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: Excavations à grand diamètre dans les failles
Autor: Boissonnas, Yves
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99517

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: 14.08.2025

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

Yves Boissonnas

Excavations à **grand diamètre** dans les failles

En dépit de pronostics favorables, l'excavation de la station multifonctionnelle de Faido a finalement dû être réalisée à proximité d'une faille, ce qui a considérablement influencé les travaux de ces dernières années. La distribution du site a été revue et les soutènements ont dû être adaptés. La traversée de la faille est aujourd'hui maîtrisée et les excavations dans la zone d'influence de cette dernière touchent à leur fin.

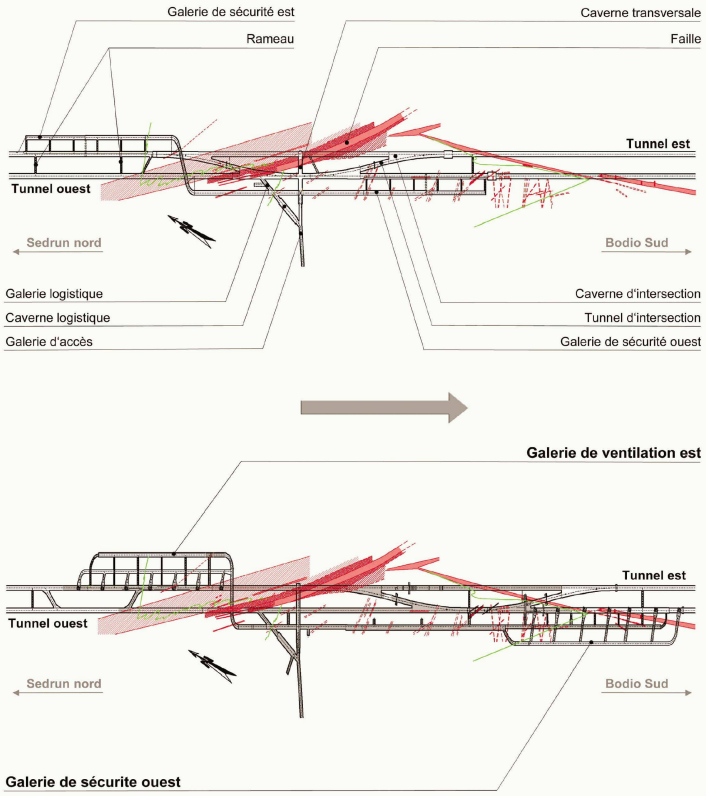
La zone d'attaque intermédiaire de Faido est destinée à accueillir une station multifonction (MFS) comprenant des locaux techniques, deux stations de sécurité reliées par une galerie de secours et deux échangeurs de voie avec de grandes cavernes d'intersection. Ce site est excavé de manière conventionnelle, à l'explosif. Il doit également accueillir les tunneliers en provenance de Bodio, qui seront révisés et transformés à Faido pour poursuivre le creusement en direction de Sedrun.

Géologie et modification du projet

Dès le début des travaux, en avril 2002, une faille s'est manifestée par des éboulis apparus lors de l'excavation de la caverne transversale (fig. 1). Des problèmes de comportement plastique de la roche, à l'intersection de la galerie de fuite Est et de la galerie logistique, ont en outre été rencontrés.

La géologie du site n'avait pas été jugée critique avant les travaux. Si l'interprétation des éléments à disposition prévoyait des intercalations de kakirites[1] entre les gneiss de la Leventina et ceux du Lukmanier, il s'est avéré que la frontière entre ces deux massifs se trouve plus au Sud que prévu. Il faut noter que le passage d'une formation rocheuse à l'autre n'avait posé de problème ni lors de l'excavation de la galerie de sondage de la Piora, ni lors de celle de la galerie d'accès, toutes deux ayant traversé une zone de contact non perturbée entre les formations. Par ailleurs, les pronostics initiaux avaient en général été confirmés par les données géologiques relevées lors de l'excavation de ces deux galeries.

Pour mieux cerner la situation, une campagne approfondie de sondages – 27 carottages complétant plus de 2 600 mètres de forages existants – a été lancée à partir des diverses galeries alors en phase d'exécution. Les forages exécutés à partir de la galerie de fuite Ouest en direction des tubes principaux et des cavernes d'intersections (entre le printemps 2002 et l'été 2003) n'ont révélé aucun problème majeur et ont fourni des résultats en accord avec l'analyse préliminaire. Il n'en a pas été de même avec les forages exécutés



1

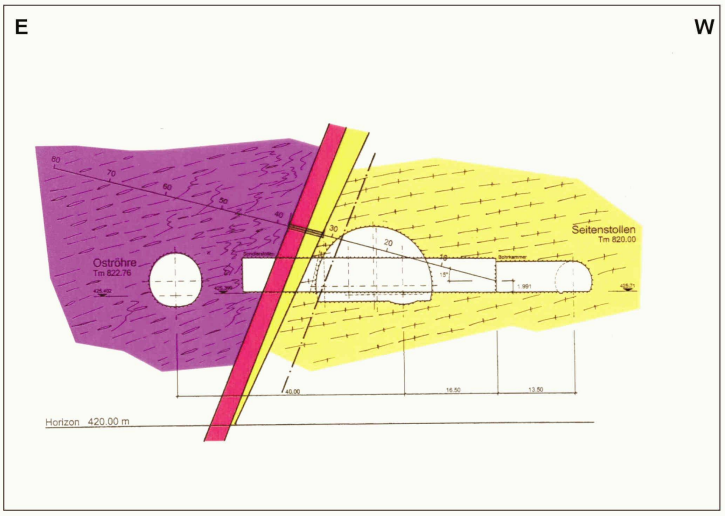
[1] Les kakirites sont des roches dont la structure a été détruite par des cisaillements du massif rocheux. Les minéraux ont été soumis à une transformation pendant ces cisaillements et la structure minéralogique initiale n'est généralement plus reconnaissable.

Fig. 1 : Schéma de la station multifonctionnelle de Faido : situation initiale (en haut) et après modification (en bas)

Fig. 2 : Caverne d'intersection Sud du tube Ouest

Fig. 3 : Coupe géologique à travers la caverne d'intersection Sud du tube Ouest

2



3

vers le nord depuis la galerie logistique. Dans ce second cas, le passage d'un simple carottage à travers la zone de la faille s'est avéré très délicat : vu le comportement fortement poussant du massif, les carottages restaient « coincés » dans la faille et n'arrivaient pas à la traverser.

Sur la base de ces nouveaux sondages, la géologie a été réinterprétée. Ce travail a été réalisé avec le soutien d'une « task force » regroupant des experts, des représentants du maître d'œuvre, les ingénieurs du projet, la direction locale des travaux, les géologues, la SIOP[2] et l'entreprise. La « task force » a analysé la disposition générale prévue pour les excavations, ce qui a conduit au déplacement du site de 600 mètres vers le sud, pour placer les cavernes d'intersection dans une géologie plus favorable (fig. 1). Cette décision s'est avérée particulièrement adéquate, puisque ce déplacement a aussi permis que toute la zone de la faille se trouve dans un tronçon excavé conventionnellement : la traversée avec des tunneliers de cette faille – bien plus importante que celles rencontrées dans la section de Bodio – aurait sans doute posé de gros problèmes (voir article p. 19).

Malgré cette décision, deux éléments ont tout de même dû être exécutés dans des zones critiques. Il s'agit d'une part de la caverne d'intersection Sud du tube Ouest, où une section de 330 m² (fig. 2) devait être creusée à moins de quatre mètres d'une faille, et d'autre part, de la réalisation d'un tronçon du tube Ouest au Nord de la caverne transversale, à travers la faille, dans un enchevêtrement de deux roches comprenant les gneiss de la Leventina et du Lukmanier.

Intersections Sud du tube Ouest

Globalement très favorable, le déplacement de 600 mètres vers le sud de la MFS de Sedrun a entraîné que la plus grande section de la caverne d'intersection se situe à proximité d'une faille (fig. 3). Afin de planifier au mieux cette excavation qui s'annonçait délicate, une galerie de sondage a été creusée pour définir avec précision l'emplacement et l'orientation de la faille et permettre des examens géologiques plus poussés, rendant possible l'élaboration d'un nouveau projet.

La section allait être creusée en plusieurs étapes, le soutènement étant assuré par des ancrages de 6 et 12 m, combinés avec la mise en place de 40 cm de béton projeté comprenant des saignées pour compenser les quelque 50 cm de déformation prévus. La séquence de mise en place des divers ancrages a été simulée avec le programme *FLAC*, dont les résultats ont été utilisés pour comparer le

La « task force »

Experts :	Prof. dr K. Kovari, Prof. dr A. Steck, Dr. U. Etter
Maître d'œuvre :	S. Flury, F. Pellegrini
Ingénieurs du projet :	M. Rehbock-Sander, Y. Boissonnas, H. Hagedorn
Direction locale des travaux :	B. Röthlisberger
Géologues :	Dr F. Keller, R. Volpers
SIOP :	W. Dallapiazza
Entreprise :	R. Baggenstos

[2] Sicherheitorientierte Prüfung

(Photo Milo Keller/ECAL)

Fig. 4: Soutènement à travers la faille du tunnel Est

4

comportement effectif du système avec les grandeurs calculées et prendre les décisions nécessaires au moment adéquat (voir encadré p. 14).

L'excavation, qui s'est faite exactement selon ces prévisions, nécessitait une communication optimale entre le chantier et les responsables du projet. Les déformations étaient relevées tous les quatre jours sur des profils de mesures comprenant cinq réflecteurs 3D posés tous les 5 m et sur des extensomètres de 25 m de longueur. Les résultats étaient disponibles quelques heures déjà après la mesure, grâce au logiciel *GEOvis*. Le géotechnicien pouvait alors contrôler l'évolution des déformations et coordonner avec le chantier les prochaines étapes de fermetures des saignées pour rigidifier le soutènement et stopper les déformations. A noter enfin que la communication a été grandement facilitée par le système *SISO*, une banque de donnée qui donne accès à divers relevés de chantier (notamment le journal de la direction des travaux) ainsi qu'à de nombreuses photos et autres documents permettant une compréhension rapide des conditions rencontrées. Ce système permet aux acteurs du projet – concepteurs, géotechniciens et responsables de la direction des travaux – de régler rapidement les problèmes depuis des lieux de travail différents.

Tube Ouest

Dans le nouveau projet, le tube Ouest traverse une faille au Nord de la caverne transversale. Cette faille avait déjà été traversée par le tube Est au Sud de la caverne transversale, mais l'excavation avait alors été réalisée dans les gneiss de la Leventina, une roche plus résistante que sa voisine du Lukmanier. La zone avait été maîtrisée par la pose de cintres coulissants de type TH 36, d'ancrages de 4 m et de 30 cm de béton projeté, avec des saignées pour absorber les 25 cm de déformation calculés (fig. 4).

Le tube Ouest traverse quant à lui la faille dans un mélange de gneiss du Lukmanier et de gneiss de la Leventina. Lors de l'excavation, la très forte contrainte initiale dans la roche (près de 40 MPa) a provoqué sa plastification. Il est nécessaire que cette roche puisse se déformer, afin de se décomprimer et atteindre des niveaux de sollicitation pouvant être repris par un soutènement (contre-pression de l'ordre de 1 à 3 MPa) et assurer la stabilité du système.

Pour éviter une trop grande zone de décompression de ce massif fortement fracturé avec un comportement poussant, la « task force » a décidé de mettre en place des cintres lourds de type HEM 180. Les calculs géotechniques ont montré qu'en laissant à la roche suffisamment de temps pour se

(Photo Milo Keller/ECAL)

5

Stabilisation en terrain poussant

Lorsque la combinaison du poids de la roche, des contraintes tectoniques et des contraintes engendrées par les excavations induisent des sollicitations supérieures à la résistance à la compression du massif rocheux, on observe un comportement dit « poussant » du terrain qui se traduit par de fortes déformations.

Cette situation délicate exige des méthodes complexes de stabilisation, combinant les divers éléments du soutènement. La pression appliquée contre la roche par les moyens de soutènement mis en place juste après l'excavation conditionne le développement des déformations (convergences) : celles-ci se stabilisent quand la pression de la roche – qui diminue au fur et à mesure que le massif se déforme – est égale à la pression exercée par le soutènement. Si on laisse la roche se déformer davantage, elle continue à se détendre et le facteur de sécurité augmente, pour autant que le soutènement final reste le même.

La solution consiste donc à laisser la roche se déformer jusqu'à une certaine valeur – que l'on estime par des calculs préalables – en y appliquant un soutènement « restreint », dont le but est d'une part de garantir la sécurité du travail pendant la phase de déformation et, d'autre part, de contrôler cette dernière. Dès que les déformations atteignent les valeurs estimées, le reste du soutènement provisoire est mis en place. Si le soutènement « restreint » est trop résistant, l'équilibre se fera avant que les déformations prévues soient atteintes, et l'espace restant entre les déformations prévues et les déformations effectives devra alors être rempli avec du béton supplémentaire.

A la fin de la phase de déformation, on applique un soutènement capable d'apporter au minimum une pression garantissant l'équilibre du système, en utilisant la méthode de convergence-confinement[1]. Une pression de soutènement plus forte que celle nécessaire à l'équilibre du système correspond à une réserve de résistance. En revanche, si la pression de la roche reste supérieure à celle pouvant être fournie par le soutènement, le système continue à se déformer, ce qui risque de provoquer des sous-profils ou, dans un cas extrême, l'obstruction du tunnel par la roche. Une ré-excavation peut alors devenir nécessaire pour garantir le gabarit exigé. Cette éventualité de reprise des sous-profils ne peut être exclue dans des terrains poussants.

Une fois les déformations totalement stabilisées, on met en place le revêtement, dont le rôle est de reprendre les pressions agissant sur le soutènement, celui-ci n'étant pas dimensionné pour résister à long terme : les ancrages peuvent être victimes de corrosion, le béton projeté peut être attaqué par des eaux agressives, etc. Le revêtement doit donc être en mesure de reprendre la totalité des sollicitations. Si les déformations ont été rapidement arrêtées par un soutènement trop rigide, le revêtement doit être en mesure de supporter de fortes pressions, la roche n'ayant pas pu se détendre suffisamment. En revanche, si on laisse la roche se détendre de façon incontrôlée, elle perd sa résistance, ce qui crée une zone de décompression (zone ameublie) produisant une charge morte sur le revêtement.

Ces quelques explications montrent à quel point la maîtrise des déformations est essentielle en cas de terrain poussant. Cette maîtrise dépend bien sûr de la qualité des calculs (donc de la connaissance des caractéristiques des roches dans lesquelles le percement a lieu), mais elle est aussi le résultat de l'expérience des divers acteurs présents (géologues, ingénieurs et foreurs).

[1] Cette méthode consiste à comparer, à partir des déformations, la résistance du soutènement avec les sollicitations de la roche.

Fig. 5 : Fluage des cintres assurant le soutènement

Fig. 6 : Travaux de reprofilage du tunnel Ouest

déformer avant de rigidifier le soutènement avec les cintres, les pressions de la roche peuvent être reprises par le seul soutènement. Pour des raisons de sécurité, la dislocation rapide de cette roche fracturée ne permet pas de lui laisser le temps de se déformer avant la mise en place des cintres, ceci en raison des risques que des éléments de roche se détachent, mettant ainsi en danger les ouvriers. Les cintres ont dû être montés à proximité du front de taille, avant que les déformations permettant la décompression partielle de la roche aient eu lieu. Le montage du soutènement comprenait aussi un remplissage de béton de 40 cm – derrière et entre les cintres – ainsi que des ancrages de 4 m.

Après quelques semaines, la pression sur le soutènement est devenue si forte que des cintres ont commencé à fluer (fig. 5), ne fournissant plus la résistance demandée. La mise en place d'ancrages lourds, de 12 m de longueur, n'a toutefois pas été à même d'empêcher la poursuite des convergences diamétrales qui ont atteint jusqu'à 1,6 m pour un diamètre d'excavation de 10 m. Ces déformations se sont produites sur une période de trois mois. Les travaux d'excavation ont alors été interrompus et une reprise de la zone était inévitable. Un nouveau type de soutènement a dû être envisagé sur la base d'une rétroanalyse[3] et des observations faites.

Ce système comprenait une nouvelle excavation du profil jusqu'à un diamètre de 12 m. Une première série d'ancrages, d'une longueur de 6 m, a été mise en place directement à l'avancement. Le soutènement était ensuite renforcé par une seconde série d'ancrages de 12 m, réalisés une fois la première phase de déformation achevée (entre 50 et 80 % des déformations totales), afin de ne pas soumettre ces longs ancrages à de trop fortes élongations. Le système était alors rigidifié par la mise en place, par étapes, d'une voûte en béton projeté de 60 cm assurant la fermeture des saignées laissées dans les premières couches de béton projeté. En plus des 40 cm d'espace prévus pour la convergence, 50 autres centimètres ont été réservés dans le profil pour un éventuel renforcement ultérieur du soutènement. Cette réserve était nécessaire, puisque le comportement du massif n'a pas pu être modélisé : l'enchevêtrement des deux roches – résultat d'un plissage du massif dans les deux directions – ne permettait en effet pas de définir un modèle géologique suffisamment précis.

Au cours de l'exécution (fig. 6), les convergences ont dépassé les 50 cm radiaux prévus, la vitesse de déformation

6

[3] Analyse des déformations mesurées, à partir de laquelle sont déterminées les propriétés des roches.

Fig. 7 : Percement du tunnel Est

(Sauf mention, toutes les images illustrant cet article proviennent de Amberg Engineering SA*)*

radiale atteignant par endroit plus d'un centimètre par heure. En analysant les déformations, les projeteurs ont décidé d'utiliser la réserve d'espace prévue pour absorber des convergences supplémentaires: lorsque celles-ci ont atteint 90 cm, le système a été rigidifié en fermant les saignées (béton projeté) et les couches finales en béton projeté ont été appliquées pour accroître la résistance du système. Ainsi, il a été possible de maîtriser le massif dans cette zone.

A noter encore que des phénomènes de décompression violente (on parle aussi de « coup de terrain ») ont accompagné les travaux d'excavation. La présence de « piliers » de roche plus résistante dans des roches plus tendres peut provoquer des dépassements de la résistance à la compression desdits piliers: les déformations engendrées par l'excavation des galeries entraînent des concentrations d'efforts dans les piliers, qui se traduisent par des ruptures violentes se manifestant par des détonations similaires à des explosions. Des mesures ont dû être prises pour garantir la sécurité des ouvriers: elles comprennent un renforcement du soutènement par des éléments capables de reprendre les forces dynamiques provoquées par ces décompressions violentes, l'interdiction d'accès aux zones dangereuses et une surveillance intensifiée des phénomènes.

Direction Sedrun

Le fort engagement des partenaires du projet fait que les zones délicates à proximité de Faido sont aujourd'hui excavées: les déformations se sont stabilisées et les travaux de préparation pour le déplacement des tunneliers à travers le site avancent à grande vitesse. Le premier tunnelier (tube Est) est arrivé le 6 septembre 2006 (fig. 7), alors que le second a fini l'excavation du tronçon de Bodio le 26 octobre 2006. Les deux tunneliers doivent reprendre le creusement du tronçon vers Sedrun (environ 11 km) au printemps 2007.

Yves Boissonnas, ing. civil EPF/SIA
Chef de projet secteur Faido
IG-GBT Sud, Amberg Engineering AG
Trockenloostrasse 21, CH – 8105 Regensdorf-Watt

7