Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 132 (2006)
Heft: 22: Les failles d'Alptransit

Artikel: Pas à pas dans le massif intermédiaire du Tavetsch
Autor: Theiler, Andreas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99519

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Andreas Theiler

Pas à pas dans le massif intermédiaire du Tavetsch

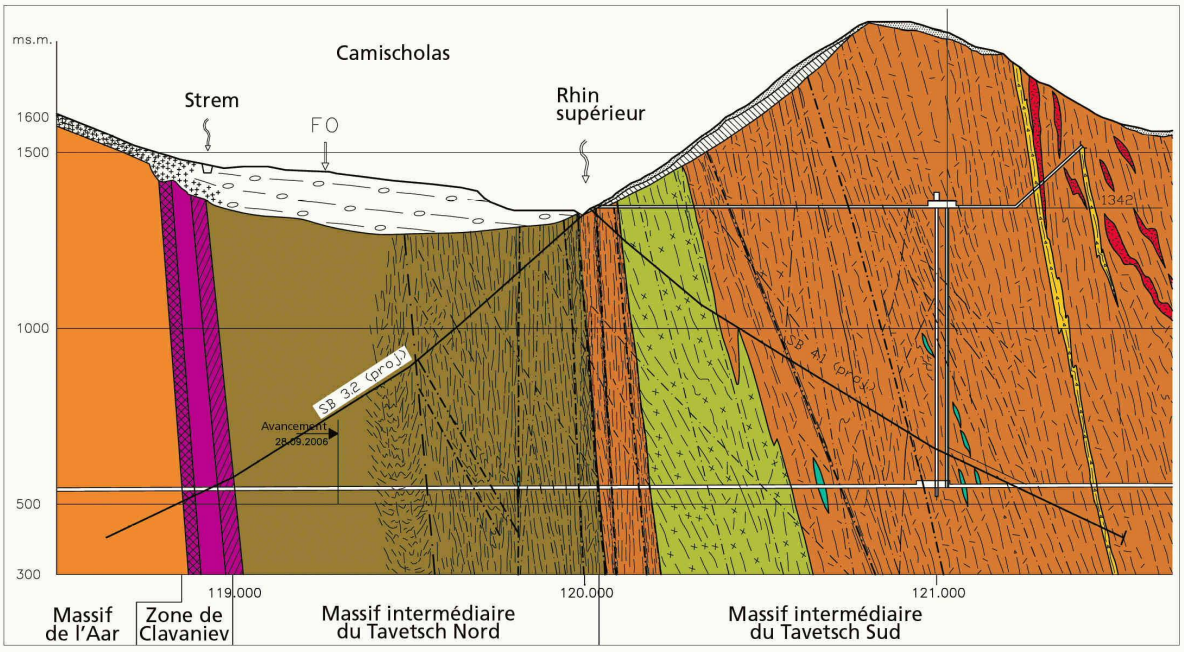
A Sedrun, le percement du massif intermédiaire du Tavetsch Nord constitue un défi considérable. Si la géologie est conforme aux prévisions, le système d'excavation a cependant dû être adapté à des particularités locales. Le concept de percement a fait ses preuves et son optimisation garantit un travail sûr, ce qui permet d'aborder le plus grand défi – la traversée de la zone de Clavaniev – avec confiance.

Engagés en 2002, les travaux sur le tronçon de Sedrun sont déjà très avancés. Commencée en été 2003, à la suite de la réalisation des deux puits d'accès, l'excavation de la station multifonction (MFS) est aujourd'hui quasiment achevée.

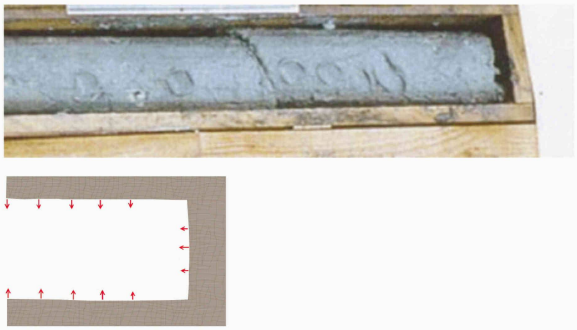
L'avancement vers le sud progresse actuellement dans le massif du St-Gothard, avec cinq mois d'avance sur le programme et il reste aujourd'hui environ 2,7 km pour rejoindre le tronçon de Faido. Considérée *a priori* comme difficile (on s'attendait à des infiltrations d'eau et à un terrain poussant), la zone Urseren Gavera (UGZ) a finalement pu être traversée sans problème. Vers le nord, le percement continue dans le massif intermédiaire du Tavetsch Nord, dans des terrains poussants, depuis le début de 2005. Les travaux se poursuivent toutefois selon le programme et environ 55 % du trajet en direction d'Amsteg est excavé : il ne manque plus que 400 mètres jusqu'au point de jonction entre les tronçons de Sedrun et Amsteg.

Prévisions géologiques et géotechniques

Le massif intermédiaire du Tavetsch (TZM) est compris entre les deux grands massifs des Alpes : celui de l'Aar, au Nord, et celui du St-Gothard, au Sud. Lors de la formation des Alpes, le TZM a été fortement comprimé (dans la direction nord-sud) et partiellement « avalé ». Ce phénomène s'est traduit par d'importantes déformations des bords du massif intermédiaire du Tavetsch, ceci tout particulièrement dans la zone de Clavaniev, située à la limite Nord (fig. 1).



1



2

Afin de cerner au mieux les conditions géotechniques de la partie Nord du massif intermédiaire du Tavetsch, quatre carottages inclinés à environ 45° ont été réalisés avant le début des travaux. Le dépouillement de ces sondages – en particulier le sondage SB 3.2, qui est celui dont l'exploitation s'est révélée la plus intéressante – a montré que le TZM Nord était dans l'ensemble constitué d'une succession rapide de séries rocheuses composées d'environ 60 % de schistes, gneiss et phyllithes (kakirites et cataclasites) fortement concassés et d'environ 40 % de gneiss et schistes friables, mais relativement intacts. De manière simplifiée, le TZM Nord peut être considéré comme une zone de « mégacisaillement » d'une longueur d'environ 1000 m, présentant une structure en sandwich. La zone de Clavaniev se compose, quant à elle, de roches dont la teneur en kakirites est plus élevée que celle du TZM Nord. Elle se caractérise en outre par la présence – à ses limites Nord et Sud – de deux zones de fortes perturbations d'environ 40 m.

Compte tenu de la très forte pression exercée par plus de 1000 m de montagnes dans cette zone, la roche y est si instable qu'elle se déforme et tend à combler l'espace excavé (terrain poussant, voir encadré p. 14). La redistribution des efforts résultant de ces mouvements aboutit néanmoins à une stabilisation de l'espace excavé. Les mouvements sont généralement lents, mais les efforts sont tels qu'aucune solution technique n'est à même de totalement les empêcher. Il faut donc choisir une méthode de soutènement autorisant ces déformations, tout en offrant une résistance susceptible de les limiter. Un autre danger caractéristique du TZM Nord tient à la nature « cassante » de la roche : celle-ci risque de se détacher de la zone faîtière ou du front d'attaque lors de l'excavation, conduisant ainsi à des instabilités (fig. 2).

Conditions géologiques réelles

Déjà analysées depuis la surface, les conditions géologiques ont dans l'ensemble été confirmées par des carottages exécutés dans l'axe des tunnels en cours d'avancement. Les essais triaxiaux réalisés sur les carottes permettent de déterminer les valeurs caractéristiques qui ont été comparées à celles issues du sondage SB 3.2, creusé depuis la surface : tous les résultats des essais se situent dans la fourchette des caractéristiques prévues lors du projet, confirmant que les roches rencontrées correspondent aux prévisions.

Pour faciliter la communication entre les participants au projet, les roches ont été classées selon leur taux de kakiritisation (degré de destruction) et un système de représentation a été défini : les zones légèrement, moyennement et fortement kakiritisées sont représentées par différentes couleurs. La figure 3 illustre la comparaison de roches rencontrées lors des sondages préalables, des carottages et enfin lors de l'excavation.

Outre les caractéristiques de la roche, le comportement du terrain lors de l'avancement dépend des conditions géologiques, comme la séquence des couches rocheuses, leur longueur et leur orientation par rapport à l'axe du tunnel. Les relevés faits lors de l'avancement montrent que les couches se succèdent sur une courte distance et que les séries de roches ressemblent plus à une pâte feuilletée qu'à un sandwich. Contrairement aux prévisions, les risques de terrains poussants et d'instabilités se présentent généralement de manière combinée.

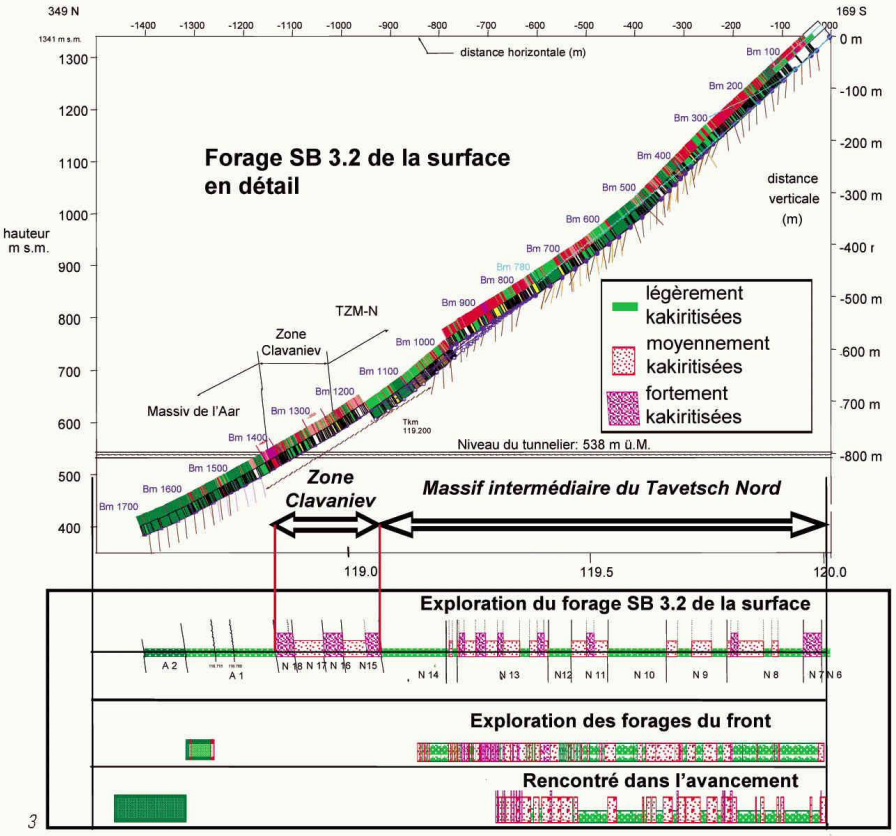
Lorsque les couches sont presque verticales, les déformations sont assez régulières sur l'ensemble du pourtour d'excavation et elles se stabilisent à une distance de 20 à 30 m du front d'attaque. En revanche, compte tenu de la faible cohésion verticale des couches, les décrochages au front d'attaque sont relativement fréquents et importants.

Dans des couches obliques, on observe plutôt des déformations asymétriques. L'influence de l'orientation des surfaces de séparation est manifeste puisque, si la foliation est parallèle à l'axe du tunnel ou forme avec celui-ci un angle aigu, d'importantes déformations peuvent se produire, même dans un terrain favorable.

Fig. 1: Profil géologique longitudinal du tronçon de Sedrun (Document Groupe des Géologues Sedrun)

Fig. 2: Terrains poussants (à gauche) et instabilités (à droite), avec carottes caractéristiques (Document IG-GBT Sud)

Fig. 3: Comparaison du sondage depuis la surface et des conditions géologiques rencontrées (Document Groupe des Géologues Sedrun)



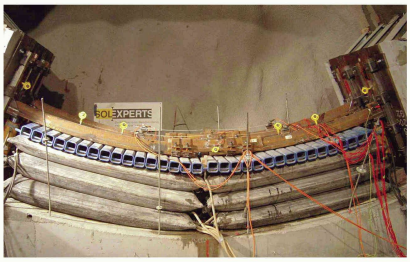
Les déformations radiales observées sont celles attendues. Elles sont en moyenne d'environ 20 cm. A noter qu'une partie de ces déformations (environ 30 %) se produisent en réalité avant l'excavation. Ce phénomène se traduit par des déformations longitudinales du front d'attaque : une seule étape – d'une longueur de 1,00 à 1,33 m – peut en effet engendrer un déplacement de 5 à 15 cm du front.

Concernant les conditions hydrogéologiques, on n'a, à ce jour, pas observé de réduction de la stabilité sous l'influence de l'eau interstitielle.

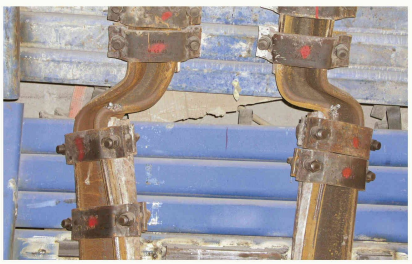
Solutions techniques et adaptations

Le soutènement de l'excavation dans les terrains poussants est assuré par la pose de doubles anneaux d'acier circulaires déformables combinés avec un système d'ancrages. Ces derniers sont disposés selon une trame de 2 x 2 m et leur longueur varie de 6 à 12 m. Selon les cas, on a posé entre un et trois doubles anneaux circulaires (faits avec des profilés pour mines TH44) par mètre. Ceux-ci doivent pouvoir absorber des déformations radiales sur tout le pourtour du profil circulaire normal. Pour garantir leur déformabilité, les anneaux se composent de deux fois quatre éléments reliés par des systèmes permettant un glissement relatif desdits éléments (raccords flexibles). Etant donné les conditions d'excavation à Sedrun (diamètre jusqu'à 13 m, avec des déformations radiales risquant d'atteindre 70 cm), des essais ont été menés pour tester le fonctionnement des anneaux et les optimiser avant le montage.

Une première série d'essais (« à petite échelle ») avait pour but de comprendre le fonctionnement des différents éléments formant les anneaux, en particulier les raccords flexibles pour lesquels il s'agissait de définir les relations entre le couple de serrage, la force dans les boulons et la résistance à l'enfoncement (compression) des raccords. Cela a permis de solliciter les anneaux simples et doubles sur un seul segment et d'analyser l'influence d'un chargement asymétrique des anneaux (fig. 4). Dans un second temps, un essai « en vraie grandeur » a permis de suivre et d'analyser le comportement réel d'un



4


5

6

anneau. A noter que pour ce second essai, le système de mise en charge par pression d'eau sur le pourtour complet du double anneau imposait un chargement symétrique.

Les essais sur les éléments ont montré que les anneaux TH44 choisis supportent sans dégât les déformations radiales prévues qui peuvent atteindre jusqu'à 65 cm. L'essai grandeur nature a par ailleurs confirmé que l'anneau était à même d'utiliser la totalité de sa capacité de déformation (enfoncement maximal de chacun des raccords). La résistance minimale d'enfoncement exigée pour les raccords flexibles (400 kN) a pu être obtenue au moyen de quatre brides installées sur chacun des raccords, en appliquant un couple de serrage de 450 Nm avec un resserrage unique. Concernant la résistance du raccord après son enfoncement complet, on a systématiquement observé une défaillance par perte de stabilité des profilés dans la zone du joint (fig. 5). Ces instabilités sont apparues aussi bien lors des essais « à petite échelle » que lors de l'essai grandeur nature, et aucun essai n'a permis d'obtenir la résistance élastique théorique à la compression de l'anneau entièrement enfoncé. Les valeurs de résistance résiduelle obtenues lors des essais sont de l'ordre de 2500 kN par anneau double, ce qui correspond à environ 40 % de la force normale théorique sans tenir compte d'une instabilité.

Exécution

Sur la base de ces essais, des caractéristiques géotechniques et des pronostics géologiques, il a été décidé d'excaver le terrain poussant du TZM Nord avec un profil ayant un diamètre d'excavation de 11,38 m (pour un diamètre final de 10,38 m) en mettant en place les moyens de soutènement suivants :

- une première couche de béton projeté avant le montage des anneaux (pour prévenir les chutes et assurer un bon appui des anneaux) ;
- un double anneau TH44 chaque mètre avec pose de filets, les anneaux offrant la possibilité d'une déformation radiale de 50 cm ;
- 12 ancrages radiaux d'une longueur de 8 m (ancrage à injection IBO 32/15), sans plaque et mis en place sur des profils espacés d'un mètre ;
- des ancrages longitudinaux du front d'attaque d'une longueur de 12 m (18 m pour la première étape), avec un recouvrement de 6 m ;
- des ancrages horizontaux autour de la voûte ; de 35 à 50 unités d'une longueur de 6-8 m (ancrage à injection IBO 51/32), avec un recouvrement de 4 m ;
- des ancrages supplémentaires d'une longueur de 12 m pour minimiser les déformations asymétriques (ancrage à injection IBO 44/24) ;
- une seconde couche de béton projeté, d'une épaisseur minimale de 25 cm, pour stabiliser les anneaux et augmenter la résistance du soutènement.

Ce système est utilisé, avec certaines adaptations selon les conditions locales, depuis le début de l'avancement dans le TZM Nord en janvier 2005. Il a à ce jour servi au percement des tunnels sur une distance totale d'un peu plus d'un kilomètre (560 m dans le tube Est et 660 m dans le tube Ouest). Il fonctionne de manière satisfaisante puisqu'il a permis de maîtriser les déformations.

Les profilés pour mines se déforment comme prévu : s'il est rare que tous les anneaux soient entièrement fermés par la pression du terrain, quelques-uns sont cependant totalement enfoncés (en cas de déformations asymétriques). Dans la zone d'avancement, il arrive que le béton projeté soit détruit par les fortes déformations de la zone située entre un et quatre mètres après le front d'attaque. Les taux de déformations radiales au front juste après l'excavation sont en général inférieurs à 5 cm par jour. Ces taux diminuent assez rapidement, mais les déformations continuent à évoluer pendant longtemps (fluage). Le taux et l'amplitude des déformations varient fortement en fonction de la géologie et de l'avancement (distance entre la section de mesure et le front d'attaque).

Fig. 4 : Dispositif d'essai pour un segment d'anneau (Photo IG-GBT Sud)

Fig. 5 : Défaillance d'un raccord lors de l'essai grandeur nature (Photo IG-GBT Sud)

Fig. 6: Vue d'ensemble de l'avancement dans le massif intermédiaire du Tavetsch Nord (avec prismes pour mesurer les déformations) (Photo IG-GBT Sud)

Fig. 7: Mesures avec un extensomètre RH, coordonnée 1589 (Document ARGE TRANSCO)

La seconde couche de soutènement en béton projeté du secteur d'avancement (L2) se fait en général environ 30 m derrière le front d'attaque. En programmant correctement la projection finale du béton – une fois atteintes les convergences calculées – la stabilisation finale des tronçons concernés a pu être réalisée comme prévu.

Système de contrôle, mesures et résultats

Les déformations radiales des profils sont surveillées tous les sept mètres, sur des sections comprenant sept prismes de mesure (fig. 6). Le front d'attaque devait en outre être systématiquement équipé avec des micromètres (points de mesure dans un forage) et les déformations de certaines sections étaient surveillées au moyen d'extensomètres.

Les forages pour les micromètres ont été détruits par les déplacements du front d'attaque lors des étapes d'avancement. En remplacement, le front a été équipé d'un nouveau type d'extensomètres RH (*Reversed Head*) d'une longueur de 24 m dont le point fixe est situé, non sur le front d'attaque, mais au fond des forages : on peut ainsi effectuer des mesures à plusieurs étapes, bien que l'extensomètre soit raccourci à chaque cycle. Ce dispositif comprend six extensomètres permettant des mesures à différentes distances du front d'attaque. Ce nouveau système de mesure est installé avec un certain recouvrement, de manière à ce que les déformations longitudinales puissent être mesurées en continu et sans lacune.

Les résultats obtenus avec ces extensomètres RH soulignent l'évolution par palier des déformations (fig. 7). Les mesures sont en outre clairement corrélées avec l'excavation : les déformations augmentent brusquement au début de chaque étape, alors que leur croissance ralentit par la suite.

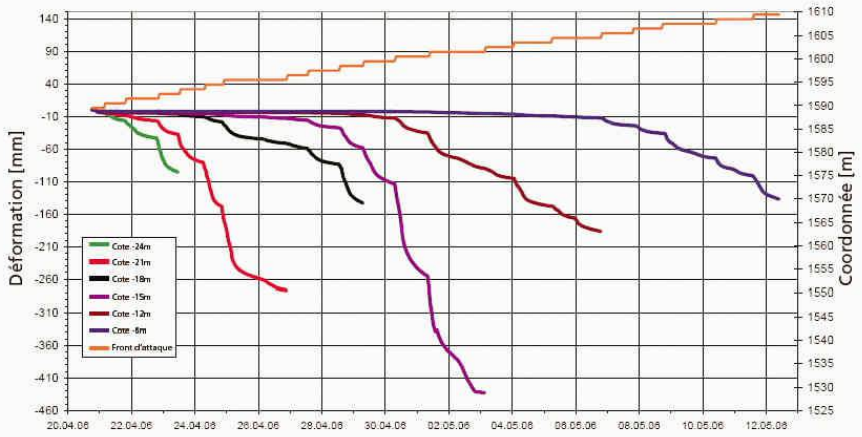
Les derniers extensomètres RH installés forment un système fiable donnant des résultats exploitables. Il est prévu de tester l'utilisation courante de l'équipement comme chaîne de mesure ininterrompue, par recouvrement des extensomètres.

Le système de soutènement doit cependant être constamment adapté aux conditions de terrain rencontrées et à sa réaction, ceci par une exploitation continue des mesures effectuées sur le chantier.

Avancement dans la zone de Clavaniev

Le concept d'excavation, qui est mis en œuvre avec les machines d'aménagement du tronçon, a, jusqu'à présent, fait ses preuves : à ce jour, les deux tubes du tunnel avancent régulièrement à raison d'environ 90 cm par jour, un rythme qui correspond à la cadence prévue dans le contrat. On s'approche maintenant du tronçon le plus poussant du TZM Nord, la zone de Clavaniev, qui sera explorée par carottage depuis Amsteg l'année prochaine. Les résultats de ces investigations, combinées avec les expériences acquises à ce jour, devront permettre d'établir un concept pour le percement du dernier tronçon en direction d'Amsteg.

Andreas Theiler, ing. civil EPF
Chef de projet adjoint secteur Sedrun
IG-GBT Sud, Lombardi SA, Burgerstrasse 22, CH – 6003 Lucerne



7