

Metro Cityringen Kopenhagen: Innovatives Grundwassermanagement

Um die Infrastruktur in der dänischen Hauptstadt zu verbessern, vergrößert Kopenhagen sein bestehendes Metro-System durch den Bau des neuen Metro-Ringes „Cityringen“ um zwei Drittel. Im folgenden Beitrag wird bei der Betrachtung des Projektes im Besonderen auf das innovative Grundwassermanagement eingegangen.

Projektvorstellung

Der Cityringen besteht aus einem 15,5 km langen doppelröhren Tunnelsystem sowie 17 U-Bahn-Stationen und einem oberirdischen Wartungsbahnhof. Die führerlosen U-Bahn-Züge werden ab 2018 rund um die Uhr täglich bis zu 240.000 Menschen transportieren. Das gesamte Projektbudget des Bauherrn Metroselskabet I/S beträgt 2,87 Mrd. Euro.

Die Hölscher Wasserbau GmbH wurde vom Generalunternehmer CMT I/S mit der Ausführung des Grundwassermanagements für das Projekt beauftragt.

Der Tunnel besteht aus 2 Röhren mit jeweils 5,78 m Durchmesser und wird von insgesamt 4 gleichzeitig eingesetzten EPB-TBM aufgeföhren. Die Tunnelröhren verlaufen im Kopenhagener Kalkstein in einer Tiefe von bis zu 25 m unter der Erde. Neben den TBM-Vortrieben werden insgesamt 21 Schächte mit mittleren Abmessungen von 65 x 20 m und Tiefen von bis zu 30 m hergestellt. Diese sind für die 17 Stationen

Dipl.-Geol. Helena Demel, B.Eng. Henrik Koers, Dipl.-Ing. Tim Röder;
Hölscher Wasserbau GmbH, Haren/D, info@hoelscher-wasserbau.de

sowie TBM-Startschächte und sonstige Sonderbauwerke nötig (Bild 1).

Geologie

Die für den Tunnelvortrieb relevante Boden- bzw. Felsschicht bildet der Kopenhagener Kalkstein (Copenhagen Limestone). Dieser steht ab einer Tiefe von ungefähr 10 bis 15 m unter Gelände an. Er gliedert sich im Aufbau in eine 2 bis 5 m mächtige Schicht fortgeschrittener Verwitterung „Upper Copenhagen Limestone“ sowie der unterliegend bautechnisch berührten Schicht „Middle Copenhagen Limestone“ und der Schicht des „Lower Copenhagen Limestone“. Im Verbund mit überlagernden quartären Kiessanden aus eiszeitlicher Ablagerung mit einer Schichtdicke von rund 2 m bildet die Kalksteinformation einen Grundwasserhorizont. Dieser Aquifer ist für die Wasserhaltungsarbeiten an den Bauschächten der Metrostationen sowie den Startschächten

Metro Cityringen Kopenhagen: Innovative Groundwater Management

Copenhagen is increasing the size of its existing Metro system by two-thirds through the construction of the new “Cityringen” Metro ring in order to improve the infrastructure of the Danish capital. The following report deals with the project in general and concentrates especially on the innovative groundwater management system.

Geology

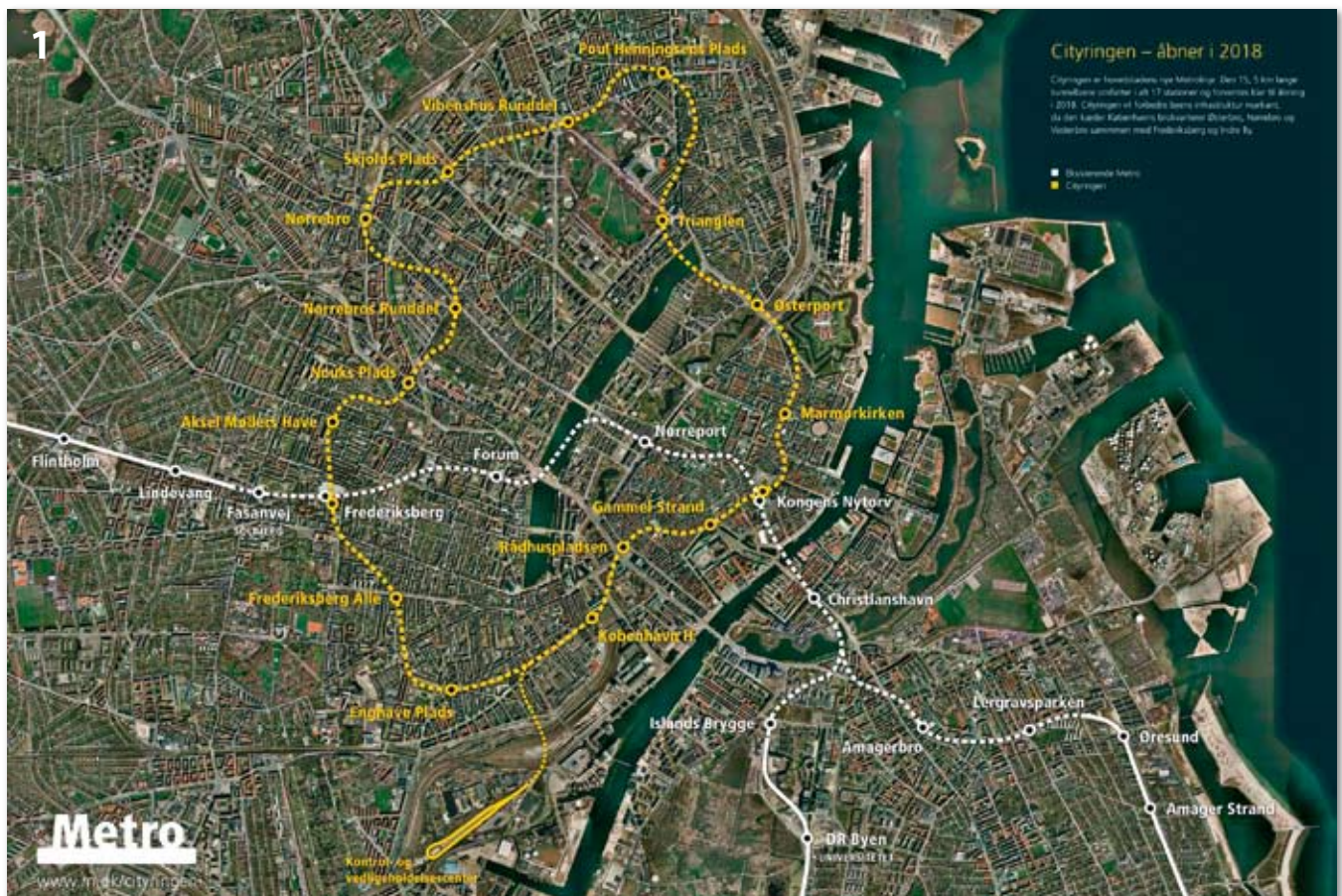
Copenhagen Limestone forms the predominant ground layer through which tunnels are to be driven. This layer is to be found at a depth of approx. 10 to 15 m beneath the surface. It is divided into a 2 to 5 m thick layer of highly weathered Upper Copenhagen Limestone with Middle Copenhagen Limestone – affected by tunnelling – underneath followed by Lower Copenhagen Limestone. This limestone formation forms a groundwater horizon in conjunction with roughly 2 m thick superordinated quaternary gravel sands of glacial origin. This aquifer is critical to the water control operations at the construction shafts for the Metro stations and the starting shafts for the TBMs and the special structures. The hydraulic capability of the limestone greatly depends on the separation plane and fissure formation as well as its orientation. The average horizontal permeability is 3 to 10 times greater than the vertical one. The lower aquifer is separated by a quaternary overconsolidated marl layer from the aquifer close to the surface, which

Project Presentation

The Cityringen comprises a 15.5 km long twin-bore tunnel system as well as 17 Underground stations and a surface maintenance depot. As from 2018, the driverless Metro trains will transport up to 240,000 passengers 24/7. The total project budget for the client, Metroselskabet I/S amounts to 2.87 billion euros.

Hölscher Wasserbau GmbH was commissioned to execute the groundwater management by the general contractor CMT I/S.

The tunnel consists of 2 bores each 5.78 m in diameter and is being produced by 4 EPB TBMs driving simultaneously. The bores run through Copenhagen Limestone down to a depth of 25 m below the surface. In addition to the TBM drives, a total of 21 shafts averaging 65 x 20 m with depths of up to 30 m are to be created. These are required for the 17 stations as well as TBM starting shafts and other special structures (Fig. 1).



Layout Metro Cityringen (Foto: Metroselskabet I/S)

Layout of Metro Cityringen (Photo: Metroselskabet I/S)

der der TBM und den Sonderbauwerken entscheidend. Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Kalksteins ist stark von der örtlichen Trennflächen- und Kluftausbildung sowie deren Orientierung abhängig. Die mittlere horizontale Permeabilität ist im Vergleich zur vertikalen um den Faktor 3 bis 10 größer. Hydraulisch mäßig getrennt wird der untere Aquifer durch eine quartäre überkonsolidierte Mergelschicht vom oberflächennahen Aquifer, der aus jüngeren quartären geringmächtigen Kiessandlagen, Mergelschichten und Auffüllungen besteht.

Das System

Die Konstruktion der Tunnelschächte besteht aus Schlitzwänden und überschnittenen

Bohrpfählen mit einer Tiefe von bis zu 46 m, die damit weit in den Kopenhagener Kalkstein einbinden. Zum Abteufen der Schächte und insbesondere zur Entspannung der Schachtsohle ist eine innen liegende Grundwasserabsenkung erforderlich. Da keine Wasser stauende Schicht ansteht, hätte dies natürlicherweise zur Folge, dass sich der Grundwasserspiegel auch außerhalb der Schächte absenkt. Eine Absenkung des normalen Grundwasserstandes ist im Kopenhagener Stadtzentrum jedoch nicht zugelassen, da es auf alten Holzpfehlen gegründet ist welche auf keinen Fall trocken gelegt werden dürfen (Bild 2).

Durch Re-Infiltration von aufbereitetem Grundwasser in den Aquifer soll gewährleistet

comprises younger quaternary thin gravel sands, marl layers and fills.

The System

The tunnel shafts are designed as diaphragm walls with overcut drilled piles down to a depth of 46 m providing substantial penetration into the Copenhagen Limestone. Internal groundwater lowering is needed to allow shaft sinking and particularly to relieve the shaft floor. As there is no impermeable layer this would of course mean that the groundwater level would also drop outside the shaft. However it is not permitted to lower the normal groundwater level in the centre of Copenhagen as it is set up on old wooden piles, which must on no account be allowed to dry out (Fig. 2).

It is intended to reinfiltrate treated groundwater into the aquifer to ensure that the groundwater level does not change outside the shafts. The existing groundwater is observed at a number of defined measuring points and the required amount of water infiltrated by means of infiltration wells. For this purpose the Hölscher Wasserbau GmbH developed an innovative concept, which possesses both technical and economic advantages. The system contains water treatment plants, which enable the groundwater to be reinfiltrated once treated so that expensive drinking water is saved. In addition, the system can control the groundwater level in the city by fully automatic, computer-regulated means thus enhancing safety.

werden, dass sich der Grundwasserstand außerhalb der Schächte nicht ändert. An mehreren definierten Messpegeln wird der vorhandene Grundwasserstand beobachtet und mittels Infiltrationsbrunnen die erforderliche Menge an Wasser infiltriert. Hierzu entwickelte die Hölscher Wasserbau GmbH ein innovatives Konzept, welches sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile hat. Das konzipierte System enthält Wasseraufbereitungsanlagen, die es ermöglichen das geförderte Grundwasser nach der Behandlung wieder zu infiltrieren und somit teures Trinkwasser einzusparen. Des Weiteren kann das System den Grundwasserstand in der Stadt vollautomatisch und computergesteuert regeln und somit die Sicherheit erhöhen.

Insgesamt besteht das Grundwassermanagementsystem für den Cityring aus ca. 600 Entnahme- und Re-Infiltrationsbrunnen sowie ca. 600 mit GPRS-Datenlogger ausgestatteten Grundwassermesspegel, 21 Wasseraufbereitungsanlagen, ca. 25 km Rohrleitung und einem vollautomatischen SCADA-System.

Aufbau der Grundwassermanagement-Anlage Brunnen und Brunnenherstellung

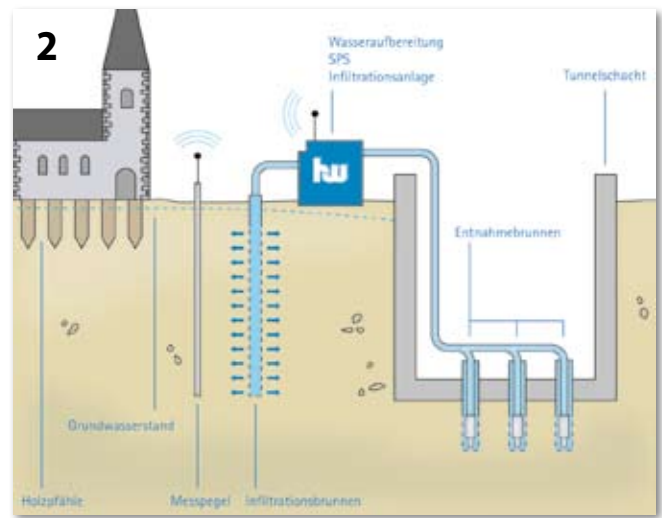
Grundvoraussetzung zur erfolgreichen Installation der Anlagen des Grundwassermanagements ist die Herstellung von funktionsfähigen Brunnen. Die Arbeiten umfassen die Herstellung von Förder-, Re-Infiltrations- und Monitoringbrunnen. Für die einzelnen Stationen und weitere Schachtbauwerke werden separate Brunnengalerien aus den genannten Brunnen-

arten abgeteuft. Die Brunnen-tiefen liegen je nach Erfordernis zwischen 15 und 45 m unter Gelände.

Gebohrt wird durchgängig mit der DTH-Methode (Hammerbohrungen mit Doppelkopfverfahren). In einem Arbeitsschritt werden Bohrgestänge und Verrohrung zusammen abgeteuft. Über den Ringraum zwischen Gestänge und gleichzeitig abgeteufte Verrohrung wird mittels Druckluft das Bohrgut gefördert. So lässt sich in dieser bohrtechnisch schwierigen Geologie mit vielen natürlichen Hindernissen im Quartär sowie der Formation des Kalkseins ein wirtschaftlicher Bohrprozess unterhalten.

An den Bohrprozess sind in Kopenhagen erhöhte Anforderungen gestellt. Um das innerstädtische Leben auch während der Bauzeit in der gewohnten Qualität zu gewährleisten, ist ein besonderes Augenmerk auf die Verkehrssicherung sowie die Emission von Schall und Abgasen zu legen. Um die Abgasbelastung zu verringern wurden alle Bohrgeräte mit Rußpartikelfiltern ausgestattet.

Die Pumpbrunnen lokalisieren sich jeweils innerhalb der Schachtbauwerke, um dort den Grundwasserspiegel des von unten unter freiem Zufluss stehenden Aquifers abzusenken. Förderbrunnen werden über die gesamte Brunnenlänge verfiltert um aus beiden Aquiferen in allen Bauphasen Wasser fassen und so die Absenkung kontinuierlich sicherstellen zu können. Es kommen PVC-Filter mit 165 mm Durchmesser zur Anwendung. Schlitzweiten der Filter und die Fraktionen von Filterkörnungen werden der jeweiligen geologischen Situation angepasst.



Prinzipische Skizze Grundwassermanagement

General diagram of groundwater management system

Altogether the groundwater management system for the City Ring consists of approx. 600 extraction and re-infiltration together with as around 600 groundwater measuring sensors with GPRS data loggers, 21 water treatment plants, approx. 25 km of pipeline and a fully automatic SCADA system.

Set-up of the Groundwater Management System

Wells and Well Drilling

Drilling wells capable of functioning represents the basic essential for successfully installing the system. Activities involve creating extraction, re-infiltration and monitoring wells. Separate well galleries are drilled from the various types of well mentioned for the individual stations and the further shaft structures. The well depths vary from 15 to 45 m depending on requirements.

The DTH (down-the-hole) method is applied throughout. The drill string and casing are sunk together in a single operation. The drilled material is removed by means of compressed air via the annular gap between the string and the casing. In this way

an economic drilling process can be pursued in this technically difficult geology which includes many natural obstacles in the quaternary and the limestone formation.

Enhanced demands are placed on the drilling process in Copenhagen. Special attention must be paid to safeguarding traffic as well as noise and fume emission in order to ensure that the quality of life in the downtown area remains unaffected. All drilling appliances were equipped with soot particulate filters to reduce the impact of fumes.

The pump wells are in each case located within the shaft structures in order to lower the groundwater level there from the aquifer, which is freely accessible underneath. Extraction wells are filtered along the entire well length so that water is collected from both aquifers during all construction phases in order to ensure that lowering is carried out continuously. PVC filters with a diameter of 165 mm are used. The filter slot widths and the filter grain fractions are adapted to the given geological situation.

Nach Fassung und Aufbereitung des Förderwassers wird es in die außerhalb der Baugrube im Umkreis von bis zu 500 m gelegenen Re-Infiltrationsbrunnen wieder dem Untergrund zurückgegeben. Die Re-Infiltration erfolgt über Brunnen, deren Re-Infiltrationsstrecken im Kluftwasserleiter stecken. So soll der Grundwasserhorizont, dem primär das Wasser entzogen wird, wieder an sein natürliches Niveau angepasst werden. Eine dauerhafte, zeitverzögerte Beeinflussung des oberen Aquifers über die Mergelschicht, welche sich suboptimal auf die umliegend gegründete Bebauung auswirken würde, wird so verhindert. Der Ausbau erfolgt mit Voll- und Filterrohren mit 165 mm Durchmesser.

Zur Sicherstellung und Kontrolle der Absenk- und Re-Infiltrationsziele werden im weitläufigeren Umkreis Monitoringbrunnen mit Peilfiltern in beiden Aquiferen hergestellt. Hierzu werden jeweils HDPE-Rohre mit 63 mm Durchmesser mit 2 m Filterstrecke eingebaut. Bild 3 zeigt einen Auszug aus der dokumentierten Erfassung der Bohrarbeiten inklusive des Schichtenaufbaus und des Ausbaus an einem Monitoringbrunnen.

Zur Kontrolle der Leistungsfähigkeit der Brunnen, die stark von der globalen und lokalen Kluftausbildung und -orientierung des Kalksteins abhängt, werden an den Pump- und Re-Infiltrationsbrunnen Drei-Stufen-Tests und an den Monitoringbrunnen Kapazitätstests durchgeführt. Die Drei-Stufen-Tests gliedern sich in 3 direkt ineinander übergehende Pumpstufen ansteigender Pumpleistung von je 1 Stunde

dreistündiger Beobachtung des Wiederanstieges. Kapazitätstests bei den Monitoringbrunnen werden mit stündlicher einstufiger Pumpleistung und Beobachtung des Wiederanstieges über 1 Stunde gefahren. Die Wasserstände während der Bepumpung und des Wiederanstieges werden elektronisch über Logger erfasst und durch Handmessungen referenziert (Bild 4).

SCADA-Steuerungsanlage

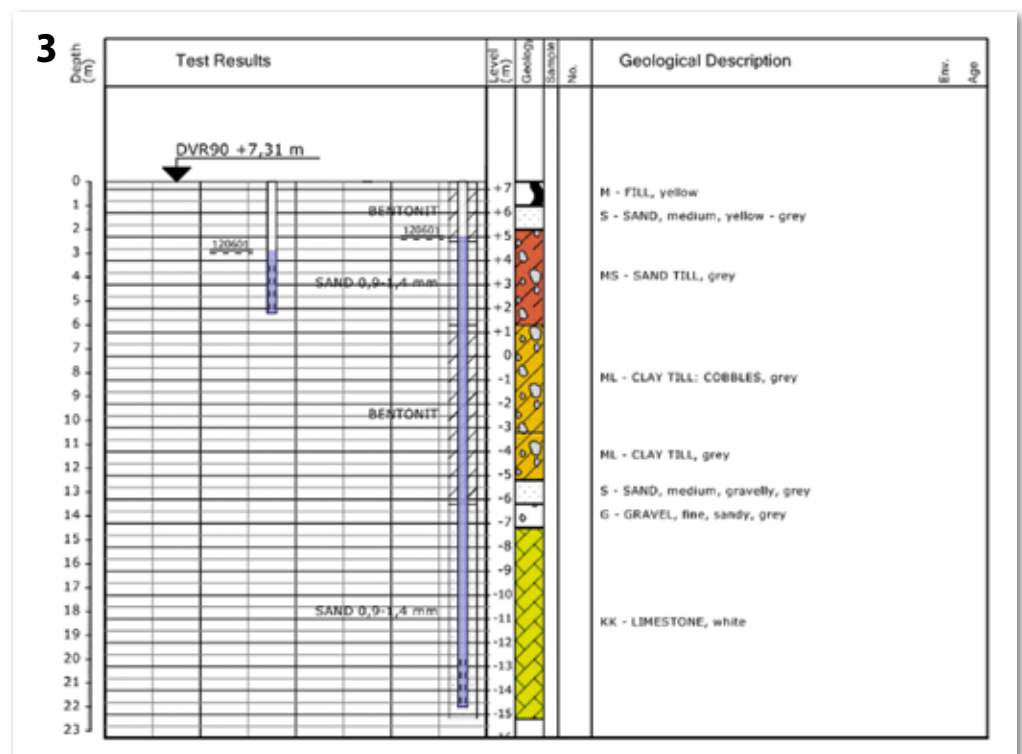
Die Grundwassermanagement-Anlage wird zentral über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SCADA) gesteuert und überwacht. Dazu wird jede der 21 lokalen Baustellen von einer Siemens-SPS gesteuert. Über die SPS werden die frequenzgesteuerten Brunnenpumpen, die Wasseraufbereitung und die Re-Infiltration geregelt und überwacht.

After the extracted water is collected and treated, it is returned to the ground via the reinfiltration wells, which are located outside the construction pit at distances of up to 500 m. Reinfiltration takes place via wells, whose reinfiltration sections are to be found in the fissure water aquifer. In this way, the groundwater horizon, from which the water is primarily extracted, is to be returned to its natural level. As a result, a permanent, time-delayed influence on the upper aquifer via the marl layer, which would exert a suboptimal effect on the surrounding structural foundations, is prevented. Supporting is undertaken by means of 165 mm diameter full and filter pipes.

Monitoring wells with piezometers are installed in the vicinity of both aquifers to secure and control the lowering and reinfiltration targets. For this purpose, 63 mm diameter HDPE pipes

with a 2 m filter section are installed. Fig. 3 displays an excerpt from the documented compilation of the drilling operations including the layer structure and the lining for a monitoring well.

Three-step tests are carried out on the pump and reinfiltration wells and capacity tests on the monitoring wells to check the efficacy of the wells, which greatly depend on the global and local fissure formation and orientation of the limestone. The three-step tests comprise 3 directly integrated pump stages involving an increasing pump rate each lasting 1 hour followed by a 3-hour long rise observation phase. Capacity tests for the monitoring wells are executed with an hourly single-stage pump rate and observation of rising over 1 hour. Water levels during pumping and rising are compiled electronically via loggers and referred to by manual measurements (Fig. 4).



Geologie mit Brunnenskizze

Geology with well diagram

Die 21 SPS-Anlagen sind über UMTS an einen Mainserver angeschlossen. Zwischen den Anlagen und dem Mainserver besteht ein ständiger Datenverkehr, über welchen die Anlagen gesteuert werden und auch Daten zur Dokumentation übertragen werden. Beispielsweise können gewünschte Grundwasser-Absenkeziele über den Mainserver eingegeben werden, welche dann in "real time" über die SPS auf die frequenz-gesteuerten Brunnenpumpen übertragen werden.

Die 21 Stationen werden visualisiert, wodurch die wichtigsten Betriebszustände der Anlage zu erkennen sind. Das SCADA-System generiert variabel gestaltbare Berichte der Betriebsdaten und stellt sicher, dass bei Fehlfunktionen oder Grenzwertverletzungen entsprechende Nachrichten via Onlinesystem oder SMS abgesetzt werden. Gegenwärtige Betriebsparameter können auf iPads des Wartungspersonals abgerufen werden. Ebenfalls lässt sich die Gesamtanlage

SCADA Control System

The groundwater management system is controlled and monitored centrally by means of a supervisory control and data acquisition system (SCADA). For this purpose, each of the 21 local sites is controlled by a Siemens SPS. The frequency-controlled well pumps, the water treatment and reinfiltration processes are controlled and monitored via SPS.

The 21 SPS stations are connected to a main server via UMTS. Continuous data transmission is maintained between the stations

and the main server, by means of which the stations are controlled, with data being transmitted also for documentation purposes. For example, desired groundwater lowering targets can be introduced via the main server, which are then transmitted via SPS to the frequency-controlled well pumps.

The 21 stations are visualised, as a result of which the most essential operating modes for the system are identifiable. The SCADA system generates variably reproducible reports of operational data and ensures that cor-



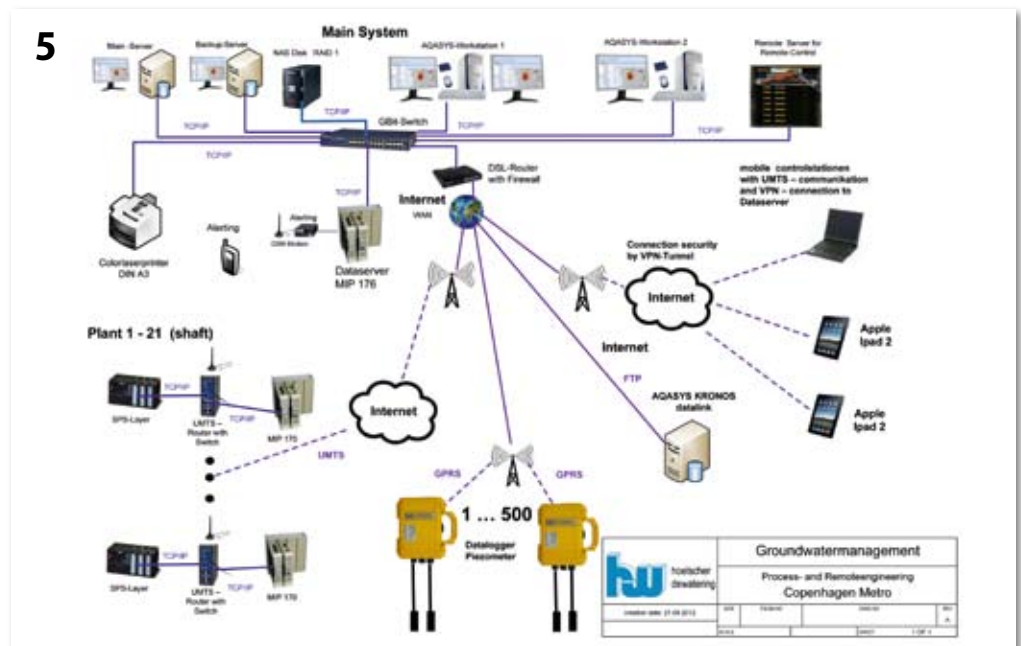
Brunnenbohrarbeiten im öffentlichen Straßengebiet an der Metrostation "Nuuka Plada"

Well drilling activities in a public area at the "Nuuka Plada" Metro station

mit den iPads auch steuern. So ist es dem Wartungspersonal möglich, rund um die Uhr von jedem beliebigen Ort aus die ständige Kontrolle über die Anlage zu haben. Des Weiteren können regelmäßig geplante Wartungsvorgänge wie z.B. das Rückspülen der Wasseraufbereitungsanlagen mit einem einfachen „Klick“ durchgeführt werden (Bild 5).

Kontrollpegel

Verteilt um die jeweiligen Schachtbauwerke sind ca. 600



Prinzipskizze SCADA-System

General diagram of SCADA system

Grundwassermesspegel herzustellen. Die Pegel werden mit einem Bohrdurchmesser von 8" hergestellt und als Doppel- bzw. Dreifachpegel ausgebaut. Die Logger in den Grundwassermesspegeln zeichnen kontinuierlich den Grundwasserstand auf und übertragen die Daten zur Dokumentation sowie zur Steuerung des Grundwassermanagementsystems an das SCADA-System. Die in Schachtnähe befindlichen Pegel werden per erdverlegter Datenleitung auf die jeweilige SPS geschaltet. Die Pegel, die sich in größerer Entfernung zu den Steuerungsanlagen befinden, sind mit batteriebetriebenen GPRS-Datenloggern ausgestattet. Die GPRS-Datenlogger übertragen die aufgezeichneten Daten über das Mobilfunknetz direkt zum SCADA-System der Grundwassermanagement-Anlage.

Monitoring

Die Überwachung der Betriebsparameter erfolgt automatisch über das SCADA-System. Im Vor-

responding messages are provided via an online system or SMS in the event of malfunctions or if limit values are not observed. Current operating parameters can be called up by service staff on iPads. The overall system can also be controlled with iPads. In this way it is possible for the service staff to control the system permanently 24/7 from any location. Furthermore maintenance procedures planned on a regular basis such as e.g. back-flushing the water treatment plants can be undertaken with a simple "click" (Fig. 5).

Monitoring Wells

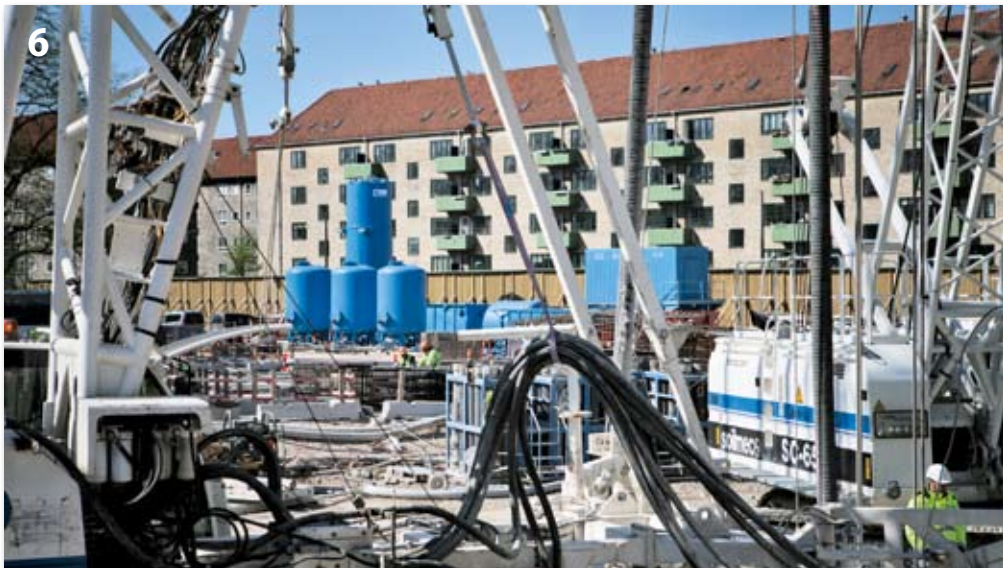
Roughly 600 groundwater monitoring wells distributed around the individual shaft structures have to be installed. These 8" diameter wells take the form of a double or triple piezometer. The loggers in the monitoring wells continuously display the groundwater level and transmit the data to the SCADA system for documentation as well as for controlling the groundwater

management system. The wells located close to the shaft are connected with the appropriate SPS via a data line laid in the ground.

The wells, which are located further away from the control facilities, are equipped with battery-operated GPRS data loggers. These GPRS data loggers transmit the recorded data via the mobile communications network directly to the SCADA system of the groundwater management facility.

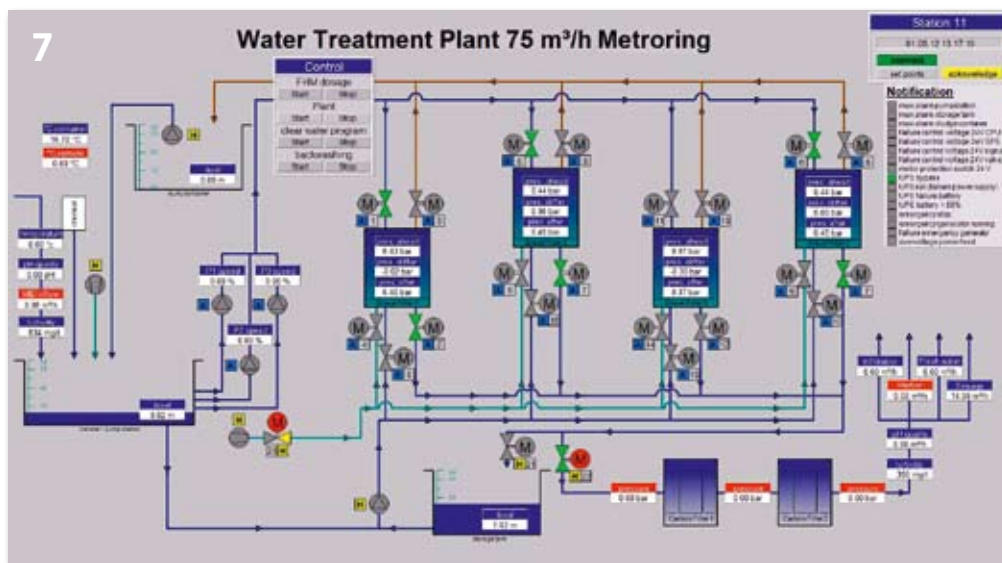
Monitoring

The SCADA system automatically facilitates monitoring of the operating parameters. Predetermined alarm signals are directly displayed on the system's user interface and transmitted to as many mobile phones as desired in SMS form. In order to ensure that the transmitted data corresponds with the effective groundwater levels, these are checked against manual measurements carried out at regular intervals. The data thus



Wasseraufbereitungsanlage am TBM-Startschacht "Norreproparken"

Water treatment plant at the "Norreproparken" TBM starting shaft



Steuerungsanlage für die Wasseraufbereitungsanlage "Norreproparken"

Control system for the "Norreproparken" water treatment plant

feld definierte Alarmmeldungen werden bei auftretenden Grenzwertverletzungen direkt auf der Benutzeroberfläche des Systems angezeigt und als SMS auf eine beliebige Anzahl von Mobiltelefonen übertragen. Um zu gewährleisten, dass die übertragenen Daten den tatsächlichen Grundwasserständen entsprechen, werden diese mit regelmäßig durchgeführten manuellen Messungen überprüft. Die anfallenden

Daten können in das System eingegeben und zusammen mit den von den Sensoren automatisch übertragenen Daten als Diagramm angezeigt werden um einen bequemen Abgleich zu ermöglichen. Auch die Fördermengen der Pumpbrunnen werden mit regelmäßig manuell abgelesenen Zählerständen abgeglichen.

Trübesonden zeichnen die Suspensionsfracht im geförderten Wasser auf. Liegen Grenz-

obtained can be entered into the system and displayed as a diagram together with the data automatically transmitted by the sensors thus enabling a suitable comparison. The amount of water extracted by the pump wells is compared with regular manually read ratings.

Turbidity sensors indicate the amount of suspension carried by the extracted water. Should limits be exceeded, a signal is automatically initiated, which

controls the valve for the reinfiltration line or the drainage system to open or close them. The turbidity sensor is calibrated when the system is commissioned. Water samples are taken at regular intervals and checked to establish their chemical components to ensure the water quality within the system and prevent any premature aging through deposits forming.

Water Treatment Plant

The pumped groundwater from the shafts is treated to provide a quality better than drinking water prior to being reinfiltrated. Towards this end, the authorities set the highest standards to make absolutely sure that the communal wells that provide drinking water, which are located in the Metro catchment area, remain unaffected by the reinfiltration process. As a result, in some cases even flocculants, which are permitted for drinking water, are not allowed to be used. Only special compositions developed jointly with the authorities are permitted for use.

The groundwater is pumped to the water treatment plant from the extraction wells in the interior of the shafts. In addition pump sumps to remove the prevailing groundwater are installed in individual shafts, in which special structures have been created by the cavern construction method. This water is first subjected to a pre-sedimentation phase on account of the relatively high sediment content. The water is cleaned to reach a sediment content of < 0.02 mg/l via plate clarifiers and gravel filters. This treated water is then combined with groundwater pumped from extraction wells and passes through to the water treatment plant.

verletzungen vor, so wird automatisch ein Signal erzeugt, das Ventile zur Re-Infiltrationsleitung oder der Kanalisation ansteuert, um diese zu öffnen oder zu schließen. Das Einmessen der Trübesonde erfolgt bei Inbetriebnahme der Anlage. Für die Gewährleistung der Wasserqualität innerhalb der Anlage und um deren frühzeitiger Alterung in Form von Anlage-rungen vorzubeugen, werden in regelmäßigen Abständen Wasserproben entnommen und auf ihre chemischen Bestandteile untersucht.

Wasseraufbereitungs-anlage

Das gepumpte Grundwasser aus den Schächten wird, um es

wieder infiltrieren zu können, auf eine Qualität besser als Trinkwasserqualität aufbereitet. Die Behörden stellen dazu höchste Anforderungen um absolut auszuschließen, dass die kommunalen Trinkwassergewinnungsbrunnen, welche sich im weiten Einzugsbereich der Metro befinden, von der Re-Infiltration in irgendeiner Weise beeinflusst werden. So werden teilweise selbst Trinkwasser zugelassene Flockungshilfsmittel nicht zur Anwendung freigegeben. Nur gemeinsam mit den Behörden entwickelte spezielle Rezepturen dürfen verwendet werden.

Das Grundwasser wird aus den im Innern der Schächte angeordneten Entnahmebrun-

nen in addition to a chemical treatment step, the treatment plant mainly consists of an oxidation plant, in which bivalent iron is oxidised to form the trivalent variety, and subsequently removed from the groundwater by means of gravel filters. The treated water is then pumped to the reinfiltration plant.

The ground conditions at the "Sonder Boulevard" tunnel shaft present a special challenge. The groundwater there is polluted with benzene and cyanides. In this case the standard treatment plant is extended to include activated carbon filters, strippers, ion exchangers as well as centrifugal technique. The water from the groundwater management system passes through this

plant along with the process water from the installation at the diaphragm walls as well as the process water, which ensures during well drilling. In addition to the existing complexity of the treatment plant as such, logistical challenges for managing this process water have to be tackled (Figs. 6 + 7).

Infiltration Plant

The necessary water pipelines and control cables are laid underground, mainly in roads, between the infiltration wells and the control/treatment facilities. The prevailing geology indicates relatively different capacities for the individual infiltration wells. In this connection it should be mentioned that the horizon-



Wir können es besser. Und wirtschaftlicher.



Rowa vereint hohe Kompetenz im Anlagenbau und langjährige Erfahrung im Untertagebau. Intelligente Gesamtlösungen vom Vortrieb bis zur Deponie sind unser Markenzeichen: Sie garantieren eine überdurchschnittliche Betriebssicherheit und eine hohe Wirtschaftlichkeit.

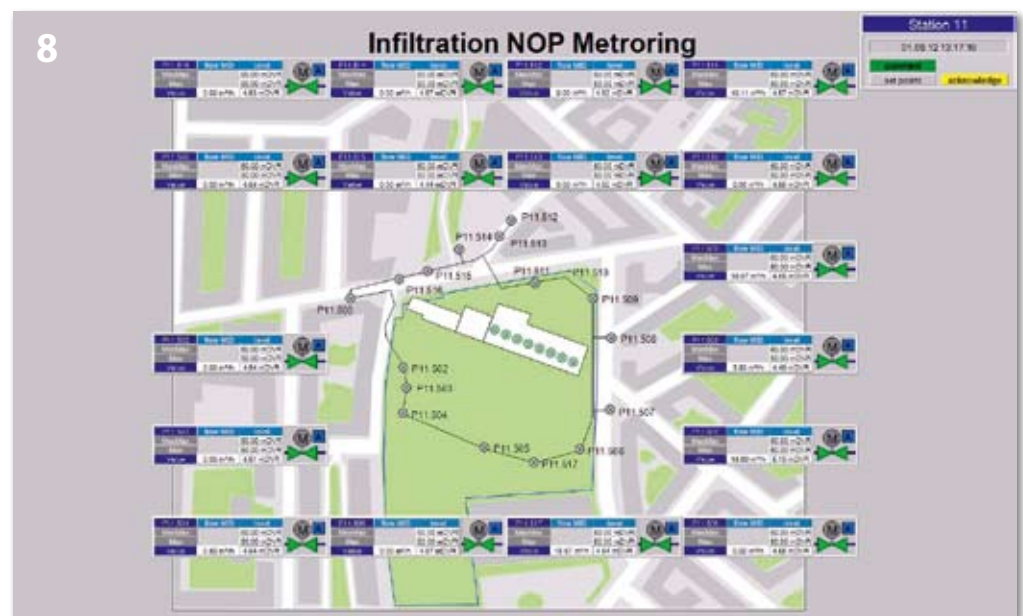
Wir können es besser – weltweit. Das Vertrauen unserer Kunden beweist es.

Rowa Tunnelling Logistics AG, Leuholz 15, CH-8855 Wangen SZ
Telefon +41 (0)55 450 20 30, Fax +41 (0)55 450 20 35
rowa@rowa-ag.ch, www.rowa-ag.ch

nen zur Wasseraufbereitungsanlage gepumpt. Zusätzlich sind in einzelnen Schächten, in welchen Sonderbauwerke in Kavernenbauweise hergestellt werden, Pumpensümpfe zur Ableitung des anfallenden Grundwassers installiert. Wegen des dann relativ hohen Sedimentgehalts wird dieses Wasser zuerst über eine Voredimentation geführt. Über Lamellenschräglklärer und Kiesfilter wird das Wasser bis auf einen Sedimentgehalt $< 0,02 \text{ mg/l}$ abgereinigt. Das nun voredimentierte Kavernenwasser sowie das Grundwasser, welches direkt aus den Förderbrunnen gepumpt wird, durchläuft die eigentliche Wasseraufbereitungsanlage.

Die Aufbereitungsanlage besteht neben einer chemischen Aufbereitungsstufe primär aus einer Oxidationsanlage, in der zweiwertiges Eisen zu dreiwertigem Eisen oxidiert wird, und anschließend mittels Kiesfiltern aus dem Grundwasser entfernt wird. Das gereinigte Wasser wird dann zur Re-Infiltrationsanlage gepumpt.

Eine besondere Herausforderung stellt die Baugrundsituation am Tunnelschacht "Sonder Boulevard" dar. Das Grundwasser ist dort mit Benzol und Cyaniden belastet. Hier wird die Standard-Aufbereitungsanlage mit Aktivkohlefiltern, Stripanlagen, Ionentauscher-Anlagen sowie Zentrifugentechnik erweitert. Nicht nur das Wasser aus dem Grundwassermanagement-System durchläuft diese Anlage, sondern auch Prozesswässer aus der Herstellung der Schlitzwände sowie die Prozesswässer, die bei der Herstellung der Brunnenbohrungen anfallen. Neben der per se schon vorhandenen Komple-



Steuerungsanlage für die Re-Infiltration am TBM-Startschacht "Norreproparken"

Control system for re-infiltration at the "Norreproparken" TBM starting shaft

xität der Aufbereitungsanlage sind zudem noch logistische Herausforderungen für das Management dieser Prozesswässer zu meistern (Bild 6, 7).

Infiltrationsanlage

Zwischen den Infiltrationsbrunnen und den Steuerungs-/Aufbereitungsanlagen werden unterirdisch, vorwiegend in Straßen, die erforderlichen Wasserleitungen und Steuerungskabel verlegt. Die anstehende Geologie impliziert relativ unterschiedliche Leistungsfähigkeiten der einzelnen Infiltrationsbrunnen. Hierzu ist noch anzumerken, dass die horizontale Durchlässigkeit des Kopenhagener Kalksteins etwa 3 bis 10 mal größer ist als die vertikale Durchlässigkeit.

Zur Ermittlung der optimalen Betriebszustände wurde das Schluckvermögen eines jeden Infiltrationsbrunnens im Rahmen eines Testlaufes bestimmt. Die Testergebnisse wurden als Grundlage für die Programmierung der Grundwassermanagement-Anlage herangezogen.

tal permeability of Copenhagen Limestone is roughly 3 to 10 times greater than the vertical permeability.

The capacity of each infiltration well was determined by a test run to establish the optimal operating conditions. The test results were taken as the basis for programming the groundwater management system. The water treatment plant and the infiltration plant in conjunction with the control system form a complex, interactive system. The infiltration plant constitutes the core of the system. It consists of valves and automatic flaps, which are controlled via the SPS. The automatic flaps are initiated in keeping with the current groundwater conditions recorded by the piezometers thus regulating the rate of inflow to the infiltration well. The maximum rate of inflow to a well is established in advance in keeping with the determined capacity. The resultant tolerances for the current groundwater level amount to a few centimetres. Such results are practically impossible to at-

tain with conventional, manually operated infiltration wells.

A total of around 20 million m^3 of groundwater is being prepared via the water treatment plants and re-infiltrated into the Copenhagen subsoil.

Reporting System

The SCADA system enables the recorded data to be displayed in lucid fashion in the form of individually presented reports. In this connection, the selection of parameters can be summarised as hourly or daily averages and exported as a daily, weekly or monthly report. Additional data in diagram form can be displayed alongside water balances and further tabular listings.

Summary and Outlook

The fully automatically controlled groundwater management system, as is applied for building the Metro Cityringen project, affords the ultimate degree of safety in conjunction with an inner-urban tunnelling scheme. Furthermore the authorities and client's representatives can place great faith

Die Wasseraufbereitungsanlage und die Infiltrationsanlage zusammen mit der Steuerungsanlage bilden ein komplexes, zusammenhängendes System. Den Kern der Anlage bildet das Infiltrationssystem. Es besteht aus Schiebern und automatischen Klappen, die über die SPS gesteuert werden. Entsprechend den von den Messpegeln aufgezeichneten aktuellen Grundwasserständen werden die automatischen Klappen angesteuert und somit der Zufluss zum Infiltrationsbrunnen geregelt. Der maximale Zufluss zu einem Brunnen wird vorab entsprechend dem ermittelten Schluckvermögen eingestellt. Die dabei erreichten Toleranzen des aktuellen Grundwasserstandes liegen im Zentimeterbereich. Solche Werte sind mit herkömmlichen, manuell betriebenen Infiltrationsbrunnen praktisch unmöglich.

Insgesamt ca. 20 Mio. m³ Grundwasser werden über die Wasseraufbereitungsanlagen aufbereitet und wieder in den Kopenhagener Untergrund infiltriert (Bild 8).

Berichtswesen

Das SCADA-System bietet die Möglichkeit, die aufgenommenen Daten in Form von individuell zusammengestellten Berichten übersichtlich darzustellen. Hierbei kann die Auswahl an darzustellenden Parametern als Stunden- oder Tagesmittelwerte zusammengefasst und als Tages-, Wochen- oder Monatsbericht exportiert werden. Neben Wasserbilanzen und weiteren tabellarischen Auflistungen können zusätzlich Daten in Form von Diagrammen angezeigt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das vollautomatisch gesteuerte Grundwassermanagementsystem, wie es beim Bau der Metro Cityringen verwendet wird, bietet ein Höchstmaß an Sicherheit im Umfeld innerstädtischer Tunnelbaumaßnahmen. Darüber hinaus wird zu Behörden und Bauherrenvertretern großes Vertrauen geschaffen durch die Möglichkeit, ständig über einen direkten Onlinezugang zum Grundwassermanagementsystem einen Überblick der Grundwassersituation zu haben.

Neben dem Sicherheitsaspekt bietet dieses Grundwassermanagementsystem nachhaltige Vorteile in der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Allein schon die Tatsache, dass durch die Aufbereitung und somit Weiterverwendung von Grundwasser hohe Trinkwasser- und Einleitgebühren eingespart werden können, können monetär direkt bewertet werden. Hinzu kommt die Möglichkeit entsprechend dem aktuellen Schluckvermögen der Infiltrationsbrunnen die Anlage fortlaufend flexibel zu regeln.

Ganz zuletzt sei noch die international steigende Bedeutung von Umweltverträglichkeitsprüfungen erwähnt, deren Rahmenbedingungen innovative Lösungen zum Schutz der Grundwasserressourcen im Zuge von Bauprojekten erfordern. 

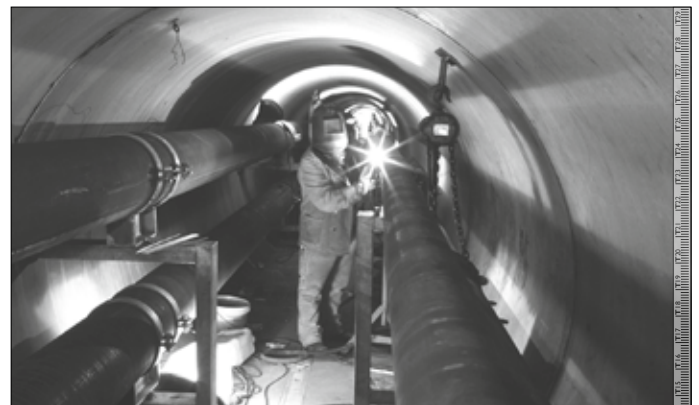
in the measure implemented as they are able at all times to obtain an insight into the groundwater situation thanks to direct online access to the groundwater management system.

Apart from the safety aspect, this groundwater management system affords sustainable advantages regarding economy and environmental compatibility. Alone owing to the fact that through the treatment and reutilisation of groundwater, high drinking water and disposal charges can be avoided and the savings can be directly assessed monetarily. Furthermore, it is possible to constantly regulate the facility in a flexible manner in accordance with the current capacity of the infiltration wells.

In conclusion the ever increasing significance of environmental compatibility tests at international level should be mentioned, whose general conditions require innovative solutions to protect groundwater resources in conjunction with construction projects. 

Literatur / References

T&T „Expansion of the Copenhagen Metro“, Februar 2012



Innovativer – Kompetenter – Zuverlässiger

Gemeinsam stärker
im Tunnelbau

Schläuche · Armaturen · Zubehör für:
hoses · fittings · equipment for:

	Pressluft	compressed air
	Wasser	water
	Beton	concrete



Salweidenbecke 21
44894 Bochum, Germany
Tel. +49 (0)2 34/5 88 73-73
Fax +49 (0)2 34/5 88 73-10
info@techno-bochum.de
www.techno-bochum.de

 **TechnoBochum**