Kap. 4.7).

4.5.3 *Provisorische Sicherung der Ortbrust*

Für die Ortbrustsicherung, die im Gegensatz zur radialen Sicherung im Querschnitt durch den ständigen Baufortschritt laufend abgebaut und in Etappen wieder neu eingebaut werden muss, gilt es, zwei verschiedene Phänomene zu betrachten (vgl. Fig. 2):

- Die Gefährdung aus dem Phänomen des echten Gebirgsdruckes zeigt sich mit einem langsamen Hineindrücken des Gebirges in den Hohlraum
- Ortbrustinstabilitäten mit der Folge eines z.T. schlagartigen Versagens der Ortbrust.

Hinsichtlich Arbeitssicherheit ist das zweite Phänomen massgebend. Dieser Gefährdung wird mit einer grossen Zahl 12 m langer Selbstbohranker laufend mit dem Vortrieb entgegengewirkt. Um die Deformationen aus dem ersten Phänomen wirksam zu reduzieren, werden längere Anker (18 m) erforderlich.

4.5.4 *Abdichtung*

Einer möglichen Gefährdung des Bauwerks im Betriebszustand durch aggressives Bergwasser wird mit dem Einsatz einer drucklosen Vollabdichtung begegnet.

4.5.5 *Innengewölbe*

Die Dimensionierung des Innengewölbes erfolgt den Projektvorgaben entsprechend ohne Berücksichtigung eines Mitwirkens der provisorischen Sicherung.

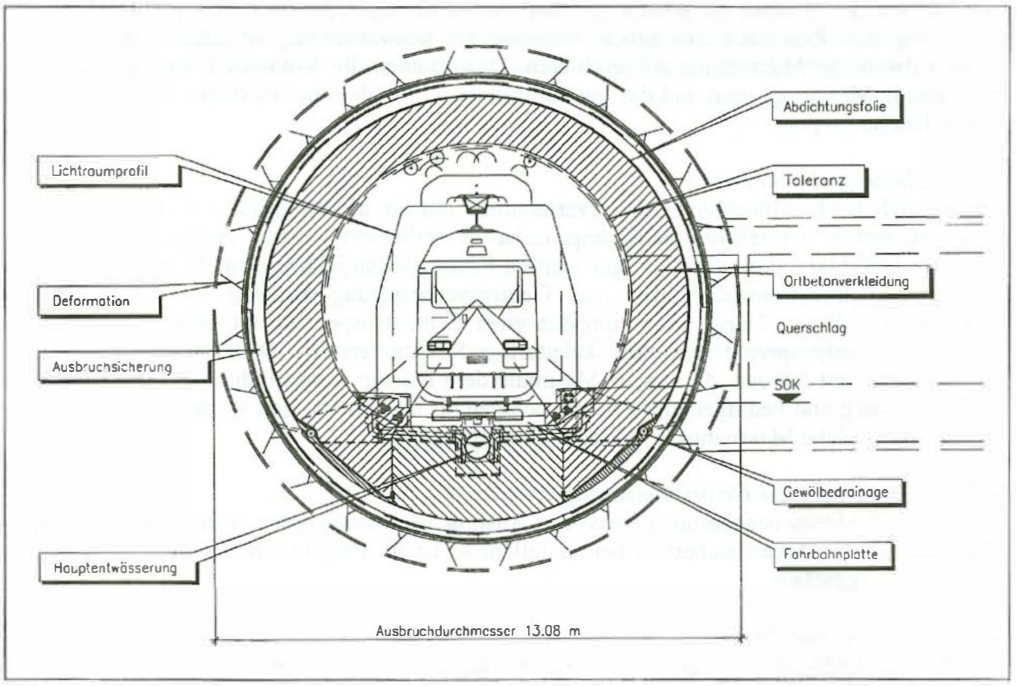
Grundsätzlich wird für den gesamten Gotthard-Basistunnel angenommen, dass die Aussenfläche des Innengewölbes permanent drainiert werden kann, d.h. im Normalfall wird kein Wasserdruck auf die Innenschale berücksichtigt. Für den Bereich des TZM Nord wird dem schwer erfassbaren Phänomen Porenwasserdruck jedoch mit einer Zusatzbelastung aus einem Wasserdruck von 50 m Wassersäule Rechnung getragen.

4.6 *Ausbruchsicherungstypen*

Auf Basis des erarbeiteten Ausbaukonzeptes (vgl. Kap. 4.3) werden konkrete Ausbruchsicherungstypen definiert. Der stärkste Ausbruchsicherungstyp ist auf das schlechteste, anzunehmende Gebirgsmodell gemäss vorangehender Definition ausgelegt und schöpft die konstruktiven Möglichkeiten des Stahleinbaus voll aus. Er lässt eine totale Gebirgsdeformation von 1.0 m (inkl. Deformationen vor der Ortbrust) bei einem totalen Ausbauwiderstand von über 3 MPa zu.

Ausgehend von diesem stärksten Ausbruchsicherungstyp werden drei weitere, in Ausmass an Ausbruchquerschnitt und Sicherungsmittel abgestufte Untertypen nach dem gleichen Ausbaukonzept definiert. Dies erfolgt unter Berücksichtigung einer systematischen Abstufung von Bauabständen und Ankerrastern zur Gewährleistung der Flexibilität und Modularität des Systems während der Ausführung („Baukastensystem").

Auf Basis dieses Katalogs an Ausbruchsicherungstypen erfolgt die Zuteilung im geologisch-bautechnischen Längenprofil für jeden Homogenbereich entsprechend den massgebenden Gefährdungsbildern und deren Intensität (vgl. Fig. 1).



Figur 5. Normalprofil zum stärksten Ausbruchsicherungstyp für das TZM-Nord.

Figur 5 zeigt das Normalprofil zum stärksten Ausbruchsicherungstyp mit einem Ausbruchdurchmesser von 13.1 m. Der Querschnitt von 134 m² ergibt sich aus dem erforderlichen Lichtraumprofil, einem Mehrausbruch für Deformationen von 70 cm, einer konstruktiven Stärke der Ausbruchsicherung von 55 cm, einem Innengewölbe von 1.20 m Stärke und diversen Toleranzmassen.

4.7 *Besondere Massnahmen*

4.7.1 *Einleitung*

Mit den Ausbruchsicherungstypen sind diejenigen Massnahmen definiert, die im Erwartungsfall systematisch zur Anwendung gelangen. Die Unsicherheiten aus der geologischen Prognose und der bautechnischen Beurteilung sind damit nur zum Teil abgedeckt. Sollten sich Deformationen bzw. Gebirgsdrücke einstellen, die das erwartete Mass überschreiten, wird auf zusätzliche Besondere Massnahmen zurückgegriffen. Für die Durchörterung des TZM-Nord und der Clavaniev-Zone wurde folgender Katalog von Besonderen Massnahmen definiert:

- nachträgliches Nachprofilieren des Profils
- Claquage-Injektionen
- Verstärkung der Ortbrustankerung
- lange Vorausdrainagen

Schlechtere geologische Verhältnisse als prognostiziert sollen mit den Voraussondierungen frühzeitig erkannt werden und den rechtzeitigen Einsatz Besonderer Massnahmen ermöglichen.

4.7.2 *Nachprofilieren*

Das Nachprofilieren sieht ein nachträgliches Aufweiten des Profils bei unzulässigen Deformationen im Tunnelquerschnitt vor. Solche unzulässigen Deformationen können die Folge einer Überbeanspruchung des Ausbaus in der Phase des Widerstandsprinzips sein, oder auch aus stark asymmetrischer Verformungen des gesamten Ausbaus resultieren. Das Nachnehmen des Profils erfordert vorgängig den Ausbau des Stahleinbaus und eines allfälligen Spritzbetons sowie das Ablängen der Systemankerung und nachträglich das Ersetzen der Ausbruchsicherung.

Eine Überbeanspruchung des Ausbaus kann durch schlechtere geologische Verhältnisse als prognostiziert begründet sein. Aber auch Fehleinschätzungen der anstehenden Verhältnisse vor Ort können den Einbau zu schwacher Ausbruchsicherungstypen und damit eine Überbeanspruchung derselben zur Folge haben. Während der Bauausführung ist alles zu unternehmen, diese aufwendige Massnahme zu verhindern. Dazu dienen die Voraussondierungen, das baubegleitende Messprogramm und das gut beobachtbare, flexible und modulare System der Ausbruchsicherungtypen.

4.7.3 *Claquage-Injektionen*

Stellen sich noch schlechtere Gebirgsverhältnisse ein als die aufgrund der Bohrung SB 3.2 prognostizierten, müssen die Gebirgseigenschaften verbessert werden. Aufgrund der äusserst geringen Durchlässigkeit des Gebirges werden Penetrationsinjektionen nicht zum Ziel führen. Als einzige Injektionsmöglichkeit zur Gebirgsverbesserung kommen deshalb Claquage-Injektionen in Frage. Durch das Einpressen einer Zementsuspension mit hohen Drücken wird das Gebirge aufgesprengt und eine skelettartige Struktur erstellt. Dadurch soll das Gebirge soweit verbessert werden, dass es im Minimum dem Felstyp J entspricht. Solche Massnahmen sind aufwendig und bedingen einen mehrwöchigen bis mehrmonatigen Vortriebsunterbruch. Im Projekt sind solche Massnahmen in Einzelfällen vorgesehen.

4.7.4 *Verstärkung der Ortbrustankerung*

Sollte sich die Ortbrustankerung gemäss den Ausbruchsicherungstypen als nicht ausreichend im Hinblick auf die Arbeitssicherheit herausstellen, so ist im Projekt eine teilweise Verstärkung derselben vorgesehen.

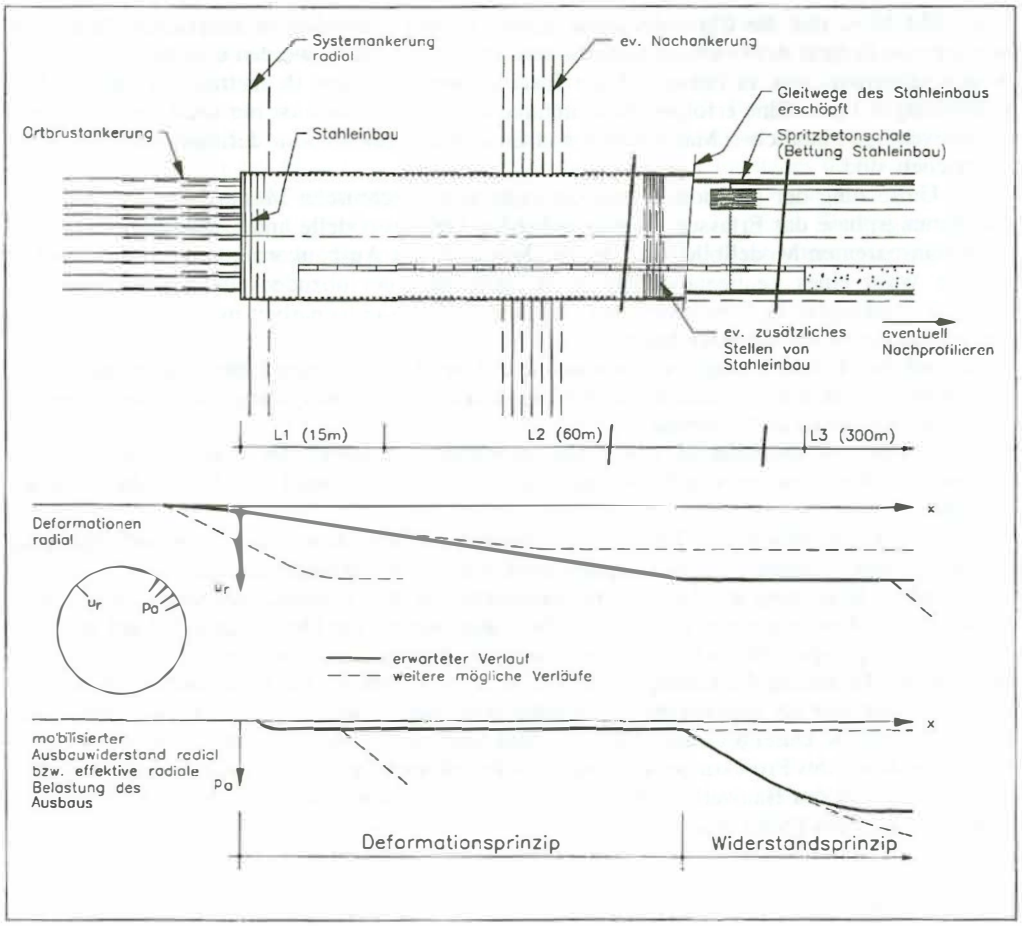
4.7.5 *Lange Vorausdrainagen*

Die Abfolge mehr oder weniger durchlässiger Schichten kann ungünstige Druckverhältnisse aus dem vorhandenen Bergwasserspiegel auf die Ortbrust zur Folge haben. Falls sich ein Wasserdruck hinter einer undurchlässigen Schicht aufbaut, muss der Druck auf die Ortbrust vorgängig durch eine systematische Drainage abgebaut werden, um ein plötzliches Einbrechen der Ortbrust zu verhindern. Damit sich die Drainagewirkung über eine genügende Zeit entwickeln kann, müssen die Bohrungen eine ausreichende Länge aufweisen. Im Projekt wird ein Fächer verrohrter, 40 m langer Bohrungen im First vorgesehen.

4.8 *Vorgesehener Bauablauf*

Für die Gesamtbauzeit des Gotthard-Basistunnels ist es von erheblicher Bedeutung, dass in den geologisch schwierigen Zonen die angenommenen Vortriebsleistungen von 0.8 m/AT bis 1.5 m/AT auch wirklich erreicht werden. Eine systematische Unterschreitung der Leistungsannahmen kann eine erhebliche Bauzeitverlängerung zur Folge haben. Die angestrebten Leistungswerte lassen sich nur dann erzielen, wenn ein auf die vorgesehene Baumethode abgestimmtes Installationskonzept zur Anwendung kommt. Erfahrungen aus dem Bergbau zeigen, dass unter Anwendung der entsprechenden Geräte ein leistungsfähiger Vortrieb auch bei massivem Stahleinbau sichergestellt werden kann.

Im TZM-Nord und in der Clavaniev-Zone spielen die Voraussondierungen in Kombination mit dem baubegleitenden Messprogramm eine bedeutende Rolle. Sie ermöglichen eine Optimierung der vorgesehenen baulichen Massnahmen während der Ausführung. Der Bauablauf im TZM-Nord und in der Clavaniev-Zone muss diesem Aspekt mit der Gewährleistung eines ausreichenden Handlungsspielraums für nachträgliche Modifikationen an den eingebauten Ausbruchsicherungstypen, also für Sicherungsarbeiten aller Art über eine gewisse Distanz hinter der Ortbrust gebührend Rechnung tragen.



Figur 6. Vorgesehener Bauablauf im TZM-Nord im Längsschnitt (schematisch), Verlauf der Deformationen und der Belastung der Sicherung.

Nach dem Einbau eines Ausbruchsicherungstyps im Ortbrustbereich, dessen Wahl aufgrund der Voraussondierungen und der Erfahrung aus der bereits aufgefahrenen Strecke erfolgt, werden Deformationsmessungen durchgeführt. Während der Phase des Ausweichprinzips werden

aufgrund des damit erfassten Deformationsverlaufs Entscheide bezüglich Ergreifen zusätzlicher Massnahmen gefällt. Es wird angenommen, dass die Phase des Ausweichprinzips spätestens bis 75 m hinter der Ortbrust abgeschlossen ist und durch das Widerstansprinzip abgelöst wird. Das Installationskonzept muss über diese Distanz zusätzliche Sicherungsarbeiten über den gesamten Querschnitt ermöglichen, wie z.B. das Stellen zusätzlicher Stahlbogen, das Nachankern während des Deformationsvorgangs und das Einbringen einer Spritzbetonschale nach Abschluss des Deformationsvorgangs (vgl. Fig. 6).

Nach Abschluss des kontrolliert zugelassenen Deformationsvorgangs, also beim Übergang auf das Widerstandsprinzip, bleiben die Deformationen aus. Es baut sich ein Ausbauwiderstand auf. Dieser Vorgang kann im Gegensatz zum vorgängigen Deformationsablauf messtechnisch schlecht erfasst werden. Während dieser Phase bis spätestens zum Einbau des definitiven Innengewölbes erfolgt keine Anpassung des Ausbaus mehr. Ein Nachprofilieren muss jedoch in Ausnahmefällen möglich sein.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das TZM Nord und die Clavaniev-Zone zählen zu den bautechnisch anspruchsvollsten Abschnitten im Projekt des Gotthard-Basistunnels. Diese Abschnitte werden über den Schacht Sedrun erschlossen, was in bezug auf die Installationen und den Baubetrieb zu einigen Einschränkungen führt. Eine erfolgreiche Durchquerung dieser Zonen ist nur dann möglich, wenn die notwendigen baulichen Massnahmen und Entscheidungswege klar definiert und vertraglich abgesichert sind.

Die Umsetzung der prognostizierten Geologie in bautechnische Massnahmen beinhaltet in der Planungsphase das Erfassen der massgebenden Gebirgsmodelle und Gefährdungsbilder mit einer transparenten Modellbildung. Für die Definition des Ausbaukonzepts wird insbesondere auf die Wahl eines genügend umfassenden Spektrums der abzudeckenden Gebirgsmodelle geachtet. Umfangreiche Sondierarbeiten und eine enge Zusammenarbeit mit dem Projektgeologen tragen diesen Aspekten Rechnung.

Das auf dieser Basis projektierte Ausbaukonzept weist die folgende Eigenschaften auf:

- Anwendung einer Kombination von Ausweich- und Widerstandsprinzip zur Optimierung des Gesamtaufwandes an Sicherung,
- Flexibilität und Modularität sowie Beobachtbarkeit während der Ausführung dank der gewählten Kombination von Sicherungsmitteln und der Systematik der Ausbruchsicherungstypen,
- zusätzliche Definition von Besonderen Massnahmen zur Bewältigung speziell schlechter Verhältnisse (Nachprofilieren, Claquage-Injektionen, Drainagemassnahmen).

Besondere Beachtung gilt bei diesem Ausbaukonzept der Voraussondierung und dem baubegleitenden Messprogramm, die der Entscheidungsfindung vor Ort bezüglich Wahl der Ausbruchsicherungstypen als auch der Optimierung des Projekts während der Ausführung dienen. Die laufende Erfassung der Geologie vor Ort, die Verifikation der Prognose und die Umsetzung neuer Erkenntnisse im angewandten Ausbaukonzept sind ein weiterer wesentlicher Bestandteil zur erfolgreichen Durchörterung dieser bautechnisch anspruchsvollen Abschnitte. Die enge Zusammenarbeit des Projektingenieurs mit dem Projektgeologen erweist sich für eine erfolgreiche Realisierung des Bauwerks insbesondere in solch schwierigen, heterogenen Verhältnissen in allen Phasen des Projekts als zwingend.

LITERATUR

Gehriger, W. 1994. Das Vorprojekt des Gotthard Basistunnels. In *Tagungsband Symposium Basistunnel durch die Alpen, 24./25. März 1994. Zürich: ETH Zürich.*

Kovári, K. 1998. Tunnelbau in druckhaftem Gebirge. *Tunnel* 5/98, München: 12-31.

Sala, A. 1998. Erfassen des Gebirges im Untertagbau, AlpTransit Gotthard. *Einführungstagung zur Empfehlung SIA 199, 26. Nov. 1998, Fribourg.*

Schneider, T.R. 1997. Behandlung der Störzonen beim Projekt des Gotthard-Basistunnels. *Felsbau* 15(6): 489-495.