

Istanbul Strait Road Tunnel

Werner Burger

Leiter Engineering bei Herrenknecht AG, Deutschland

Der Hauptabschnitt des Straßentunnelprojekts unter der Bosphorus-Meerenge besteht aus einem 3,34 Kilometer langem Tunnel, der von einer TBM mit einem Innendurchmesser von 12,0 Metern aufgeföhren wird. Der Tunnel nimmt auf zwei übereinander verlaufenden Fahrbahnebenen jeweils zwei Fahrspuren und eine Standspur auf. In Kombination mit den erwarteten Drücken an der Ortsbrust von über 10 bar verlangen der anspruchsvolle Baugrund und der große Durchmesser ein hoch spezialisiertes und speziell angepasstes TBM-Konzept.

1 Einführung

Im Jahr 2013 wurde ein Mixschild mit einem Durchmesser von 13,7 m in Deutschland hergestellt und auf den Weg nach Istanbul gebracht. Für das "Istanbul Strait Road Crossing Projekt", das auch unter dem Namen "Eurasia Tunnel Projekt" bekannt ist, markierte die Lieferung der TBM Ende 2013 einen wesentlichen Meilenstein.

Das "Eurasia Tunnel Projekt" [1] umfasst den Bau einer Trasse von 14,6 Kilometern, einschließlich eines Tunnelabschnitts mit einer Länge von 5,4 km, der an seiner zentralen Stelle den Bosphorus unterquert (Abb. 1). Der 3,34 km lange Unterwasserabschnitt des Tunnels wird im geschlossenen Modus mit einem Mixschild aufgeföhren. Die verbleibende Tunnelstrecke wird in Spritzbetonbauweise ausgeföhrt und der Montageschacht für die TBM wird in offener Bauweise hergestellt. Auf den weiteren Abschnitten des Projekts werden oberirdische Zufahrtsstraßen zum Tunnel auf der europäischen und asiatischen Seite aus- und umgebaut.



Bild 1 Projekttrasse (grün) mit zentralem Unterwasserabschnitt

Entwurfsideen, wie man Asien mit Europa über einen Tunnel unter dem Bosphorus verbinden kann, gibt es bereits seit langem. Realistisch wurden diese Ideen jedoch erst durch die bedeutenden technischen Entwicklungen im maschinellen Tunnelvortrieb gegen Ende des 20. Jahrhunderts. Machbarkeitsstudien für eine neue Bosphorus-Unterquerung aus den Jahren 2003 und 2005 empfahlen einen Straßentunnel in seiner jetzigen Trassenführung als bevorzugte Lösung.

Nach einem internationalen Ausschreibungsverfahren des türkischen Verkehrsministeriums erhielt ATAS, ein Konsortium des türkischen Unternehmens Yapi Merkezi und des koreanischen Unternehmens SK E&C, den Zuschlag, das "Eurasia Tunnel Projekt" zu planen, zu bauen und zu betreiben. Der Durchführungsvertrag wurde im Februar 2011 unterzeichnet. Im Jahr 2012 erhielt die Herrenknecht AG den Auftrag, ein Mixschild mit einem Durchmesser von 13,7 m herzustellen.

2 Baugrund und Tunnelkonstruktion

Der Hauptabschnitt des "Istanbul Strait Road Tunnel Crossing Projekts" besteht aus einem 3,34 Kilometer langem Unterwassertunnel mit einem Innendurchmesser von 12,0 Metern. Die Tunnelbohrmaschine wird in einem offenen Schacht, der Teil eines in offener Bauweise erstellten Abschnitts auf der asiatischen Seite ist, montiert und von dort angefahren.

Der erwartete Baugrund, den die TBM beim Vortrieb meistern muss, besteht zu ca. 70 % aus Hartgestein der Trakaya Formation (Tonstein, Sandstein und magmatische Felsrücken) und zu etwa 20 % aus Meeresablagerungen (Ton, Schluff, Sand, Kies und Felsblöcke). Die Felsrücken bestehen aus Diabas-, Andesit- oder Diorit- Gestein mit hoher Festigkeit (UCS von bis zu 250 MPa) und hoher Abrasivität. Auch beim Lockermaterial, bei Sand und Felsblöcken wird von einer hohen Abrasivität ausgegangen. Die Trassenführung des Tunnels mit einem Gefälle von $\pm 5\%$ führt zu einer maximalen Tiefe an der Tunnelsohle von 105 Metern unter dem Meeresspiegel. Es werden hohe hydrostatische Drücke von ca. 10 bar auf der Tunnelachse erwartet (Abb. 2).

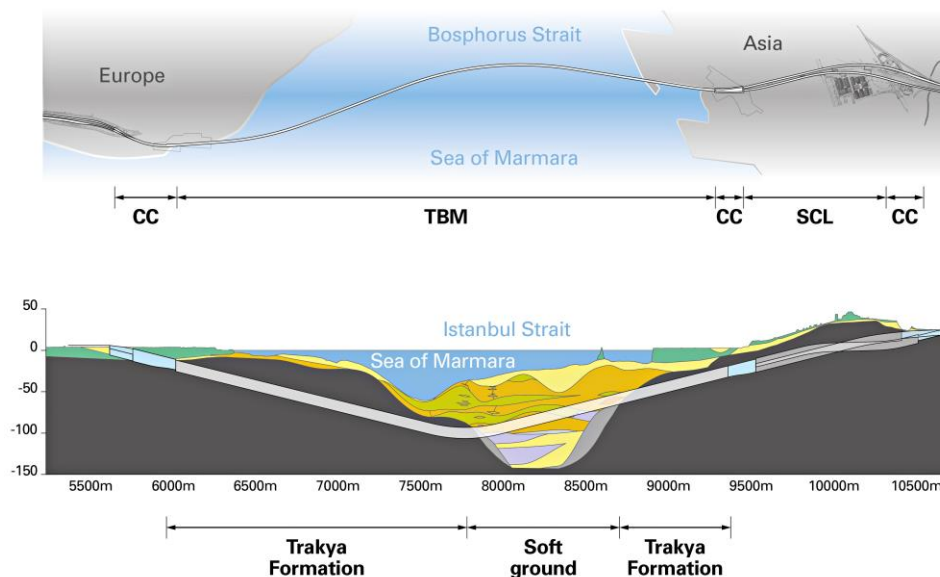


Bild 2 Überblick über TBM Tunnelabschnitt mit erwarteten geologischen Bedingungen

Der Tübbingausbau des TBM-Tunnels hat einen Innendurchmesser von 12,0 m und besteht aus 8+1 vorgefertigten Betonsegmenten. Die Tübbinge haben eine Länge von 2,0 m, eine Dicke von 0,6 m, und das schwerste Element hat ein Gewicht von ca. 15 t. Das Tunnelprofil wird zwei Ebenen mit jeweils zwei Fahrspuren und einer Standspur aufnehmen (Abb. 3). Die Strukturen für die Straßenebenen werden in einem zweiten Schritt hinter der TBM installiert. Die Tunnelkonstruktion ist so ausgelegt, dass lediglich Leichtfahrzeuge (PKWs) den Tunnel passieren können (Abb. 3).

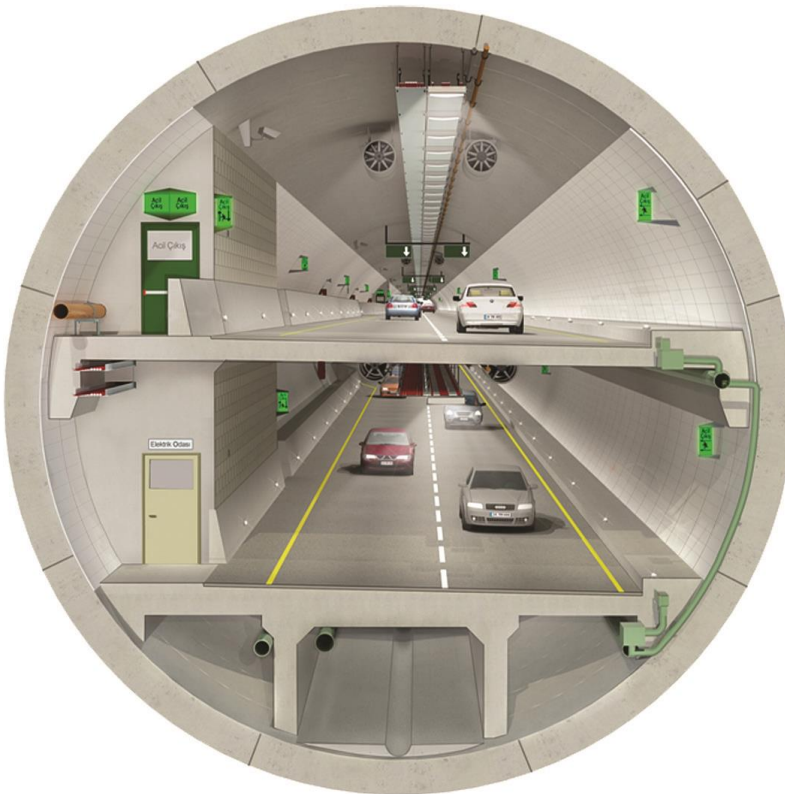


Bild 3 Typischer Querschnitt des Unterwassertunnels

3 TBM-Layout und projektspezifische Konstruktionsmerkmale

Heutzutage stellt eine TBM mit einem Bohrdurchmesser von 13,71 m keine Dimension in der Nähe des „Weltrekords“ mehr dar. Nichtsdestotrotz gehört eine TBM dieser Dimension in die immer noch kleine Gruppe der ausgesprochenen Großmaschinen. Die hohen Projektanforderungen werden besonders deutlich, wenn man betrachtet, welche einzelnen Projektelemente miteinander kombiniert werden müssen:

- der sehr große Durchmesser der TBM
- die unterschiedlichsten Baugründe, einschließlich Fels, Lockerböden mit Steinblöcken, sowie ausgedehnte Übergangszonen.
- der erwartete Druck an der Ortsbrust von über 10 bar in Kombination mit weichen oder heterogenen Baugründen.

Für alle dieser Einzelaspekte gibt es in vorangegangenen Projekten vergleichbare Referenzbedingungen:

- Eine Reihe von Mixschilden oder Erddruckschilden in "Megagröße" der "über 15 m Liga" haben erfolgreich Projekte abgeschlossen oder sind derzeit weltweit unterwegs, was zeigt, dass Konstruktion und Logistik für solch große Tunnel möglich sind (Elbtunnel, M30 Madrid, Schanghai, Galleria Sparvo etc.).
- Für mittlere bis große Tunnelbohrmaschinendurchmesser gibt es Erfahrungen aus dem erfolgreichen Einsatz von Mixschilden in sehr unterschiedlichen Baugründen (Singapur, Inntal, Sydney, etc.).
- Auch lange Unterwassertunnel mit einem durchgehenden Ortsbrustdruck von 7 bar konnten erfolgreich fertiggestellt werden. Und es gibt bereits Erfahrungen mit Mixschild-Vortrieben bei 13 bar an der Ortsbrust (Westerschelde, Schanghai, Lake Mead, etc.).

Die tatsächliche Herausforderung liegt demnach darin, sämtliche Aspekte zu kombinieren.

In Anbetracht der erwarteten Baugründe und Stützdrücke war bereits in einem frühen Projektstadium klar, dass die Slurry- oder Mixschild-Technologie die geeignetste Methode für den maschinellen Tunnelvortrieb sein würde. Weitere Argumente für diese Lösung waren die optimale Eignung bei sehr hohen Ortsbrustdrücken sowie deutliche Vorteile bei heterogenem Baugrund oder Felsgestein. Die Tatsache, dass das "begehbare Schneidrad" für eine "Wartung der Abbauwerkzeuge ohne Druckeinstieg" unter atmosphärischen Bedingungen seit Mitte der 1990er Jahre bereits bei einer Vielzahl von großen Mixschilden eingesetzt worden war, war ein weiteres Argument, was die allgemeinen Aspekte stützte.

Der Mixschild (siehe Tabelle 1 für wichtige technische Daten) und ihr erster Nachläufer wurden vollständig in den Herrenknecht-Werkshallen in Schwanau, Deutschland vormontiert und getestet (Abb. 4). Das umfangreiche Werksabnahme- und Inbetriebnahmeprogramm beinhaltete nicht nur die gesamte Bandbreite an Funktionstests, sondern auch kombinierte Test- bzw. Trainingsprogramme für spezielle Funktionen wie Handling und Transfer der Transportschleuse und Handling bzw. Auswechseln der Abbauwerkzeuge innerhalb des Schneidrads.

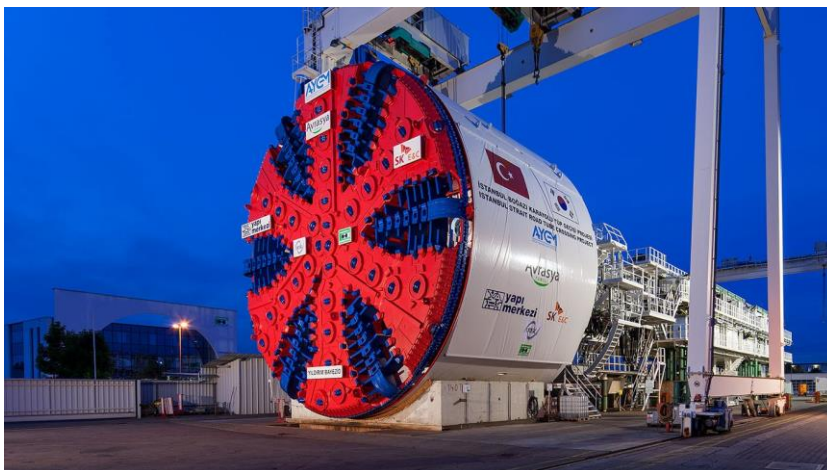


Bild 4 Vormontiertes Mixschild im Herrenknecht-Werk in Schwanau

Der Mixschild besteht aus einer starr verschraubten Schildkonstruktion, die für einen Ortsbrustdruck von bis zu 13 bar auf Achse ausgelegt ist. Der Schild ist mit zwei fest installierten Personenschleusen versehen, wobei eine davon mit einer Anschlussmöglichkeit für die Transportschleuse versehen ist, und verfügt weiterhin über insgesamt drei Materialschleusen. Zusätzlich besteht die Option für eine temporäre Personenschleuse im Zentrumsbereich. Der frequenzgeregelte elektrische Bohrkopftrieb ist längsverschieblich und in einem Gelenklager verkippt. Der Durchmesser des Hauptlagers beträgt 6,0 m. In der Luftpolsterkammer sind ein großer Zangenbrecher vor dem Ansaugrechen sowie ein Tauchwandschieber installiert. Das Speichenschneidrad hat sechs begehbare Hauptspeichen und sechs Hilfsspeichen und ist mit 19" Schneidrollen und Schälmessern vollflächig für gemischte Böden ausgestattet. Im Bereich des doppelwandigen Schildschwanzes befindet sich ein Vakuum-Erektor zum Einbau der Tübbingringe. Als Schildschwanzdichtung ist ein Stahlbürstendichtungssystem eingebaut. Das Verpressen des Ringspalts erfolgt mit Zwei-Komponenten Mörtel durch den Schildschwanz.

Maschinentyp	Mixschild
Hersteller	Herrenknecht AG
Bohrdurchmesser	13,71 m
Gesamtlänge	120 m
Gesamtgewicht	3.300 to
Installierte Leistung	13.300 kW
Schneidrad	Gemischte Ortsbrust, begebar für atmosphärischen Werkzeugwechsel
Abbauwerkzeuge	19", 2-Ring Disken, Schälmesser, von hinten auswechselbar (atmosphärisch)
Schneidrad Leistung	4.900 kW
Drehzahl	0 – 3,2 rpm, elektrisch FU
Drehmoment	34,9 MNm / 37,3 MNm
Schilddurchmesser	Ø 13,66 m,
Max. Betriebsdruck	12 bar
Vortriebskraft	247.300 kN
Förderkreislauf	2.800 m ³ /h, Steinbrecher
Tübbinghinterfüllung	2 Komponenten Mörtel, durch Schildschwanz
Vorausbohrausrüstung	1x permanent eingebaut (+ 1x temporär auf Erektor)
Zugang Abbaukammer	Zwei Personenschleusen, Shuttlebetrieb
Nachlaufsystem	4 Nachlaufwagen, im Tunnel fahrend, MSV Versorgung

Tabelle 1 Technische Hauptdaten des Mixschilds

Das Nachläufsystem besteht aus 4 Wagen, die auf lenkbaren Gummiradsätzen direkt im Tunnel laufen. Zwischen dem vorderen Nachläufer und dem Schild befindet sich eine kurze Brückenkonstruktion für das fest installierte Voraus- und Injektionsbohrgerät. Die Versorgungslogistik im Tunnel wird über Multi-Service-Fahrzeuge (MSV) gewährleistet. Ein einziges MSV kann einen kompletten Ring aus 8+1 Tübbing transportieren. Ein Tübbingförderer mit der Speicherkapazität für einem kompletten Ring befindet sich unterhalb von Nachläufer Nr. 1. Die Nachlaufwagen 1 und 2 beinhalten alle wesentlichen Versorgungssysteme und Aggregate für den TBM-Vortrieb, in Nachläufer 3 und 4 sind zusätzliche Sekundär-Systeme für die TBM und die Installation für die Verlängerung der Versorgungsleitungen im Tunnel eingebaut. Besonderes Augenmerk wurde auf den Transport und das Handling der Transportschleuse für das Sättigungstauchen gelegt.

Die größte Herausforderung für das Projekt sind jedoch die enorme Tiefe unter dem Meeresspiegel und die daraus folgenden Druckverhältnisse im zentralen Abschnitt der Tunneltrasse. Aber es ist nicht allein der hohe Druck, der Probleme bereitet, zusätzlich ist der zentrale Abschnitt durch instabile weiche Baugründe und Übergangszonen geprägt.

Die Wartung des Schneidrads bzw. der Abbauwerkzeuge wird daher zum wichtigsten Aspekt bei der Konstruktion und dem Betrieb der TBM. Bei solch hohen Stützdrücken ist ein konventioneller Druckluftestieg auch unter der Verwendung von Mischgas mit anschließender Dekompression in der TBM-Personenschleuse keine mögliche Option für Wechsel und Wartung der Abbauwerkzeuge. Die einzige realistische Option für einen Kammereinstieg besteht im Sättigungstauchen, d.h. die Wartungsmannschaft arbeitet einen längeren Zeitraum unter Druckverhältnissen und wechselt zwischen dem hyperbarischen Habitat und der TBM in einem mit Druck beaufschlagten Transfer-Shuttle [2]. Aus diesem Grund integriert das Schneidrad- und Maschinenkonzept so viele Konstruktionsmerkmale wie möglich, um Wartungsarbeiten ohne Druckestieg zu ermöglichen. Dazu tragen auch die Möglichkeit der Datenfernabfrage, die über den Zustand der Schneidradstruktur und der Abbauwerkzeuge informiert, sowie konstruktive Lösungen innerhalb des Schneidrads bei, die erlauben, verschlissene Abbauwerkzeuge zu wechseln, ohne dass die Wartungsmannschaft sich in den Druckbereich der Abbaukammer begeben muss. Es ist jedoch unbedingt notwendig, dass die TBM alternativ für konventionelle Druckluft- oder Mischgasinterventionen sowie für Sättigungstauchen vorbereitet und ausgerüstet ist.

4 Überwachungs- und Wartungsmerkmale für Schneidrad bzw. Abbauwerkzeuge

Um möglichst viele Optionen zur Verfügung zu haben, die die Notwendigkeit für Druckluftestiege reduzieren, wurde eine Reihe von Einrichtungen für eine Zustandsüberwachung des Abbausystems ohne die Notwendigkeit eines Kammereinstiegs.

4.1 Zustandsüberwachungssysteme

- ein voll bewegliches Schneidrad in Kombination mit einem Datenverarbeitungssystem, das die Schneidradbelastung, einschließlich exzentrischer Lasten in Echtzeit darstellt
- elektronisches Disc Cutter Rotation Monitoring (DCRM) System für jede einzelne Schneidrolle zur Echtzeitermittlung des Schneidrollenzustands

Istanbul Strait Road Tunnel

- mechanische Verschleißsensoren für jede einzelne Schneidrolle
- definierte Messpunkte für regelmäßige Ultraschalldickenmessungen der Schneiradstruktur von innen
- Überwachungsschleifen in bestimmten Sektoren zur Feststellung des strukturellen Verschleißes an der Vorder- und Rückseite des Schneirads
- dauerhaft installierte Kamera in der Abbaukammer

4.2 Werkzeugwartungssysteme

- ein vollständiger Satz 19" Doppelschneidrollen, einschließlich Zentrums- und Peripheriebestückung, die unter atmosphärischen Bedingungen von innerhalb der Schneiradstruktur auswechselbar sind
- ein vollständiger Satz Schälmesser für jede Drehrichtung, der unter atmosphärischen Bedingungen von innerhalb der Schneiradstruktur auswechselbar ist
- Option für die temporäre Installation einer Personenschleuse im Zentrumsbereich, oder alternativ einer Transportschleuse für eine Druckluftbeaufschlagung des Schneiradinneren, um Druckluftarbeiten innerhalb der Schneiradstruktur zu ermöglichen, ohne dass die Mannschaft sich an der Ortsbrust aufhalten muss; die zulässige Dauer der Druckluftarbeiten im Schneiradarm hängt dann vom jeweils notwendigen Druck während des Einstiegs ab.

Zusätzlich zu dem primären vollständigen Werkzeugsatz für einen Wechsel unter atmosphärischen Bedingungen, der sich an den 6 Hauptspeichen befindet, ist ein zweiter Satz Schälmesser, einschließlich konventioneller Räumern an der Peripherie in den Hilfsschneiradarmen installiert (Abb. 5). Eine Wartung dieses zweiten Werkzeugsatzes erfordert jedoch einen konventionellen Kammereinstieg, je nach Stützdruck konventionell unter Verwendung von Druckluft bzw. Mischgas oder aber mittels Sättigungstauchen.



- Hauptspeiche, drucklos begehrbar
- Hilfsspeiche, konventionell
- 19" Zweiring Schneidrollen, drucklos wechselbar
- Schälmesser, drucklos wechselbar
- Schälmesser, konventionell
- Überwachungsschleife Strukturverschleiß
- Räumwerkzeuge, konventionell

Bild 5 Schneiradmerkmale

Die Schneiradkonstruktion mit begehbaren Speichen und einem Werkzeugwechsel unter atmosphärischen Bedingungen geht zurück auf ein Patent aus dem Jahr 1994, das erstmals 1996 für das 14,2 m Mixschild für die 4. Elbtunnelröhre eingesetzt wurde (Abb. 6). Damals beinhaltete das Konzept eine teilflächige Ausstattung mit 17" Doppelschneidrollen und Schälmessern, eine Lösung für einen Zentrumsbesatz mit atmosphärisch wechselbaren Werkzeugen gab es zu dieser Zeit noch nicht. Nach erfolgreicher Fertigstellung des Elbtunnel-Projekts wurde das Konzept eines Werkzeugwechsels unter atmosphärischen Bedingungen weiterentwickelt und in einer Reihe von Mixschilden mit großem Durchmesser in mehreren Projekten in China eingesetzt.

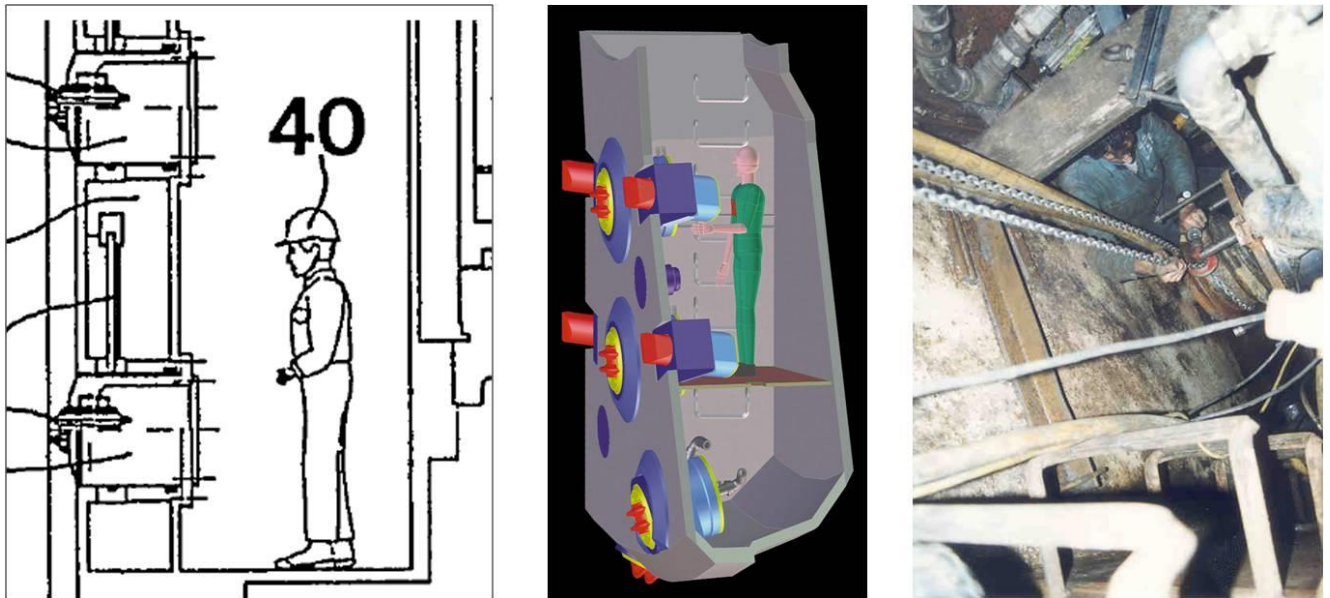
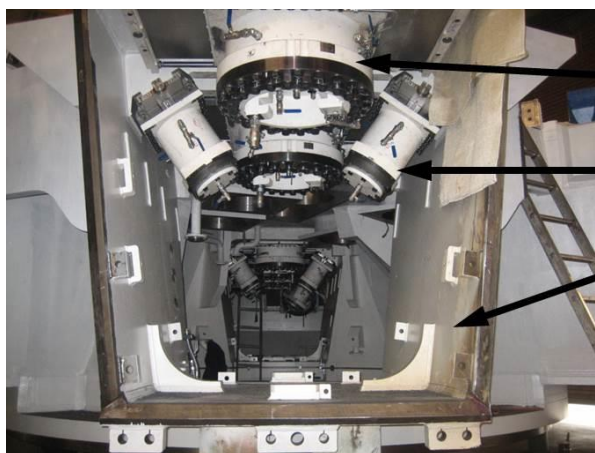


Bild 6 Erste Entwurfskonstruktion (links und mitte) und erst Anwendung vor Ort des atmosphärischen Werkzeugwechselsystems beim Elbtunnel 1996



Halterung 19" Zweiringschneidrolle, drucklos wechselbar

Halterung Schälmesser, drucklos wechselbar

Hauptarm, drucklos begebar

Bild 7 Inneres des Schneirads mit Rückansicht für unter drucklosen Bedingungen wechselbare Abbauerzeug während der Vormontage des Schneirads

Das Mixschild für das "Istanbul Strait Crossing Projekt" ist nun mit der neusten 19" Version einschließlich eines vollständigem Zentrumsbesatzes sowie individuellen Sensorsystem an den Werkzeugen ausgestattet. Verglichen mit den vorherigen Versionen erlaubt das System jetzt die leistungs-

fähigeren 19" Abbaugeräte mit interner Druckkompensation. Der Wechselmechanismus funktioniert ähnlich wie der vorherige mit Flachschiebern an der Vorderseite und einem rückziehbaren runden Werkzeuggehäuse. Im Gegensatz zu früheren Lösungen ist der Wechselmechanismus jedoch größer und der Verschlusschieber und die rückziehbaren Werkzeuggehäuse werden jetzt vollständig hydraulisch betätigt (Abb. 7). Für den Zentrumsbereich mussten spezielle Versionen entwickelt werden, um die geometrischen Einschränkungen auszugleichen. Der begehbare innere Bereich des Schneidrads hat eine Zugangsöffnung durch die Zentrumsdruckwand, wobei üblicherweise der Zugang unter Normaldruckbedingungen erfolgt, jedoch im Fall von besonderen Umständen oder in Notfällen ebenfalls unter Druckluft stattfinden kann. Sämtliche Ausrüstungsteile und Hilfswerkzeuge die für den Werkzeugwechsel und Transport innerhalb der Maschine benötigt werden sind ebenfalls Bestandteil der Maschinenlieferung (Abb. 8).



Bild 8 Test und Training für Schneidrollenwechsel innerhalb des Schneidrads während der Inbetriebnahme der TBM

5 Handling und Transfer des Shuttle

Von Anfang an wurde besondere Sorgfalt auf das Konstruktionskonzept für sicheres und effizientes Handling und Transfer der Transportschleuse (auch Shuttle genannt) gelegt, das die Wartungsmannschaft von der Oberfläche in die Arbeitskammer der TBM befördert. Auch wenn die bevorzugte Methode bei der Wartung der Abbaugeräte auf dem Konzept des begehbaren Schneidrads ohne Druckanstieg basiert, muss als Rückfallebene zwingend die Möglichkeit eines Kammereinstiegs zum Werkzeugwechsel unter Sättigungstauchen gegeben sein.

Der Transport des Shuttle im Tunnel findet auf einem speziell dafür ausgerüsteten MSV statt. Sobald das Shuttle unter Nachläufer Nr. 2 angelangt ist, wird es aufgenommen und von einem fest installierten hydraulischen Hebesystem, das in diesem Nachläufer eingebaut ist, auf das Mitteldeck des Nachläufers gehoben (Abb. 9). Es ist ein durchgehender und permanent verfügbarer Durchfahrtskorridor bis zur Schildrückseite vorgesehen. Wenn das Shuttle vor dem Erektor angekommen ist, bewegt ein

Istanbul Strait Road Tunnel

ständig installiertes hydraulisches Hebesystem das Shuttle in die Hauptdockposition an der oberen Personenschleuse oder zur Nebendockposition am Zugang zum Schneidradzentrum.

Das gesamte System, das den Sättigungsprozess stützt, wurde in Anlehnung an den ITA-Report Nr. 10 [3] konzipiert und von Beginn an mit der deutschen Fachfirma Nordseetaucher koordiniert, die das Joint Venture als Partner für Druckeinstiege ausgewählt hat.



a.)



b.)



c.)



d.)

Bild 9 Transfer und Handling des Shuttles entlang der TBM

a.) Hydraulische Hebevorrichtung vom MSV zum Mitteldeck des Nachläufers

b.) Shuttle-Durchfahrt durch das Mitteldeck des Nachläufers

c.) Shuttle-Transport im Nachläufer mit Zugmaschine

d.) Hydraulische Hebevorrichtung zur Andockstation an der oberen Personenschleuse im Schild

6 Fazit

Mit dem Mixschild für das "Istanbul Strait Crossing Projekt" wird der nächste Schritt in der Konstruktion von Großmaschinen für schwierige Baugründe vollzogen. Anspruchsvolle heterogene Baugründe verlangten in Kombination mit hohem Wasserdruck und immer größeren Schwierigkeiten, entlang der Tunneltrasse "safe havens" für die Schneidradwartung zu finden, angepasste Lösungen. Der zweifache Ansatz, der auf der einen Seite ein Wartungskonzept ohne Druckeinstieg mit kompletten Sätzen von unter atmosphärischen Bedingungen begehbaren Abbauwerkzeugen, und auf der anderen Seite die vollständige Auslegung für Druckeinstiege oder sogar Sättigungsprozesse vorsieht, bietet eine optimale Lösung für diese Bedingungen.

Literatur / Referenzen:

[1] Homepage Eurasia Tunnel Project www.avrasyatuneli.com

[2] Burger, W. Wehrmeyer, G.: Einstieg in die Abbaukammer bei Vortriebsmaschinen mit gestützter Ortsbrust. Taschenbuch für den Tunnelbau 2013, S. 183 – 202, Essen: VGE Verlag GmbH

[3] International Tunnelling and Underground Space Association, Report Nr. 10.: Guidelines for good working practice in high pressure compressed air, ITA WG 5. Februar 2012