



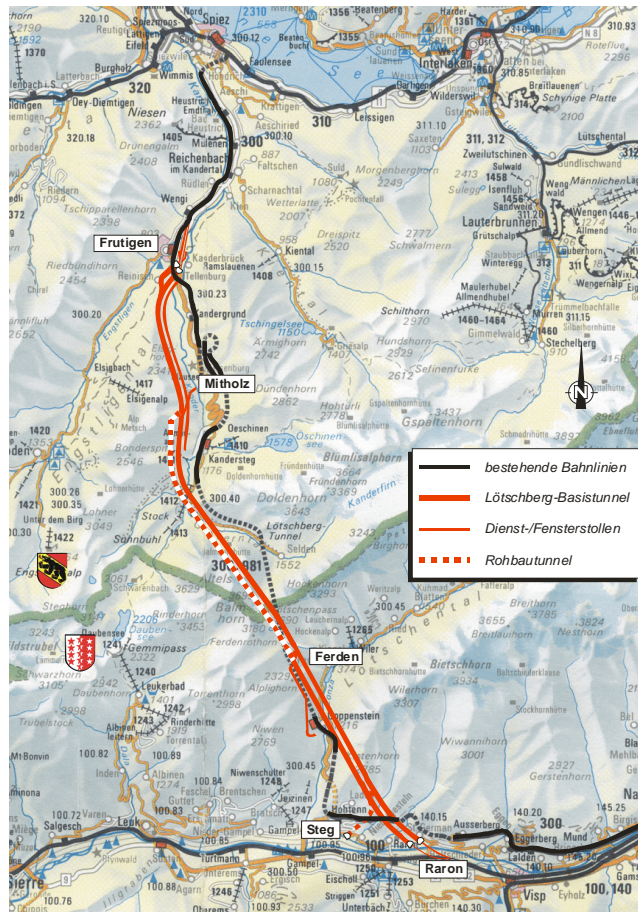
Tunnel de base du Lötschberg





Colloque AFTES / CFMR du 7 décembre 2006 PHENOMENE DE DECOMPRESSION VIOLENTE

(P. Michel, PRA Ingénieurs Conseils SA)

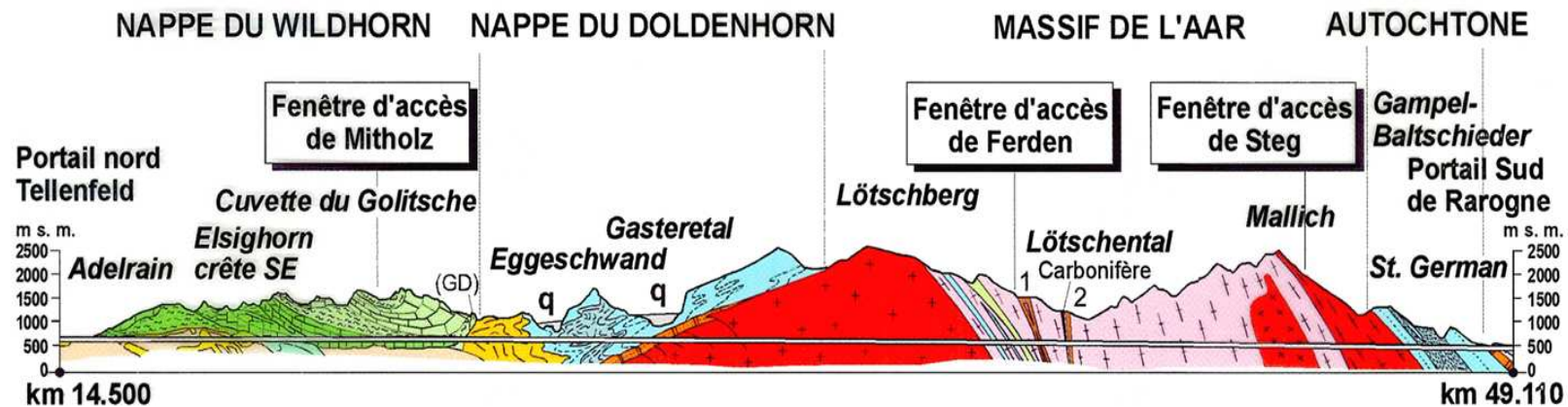
1. Etudes préliminaires
2. Mesures prévues
3. Phénomènes rencontrés à l'exécution
4. Conclusion

Plan de situation du projet



-  ligne ferroviaire existante
-  tunnel de base du Lötschberg
-  fenêtre
-  tunnel non équipé

Coupe géologique

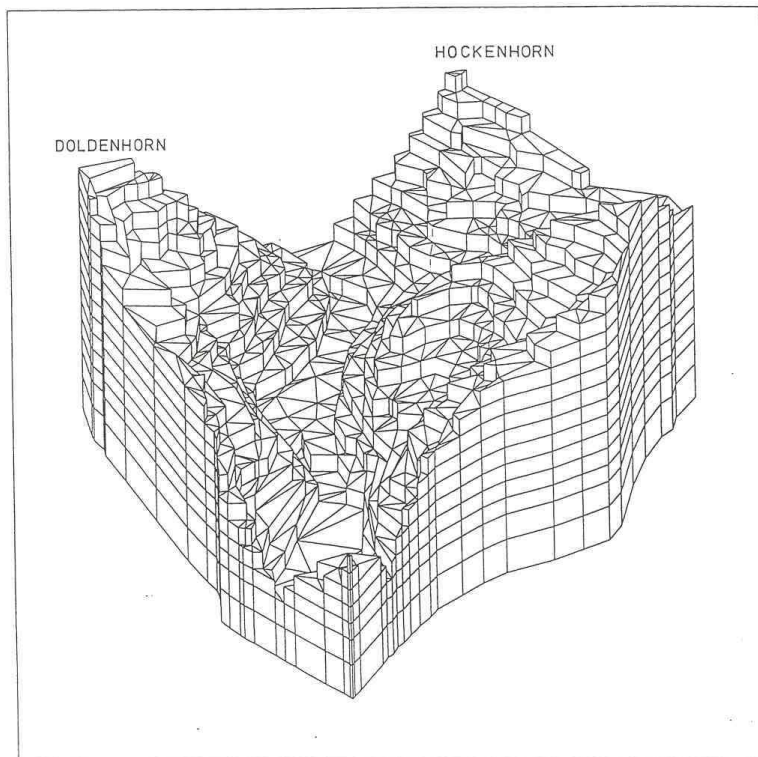


- q Remplissage quaternaire
- Série de Taveyanne Grès et "Dachschiefer"
- Flysch d'origine incertaine
- Nappe du Wildhorn Partie supérieure plissée
Partie inférieure écaillée
- Mélange
- Nappe du Gellihorn (GD)
- Flysch de la nappe du Doldenhorn

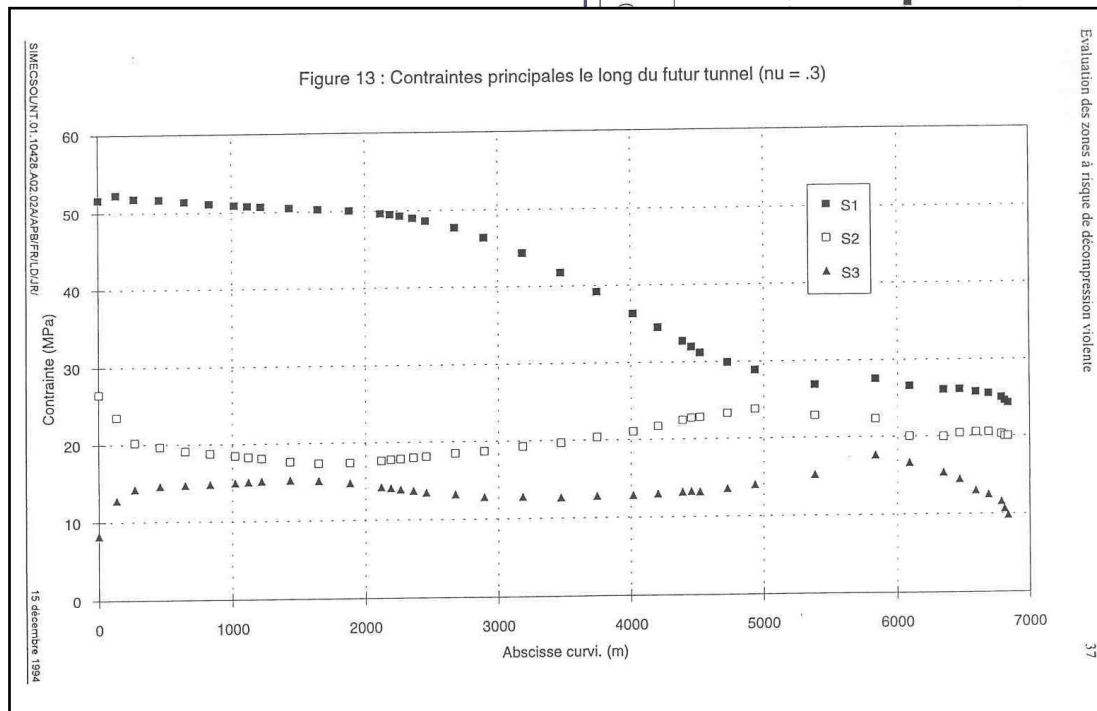
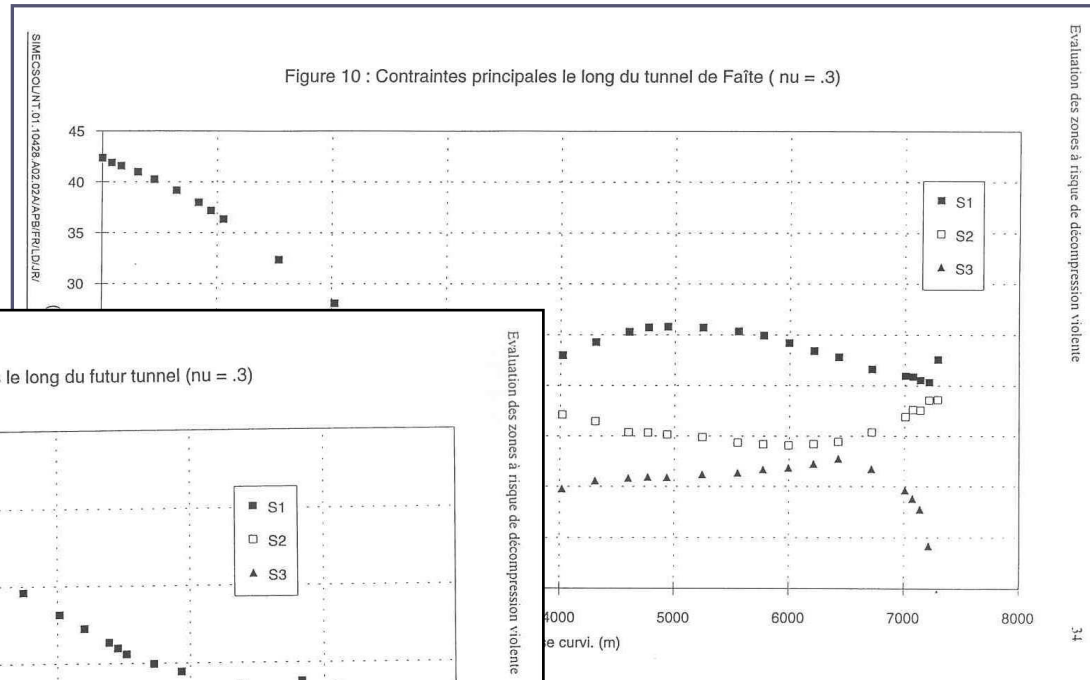
- Nappe du Doldenhorn et Autochtone Prédominant calcaire marneux (au Sud: Schistes argileux durs) prédominant calcaire
- Trias autochtone Dolomies, schistes, gypse/ anhydrite, grès
- Ecaille de la Jungfrau
- + Granite de Gastern
- x Granite central de l'Aar
- / Granodiorite de Baltschieder
- Massif de l'Aar Socle cristallin: gneiss, schistes
- Ecailles de sédiment
- Gneiss à amphibole, amphibolite
- Zônes de phyllites 1 Dornbach/ 2 Faldumbach

1. Etudes preliminaires

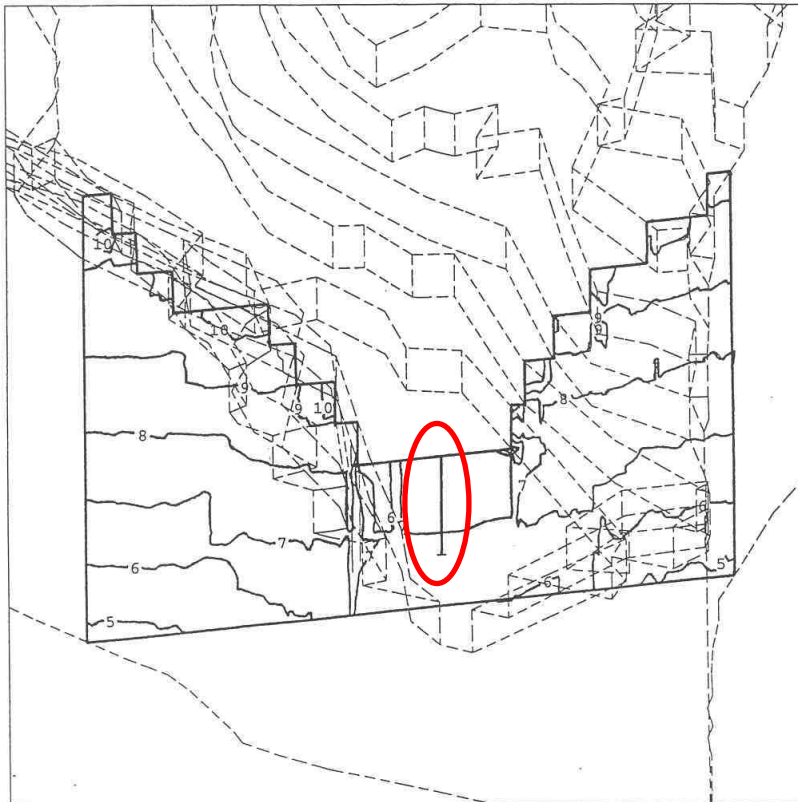
- a) Modélisation de l'état de contraintes géostatiques naturelles au moyen d'un modèle 3D et comparaison avec les contraintes résultant d'essais d'hydrofracturation réalisés dans les forages de reconnaissance
- b) Analyse statistique de retour d'expérience sur des tunnels où des phénomènes de décompression violentes ont été observés
- c) Evaluation des zones à risque de décompression violente sur le tunnel de base du Lötschberg



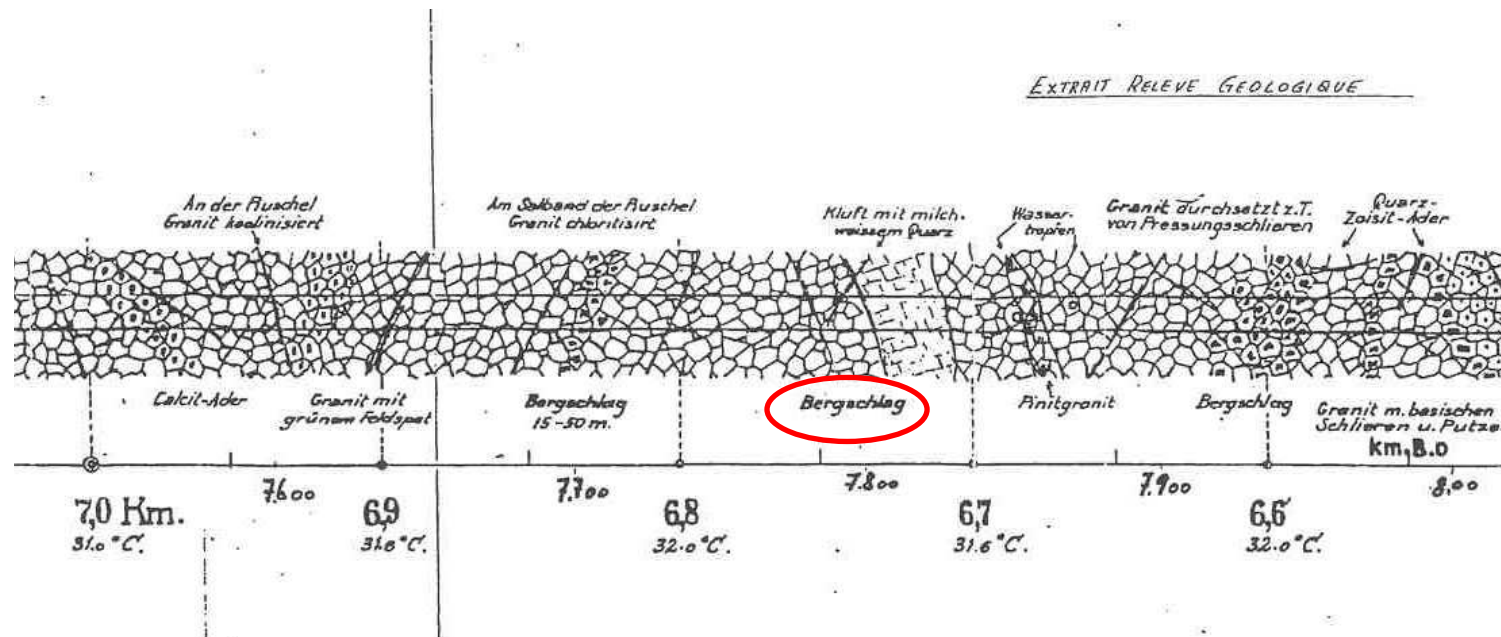
Modèle 3D par éléments finis



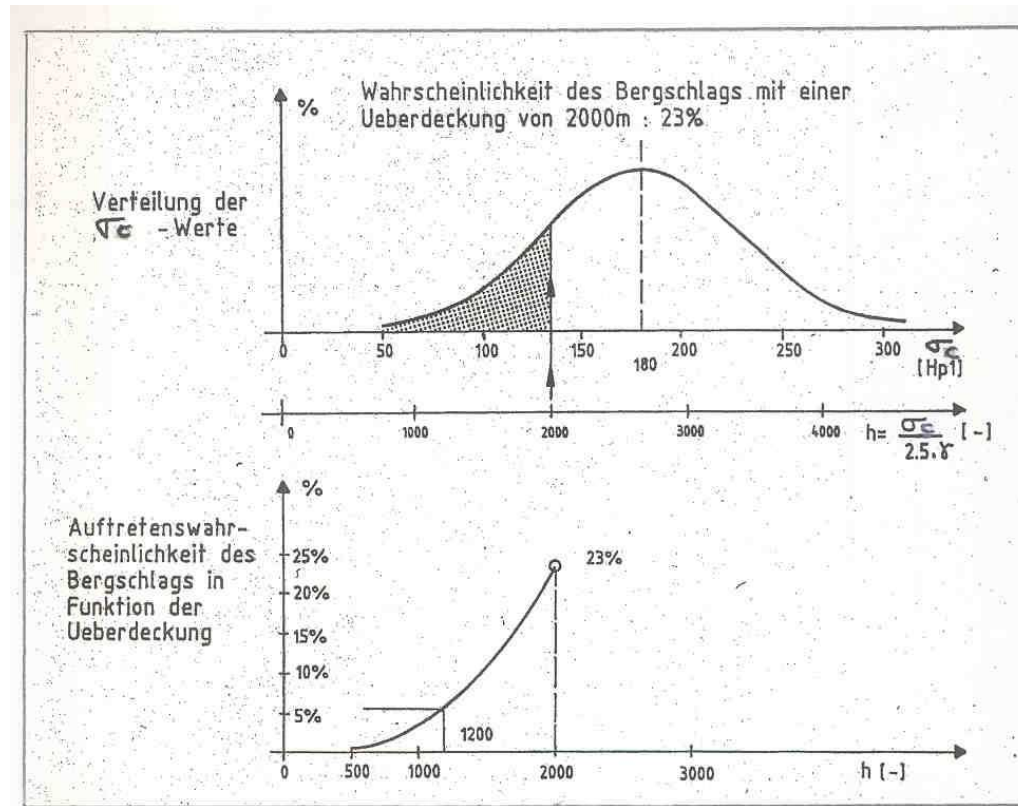
Résultats de la
modélisation 3D



Comparaison des résultats de la
modélisation avec les contraintes d'essais
d'hydrofracturation dans un forage de
reconnaissance



Analyse statistique de retour d'expérience sur des tunnels où des phénomènes de décompression violente ont été observés, notamment le tunnel de faite du Lötschberg



Exemple: Granite de Gastern (roche type 9.1)
 Résistance à la compression uniaxiale
 $\sigma_c = 180 \pm 50$ MPa

Critère d'évaluation des zones à risque de décompression violente

Classe A

Risque très élevé de décompression violente : 75 - 100 %

$$\sigma_t > 130 \text{ MPa}$$

Classe B

Risque élevé de décompression violente : 50 - 75 %

$$120 \text{ Mpa} < \sigma_t < 130 \text{ MPa}$$

Classe C

Risque moyen de décompression violente : 25 - 50 %

$$110 \text{ Mpa} < \sigma_t < 120 \text{ MPa}$$

Classe D

Risque faible de décompression violente : 0 - 25 %

$$100 \text{ Mpa} < \sigma_t < 110 \text{ MPa}$$



Tunnel de base du Lötschberg

Prévision de zones à risque de décompression violente

Classe A

Risque très élevé: ~ 4,8 km

Classe B

Risque élevé: ~ 3,7 km

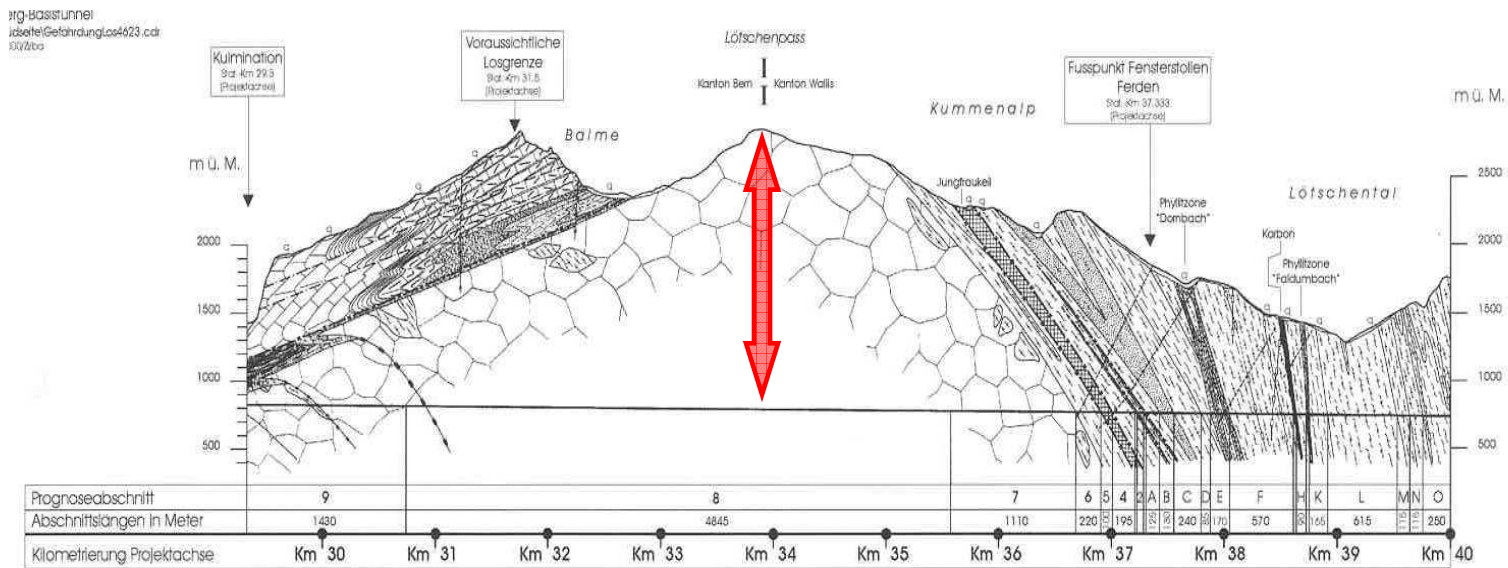
Classe C

Risque moyen: ~ 1,4 km

Classe D

Risque faible: ~ 3,2 km

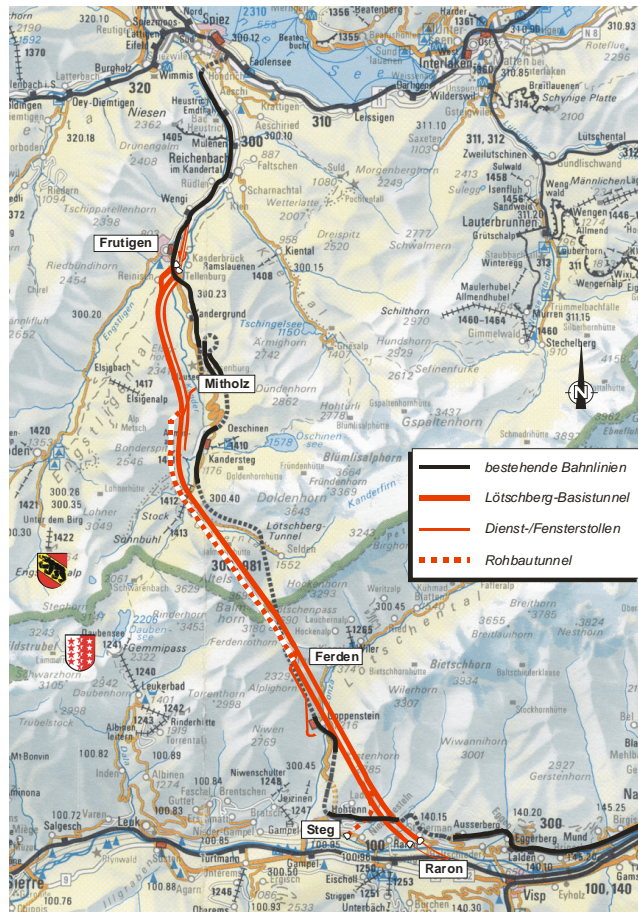
Profil géologique prévisionnel Zones à risque de décompression violente







Gefahrenbereich Gestein

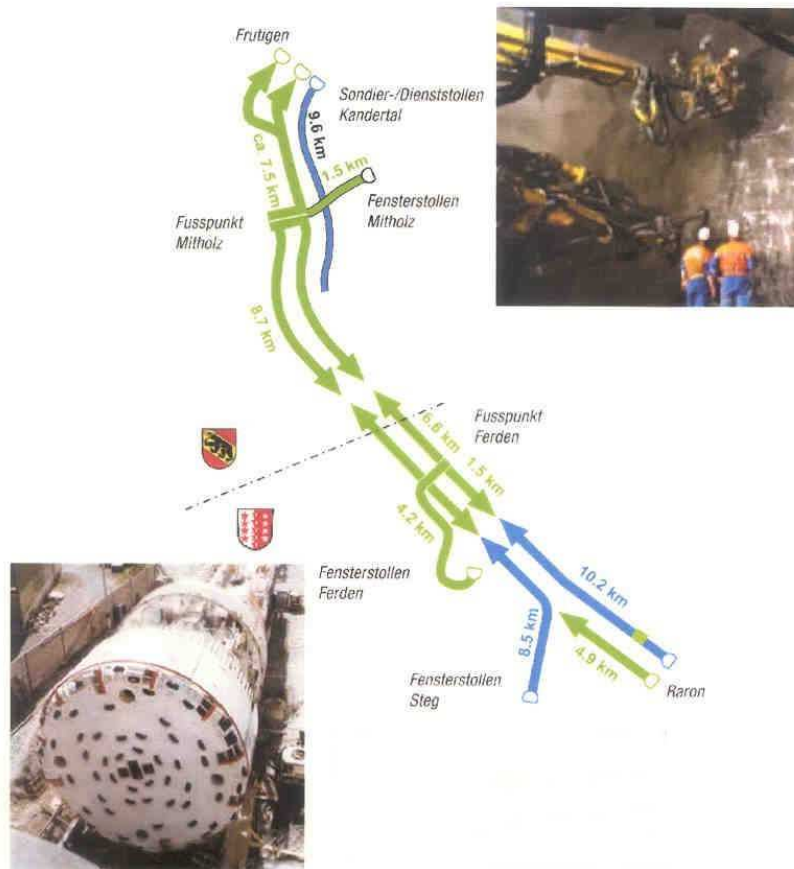
Steinfall																							
Niederbruch																							
Verbruch																							
Instabile Ortsbrust																							
Bergschlag																							
Verformung (schl. Bergstrukt.)																							
Radioaktivität																							
Neotektonische Bewegungen																							
Quellen und Schwellen																							

2. Mesures prévues sur le projet du tunnel de base



-  ligne ferroviaire existante
-  tunnel de base du Lötschberg
-  fenêtre
-  tunnel non équipé

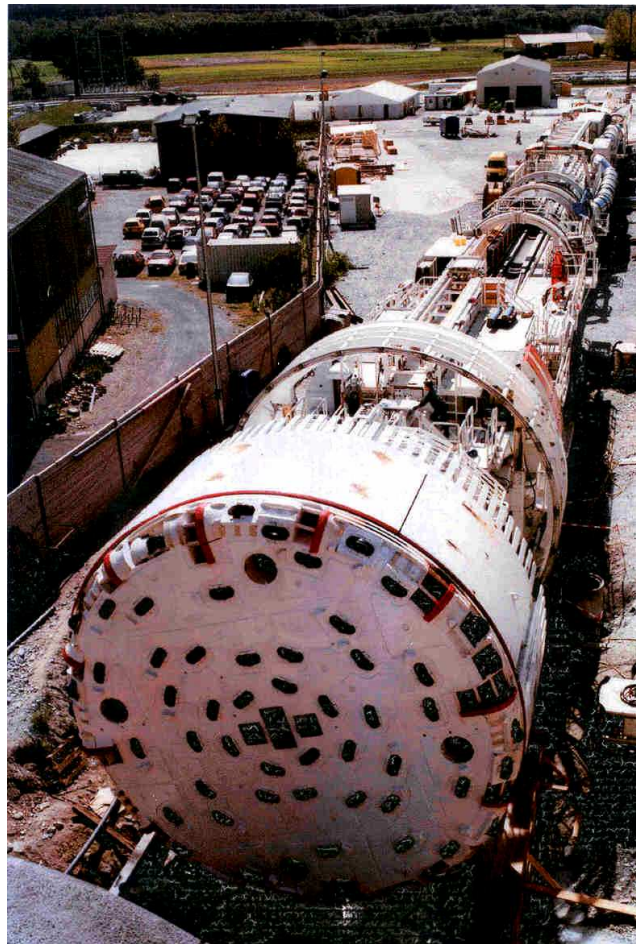
Choix des méthodes d'avancement



— Avancement à l'explosif

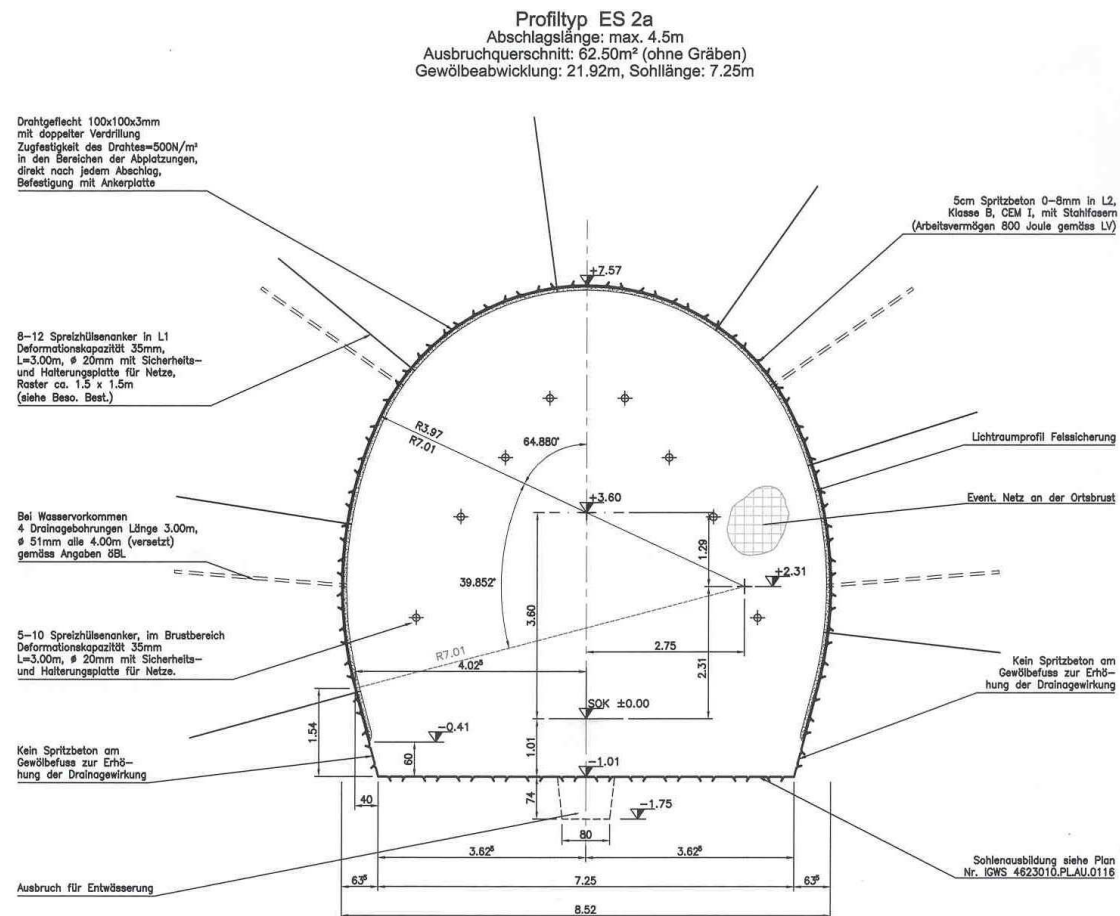
— Avancement au tunnelier

Tunnel de base du Lötschberg



Avancement au tunnelier
pour les deux attaques
principales sud

Avancement à l'explosif Profil type ES2a en cas de risque de décompression violente



Mesures de protection / soutènement pour le profil type ES2a

Detail zu Profil ES 2a

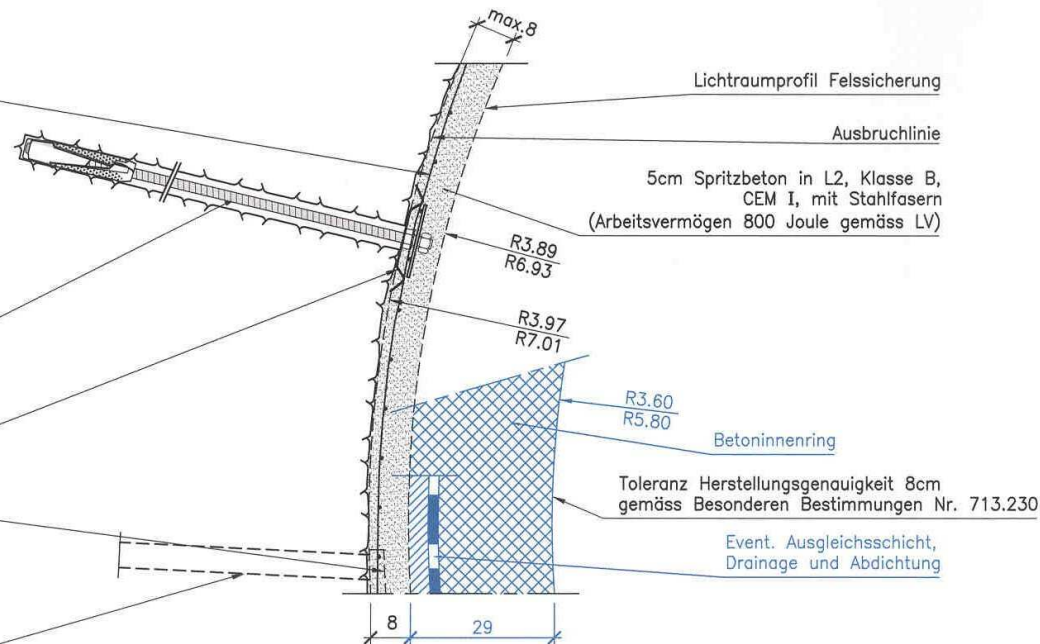
Drahtgeflecht 100x100x3mm
mit doppelter Verdrehung
Zugfestigkeit des Drahtes=500N/m²
in den Bereichen der Abplatzungen,
direkt nach jedem Abschlag,
Befestigung mit Ankerplatte

8-12 Sprezhülsenanker in L1,
Deformationskapazität 35mm,
L=3.00m, ø20mm mit Sicherheits-
und Halterungsplatte für Netze,
Raster ca. 1.50x1.50m
(siehe Beso. Best.)

"Sicherheitsplatte" 220x500x3mm

Entwässerungsrinne oder -Schlauch

Bei Wasservorkommen
4 Drainagebohrungen Länge 3.00m,
ø 51mm alle 4.00m (versetzt)
gemäss Angaben öBL



3. Phénomènes rencontrés à l'exécution

3.1 Observations générales

- Pas de projection de plaques avec libération d'énergie
- Localement, phénomènes acoustiques puissants
- Détachement de blocs ou de plaques de dimensions parfois conséquentes dans le front d'attaque
- Détachement de blocs en calotte et sur les parements du tunnel, en règle générale en corrélation avec les phénomènes observés au front
- Pour l'avancement au tunnelier (TBM), formation de "pelures d'oignon" initialisées dans la zone du front d'attaque

3.2 Localisation

Phénomènes rencontrés essentiellement dans les zones identifiées avec un risque potentiel élevé à très élevé et sous forte couverture:

- dans les zones du Granite central de l'Aar et de Granodiorite de Baltschieder pour l'avancement au tunnelier: 1,8 km
- dans la zone du Granite du Gastern pour l'avancement à l'explosif: 4,0 km

⇒ Bonne corrélation de la localisation des zones par rapport aux prévisions



Ecaillage
devant la tête
du tunnelier





Détachement
de bloc devant
la tête du
tunnelier en
corrélation avec
le système de
fracturation du
massif rocheux

Détachement de plaques en calotte



Détachement de blocs en calotte et en parement



3.3 Etudes complémentaires du comportement du massif rocheux postérieures à l'avancement au tunnelier

- Etude Prof. P. K. Kayser (décembre 2004)

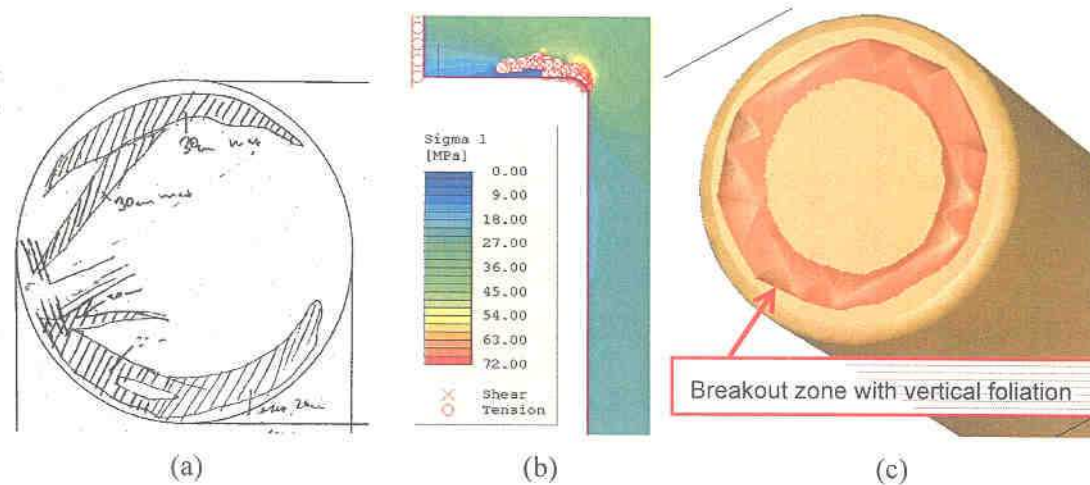


Figure 4.11 Typical face records (a) showing locations and depths of ravelling at face; compared with model results (b) axisymmetric plastic analyses, and (c) elastic analysis of vertically dipping foliation in the face ($K_0 \neq 1$).

⇒ Le modèle développé démontre la corrélation entre les relevés du front d'attaque effectués à l'avancement et l'état de contraintes dans le massif rocheux.

3.3 Etudes complémentaires du comportement du massif rocheux postérieures à l'avancement au tunnelier

- Etude Prof. H. H. Einstein (avril 2006)
- ⇒ L'étude réalisée reprend les hypothèses et résultats de l'étude précédente et les complète en fonction des caractéristiques du massif, en particulier:
- Orientation / pendage des couches
 - Espacement / système de fracturation

Korrelation Ausbrüche / Überlagerung / Strukturen

TO-TBM (Raron - Ferden, nur Kristallin)

Zone	Tm Raron	lithostrat. Einheit	Gesteinstyp	Ausbrüche			Ausbrüche in der Brust m ³ /Aufn.	Überlagerung m	Klüftigkeit Klüfte/m	Schiefrigkeit Plattendicke
				rechts	Mitte	links				
1	2830 - 3610	Ballschieder Grandodiorit	8.20/9.10 (9.11)	-	sehr selten	sehr selten	0.1	700 - 900	≤ 1 (A + B)	massig (cm)
2	3610 - 3910	ZAGR	9.13	sehr selten	-	sehr selten	0.4	670 - 820	- 10 (D + E)	massig
3	3910 - 3980	ZAGR	9.13	sehr selten	sehr selten	sehr viele	1.1	820 - 860	> 10 (E)	massig
4	3980 - 4360	ZAGR	9.12 (9.11/9.13)	-	-	sehr selten	0.4	860 - 1130	- 10 (D)	gneissig
5	4360 - 4380	ZAGR	9.11/9.12	-	vielen	sehr viele	0.7	1140	- 10 (D)	massig
6	4380 - 4710	ZAGR	9.12/9.13	selten	wenig	wenig	0.3	1140 - 1340	1 - 10 (B + C)	massig
7	4710 - 5240	ZAGR	9.12 (9.13)	sehr viele	vielen	sehr viele	3.1	1340 - 1730	1 - > 10 (C + E)	massig - gneissig
8	5240 - 5400	ZAGR	9.12	wenig	wenig	vielen	1.1	1730 - 1950	1 - 10 (B - D)	massig (gneissig)
9	5400 - 5730	granitische Schollengneise	8.40 (8.31)	selten	wenig	vielen	0	1850 - 2000	1 - 5 (B, C)	cm - dm
10	5730 - 6030	granitische Schollengneise	8.32/8.40 (8.31)	-	selten	wenig	0.1	1710 - 1980	- 5 (C)	dm (cm)
11	6030 - 6270	granitische Schollengneise	8.31	wenig	vielen	vielen	0.3	1710 - 1780	- 10 (D, B + A)	dm (cm)
12	6270 - 6380	granitische Schollengneise	8.32	selten	vielen	vielen	0.2	1730 - 1750	- 5 (C, E)	cm (dm)
13	6380 - 6700	granitische Schollengneise	8.32	-	wenig	selten	0.2	1530 - 1730	5 - 10 (C + D)	dm (cm)
14	6700 - 7170	granitische Schollengneise	8.32 (8.31)	-	sehr selten	-	1.6	1500 - 1740	1 - 10 (B - D)	dm - cm
15	7170 - 7430	AK dunkler, massiger Gneis	8.23 (8.22)	-	wenig	wenig	0.2	1350 - 1500	- 1 (B, C)	cm - dm
16	7430 - 7620	AK dunkler, massiger Gneis	8.22/8.23	sehr selten	sehr viele	-	0	1280 - 1350	- 1 (B)	dm
17	7620 - 7790	AK dunkler, massiger Gneis	8.22/8.23	wenig	sehr viele	vielen	9.5	1110 - 1280	- 1 (B)	dm
18	7790 - 8280	AK Bändergneis	8.24/8.20	wenig	vielen	wenig	5.3	1110 - 1200	1 - 5 (B, C)	cm (massig)
19	8280 - 8790	AK Bändergneis	8.24/8.21	wenig	wenig	wenig	5.8	1160 - 1250	- 1 (B)	cm (dm)
20	8790 - 9040	AK Bändergneis	8.24 (9.20)	selten	wenig	-	3	950 - 1160	1 - 5 (B, C)	cm (dm)
21	9040 - 9560	AK schiefzig-massiger Gneis	8.22 (9.21)	selten	wenig	selten	0.4	780 - 1030	- 1 (B)	cm (dm)
22	9560 - 9690	AK schiefzig-massiger Gneis	8.21 (8.22)	vielen	sehr viele	vielen	0.3	710 - 780	- 1 (B)	cm
23	9690 - 10020	AK schiefzig-massiger Gneis	8.22 (8.21)	sehr selten	vielen	-	4.8	540 - 710	- 1 (B)	cm - dm

Zusammenstellung gemäss Befundprofil 1:5000 (zur Erinnerung: bezahletes geologisches Überprofil 3 %)0

6 Klassen bei den Ausbrüchen: keine - sehr selten - selten - wenig - viele - sehr viele

mittlere Überlagerung: < 1000 m ; 1000 - 1500 m ; 1500 - 1750 m ; > 1750 m

Ausbrüche aus der Brust gemäss Brustaufnahmen (Mittelwert in m³ pro Aufnahme): < 0.5 ; 0.5 - 1.0 ; 1.0 - 5.0 ; > 5

Klüftigkeit : 5 - 10 Klüfte/m ; > 10 Klüfte/m

Schiefrigkeit: cm, cm - dm ; cm (mm)

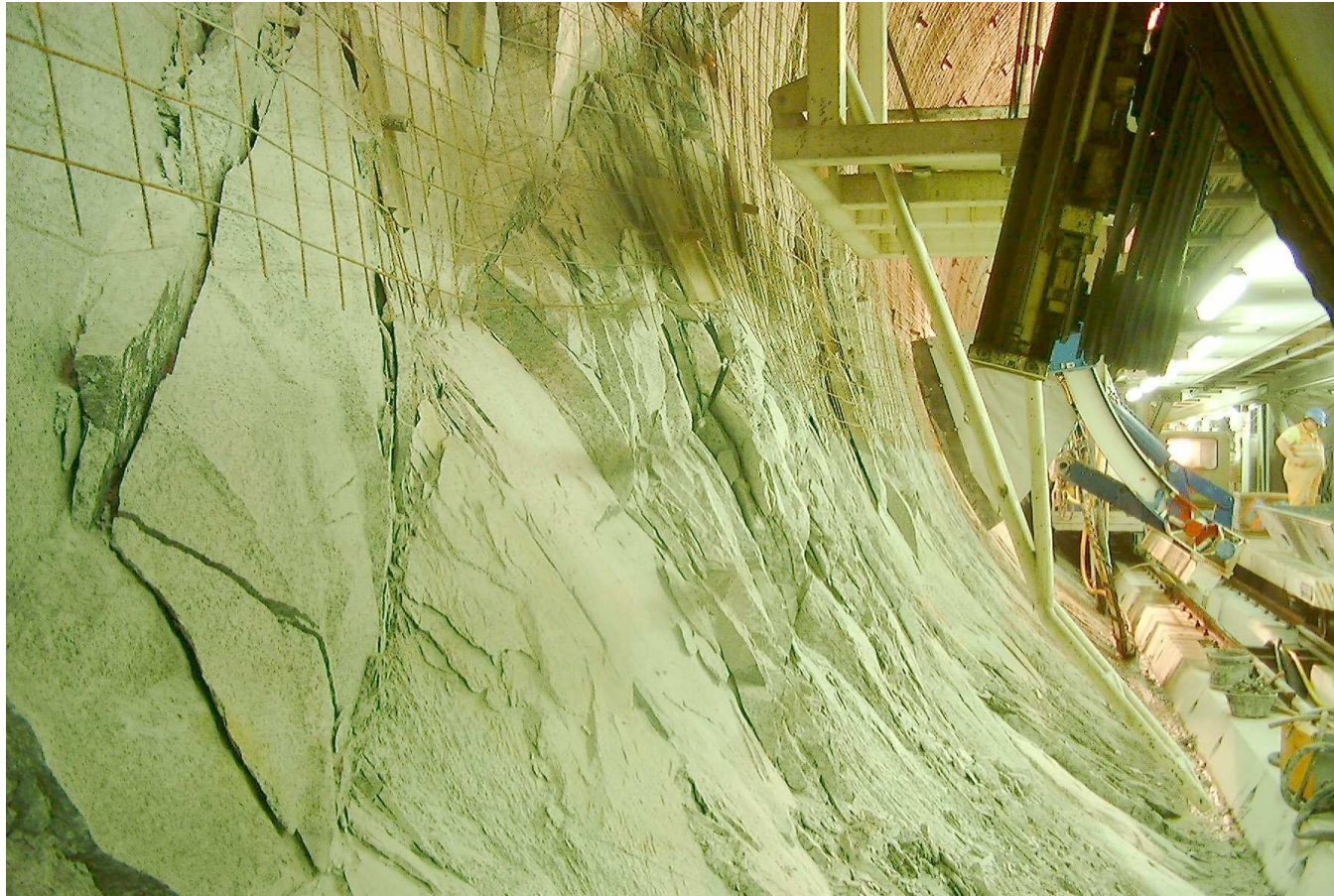


Intensification de la purge et des mesures de protection par ancrages, treillis puis béton projeté à l'avancement



Difficulté de grippage du tunnelier

Ecaillage en parement



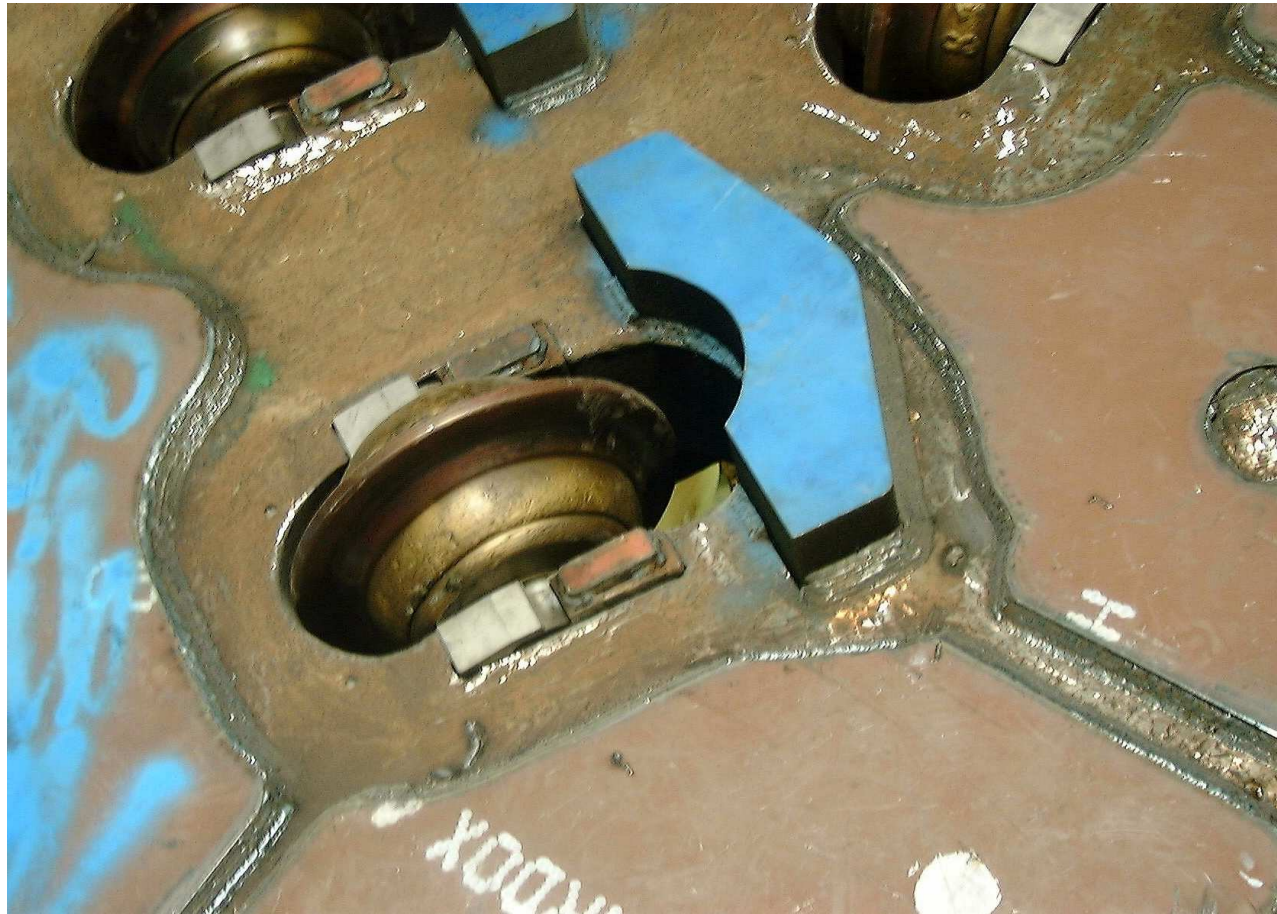


Usure irrégulière
et prématurée de
molettes suite à
un blocage



Renforcement
de la tête du
tunnelier

Soudage d'un chasse-bloc sur la tête du tunnelier





Présence de
blocs dans le
marinage par
bande
transporteuse



Présence
de blocs
dans le
marin
appelé à
être
recyclé

3.4 Incidences pour l'avancement au tunnelier

- ⇒ Conception "renforcée" de la tête de forage du tunnelier permettant le passage de marin parfois "grossier"
- ⇒ Prévoir la possibilité de concasser le marin directement en zone arrière sur le tunnelier
- ⇒ Renforcement des mesures de protection intégrées dans le soutènement posé immédiatement derrière la tête de forage
- ⇒ Intensification du travail de purge et de nettoyage sur le périmètre de la surface excavée



Avancement
à l'explosif:
plaques
dans le front
d'attaque



Intensification
de la purge
après chaque
volée



Détachement
de blocs et de
plaques dans
le secteur du
front



Mesures de
protection par
ancrages et
béton projeté
après chaque
volée

3.5 Incidences pour l'avancement à l'explosif

- ⇒ Optimisation du plan de tir (nombre de trous) visant à obtenir un découpage soigné de l'excavation et à diminuer la granulométrie du marin (moins de blocs)
- ⇒ Intensification du travail de purge mécanique et de nettoyage du front d'attaque et de la voûte après chaque volée
- ⇒ Renforcement des mesures de protection intégrées dans le soutènement du front d'attaque et de la voûte à chaque volée
- ⇒ Triage et/ou concassage du marin pour son évacuation par bande transporteuse, puis par trains.

4. Conclusions

- ⇒ Phénomènes de décompression de moindre intensité que prévue (décompression modérée)
- ⇒ Risque moins élevé pour la sécurité des personnes moyennant des mesures de protection adéquates
- ⇒ Incidences pratiques sur la conception des installations d'avancement, sur la logistique de marinage et sur les cadences d'avancement