

Hydrogeology of Crystal Rocks in the Planning and Construction of Underground Structures.

Giorgio Höfer-Öllinger

Geoconsult ZT GmbH, Hölzlstraße 5, A-5071 Wals/Salzburg.

ABSTRACT: Underground excavations usually have a significant impact on hydrogeological runoff. Water seepage affects underground construction and the long-term behaviour of the structure. The flow paths can be altered by underground activity and the spring areas can become infiltration zones. Concerning the healthy massif, permeabilities near a cavity can increase or decrease. The increase in permeability through excavations in an environment of shear stress and associated water inlets, have a lapse, which can lead to problems in mechanized tunnels when falling below a critical feed rate. When a rock mass is drained, deformations occur, which are reflected in surface settlements; the drainage of the massif causes changes in the physical parameters and the chemical composition of the groundwater. The characteristics of the leaks found in tunnels and drains do not reflect the state of the unaffected groundwater. Numerous parameters in the forecast can lead to over- or underestimations of the actual flow rates of water seepage. In addition to a forecast, it is recommended to carry out sensitivity and risk analyses, in particular to exceeding the value of the forecast and when assessing environmental compatibility, the worst possible scenario.

RESUMEN: Las excavaciones subterráneas suelen tener un impacto importante en la escorrentía hidrogeológica. Las filtraciones de agua tienen un efecto durante la construcción subterránea y el comportamiento a largo plazo de la estructura. Las vías de flujo pueden ser alteradas por la actividad subterránea y las áreas de origen se pueden convertir en zonas de infiltración. Las permeabilidades cerca de una cavidad pueden aumentar o disminuir. El aumento de la permeabilidad a través de túneles cerca de la relajación en un entorno de esfuerzos de corte y las entradas de agua asociadas tienen un lapso, lo que puede conllevar a problemas en túneles mecanizados al caer por debajo de una velocidad de avance crítica. Al drenar un macizo rocoso ocurren deformaciones, que se reflejan en los asentamientos de la superficie; el drenaje del macizo provoca cambios en los parámetros físicos y en la composición química de las aguas subterráneas. Las características de las filtraciones que se encuentra en los túneles y en los drenajes no reflejan el estado del agua subterránea no afectada. Numerosos parámetros en el pronóstico pueden llevar a sobre- o subestimaciones de las caudales reales de filtraciones de agua. Además de un pronóstico, se recomienda realizar análisis de sensibilidad y riesgo, en particular con respecto a exceder el valor del pronóstico y al evaluar la compatibilidad ambiental, el peor escenario posible.

KEYWORDS: hydrogeology, tunneling, underground excavation

1 INTRODUCCIÓN

Las prospecciones subterráneas provenientes de sondajes, galerías de exploración, túneles y cavernas (de manera intencional o no) proporcionan un contacto directo y un acceso a los procesos hidrogeológicos. Una prospección generalmente se asocia con un cambio en estos procesos, cuyo conocimiento es importante en las fases iniciales de planificación, como estudios de selección de corredores, estudios de variantes o de factibilidad del proyecto. La influencia de obras subterráneas en la

hidrogeología juega un papel importante en los procedimientos de concesión de licencias, ya que aquí se debe probar la protección de los derechos de terceros y del medio ambiente. Durante la construcción, el impacto del agua subterránea es relevante desde la perspectiva de higiene y seguridad y contractualmente, mientras que los programas de monitoreo verifican los impactos ambientales y/o las medidas de mitigación para evitar efectos indeseables [Reichl, P., Domberger, G., Reszler, C. & G. Winkler (2016)]. La caracterización hidrogeológica de un macizo rocoso es una

labor compleja, se debe realizar una ponderación entre factores influenciadores a

En la presente publicación, se formulan las relaciones más importantes en la interacción entre acuíferos en una roca fracturada y las cavidades (túneles). No se incluyen las derivaciones de fórmulas y modelos, ni tampoco una descripción detallada de cada obra mencionada.

El primer capítulo presenta la permeabilidad del macizo, seguido de un resumen del rol que cumplen las zonas de falla. El siguiente capítulo describe las propiedades hidro-químicas esenciales de las aguas subterráneas cristalinas. Luego se presentan los cambios estructurales en la permeabilidad, las propiedades físicas y químicas, y finalmente se describe el impacto en el medio ambiente a través de algunos ejemplos de obras ejecutadas.

Las referencias son en base a experiencias obtenidas en los Himalayas (túnel ferroviario Pir Panjal, central hidroeléctrica Tapovan-Vishnugad), en el Cratón Indico (cavernas de Vizakapathnam y Padur, India), en los Andes (túneles binacionales entre Chile y Argentina y Túnel de La Línea, Colombia), en el Macizo Cristalino Bohemio (autopista Mühlviertel), Adit Engadin y pozo inclinado Prutz (GKI, Tirol), la cadena montañosa Koralp (túnel de base de Koralm), en los Alpes Centrales (túnel base del Brennero) y los Alpes Orientales (túnel base del Semmering). Desde un punto de vista litológico, estos proyectos están ubicados en roca base granito, gneis, andesita, gabro, cuarcita, filita y lutita.

2 PERMEABILIDAD DEL MACIZO EN ESTADO VIRGEN

2.1 Influencia del Fracturamiento

La permeabilidad hidráulica de los macizos se caracteriza por la permeabilidad primaria (roca) y secundaria (macizo). La permeabilidad secundaria se basa en los sistemas estructurales del macizo rocoso (diaclasas y planos de falla). En las rocas cristalinas, el flujo de agua subterránea se produce casi exclusivamente en las discontinuidades (diaclasas, 'slickensides' y fallas). Las excepciones son el mármol y las rocas de evaporita metamórfica, donde la karstificación puede conducir a sistemas discretos de flujo subterráneo.

veces contradictorios [Reichl, P., Strobl, E., Winkler, G. (2002):].

Si bien la permeabilidad primaria en rocas metamórficas es significativamente inferior a 1×10^{-10} m/s, se pueden asumir valores superiores a 1×10^{-10} m/s, debido a discontinuidades, fallas o karstificación de macizos rocosos impactados en forma secundaria. Por ejemplo, se determinó una permeabilidad de 4×10^{-08} m/s para el sondaje de investigación KTB [Stober, I. Bucher, K. (2004)] en el macizo cristalino bohemio, a profundidades entre los 3850 m y 4000 m, para un macizo cristalino descom-puesto de hasta 1 km de profundidad, en [Stober, I. Bucher, K. (2005)] se demuestran valores entre 1×10^{-08} y 1×10^{-06} m/s y en [Stober, I. Bucher, K. (2007)] se ofrece una visión general de la permeabilidad hidráulica en rocas cristalinas, que se complementa con datos del *Semmering* (Alpes Orientales, Austria) [Winkler, G. & Reichl, P. (2014)]. Para otros tipos de roca, como por ejemplo el granito Bukit-Timah en Singapur, se documentan valores entre 1×10^{-10} y 1×10^{-08} m/s, con rangos limitados de 1×10^{-07} a 1×10^{-06} m/s, que se extienden a una profundidad máxima de 70 metros [Zhao, J. (1998)].

El rol de los sistemas estructurales se describe en granodioritas en Japón [Shidahara, T., Oyama, T. Nakagawa, K. (1993)]. La permeabilidad está directamente relacionada con la división y esto puede explorarse mediante una tomografía de resistencia eléctrica. Se demostró en un análisis de sensibilidad que la orientación, la desviación de los ángulos de los juegos de mordaza, la longitud y la densidad de las fisuras tienen los mayores efectos sobre la permeabilidad del macizo [Zhao, J. (1998)]. Además, se comprobó una relación entre la permeabilidad del macizo y las pruebas realizadas en granito fracturado [Hamm, S.-Y., Kim, M., Cheong, J.-Y., Kim, J.-Y., Son, M. Kim, T.-W. (2007)]:

- La apertura de las fisuras juega un papel mucho más importante que la cantidad de fisuras.
- La correlación entre transmisividad y el cubo de la apertura de las fisuras es mayor que entre la permeabilidad hidráulica y el cuadrado de la apertura.
- El cuadrado de la apertura del rumbo principal de las fisuras se correlaciona menos con la permeabilidad hidráulica que la del rumbo de todas las fisuras.

La correlación entre la permeabilidad con el número de fisuras de las imágenes de sondajes es mayor que con la del mapeo del testigo.

2.2 Influencia de la Meteorización

En roca sólida, la recarga de agua subterránea se caracteriza por la sucesión típica de roca suelta - roca meteorizada - roca intacta, en la que no necesariamente debe estar presente cada unidad. Esta secuencia suele caracterizarse por la disminución de la permeabilidad. Los residuos meteorizados se encuentran a menudo in situ a largo plazo y alcanzan en casos extremos, edades de periodos geológicos.

Pueden alcanzar profundidades mayores a 250 m y por lo tanto, representan acuíferos considerables [Arias, D., et al. (2016)], [Guihéneuf, N. et al. (2014)], [Stournaras, G.C. (2008)].

El fenómeno de la saprolita se investigó en detalle, utilizando un ejemplo de ANDHRA PRADESH en el Centro de Investigación NGRI, Choutuppal, India [Guihéneuf, N. et al. (2014)] y demostrando que porciones significativas de la escorrentía de agua subterránea ocurren en la porción superior de granito (cada vez menos desarrollado), así como en la saprolita superpuesta inmedia-tamente. La parte suprayacente de la saprolita varía en permeabilidad, que es significativamente más baja que la de las rocas subyacentes. Por medio de rocas metamórficas en las islas griegas, se podrían establecer relaciones entre la meteorización, la recarga, la escorrentía y la vulnerabilidad de las aguas subterráneas [Stournaras, G.C. (2008)].

Investigaciones realizadas en una cadena de túneles a lo largo de la autopista Mühlviertel, en el sector austriaco de la masa cristalina de Bohemia, muestran una meteorización de granito hacia saprolita (flinz) en zonas con presencia importante de agua. La evolución del acuífero está fuertemente articulada por la meteorización de la caolinita, movilización y deposición de arcillas dentro del acuífero.

En Singapur, se observó una disminución de la permeabilidad de los granitos dependiente de la profundidad de (0 a 120 metros) [Zhao, J. (1998)] por lo que, dado el bajo nivel de estrés en general, es más probable que se deba a la influencia decreciente de la intemperie que al aumento del estrés. La permeabilidad observada en el granito Bukit Timah fue entre 1×10^{-11} m/s y 1×10^{-06} m/s, con una concentración de valores entre 1×10^{-08} y 1×10^{-07} m/s a

profundidades de hasta 30 m. A mayores profundidades, los valores son consistentes entre 1×10^{-09} y 1×10^{-08} m/s [Zhao, J. (1998)].

El área de transición de la zona meteorizada se representa en gneises del Subcontinente Índico (khondalita) [Millen, B., Sigl, O. Höfer-Öllinger, G. (2014)], donde se determinó una permeabilidad que variaba desde 0.3×10^{-07} m/s hasta 3.7×10^{-07} m/s (khondalita intacta), mientras que los valores en los macizos meteorizados o cercanas a la superficie, estaban entre 5×10^{-07} m/s y 1×10^{-05} m/s. En general, el fracturamiento cercano a la superficie y la meteorización, que a menudo se asocian espacial y genéticamente, presentan un desafío en la planificación y construcción de cavernas de almacenamiento de crudo [Höfer-Öllinger, G. Millen, B. (2014)], [Mohanty, S.K., Sigl, O., Krenn, F. Höfer-Öllinger, G. (2013)]. En base a la logística de la construcción, su mantención operacional y los costos de bombeo, las cavernas deben ubicarse lo más cerca posible de la superficie. Desde el punto de vista de la permeabilidad (en los ejemplos considerados se trata de cavernas sin revestimiento interno, para almacenamiento de petróleo crudo), así como de la estabilidad (asociada también a la seguridad de los operadores durante la construcción), las cavernas se deben excavar en macizos lo menos meteorizados y descompuestos posibles. El diseño de la humectación continua del entorno de la caverna mediante una pantalla de perforaciones de irrigación, se basa en los resultados de las investigaciones hidrogeológicas, en particular la permeabilidad del macizo.

2.3 Influencia de movimientos de taludes

En zonas alpinas el relieve extremo favorece deslizamientos profundos. Esto también lleva a sistemas de acuíferos, que pueden llegar a aparecer a profundidades entre 200 y 400 metros [Masset, O. Loew, S. (2010):].

La galería piloto para el túnel ferroviario Kaponig, (L: 5 km), en Carintia (Austria), se excavó en rocas de carbonato metamórfico, esquistos de mica, cuarcitas y anfibolitas. Se presentaron importantes Filtraciones de agua (hasta aprox. 350 l/s) en PK 1170 (cobertura: 600 m) complicaron el avance del túnel, obligando a tomar medidas especiales de sostenimiento para poder continuar [Rinder, T., Dietzel, M. Leis, A. (2013)]. El ingreso de agua estaba en principio ligado a las fallas en el mármol y asociado con un fuerte

reblandecimiento y descarga del material de falla, sugiriendo una asociación con procesos de carstificación. Esto fue además apoyado por un descenso extenso del nivel freático. Sin embargo, las investigaciones en superficie mostraron que la causa de las fallas podrían ser los procesos gravitacionales [Rinder, T., Dietzel, M. Leis, A. (2013)]. En este caso, existió una combinación de movimiento de taludes, tectonismo y carstificación. El sistema de acuíferos, asociado con movimiento de masa, alcanzó profundidades mayores a 600 metros [Höfer-Öllinger, G., Pointner, P. Stadlober, M. (2016)], [Knittel, A. (1995)], [Rinder, T., Dietzel, M. Leis, A. (2013)], [Steidl, A. (2012)].

2.4 Influencia del Estado de Tensiones

Hasta qué punto los planos de falla son hidráulicamente efectivos, depende de las propiedades mecánicas de la roca en relación con las tensiones del macizo. En un mismo macizo rocoso, la permeabilidad hidráulica del macizo puede disminuir al aumentar la cobertura [Rutqvist, J. (2015)], [Stober, I. Bucher, K. (2005)], [Stober, I. Bucher, K. (2015)]. A la inversa, pequeños cambios en la composición mineralógica pueden influir en la resistencia a la compresión uniaxial de la roca de tal manera que, en condiciones idénticas (descomposición, tensión), las zonas con filtraciones se alternan con áreas prácticamente secas.

Las tendencias en la relación entre las tensiones in situ medidas fueron realizadas por HOEK&BROWN [Brown, E.T. Hoek, E. (1978)]. La definición de las condiciones de estrés [Zang, A. Stephansson, O. (2010)] y la disminución en la permeabilidad al aumentar el estrés están debidamente documentadas [Zhang, X. et al. (1996)]. Los supuestos de cálculo en el modelo son:

- Densidad de macizo 2500 kg/m³
- Módulo de cizalle 14 GPa
- Módulo elasticidad 20 GPa
- Resistencia a la tracción 1 MPa
- Cohesión 2,5 MPa
- Ángulo de rozamiento 37,5°

A medida que aumenta la tensión primaria, la razón de esfuerzos disminuye hasta un valor =1 (relación entre tensión horizontal a vertical). Esta disminución depende de la naturaleza de la fracturamiento del acuífero y es más

pronunciada en los acuíferos con numerosas fisuras más pequeñas. Sin embargo, en el caso de pocas fisuras grandes, la disminución es limitada. A medida que las tensiones y su anisotropía aumentan ($\kappa > 3$), se abren pequeñas fisuras por fuerzas de corte y aumenta la permeabilidad, que también tiene una anisotropía que depende de la orientación de las tensiones [Baghbanan, A. Jing, L. (2008)], [Chen, Y., Zhou, C. Sheng, Y. (2007)]. Los túneles se encuentran generalmente ubicados por encima de estas áreas. Basado en observaciones realizadas en 23 túneles en los Alpes Suizos, se comprobó la disminución de la permeabilidad, siendo despreciable en comparación con otros parámetros, en particular la sobrecarga tectónica de zonas frágiles a través de zonas de falla [Masset, O. Loew, S. (2010)]. En el Cristalino Báltico, se observa a través de los datos in situ a profundidades de hasta 7 km, que efectivamente existe una disminución en la permeabilidad relacionada con la tensión [Rutqvist, J. (2015)]. La permeabilidad (κ [m²]) no solo disminuye significativamente con la profundidad, sino también su varianza [Stober, I. Bucher, K. (2004)]. En el túnel de aducción de la C.H. Manapouri, (ejecutado en rocas cristalinas de los fiordos de Nueva Zelanda, L: 10 km, profundidad máxima de 1 km, donde la cobertura representa menos del 30% del campo de tensiones) no se pudo comprobar una disminución de la permeabilidad con la cobertura [Upton, P. Sutherland, R. (2014)]. Esto coincide con las observaciones mencionadas de que con una fuerte anisotropía no se puede esperar una disminución de la permeabilidad, al aumentar las tensiones.

2.5 Acople hidromecánico

Si el vector de la tensión primaria es vertical y el nivel freático se encuentra cerca de la superficie del terreno, el volumen de la fisura saturada tiene una presión hidráulica correspondiente a 30% hasta 40% de la tensión litostática, dependiendo de la litología. Esta presión tiene un efecto de apoyo en el macizo. Debido a una excavación y construcción, se esperan deformaciones, cuando las fisuras se cierran debido al drenaje. Esto reduce la permeabilidad del macizo y, a pesar de cantidades relativamente bajas de agua en la estructura, produce asentamientos en la superficie. La situación es diferente con macizo que, desde el punto de vista de mecánica de rocas, se comporta en forma competente. Las

fisuras permanecen abiertas a pesar del drenaje y las filtraciones de agua pueden permanecer activas. En este caso, los asentamientos de superficie son significativamente menores, las mayores deformaciones solo se esperarían, si por las fisuras en roca competente se drenaran otros materiales, como por ejemplo una sedimentación cuaternaria con material de grano fino no consolidado.

3 ZONAS DE FALLA

Las zonas de falla tienen diferentes efectos desde el punto de vista hidráulico y deben distinguirse como áreas de permeabilidad del macizo más limitadas y discretas. Dependiendo de la situación, pueden ser más o menos permeables o tener una zonificación pronunciada con respecto a su vía de flujo. Con frecuencia, una zona central rica en arcillas (core-zone) va acompañada de una zona de fracturamiento, la cual tiene la mayor permeabilidad.

BENSE proporcionó una descripción general de los diferentes enfoques de la hidrogeología de las zonas de falla [Bense, V.F. et al. (2013)]. También describió la manifestación de fallas en diversas litologías, distinguiendo 4 tipos principales: rocas silicoclásticas, cristalinas, volcánicas y carbonatadas. Se utilizaron las propiedades mecánicas de la roca de origen para definir un "índice dúctil" y, en base a esto, la transmisividad máxima posible de una zona de falla en esa roca [Ishii, E. (2015)]. La dependencia de la permeabilidad y su dependencia direccional, así como los sistemas conductor-barrera (obturador), fueron presentados para rocas cristalinas en CAINE et al [Caine, J.S., Evans, J.P. Forster, C.B. (1996)]. Ellos distinguen en un diagrama con cuatro partes finales la arquitectura de la falla con relevancia hidrogeológica. Los partes finales son definidos de la expresión de la zona central y la zona de fracturamiento y su conductibilidad hidráulica. Se distinguen sistemas conductor-barrera, sistemas complejos, conductores y barreras discretas.

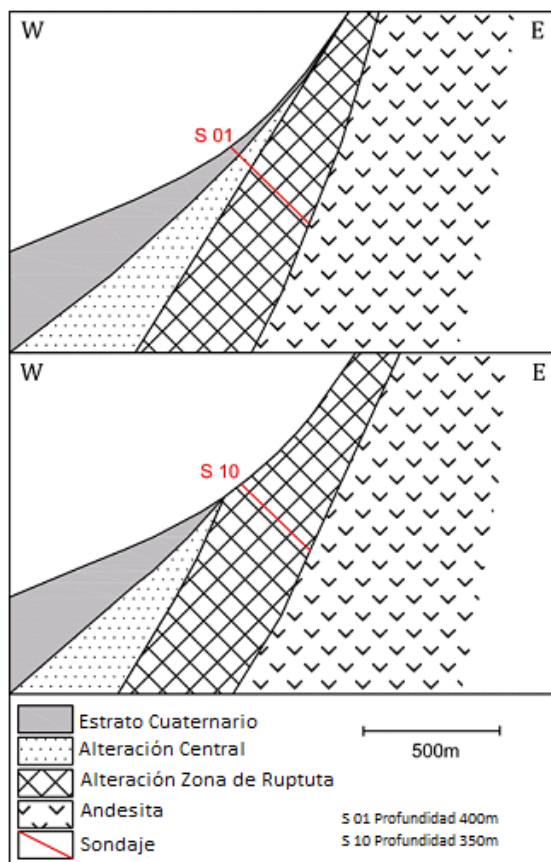
Con la distancia desde la zona núcleo, aumenta la complejidad de la orientación de las estructuras [Benedek, K. Molnár, P. (2013)], [Faulkner, D.R. et al. (2010)]. Un ejemplo de una repetición múltiple de zonas centrales y

fracturadas en sistemas de falla, que en fin rodean macizo intacto, con sus propiedades hidrogeológicas muestran [Faulkner, D.R. et al. (2010)].

[Gudmundsson, A. (2001)] comprobó que una falla (dependiendo del tiempo) puede cambiar su condición como conductor u barrera relativa: si se deforma fuertemente, la transmisividad puede aumentar hasta 8 órdenes de magnitud. La dependencia de la transmisividad de la ubicación tridimensional de la falla en el macizo en hornfels neo-proterozoico fue descrita en Brittany (Francia) [Rinder, T., Dietzel, M. Leis, A. (2013)]. En el estado natural, el acuífero unido a la interrupción alimenta la grava de poros cerca de la superficie a aproximadamente 2 l/s. Una prueba de bombeo continuo con una producción de 13 l/s invirtió este sistema. Debido a la estructura casi vertical, las zonas de alta permeabilidad no están lo suficientemente conectadas a los recursos de agua subterránea de poros adyacentes para permitir una extracción sostenible.

Las propiedades geo- e hidromecánicas de rocas volcánicas dependen del tipo de roca. Por ejemplo, se esperan fallas con similitudes con las rocas sedimentarias silicoclásticas en tobas suaves, mientras que fallas de lavas cristalizadas, como riolitas o andesitas, tienden a mostrar propiedades de falles en rocas cristalinas [Bense, V.F., et al. (2013)]. Un ejemplo muestra 2 ensayos de bombeo cerca del portal oeste del futuro túnel de Agua Negra en los Andes Centrales. Este es, un proyecto de túnel vial, de aproximadamente 14 km de longitud en la frontera entre Chile y Argentina. La geología se compone esencialmente de riolita y andesita [Böfer, M., et al. (2012)], [Hofer-Öllinger, G. Millen, B. (2010)]. Se perforaron 2 sondajes inclinados, en sentido perpendicular a una falla. El primer sondaje (S01), de 400 m de profundidad, estaba ubicado debajo de un estrato cuaternario, primero en la zona central de la falla, luego en la zona fracturada, y en el final del sondaje en macizo intacto (Fig. 1). El segundo sondaje (S-10), comenzó fuera de la zona central directamente desde la superficie del terreno en la zona fracturada de borde y permaneció (en casi toda la distancia del sondaje: 350 m) en la misma zona. Solo hacia el final de la perforación mejoró la calidad del macizo (Fig. 1).

Figura 1: Esquema de la situación en la ladera occidental Olivares (proyecto túnel Agua Negra). La distancia entre los 2 sondajes es de aproximadamente 1 km.



Durante la perforación de los sondajes, se interrumpieron los trabajos de sondeo para realizar ensayos de bombeo, que permitieron determinar las características de los acuíferos a diferentes profundidades del sondaje. Estas subsecciones se muestran en la Tabla 1. El resultado muestra que el macizo rocoso alrededor del sondaje S-01 tiene permeabilidades significativamente menores. Los testigos y la geofísica del sondaje de perforación del sondaje S-01 muestran hasta una profundidad de 100 metros que a lo largo las fisuras están rellenas de arcilla y material de falla rico en arcillas; sin embargo, el sondaje S-10 presentó principalmente fisuras sin relleno de arcillas. La permeabilidad entre estos 2 sondajes se diferencia por lo tanto por 1 a 2 órdenes de magnitud.

Tabla 1: Resumen de resultados de pruebas de bombeo en sondajes S01 y S10.

Sondaje	S-01	S-01	S-01	S-10	S-10	
fecha	23.02.2010	16.03.2010	16.05.2010	17.04.2010	06.05.2010	
profundidad [m]	100,0	224,6	400,9	228,1	351,5	
Zona	núcleo	borde	borde + protolito	borde	borde + protolito	
Lapso de etapas de bombeo [s]	1.	630	3.550	5.440	3.070	2.405
	2.	-	2.385	5.710	3.005	2.400
	3.	-	2.635	21.375	2.990	2.395
Caudal luego de prueba de bombeo [l/min]	1.	60	30	12	15,5	11,9
	2.	-	45	24	30,3	24,6
	3.	-	60	36	37,9	36
Máximo descenso (m)	58,1	62,4	37	3,8	2,9	
Transmisividad T (m ² /s)	8,5 E-7	1,3 E-5	2 E-5	3,1 E-4	4,1 E-4	
Permeabilidad 1 K _f (m/s)	1,3 E-8	6,8 E-8	5 E-8	2,4 E-6	1,6 E-6	
Permeabilidad 2 K _f (m/s)	1,3 E-8	9,3 E-8	4 E-8	2,4 E-6	7,9 E-7	

La galería piloto *Aicha-Mauls* (L: 10 km, para túnel base del *Brenero*) se excavó entre 2008 y 2010 en granito *Brixen*. Las zonas de falla encontradas muestran distribuciones de permeabilidad muy heterogéneas: Gran parte de estas fallas tienen bajas permeabilidades y actúan como barreras a través de material cataclástico de grano fino. Se observó además que las áreas de las fallas con alta conductibilidad hidráulica mostraron bajos ingresos de agua debido a que están rodeadas por ramales de fallas que se atascan. Fuera de las zonas de falla, se encontraron diaclasas altamente permeables, que están conectadas a la superficie. Las filtraciones que entran en las 2 fallas principales (*Falla de Río Bianco* y *Lineamiento Periadriático*) muestran una mineralización ligeramente más alta que las aguas de la red de fisuras graníticas [Perello, P., et al. (2014)].

La sección central de casi 2 km en el túnel ferroviario *Pir Panjal* (L: 11 km) en los Himalayas, consta de andesita [Golger, M., et al. (2014):], [Hofer-Ollinger, G., et al. (2014)]. Las rocas volcánicas masivas, solo ligeramente descompuestas, se interrumpen a intervalos irregulares desde fallas en el rango de decímetros hasta 10 metros. Las fallas representan un acuífero débil. A pesar de una superposición de hasta 1200 m, los avances del túnel tenían solo unas pocas infiltraciones, que rara vez superaban los 50 l/s, y que disminuyeron rápidamente. Las temperaturas del agua encontrada fueron < 30 °C.

Las zonas de falla actúan como barreras si la estructura geológica consiste en roca blanda, que está muy descompuesta, pero cuyas aberturas de fisuras no tienen permeabilidad. Un

ejemplo es la falla regional *Lavanttal* en el Cristalino del *Koralmb*, prácticamente perpendicular al túnel del *Koralmb* [Brosch, F.J. Pischinger, G. (2014)], [Fasching, F., Wurzwaller, S. Pischinger, G. (2008)]. Para explorar este sistema de fallas, que tiene varios cientos de metros de espesor, se excavó un túnel exploratorio (galería piloto Paierdorf), desde un pozo de aproximadamente 120 m de profundidad. Durante la excavación de los túneles en esta zona, el macizo encontrado mostró altas deformaciones con corte profunda ('squeezing rock mass'), pero prácticamente sin presencia de aguas subterráneas. El túnel principal del *Koralmb* se encuentra en plena construcción desde el 2010 y la puesta en servicio está programada para el 2023.

4 HIDROQUÍMICA EN EL MACIZO CRISTALINO

En acuíferos profundos de rocas cristalinas, las aguas suelen estar libres de oxígeno, neutras a ligeramente alcalinas, raramente ácidas, normalmente libres de tritio, nitrato y sulfato. Característicamente, se presentan metales diluidos (especialmente hierro, manganeso), fluoruro y boro, así como gases (dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno, por ejemplo). Dependiendo de la mineralización de sulfuros, se encuentran metales y semimetales en solución, tales como el antimonio, molibdeno, uranio o arsénico. La relación calcio/magnesio es de 1 a 3,3. Por procesos de intercambio iónico, el calcio y el magnesio a veces pueden retroceder fuertemente en relación al sodio. Se encontraron aguas de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) libres de cloruro en incrustaciones de mármol del Cristalino de *Koralmb*, cuya mineralización aumentó a pesar del drenaje continuo de los macizos (durante el tiempo de observación). En este caso el contenido de boro y la relación sodio/potasio son muy altos. Observaciones similares fueron realizadas en el túnel base del *Gotardo*, donde los contenidos de calcio y magnesio se intercambian por sodio y - subordinado - potasio [Bucher, K., Stober, I. Seelig, U. (2012)]. En contraste con el túnel de *Koralmb*, existen niveles significativos de Cl_{1-} y SO_4^{2-} (dominado por HCO_3 , en el caso de *Koralmb*). Se comprobó que los sondajes para el proyecto de túnel *Agua Negra* (en riolita y andesita) tienen aguas con relaciones bajas de $\text{Ca}_{2+}/\text{Mg}_{2+}$ (1 a 1.5) y con altos niveles de sodio y sulfato (también aquí la

relación $\text{Na}_{1+}/\text{K}_{1+}$ es muy alta). Es de suponer que la distribución de los aniones se debe a una incongruente hidrólisis del macizo original, mientras que el sulfato se origina a partir de sulfuros oxidados y zonas de alteración de las rocas volcánicas. El cloruro, que está presente en diferentes concentraciones, puede originarse en la roca cristalina. Los análisis de las aguas en el paragneis de la *Mina Clara* (Selva Negra, Sur de Alemania) permiten observar la evolución desde la entrada a aguas superficiales subsaturadas con $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ hasta aguas más mineralizadas de $\text{Ca-SO}_4\text{-(Na-Cl)}$. Se demuestra que el calcio se origina a partir de la hidrólisis del feldespato y precipita como calcita en las partes más bajas de la mina a partir de agua rica en CO_2 [Bucher, K., Zhu, Y. Stober, I. (2009)].

En la *Mina Clara* se investigaron 50 diferentes acuíferos en el subsuelo cristalino, mostrando 4 etapas de desarrollo [Michard, G., Pearson Jr, F.J. Gautschi, A. (1996)]:

1. Aguas recientes cercanas a la superficie, poco mineralizadas (con una baja relación Na-K) aproximadamente 2 órdenes de magnitud por debajo del equilibrio con la roca de origen. Las etapas 2 a 4 se encontraron a mayores profundidades (200 a 1700 m).
2. El segundo grupo comprende aguas más mineralizadas de la última época glacial. La relación Na-K es significativamente más alta que en el grupo 1 (solo 2-5 veces menor que en el equilibrio), las proporciones de Ca-Na y Mg-Na son más bajas que en el grupo 1.
3. El tercer grupo es similar en términos del grupo 2, y se asigna a la última época interglacial, debido a los contenidos isotópicos. Se diferencia por una mayor mineralización.
4. El cuarto grupo son las aguas salinas. Los altos contenidos de NaCl provienen en parte de la roca cristalina, en parte de la evaporita sedimentaria adyacente a la roca cristalina. Las aguas están en equilibrio con la asociación mineral de la recristalización del granito. En este caso, se pueden lograr contenidos de un mol por litro de Na_{1+} y Cl_{1-} , lo que corresponde a una mineralización de aproximadamente 70 g/l.

También se conocen valores comparables para NaCl a partir del Cristalino de *Varisca* (sondaje *Urach*), mientras que la hidroquímica del sondaje continental profundo en el

Cristalino de Bohemia es de 44 g/l de CaCl_2 con 16 g/l de NaCl a una mineralización total de 62 g/l [Stober, I. Bucher, K. (2004):], [Stober, I. Bucher, K. (2005)].

5 CAMBIOS DE PERMEABILIDAD PRODUCIDAS POR LA EXCAVACIÓN

Durante las labores de excavación, se modifica la permeabilidad en el macizo rocoso adyacente, demostrándose 4 diferentes escenarios: un aumento o disminución de la permeabilidad, respectivamente inducida artificial- o pasivamente, como consecuencia no deseada del avance del túnel.

5.1 Aumento involuntario de la Permeabilidad

Se produce un aumento en la permeabilidad debido a la redistribución de tensiones en el macizo, en respuesta a la cavidad acumulada, así como debido a los trabajos de voladura durante el avance convencional. Si aumenta la apertura de fisuras existentes, se aumenta su permeabilidad en la tercera potencia [Millen, B., Höfer-Öllinger, G. Brandl, J. (2015)]. Se investigó el efecto y su disminución en la distancia radial desde la tunelización mediante pruebas de campo, complementadas por evaluaciones analíticas, obteniéndose 5 conclusiones para una probable zona de aflojamiento alrededor del túnel [Kelsall, P.C., Case, J.B. Chabannes, C.R. (1984)]:

1. Tal como esperado, la permeabilidad difiera en las direcciones radial y longitudinal.
2. En una roca perfectamente elástica (roca competente con baja superposición), la permeabilidad en fisuras paralelas a las excavaciones aumenta, mientras que en estructuras dispuestas radialmente disminuye. Por el contrario, en el caso de estructuras bajas, aumenta la permeabilidad de fisuras en todas las orientaciones.
3. En un macizo micro-fracturado y competente, la permeabilidad de las fisuras paralelas al frente de avance puede aumentar de 2 a 3 órdenes de magnitud bajo tensión homogénea y la zona alterada en el macizo puede alcanzar uno o dos diámetros de túnel. Las condiciones de tensión anisotrópica aumentan estos efectos, especialmente si la tensión primaria es paralela al set principal de planos de fallas.

4. El efecto de los cambios en la tensión sobre la permeabilidad hidráulica depende de diversos factores, como la geología local, el método constructivo, la profundidad y la geometría de la excavación.

5. Existen pocos estudios referentes a la diferencia entre el estrés y el aflojamiento inducido por la tronadura (el aflojamiento causado por la tronadura es de un máximo de 1 m).

Sobre la base de una redistribución de tensiones elastoplásticas, se efectúa un pronóstico para un túnel en basalto, con una cobertura de 1 km, suponiendo un 50% a 70% del potencial de flujo incrementado de la zona fracturada se origina a partir de una combinación de reordenamiento de tensión y de la influencia por las voladuras [Kelsall, P.C., Case, J.B. Chabannes, C.R. (1984)]. Una investigación más detallada de estas influencias se realizó en el laboratorio de investigación de obras subterráneas en *Manitoba*, Canadá. La geología está compuesta por el batolito granítico Lac du Bonnet y muestra una clara disminución de la descomposición a medida que aumenta la profundidad [Brosch, F.J. Pischinger, G. (2014)], [Souley, M., et al (2001)]. Las observaciones y los cálculos mostraron fuertes diferencias entre la presión (clave y solera) y la tensión (hastiales de túnel). En el granito de la *Mina Stripa* (Suecia), la permeabilidad está en el rango de 0.5 m a 1.0 m desde el borde de la excavación, entre 3 y 4 órdenes de magnitud más alta que en el estado virgen [Pusch, R. (1989)].

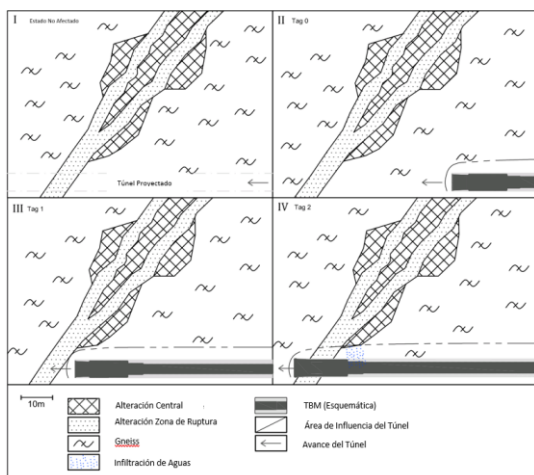
En la caverna de la central hidroeléctrica Jinping se mostraron valores significativamente mayores para el área perturbada mediante cálculos numéricos y mediciones relacionadas con el avance en roca metamórfica epizonal [Chen, Y.-F., et al. (2015)]. El ancho del área en los macizos influenciadas por la excavación fue de 6 a 17 m. La permeabilidad hidráulica del macizo aumentó de 2 a 3 órdenes de magnitud.

Ninguno de los estudios mencionados tomó en cuenta el factor de temporalidad. Además, en dependencia de la litología a corto, mediano o largo plazo, la solución de roca sólida a través de las nuevas vías de flujo, conlleva a un aumento adicional sucesivo en la permeabilidad [Millen, B., Höfer-Öllinger, G. Brandl, J. (2015)]. A corto plazo, las zonas de fallas frágiles de roca rígida y *Haselgebirge* (roca sedimentaria, combinación de arcillas, yeso, halita y otras sales) se "deslavan" en un período de días y semanas; a largo plazo ocurre para

yeso y anhídrido. Aparte de soluciones a medio y largo plazo, se puede representar la dependencia del tiempo como sigue:

1. La excavación (mediante voladura, retroexcavadora, rozadora o tuneladora TBM) conduce a aflojamiento (por voladuras y redistribución de esfuerzos, o excluyendo la redistribución de esfuerzos): ("día 0" en Fig. 2).
2. Siguiendo con el avance (y por lo tanto disminuyendo el efecto de soporte del frente de avance), las deformaciones alrededor de la cavidad aumentan: ("día 1" en la Fig. 2).
3. El aumento de las permeabilidades conduce a un mayor acceso tan pronto como el área perturbada alcanza zonas de mayor conductibilidad hidráulica: ("día 2" en Fig. 2).
4. El aumento de la cantidad de agua en los macizos previamente secos conduce (especialmente a altas presiones hidráulicas), a la "deslave" de fisuras, lo que a su vez conduce rápidamente a un aumento de la permeabilidad: tercer factor de tiempo.

Figura 1: Proceso hipotético con comportamiento dependiente del tiempo.



Tal proceso se observó en los Himalayas (*Garhwal-Uttarkhand*, India), a pesar de un avance cuidadoso (utilizando una TBM), donde se construyó un túnel de aducción (L: 12,1 km) para una central hidroeléctrica (NTPC). El área del proyecto se encuentra entre los valles de Ahauliganga y Alaknanda, con presencia de rocas duras, medianas - a altamente metamórficas (sucesiones del Cristalino del Himalaya Central) [Heim, A. Gansser, A. (1939)], [Yin, A. (2006)]. Desde octubre del

2008, un 67% de los 8,6 km de este túnel de desvío había sido excavado mediante una máquina tuneladora (TBM) de doble escudo. El resto del túnel fue excavado mediante método convencional (D&B). Durante la excavación, se instalaron dovelas de 0,3 m de espesor, rellenando el espacio anular con gravas y lechada de cemento (grout mono-componente). La TBM se atascó 3 veces en el macizo, cada vez ocasionando filtraciones importantes de agua, lo que provocaba demoras y costos adicionales. El primer evento tuvo lugar en diciembre de 2009 (PK 3016) y con una cobertura de 900 m en una falla en gneises tipo 'ojos de sapo' (*Augengneisen*) y cuarcitas [Brandl, J., Gupta, V.K. Millen, B. (2010)], [Goel, R.K. (2014)], [Millen, B., Höfer-Öllinger, G. Brandl, J. (2015)]. La falla vertical consistía en una roca cohesiva (en una estructura de bloque en matriz) y tenía un espesor de hasta 2 m. La movilización de un bloque suelto deformó el escudo telescópico. Inicialmente el macizo estaba prácticamente seco, pero después de 24 horas, el agua comenzó a penetrar a alta presión en la cavidad. El agua transportó detritos de falla (salbandas) y destruyó 2 segmentos (dovelas) contiguos al escudo de cola. La filtración alcanzó un caudal de 700 l/s. El segundo y tercer evento tuvieron lugar en febrero y octubre de 2012, (PK 5840 y PK 5859), con una cobertura de 700 m dentro de una zona de falla de aproximadamente 20 m de ancho. Esta falla arrastró tangencialmente el eje del túnel, a lo largo de unos 35 m. En otoño del 2019, la máquina TBM seguía atascada en el PK 5859. Durante el segundo evento, el frente de avance se encontraba momentáneamente seco. En el área de la rueda de corte y del escudo, ocurrió un pequeño derrumbe (algunos metros cúbicos) de material fracturado (arcillas rígidas y brechas). Al igual que en el primer evento, apareció una filtración después de 20 horas, aunque con caudales significativamente menores (1-2 l/s). La cantidad fue suficiente para suavizar y disolver el material de falla, que desestabilizó toda el área [Millen, B., Höfer-Öllinger, G. Brandl, J. (2015)]. Las infiltraciones de agua, causadas por aumentos en la permeabilidad en la región cercana a la cavidad, difieren de sus entradas iniciales en que ocurren típicamente entre 24 y 72 horas después de volver a excavar (Figura 2). Cuantitativamente, el espectro abarca desde una humectación local hasta colapsos, como se describe anteriormente. Otros ejemplos observados por los autores (en esquistos

filíticos) en obras de *Central Hidro-eléctrica GKI* en el Tirol austríaco (2009 y 2010, dp de 24 horas: leve humectación; 2016, después de 72 horas: filtraciones menores de 0,1 l/s) y en los gneises del *Koralmb KAT2*, (después de 72 horas: filtraciones de 1-2 l/s), así como en esquistos filíticos del *Semmering* (BL SBT1, 2016), demostrando la tendencia de que al comienzo el frente de avance está seco y luego aparecen filtraciones.

5.2 Aumento de la permeabilidad inducida artificialmente

Las permeabilidades se inducen artificialmente mediante perforaciones de drenaje o desagüe. La perforación de drenaje se realiza como una perforación previa a lo largo de varios cientos de metros, equipados con una válvula especial (*Preventer*), permitiendo un drenaje controlado del macizo (Fig. 3B) [Höfer-Ollinger, G., et al. 2016)]. Junto con el avance, se realizan perforaciones dirigidas radialmente alrededor del túnel (Fig. 3C) o en dirección al frente, con el objetivo de alejar el "agua de macizo" del área del túnel en la medida de lo posible (Fig. 3A).

También existe la posibilidad de instalar un "paraguas de irrigación", para una humectación continua del contorno de una caverna de almacenamiento de crudo, mediante barrenos instalados en la clave. El número de barrenos depende de la permeabilidad de la roca, la longitud de todo el diseño del sistema, abarcando ampliamente la caverna correspondiente. En operación, la galería y los sondajes están sujetos a una presión de agua controlada para evitar la migración del crudo o productos derivados a la superficie (ver Fig. 3D).

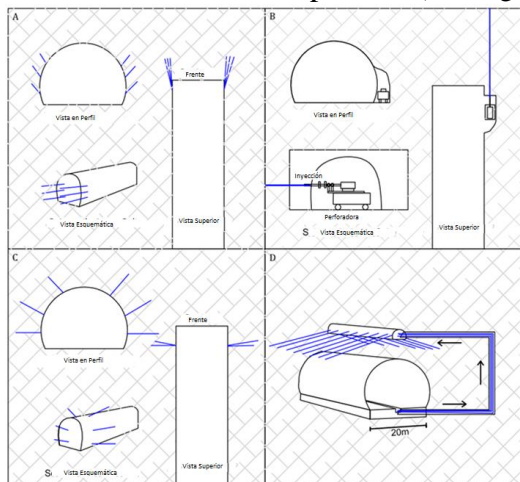


Figura 2: Ejemplos de perforaciones de drenaje (A-C) y recarga (D) en construcción subterránea

5.3 Disminución no deseada de la permeabilidad

La disminución de la permeabilidad ocurre al cerrarse las fisuras a través del drenaje en macizos no competentes. El acoplamiento hidromecánico se alivia mediante el drenaje en el entorno del túnel, ya que el "agua del macizo" tiene un efecto de soporte en las fisuras hasta el drenaje. El cierre de las fisuras reduce la permeabilidad, por lo que el efecto debe limitarse al entorno inmediato alrededor del túnel (0,5 a 1 veces el diámetro del túnel) [Fernandez, G. Moon, J. (2010):]. Observando las reducciones de gran alcance utilizando el ejemplo del túnel del *Gotardo* [El Tani, M. Bremen, R. (2014)], bajo condiciones especiales se puede asumir un cierre de las fisuras en el macizo mucho más amplio.

La permeabilidad puede además cambiar debido a procesos químicos. Generalmente, esto ocurre por precipitación de sustancias en el volumen de la fisura. Teóricamente, esto fue modelado para desarrollos geotérmicos en macizos, con temperaturas de 190°C [Bucher, K., Zhu, Y. Stober, I. (2009)] o experimentalmente a 20°C, 8°C, 1 °C y 150°C [Polak, A., et al. (2003)]. En la ingeniería de túneles, tales fenómenos tienen lugar a un nivel de temperatura inferior y generalmente son el resultado de condiciones cambiantes por la construcción u operación con respecto a la movilidad del agua, la temperatura, la presión y el contenido de gas. La reducción generalmente ocurre como resultado de la sinterización o precipitación de hidróxido de hierro (formación de limonita y otros minerales de hierro en presencia de oxígeno y agua) [Rinder, T., Dietzel, M. Leis, A. (2013)].

5.4 Disminución de la permeabilidad inducida artificialmente

Existe la posibilidad de disminuir la permeabilidad de un macizo mediante (pre)inyecciones, una práctica común desarrollada en Escandinavia y que se ha implementado en diversas obras subterráneas en el mundo, utilizando principalmente cementos, micro-cementos y sílica coloidal. Además, existe la posibilidad de post-inyectar con materiales base resinas sintéticas, geles acrílicos o espumas base poliuretano o resinas órgano-minerales [Fransson, Å., et al. (2010)], [Garshol, K. (2011)]. Frecuentemente, las reducciones son requerimientos de las

autoridades ambientales, para lograr los permisos correspondientes de la obra. En los túneles de baja altura como el *Semmering, Brenero* y *Gotardo* [Masset, O. Loew, S. (2013)] se consiguió disminuir los flujos de agua, mediante trabajos de inyección.

5.5 Combinaciones

En realidad, se trata en general de situaciones rápidamente cambiantes o combinadas. Mediante cálculos numéricos, se demostró que, bajo condiciones idénticas, la permeabilidad en la dirección de avance aumenta hasta 3000 veces, mientras que en la dirección radial se produce una reducción significativa, lo que provoca un sellado del túnel a la roca circundante [Liu, J., et al. (1997):]. Mediante estudios numéricos se pudo comprobar que una transmitancia homogénea disminuye al aumentar la tensión, por lo que la disminución puede ser de hasta dos órdenes de magnitud [Mohanty, S.K., et al. (2013)]. La anisotropía existente, respecto a la permeabilidad, aumenta junto con la tensión, en particular con la aplicación de fuerzas de corte. Para tensiones diferenciales, la permeabilidad aumenta hasta en un orden de magnitud.

6 CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los procesos hidro-químicos en cavidades subterráneas, están influenciados principalmente por el área cercana a la cavidad o el borde de la cavidad y, por lo tanto, rara vez son detectables en su "naturaleza". El aflojamiento de la cavitación debido a la construcción de túneles, la introducción de anclajes de roca, que generalmente se cementan, y la aplicación de hormigón proyectado en los túneles hacen que sea difícil caracterizar las "aguas de macizo".

Durante el avance del túnel, las filtraciones se encauzan primero y luego se drenan, a menos que se atenúen por sí mismas. En contacto con el cemento cambia el pH y la mineralización del agua, el aire en el túnel, al igual que con el contenido de oxígeno y el potencial redox. Como consecuencia, las mediciones de los parámetros en el sitio a menudo muestran niveles de oxígeno muy fluctuantes, valores de pH entre 2.5 y 12 y un potencial redox respectivamente fluctuante. En la zona de Tokio, el valor del pH de los granitos (debido a

obras de construcción) disminuyó de 12 a 10, en un plazo de 2 años [Mizuno, T., et. al (2013)]. Aquí, el potencial redox permaneció en el medio reductor, que se atribuye a los procesos de oxidación hierro libre y solución de sulfuros.

Como se mencionó anteriormente, la mineralización en el acceso puntual de agua en el túnel de *Koralm* aumenta con los años. Se informaron efectos similares en tomas realizadas a largo plazo (en este caso, más de un año) en la *perforación profunda continental* (KTB) pudiendo compararse con un drenaje a través de una cavidad [Gräsle, W., et. al (2006)].

7 IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE

7.1 Influencia de la escorrentía hidrogeológica debido a la excavación

Para pronosticar y evaluar la influencia, se requiere del conocimiento sobre los procesos hidrogeológicos en el estado natural y las ideas sobre cómo estos procesos cambian nuevas circunstancias. Como se mencionó anteriormente, la extracción a largo plazo suele asociarse con un aumento en la mineralización del agua subterránea recuperada. Los impactos ambientales son justificables en la 'perforación profunda continental' (KTB) o en el túnel de *Koralm*, por dar algunos ejemplos. Por otro lado, en el túnel ferroviario *Kattleberg* (Suecia, L: 1,8 km), excavado en granito y tonalita, el avance de los túneles originó que la fuente original de un área pantanosa se transformara en una zona de infiltración. Las aguas ácidas del pantano además afectaron al acuífero fisurado, descendiendo (con el tiempo), el valor pH. El sulfuro de hidrógeno se oxida en sulfato, el hidrógeno se libera. Los cambios afectaron los niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} a largo plazo, lo que deslizó los índices de saturación e impactó al revestimiento final de la obra. Por el contrario, se temía que el hierro y manganeso disueltos, podrían precipitarse con el contacto con el aire y tapar los sistemas de drenaje [Mossmark, F., et. al (2015)].

Otro ejemplo es el túnel *Neumarkt* (Mühlviertel-Austria), ubicado en rocas cristalinas del Batolito Bohemio, constituido por varios tipos de granito, y en las áreas de portal, del producto de su meteorización: la saprolita. Puntualmente, las fallas pronunciadas conectan la estructura con la saprolita, que tiene un espesor de hasta 10 m, en la superficie. El granito tiene una porosidad primaria

despreciable y la porosidad secundaria es altamente variable, dependiendo del grado de fracturamiento. Las fallas que cruzan el eje del túnel están acompañadas por zonas fracturadas con una permeabilidad relativamente alta. La saprolita consta de residuos de granitos meteorizados (arcilla y arena ricas en caolinita) y actúa al final como un acuífero de poros. En estado virgen, en la saprolita se produce una recarga y drenaje de agua subterránea, las arcillas residuales subdividen parcialmente el acuífero y, en ocasiones, conducen a condiciones artesianas. Las zonas pobladas se caracterizan por presencia de pozos de agua en saprolita. Estos suministros fueron sometidos a observación hidrogeológica (monitoreo) antes y durante el trabajo de excavación. Las obras de excavación del primer tubo resultaron en los siguientes procesos hidrogeológicos:

- Algunos pocos pozos quedaron permanentemente secos.
- Algunos pozos se secaron temporalmente y se reflejaron en un nuevo nivel inferior.
- Algunos pozos mostraron una caída temporal y luego se recuperaron nuevamente.
- La mayoría de los pozos permanecieron intactos.

Estos eventos tuvieron lugar independientemente de la cobertura (hasta un máximo de 100 m). El deterioro de los pozos se debió a filtraciones de agua en zonas de falla. Otros pozos permanecieron intactos a pesar de su ubicación cerca del área del portal y a menos de 10 m por encima de la estructura. Estos hechos condujeron a la siguiente interpretación: Los eventos hidrogeológicos (recarga, descarga) tienen lugar principalmente en saprolita. No hay afectación debido al avance del túnel, ya que la roca granítica forma un sello a la estructura de la cavidad en relación con la saprolita más permeable. En el caso de presencia de fallas, se da un comportamiento diferente: a pesar de la cobertura y la distancia a las fuentes de agua, el acuífero de saprolita se ve afectado localmente en el área de la subsidencia lineal en la zona de falla. Aquí se limitan localmente los cambios en el flujo de salida de +/- paralelos a la superficie, hacia la zona de falla y desde allí a la estructura de la cavidad y más consecuencias en el drenaje del túnel. La "recuperación" se puede explicar por una reducción en la permeabilidad en el área cercana a la cavidad.

Un ejemplo de cambios irreversibles en el balance hídrico es el lamentable caso del túnel ferroviario *Romeriksporten* (L: 14.6 km.), que

une la ciudad de Oslo con el aeropuerto en *Gardermoen*, Noruega. Ubicado en gneis precámbrico y en un área ambientalmente sensible (colindante a la Reserva Natural *Østmarka*). La hidrología fue modificada, el acuífero se convirtió en zonas de infiltración y cambió la química de las aguas subterráneas. Se trataron de contrarrestar estos efectos mediante (post)inyecciones fallidas con gel de acrilamida, contaminando las aguas subterráneas y causando graves daños medioambientales [Kværner, J. Snilsberg, P. (2013)].

En el curso de la planificación, se debe prestar atención a estas características, tanto en términos de prospección y muestreo, como en términos de impacto ambiental, evaluación, medidas compensatorias y contaminación residual. En el curso de los trabajos de excavación, el modelo geológico e hidrogeológico de la planificación debe verificarse y complementarse durante la construcción, para lograr un resultado óptimo al medio ambiente y que el proyecto de construcción sea sustentable.

7.2 Asentamiento superficial

Como investigación geológica-hidrogeológica preliminar para el futuro túnel vial de *Rawyl*, (L: original 9.7 km) en el cantón de Valais, se comenzó en 1976 con una galería piloto (sección transversal: 13 m²). La dirección de avance era de sur a norte, el portal estaba a una altitud de 1180 m. Los avances fueron en rocas sedimentarias, pero tuvieron consecuencias de gran alcance, sobre la posterior planificación y construcción del túnel base del *Gotardo*.

Entre finales de 1978 y principios de 1979, hubo una importante filtración durante la excavación (entre PK 2657 y PK 3042) y el caudal llegó a 700 l/s [Badoux, H. (1982)], [Bianchetti, G. (1993)]. Durante el mismo período, en la presa de *Tseuzier*, ubicada a unos 1500 metros al oeste del túnel, entre los 1400 m y 1600 m de altura, se detectaron asentamientos asimétricos, lo que originó el cese inmediato de las excavaciones en el PK 3236. Los caudales, inicialmente altos, descendieron rápidamente después de parar la obra a unos 20 l/s y la temperatura del agua disminuyó desde 30°C hasta 24°C [Bianchetti, G. (1993)]. La presa sufrió graves daños a pesar de la suspensión de la excavación del túnel. Las grietas en el muro condujeron a restricciones operativas y desencadenaron en medidas extensas de remediación [Ehrbar, H., et.al (2010):].

Incluso en el túnel vial del San Gotardo (que entró en operaciones en 1977), se observaron asentamientos superficiales de 10 cm [Zangerl, C., et al (2003)]. Por otro lado, en el túnel base (ferroviario) del *Gotardo* (excavado entre 2000 y 2011), se tomaron una serie de medidas para garantizar que tal incidente no se repitiera, realizándose trabajos preparatorios cerca de las represas de *Nalps* y *Santa María*. Las excavaciones fueron acompañadas por programas integrales de monitoreo, sobre y bajo tierra, que aseguraron el éxito de las medidas de acompañamiento, destinadas a garantizar el funcionamiento seguro a largo plazo de las represas [Chen, Y., Zhou, C. Sheng, Y. (2007)], [Loew, S., et al (2015)]. Durante la construcción, se midieron las deformaciones superficiales de forma continua y se pudo representar una depresión de la subsidencia dinámica, cuya mayor amplitud estaba en el frente de avance. Sobre la base de un modelo simplificado de aguas subterráneas, se utilizó un software especial para modelar propiedades de roca y el acoplamiento hidromecánico. El modelo se actualizó durante el trabajo de excavación y se calibró continuamente sobre la base de mediciones reales de deformación [Loew, S., et al (2015)]. En consecuencia, hasta el 2013, el asentamiento máximo fue de 11 cm, con una distribución irregular a lo largo del eje del túnel. A cambio, el asentamiento transversal al eje del túnel es muy regular y sigue una distribución normal de Gauss. Se pudieron detectar asentamientos de 1 cm hasta 4 km de distancia del eje del túnel. A nivel de túnel, el 50% de los asentamientos de superficie fueron observables. La curva de asentamiento condujo a una deformación por compresión en un corredor de 1 km a 1,5 km de ancho, mientras que fuera del punto crítico se observó una extensión [Loew, S., et al (2015)]. Las diferentes reacciones de las 2 represas fueron de interés: debido a su respectiva ubicación dentro de la cuenca de asentamiento, *Nalps* corresponde a una compresión y *Santa María* a una extensión. Por la limitación de deformaciones en *Nalps*, durante el avance del túnel, al encontrarse con la falla no. 44, se realizaron inyecciones para reducir la permeabilidad del macizo desde el frente, mientras que las medidas en el área de influencia de *Santa María* se limitaron al monitoreo en el frente [El Tani, M. Bremen, R. (2014)]. La discusión se tornó contradictoria, ya que para entradas de agua más grandes en el área de influencia de *Santa María* (cantidades

iniciales de hasta 40 l/s), se produjeron menos deformaciones que aquellas con un máximo de 12 l/s (cantidades moderadas en el área de influencia de *Nalps*) [Chen, Y., Zhou, C. Sheng, Y. (2007)], [El Tani, M. Bremen, R. (2014)]. Si observamos la geología, esto no es una contradicción: la presa de *Nalps* se encuentra en paragneises, los de *Santa María* en granito y granodiorita competente.

Los asentamientos superficiales causados por la construcción de un túnel para una central hidroeléctrica en el cantón de *Valais* (L: 15,8 km) en gneis, pizarras y micaesquistos, se pudieron observar mediante interferometría de radar asistida por satélite (inSAR) durante el tiempo de excavación del túnel. Aquí también se demostró que los asentamientos son parcialmente reversibles. El revestimiento interior del túnel provocó un aumento del nivel freático y después de subsidencias de hasta 4 cm, el terreno volvió a subir en aproximadamente 1 cm [Strozzi, T., et al (2011)].

En el curso de los estudios de prefactibilidad del túnel base del *Brennero* (en roca metamórfica) se prepararon los pronósticos de subsidencia. En el curso de la presentación y negociación con la autoridad ambiental, se preparó un mapa de riesgos de asentamientos. Desde el punto de vista geológico, se observaron rocas sólidas sensibles a los asentamientos y rellenos de valles con sedimentos de grano fino. Geotécnicamente, se identificaron áreas donde era posible o probable una subsidencia. Desde el punto de vista de los bienes protegidos, se marcan las zonas sensibles a hundimientos. Al igual que en el caso del túnel base del *Gotardo*, el peligro de asentamiento del túnel en las rocas metamórficas y cristalinas, especialmente en los gneises, también está presente en el túnel base del *Brennero*. Además, el drenaje de los acuíferos de poros, en contacto con la obra planificada, podía representar una amenaza, directamente a través de zonas de falla o estratos de roca bien drenados. El temor era que el drenaje a través de mármoles cársticos o fallas, iba a tener un impacto directo en objetos sensibles. Ensayos posteriores y un plan de acción integral durante el avance (anticipado al frente) redujeron el riesgo a un nivel aceptable. El túnel base del *Brennero* se encuentra en plena construcción desde el 2008.

8 CONCLUSIONES

Las campañas de exploración para proyectos subterráneos en roca cristalina se coordinarán con la investigación respectiva [Reichl, P., et. al (2016)]. Con los requisitos de la obra, aumentan las demandas sobre el programa de exploración. Los tipos de edificios con requisitos crecientes pueden, por ejemplo, clasificarse de la siguiente manera: labores temporales mineras, galerías de acceso, cavernas de almacenamiento, túneles de tráfico, cavernas para centrales hidroeléctricas, laboratorios de investigación, etc., depósitos de desechos radioactivos. En el curso de las campañas de exploración, las fuentes de error deben ser excluidas en la medida de lo posible.

Los problemas de cuantificación y modelación en acuíferos fisurados se resumen en [Berkowitz, B. (2002)]. Las condiciones de borde de modelos digitales de fisuras fueron limitadas a base de dos proyectos por DARCEL et al [Darcel, C., et. al (2009)]. Enfoque de este estudio son las escalas dependiendo de la distribución de tamaños de diaclasas, el peso relativo de propiedades en términos de incertidumbre y la variabilidad, así como la asignación de áreas en una categoría estadística de las propiedades de división similar. El tamaño ideal de un modelo numérico de simulación de una filtración de agua en un túnel depende de las condiciones de la litología, la cobertura (tapada), rumbo y buzamiento de las estructuras y fallas relevantes y la geometría de la excavación. El tamaño óptimo del modelo se calculó, teniendo en cuenta la distancia al agua subterránea, el radio del túnel y la distancia de separación [Farhadian, H., et. al (2016)]. Si el modelo es demasiado pequeño, la cantidad de acceso de agua se sobreestimarán. Los modelos demasiado grandes, se vuelven difíciles de manejar y las simulaciones requieren demasiado tiempo de cálculo y requisitos de memoria. La influencia del REV (volumen elemental representativo) ideal y los efectos de escala en términos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento se documentaron debidamente [Wang, M., et. al (2002):], [Pedretti, D., et. al (2016)]. El uso de geoestadística 3D con el software geoestadístico *GEOFRAC* para modelar la red de fisuras como el parámetro de entrada más importante en un modelo numérico de agua subterránea fisurada, se describió en el ejemplo de un macizo granítico en Japón [Liu, J., Elsworth, D. Brady, B.H. (1997)] y con granulitas y migmatitas en Costa de Marfil [Razack, M. Lasm, T. (2006)]. El uso de las

propiedades mecánicas de la roca matriz, para definir un "índice de ductilidad" y la transmisividad máxima posible de una zona de falla en esta roca podría ser un enfoque para la simplificación al mismo tiempo que aumenta la confianza predictiva (el modelo aún está por verificarse) [Ishii, E. (2015)].

La excavación de un túnel en roca metamórfica es un desafío hidrogeológico que puede manejarse a través de una planificación prudente. Los hallazgos clave a considerar en la planificación son:

- Las vías de flujo se modifican por trabajos subterráneos, permitiendo que un afluyente se convierta en una zona de infiltración.
- Dependiendo de las condiciones geológicas, las condiciones de tensión, la geometría de la cavidad y el método de excavación, la permeabilidad del macizo cambia alrededor de la estructura.
- El aumento de las permeabilidades a través de una relajación cerca de un túnel, en un entorno de estrés muy heterogéneo y por ende filtraciones de agua asociadas, tienen un curso de tiempo, lo que puede conducir a problemas en la excavación mecanizada al descender por debajo de una velocidad crítica.
- El drenaje del macizo conduce a deformaciones, que generalmente se reflejan en asentamientos de superficie. Este hecho tiene relevancia cuando existen en las cercanías de la obra, estructuras sensibles a posibles subsidencias.
- El drenaje del macizo generalmente conduce a cambios en los parámetros físicos y en la composición química del agua subterránea al activar nuevas vías de flujo.
- Las características del agua subterránea que se encuentra en los túneles y en sus drenajes no reflejan el agua del acuífero no afectado. Esto aplica por sobre todo para los parámetros críticos que están influenciados por la desgasificación (valor pH, contenido de oxígeno, balance de ácido carbónico). Además, el contacto con materiales de inyección o sostenimiento afectarán las propiedades del agua.
- Conceptos erróneos con respecto a la recarga de agua subterránea, las propiedades de mecánica de roca del macizo, el fracturamiento y la relevancia de las zonas de falla, pueden llevar a sobre o subestimar la filtración real y el impacto ambiental en el pronóstico. Por lo tanto, tiene sentido realizar análisis de sensibilidad y de riesgo, además del pronóstico habitual, especialmente en el caso de desviaciones

pronunciadas en el valor del pronóstico. Esto se puede realizar considerando el peor caso posible para cada parámetro de entrada.

REFERENCIAS

- Alt-Epping, P., Diamond, L.W., Häring, M.O., Ladner, F. Meier, D.B. (2013): Prediction of water-rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5 km Basel-1 well. *Applied Geochemistry*, Vol.38, pp. 121-133.
- Arias, D., Pando, L., López-Fernández, C., Díaz-Díaz, L.M. Rubio-Ordóñez, Á. (2016): Deep weathering of granitic rocks: A case of tunnelling in NW Spain. *Catena*, Vol. 137, pp. 572-580.
- Badoux, H. (1982): Des événements de Zeuzier et de la galerie du Rawyl RN6. *Ingénieurs et architectes suisses*, Vol.108, pp.155-167.
- Baghbanan, A. Jing, L. (2008): Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, pp. 1320-1334.
- Benedek, K. Molnár, P. (2013): Combining structural and hydrogeological data: Conceptualization of a fracture system. Vol. 163, pp. 1-10
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O. Scibek, J. (2013): Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, Vol. 127, pp. 171-192
- Berkowitz, B. (2002): Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp.861-884
- Bianchetti, G. (1993): Hydrogéologie et géothermie des venues d'eau du tunnel du Rawyl (Valais, Suisse). *Bulletin du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, 12, pp. 87-109
- Böfer, M., Höfer-Öllinger, G., Negro, A. Strada, J. (2012): The Basic Design of the Agua Negra Tunnel, Argentina WTC2012 Bangkok Thailand. *Underground & Tunnelling Group*, conference paper, 10.05.2012
- Brandl, J., Gupta, V.K. Millen, B. (2010): Tapovan-Vishnugad hydroelectric power project – experience with TBM excavation under high rock cover / . Tapovan-Vishnugad Wasserkraftwerk – Erfahrungen mit TBM-Vortrieb bei hoher Überlagerung. *Geomechanics and Tunnelling*, 3, pp. 501-509
- Brosch, F.J. Pischinger, G. (2014): Small- to meso - scale brittle rock structures and the estimation of "paleostress" axes - A case study from the Koralm region (Styria/Carinthia). *Austrian Journal of Earth Sciences*, Vol.107/2, pp. 37-59
- Brown, E.T. Hoek, E. (1978): Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, Abstracts 15, pp. 211-215
- Bucher, K., Stober, I. Seelig, U. (2012): Water deep inside the mountains: Unique water samples from the Gotthard rail base tunnel, Switzerland. *Chemical Geology*, 334, pp. 240-253
- Bucher, K., Zhu, Y. Stober, I. (2009): Groundwater in fractured crystalline rocks, the Clara mine, Black Forest (Germany) *International Journal of Earth Sciences* 98, 1727-1739
- Caine, J.S., Evans, J.P. Forster, C.B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* Vol. 24/11, pp. 1025-1028
- Chen, Y.-F., Zheng, H.-K., Wang, M., Hong, J.-M. Zhou, C.-B. (2015): Excavation-induced relaxation effects and hydraulic conductivity variations in the surrounding rocks of a large-scale underground powerhouse cavern system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, pp. 253-267
- Chen, Y., Zhou, C. Sheng, Y. (2007): Formulation of strain-dependent hydraulic conductivity for a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, pp. 981-996
- Darcel, C., Davy, P., Le Goc, R., de Dreuzy, J.R. Bour, O. (2009): Statistical methodology for discrete fracture model-including fracture size, orientation uncertainty together with intensity uncertainty and variability
- Ehrbar, H., Bremen, R. Otto, B. (2010): Gotthard Base Tunnel – Tunnelling in the influence zone of two concrete arch dams / Gotthard Basistunnel – Tunnelbau im Einflussbereich von zwei Bogenmauern. *Geomechanics and Tunnelling*, 3, pp. 428-441
- El Tani, M. Bremen, R. (2014): Alp Transit: Crossing Faults 44 and 49. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, pp. 1037-1048
- Farhadian, H., Katibeh, H., Huggenberger, P. Butscher, C. (2016): Optimum model extent for numerical simulation of tunnel inflow in fractured rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, pp.21-29
- Fasching, F., Wurzwaller, S. Pischinger, G. (2008): The Lavanttal fault - tunnelling through a major fault zone of the Eastern Alps, *Pangeo* 2008
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. Withjack, M.O. (2010): A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, pp.1557-1575
- Fernandez, G. Moon, J. (2010): Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – Part 2: Verification of proposed method using numerical modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25/5, pp. 567-574
- Fransson, Å., Tsang, C.F., Rutqvist, J. Gustafson, G. (2010): Estimation of deformation and stiffness of fractures close to tunnels using data from single-hole hydraulic testing and grouting *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47, pp. 887-893
- Garshol, K. (2011): Pre-Excavation Grouting in Rock Tunneling, Degussa CC
- Goel, R.K. (2014): Tunnelling through weak and fragile rocks of Himalayas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, pp. 783-790
- Golger, M., Höfer-Öllinger, G. Prinzl, F. (2014): The Pir Panjal Railway Tunnel. *Geomechanics and Tunnelling*, 7, pp. 133-141
- Gräsele, W., Kessels, W., Kümpel, H.J. Li, X. (2006): Hydraulic observations from a 1 year fluid production test in the 4000 m deep KTB pilot borehole. *Geofluids*, 6, pp. 8-23

- Gudmundsson, A. (2001): Fluid overpressure and flow in fault zones: field measurements and models. *Tectonophysics*, 336, pp. 183-197
- Guihéneuf, N., Boisson, A., Bour, O., Dewandel, B., Perrin, J., Dausse, A., Viossanges, M., Chandra, S., Ahmed, S. Maréchal, J.C. (2014): Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. *Journal of Hydrology*, 511, pp. 320-334
- Hamm, S.-Y., Kim, M., Cheong, J.-Y., Kim, J.-Y., Son, M. Kim, T.-W. (2007): Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite. *Engineering Geology*, 92, pp. 73-87
- Heim, A. Gansser, A. (1939): Central Himalaya Geological observations of the Swiss expedition 1936
- Höfer-Öllinger, G. (2016): Karst im Tunnelbau. In C. Spötl, L. Plan and E. Christian (Eds.), *Höhlen und Karst in Österreich*, S.113-122
- Höfer-Öllinger, G. Millen, B. (2010): Geothermal prognoses for tunnels in the Andes / . Geothermische Prognose für Andentunnel. *Geomechanics and Tunnelling*, 3, pp. 622-633
- Höfer-Öllinger, G. Millen, B. (2014): Development of a Geological Model for a Base Tunnel. ITA-AITES World Tunnel Congress 2014
- Höfer-Öllinger, G., Pointner, P. Stadlober, M. (2016): Percussion Drilling as Fast and Efficient Investigation in Construction Stage - A Case Study from Koralm Base Tunnel, Austria. ITA-AITES World Tunnel Congress 2016
- Höfer-Öllinger, G., Sigl, O., Krenn, F., Mohanty, S.K., Bailapudi, E., Kudtarkar, D. Nair, U. (2014): Underground Crude Oil Strategic Storage Projects in India. *World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life*, 9
- Ishii, E. (2015): Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120/4, pp.2220-2241
- Kelsall, P.C., Case, J.B. Chabannes, C.R. (1984): Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 21, pp.123-135
- Knittel, A. (1995): Geotechnische Probleme beim Bau des Erkundungsstollen Kaponig. *Mitteilungen des Institutes für Bodenforschung und Baugeologie*, 5, S. 67-102
- Koike, K., Kubo, T., Liu, C., Masoud, A., Amano, K., Kurihara, A., Matsuoka, T. Lanyon, B. (2015): 3D geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution. *Tectonophysics*, 660, pp. 1-16
- Kværner, J. Snilsberg, P. (2013): Hydrogeological impacts of a railway tunnel in fractured Precambrian gneiss rocks (south-eastern Norway). *Hydrogeology Journal*, 21, pp. 1633-1653
- Liu, J., Elsworth, D. Brady, B.H. (1997): Analytical evaluation of post-excavation hydraulic conductivity field around a tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 181.e181-181.e187
- Loew, S., Lützenkirchen, V., Hansmann, J., Ryf, A. Guntli, P. (2015): Transient surface deformations caused by the Gotthard Base Tunnel International. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, pp. 82-101
- Martino, J.B. Chandler, N.A. (2004): Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, pp. 1413-1426
- Masset, O. Loew, S. (2010): Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 18, pp. 863-891
- Masset, O. Loew, S. (2013): Quantitative hydraulic analysis of pre-drillings and inflows to the Gotthard Base Tunnel (Sedrun Lot, Switzerland). *Engineering Geology*, 164, pp. 50-66
- Michard, G., Pearson Jr, F.J. Gautschi, A. (1996): Chemical evolution of waters during long term interaction with granitic rocks in northern Switzerland. *Applied Geochemistry*, 11, pp. 757-774
- Millen, B., Höfer-Öllinger, G. Brandl, J. (2015): Change in Hydraulic Properties of Rock Mass Due to Tunnelling. IN G. Lollino, D. Giordan, K. Thuro, C. Carranza-Torres, F. Wu, P. Marinos and C. Delgado (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects*, pp. 937-940
- Millen, B., Sigl, O. Höfer-Öllinger, G. (2014): Rock mass behaviour of weathered, jointed and faulted Khondalite – Examples from the underground crude oil storage caverns in Visakhapatnam, India. *Geomechanics and Tunnelling*, 7, pp. 255-271
- Min, K.-B., Rutqvist, J., Tsang, C.-F. Jing, L. (2004): Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, pp. 1191-1210
- Mizuno, T., Aosai, D., Shingu, S., Hagiwara, H., Yamamoto, Y. Fukuda, A. (2013): Hydrochemical Changes Associated with Construction of Mizunami Underground Research Laboratory. *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, 12, pp. 89-102
- Mohanty, S.K., Sigl, O., Krenn, F. Höfer-Öllinger, G. (2013): Underground crude oil storage projects in India / Unterirdische Rohölkavernen in Indien. *Geomechanics and Tunnelling*, 6, pp. 509-518
- Mossmark, F., Ericsson, L.O., Norin, M. Dahlström, L.-O.: Hydrochemical changes caused by underground constructions — A case study of the Kattleberg rail tunnel *Engineering Geology* 191, pp. 86-98 (2015)
- Pedretti, D., Russian, A., Sanchez-Vila, X. Dentz, M. (2016): Scale dependence of the hydraulic properties of a fractured aquifer estimated using transfer functions. *Water Resources Research*, 52, pp. 5008-5024
- Perello, P., Baietto, A., Burger, U. Skuk, S. (2014): Excavation of the Aica-Mules pilot tunnel for the Brennero base tunnel: information gained on water inflows in tunnels in granitic massifs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, pp. 1049-1071
- Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grader, A.S. Halleck, P.M. (2003): Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*, 30/20, pp. 1-4
- Pusch, R. (1989): Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26, pp. 79-83

- Ramsbacher, P., Steidl, A., Strobl, e. (2000): Hydrogeologische Untersuchungen im Raum Kaponig-Dösen im Rahmen der Errichtung des Kaponig Eisenbahntunnels (Kärnten, Österreich). Beiträge zur Hydrogeologie, 51, Graz pp. 111-168
- Razack, M. Lasm, T. (2006): Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). Journal of Hydrology, 325, pp. 164-178
- Reichl, P., Strobl, E., Winkler, G. (2002): Hydrogeologische Systembeschreibung - Eine Grundlage für die Bewertung umweltrelevanter Auswirkungen von Untertagebauwerken. Felsbau, 20/5, pp. 112-120
- Reichl, P., Domberger, G., Reszler, C. & G. Winkler (2016): Hydrogeologische Untersuchungen im Tunnelbau – eine Zusammenschau der Vielfalt an unterschiedlichen Fragestellungen und Untersuchungsmethoden. Beiträge zur Hydrogeologie, 60, pp. 73-90, Graz
- Rinder, T., Dietzel, M. Leis, A. (2013): Calcium carbonate scaling under alkaline conditions – Case studies and hydrochemical modelling. Applied Geochemistry, 35, pp. 132-141
- Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., Leray, S., Schroetter, J.M., Longuevergne, L., Le Borgne, T., Hochreutener, R., Labasque, T., Lavenant, N., Vergnaud-Ayraud, V. Mougín, B. (2014): Hydrological behavior of a deep sub-vertical fault in crystalline basement and relationships with surrounding reservoirs. Journal of Hydrology, 509, pp. 42-54
- Rutqvist, J. (2015): Fractured rock stress-permeability relationships from in situ data and effects of temperature and chemical-mechanical couplings. Geofluids, 15, pp. 48-66
- Shidahara, T., Oyama, T. Nakagawa, K. (1993): The hydrogeology of granitic rocks in deep boreholes used for compressed air storage. Engineering Geology, 35, pp. 207-213
- Souley, M., Homand, F., Pepa, S. Hoxha, D. (2001): Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, pp. 297-310
- Steidl, A. (2012): Engineering geological investigation of Quaternary faulting and deep-seated gravitational slope deformation mechanics – with reference to the Kaponig Pilot Tunnel, Mallnitz, Austria. Dissertation, 164 pp.
- Stober, I. Bucher, K. (2004): Fluid sinks within the earth's crust. Geofluids, 4, pp. 143-151
- Stober, I. Bucher, K. (2005): The upper continental crust, an aquifer and its fluid: hydraulic and chemical data from 4 km depth in fractured crystalline basement rocks at the KTB test site. Geofluids, 5, pp. 8-19
- Stober, I. Bucher, K. (2007): Hydraulic properties of the crystalline basement. Hydrogeology Journal, 15, pp. 213-224
- Stober, I. Bucher, K. (2015): Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. Geofluids, 15, pp. 161-178
- Stournaras, G.C. (2008): Hydrogeology and vulnerability of limited extension fissured rocks islands. Ecohydrology & Hydrobiology, 8, pp. 391-399
- Strozzi, T., Delaloye, R., Poffet, D., Hansmann, J. Loew, S. (2011): Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry. Remote Sensing of Environment, 115, pp. 1353-1360
- Upton, P. Sutherland, R. (2014): High permeability and low temperature correlates with proximity to brittle failure within mountains at an active tectonic boundary, Manapouri tunnel, Fiordland, New Zealand. Earth and Planetary Science Letters, 389, pp. 176-187
- Wang, M., Kulatilake, P.H.S.W., Um, J. Narvaiz, J. (2002): Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, pp. 887-904
- Winkler, G. & Reichl, P. (2014): Scale dependent investigations of faulted crystalline rocks – examples from the Eastern Alps, Austria. In: Sharp, J.: Fractured Rock Hydrogeology, IAH Selected Papers 20, CRC Press/Balkema pp. 181-196.
- Yin, A. (2006): Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. Earth-Science Reviews, 76, pp. 1-131
- Zang, A. Stephansson, O. (2010): Stress Field of the Earth's Crust, Springer, Netherlands
- Zangerl, C., Eberhardt, E., Loew, S. & Evans, K.F. (2003a): Coupled hydromechanical modelling of surface subsidence in crystalline rock masses due to tunnel drainage. Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy
- Zangerl, C., Eberhardt, E. & Loew, S. (2003b): Ground settlements above tunnels in fractured crystalline rock: Numerical analysis of coupled hydromechanical mechanisms. Hydrogeology Journal, 11, pp. 162-173
- Zhang, X., Sanderson, D.J., Harkness, R.M. Last, N.C. (1996): Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 33, pp. 17-37
- Zhao, J. (1998): Rock mass hydraulic conductivity of the Bukit Timah granite, Singapore. Engineering Geology, 50, pp. 211-216