

ALL AROUND #3 by HERRENKNECHT

TUNNEL BAU EXTREM

MAXIMALE SICHERHEIT BEI
MAXIMALEM DRUCK

HERRENKNECHT



Tunnelling Systems



NEUESTE VORTRIEBSTECHNIK FÜR BAHNBRECHENDE MISSIONEN

Technischer Fortschritt bringt den Tunnelbau voran. In Partnerschaft mit Bauherren, Planern und Bauunternehmen entwickelt Herrenknecht Vortriebstechnik, um selbst in neuem, äußerst komplexem Terrain sicher und verlässlich qualitativ hochwertige und sehr langlebige Tunnelbauwerke herstellen zu können. Hier bieten wir Einblicke in exponierte Pionier-Projekte und deren Technik, die für profunden Fortschritt im Tunnelbau stehen.

◀ **Ein Meilenstein im Tunnelbau:** Seit 2013 führt ein Tunnel direkt durch den Hallandsås-Höhenzug in Schweden – bezwungen mit Vortriebstechnik von Herrenknecht.



BREAKING NEWS

Die Grenzen des Machbaren erweitern 08

Rekordmarke beim Wasserdruck 12

Herausforderung Kammereinstieg 14

Sättigungstauchen als letzte Option 18

Für alle Fälle vorbereitet 21

▲ **Tunnelbau am Limit:** Bei Pionierprojekten wie der Bosphorus-Unterquerung in Istanbul spielt die Sicherheit für Mensch und Maschine die entscheidende Rolle.



Augmented Reality: Auf einigen Seiten des Magazins finden Sie das linksstehende Symbol. Wenn Sie eine solche Seite mit der Kamera Ihres Smartphones oder Ihres Tablet-PC erfassen, holt das Gerät über die passende App zusätzliche Inhalte aus dem Internet und spiegelt sie in die Seite ein. Alles was Sie vorab tun müssen, ist, den QR-Code mithilfe der App Junaio (kostenlos erhältlich für iOS und Android) zu scannen.

**MAXIMALE SICHERHEIT BEI
MAXIMALEM DRUCK**

TUNNEL BAU EXTREM

► Autor: Georg Küffner

Ein großformatiger Straßentunnel tief unter einer Meeresenge, ein Eisenbahntunnel durch enorm komplexes Bergmassiv, ein Wasserstollen unter gewaltigen Umgebungsdrücken: Der maschinelle Tunnelbau dringt im Untergrund in neues Terrain vor. Echte Partnerschaft mit Auftraggebern und Projekteignern führt zu wegweisenden Fortschritten in der Maschinenteknik. Auch innovative Ableitungen aus dem professionellen Offshore-Tauchen bringen den Tunnelbau vorwärts.

„Das ist nicht zu schaffen!“ Dieser Satz ist immer nur so lange wahr, bis das Gegenteil bewiesen wird. Gerade für Ingenieursleistungen gilt: Grenzen sind Ansporn und nie Limit. Größer, schneller, tiefer, weiter – und dabei immer sicherer. So lautet das Motto im maschinellen Tunnelvortrieb.

DIE GRENZEN DES MACHBAREN ERWEITERN

Die echten ingenieurtechnischen Herausforderungen warten vor allem in der Tiefe. In Geologien, die unter extremen Drücken stehen und wo Grund-, Meer- oder Flusswasser, welches durch Klüfte und sonstige Anomalien eindringt, den Vortrieb beeinflusst. Wie das geotechnologisch anspruchsvolle Auffahren solcher Tunnel gelingen kann, zeigt das Beispiel eines Wasserentnahmestollens unter dem Lake Mead.

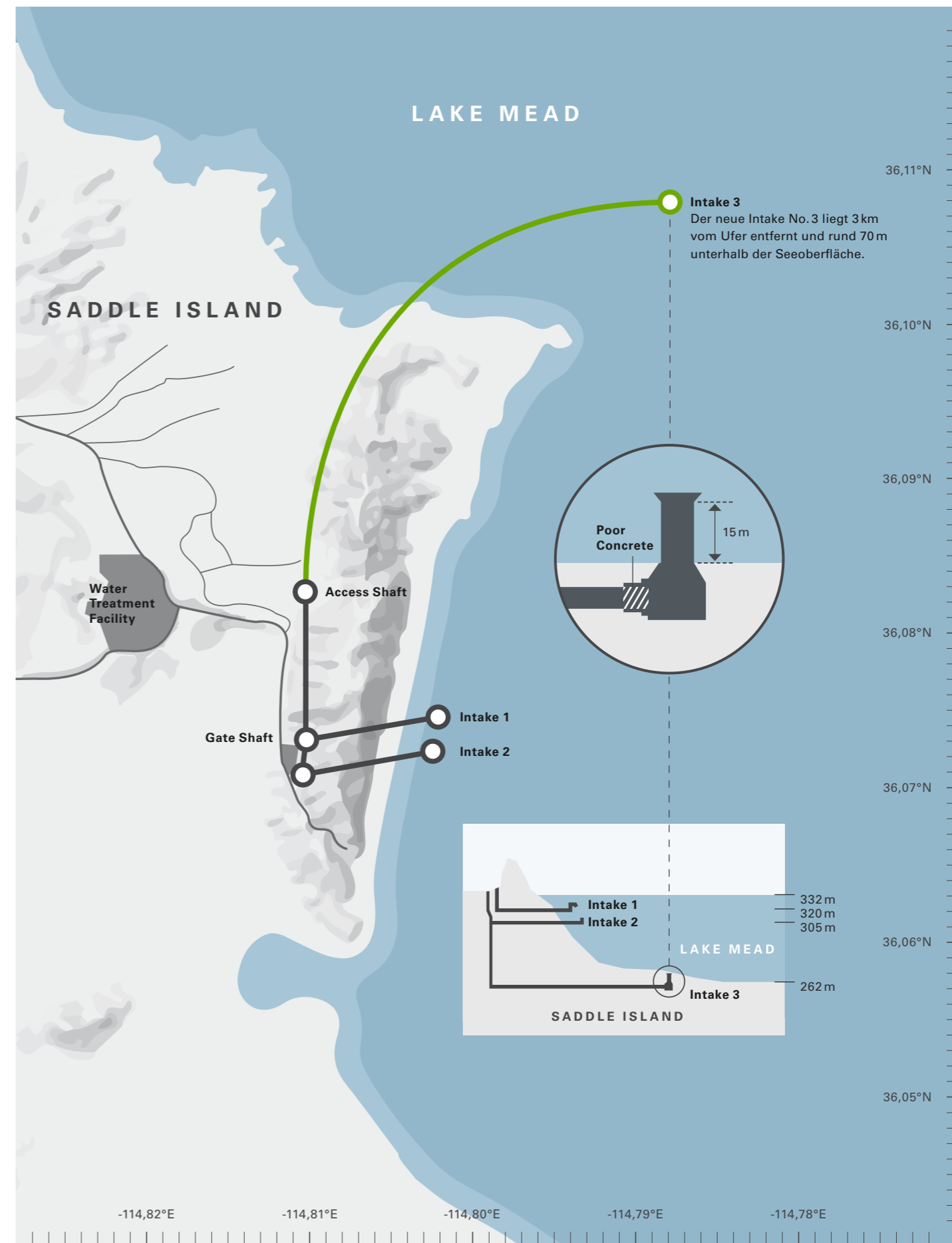
Wie ein blauer Diamant liegt der größte Stausee der Vereinigten Staaten rund 50 Kilometer südöstlich von Las Vegas, mitten in der Wüste zwischen Nevada und Arizona. Der 1935 fertig gestellte Hoover-Damm staut hier den Colorado-River auf: auf einer Länge von 170 Kilometern und mit einer Tiefe von bis zu 150 Meter. Das maximale Stauvolumen liegt bei schier unvorstellbaren 35 Milliarden Kubikmetern Wasser – damit könnten Deutschlands Privathaushalte etwa zehn Jahre lang versorgt werden.

Doch der Lake Mead ist längst nicht mehr randvoll. Seit 1998 sinkt sein Pegel stetig – in Folge einer bis heute beispiellosen Dürrephase. Mittlerweile ist sein Wasserstand historisch niedrig: lediglich 332 Meter über dem Meeresspiegel. Damit steht das Wasser nur noch wenige Meter oberhalb der beiden bereits existierenden Entnahmestellen – und gefährdet die Wasserversorgung.

DRITTER AUSLASS SOLL WASSERVERSORGUNG SICHERN

Ein neuer, dritter Auslass muss gebaut werden. Der geplante „Intake No. 3“ liegt rund 70 Meter unterhalb der Seeoberfläche und etwa 3 Kilometer vom Ufer entfernt. Das vom Seeboden 15 Meter senkrecht nach oben ragende Entnahmerohr wurde von einer schwimmenden Plattform aus in eine zuvor ausgehobene Grube abgesenkt. Anschließend wurde das Fundament mit Unterwasserbeton ausgegossen und dadurch die Konstruktion fixiert.

Der neue Intake No.3 liegt 3 km vom Ufer entfernt und rund 70 m unterhalb der Seeoberfläche. Der eigentliche „Intake No.3“ besteht aus einem 4,4 Kilometer langen, leicht ansteigenden Tunnel, den die Herrenknecht-TBM S-502 mit einem Außendurchmesser von 7,2 Meter direkt unter dem See auffuhr. Zentimetergenau traf sie von unten in die aus weicherem Magerbeton dafür eigens hergestellte Einfahrkonstruktion im Betonsockel der Entnahmestelle. Rund drei Jahre hatte sich die speziell angepasste Multi-Mode-TBM durch komplexe Geologien mit zerrüttetem Fels und mit zahlreichen Seewassereinschlüssen durchsetztem Lehm gekämpft.





▲
Lake Mead: Der Lake Mead-Stausee bei Las Vegas wird vom Colorado River gespeist und ist die wichtigste Wasserquelle der Spielmetropole. Mineralablagerungen an den Ufern dokumentieren den historisch niedrigen Wasserstand.





◀ Die abrasive Geologie in Verbindung mit den hohen Wasserdrücke führte **Stahl** und **Dichtungen** an die absolute **Belastungsgrenze**.

DIE SUCHE NACH DER PASSENDEN LÖSUNG

Die richtige Frage hatten sich alle Beteiligten schon lange vor Projektbeginn gestellt: Wie muss eine TBM konstruiert sein, damit sie derart hohen, bisher unberechenbaren Drücken dauerhaft standhalten kann? Zum einen, indem mehr Stahl verbaut und die Wände dicker gemacht werden. Schließlich lasten bei 15 Bar Wasserdruck auf jedem Quadratcentimeter des Schildes 15 Kilogramm – bei seiner Gesamtlänge von 16 Metern und einem Durchmesser von mehr als sieben Metern summiert sich das zu einer gewaltigen Last. Zum anderen durch den Einsatz von Dichtungen, etwa an Hauptlager und Schildschwanz, die entsprechend robust ausgelegt sind. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass auch unter den extremen Druckverhältnissen sowohl Routinearbeiten wie Werkzeugwechsel als auch außerplanmäßige Wartungsarbeiten durchgeführt werden können. Auf Basis der gesammelten Informationen entschied sich Salini-Impregilo, eine Multi-Mode-TBM von Herrenknecht einzusetzen. In guten, standfesten Formationen arbeitete sie im sogenannten offenen Modus. Dabei wird der von den Rollenmeißeln des Schneidrads zu handtellergroßen Chips gebrochene Fels mechanisch aus dem Arbeitsbereich abtransportiert. Das geht schnell und ist effizient. Und die S-502 machte „Strecke“: vier bis fünf Zentimeter pro Minute. Zeitweise fraß sie sich in sehr rauer Umgebung in der Woche mehr als 100 Meter weit voran.

REKORDMARKE BEIM WASSERDRUCK

Aufgrund der Arbeitstiefe – unter Wasser steigt der Druck alle zehn Meter um ein Bar – lastete auf großen Teilen der Vortriebsstrecke ein enormer Wasserdruck von bis zu 15 Bar auf der Maschine: ein absolutes Novum im maschinellen Tunnelvortrieb. Bis dahin lag die Rekordmarke punktuell bei 11 Bar, aufgestellt von einer Herrenknecht-TBM, mit der man den im Jahr 2013 fertig gestellten Hallandsås-Eisenbahntunnel zwischen Göteborg und Malmö aufgefahren hatte.

Die anspruchsvollen geologischen und hydrologischen Bedingungen unter dem Lake Mead stellten das bauausführende Team von Salini-Impregilo vor echte Herausforderungen. Mehrfach musste der Vortrieb gestoppt und Teile ausgetauscht werden. Das abrasive Gestein hatte die Schneidrollen und Teile des Schneidrads weggeschliffen. Auch die Lagerdichtung wurde vom hohen Druck erheblich in Mitleidenschaft gezogen und musste erneuert werden.

Nach rund 3 Jahren Vortrieb fuhr die Herrenknecht Multi-Mode-TBM Ende 2014 exakt durch die Einfuhrkonstruktion der neuen Entnahmestelle.

3



NICHT ALLES VERLÄUFT NACH PLAN

Mit Tempo konnte aber nur auf rund 40 Prozent der Strecke im offenen Modus gefahren werden – statt auf den vorgesehenen 70 Prozent: Unvorhergesehene geologische Störzonen und starker Wasserzufluss an der Ortsbrust machten es erforderlich, dass das Gros der Wegstrecke im zeit- und verschleißintensiveren geschlossenen Slurry-Modus absolviert wurde. Hierbei wird mit Hilfe einer unter Druck stehenden Flüssigkeit – meist eine Bentonitsuspension – der Boden an der Ortsbrust stabilisiert. Der abgebaute Boden wird über einen Spülkreislauf zusammen mit der Suspension aus der Arbeitskammer abgepumpt. Auch schwankende Druckverhältnisse können so sehr exakt geregelt werden.

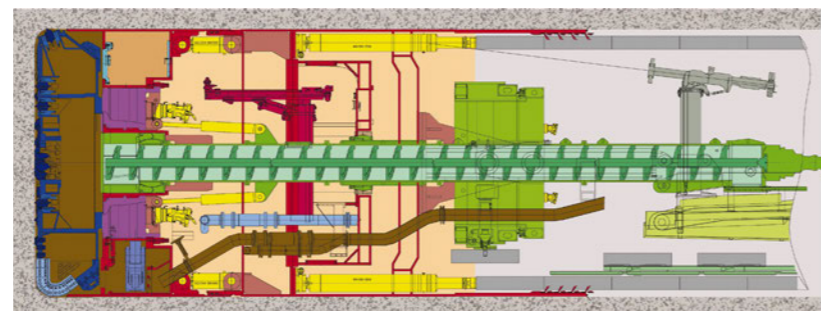
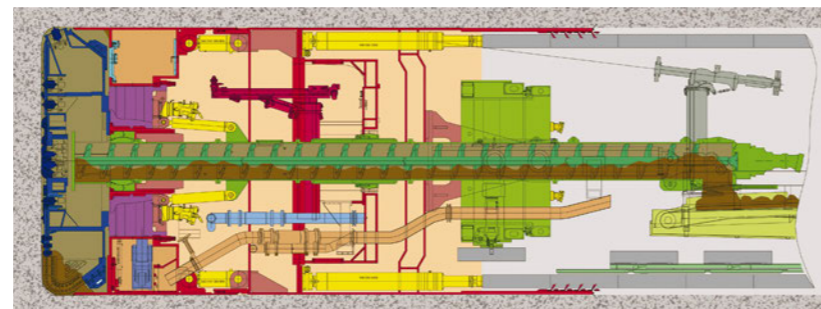
Der Wechsel vom offenen in den geschlossenen Modus muss schnell gehen. Denn strömt Wasser, dann kommt viel und das unter hohem Druck. Innerhalb von 120 Sekunden muss, so die Vorgabe für die Lake-Mead-TBM, die Maschine abgedichtet werden können. Dazu wird die Hauptkammer verriegelt, indem man am hinteren Ende der Förderschnecke den Abwurfschieber schließt.



▼ Aufgrund der wechselhaften Bodenbedingungen entlang der Tunneltrasse entschied sich der Auftraggeber für eine **Multi-Mode-Maschine** von Herrenknecht.

HERAUSFORDERUNG KAMMEREINSTIEG

Geschlossen, sicher, easy going? Von wegen. Denn auch wenn Tunnelbohrmaschinen im abgesicherten Slurry-Modus graben, verlangen Schneidrad und Abbauprodukte nach regelmäßiger Inspektion und Wartung. Verschiedene Monitoring-Systeme erfassen über Sensoren in Echtzeit alle wichtigen Vortriebsparameter und zeichnen sie auf. Auf Grundlage dieser Daten entscheidet der Maschinenführer, wann Kammer-einstiege notwendig sind. Die Datenanalyse ist nur der erste Schritt: Das tatsächliche Auswechseln der Schneidrollen, Schälmesser und Räumer ist kräftezehrende, aufwändige Handarbeit.



▲ Darstellung der beiden **Vortriebsmodi** offen (mit horizontaler Förderschnecke) und geschlossen (mit hydraulischem Spülkreislauf).



▲ Während den Montagearbeiten in Deutschland wurden die weiterentwickelten **Schleusensysteme** der Schneidrollen für den Projekteinsatz ausgiebig getestet.



DRUCKLOSER WERKZEUG-WECHSEL BEI GRÖßEREN DURCHMESSERN

Bei Vortrieben unter hohem Druck hat sich das Konzept der begehbaren Schneidradarme bewährt. Die konstruktive Besonderheit wurde erstmals 1998 beim Bau der vierten Röhre des Hamburger Elbtunnels mit einem Mixschild erfolgreich bei 4,5 Bar genutzt. Bei Tunnelbohrmaschinen mit einem Durchmesser \geq zehn Metern können die Schneidradarme als begehbare Hohlkästen ausgebildet werden. Unter Atmosphärendruck gesetzt sind sie dann zugänglich, verschlissene oder defekte Werkzeuge lassen sich vergleichsweise einfach über den rückwärtigen Bereich des Schneidrads austauschen. Dieses Prinzip hat Herrenknecht in den vergangenen zwei Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt und für deutlich höhere Drücke angepasst.

ALL AROUND #3 by HERRENKNECHT

FRONT RUNNER

Technischer Fortschritt

für effizientere Infrastrukturen

allaround.herrenknecht.com/de/ausgabe-3

allaround.herrenknecht.com/de/ausgabe-3/

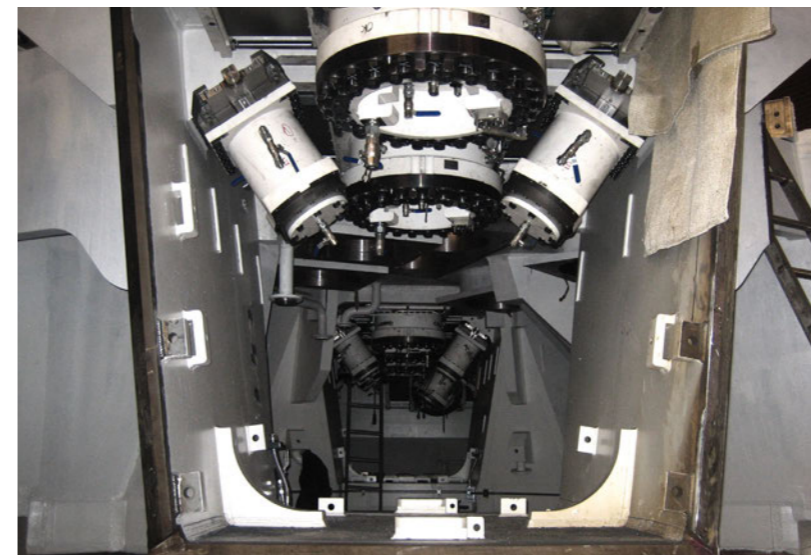
tunnelbauextrem

- ▶ **Maximale Sicherheit bei maximalem Druck:**
Größer, tiefer, extremer – der maschinelle Tunnelbau dringt im Untergrund in neues Terrain vor.

allaround.herrenknecht.com/de/ausgabe-3/

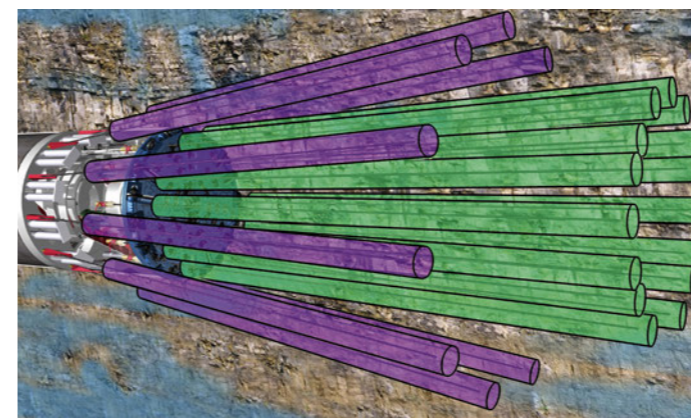
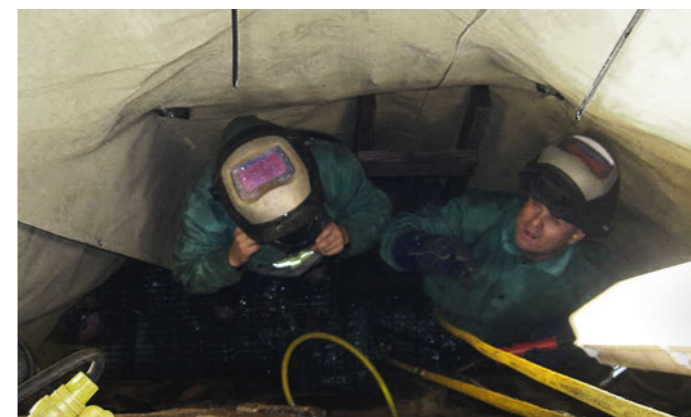
pioniertechnik

- ▶ **Pioniertechnik – neue Lösungen für spezielle Anwendungsfelder:** Als Frontrunner bei maschineller Vortriebstechnik bietet Herrenknecht auch für spezielle Anwendungen neue, effiziente Lösungen.



- ◀ **Ab einem Durchmesser** von ca. 10 m können die Schneidradarme für einen drucklosen Werkzeugwechsel begehrbar ausgeführt werden

- ▼ **Wartungsarbeiten** an der Front des Schneidrads der **Lake Mead-TBM** unter extrem beengten Platzverhältnissen im Schutz eines safe haven.

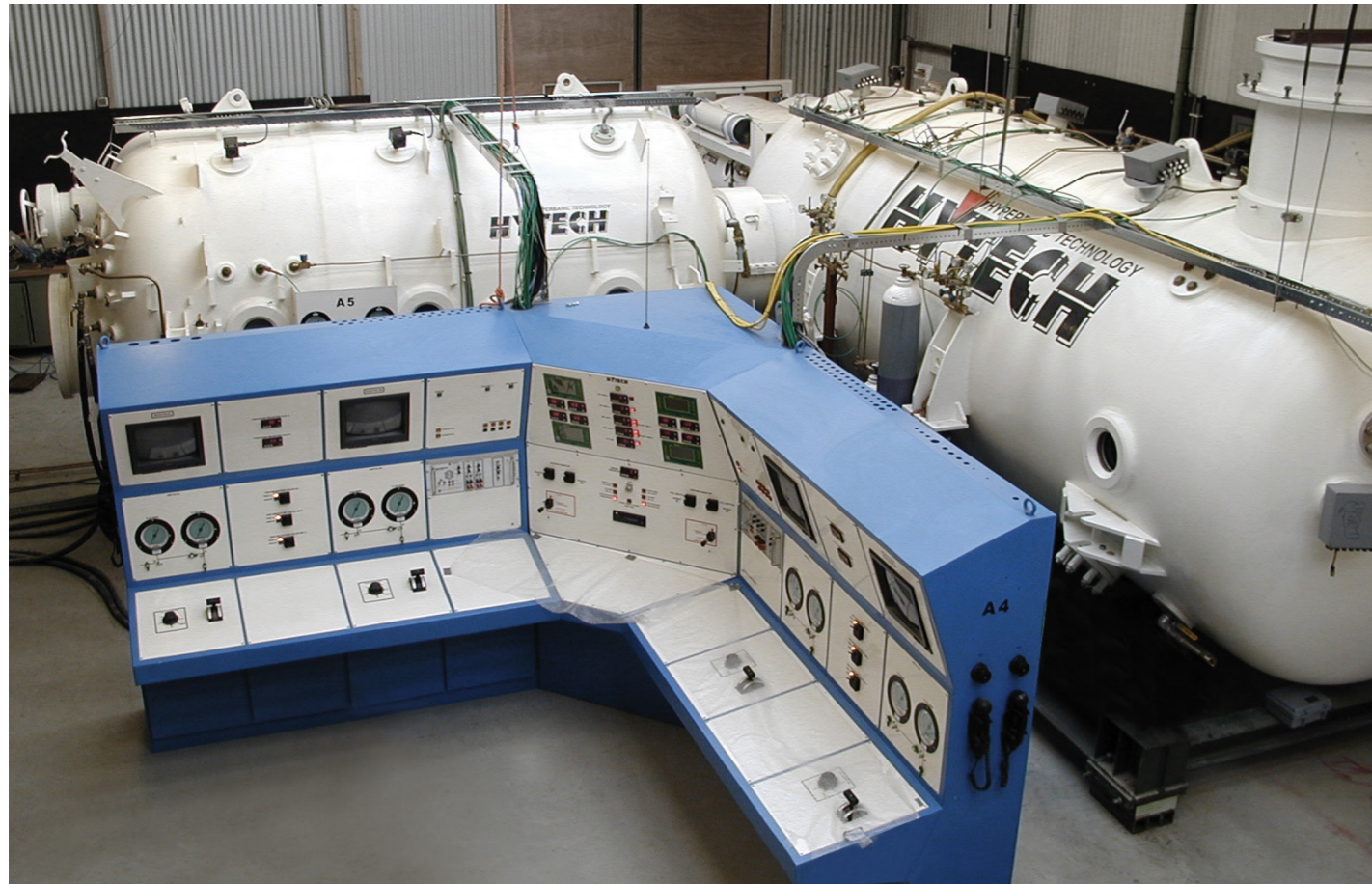


- ▲ **Mit Hilfe von Bohrgeräten** können über **Zementinjektionen** auf der Vortriebsstrecke künstliche Wartungszonen hergestellt werden. Dieses Verfahren ist jedoch nicht immer anwendbar.

VORTRIEB MIT FINGERSPITZENGEFÜHL

TBM-Durchmesser von unter zehn Metern lassen aufgrund der beengten Platzverhältnisse begehbare Schneidarme konstruktiv nicht zu – wie beispielsweise am Lake Mead. Drucklose Kammereinstiege sind nicht möglich. In diesem Fall können Werkzeugwechsel oder Wartungsarbeiten nur in „Wartungsbahnhöfen“ (safe haven) ausgeführt werden. Sie erlauben einen sicheren Zugang zur Abbaukammer. Allerdings ist es ein glücklicher Zufall, eine solche natürliche, stabile Zone im Verlauf einer Tunneltrasse anzutreffen. Die Regel ist es nicht.

Hier ist Erfahrung und Fingerspitzengefühl von allen Projektpartnern gefragt: Geht man das Risiko ein und fährt noch eine gewisse Strecke weiter, in der Hoffnung bald eine sichere Zone zu erreichen? Oder sind die Werkzeuge so verschlissen, dass sofort gehandelt werden muss? Safe haven können auch künstlich hergestellt werden, beispielsweise durch vorausseilende Baugrundverbesserung mit Bohrgeräten der TBM oder von über Tage. Das ist allerdings mit einem sehr hohen Aufwand verbunden und nicht überall möglich.



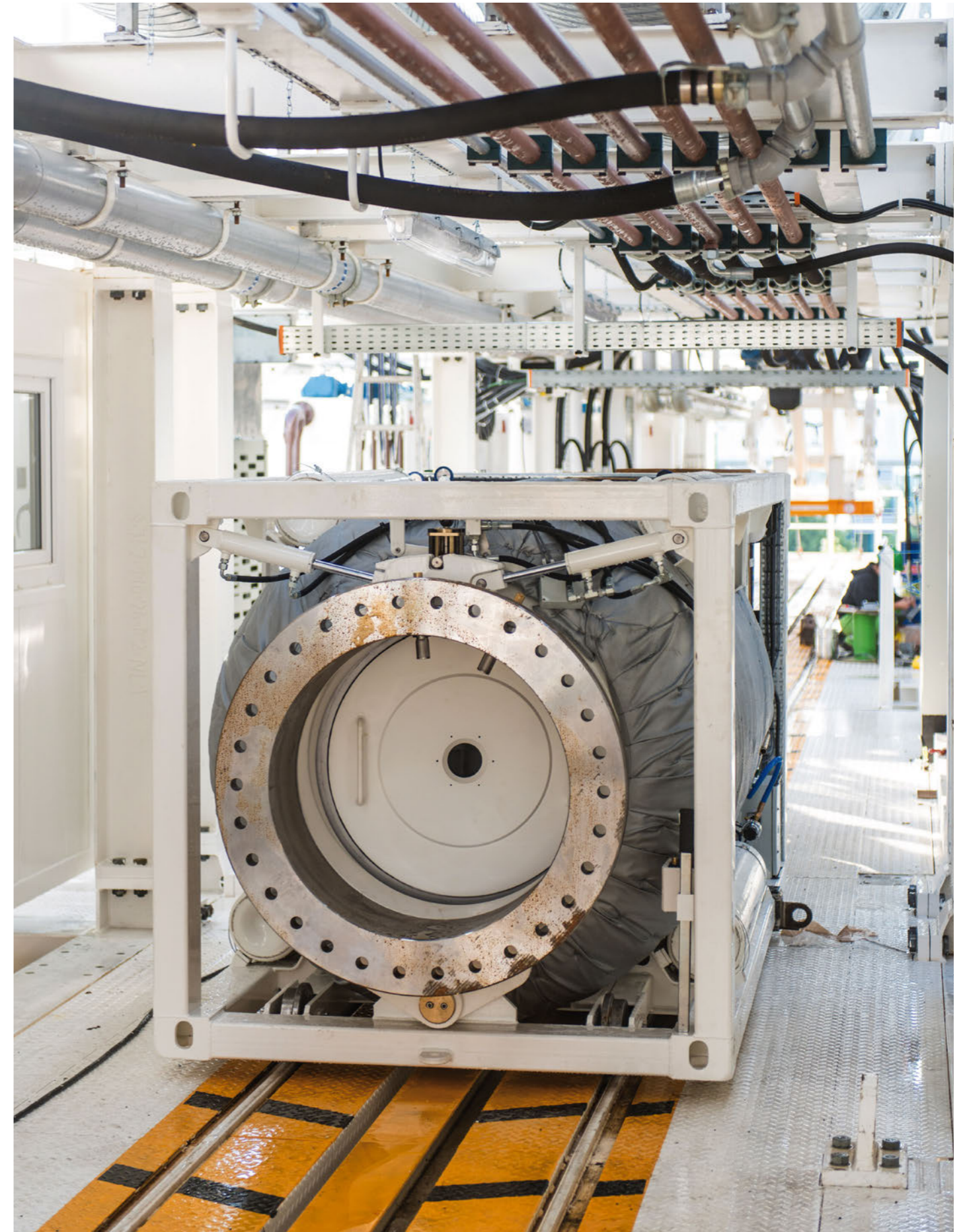
Sättigungstauchen ist ein extrem aufwändiges Verfahren: Vom Wohncontainer (oben) über das Transfer-Shuttle (rechts) bis zur TBM, überall sind projektspezifische Sonderkonstruktionen notwendig, um die Sicherheit der Taucher zu maximieren.

AR

SÄTTIGUNGSTAUCHEN ALS LETZTE OPTION

Im ungünstigsten Fall greift die Fallback-Lösung: Man schickt Taucher in den Druckbereich der TBM. Erste Erfahrungen mit dieser Methode hat man ebenfalls beim Bau der vierten Elbröhre in Hamburg sammeln können. Dort mussten die Räumerhalterungen neu verschweißt und die Räumer selbst gewechselt werden. Sechs Wochen dauerte der Einsatz – bei Drücken von bis zu 4,5 Bar und damit in Druckbereichen, in die Taucher nur ausnahmsweise noch mit „normaler“ Druckluft einsteigen können.

Bei Tiefen wie unter dem Lake Mead und einem Druck von bis zu 15 Bar funktioniert das nicht mehr. Hier muss man auf Erfahrungen aus dem „Offshore-Sektor“ zurückgreifen. Sättigungstauchen heißt das Zauberwort. Dabei macht man sich zunutze, dass die Gasaufnahme des menschlichen Organismus unter hohem Druck irgendwann begrenzt (gesättigt) ist – und damit die Dekompressionszeiten eine natürliche, überschaubare Grenze finden.





▲ Blick in das Innenleben eines Transfer-Schuttles. Sättigungstaucher halten sich je nach Einsatz bis zu mehrere Wochen am Stück im Überdruck auf.

FÜR ALLE FÄLLE VORBEREITET

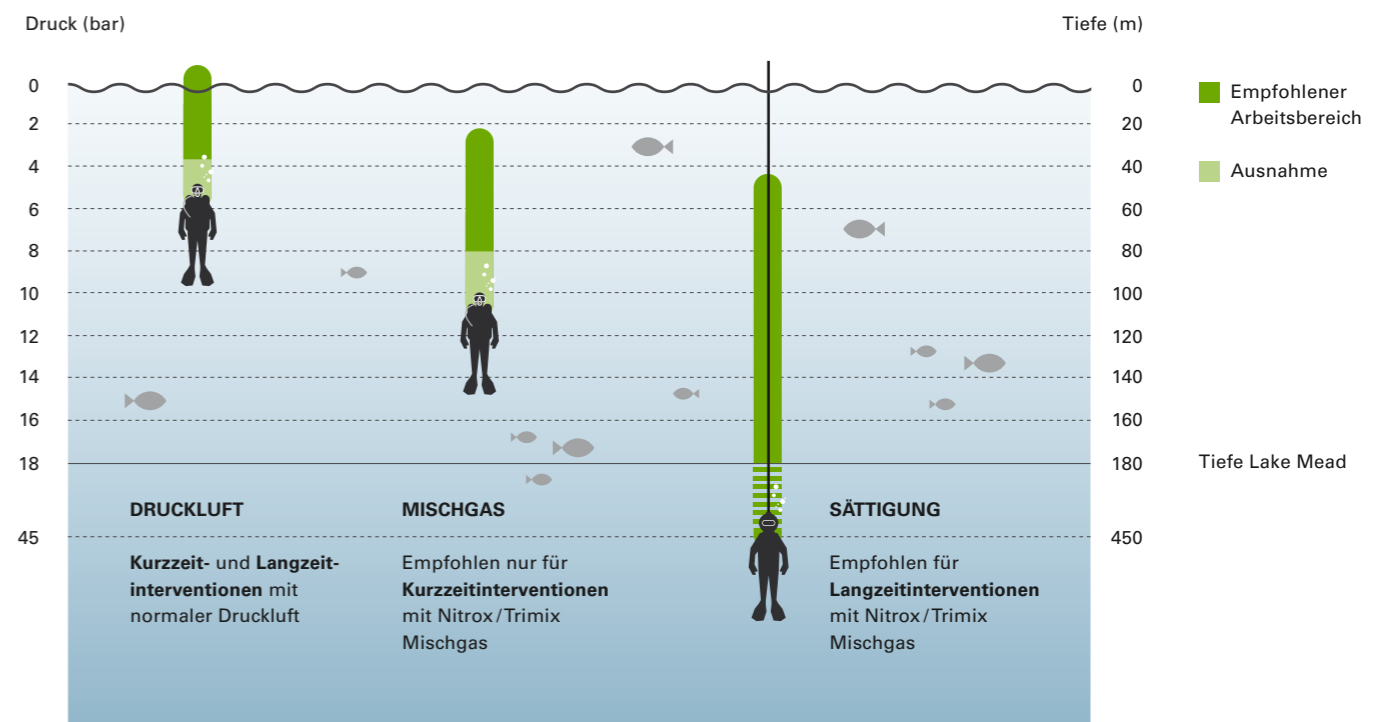
Baustelle und Maschine waren beim Projekt Lake Mead für Sättigungstauchen bis 15 Bar ideal vorbereitet. Dazu wurde ein lückenloser Überdruck-Transportweg konzipiert und realisiert. Dieser führt von der (Druck-)Wohnkammer im Bereich des Startschachts, in der die Taucher teilweise wochenlang leben, bis zur Druckschleuse der TBM im vorderen Schildbereich. Beim Einsatz muss der Transfer-Shuttle durch den gesamten Nachläuferbereich der Maschine transportiert werden. Hierzu sind spezielle konstruktive Überlegungen notwendig, damit im Zentrum genügend Raum für den Shuttle frei bleibt. Nur so kann den professionellen Sättigungstauchern ein schneller und vor allem absolut sicherer Einstieg in die Abbaukammer ermöglicht werden. Im Normalbetrieb dürfen diese Einrichtungen den Vortrieb dagegen nur minimal beeinträchtigen.

Erfreulicherweise blieb beim Vortrieb unter dem Lake Mead das aufwändige und zeitintensive Sättigungstauchen unnötig. Entscheidend ist allerdings, dass man bei derart anspruchsvollen Pionier-Projekten im Grenzbereich der technischen Machbarkeit neben Plan A immer Plan B oder im Bestfall Plan C in der Tasche hat. Künftig dürften deshalb alle Tunnelvortriebsmaschinen, die tief unter der Erdoberfläche unterwegs sind, mit solcher an die Raumfahrt erinnernden Technik ausgestattet sein. Bohrtiefen von 200 Meter sind keine Utopie mehr. Auch an der Grenze zwischen Orient und Okzident sind die Sättigungstaucher die Fallback-Lösung: Direkt unter dem Bosphorus frisst sich derzeit eine Herrenknecht-Tunnelbohrmaschine mit einem Durchmesser von 13,60 Meter durch den Meeresboden zwischen Europa und Asien – alle möglichen Einrichtungen für Kammereinstiege sind mit an Bord. Der 5,4 Kilometer lange Straßentunnel des „Istanbul Strait Road Tube Crossing Project“ liegt an seiner tiefsten Stelle über 100 Meter unterhalb des Wasserspiegels.

Sättigungstauchen

Je tiefer und länger ein Mensch taucht, desto langwieriger ist seine Rückkehr an die Wasseroberfläche. Das Problem ist das Gas, das er atmet. Es löst sich in den Körperflüssigkeiten auf und lagert sich im Gewebe ein – bis der Körper gesättigt ist. Daher der Name: Sättigungstaucher. Bei einem raschen Auftauchen würde das Gas zu schnell austreten, vor allem im Blut.

Vergleichbar mit einer Sprudelflasche, die man vor dem Öffnen schüttelt. Die Folge wären Gasembolien, Schäden an den Nervenbahnen und im Gewebe, mit tödlichen Folgen. Daher muss der Taucher das aufgenommene Gas bei langsam abnehmendem Druck über die Atmung abgeben – was dauert. So kann die Dekompressionszeit nach einem Tauchgang bis 200 Meter sieben Tage betragen.



BACKGROUND

Lake Mead, Intake No. 3

Land, Ort:	Vereinigte Staaten von Amerika, Las Vegas, NV
Bauherr:	Southern Nevada Water Authority
Kunde:	Vegas Tunnel Constructors JV
Jahr:	2011–2014
Anwendung:	Wasser
Geologie:	Heterogene Böden und Festgestein (Basalt, Sandstein, Amphibolite, Konglomerate)
Vortriebslänge:	4.400 m
Maschinendaten:	1x Multi-Mode-TBM
Durchmesser:	7.180 mm
Ausbauverfahren:	Tübbingausbau

Impressum

Herausgeber: Herrenknecht AG
77963 Schwana, Deutschland

Redaktion:
Corporate Communications
Herrenknecht AG
(Verantwortlich: Achim Kühn)
© 2015 Herrenknecht AG

ALL AROUND #3 by HERRENKNECHT

› ONLINE NOW.

DIVE IN.

› allaround.herrenknecht.com



➤ Herausragender Erfolg für die Herrenknecht Multi-Mode-TBM am Lake Mead: TBM bewältigt den Vortrieb unter extremen Wasserdrücken bis 15 bar.



HERRENKNECHT



Tunnelling Systems

HERRENKNECHT AG

77963 Schwanau

Germany

Phone +49 7824 302-0

Fax +49 7824 3403

pr@herrenknecht.com

www.herrenknecht.com