

# Impermeabilización subterránea

Un corte de flujo con inyecciones de gel acrílico



**JÖRG**  
**De Hesselle**

CE, IBE-Ingenieure GmbH+Co.KG



**UTE**  
**Hornig**

MFPA para la industria de la construcción Leipzig GmbH



**GÖTZ**  
**Tintelnot**

TPH Bausysteme GmbH

## RESUMEN

La sección parcial que incluye aprox. 3,1 km de longitud. El túnel de Jagdberg adquiere un papel clave durante la modernización de la autopista federal A4 en Turingia / D. Las intervenciones de inyección en el Túnel de Jagdberg sirvieron para interceptar, recoger y eliminar las aguas subterráneas, que debido a su contenido de sulfato eran agresivas a las estructuras de hormigón. Este documento muestra cómo se realizó la planificación, ejecución y monitoreo.

## PALABRAS CLAVE

Aguas sulfatadas, gel acrílico, inyección cortina, drenaje, tubos manguito

## ABSTRACT

*The part-section including the approx. 3,1 km long Jagdberg Tunnel takes on a key role during the upgrading of the federal motorway A4 in Thuringia/D. Injection interventions in the Jagdberg Tunnel served to intercept, collect and remove underground water, which due to its sulphate content were aggressive to the concrete structures. This paper shows how planning, execution and monitoring were done.*

## KEYWORDS

*Sulphate water, acrylic gel, injection curtain, drainage, sleeve pipes*

# 1

## Introducción

La autopista federal A4 es uno de los más importantes enlaces este-oeste de la red de autopistas de la República Federal de Alemania. Conecta los centros de Rhine-Main y el distrito de Ruhr con Turingia y Sajonia, así como la región económica en desarrollo en el este y el sureste de Europa.

Dentro del proyecto global que implica la “reurbanización y nueva construcción de la autopista A4”, el tramo parcial entre los polos de Magdala y Jena-Göschwitz asume un papel clave debido a las deficiencias de la ruta existente ya los problemas de programación. Los aprox. del túnel de Jagdberg, de 3,1 km de longitud, fue planeado y construido en esta sección parcial.

La zona del valle circundante posee una significación ecológica regional extremadamente alta y, por lo tanto, es clasificada como zona FFH (Flora, Fauna y Hábitat). El DEGES adjudicó el contrato global de construcción al JV Tunnel-Jagdberg. Se trató de la excavación del Túnel de Jagdberg con una sección transversal estándar RQ 33t en Drill & Blast, así como medidas extensivas para asegurar pendientes, varias paredes de reducción de ruido e instalaciones de protección contra el ruido. También implica la construcción de la ruta de aproximadamente

11 km de largo que implica mover unos 4 millones de m<sup>3</sup> de tierra (eliminación y replantación). Posee 7 pasajes transversales y 3 sobre pasajes, 5 pozos por pozo, un pozo de eliminación de humo de 140 m de altura aproximadamente en medio del túnel, centros de operaciones en los portales oeste y este (fig. 1) y un edificio de ventilación Sobre el túnel.

En la etapa de planificación preliminar y en preparación para la convocatoria de licitaciones para el esquema de construcción, se realizaron extensas investigaciones para establecer la situación del suelo. Las predicciones del subsuelo basadas en estos reconocimientos se confirmaron en gran medida durante la producción del túnel. El túnel fue conducido y apoyado bien dentro del límite de tiempo programado. La zona de falla prevista para circular aproximadamente en el centro del túnel, que representa la intersección geológica entre la caliza y la formación de caliza rojiza “Röt”, resultó ser menos complicado de penetrar que anticipado. Un curso de agua en el Röt no se asumió sobre la base de las investigaciones del subsuelo como la roca resultó ser compacto y no perturbado. Las secciones con un suelo abierto fueron abordadas y soportadas sin la infiltración de agua subterránea durante las operaciones de conducción y la vida útil de la cáscara externa del túnel.

Sin embargo, no se encontraron realmente las cantidades de agua subterránea predichas por la evaluación del

subsuelo por adelantado. Se realizó una mampara / barrera y la recolección selectiva de posibles aguas subterráneas que se filtraban para evitar que el agua de la roca que cubría (caliza de la cáscara) pudiera penetrar mientras el túnel estaba siendo conducido en el sector Röt (fig. 2). Investigaciones adicionales habían revelado que cualquier entrada de agua actuaría de una manera altamente agresiva hacia el concreto debido a su contenido de sulfato. Se planificaron y ejecutaron cortinas de inyección con estructuras de barrera para recoger y eliminar cualquier posible agua de filtración. Las medidas para contener permanentemente aguas subterráneas agresivas al hormigón, que fueron impulsadas por el cliente, serán presentadas y explicadas a continuación.

## 2 Preparación de las medidas de inyección

### 2.1. Investigación previa

El concepto del cliente para la aplicación de la medida prevé las inyecciones de ensayo de acuerdo con DIN EN 12715 [1] para afinar el procedimiento de inyección real para garantizar la ejecución regular y la eficacia de la acción de inyección en las zonas de transición entre la Formación “Röt” y la caliza. En paralelo también se probó la idoneidad básica de los materiales de inyección de sellado bajo las condiciones generales imperantes. Las inyecciones de ensayo fueron



Fig. 1. Portal Este del Túnel de Jagdberg

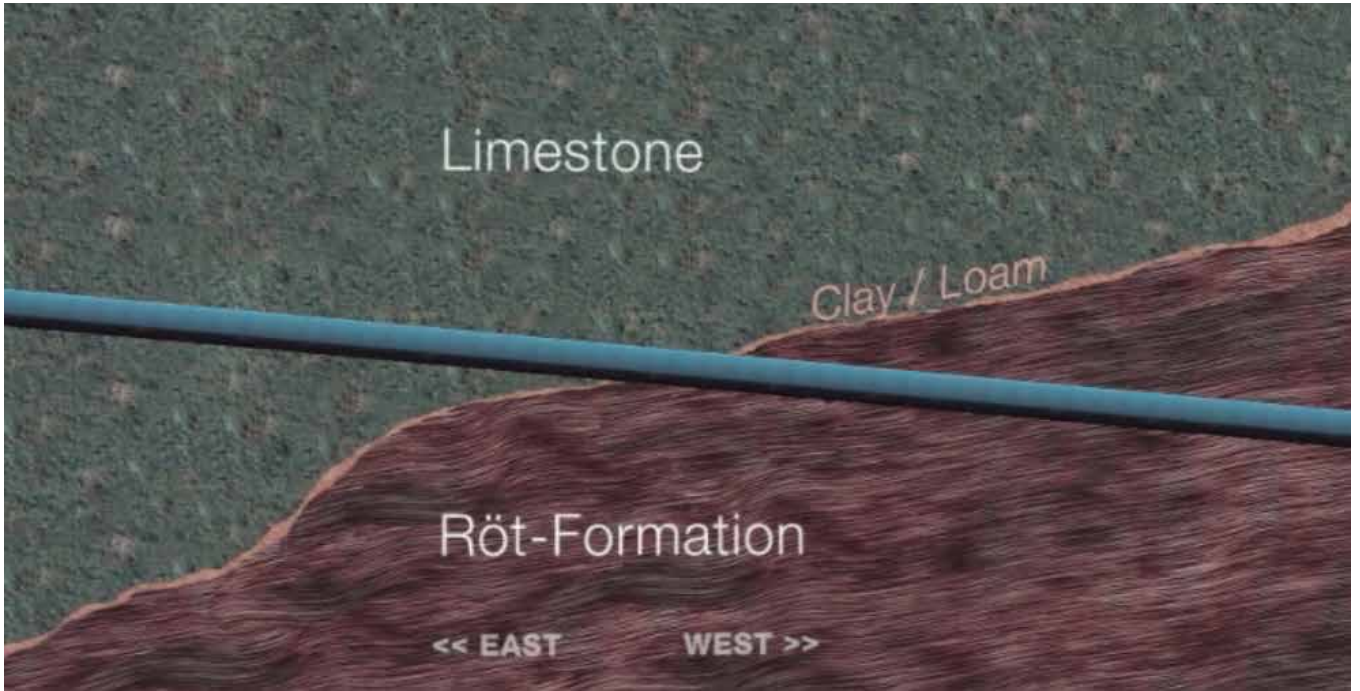


Fig. 2. Zona de Falla entre Caliza y la formación "Röt" llevando aguas agresivas

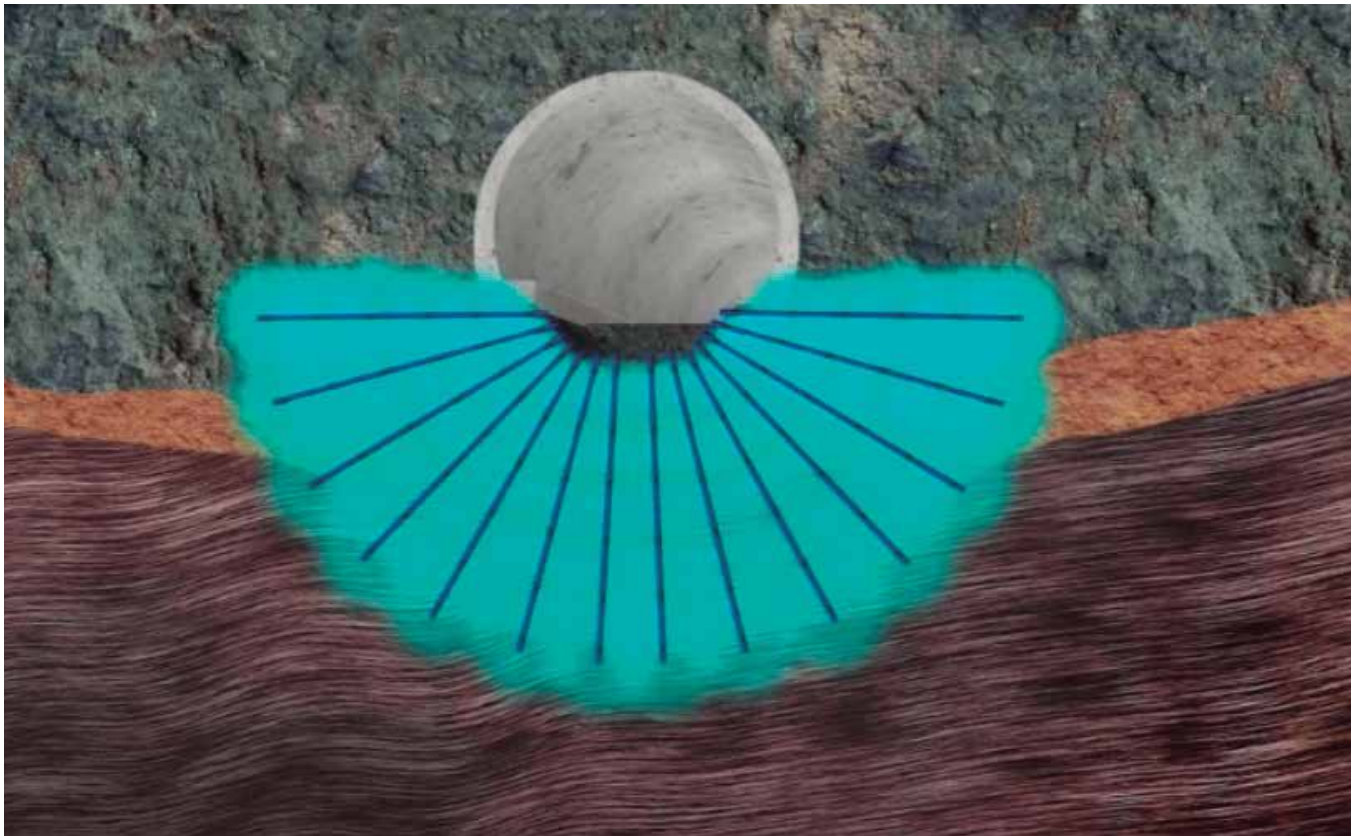


Fig. 3. Corte cortina de la inyección ideal para detener y desviar el agua agresiva





Fig. 4. WD Unidad de test

Fig. 5. Ejecución de la inyección de ensayo



realizadas y evaluadas por IBE Ingenieure GmbH + Co. KG en unión con el STUVA e. V. y MFPA Leipzig GmbH, así como TPH Bausysteme GmbH.

De acuerdo con la documentación geológica disponible, el agua de infiltración ascendente debía ser contada en la esfera de influencia de las inyecciones, emergiendo de fisuras a caudales variables que oscilaban entre 0,005 y 0,01 l / s. Este aspecto tuvo que ser tomado en consideración por la selección de los materiales de inyección con suficientes posibilidades de ajuste para evitar la dilución o el lavado del producto de inyección. Además, en algunos casos, las aguas subterráneas agresivas que contenían una alta proporción de sulfato debían considerarse en la esfera de influencia de las inyecciones ya su vez las estructuras de inyección subsiguientes.

Teniendo en cuenta los análisis existentes de agua obtenida de la exploración, así como los minerales prevaletentes en cuenta, se llevaron a cabo pruebas de exposición con posibles materiales. Se examinaron los cambios de volumen y masa relacionados con el tiempo, así como las características especiales durante el contacto con los líquidos almacenados. Se aplicó una solución de yeso

saturado ( $\text{CaSO}_4$ ) así como un compuesto de sal, que se utilizó para simular el agua que se encontraba sobre el terreno, para fines de ensayo.

Las pruebas de almacenamiento con 6 materiales diferentes revelaron la idoneidad básica de 2 geles de acrilato y una resina a base de silicato flexible, no espumante, de doble componente para ser inyectada en fisuras que contienen agua. Durante el período de almacenamiento, estos materiales no mostraron fenómenos de disolución hidrolítica o propiedades de hinchamiento excesivo. Más detalles sobre los materiales de inyección se encuentran en la Sección 2.3.

## 2.2. Inyecciones de ensayo

Pruebas de permeabilidad al agua (WD-Tests) se llevaron a cabo en la esfera de influencia de las inyecciones de prueba para probar su eficacia [2]. Estas pruebas WD sirvieron para establecer la capacidad de absorción de agua de la roca dependiendo de la presión. Los resultados pretendieron proporcionar conclusiones extensas sobre la permeabilidad de la roca circundante. Basándose en las Pruebas WD (Fig. 4), el objetivo era averiguar entre otras cosas si los agentes de inyección definidos en la etapa de planificación con sus características

específicas tales como la viscosidad y el ciclo de reacción son adecuados para inyectarse en las hendiduras y fisuras dentro de la Roca alcanzada por la perforación.

El método de ensayo aplicado era esencialmente adecuado para esta tarea, aunque no permitía distinciones significativas entre los procedimientos ensayados individualmente, sino que sólo indicaba la eficacia de la inyección como tal en las condiciones generales existentes (incluyendo cambios en el patrón de fisura y cavidad Área estrecha).

Las inyecciones de ensayo de acuerdo con [3] se llevaron a cabo en los bloques, en los que el trabajo de inyección de sellado fue ejecutado posteriormente. Se previeron dos puntos de prueba de inyección por bloque. Estos puntos en forma de triángulos se localizaron lo más cerca posible de los hombros para determinar la influencia de la inyección sobre estos componentes estructurales, así como el sistema de drenaje instalado en el hombro (figuras 5 y 6). La separación entre los triángulos de ensayo se seleccionó de tal manera que los puntos de inyección no pudieran afectarse mutuamente entre sí. Se produjeron tres agujeros de perforación de 12,5 m



de profundidad por zona de ensayo de inyección para alcanzar la profundidad final posterior de 10 m por debajo del fondo del pozo de construcción con respecto al nivel actualmente existente que consiste en aprox. 2,5 m de material apilado. El patrón de perforación para los taladros, que comprende un triángulo equilátero, se fijó en 1,0 m x 1,0 m. El ángulo de perforación ascendió a 1 grado.

Después de concluir las inyecciones, se requirió un agujero de prueba / control K1 para un nuevo ensayo WD en el área central del triángulo. Los triángulos de prueba estaban dispuestos de tal manera que un eje corría paralelo a los hombros y el pico del triángulo apuntaba hacia el hombro a una distancia de 1 m. Se diseñó para optimizar el patrón de perforación para las barreras de inyección basándose en la geometría seleccionada para los triángulos de prueba junto con los ensayos WD.

Los taladros A1 y B1 se crearon como orificios de núcleo DN 100. De este modo, por una parte, se disponía directamente de información sobre la estructura de la capa en la zona de la cortina de inyección prevista antes del inicio de las inyecciones de ensayo y, por otra,

era posible realizar un ensayo WD para establecer la permeabilidad existente. Las muestras de núcleo obtenidas del agujero se sometieron a un examen geológico de acuerdo con la secuencia de perforación, luego se documentaron y evaluaron. Además, los taladros fueron inspeccionados por cámara para respaldar el resultado de la evaluación de la muestra de núcleo óptico.

Las inyecciones experimentales fueron respaldadas por monitoreo para documentar los cambios de posición que afectan tanto al subsuelo como a la cámara interna del túnel (figuras 7 + 8). Para ello, se utilizó un sistema de medición tachométrica para que las inyecciones de ensayo pudieran ser embarcadas una vez instalados los dispositivos técnicos de medición.

También se probaron y documentaron diferentes especificaciones tecnológicas con respecto a la cantidad de descarga, la presión de inyección, el tipo de envasador, los tiempos de espera, las secuencias de lavado y los criterios de excavación oportunos con respecto a su influencia en el resultado de inyección deseado además de variar los agentes de inyección y los parámetros de in-





Fig. 6. Montaje de un triángulo de prueba

Fig. 7. Inyección prueba con monitoreo

Fig. 8. Detalle de la prueba de inyección

yección. Además, el procedimiento de medición adjunto permitió hacer predicciones sobre la deformación en la roca circundante y la envoltura del túnel.

Se obtuvo información inestimable para seleccionar los materiales de inyección adecuados, la tecnología de inyección y las presiones máximas de inyección, así como para determinar las cantidades requeridas de material y establecer comprobaciones, a partir de los resultados de la inyección de ensayo. Por lo tanto, las inyecciones de ensayo ejercieron una influencia sustancial sobre la eficacia y la economía de las medidas de inyección reales.

### 2.3 Elección del material inyectable más idóneo

La fig. 7 muestra los campos de aplicación para diversos agentes de inyección dependiendo de la permeabilidad del suelo que prevalece. En el Túnel de Jagdberg, se aplicaron mezclas de mortero mineral para llenar el espacio anular entre el tubo de manga y la roca y un gel a base de acrilato utilizado como agente de inyección para el sellado. Antes de esto, el MFPA Leipzig GmbH probó la capacidad técnica del agente de inyección para su aplicación técnica sobre la base del Boletín Técnico de Inyecciones de Sellado [4] y aprobó su uso por las autoridades responsables.

Los gels de acrilato son agentes de inyección de baja viscosidad que comprenden derivados de ácidos acrílico y metacrílico así como aminas y sales. El gel de acrilato [5] aplicado para el Túnel de Jagdberg corresponde a la llamada 5ª generación. Estos gels no están basados en vidrio acuoso ni contienen acrilamidas. Son duraderos, altamente flexibles y neutros para las aguas subterráneas y poseen la aprobación general de las autoridades de supervisión de la construcción desde el año 2008 con respecto a su compatibilidad con el medio ambiente. Esto significa que el gel de acrilato no libera sustancias nocivas para el medio ambiente, ya sea en estado líquido o sólido. Los componentes básicos y los catalizadores en el caso de estos materiales forman en su mayoría un compuesto descrito como un componente A activado. Después de mezclar con un componente B activado que consiste en agua e iniciador en una base de volumen 1: 1, está disponible

una solución con una viscosidad similar al agua.

Dependiendo del tipo de producto, la viscosidad fluctúa entre 3 y 12 mPas, de modo que también se pueden rellenar fisuras y cavidades extremadamente pequeñas (fig. 9). Pueden ajustarse tiempos de reacción de unos segundos hasta 60 minutos - también dependiendo del tipo de producto. La reacción que forma una masa de gel elástica similar a la de un caucho tiene lugar más bien bruscamente después de la fase líquida. El volumen de la masa sólida no aumenta calentándose o por escarcha, ya que el agua dentro de la estructura de gel ya no es capaz de moverse libremente. La ruptura de fisuras y cavidades inyectadas y los nuevos cursos de agua resultantes provocados por cambios de temperatura pueden ser excluidos.

Esencialmente es posible reemplazar el agua en la solución por una dispersión polimérica. Esto conduce a un ligero aumento de la viscosidad pero al mismo tiempo mejora la adherencia con los materiales circundantes y minimiza el comportamiento de contracción de la masa de gel reaccionada. Sin embargo, la contracción no se produce cuando se instala en el suelo o la roca en contraste con un ambiente atmosférico porque no se puede secar en estas circunstancias.

Los gels de acrilato poseen la particularidad de unir también pequeñas cantidades de agua físicamente incluso después de haber reaccionado aumentando así su volumen. En caso de que la expansión de volumen se vea obstaculizada, se acumula la presión de hinchado, lo que supone además el efecto de sellado de estos materiales.

Existen amplios resultados de ensayos que confirman la durabilidad y la capacidad funcional del material de inyección aplicado incluso durante largos períodos de tiempo, para su aplicación en áreas donde se sospecha la presencia de líquidos químicamente impactados o líquidos agresivos al hormigón. Por la construcción del Túnel de Jagdberg se realizaron extensas pruebas durante más de 14 años (fig. 10), las investigaciones realizadas sobre la resistencia al cambio de las condiciones del agua y el comportamiento cuando se almacenan en la tierra, los cuales muestran resulta-

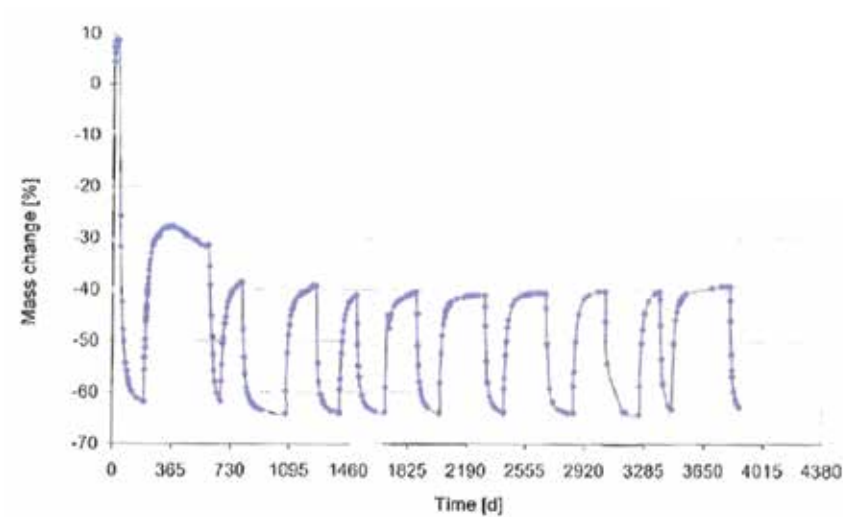
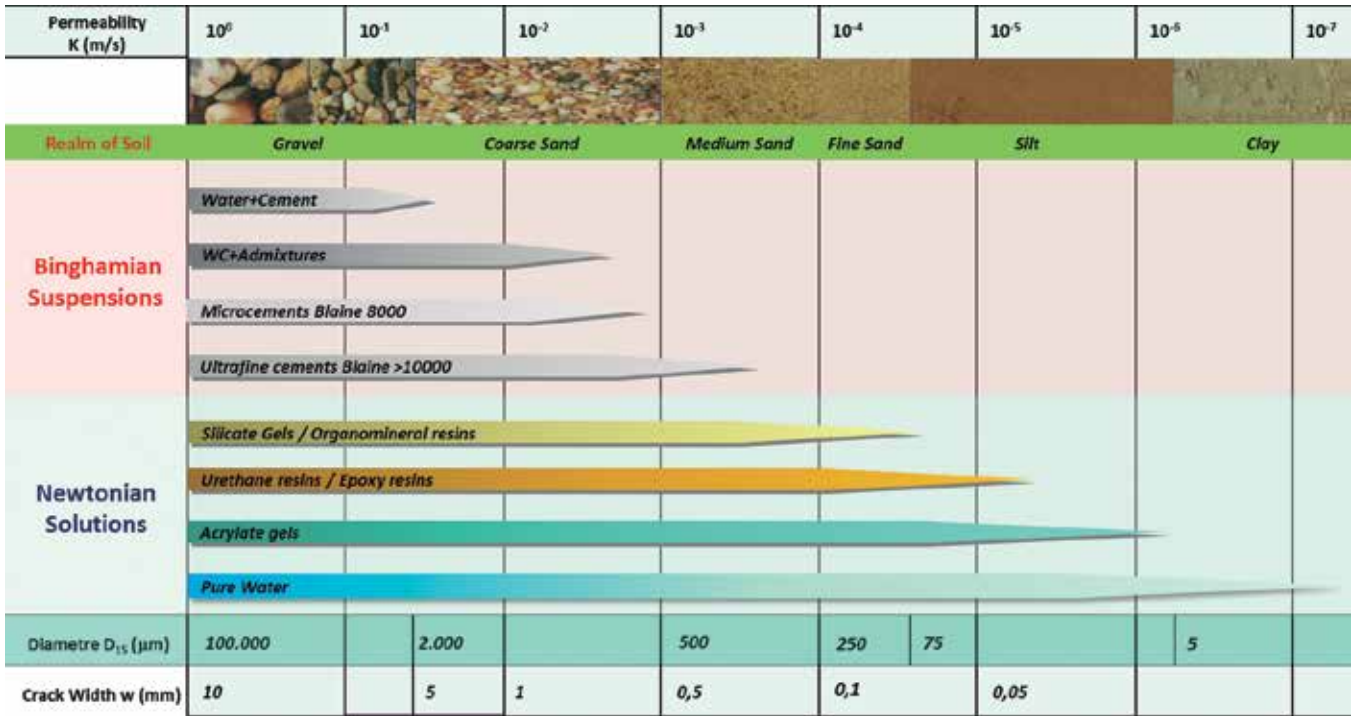


Fig. 9. Posibilidades de aplicación para agentes de inyección orientados a la permeabilidad del suelo predominante

Fig. 10. Comportamiento a largo plazo de durabilidad de muestras de gel acrílico en el suelo

dos completamente positivos, para demostrar la durabilidad [6].

## 2.4 Preparación de los trabajos

### 2.4.1 Planeamiento de las secuencias de construcción

La planificación estructural de la medida de inyección tuvo que ser realizada por un gerente de construcción, que posee un buen conocimiento del túnel, aparte de una extensa experiencia práctica en el campo de la tecnología de inyección. En el marco de la planificación operativa del proceso principal de implantación del emplazamiento de la obra, producción de taladros, ejecución de inyecciones y cambio de un sector de trabajo a otro, se permitieron plazos suficientemente largos para asesorar al personal sobre medidas de seguridad.

Se elaboró un plan detallado de la secuencia de construcción con una evaluación de los peligros, instrucciones de ejecución con identificación de los equipos para cada proceso, observación de las fichas de seguridad DIN, etc., que debieron coordinarse con el responsable del proyecto de obra. Las medidas de aseguramiento de la calidad en el marco del sistema de gestión de la calidad operacional y el autocontrol se coordinaron con el cliente, sus especialistas en pla-



nificación y el supervisor de la construcción (IBE-Ingenieure GmbH + Co.KG), así como el seguimiento por terceros (MFFPA Leipzig GmbH).

Aparte de los procesos mencionados anteriormente, los cuales fueron ajustados para cada medida de construcción de acuerdo con la extensión y el grado de dificultad, se planificó un control técnico de medición de las operaciones de perforación debido a las altas exigencias de precisión de la geometría Posición de los taladros de inyección. Estas mediciones podrían combinarse en parte con las mediciones de deformación requeridas. Cuando las exigencias de precisión son bajas, las mediciones pueden realizarse con un sistema automático de taquímetro con resultados de medición retardados. Las altas exigencias de precisión requieren mediciones con un sistema de tubos electrónicos con los resultados apareciendo en tiempo real.

#### 2.4.2 Personal

Sólo se permitió al personal, que había realizado con éxito las actividades correspondientes en varias ocasiones y que estaban familiarizados con el equipo utilizado, ejecutar los trabajos de perforación e inyección. Dado que las operaciones se llevaban a cabo en el túnel existente paralelamente a otros trabajos de túneles, era esencial que el personal implicado estuviera también acostumbrado a las condiciones especiales de funcionamiento en un túnel.

#### 2.4.3 Equipamiento

No se permitía el uso de un equipo a gasolina en un túnel. Sólo se permitió el uso de máquinas con motor eléctrico o diésel equipado con filtros de partículas. Aparte de varios equipos pequeños, se utilizaron cargadores de ruedas para el transporte horizontal y vertical, equipos de perforación de orugas para la perforación completa de 7 a 10 m de profundidad mediante el método de perforación en seco, así como compresores para proporcionar aire comprimido para el lavado Los taladros. Los agujeros del núcleo fueron creados por el método de perforación en húmedo. Aplicadores dobles fueron aplicados para inyectar la roca por encima de los tubos de manga instalados. Se tuvo que tener cuidado al dimensionar las tuberías de manga que se instalaron dos empacadores con cable de seguridad, conducto de servicio

público y tubería de aire. El conducto utilitario con piezas de acoplamiento tenía que dimensionarse adecuadamente de modo que no influyera en la presión del sistema durante la fase de inyección. Las inyecciones se llevaron a cabo por bombas de pistón accionadas eléctricamente. Las bombas con diámetros de pistón diferentes se pusieron a disposición debido a que las tasas de inyección eran desconocidas. Se desplegaron unidades de medida para documentar las inyecciones, que podían mostrar los parámetros de inyección principales con la precisión requerida en tiempo real. Los sensores estándar registraron la presión y la cantidad. Se seleccionaron sensores inductivos para recopilar la cantidad, ya que los sensores mecánicos o contadores de carrera eran demasiado inexactos para las medidas requeridas.

#### 2.4.4 Seguridad

El encargado responsable de la construcción presentó las evaluaciones de peligro conjuntamente con el experto en seguridad. Los avisos relativos a la seguridad no han de compilarse. Los avisos encontrados en el sitio podrían ser utilizados. El personal de seguridad en el sitio proporcionó instrucciones de seguridad. Después de completar la preparación del trabajo, las actividades en el túnel podrían comenzar. Las inyecciones de ensayo mencionadas anteriormente se realizaron antes de la medida principal para salvaguardar la planificación.

## 3 Programa de inyección y patrón de perforación

Se establecieron los siguientes parámetros básicos para las inyecciones teniendo en cuenta las conclusiones de las inyecciones de ensayo:

- Ejecución de todos los taladros que se suceden directamente en una sección de túnel.
- Inyecciones a través de tubos de manga, continuamente desde la parte inferior hasta la parte superior hasta el borde inferior de la cuenca de recogida.
- 66 cm entre los puntos de inyección suponiendo un radio de 0,35 m relacionado con el eje del taladro como una eficacia alcanzable al inyectar un taladro.

- Profundidad de perforación de 7 m debajo del suelo de la cuenca de recogida y profundidad de hasta 10 m debajo del hombro del túnel o de los sistemas de drenaje.

- Perforación e inyección de 3 niveles convergentes entre sí, que se cruzan a una profundidad de cortina teórica de 7 m bajo el suelo de la cuenca de recogida.

- El patrón de perforación seleccionado presentado en las figuras 11 y 12 se basa en la premisa de un cambio en la fisura y las imágenes de la cavidad en un área muy estrecha. Se asumió un diámetro alcanzable para la zona de inyección de alrededor de 70 cm para la profundidad teórica de la estructura de barrera para llegar a la mayor reducción posible de permeabilidad dado un gasto aceptable así como el menor daño posible a la roca.

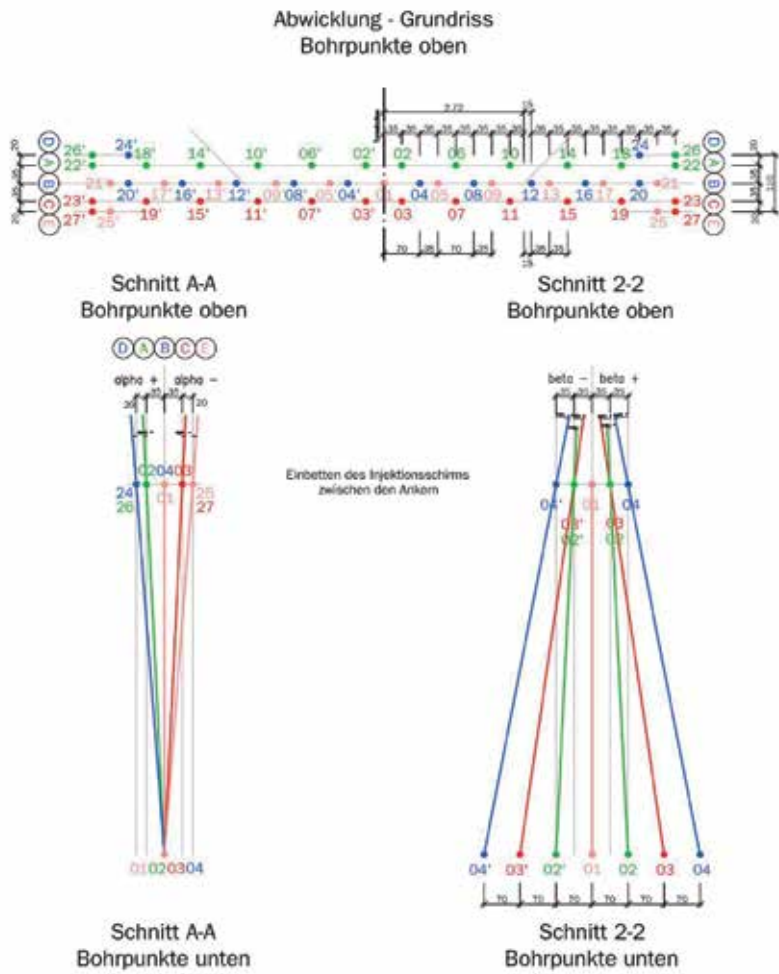
La profundidad teórica asumida para el patrón de perforación se tomó a 7 m bajo la cuenca de recogida. Esto no corresponde esencialmente a la profundidad del taladro. La profundidad del taladro debajo del suelo de la cuenca de recogida asciende también a 7 m; Se aumenta en etapas de 1 m hasta alcanzar los 10 m que se extienden hasta los orificios de perforación más exteriores para la estructura de barrera debajo de los hombros del túnel o los cimientos del túnel.

Partiendo del suelo de la excavación, los agujeros de perforación debían ser hundidos a 3 niveles A, B y C y perforados en ángulos correspondientes contra la vertical que los niveles se intersecan a la profundidad teórica de la estructura de barrera y al mismo tiempo la inyección Zonas estaban cubiertas.

Los niveles A y C contienen 14 taladros. El nivel B comprende 25 taladros en las estructuras de barrera de la cáscara y 27 en las estructuras del Röt. Por lo tanto, una estructura de barrera consta de 53 o 55 orificios de perforación por inyección. Los agujeros de los niveles A y C se perforan en cada caso inclinados en una dirección de x (ángulo beta) e y (ángulo alfa) contra la vertical. Los de nivel B se perforan inclinados en la dirección x (ángulo beta) contra la vertical.



# 4 Executing the Injections



Las figuras 13 y 14 muestran tuberías de manguera ejecutadas. Para llevar a cabo la medida de inyección principal en 4 campos de construcción espacialmente separados, las instalaciones del sitio tuvieron que ser reubicadas en cada caso. Al ejecutar el trabajo así como durante los procesos de reubicación se constató que el equipo había sido seleccionado de forma flexible y estaba adecuadamente dimensionado y correspondía a las especificaciones calculadas gracias a la ayuda de la división de ingeniería del contratista.

La técnica de medición aplicada para la instalación de los equipos de perforación y la monitorización permanente de la estructura cumplieron con las expectativas. Las demandas de precisión de los taladros fueron verificadas y verificadas por un inclinómetro.

Durante las operaciones de inyección emergió que la roca sólo aceptaba pequeñas cantidades de material de inyección en secciones parciales, permitiendo tan solo bajas tasas de inyección con una velocidad de flujo restringida del material de inyección dada una presión de inyección definida. Aparte de poseer unas características de inyección extremadamente buenas para este caso de aplicación, el gel de acrilato seleccionado también tenía la propiedad de comenzar a reaccionar durante el suministro debido a las muy bajas velocidades de flujo. Con el fin de evitar que los empaquetadores y el tubo de manguito se peguen, los empaquetadores tuvieron que ser frecuentemente extraídos del tubo de manguito y ambos tenían que ser limpiados. Se pudo probar y documentar con el sistema de medición aplicado que todas las deformaciones que se producían no superaron las proyecciones en la etapa de planificación. Sin embargo, el sistema no era adecuado para optimizar la presión de los parámetros de inyección y la cantidad de suministro, así como las deformaciones programadas deseadas, si fuera necesario, ya que el registro de un gran número de puntos de medición no podía ser reproducido en un perfil y evaluado en tiempo real por el sistema. Gracias al sistema de documenta-

Fig. 11. Niveles de perforación con descripción del ángulo de perforación y espacios entre taladros.

Fig. 12. Ángulo de taladrado para el bloque L 117 / R 123

ción aplicado, así como al control de la bomba, fue posible cumplir los acuerdos contractuales de garantía de calidad, así como compilar datos de contabilidad extensivos.

## 5 Documentación y Monitoreo

Tanto las inyecciones de ensayo como las medidas de inyección fueron permanentemente monitoreadas y documentadas por personal calificado en el lugar. Además de comprobar los parámetros importantes del material y de crear muestras retenidas del material de inyección utilizado, se recopilaron registros reproducibles de todos los datos que influyen en el proceso de inyección con éxito. Los datos enumerados en la Tabla 1 fueron reunidos individualmente por la firma de especialistas implicados y verificados por un tercero.

Gracias a la documentación disponible en gran parte digitalmente también fue posible seguir las inyecciones para rastrear cada paso, identificar la ubicación y si es necesario explicar cualquier ocurrencias especiales que surgieron posteriormente. Además, la documentación digital permitió que las cantidades inyectadas fueran contabilizadas correctamente..

## 6 Conclusión

Como un túnel siempre tenía que estar disponible para el tráfico del sitio, el proceso de construcción tuvo que ser emprendido sucesivamente. Los taladros se organizaron biaxialmente en la planificación de la ejecución sobre la base de los resultados de la inyección de prueba. Esto resultó en la reducción del número de taladros así como en la reducción de las cantidades inyectadas. La decisión del cliente de reunir el equipo adecuado de planificadores, monitores y contratistas de tal manera resultó ser el enfoque correcto, ya que se encontró una solución tanto técnica como comprensible. Las 4 estructuras de barrera incluyendo las inyecciones requeridas para ellas se produjeron en unos 4 meses. 📍



Fig. 13. Posición de los tubos de manga en la sección transversal del túnel

Fig. 14. Disposición de los tubos de manga

	Datos	Intervalo de mediciones	Responsable de la ejecución y documentación
General	Temperatura del aire, temperatura de la roca	diario	Compañía de inyección
	Fecha, hora, personal	diario	Compañía de inyección
Agente de inyección	Número de lote, relación de mezcla W/B, Temperatura del material, tiempo de reacción, Si era necesario Dimensiones de stripping	Por cada paso de trabajo	Compañía de inyección
Agente de inyección	Producción de prismas, resistencia a la compresión	Circunstancias especiales empresa de inyección	Monitoreo de terceros (FÜ)
Agente de Inyección	Tipo de material, número de lote	Por mezcla	Compañía de inyección y FÜ
	Relación de mezcla, temperatura del material, tiempo de reacción actual/target comparación	Por mezcla	Compañía de inyección y FÜ
Secuencia de inyección	Localización de la perforación	Por perforación	Compañía de inyección y FÜ
	Procesamiento digital de los siguientes parámetros de inyección: Lanza fase fase Fecha, duración, inyección por etapa presión de inyección Cantidad de descarga / caudal volumétrico Consumo de material con comparación real / objetivo hora de espera Aborto de inyección Parámetros de fluctuación reales de la documentación	Por perforación, lanza de inyección, etapa y fase	Compañía de inyección y FÜ

Tabla 1. Alcance de la supervisión y la documentación

## REFERENCIAS

[1] EN 12715: Ejecución de obras geotécnicas especiales (ingeniería civil) - inyecciones. Versión alemana EN 12715: 2000

[2] Schuchman, H; Happel, M.: Pruebas de presión de agua en el agujero libre de WD - WAP - Trineo-enKutzner, C.: Injektionen im Baugrund. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1991.

[3] Asociación de Investigación para STUVA subterráneos instalaciones de transporte. V.: Val-va ABI - Ab-densa de edificios por inyección. IRB Verlag, 2ª edición, octubre de 2007.

[4] TPH Bausysteme GmbH: hoja Datos técnicos de RUBBERTITE

[5] MFPA Leipzig GmbH: Comportamiento del Gel Acrílico RUBBERTITE después de 10 años de retraso agua y la externalización en el suelo. Informe de Investigación P5.1 / 09-003-1 t.