



Arbeiten in Überdruck Taucher- und Druckluftarbeiten im maschinellen Tunnelvortrieb

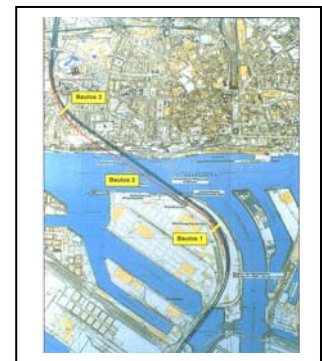
Ab einer Tiefe von 40 Metern (4,0bar Überdruck) kommt der Drucklufttechniker in Bereiche, in denen es aus Zeitgründen nicht mehr interessant ist, Druckluftarbeiten auf herkömmliche Art auszuführen. Da aber die nächste Generation von Tunnelprojekten immer länger und immer tiefer gebaut wird, war es nur eine Frage der Zeit und Gelegenheit den Einsatz von Tauchern für die Arbeiten in Überdruck mit einzubeziehen.

Hohe Grundwasserdrücke sind bei Tunnelvortrieben im Lockergestein bzw. im Fels eine große Herausforderung und beeinflussen maßgebend die Auslegung und den Betrieb von Tunnelbohrmaschinen (TBMs). Hierbei gilt es, einen übermäßigen Zustrom von Grundwasser zu verhindern, die Ortsbruststabilität zu gewährleisten und den Zugang zum Schneidrad für Wartungsarbeiten zu ermöglichen. Dies kann zu einer Verlängerung der Bauzeit und zu einem Anstieg der Baukosten führen.



Die 4. Röhre Elbtunnel setzte einen Meilenstein in Flüssigkeit gestütztem Tunnelvortrieb. Mit einem Durchmesser von 14,2 m., teilweise nur 7 m Bodenüberdeckung und einem Grundwasserdruck von bis zu 4,5 bar, stellte das Projekt eine ganze Reihe von Herausforderungen.

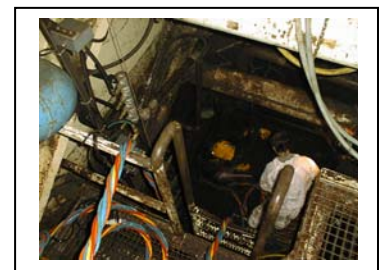
Der 2.561 m lange Autobahn-Tunnel wurde in glazialen Böden mit Sanden, Geschiebemergel mit Blöcken und Ton mit Sandlinsen aufgefahren.



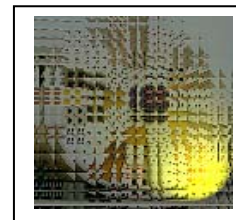
Auf Grund der abrasiven Böden waren häufig Drucklufteinstiege erforderlich. Übermäßiger Verschleiß entstand an den Abbauwerkzeugen und an der Rückseite des Schneidrades. Eine umfassende Reparatur wurde notwendig ca. 50 m vor dem Punkt, an dem die geringste Überdeckung erreicht wurde. Hier musste die TBM auf Grund von erhöhtem Drehmoment angehalten werden um die Räumerhalterungen neu zu verschweißen und die Räumer zu wechseln. Dieser Einsatz in Überdruck dauerte etwa 6 Wochen bei Drücken von bis zu 4,5 bar.



Insgesamt haben Ingenieure, Taucher und Techniker beim Bau der neuen Elbtunnel Röhre 10.920 Stunden in Überdruck gearbeitet unter Druckverhältnissen von bis zu 4,5 bar. Während dieser Zeit wurden 2.738 Druckluftmanneinsätze durchgeführt, von denen 237 unter Druckverhältnissen von mehr als 3,6 bar stattfanden.



Insgesamt wurden 21 Drucklufterkrankungen gemeldet, die in der Krankenschleuse an der Oberfläche behandelt wurden. Alle Zwischenfälle ereigneten sich in Drücken unterhalb 3,6 bar.



Die Tunnelbohrmaschine der 4. Elbtunnelröhre war die erste Bohrmaschine auf der für die Rettung von Verunfallten ein NATO-Flansch an die Druckluftschleuse angeschlossen werden konnte um den Transport von Verletzten aus dem Überdruckbereich in eine Transportkammer (Shuttle) zu ermöglichen. In der Transportkammer sollte der Verunfallte dann aus dem Tunnel gebracht und an der Oberfläche an die Krankenschleuse angedockt werden.

Glücklicherweise ist es zu einem solchen Transport, außer zu Trainingszwecken, nicht gekommen.



Der **Wesertunnel** mit zwei Röhren und einer Länge von 1.640 m. ist die einzige feste Querung der Weser nördlich von Bremen. Eine Tunnelvortriebsmaschine (\varnothing 11,71 m) mit Flüssigkeit gestützter Ortsbrust wurde verwendet, um den Tunnel durch Geschiebemergel und Ton aufzufahren.

Hierbei wurden glaziale Böden durchfahren, bestehend aus Sanden, Klei, Torf, Ton und Geschiebemergel sowie eingelagerten Granitblöcken.

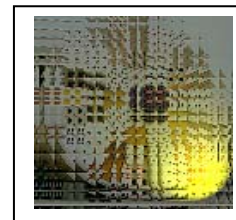
Der tiefste Punkt des Wesertunnels liegt 40 m unterhalb des Meeresspiegels. Aufgrund des Tideneinflusses von der Nordsee schwankt der Wasserstand der Weser +/- 2 m zum Meeresspiegel und erreicht im Maximum +5,2 m über dem Meeresspiegel. Entlang der Tunneltrasse erreicht der Grundwasserdruck im Mittel 2,5 bis 4,0 bar und im Maximum 4,5 bar bei Sturmflut.

Reparatur- und Wartungsarbeiten am Schneidrad wurden in Überdruck unter Druckverhältnissen von bis zu 4,5 bar durchgeführt und von bis zu 5,0 bar für Arbeiten am Steinbrecher der TBM. Zusätzlich wurden von den Tauchern arbeiten in Bentonit in Drücken bis zu 5,0 bar ausgeführt. Bei den Arbeiten in Überdruck wurde 'normale' Druckluft (keine Mischgase) und Sauerstoffdekompression erfolgreich eingesetzt. Es wurden 1.400 Druckluftmanneinsätze durchgeführt mit insgesamt 5.000 Stunden in Überdruck, von denen 600 unter Druckverhältnissen von mehr als 3,6 bar stattfanden. Es wurden 15 Drucklufterkrankungen gemeldet, alle in Drücken unterhalb 3,6 bar.



Der 6,6 km lange **Westerschelde-Tunnel** war der erste Tunnel, bei dem das Mischgas-Sättigungsverfahren für Einsätze am Schneidrad in der Abbaukammer praktiziert wurde. Die beiden Tunnelröhren wurden mit zwei Tunnelvortriebsmaschinen (\varnothing 11,33 m) mit Flüssigkeit gestützter Ortsbrust aufgefahren. Auf einer Länge von ca. 2 km wurden Bodenformationen durchfahren bestehend aus quartären Sanden mit kleinen und massiven Formationen aus tertiärem Lehm. Dichte tertiäre Sande wurden unterhalb des Lehms im Bereich der tiefsten Tunnelauffahrung gefunden.

Am tiefsten Punkt verläuft der Westerschelde Tunnel 60 m unterhalb des Meeresspiegels. Aufgrund des Tideneinflusses von der Nordsee schwankt der Wasserstand +/- 2,5 m zum Meeresspiegel und erreicht im Maximum +4,0 m über dem Meeresspiegel. Die Tunnelüberdeckung lag im Mittel zwischen 28 und 40 Meter.



Als die Nordseetaucher GmbH um Projektzusammenarbeit gebeten wurde, zwei Tunnel unter der Westerschelde in den Niederlanden aufzufahren, zögerten wir keinen Moment, wohl wissend, dass es eine ideale Gelegenheit ist, um die Qualifikationen und die erworbene Sachkenntnis aus dem Bau der 4. Elbtunnelröhre sowie des Wesertunnels in Deutschland einzubringen.

Die Probleme mit denen wir nun konfrontiert wurden waren jedoch etwas anders geartet. Beim Bau der 4. Elbtunnelröhre wurden die Arbeiten in Überdruck bei maximal 4,5 bar und beim Bau des Wesertunnels in maximal 5,0 bar Überdruck ausgeführt. Die Vorausberechnung für die beiden Tunnel unter der Westerschelde ergaben jedoch Drücke von bis zu 8,5 bar Überdruck.

Arbeiten in Überdruck bis 8,5 bar sind in Druckluft nicht mehr möglich, da der Stickstoff in der Luft narkotisch wird. Von daher verlief die Planung von Anfang an auf den Einsatz von Mischgasen hinaus. Um aber Mischgase erfolgreich einzusetzen, mussten umfangreiche Vorbereitungen an den Tunnelmaschinen und im Bereich der Logistik getroffen werden.

Im internationalen Geschäft des "Offshore-Tauchen" werden seit Jahrzehnten die Verfahren demonstriert, die auch für den Einsatz in Tunnelbohrmaschinen in Tiefenbereichen jenseits von 5 bar Überdruck einsetzbar sind. Es handelt sich hierbei um Gasgemische aus Sauerstoff mit Zumischung verschiedener Inertgase, die je nach zu erwartendem Druckspektrum Einsatzzeiten von Tagen und Wochen („Sättigungsverfahren“) ermöglichen. Für die Bereiche von 3,0 bis 6,0 bar Überdruck ist die Anwendung von Druckluft als Arbeitsgas auch mit der Sättigungsmethode machbar und möglicherweise in der Zukunft vorzuziehen. Hier kam diese neue Methode jedoch nicht zum Einsatz.

Für den Fall, dass Reparatur und Wartungsarbeiten nicht ausgeführt werden können, da eine Teilabsenkung des Bentonit im Abbauraum nicht möglich ist, wurde die Möglichkeit geschaffen speziell ausgebildete Taucher für Kontrollarbeiten und den Werkzeugwechsel einzusetzen.

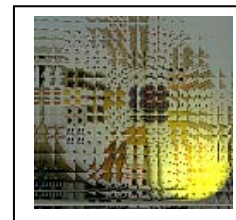
Es wurden 6 Einsätze in Sättigung (Langzeitaufenthalt in Überdruck) gefahren mit einer Gesamtaufenthaltszeit von über 40 Tagen. Die Dekompressionszeiten bei Arbeitsdrücken von bis zu 6,9 bar betragen jeweils 4 Tage. Außerdem wurden 10 Inspektionseinsätze unter Mischgas sowie 1652 Stunden unter Druckluft mit 546 Mann-Schleusungen durchgeführt. 5 Druckfallerkrankungen sind aufgetreten, die allesamt in der Krankenschleuse an der Oberfläche behandelt werden konnten.

Tauchen im Bentonit

Vorbereitung

Um Taucherarbeiten im Bentonit auszuführen werden spezielle Flanschverbindungen an der Druckwand installiert. Diese Verbindungen garantieren die Versorgung der Taucher mit Atemluft, Reserveluft, Kommunikation, Licht, Videoübertragung und Spülwasser für die Atemluftregler in den Taucherhelmen. Diese Flanschverbindungen sind aber auch ausgezeichnet geeignet für den Einsatz der neuen Drucklufthelme.





Der Taucherhelm



Speziell für die Arbeiten in Bentonit wurde der, ansonsten bei Offshore-Arbeiten eingesetzte, Helm modifiziert. Um dem Taucher das Atmen in der Tonsuspension Bentonit zu erleichtern, Reduzierung des Atemwiderstandes, wurde der Helm mit einer Wasserspülung für den Lungenautomaten ausgerüstet. Außerdem verhindert das Frischwasser das Verkleben der Atemmembrane.

Das Umbilical (Schlauch und Leine)

Das Umbilical ist die Nabelschnur zum Taucher. Die verschiedenfarbig gekennzeichneten Schläuche und Kabel sind die Luftversorgung, Notatemluftversorgung, Frischwasserversorgung, Kommunikation, Licht- und Videoübertragung.



Tauchen und Arbeiten in Sättigung

Die Wohnkammern

Das Sättigungstauchen ist ein Langzeitaufenthalt in Überdruck. Dieser Aufenthalt kann bis zu 28 Tagen dauern. Um den Tauchern diesen Aufenthalt zu ermöglichen ist ein Druckkammersystem bestehend aus zwei Wohnkammern außerhalb des Tunnels erforderlich. In diesem System können bis zu 9 (neun) Taucher und Techniker wohnen. Es enthält alle notwendigen Versorgungseinrichtungen von Schlafkojen bis hin zu Duschen und Toiletten.

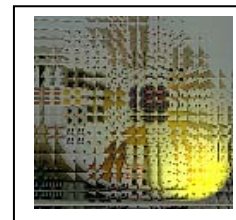


Der Transport Shuttle



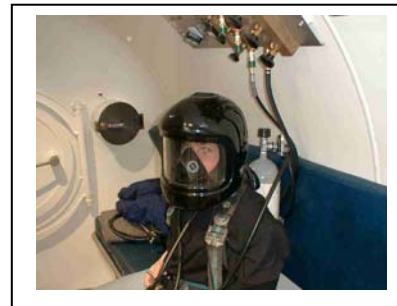
Da es auf Grund technischer Schwierigkeiten nicht möglich war und ist die Sättigungsanlage in den Tunnel zu bringen und an der Tunnelmaschine anzuschließen, haben wir uns entschlossen ein mobiles Transportsystem, das Shuttle, zu bauen. Mit diesen Shuttles ist es möglich die Taucher von den Wohnkammern außerhalb des Tunnels oder vom Nachläufer auf der Tunnelmaschine abzuholen, in den Tunnel zu bringen um dann an der Tunnelmaschine an der Druckwand anzudocken. Jeder Shuttle kann bis zu 4 Taucher in Überdruck transportieren. Einmal angedockt an der

Tunnelmaschine steigen die 4 Taucher um und begeben sich in den Arbeitsraum. Vom Arbeitsraum gelangen sie durch die Türen in der Tauchwand an ihren Arbeitsplatz, dem Schneidrad, um alle notwendigen Inspektionen, Wartungen und Reparaturen auszuführen.



Der Überdruckhelm

Anders als am Elbe- und Wesertunnel war bei Drücken über 4,5 bar das Arbeiten in Druckluft nicht mehr möglich. Es mussten Mischgase, bestehend aus Helium, Stickstoff und Sauerstoff eingesetzt werden. Die Ausrüstung für die Taucher ist die gleiche, die wir bereits erfolgreich in den anderen Tunnelprojekten eingesetzt haben, aber für die Arbeiten im teilabgesenktem Zustand mussten wir neue, leichte Helme einsetzen, die es am Markt nicht zu kaufen gab. Wir haben daher einen englischen Helm, der in der chemischen Industrie eingesetzt wird, umgerüstet und angepasst. Die vor dem Einsatz notwendigen Testversuche wurden bei der Belgischen Marine in Zeebrücke durchgeführt. Dieser spezielle Helm verfügt über zwei Atemluftregler sowie über ein steuerbares Kühlungssystem. Dieses Kühlungssystem ist wichtig, da es an der Ortsbrust zu Temperaturen von bis zu 50 Grad kommen kann.



Dieses neue Helmdesign von Composite Beat Engel, Schweiz ist die neue Konstruktion eines Überdruckhelms. Der Helm ist in enger Zusammenarbeit mit der Nordseetaucher GmbH realisiert worden. Dieser neue Helm - der mit einem zusätzlichen Bausatz innerhalb von einer Stunde in einen atemluftgesteuerten Helm umgebaut werden kann - ist jetzt betriebsbereit um im Überdruck der äußerst risikoreichen Umgebung einer Tunnelvortriebsmaschine dem Benutzer äußerste Sicherheit zu gewährleisten. Jeder Helm ist mit Anschlüsse für Oberflächenluft/Gasversorgung und einem unabhängigen Notatemluft/Gasanschluss sowie Kommunikationstechnik ausgerüstet.



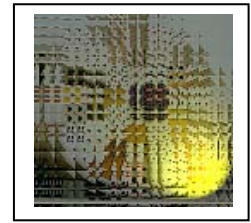
Mit zwei Röhren und eine Länge von 2.990 m. unterquert der **Nanjing-Yangtze-River-Crossing-Tunnel** den Yangtze bei Nanjing in China. Zwei Tunnelvortriebsmaschinen (\varnothing 14,96 m) mit Flüssigkeit gestützter Ortsbrust wurden verwendet, um die Tunnel durch weiche Gesteinsschichten aufzufahren.

Der tiefste Punkt des Yangtze River Tunnel liegt 65 m unterhalb des Meeresspiegels. Aufgrund des Tideneinflusses vom Südchinesischen Meer schwankt der Wasserstand des Yangtze River +/- 1,5 m zum Meeresspiegel.



Bei diesem Projekt war das Schweißen in Überdruck die größte auszuführende Aufgabe. Auf Grund unserer Erfahrungen und durch eigene Schweißforschung in Druckluft und unter Wasser wussten wir, dass es kein wirkliches Problem ist. Aber dieses Mal war es äußerst extrem. Die Halterungen der Räumern an 6 Schneidarmen der TBM mussten erneuert werden. Deshalb wurden neue Versteifungen an die Rückseite der Halterungen der Seitenarme des Schneidrades geschweißt. Die Gesamtzeit dieser Arbeit dauerte mehr als 12 Wochen, Tag und Nacht. Im Abbauraum wurden bis zu 5,4 bar Überdruck erreicht. Um den

Stützdruck an der Ortsbrust stabil zu halten, verwendeten wir eine spezielle, zähflüssige Bentonit Mischung mit einer hohen Dichte.



Die Taucher und Drucklufttechniker führten Reparatur- und Wartungsarbeiten am Schneidrad in Überdruck unter Druckverhältnissen von bis zu 5,4 bar und in bis zu 6,5 bar Überdruck wurden Arbeiten an den Steinbrechern der TBMs ausgeführt. Gearbeitet wurde in 'normaler' Druckluft (keine Mischgase) mit anschließender Sauerstoffdekompression. Insgesamt wurden über 4.000 Stunden in Überdruck verbracht und über 945 Druckluftmanneinsätze ausgeführt. Es wurden lediglich 3 Drucklufterkrankungen gemeldet, die in der Druckbehandlungskammer an der Oberfläche behandelt wurden.

Bei den Schweiß- und Schneidarbeiten in Überdruck wurde zum ersten Mal der neue Drucklufthelm mit dreifacher Luftzufuhr, bestehend aus zwei Lungenautomaten und einer oberflächenversorgten Luftversorgung mit Spüleinrichtung, Sprechverbindung und einem integrierten Schweißschuttschirm mit Sensoren erfolgreich eingesetzt.

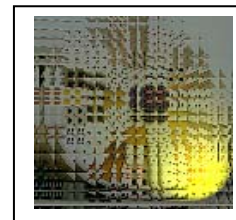


Zusammenfassung

Hohe Grundwasserdrücke (>4 bar) erschweren Tunnelvortriebe und erfordern Spezialkenntnisse während der Planung und bei der Ausführung.

NORDSEETAUCHER GmbH

Hyperbaric Tunnel Construction and Diving®



TBM, Tunnel-Ausrüstung und Vortriebsprozeduren sollten das Aufbringen eines adäquaten Stützdruckes zu jeder Zeit während des Vortriebs und bei Interventionen ermöglichen, um dem Grundwasserdruck entgegenzuwirken.

Wenn entsprechende Komponenten nicht auf der TBM installiert sind, können erhebliche Vortriebsprobleme, Bauzeitverlängerung und Mehrkosten entstehen.

Tunnelvortrieb in festen, feinkörnigen, kohäsiven Böden bzw. im Fels unter hohem Grundwasserdruck ist im Allgemeinen für Slurry- und EPB-TBMs unproblematisch, da die Ortsbrust standfest ist und die Menge an zufließendem Wasser auf Grund der geringen Durchlässigkeit gering ist.

In grobkörnigem Boden oder in nicht standfestem Fels ist eine aktive Ortsbruststützung erforderlich, um während des Vortriebs und bei Interventionen die Stabilität der Ortsbrust zu gewährleisten und Mehrausbruch zu verhindern.

Eine zuverlässige Ortsbruststützung ist mit Slurry-TBMs leichter zu erreichen.

In Abhängigkeit von der Höhe des Grundwasserdruckes, der Abrasivität und Standzeit des Baugrundes und der Länge der jeweiligen Tunnelabschnitte, sollten auf der TBM Installationen für Interventionen mit 'normaler' Druckluft, Mischgas oder Mischgas mit Saturation vorhanden sein.

Nur in sehr festen, gering durchlässigen Böden oder in standfestem Fels ist das Risiko von drucklosen Interventionen unter atmosphärischen Bedingungen vertretbar. Jedoch sollten auch dann Vorkehrungen vorbereitet sein, um bei Bedarf sofort einen adäquaten Stützdruck aufbringen zu können oder Baugrundverbesserungen auszuführen.

Die Erfahrungen die wir aus den Projekten gewonnen haben zeigen, dass die Sättigungsmethode ein sehr erfolgreicher Ansatz ist im hyperbaren Tunnelbau. Sie zeigt uns aber auch, dass Arbeiten in Druckluft bis zu 6,5 bar Überdruck möglich sind, dass dies Verfahren aber nicht sehr effizient ist.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass die neuen Wege, die bei Arbeiten in Überdruck im Tunnelbau eingeschlagen wurden, sehr erfolgreich sind und Anlass genug seien sollten die konstruktive Zusammenarbeit mit den Tunnelbauunternehmen, dem Hersteller dieser Maschinen, der Herrenknecht AG, dem Mediziner für Überdruckerarbeiten, Dr. Faesecke, dem Hyperbaric Training Center, Deutschland, der Klassifikationsgesellschaft Germanischer Lloyd, der Design und Herstellerfirma Composite Beat Engel und der Nordseetaucher GmbH auch in der Zukunft fortzusetzen. Die sehr gute Ausbildung der beteiligten Taucher und Drucklufttechniker, das ständige Training sowie die Anpassung der Tunnelmaschinen an die neuen Gegebenheiten sind Grund genug optimistisch in die Tunnelbauzukunft zu schauen. Immer größer, länger und immer tiefer...

