

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: Tunneliers en zones instables
Autor: Ferrari, Alessandro
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99518>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.03.2025

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

Tunneliers en **zones instables**

Conformément aux pronostics géologiques, le tronçon de Bodio du tunnel de base du St-Gothard (15,9 km) se situe entièrement dans le massif de gneiss de la Levantine de la zone pennique. Ces pronostics lui avaient valu d'être considéré comme propice à l'avancement sur longue distance par tunnelier ouvert avec des grippers. Les deux tunneliers du secteur de Bodio ont néanmoins rencontré deux zones instables qui ont finalement pu être maîtrisées avec succès.

Selon les données géologiques, seules quelques courtes zones de failles perpendiculaires à l'axe du tunnel étaient attendues sur le tronçon entre Bodio et Faido. La présence de longues zones instables, en particulier celle de zones de roche ayant un comportement poussant (voir encadré p. 14) alors que la couverture atteint 1000m, n'était pas prévue et n'a donc pas été considérée comme situation de risque pour les mesures de soutènement du projet définitif qui a servi de base aux documents d'appel d'offre.

Explorations et procédures préparées

En dépit de ces prévisions favorables et pour faire face à d'éventuelles surprises, la planification des travaux prévoyait la mise en place d'un concept d'exploration à l'avancement à partir du front de taille dans le secteur de Bodio. Le concept d'exploration a été adapté pendant les travaux sur la base des connaissances et expériences acquises. Dans un premier temps, on avait prévu d'utiliser la méthode par exploration sismique. Celle-ci s'est avérée peu efficace et a été abandonnée après environ 1000 m d'excavation, à la suite de la rencontre de la première zone importante de failles sub-horizontales dans le tube Est, qu'elle n'avait pas permis d'anticiper. L'exploration a alors été assurée par des forages destructifs radiaux et longitudinaux, complétés le cas échéant par des forages carottés.

En plus de cette exploration à l'avancement et des plans de mesure en cas d'événements extraordinaires, un concept visant au franchissement de massifs difficiles avait été

élaboré préventivement. Qu'il s'agisse de zones instables prévues ou non, une procédure décrivant pas à pas les interventions a été établie, non seulement pour l'avancement des tunneliers, mais aussi pour les galeries transversales excavées à l'explosif.

Faille «Tm 2 705 »

Après avoir parcouru environ 200m, le tunnelier du tube Est s'est trouvé confronté à une faille sub-horizontale instable totalement inattendue. D'une épaisseur de quelques mètres, elle se compose essentiellement de kakirite, de cataclasite et de roches fortement fracturées et suit l'axe du tunnel sur environ 400m, principalement dans la partie de la calotte. Cette faille a aussi été détectée dans le tube Ouest, sur une longueur d'environ 100 m (fig. 1). Elle a en outre perturbé les travaux d'excavation de deux galeries transversales.

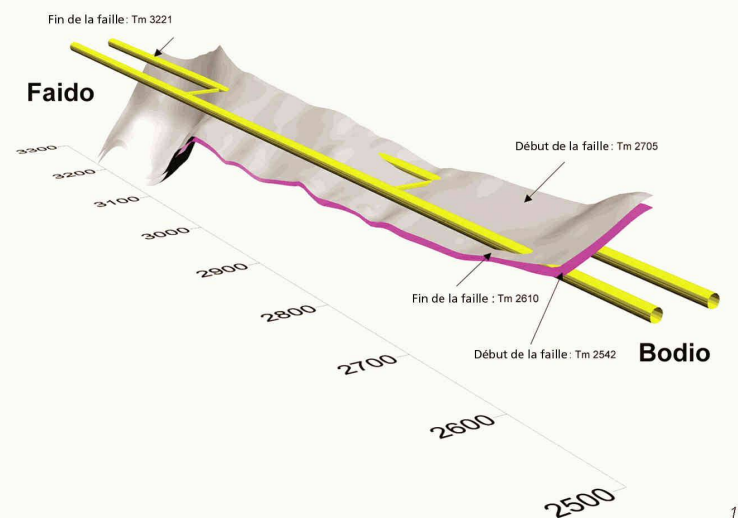


Fig. 1 : Représentation géologique en 3D de la faille « Tm 2705 » (Document Geolog.ch)

Fig. 2 : Formation d'une cavité en calotte à la suite des travaux d'excavation à travers la faille « Tm 2705 » (Photo Lombardi SA)

Fig. 3 : Coupe type du tunnel à simple voie du secteur de Bodio excavé au tunnelier avec soutènement lourd (Document Lombardi SA)



2

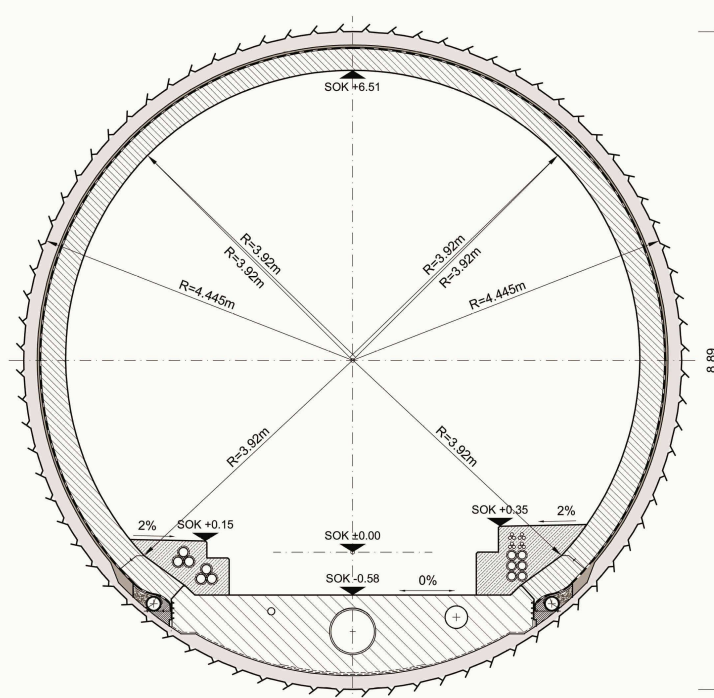
La principale situation de risque lors de la traversée d'une telle faille concerne les détachements de matériaux sans cohésion, sur ou juste derrière la tête de forage. Ceux-ci se sont traduits par la formation de nombreuses cavités en calotte, lesquelles se sont étendues dans le cas extrême sur toute la section du tunnel pour atteindre jusqu'à 6 m de hauteur (fig. 2).

Le soutènement a été réalisé immédiatement dans toute la zone du front de taille (L1*). Des cintres métalliques fermés (type TH29) ont été placés à 1 m de distance les uns des autres. Ils étaient combinés avec des treillis et un revêtement en béton projeté d'environ 15 cm. Les cavités ont alors été remplies, généralement avec du béton projeté, dans quelques cas avec du béton coulé sur place.

Le projet prévoyait la possibilité d'un élargissement maximal de 30 cm du diamètre de forage courant (8,80 m) pour traverser des éventuelles failles locales. Cette mesure devait permettre, le cas échéant, de disposer d'un espace additionnel pour faire face à d'importantes convergences ou mettre en place un soutènement et un revêtement définitif plus résistant. Le diamètre de forage maximal réalisé pratiquement n'a été que de 8,89 m, car son élargissement n'a été possible que dans la limite d'une augmentation du calibre des outils périphériques. Le projet a donc dû être adapté rapidement.

Afin d'éviter des conflits avec le futur système de drainage, des cintres métalliques complets de type TH29 spéciaux, comportant une hauteur réduite au droit du pied du parement, ont été conçus et mis en place. En outre, les 30 cm prévus par le projet d'appel d'offre pour l'anneau interne en béton coulé sur place dans les zones de failles ont été ramenés à 25 cm, comme pour le profil courant (fig. 3). Pour des raisons statiques, les voûtes du tunnel et des galeries transversales dans la zone instable ont été entièrement armées, l'armature étant dimensionnée par combinaison du moment de flexion et de l'effort normal. Ces efforts correspondent au cas de charge le plus défavorable, qui prend notamment en compte la charge de dislocation, le poids propre, la variation de température et la charge due au trafic. La charge de dislocation, qui est définie par l'ensemble du poids propre des blocs détachés du massif qui pèse sur la zone de la calotte de l'anneau intérieur, a été estimée sur la base d'une analyse détaillée des conditions géologiques effectives. Le radier définitif n'a, quant à lui, pas dû être armé.

Finalement, pour répondre aux nouvelles exigences de protection anti-incendie, le revêtement de la voûte dans ce tronçon du tunnel a été bétonné avec 2 kg/m³ de fibre polypropylène monofilament.



3



Fig. 4 : Situation de la zone de failles dès le Tm 13 460 (Document Geolog.ch)

Fig. 5 : Déformation des cintres métalliques fermés de type TH29 (Photo Lombardi SA)

Fig. 6 : Travaux de libération du tunnelier Ouest resté bloqué (Photo Lombardi SA)

Compte tenu des conditions géologiques particulièrement difficiles de la zone instable et de la phase de rodage des travaux, l'avancement des tunneliers n'a pu être que d'environ 2,5 m par jour.

Failles instables et massif poussant

Les deux tunneliers partis de Bodio ont croisé une nouvelle zone de failles à partir du Tm 13 460. Cette seconde zone a engendré tout d'abord la formation de cavité en calotte et au parements dans le tube Est (env. Tm 13 450 et 14 340), puis dans le tube Ouest (env. Tm 13 745 et 14 425). Il s'agit de deux failles sub-verticales quasiment parallèles qui coupent le tube Est et se poursuivent en direction du tube Ouest avec un angle de 5 à 10° par rapport à l'axe du tunnel, et qui plongent vers l'Est avec un angle de quelque 65° (fig. 4). Se présentant sous la forme d'une plaque de 3 à 5 m d'épaisseur, les failles comprennent des roches cataclastiques, dans lesquelles s'intercalent des couches de kakirite. Elles sont délimitées par des roches fortement fracturées dans la zone de contact.

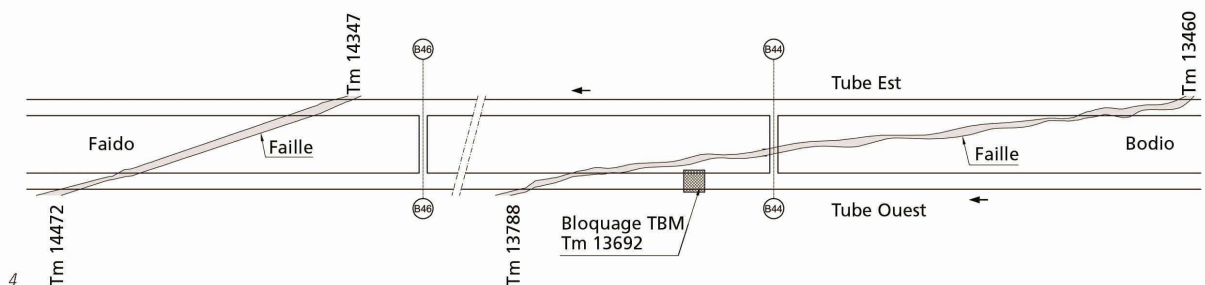
Lors du passage dans les parties adjacentes aux failles, le tunnelier a en outre subi de fortes pressions exercées par la roche sur le bouclier court situé juste derrière la tête de forage. Les cintres métalliques fermés (TH29) mis en œuvre

dans la zone d'avancement ont flué, des plaques de béton projeté se sont détachées et les treillis se sont fortement déformés (fig. 5) à la suite de la convergence du tunnel. Ces phénomènes sont révélateurs de la présence de roche à caractère poussant : l'excavation engendre une surcharge du massif autour de la cavité, induit des déformations plastiques, ce qui tend à fermer toujours plus la cavité.

Ce phénomène est apparu plus particulièrement au droit du tube Ouest, entre le Tm 13 595 et le Tm 13 692, à un endroit où la faille sub-verticale de roche instable située entre les deux tunnels se rapproche du tube Ouest. Les pressions sur le bouclier court étaient telles que le tunnelier n'arrivait plus à vaincre les forces de frottement et s'est trouvé bloqué le 3 mars 2006 près du Tm 13 692. L'avancement n'a repris que dix jours plus tard, à la suite du creusement d'une cavité en calotte (fig. 6).

Dans la zone perturbée, les conditions géologiques – et par conséquent leurs effets sur le procédé d'avancement – variaient considérablement le long des deux tunnels. Sur une distance d'au moins 1 km, la délimitation des transitions entre les zones stables, les zones instables et les zones de roche à caractère poussant était loin d'être évidente.

Les déformations du soutènement ont été enregistrées par des mesures de convergence transversales sur des stations



4

espacées de 5 à 15 m. Les mesures ne pouvaient toutefois commencer qu'une fois le soutènement mis en œuvre et les sections de référence n'ont pu être établies qu'à sept ou huit mètres derrière le front d'excavation. Les résultats montrent d'une part que les déformations transversales sont fortement asymétriques et inégales le long de l'axe du tunnel, et d'autre part qu'elles se stabilisent complètement 80 à 100 m derrière le front d'excavation. Les convergences maximales atteignent 10 cm, auxquels il convient d'ajouter les convergences survenues en amont de la section de référence, qu'on estime entre 4 et 7 cm.

Le radier a pu être bétonné conformément au projet d'exécution, sans conséquence directe sur la progression du tunnelier. Ensuite, le radier n'a pas subi de déformations majeures.

En faisant abstraction du blocage du tunnelier Ouest, l'avancement des tunneliers dans cette seconde zone de failles a été compris entre 7 et 15 m par jour, soit beaucoup plus que lors de la traversée de la faille « Tm 2705 ». Cette performance est principalement le fruit de l'expérience acquise par les équipes et des améliorations apportées aux installations de pose des cintres métalliques.

Modélisation

Comme pour la faille « Tm 2705 », la sécurité structurale et l'aptitude au service du revêtement définitif de cette nouvelle zone de failles repose aussi sur un anneau de 25 cm en béton armé et un radier non armé. Pour parvenir à une armature uniforme sur l'ensemble du tronçon, on a considéré soit des charges du même type que celles de la faille « Tm 2705 », soit des charges relatives à la poussée du massif rocheux. Les charges dues à la poussée du massif ont été déterminées par un calcul inverse (*back analysis*), en utilisant un modèle 2D aux différences finies qui considère les déformations observées et le type de soutènement adopté (cintres TH29 tous les mètres, treillis et 14-18 cm de béton projeté). Le modèle tient compte de l'influence de la faille entre les tubes, des propriétés anisotropiques de la roche dues à sa schistosité ainsi que de l'influence mutuelle des deux tubes (fig. 7).



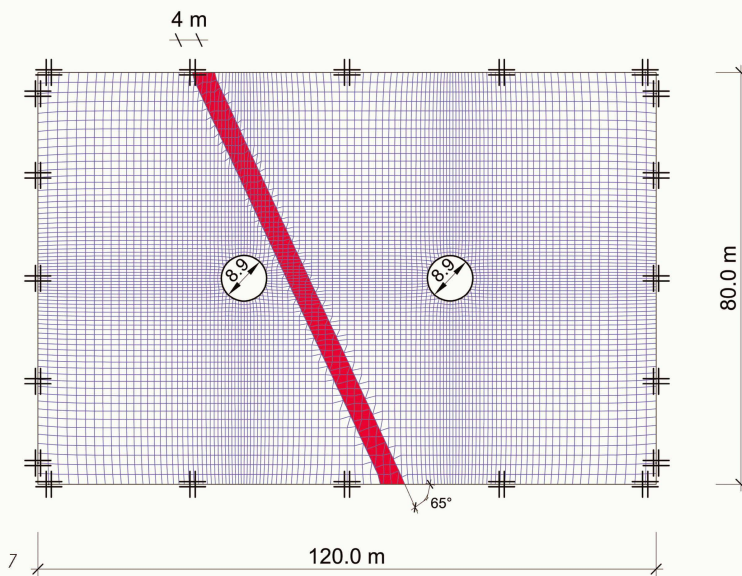
5



6

Fig. 7 : Modèle de calcul aux différences finies utilisé pour la back analysis (Document Lombardi SA)

Fig. 8 : Courbes caractéristiques du massif (Document Lombardi SA)



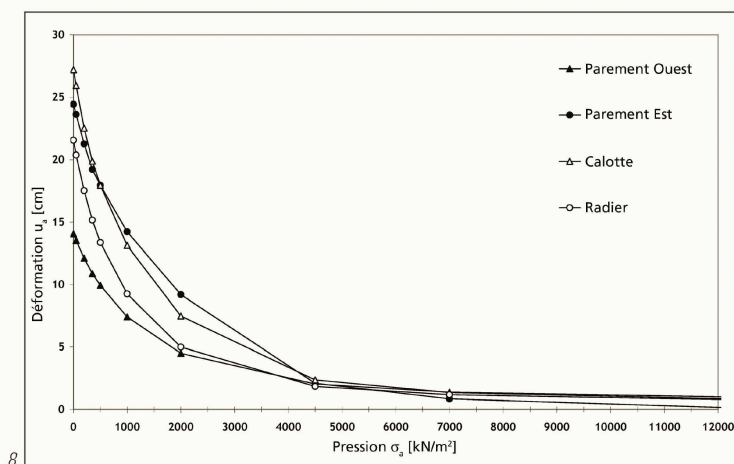
Lors du déblocage du tunnelier Ouest, des carottes ont été prélevées pour définir les propriétés mécaniques des roches (essais de compression triaxiale effectués à l'EPFZ). Ces essais ont souligné l'influence, sur la résistance de la roche, de la direction de la schistosité par rapport à celle du chargement. Les essais et les déformations mesurées ont permis de calibrer le modèle, notamment à l'aide d'une analyse de sensibilité des paramètres de calcul. On a alors déterminé des courbes caractéristiques pour le massif au droit de la calotte, des parements et du radier (fig. 8). Ces courbes permettent, en fonction de la résistance du soutènement, d'estimer les pressions effectives exercées par le massif sur le soutènement, puis sur l'anneau intérieur (méthode convergence-confinement). Compte tenu des fortes déformations subies par le soutènement, l'estimation de sa résistance effective était très difficile: des valeurs minimales et maximales de cette résistance ont été estimées et différentes hypothèses de charge sur le revêtement définitif ont ensuite été déduites.

Les calculs ont confirmé les observations *in situ*, à savoir que les pressions dues à la poussée effective du massif sont asymétriques, ce qui est normalement peu courant pour des tunnels à grande profondeur où la pression est censée être homogène. Cette asymétrie des charges est la conséquence de la coexistence de deux situations particulières :

- la présence de la faille inclinée à 65° entre les deux tubes ayant des propriétés mécaniques très différentes de celles du massif,
- l'anisotropie du massif en matière de résistance (schistosité horizontale).

Travaux de reprofilage du gabarit

Les déformations importantes subies par le soutènement dans les zones de faille ont engendré des sous-profilés de l'ordre de 15 cm qui font qu'environ 300 m de chacun des tubes doivent être reprofilés, puisque de telles déformations empêchent la mise en œuvre du revêtement définitif. Si les travaux de reprofilage ne sont pas rares lors de la construction des tunnels, le cas de Bodio comprend – en plus





des risques géologiques – des particularités qui compliquent la situation: radier déjà réalisé (y compris les conduites d'évacuation des eaux), section limitée et problèmes logistiques (longue distance entre le portail et le lieu d'intervention).

Il a été décidé que les travaux de reprofilage seront réalisés à l'aide d'une nouvelle installation dans chacun des tubes. Celle-ci sera intégrée au chantier qui assure la mise en œuvre du revêtement définitif. La longueur des étapes d'intervention est conditionnée par la situation géologique locale. Les travaux – démolition du soutènement déformé, reprofilage et nouveau soutènement – doivent garantir la sécurité des ouvriers pendant plusieurs mois, jusqu'au bétonnage du revêtement définitif. L'épaisseur effective du reprofilage varie fortement en fonction des déformations, du soutènement existant et des nouvelles mesures de soutènement nécessaires. Selon les situations, il est prévu de recourir à des interventions allant du type « léger » – tronçons où le reprofilage reste local et les nouvelles mesures de soutènement restent limitées – au type « lourd » – massif poussant où des risques de déformations additionnelles et de soulèvement du radier sont à craindre. Dans ce dernier cas, il s'agit de recréer le plus rapidement possible un nouveau soutènement complet, formant un anneau rigide.

Perspectives

Les expériences de Bodio prouvent que des études géologiques soignées et approfondies ne mettent pas à l'abri de situations inattendues, tout particulièrement pour des percements à grande profondeur. Si une coopération de tous les participants du projet et la détermination de mesures planifiées avec une répartition claire des compétences de chacun sont des conditions de base pour maîtriser des événements inattendus, des mesures préventives peuvent toutefois être prises, comme par exemple:

- même en cas de pronostics géologiques favorables, des scénarios relatifs à des événements extraordinaires doivent être élaborés et préparés;

- les installations pour la mise en œuvre des mesures de soutènement lourdes – en particulier la pose des cintres métalliques – doivent être incluses dès le début des travaux d'excavation et les équipes travaillant au front doivent être formées le plus tôt possible;

- l'exploration à l'avancement doit être régulièrement adaptée selon les conditions géologiques effectivement rencontrées. Les sondages à l'avancement – qui peuvent être effectués pendant le poste de maintenance – doivent être suffisamment longs et approfondis, même en cas de pronostics géologiques favorables;

- il est recommandé de planifier une réserve de place raisonnable dans le profil normal pour faire face à d'importantes déformations du soutènement, surtout dans le cas de travaux d'excavation au tunnelier en roche dure, où la fonctionnalité effective des dispositifs pour une augmentation du diamètre de forage est incertaine;

Dans des projets de cette complexité, des imprévus pendant les travaux ont inévitablement des répercussions significatives sur les coûts et les délais. Celles-ci peuvent toutefois être limitées par la recherche immédiate de solutions techniques appropriées et par une prise de décision ponctuelle adéquate.

Alessandro Ferrari, ing. civil EPF
Chef de projet secteur Bodio
IG-GBT Sud, Lombardi SA, CH – 6648 Minusio