



Die Zentralbahn.

Tunnel Engelberg

Tunnelausbau in der Quintnerkalk-Strecke

Kurzbericht über die Konzepterarbeitung

Auftrags Nr.: 51602	Format:		Datum: 04. Mai 2007
Verfasser: Sid	Kontrolliert: He	Genehmigt:	zb Registratur Code:
Geändert:			
A:	A:	A:	
B:	B:	B:	
C:	C:	C:	
D:	D:	D:	Plan Nr.: 981.6-R-6
PROJEKTVERFASSER			
INGENIEURGEMEINSCHAFT LSE STEILRAMPE			
Lombardi AG	Via R. Simen 19	CH-6648 Minusio	Tel. 091/744 60 30 Fax 091/743 97 37
Henauer Gugler AG	Sonnenplätzli 7	CH-6430 Schwyz	Tel. 041/818 81 41 Fax 041/818 81 51
Ing.-Büro Gasser & Partner AG	Obseestrasse 11	CH-6078 Lungern	Tel. 041/679 09 00 Fax 041/679 09 01
Postadresse: c/o Henauer Gugler AG	Sonnenplätzli 7	CH-6430 Schwyz	Tel. 041/818 81 41 Fax 041/818 81 51

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	3
2. ZIELSETZUNG UND ANFORDERUNGEN	4
3. LÖSUNGSFINDUNGSPROZESS	5
3.1 Studium und Analyse des hydrogeologischen Baugrundmodells	5
3.2 Auslegung der Lösungsansätze	6
3.3 Wahl einer repräsentativen Variante für jeden Lösungsansatz	7
3.4 Prüfung der technischen Machbarkeit	13
3.5 Vergleich und Bewertung der Varianten	16
4. WAHL DES BESTKONZEPTS	18
5. SICHERHEITSÜBERLEGUNGEN BEI DER LÖSUNG MIT DRUCKLOSER WASSERABLEITUNG	19
6. ANTRAG FÜR WEITERBEARBEITUNG UND DESSEN BEGRÜNDUNG	20

1. EINLEITUNG

Der vorliegende Kurzbericht über die Konzepterarbeitung stellt eine Zusammenfassung des Berichts "*Tunnelausbau in der Quintnerkalkstrecke - Konzepterarbeitung und Antrag für die Wahl der weiter zu bearbeitenden Variante*" (981.6-R-2) dar. Auf Details wird bewusst verzichtet und es wird auf eine allgemein verständliche Formulierung Wert gelegt. Der Schwerpunkt der Erläuterungen liegt auf dem schliesslich gewählten Lösungskonzept "drucklose Ableitung". Es werden ausschliesslich von diesem Lösungskonzept detailliertere Schemen und Pläne dargestellt.

Der Tunnel Engelberg ist heute samt den beiden Portalbauwerken im Rohbau fertig erstellt. Ausnahme bilden der Einbau der berg- sowie talseitigen Tunnelbankette sowie der Ausbau der Strecke in den rund 300m langen Quintnerkalken im mittleren Tunnelabschnitt.

Nach dem verheerenden Hochwasserereignis vom August 2005 und den dadurch verursachten Schäden im Tunnel wurden die Wassereintrittstellen gesichert und die stark wasserführende Karsthöhle mit einer kontrollierten Ableitung in die Tunnelkanalisation versehen. Somit konnte der Bestand des ausgeführten Bauwerks auch für den Fall eines nächsten Hochwassers gewährleistet werden.

Im Herbst 2006 wurde das Geologiebüro Dr. von Moos AG zu einer Neuüberprüfung der hydrogeologischen Verhältnisse, als Basis für die Projektierung des definitiven Tunnelausbaus in der Quintnerkalkstrecke, beauftragt. Die aus diesem Studium hervorgegangenen Erkenntnisse sind in einem Bericht (Bericht Nr. 8228, 5.4.2007) erläutert.

Auf der Grundlage dieser Neubeurteilung sind die Vorgaben und Randbedingungen für die Konzeptstudie für den definitiven Tunnelausbau festgelegt worden.

2. ZIELSETZUNG UND ANFORDERUNGEN

Hauptziel der vorliegenden Konzeptstudie ist die Evaluierung einer technisch machbaren und dauerhaften Lösung für die Quintnerkalkstrecke. Angesichts der ausserordentlich schwierigen Verhältnisse, was die zu bewältigenden extremen Wasserdrücke und -mengen anbetrifft, hat die Gesamtprojektleitung vorgegeben, bei der Erarbeitung die technischen Faktoren vorrangig zu werten und die Belange der Wirtschaftlichkeit, der Umweltbeeinflussung, der Bewilligungstauglichkeit und der Realisierungszeit nicht in die primäre Beurteilung einfließen zu lassen.

Neben den für Bahntunnel „normalen“ Anforderungen, wie

- Verfügbarkeit, Funktionsfähigkeit und Sicherheit
- Vertretbarer jährlicher Aufwand für Unterhalt
- Nutzungsdauer 100 Jahre, usw.

sind die beiden folgenden Eckwerte für die statische und hydraulische Dimensionierung des Projekts festgelegt worden:

- Das Gewölbe muss im Falle einer vollkommen druckhaltigen Auskleidung auf einen maximalen von aussen wirkenden gleichförmigen Wasserdruck von 540 m Wassersäule ausgelegt werden;
- Für den Fall einer drucklosen Verkleidung und freier Gebirgsentwässerung ist eine maximale Gebirgswassermenge von 1'100 Liter/sec. schadlos abzuleiten.

Man war sich von allem Anfang an bewusst, dass diese Anforderungen extrem hoch sind. Ein Bauwerk, welches einem Wasserdruck mit einer Druckhöhe von 540 Metern standhält ist noch nirgends realisiert worden; die Höhe entspricht rund dem doppelten der höchsten Staumauern. Andererseits stellt die im Falle der Ableitung zu bewältigende Wassermenge eine Grössenordnung dar, die wohl in hydraulischen Bauwerken, aber nicht in Verkehrstunneln üblich ist.

3. LÖSUNGSFINDUNGSPROZESS

Der Lösungsfindungsprozess war folgendermassen aufgebaut:

1. Studium und Analyse des hydrogeologischen Baugrundmodells
2. Auslegung der Lösungsansätze
3. Wahl einer repräsentativen Variante für jeden Lösungsansatz
4. Prüfung der technischen Machbarkeit
5. Vergleich und Bewertung der Varianten
6. Wahl des Bestkonzepts und Antrag an den Tunnelausschuss

Nachfolgend werden die Schritte kurz erklärt und die jeweils daraus gezogenen Schlussfolgerungen erläutert.

3.1 Studium und Analyse des hydrogeologischen Baugrundmodells

In einem ersten Schritt wurde das hydrogeologische Baugrundmodell (Bericht Nr. 8228, 5.4.2007) studiert und analysiert. Unter Einbezug von zahlreichen, in früheren Projektierungsphasen erstellten, geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen, sowie Erhebungen und Erfahrungen konnten die oben bereits erwähnten wichtigsten Kenndaten abgeleitet werden:

- maximal zu erwartende Wasserdruckhöhe von 540 m bei der Variante mit "druckhaltigem Ausbau", respektiv ein auf der Kote 1'300 m ü.M. liegender Grundwasserspiegel.
- maximal zu erwartender Abfluss bei der Variante "drucklose Wasserableitung" beträgt 1'100 l/s respektiv maximal 10-20 l/s pro Laufmeter.

3.2 Auslegung der Lösungsansätze

Diese Phase beinhaltet die Auslegung grundsätzlicher Lösungsansätze. Zwischen den beiden Extremen „drucklose Wasserableitung“ sowie „druckhafter Ausbau“ existieren zahlreiche Zwischenlösungen (Abbildung 1).

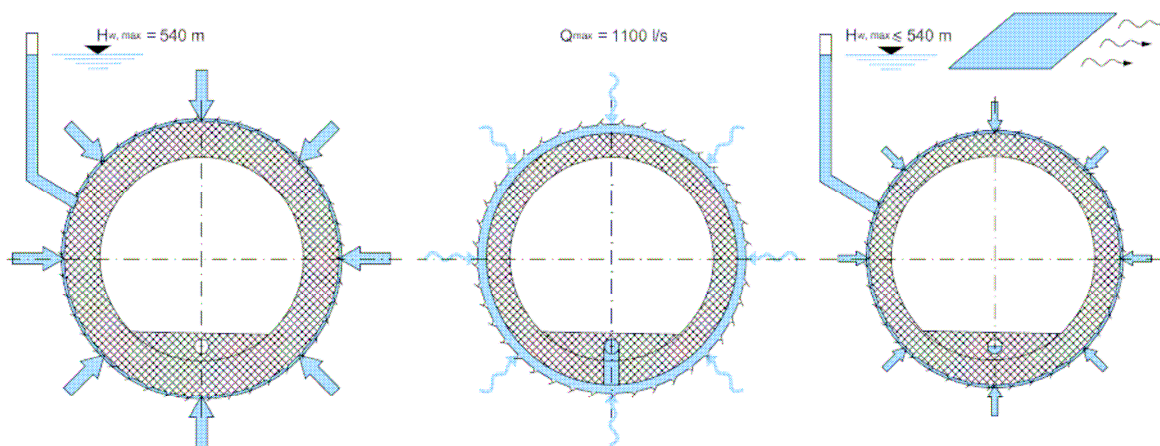


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lösungsansätze (v.l.n.r.: „druckhafter Ausbau“, „drucklose Wasserableitung“, „Zwischenlösung(-en)“)

Die Zwischenlösungen mit teilweiser Druckentlastung und entsprechender Wasserableitung sehen vor, einen gewissen Wassereinstau zuzulassen (dargestellt mit einer blauen Ebene in Abbildung 1), jedoch bei Überschreitung dieses Niveaus das Wasser abzuleiten, so dass der Dimensionierungswasserdruck nicht überschritten werden kann. Der Zusammenhang zwischen Wasserdruck und dem entsprechend zu erwartender Wassermenge kann trotz intensiver hydrogeologischer Analyse nicht genau evaluiert werden. Sehr vereinfacht stellt Abbildung 2 diesen Zusammenhang schematisch dar: Je höher das „eingestellte“ Wasserdruckniveau, desto geringer sind die zu erwartenden abzuleitenden Wassermengen, resp. je geringer das Wasserdruckniveau umso grösser sind die abzuleitenden Wassermengen.

Lösungen zwischen „drucklose Wasserableitung“ und „druckhafter Ausbau“

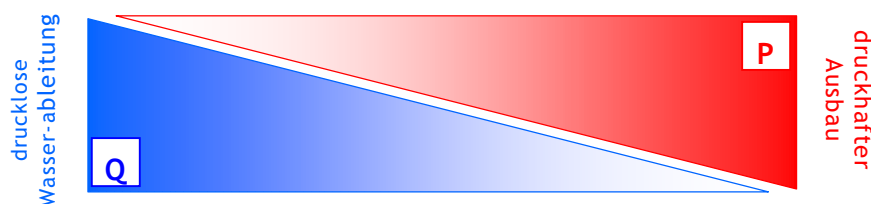


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Wasserdruck p und der entsprechend zu erwartende Wassermenge Q

3.3 Wahl einer repräsentativen Variante für jeden Lösungsansatz

Im Sinne einer nachvollziehbaren Einordnung innerhalb des anvisierten Variantenfelders sind die grundsätzlich möglichen und untersuchten Lösungen in der folgenden Tabelle 1 nochmals schematisch dargestellt und mit Stichworten in ihrer Wirkungsweise erläutert. Da es im Rahmen der Konzeptstudie nicht möglich und im Bestreben nach Übersichtlichkeit auch nicht sinnvoll ist, jede einzelne Variante detailliert auszuarbeiten, wird von jeder Gruppe mindestens eine repräsentative Variante dargestellt, geprüft und beurteilt, zumindest was die technische Machbarkeit anbetrifft.

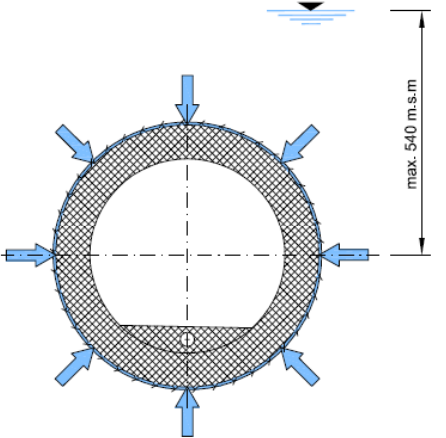
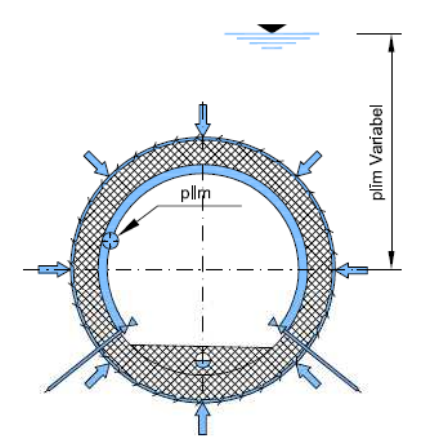
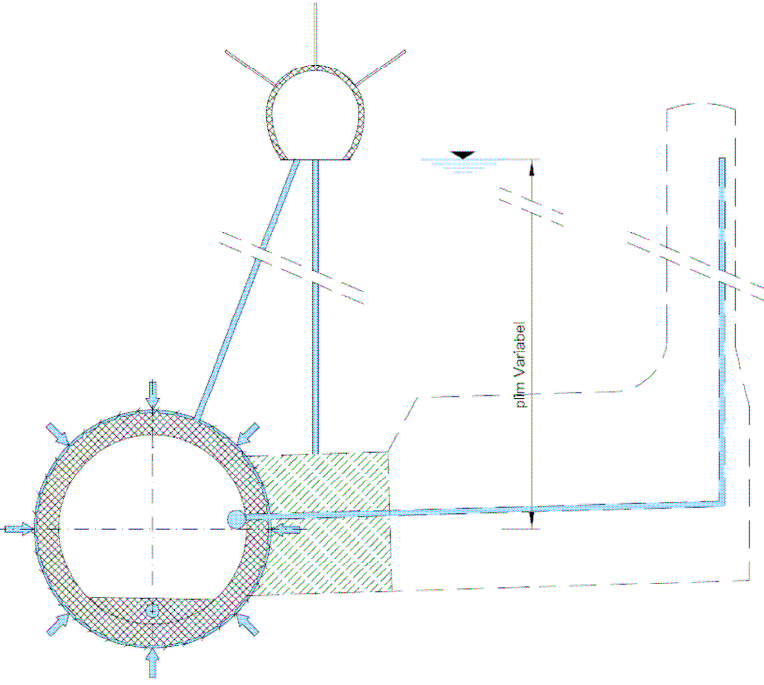
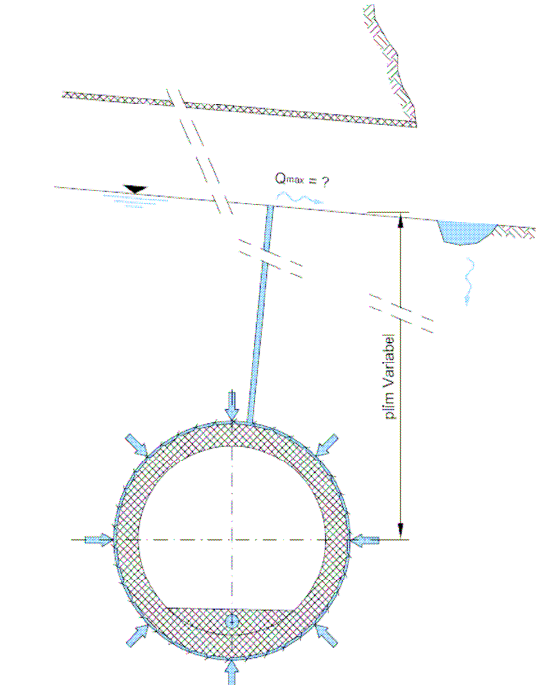
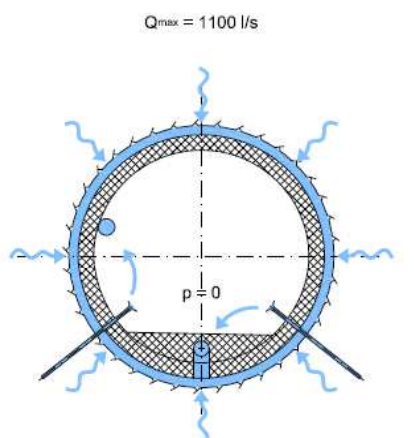
Voll druckhaltiger Ausbau	Lösungen mit beschränkter Druckhaltung und Drainageüberlauf			Voll drainierender Ausbau
	Druckentlastung am Tunnelprofil	Druckentlastung durch Nebenbauwerke	Druckentlastung durch separaten Stollen nach Aussen	
<p>Schemaskizze:</p> 	<p>Schemaskizze:</p> 	<p>Schemaskizze:</p> 	<p>Schemaskizze:</p> 	<p>Schemaskizze:</p> 
<p>Kurzbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> □ $p_{max} = 540$ m W.S. □ Dichtungshaut aus Stahl erforderlich □ Weitgreifende Einbindung in benachbarte Palfrismergelschiefer □ Minimaler Unterhalt 	<p>Kurzbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> □ $p_{lim} =$ variabel □ Druck durch Ventile festgelegt □ Wasserableitung durch Tunnel, wenn p_{lim} überschritten wird □ Gesamtwassermenge im Tunnel reduziert □ Periodischer Unterhalt im Tunnel erforderlich 	<p>Kurzbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> □ $p_{lim} =$ variabel □ zugängliche Entlastungs- bzw. Nebenbauwerke erforderlich □ Wasserableitung durch Tunnel, wenn p_{lim} überschritten wird □ Gesamtwassermenge im Tunnel reduziert □ Periodischer Unterhalt im Tunnel erforderlich 	<p>Kurzbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> □ $p_{lim} =$ variabel □ separat zugängliche Entlastungs- bzw. Nebenbauwerke erforderlich □ Wasserableitung separat nach aussen, wenn p_{lim} überschritten wird □ Kein Gebirgswasser im Tunnel □ Periodischer Unterhalt erforderlich (ausserhalb des Tunnels) 	<p>Kurzbeschreibung:</p> <ul style="list-style-type: none"> □ $p = 0$ m W.S. □ $Q_{max} = 1'100$ l/s □ Wasserableitung durch Tunnel □ Periodischer Unterhalt erforderlich

Tabelle 1: Schematische Darstellung der Ausbausysteme in der Quintnerkalkstrecke (p : Wasserdruck, p_{lim} : maximaler ("einstellbarer") Wasserdruck, m W.S. : Druckhöhe in Metern Wasser (-säule))

3.3.1 Variante mit druckhaltigem Ausbau

Mit dieser Variante ist vorgesehen, den gesamten Quintnerkalkabschnitt druckhaltig auszubauen. D.h. vom Anschluss Nord bis zum Anschluss Süd wird das Tunnelgewölbe auf einen Wasserdruck entsprechend einem Wasserspiegel auf Kote 1'300 m ü.M. ausgebaut. In den Randzonen, d.h. in den Übergängen zu den Palfrisformationen, werden Anschlüsse erstellt, welche verhindern, dass der Ausbau der angrenzenden Hufeisenprofile von unzulässig hohen Wasserdrücken belastet wird, resp. übermässiger Wassereindrang die Anforderungen der Dichtigkeitsklasse verletzen. Diese Variante erfordert folgende Bauteile:

- **Anschluss Nord** (Länge 60 m) mit einem radialen dichtenden Injektionsschirm und einem Drainageschirm auf der trockenen Seite des Injektionsschirms . Der Injektionsschirm mindert den hydraulischen Gradienten (resp. vergrössert den Sickerweg) auf einen zulässigen Wert. Der Drainageschirm gewährleistet einerseits den Druckabbau in genügender Distanz zum Gewölbe und führt andererseits Wassermengen über die Bohrlöcher ab, so dass die Dichtigkeitsanforderungen am Tunnelgewölbe selbst eingehalten werden können.
- **Tunnelgewölbe aus Ortbeton mit aussenliegender Stahlhaut** als Abdichtung. Eine zuverlässig abdichtende Aussenhaut ist bei diesen hohen Wasserdrücken zwingend erforderlich, so dass der 1.50 m mächtige Betonring trocken wirken kann (Verhinderung von grossen Wasserdruckgradienten innerhalb der Tragstruktur).
- **Anschluss Süd** (Länge 60 m) analog zum Anschluss Nord, wobei die Einbindung, der Injektionsschirm und die auf der drucklosen Seite angeordneten Drainagebohrungen an die schleifende Kontaktfläche zwischen den Kalken und den Mergeln angepasst werden müssen.

3.3.2 Variante mit druckloser Wasserableitung

Diese Variante sieht vor, den gesamten Quintnerkalkabschnitt zu drainieren. D.h. vom Portal Nord bis zum "Anschluss Süd" wird das Entwässerungssystem auf eine Wassermenge von 1'100 l/s dimensioniert. Die erforderlichen Bauteile sind (schematischer Längsschnitt siehe Abbildung 3 sowie Anhang A):

- **Entwässerungssystem Portal Nord bis Anschluss Quintnerkalkstrecke Nord.** Für die Lösung der Wasserableitung wird die Kapazität der bestehenden Bergwasserdrainage (600 l/s) auf 1'100 l/s erhöht.
- Die Wasserfassung Tm 1'700 im **Anschluss Nord** bleibt bestehen. Der Abfluss der wasserführenden Kluft wird weiterhin lokal gefasst und in die Bergwasserleitung eingeleitet.
- **Innengewölbe aus Ortbeton in Blöcken und dazwischenliegenden offenen Ringfugen**, welches einer Restbelastung widersteht. Als Grundlage für den Konzeptvergleich wurde eine Gewölbstärke von 70 cm gewählt. Das Gebirgswasser kann in die Fugen direkt, oder längs eines vollflächigen Drainageraums (Noppenfolie) in die Fugen einfließen. Zwecks Konzentrierung der Wasserausstritte in die Fugen können von den Fugen aus Drainagebohrungen erstellt werden. In der Konzeptstudie wird von einem Fugenabstand von 6 m ausgegangen.
- **Fuss zur Karsthöhle und Kreuzungsbereich der Störzone:** Die Ableitung im bestehenden Entlastungsschacht bei Tm 1'942 wird im Konzept belassen. Mit den bestehenden Rohren ist die Entwässerung der Karsthöhle (bis 700 l/s) gewährleistet. In Bereichen, wo die Gefährdung durch Auswaschen besteht, kann die Ringfuge felsseitig mit einem gelochten Blech ergänzt werden. Weiter ist vorgesehen, bei der Querung des Tunnels mit der Störzone das erosionsanfällige Gesteinsmaterial mit Injektionen zu verfestigen. Die Entwässerungsrohre aus dem Schacht münden in eine neu zu erstellende seitliche Kammer nördlich von Tm 1'942 (Energievernichtung, Absetzung ev. Feststoffe). Von dieser Kammer, welche inspizierbar und zugänglich ist, wird das Wasser kontrolliert in die Rigole eingeleitet. Aus der Kammer können zusätzliche Bohrungen in Richtung der Klufthöhle erstellt werden, für den Fall, dass die bestehenden Entlastungsrohre mit der Zeit in ihrer Wirkung eingeschränkt sein sollten.
- Im **Anschluss Süd** ist die bisher vorgesehene Einbindungslänge des kreisrunden Tunnelprofils in die Palfrismergel ausreichend.

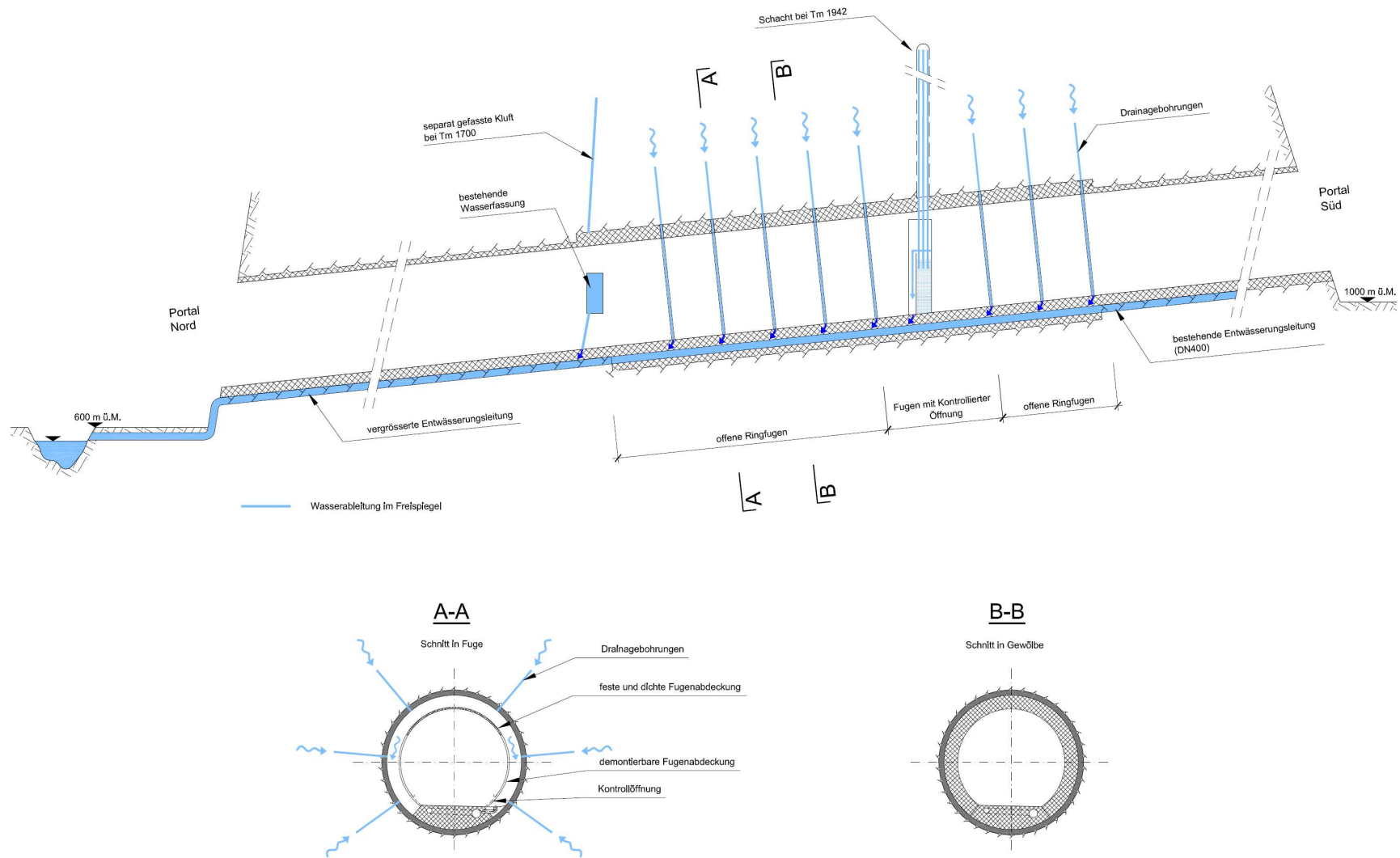


Abbildung 3: Schematischer Längsschnitt der Variante mit offenen Ringfugen

3.3.3 Variante(n) mit teilweiser Druckentlastung und entsprechender Wasserableitung

Bei diesen Lösungen wird das Gebirgswasser beim Übersteigen des definierten Grenzdruckes abgeleitet (via Tunnel oder nach aussen). Damit ergeben sich Vorteile, indem tunnelnahe Gebirgswasserströmungen und allenfalls damit zusammenhängende Erosionserscheinungen eliminiert werden. Zur besseren Übersicht verweisen wir auf die Tabelle 1. Details und Skizzen zu den Varianten sind aus dem Bericht 981.6-R-2 zu entnehmen.

Druckentlastung am Tunnelprofil

Das Tunnelgewölbe ist "geschlossen" und Wasserableitung wird in einem geschlossenen, unter Druck funktionierendem Rohrsystem bis zum Nordportal abgeleitet. Die Druckregulierung (z.B. max. 100 m W.S. bei Tm 1700) erfolgt an einem einzigen Ort (z.B. Nordrand der Quintnerkalkstrecke). In einer Druckleitung lassen sich wesentlich höhere Wassergeschwindigkeiten realisieren, als im Freispiegelablauf, womit die Rohrdimensionen kleiner gehalten werden können.

Nebenbauwerk vom Tunnel aus

Dieser Lösungsansatz beinhaltet einen separaten Drainagestollen, welcher südlich der Quintnerkalkstrecke bergseits vom Tunnel abzweigt und sich Richtung Norden steigend über die ganze Quintnerkalkstrecke, oder einen grossen Teil davon, erstreckt. Dieser vom Tunnel aus zugängliche Drainagestollen ist mit der Karsthöhle verbunden und verläuft im Mittel 40 - 70 m über dem Bahntunnel. Das Entwässerungssystem wird mit systematisch angeordneten, gegen den Tunnel gerichteten Bohrungen ergänzt. Die Überlaufmöglichkeit besteht sowohl für das Wasser aus dem Karstkanal bei Tm 1'945 als auch für das Bergwasser im Quintnerkalk zwischen Tm 1'700 und Tm 2'000. Das Wasser wird in einer Bergwasserleitung mit vergrößerter Kapazität durch den Tunnel in Richtung Portal Nord abgeführt.

Entwässerungstollen nach aussen

Als für die Konzeptdiskussion repräsentativ wurde die Lösung mit einem Zugangstollen ab Forststrasse (auf Kote 895 m ü.M.), kombiniert mit einem Entwässerungstollen mit Wasserrückgabe auf Kote 860 m ü.M. betrachtet. Mit dem separaten Mikrotunnel kann eine geeignete Wasserrückgabestelle bei der Engelberger Aa erreicht werden. Die beiden Stollenteile bilden ein Y und münden bergseits in einen rund 100 m über dem Bahntunnel parallel verlaufenden Drainagestollen. Auch diese Lösung erfordert eine durchgehende Serie von steilstehenden Drainagebohrungen bis auf Tunnelniveau sowie einen dichten und minimal bis 100 m Wassersäule tragfesten Tunnelausbau (inkl. Einbindungen).

3.4 Prüfung der technischen Machbarkeit

3.4.1 Variante mit druckhaltigem Ausbau

Nachfolgenden werden die Schlüsselprobleme des Lösungsansatzes aufgezeigt und beurteilt.

Stahlhautabdichtung

Wie bereits erwähnt ist eine zuverlässig abdichtende Aussenhaut bei diesen hohen Wasserdrücken zwingend erforderlich. Die arbeitstechnische Machbarkeit (vorgeformte Blechelemente, an Ort verschweisst und auf Untergrund montiert) ist unter den besonderen Bedingungen im Tunnel Engelberg nicht gegeben. Es besteht keine Möglichkeit die Ausführungsqualität mit einer ausreichenden Verlässlichkeit zu prüfen. Weiter besteht die Gefahr, dass die Stahlhaut innerhalb der vorgesehenen Nutzungsdauer korrodiert. Es besteht weder eine Möglichkeit den Fortschritt der Korrosion zu überprüfen noch einen Eingriff zu bewerkstelligen.

Einbindungen

Der druckhaltige Abschluss zu den angrenzenden Palfrisemergeln erfolgt prinzipiell durch eine genügend lange und satte Einbindung des massiven Kreisprofils. Aufgrund der Unsicherheiten, sowohl in Bezug auf das geotechnische Verhalten des Gebirges (k-Werte), wie auch bezüglich der Grösse und der Dauer der unterirdischen Wasserflüsse, kann die Länge der Einbindung nur durch eine vorsichtige Schätzung bestimmt werden. Eine Fehleinschätzung der Einbindungslänge kann das angrenzende nicht druckhaft ausgebaute Tunnelprofil mit unzulässigen Wasserdrücken belasten. Die Folge wäre ein Kollaps.

Schlussfolgerung

- Die technische Machbarkeit ist bei diesem Lösungskonzept nach heutigem Kenntnisstand nicht gegeben. Der Stand der Technik wird um ein Vielfaches überschritten.
- Als weiteren Punkt gilt es zu beachten, dass bei der Variante mit druckhaltigem Ausbau infolge der hohen Wasserdrücke Risiken betreffend der grossräumigen Hangstabilität bestehen.

3.4.2 Variante mit druckloser Wasserableitung

Nachfolgenden werden die speziellen Aspekte des Lösungsansatzes aufgezeigt und beurteilt.

Wasserableitung in Rigole

Bei den singulären Stellen (Tm 1700, Tm 1955) wird das Gebirgswasser kontrolliert bis in die Rigolen am Gewölbefuss abgeleitet. Die Einleitung erfolgt durch genügend gross dimensionierte Rohrleitungen und einer inspizierbaren Kammer zwecks Wasserberuhigung und Absetzung eventueller Feststoffe. In der normalen Strecke sind Einläufe alle 6 m geplant.

Gebirgserosion

Bezüglich dem Zusammenhang zwischen Feststofftransportmenge und Abflussmenge sind gemäss dem hydrogeologischen Baugrundmodell keine Auswaschungen oder Erosionserscheinungen in den normalen Quintnerkalken zu erwarten. Hingegen ist diesem Phänomen im Bereich der Klufthöhle Rechnung getragen, indem dort die Ringfugen mit felsseitigen durchlässigen Abdeckungen ergänzt werden können.

Wasserableitung längs des Tunnels

Die Ableitung bis zum Nordportal kann auf verschiedene Arten gelöst werden (Abbruch und Ersatz der bestehenden Leitung in der Sohle, oder Kapazitätserhöhung durch eine zusätzliche, neue Leitung im oder über dem bergseitigen Bankett. Die Detailprojektierung erfolgt im Rahmen des Bauprojekts.

Ausbildung Drainagebohrungen

Je nach Felsqualität und Wasseranfall sind die Drainagebohrungen verrohrt. In Tunnelnähe (2-3 m) sind die Rohre vorwiegend geschlossen, um dort Auswaschungen infolge starker Wasserströmungen zu vermeiden. Als Rohrmaterialien kommen rostfreier Stahl oder Kunststoff (HPE) in Frage.

Schlussfolgerung

Die technische Machbarkeit ist bei diesem Lösungskonzept gegeben. Die Gefährdungen wurden erkannt, und die entsprechenden Massnahmen auf Stufe Konzept erarbeitet.

3.4.3 Variante(n) mit teilweiser Druckentlastung und entsprechender Wasserableitung

Nachfolgend die wichtigsten erkannten Schlüsselprobleme der Lösungsansätze:

Druckentlastung am Tunnelprofil	Nebenbauwerk vom Tunnel aus	Entwässerungstollen nach aussen
Keine Erfahrungen im Tunnelbau mit Armaturen als Druckbeschränkung. (Be- und Entlüftung, Anschlüsse, spezielle Armaturen, Korrosion, Unterhalt, Funktionstüchtigkeit, usw.)	Funktionstüchtigkeit der langen Drainagebohrungen nicht gesichert: <ul style="list-style-type: none"> - Erforderliche Zielgenauigkeit kann nicht garantiert werden - Unterhaltungsmöglichkeit bei Verstopfungen eingeschränkt 	Funktionstüchtigkeit der langen Drainagebohrungen nicht gesichert: <ul style="list-style-type: none"> - Erforderliche Zielgenauigkeit kann nicht garantiert werden - Unterhaltungsmöglichkeit bei Verstopfungen eingeschränkt
Fehleinschätzung der anfallenden Wassermengen kann Funktionstüchtigkeit gefährden (unzulässiger Wasserdruckaufbau)	Unsicherheiten bei der Gestaltung des Entlastungstollens: <ul style="list-style-type: none"> - Höhenlage - Geologie 	Grosse Unsicherheiten bei der Gestaltung des separaten Entwässerungstollens: <ul style="list-style-type: none"> - Trassierung - Höhenlage - Neue Portale - Neue Baustelle - Geologie - Projektgenehmigung
	Hohe Wasserdrücke (ca. 70 m W.S.) => Dichtigkeitsprobleme	Hohe Wasserdrücke (ca. 120 m W.S.) => Dichtigkeitsprobleme

Tabelle 2: Zusammenstellung der wichtigsten Schlüsselprobleme bei den Varianten mit teilweiser Druckentlastung und entsprechender Wasserableitung

Schlussfolgerung

Die Varianten mit teilweiser Druckentlastung und entsprechender Wasserableitung können nicht als technisch nicht machbar beurteilt werden. Allerdings bestehen viele Risiken wie Einbindungsproblematik in die geologischen Nachbarabschnitte, Dichtigkeitsprobleme, Ausführbarkeit, Erfahrungen, Dauerhaftigkeit, Kontrollierbarkeit der Funktionalität sowie Nachbesserungsmöglichkeit. Für eine detailliertere Abklärung der technischen Machbarkeit wären zeitintensive Studien erforderlich. Ob die Schlüsselprobleme mit diesen Studien gelöst werden können bleibt aus heutiger Sicht ungewiss.

3.5 Vergleich und Bewertung der Varianten

Im Rahmen der Aufarbeitung des Gewölbeausbaus in der Quintnerkalkstrecke wurde von allen Beteiligten immer wieder auf die grossen Unsicherheiten hingewiesen, welche dieses Projekt charakterisieren, allem voran im Expertenbericht über das hydrogeologische Baugrundmodell. Es ist daher unerlässlich, dass Überlegungen über das Verhalten des Bauwerks angestellt werden, für Beanspruchungen, welche von den vereinbarten Dimensionierungsvorgaben abweichen und diese sogar übersteigen. In der Tabelle 3 sind für jede Lösung Faktoren aufgeführt und dazu eine Bewertung des Risikos, falls bei diesen Faktoren die effektiven Bedingungen am Bauwerk kritischer sind als (vorsichtigerweise) vereinbart. Es ergibt sich daraus ein Bild, wo allfällige Restrisiken anfallen.

Zusätzlich zur zusammenfassenden Beurteilung auf der Tabelle 3 wurde eine weitere Zuverlässigkeitsbetrachtung ausgeführt, mit welcher die verschiedenen Lösungen in Bezug auf verschieden starke Hochwasserereignisse analysiert wurden (siehe Bericht 981.6-R-02). Dabei wurde zwischen

- kleinen Hochwassern („Jahreshochwasser“ gem. Bericht Nr. 8228),
- „extremes Hochwasser“ (z.B. HW August 2005, welches als Grundlage für die Dimensionierung des Ausbaus vereinbart wurde und während der 100-jährigen Lebensdauer des Tunnels mit einer 63%-igen Wahrscheinlichkeit auftreten wird),
- grösseren Hochwassern gegenüber dem Ereignis vom August 2005,

unterschieden. Im Falle des grösseren Hochwassers (Eintretenswahrscheinlichkeit während den nächsten 100 Jahren weit unter 50%) ist bei der Lösung mit druckfestem Ausbau mit einem Kollaps zu rechnen, während bei der Lösung mit drainierendem Ausbau die zulässige Belastung des Gewölbes nicht überschritten wird, hingegen eine Überflutung des Tunnels in Kauf genommen werden muss. In diesem Zusammenhang sei erinnert, dass die Frage der Betriebseinschränkung, resp. der Einstellung für solche extreme Ereignisse nicht mehr allein auf den Tunnel bezogen werden kann.

	Voll druckhaltiger Ausbau	Lösungen mit beschränkter Druckhaltung und Drainageüberlauf			Voll drainierender Ausbau
Thematik		Druckentlastung am Tunnelprofil	Druckentlastung durch Nebenbauwerke	Druckentlastung durch separaten Stollen nach Aussen	
Hanginstabilität	Restrisiko	-	-	-	-
Gebirgserosion	-	-	Restrisiko (aber nicht im Tunnel)		Kleines Restrisiko
Einbindung / Umläufigkeit in Palfrismergelschiefer	Restrisiko	Kleines Restrisiko			-
Tragfähigkeit Gewölbe - höhere Wasserdrücke - asymmetrische Wasserdrücke - aufgezwungene Verformungen	Restrisiko	Kleines Restrisiko			-
Dichtigkeit	Restrisiko für Tragfähigkeit	Kleines Restrisiko			Keine Auswirkung auf Tragfähigkeit
Höherer Gebirgswasseranfall	-	Restrisiko		-	Restrisiko
Nebenbauwerke	-	-	Restrisiko bezüglich Störzonen und Karstwasservorkommen		-
Ausführbarkeit	Hohes Restrisiko	Restrisiko	Kleines Restrisiko	Restrisiko	
Erfahrungen	keine (Sprung der Technik)	keine	-		> 30 Jahre
Dauerhaftigkeit	Restrisiko	Kleines Restrisiko	-	-	-
Nachbesserungsmöglichkeit	Restrisiko	eingeschränkt	-	eingeschränkt	-

Tabelle 3: Zusammenfassende Beurteilung der Zuverlässigkeit im Hinblick auf die verbleibenden Restrisiken

4. WAHL DES BESTKONZEPTS

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich ist, erweist sich von den Systemen mit Druckentlastung die Lösung mit offenen Ringfugen und Drainagebohrungen eindeutig als die Vorteilhafteste, sowohl was die Risiken der Ausführung, wie auch die Zuverlässigkeit im Betriebszustand anbetrifft.

Die Lösung mit offenen Fugen hingegen ist robust, bautechnisch erprobt und beinhaltet eine gewisse Flexibilität im Hinblick auf eventuelle geänderte Randbedingungen aus zukünftigen Erkenntnissen. Die einzelnen Gewölbeblöcke sind voneinander statisch unabhängig und daher auch weniger empfindlich auf Zwängungen infolge von Gebirgsdeformationen. Gegenüber der Lösung mit starrer Abdichtung verhält sich der Ausbau gutmütiger im Falle von nicht vorhersehbarer Belastung. Die Überwachung der Funktionalität (Wasserflussmessungen, Druckmessungen in der Karsthöhle, Kontrolle des Entwässerungssystems) ist einfacher durchzuführen als bei den anderen Lösungen. Der periodische Unterhalt (Spülen der Leitungen, Reinigung der Ringfugen von eingeschwemmten Feststoffen und Absetzungsprodukten) ist mit einem vertretbaren Aufwand zu bewältigen und stellt keine übermäßigen Anforderungen an die Betriebsorgane, im Vergleich zu anderen Gebirgstunneln.

5. SICHERHEITSÜBERLEGUNGEN BEI DER LÖSUNG MIT DRUCKLOSER WASSERABLEITUNG

Vorgängig muss festgehalten werden, dass beim Tunnel Engelberg die in der Schweiz gültigen Normen der SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) angewendet werden. In diesem Normenwerk werden unter anderem die einzuhaltenden Sicherheitsbeiwerte festgelegt. Für den Tunnel Engelberg gelten somit die selben Sicherheitsanforderungen wie bei allen anderen Tunnelbauwerken in der Schweiz.

Zwecks Verhinderung von Missverständnissen werden die in Tabelle 3 aufgezeigten "Restrisiken" für die Lösung mit offenen Ringfugen in diesem Kapitel nochmals kurz erläutert.

Gebirgserosion

Das "Restrisiko" einer Gebirgserosion muss relativiert werden. Mit den geplanten Massnahmen wie Injektion des erosionsanfälligen Störzonenmaterials in Kombination mit felsseitig angebrachten wasserdurchlässigen gelochten Stahlblechen in den Ringfugen in den betroffenen Zonen, kann eine **Gebirgserosion** in der Grössenordnung wie 2003 bei der Entstehung der Klufthöhle **ausgeschlossen** werden. Normale feinkörnige Kluftmaterialausschwemmungen werden toleriert. Diese geringen Mengen an Feinmaterialen werden mit dem anfallenden Wasser mittransportiert und in die Engelberger-Aa eingeleitet.

Tragsicherheit des Gewölbes

Die Tragsicherheit des Gewölbes beim Konzept mit druckloser Wasserableitung ist in keiner Weise gefährdet.

Höherer Gebirgswasseranfall

Sollte der in der hydrogeologischen Studie ermittelte maximale Wasserabfluss von 1'100 l/s überschritten werden, besteht die Möglichkeit, dass die Mehrmenge an Wasserabfluss von der Bergwasserleitung nicht mehr abgeführt werden kann. Die Konsequenz wäre, dass Wasser über das Schotterbett abfließt und dieses unter Umständen beschädigen könnte. Nach solchen Ereignissen (grösseres Hochwasser als im August 2005!) müsste das Schotterbett saniert werden. ***Die Tragsicherheit des Tunnels sowie die Sicherheit der Passagiere und des Zugpersonals wäre dabei nicht gefährdet.***

6. ANTRAG FÜR WEITERBEARBEITUNG UND DESSEN BEGRÜNDUNG

Aus der Summe der durchgeführten Wertungen kommt daher der Projektverfasser zum Antrag an den Tunnelausschuss, die Projektierung auf der Basis der Lösung mit druckloser Gebirgswasserentlastung weiterzuführen und dafür ein Bauprojekt und ein Genehmigungsdossier erstellen zu lassen.

ANHANG A

NORMALPROFIL MIT RINGFUGE

