

## Maschinentechnische Neuerungen bei Mixschild- und EPB-Technik für 2 Großprojekte in Skandinavien

Dr. M. Herrenknecht, Dr. Karin Böppler, W. Burger

Im Fokus des Beitrags, der anlässlich der STUVA-Tagung 2009 in Hamburg präsentiert wurde, stehen maschinentechnische Neuerungen im Bereich der Mixschild- und EPB-Technik. Vorgestellt werden die Neuerungen am Beispiel zweier Großprojekte in Skandinavien, die auf den jeweiligen Projektanforderungen und Vortriebs-erfahrungen basieren und nun als Stand der Technik einzustufen sind.

In der Entwicklung der maschinellen Tunnelvortriebstechnik haben sich in den vergangenen Jahren 2 Tendenzen herausgebildet: Zum einen sind die Anforderungen an die Maschinentechnik signifikant gestiegen. Zum anderen sind in den Projekten immer komplexere baugrundtechnische und logistische Herausforderungen zu bewältigen.

Die Baugrundverhältnisse sowie vor allem lange Tunneltrassen bei großen Tunnelquer-

schnitten und zunehmend auch höhere Grundwasserdrücke definieren grundsätzlich die Realisierbarkeit maschineller Tunnelvortriebe. Erfordernisse über Tage (dichte innerstädtische Bebauung, beengte Platzverhältnisse an Start- und Ziel-schacht) bestimmen bei immer mehr Projekten die Auslegung von Vortriebsanlagen und stellen Herausforderungen an die Baustellenlogistik.

Die zukunftsweisenden Infrastrukturprojekte verlangen nach einer ausgereiften und stets an die wachsenden Erfordernisse angepassten Maschinentechnik. So finden z. B. die Mixschilde sowohl in ihrer klassischen Betriebsart als Schild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, als auch als Schild mit wechselnder Betriebsart, ein breiter werdendes Anwendungs-

Dr. E.h. Martin Herrenknecht,  
Vorstandsvorsitzender,  
Herrenknecht AG, Schwanau/D  
Dr.-Ing. Karin Böppler,  
Herrenknecht AG, Schwanau/D  
Dipl.-Ing. Werner Burger,  
Herrenknecht AG, Schwanau/D

## Engineering Innovations for Mix-Shield and EPB Technology for two major Projects in Scandinavia

Dr. M. Herrenknecht, Dr. Karin Böppler, W. Burger

The report concentrates on engineering innovations in conjunction with mix-shield and EPB technology. It was presented at the 2009 STUVA Conference in Hamburg. These innovations are displayed on the basis of two major projects in Scandinavia, which are founded on the given project requirements and experiences gained during tunnelling, which can now be categorised as state of the art.

Two trends have become discernible in the development of mechanised tunnel driving technology in recent years: firstly demands on the engineering technology have risen significantly. Secondly ever more complex challenges have to be mastered regarding the technical and logistical aspects of projects.

Essentially the feasibility of mechanised tunnel driving is governed by the subsoil conditions as well as long tunnel routes given major tunnel cross-sections and ever more frequently even greater groundwater pressures. Surface requirements (densely built-up inner urban areas, constricted space conditions at the access and target shafts) determine the design of tunnelling installations for an increasing number

of projects and pose challenges on the construction site logistics.

These future-oriented infrastructural projects call for mature engineering technology that is adapted to growing demands. Thus mix-shields both in their classical operating mode as a shield with fluid-supported face as well as a shield with alternating operating mode, are being used for an ever increasing range of applications. This type of machine has turned out

Dr. E. h. Martin Herrenknecht,  
CEO, Herrenknecht AG,  
Schwanau/D  
Dr.-Ing. Karin Böppler,  
Herrenknecht AG, Schwanau/D  
Dipl.-Ing. Werner Burger,  
Herrenknecht AG, Schwanau/D

gebiet. Dieser Maschinentyp erweist sich aufgrund seines Maschinenkonzepts als Generalist für Projekte mit hohen Anforderungen. Hierzu parallel haben auch die Erdruckschilde durch den Einsatz der Schaumkonditionierung eine Erweiterung ihres Einsatzbereichs erfahren und damit nach Projekterfolgen in Fernost auch in Europa eine erhebliche Verbreitung gefunden. Gegenwärtig werden Erdruckschilde auch bei heterogenen Baugrundverhältnissen (Locker- und Festgestein) eingesetzt.

### Infrastrukturprojekte in Skandinavien

In Skandinavien sind derzeit 2 der größten Infrastrukturprojekte im Bau. Es handelt sich hierbei um den Citytunnel Malmö und den Eisenbahntunnel Hallandsas in Schweden.

Der Citytunnel Malmö ist ein Eisenbahninfrastrukturprojekt, mit dem neben der verbesserten Anbindung des schwedischen Eisenbahnnetzes an das gesamteuropäische Hochgeschwindigkeitsnetz auch eine bessere Anbindung von Malmö an die Öresundbrücke und damit an die Metropolregion Kopenhagen geschaffen wird. Das Citytunnel-Projekt umfasst eine 17 km lange Eisenbahnstrecke, wovon zwei 4,6 km lange eingleisige Tunnelröhren im Rahmen des größten Bauloses E201 dieses Projektes mit maschineller Tunnelvortriebstechnik aufgeföhren wurden.

Für den Eisenbahntunnel Hallandsas an der Westküste Schwedens werden 2 parallele Röhren von 8,6 km aufgeföhren. Der Tunnel ist Teil der Verbindungsstrecke Malmö-Göteborg, die zur Hochgeschwindigkeitsstrecke ausgebaut werden soll. Im Einsatz hierfür ist ein Mixschild, das vom offenen Hartgesteinsmodus ohne Druck auf einen geschlossenen flüssig-

keitsgestützten Modus umgestellt werden kann.

Die für diese beiden Großprojekte zum Einsatz kommende Maschinentchnik muss komplexen baugrundtechnischen und logistischen Herausforderungen gerecht werden. Entsprechend wurden bzw. werden die Tunnelvortriebsanlagen einem ständigen Optimierungsprozess unterzogen, um auch zukünftige Bauvorhaben mit projektspezifisch angepasster Maschinentchnik sicher und effizient bewältigen zu können.

### Citytunnel Malmö

Der zweiröhriige Citytunnel Malmö hat eine Gesamtlänge von rd. 6 km und verbindet die Eisenbahntrasse aus Dänemark über die Öresundbrücke kommend mit dem Hauptbahnhof der Stadt Malmö und dem skandinavischen Eisenbahnnetz. Das Gesamtprojekt besteht aus 4 Einzellösen E101, E201, E301 und E302. Im Rahmen des größten Bauloses E201 des Projektes Citytunnel Malmö wurden 2 parallele eingleisige Tunnelröhren von 4,6 km Länge mit 2 Tunnelbohrmaschinen aufgeföhren.

Der Auftrag für die Planung und Ausführung des Bauloses E201 wurde im Jahr 2004 an die Arbeitsgemeinschaft „Malmö Citytunnel Group“ (MCG) unter der Federführung des deutschen Unternehmens Bilfinger Berger AG, Mannheim und 2 dänischen Firmen, Per Aarsleff A/S und E. Phil & Son A.S. erteilt.

Die beiden 4,6 km langen Tunnelröhren im Schildvortrieb mit Tübbingausbau haben einen Innendurchmesser von 7,90 m. Der Abstand zwischen den Röhren variiert zwischen 10 und 30 m. Des Weiteren beinhaltet der Auftrag für das Teillos E201 eine 390 m lange Rampe, einen 360 m langen

to be a multi-purpose weapon for projects posing high demands by dint of its engineering concept. Parallel to this EBP shields have extended their range of applications thanks to the introduction of foam conditioning and have gained in popularity following successful projects in the Far East in Europe as well. At present EPB shields are also being used for heterogeneous subsoil conditions.

### Infrastructural Projects in Scandinavia

Currently 2 major infrastructural projects are being built in Scandinavia: the Malmö Citytunnel and the Hallandsas rail tunnel in Sweden.

The Malmö Citytunnel is a railway infrastructural project that provides Malmö with a better link to the Öresund Bridge and in turn with the Copenhagen metropolitan region quite apart from connecting the Swedish railway network more satisfactorily to the entire pan-European high-speed system. The Citytunnel project embraces a 17 km long railway route including two 4.6 km long tunnel tubes within the scope of the project's biggest contract section E201 driven by mechanised tunnelling technology.

Two 8.6 km long parallel tubes are excavated for the Hallandsas rail tunnel on Sweden's west coast. The tunnel constitutes a part of the line connecting Malmö with Göteborg, which is to be developed as a high-speed route. A mixshield is used for this purpose, which can be converted from open hard rock mode without pressure to a closed fluid-supported system.

The engineering technology applied for these two major projects must master complex subsoil technical and logistical challenges. Towards this end

the tunnelling installations were and still are subject to a constant optimisation process so that future construction projects can also be tackled safely and efficiently with engineering technology adapted to the specific project.

### Malmö Citytunnel

The twin-bore Malmö Citytunnel is altogether some 6 km long and links the rail route from Denmark approaching via the Öresund Bridge with Malmö Central Station and the Scandinavian railway network. The overall project consists of 4 individual contract sections E101, E201, E301 and E302. Within the scope of the biggest contract section E201 of the Malmö Citytunnel project two 4.6 km long parallel single-track tubes were excavated with 2 tunnel boring machines.

The contract for planning and executing contract section E201 was awarded in 2004 to the "Malmö Citytunnel Group" (MCG) JV under the leadership of the German company Bilfinger Berger AG, Mannheim and 2 Danish companies, Per Aarsleff and E. Phil & Son A.S.

The two shield-driven 4.6 km long tubes with segmental lining possess a 7.90 m internal diameter. The gap between the tubes varies from 10 to 30 m. The contract for sub-section E201 also involves a 390 m long ramp, a 360 m long cut-and-cover tunnel, the "Triangeln" station (280 m), 4 pressure compensation shafts and 2 emergency exit shafts as well as 13 cross-passages.

The construction of the parallel bores created by mechanised tunnel driving is dealt with in particular.

The tubes were driven at a depth varying from roughly 20 to 25 m. The prevailing formations consist of a 6 to 12 m thick quaternary covering layer set

Cut-and-Cover-Tunnel, den Bahnhof „Triangeln“ (280 m), 4 Druckausgleichschächte und 2 Notausstiegschächte sowie 13 Querschläge.

Im Besonderen wird auf den Bau der mit maschineller Tunnelvortriebstechnik erstellten parallelen Tunnelröhren eingegangen.

Die Röhren wurden in einer Tiefe von etwa 20 bis 25 m aufgeföhren. Die anstehenden Formationen umfassen eine 6 bis 12 m dicke quartäre Deckschicht auf einem ca. 60 m mächtigen Schichtpaket aus tertiären Kalken. Diese weisen stark unterschiedliche Festigkeiten auf. Der Grenzbereich zwischen Deckschicht und dem Fels wurde als angewittert und somit stark Wasser föhrend charakterisiert.

Eingesetzt wurden 2 auf die Geologie abgestimmte baugleiche, je 120 m lange Erddruckschilde mit einem Durchmesser von 8,89 m. Die Maschinen waren auf die in Malmö anstehenden Grundwasserdrücke von bis zu 2,0 bar ausgelegt. Ende November 2006 startete der erste Schild von der Station „Holma“ bei km 5+320 zum Ziel „Malmö C“ bei km 0+448; der zweite Erddruckschild nahm den Vortrieb im Januar 2007 auf.

Das Schneidrad wurde an die zu erwartenden geologischen



1 Durchstich Vortriebsanlage Citytunnel Malmö, EPB-Schild mit 8,89 m Durchmesser

1 Breakthrough of the Citytunnel Malmö tunnelling installation, EPB shield with 8.89 m diameter

Bedingungen angepasst und mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet. Es war mit 124 Schälmessern, 46 Einfachdisken (17"), 4 Doppeldisken (17") und 16 Räumern bestückt. Alle Werkzeuge sind von der Rückseite des Schneidrades aus sicher und effizient wechselbar.

Nach einem Vortrieb von 2,7 km bis zur Station Triangeln erreichte die erste Maschine nach 9 Monaten ihr erstes Etappenziel. In der Station „Triangeln“ wurde die Maschine durch die 280 m lange Station gezogen und dort überholt, um die restlichen 1,9 km in Richtung Zielschacht „Malmö C“ (Malmö Central, Hauptbahnhof)

on a roughly 60 m thick zone of tertiary limestones, which possess varying thicknesses. The border area between the covering layer and the rock was characterised as weathered and thus strongly water-bearing.

Two identical EPB shields, each 120 m long with 8.89 m diameter and geared to the geology were applied. The machines were devised for the prevailing groundwater pressures in Malmö of up to 2.0 bar. The first shield started from „Holma“ station at km 5+320 towards the target „Malmö C“ at km 0+448 at the end of November 2006; the second EPB shield began excavating in January 2007.

The cutting wheel was adjusted to the expected geological conditions and fitted with an electric drive. It was equipped with 124 cutters, 46 single discs (17"), 4 double discs (17") and 16 buckets. All the tools can be replaced safely and efficiently from the rear of the cutting wheel.

After excavating 2.7 km up to Triangeln station the first machine reached its first stage target after 9 months. In the „Triangeln“ station the machine was pulled through the 280 m long structure and overhauled there in order to drive the remaining 1.9 km towards the „Malmö C“ (Malmö Central) target shaft. In March and April 2008 the 2 machines reached their goal „Malmö C“ with rates of advance of up to 239 m per week (Fig. 1).

The tunnel with 7.90 m internal diameter was lined with watertight reinforced concrete segments. A uni-ring with a smooth annular joint and guide rods was applied in the longitudinal joints. Intermediate layers in the level annular joints and bolting of the segments in the longitudinal joints were not foreseen apart from at the keystone. The 1.8 m long segmental ring was produced using 7+1 elements. The segments weigh 5 to 6 t with the keystone weighing 1 t.

aufzufahren. Im März bzw. April 2008 erreichten beide Maschinen ihr Ziel „Malmö C“ mit Vortriebsleistungen von bis zu 239 m pro Woche (Bild 1).

Der Tunnel mit einem Innendurchmesser von 7,90 m wurde mit wasserdichten Stahlbetontübbingungen ausgekleidet. Zur Ausführung kam ein Uni-Ring mit glatter Ringfuge und Führungsstangen in den Längsfugen. Zwischenlagen in den ebenen Ringfugen und Tübbingverschraubung in den Längsfugen wurden außer am Schlussstein nicht vorgesehen. Pro Tübbingring von 1,8 m Länge wurden 7+1 Elemente zu einem Ring zusammengesetzt. Die Tübbinge haben ein Gewicht von 5 bis 6 t, der Schlussstein wiegt 1 t.

Die Tübbingfabrikationsanlage wurde in Holma, gegenüber des Tunnelportals, eingerichtet.

Die für die in Summe 4,6 km langen doppelröhrigen Tunnel erforderlichen insgesamt 13 Querschläge wurden bei laufendem TBM-Vortrieb realisiert. Im hinteren Bereich des Nachläufers werden Sohlsegmente eingebaut, die einen zweigleisigen Betrieb im Tunnel ermöglichen. Während des Vortriebs besteht somit die Möglichkeit, die Querschläge zur Verbindung der beiden Tunnelröhren zu erstellen. Die Abmes-

sungen der Elemente ermöglichen dem mittig fixierten Streckengleis auch die Aufnahme eines örtlich benötigten Ausweichgleises. Dies konnte höhengleich verschwenkt werden.

Die Andienung der Maschine mit Tübbing und Vortriebsmaterial sowie der Personentransport wurden über das Gleis organisiert.

### Hallandsas-Eisenbahntunnel

An der schwedischen Westküste wird derzeit die Zugverbindung von Malmö nach Göteborg zu einer Hochgeschwindigkeitsstrecke ausgebaut. Der Abschluss und die Inbetriebnahme der neuen zweigleisigen Bahnverbindung für Hochgeschwindigkeitszüge wird die Fahrzeit zwischen den beiden Städten um 2 Stunden verkürzen. Darüber hinaus steigt die Gesamtkapazität der Bahnverbindung von 4 Zügen pro Stunde auf 24 Züge pro Stunde.

Eine Herausforderung entlang dieser Strecke stellt die Querung des Hallandsas-Höhenzugs südlich von Bastad dar, für die ein umbaubares Mixschild mit einem Durchmesser von 10,6 m im Einsatz ist.

Erste Versuche, den Tunnel bergmännisch aufzufahren, scheiterten Mitte der 1990er

The segment factory was set up in Holma across from the tunnel portal.

The total of 13 cross-passages required for the altogether 4.6 km long twin-tube tunnel were produced as the TBM drive progressed. Base segments were installed in the back-up's rear zone, which enabled a two-track operation in the tunnel. During the drive it is thus possible to create the cross-passages joining the 2 tunnel bores. The dimensions of the elements made it possible to set up a passby siding that was required locally in addition to the central track. This could be swivelled at the same height.

The track ensured that the machine was supplied with segments and driving material in addition to transporting personnel.

### Hallandsas Railway Tunnel

Currently the rail link between Malmö and Göteborg is being developed as a high-speed route on the Swedish west coast. When the new twin-track rail link for high-speed trains is concluded and put into service the travelling time between the 2 cities will be cut by 2 hours. In addition the total capacity of the rail link will be in-

creased from 4 to 24 trains per hour.

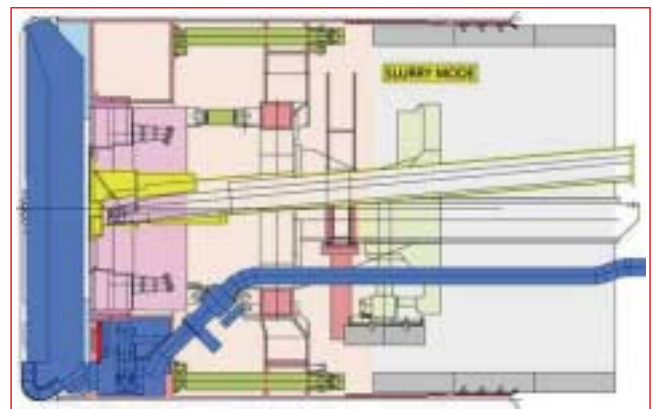
One challenge along this route is posed by crossing the Hallandsas range to the south of Bastad, towards which end a convertible mix-shield with 10.6 m diameter is being applied.

Initial attempts to drive the tunnel by mining means were thwarted in the mid-1990s owing to geological conditions that were difficult to master such as high water pressures and inflowing water as well as strongly fissured rock.

Bids were once again invited for the project requiring a 9.4 m internal diameter for the 5.5 km long tunnel preferably using mechanised tunnelling technology. Owing to the attempts that had previously failed strict environmental requirements especially regarding the groundwater were laid down.

The Swedish Central Office for Railways (Banverket) is the client for the project. A Swedish-French consortium Skanska-Vinci was awarded the contract to accomplish the project.

The prevailing geological formations along the planned tunnel route mainly consist of gneiss with amphibolite intrusions. The uni-axial compressive strengths of the freshly exposed rock can be as much as 250 MPa;



2 Dualmodus-Mixschild für Hartgestein

2 Dual-mode mix-shield for hard rock

Jahre an schwer zu beherrschenden geologischen Bedingungen wie hohen Wasserdrücken bzw. Zuflussmengen und teils stark zerklüftetem Gebirge.

Das Projekt wurde erneut ausgeschrieben mit der Forderung nach einem Innendurchmesser des Tunnels von 9,4 m bei einer Tunnellänge von 5,5 km und dem bevorzugten Einsatz maschineller Tunnelvortriebstechnik. Aufgrund der vorangegangenen gescheiterten Versuche wurden strikte Umweltauflagen insbesondere bezüglich des Grundwassers gemacht.

Bauherr des Projektes ist das Schwedische Zentralamt für Eisenbahnwesen (Banverket). Der Zuschlag für die Realisierung des Bauvorhabens ging an das schwedisch-französische Konsortium Skanska-Vinci.

Die anstehenden geologischen Formationen entlang der geplanten Tunneltrasse bestehen hauptsächlich aus Gneis mit Einschlüssen von Amphibolit. Die einaxialen Druckfestigkeiten des frisch anstehenden Felses können bis zu 250 MPa erreichen; der Cerchar Abrasivitätsindex (CAI) liegt im Allgemeinen über 4,5, wobei Werte von bis zu 5,9 gemessen wurden. Die Gesteine werden somit als sehr abrasiv klassifiziert.

Der Grundwasserdruck auf Tunnelniveau erreicht 13 bar. Entsprechend ergeben sich die größten Herausforderungen im maschinellen Vortrieb beim Projekt Hallandsas in Bezug auf erwartete hohe Wasserzuflüsse und auf eine gleichzeitig strikte gesetzliche Limitierung der zulässigen Entnahmemengen. Ebenso wurde das Antreffen von begrenzten Störzonen mit Lockergestein und ähnlichem Verhalten nicht ausgeschlossen.

Vor diesem Hintergrund wurden erste konzeptionelle Entwicklungen bei Herrenknecht auf Basis der Hauptan-

forderungen der Cerchar abrasiveness index (CAI) generally lies in excess of 4.5, with values of up to 5.9 recorded. As a consequence the rocks are classified as being extremely abrasive.

The groundwater pressure at tunnel level reaches 13 bar. Consequently the greatest challenges for mechanised driving in the case of the Hallandsas project are posed by expected high water inflows and at the same strict legal limitation of the permissible withdrawal quantities. In addition encountering limited fault zones with soft ground and similar conditions was not precluded.

Against this background initial conceptual developments were undertaken at Herrenknecht based on the main requirements dating from 1999/2000. The project at this point in time was still at the preliminary tendering phase. Technology had to adapt to the following requirements:

- Removal of hard and abrasive rock formations
- Removal of soft ground or mixed face conditions
- Danger of penetration of large quantities of water along the entire tunnel route
- More than 10 bar static water pressure along the bulk of the tunnel route
- Strict (legal) environmental conditions governing the amount of inflowing water
- Strict environmental conditions and approval procedures for the materials and methods applied.

It soon became evident that only a shield machine with sealed tunnel lining (segments) would be able to completely comply with these requirements in the event of a mechanised tunnelling solution. The TBM had to be capable of performing both in an open and closed driving mode so that the most unfavourable geological and construction technical con-



3 TBM S-246 Hallandsas in der Vormontage im Werk

3 TBM S-246 Hallandsas being pre-assembled at the factory



forderungen im Jahre 1999/2000 vorgenommen. Das Projekt befand sich zu diesem Zeitpunkt noch in der Vor-Ausschreibungsphase. Die Technik musste auf folgende Anforderungen angepasst werden:

- Abbau von harten und abrasiven Felsformationen
- Abbau von weichem Boden oder gemischten Ortsbrustverhältnissen
- Gefahr des Eindringens großer Wassermengen entlang der gesamten Tunnellänge
- Mehr als 10 bar statischer Wasserdruck entlang des überwiegenden Anteils der Tunneltrasse
- Strikte (gesetzliche) Umweltauflagen hinsichtlich der Wasserzuflussmenge
- Strikte Umweltauflagen und Genehmigungsverfahren für die verwendeten Materialien und Methoden.

Sehr schnell wurde deutlich, dass im Falle einer mechanisierten Tunnelvortriebslösung nur eine Schildmaschine mit abgedichteter Tunnelauskleidung (Tübbing) diese Anforderun-

gen vollständig erfüllen könnte. Die TBM sollte in einem offenen und auch geschlossenen Vortriebsmodus betrieben werden können, um die ungünstigsten geologischen und bautechnischen Bedingungen, wie maximale Wasserdrücke und komplexe Gebirgsbedingungen, sicher beherrschen zu können. Der flüssigkeitsgestützte Modus stellte somit die einzig mögliche Option für den geschlossenen Modus dar.

Im Januar 2004 erhielt Herrenknecht den Auftrag, eine Tunnelvortriebsmaschine entsprechend den Anforderungen zu liefern (Tabelle). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Abbau im geschlossenen Modus unter hohem Druck bei hartem Fels und gemischten Bedingungen an der Ortsbrust den schwierigsten Betriebsmodus darstellt, sollten umfangreiche Möglichkeiten für baugrundstabilisierende Maßnahmen vom Inneren der Maschine aus integriert werden, um den Betrieb im offenen Modus zu unterstützen. Für ein

ditionen such als maximum water pressures and complex rock conditions could be safety mastered. The fluid-supported mode thus represented the sole possible option for the closed mode.

In January 2004 Herrenknecht was commissioned to supply a tunnelling machine commensurate with the requirements (Table). Taking into consideration that excavation by the closed mode under high pressure given hard rock and mixed conditions at the face represents the most difficult operating mode, extensive possibilities for measures designed to stabilise the subsoil from inside the machine had to be integrated so that operation in open mode was supported. The following operating modes are available for such a concept involving a dual-mode mix-shield for hard rock (Fig. 2):

- Open mode with dry, primary material removal (TBM belt conveyor)
- Open mode with (cyclical) measures designed to stabilise

the subsoil (advance grouting)

- Open mode with (cyclical) measures designed to stabilise the subsoil under closed static conditions
- Closed mode with hydraulic (slurry) conveyance system with reduced pressure at the face
- Closed mode with full pressure at the face allowing active face support.

For the tunnelling machine used for the Hallandsas project it was essential that it can be operated with 13 bar supporting pressure and that the chambers can be entered by means of saturation diving given high pressure conditions. In this way the machine is completely furnished for extraction in the open hard rock mode with a single shield TBM as well as for excavating in slurry operation in closed mode with active face support up to a maximum dynamic pressure of 13 bar (Fig. 3).

The Hallandsas tunnel project with a history now stretching back for more than 15 years represents one of the

solches Konzept eines Dualmodus-Mixschields für Hartgestein stehen folgende Betriebsmodi zur Verfügung (Bild 2):

- Offener Modus mit trockenem, primärem Materialaustrag (TBM-Förderband)
- Offener Modus mit (zyklischen) baugrundstabilisierenden Maßnahmen (Vorausinjektionen)
- Offener Modus mit (zyklischen) baugrundstabilisierenden Maßnahmen unter geschlossenen statischen Bedingungen
- Geschlossener Modus mit hydraulischem (Slurry-)Fördersystem bei reduziertem Druck an der Ortsbrust
- Geschlossener Modus bei vollem Druck an der Ortsbrust und der Möglichkeit der aktiven Ortsbruststützung.

Für die im Projekt Hallandsås eingesetzte Tunnelvortriebsmaschine war als Anforderung festgelegt, dass sie mit einem Stützdruck von 13 bar betrieben werden kann und dass Kammereinstiege unter hohen Druckverhältnissen mit Sättigungstauchen möglich sind. Die Maschine ist somit vollwertig ausgerüstet für den Abbau im offenen Hartgesteinsmodus mit einer Einfaßschild-TBM sowie für den Abbau im Slurry-Betrieb im geschlossenen Modus mit aktiver Ortsbruststützung bis zu einem maximalen dynamischen Druck von 13 bar (Bild 3).

Das Hallandsås-Tunnelprojekt mit seiner inzwischen mehr als 15-jährigen Geschichte stellt eines der anspruchsvollsten Tunnelprojekte dar, die sich zurzeit im Bau befinden. Bis Mitte

most sophisticated tunnel projects currently under construction. By mid-2009 the construction consortium's teams excavated more than 4,300 m in tricky water-bearing rock formations with a convertible mixshield for hard rock and produced a dry tunnel lined with segments. No further ecological problems occurred and the general public's acceptance of the structure was rekindled to a large degree. Essential for the success of this project has been the close, well-focused partnership and collaboration among all the parties involved – the client, the contractor and the machine manufacturer.

## Conclusion

The 2 major projects in

Sweden distinctly spotlight the demands posed on today's tunnelling projects. This particularly relates to the challenges concerning the applied tunnel driving technology – geared to the complex geological subsoil conditions – as well as executing the project.

The described types of machine possess a potential for innovation as far as their geological and hydrogeological range of application is concerned. The mastering of extremely sophisticated conditions for soft ground drives and in hard rock with varying face conditions, rock of high compressive strength and wear intensity as well as high inflows of water and high water pressures calls for a machine design geared to the subsoil conditions.

2009 haben die Teams des Baukonsortiums mehr als 4300 m in schwierigen wasserführenden Felsformationen mit einem umstellbaren Mixschild für Hartgestein abgebaut und einen trockenen, mit Tübbing ausgekleideten Tunnel produziert. Es traten keine weiteren Umweltprobleme auf und die Akzeptanz in der Öffentlichkeit für das Bauwerk konnte in hohem Maße wiederhergestellt werden. Eine Grundlage für den Erfolg in diesem Projekt stellt eine enge und fokussierte Partnerschaft und Zusammenarbeit aller beteiligten Parteien, des Bauherren, des Auftragnehmers und des Maschinenlieferanten dar.

## Schlussfolgerung

Die beiden Großprojekte in Schweden heben deutlich die Ansprüche der Tunnelprojekte von heute hervor. Dies bezieht sich insbesondere auf die Herausforderungen bezüglich der eingesetzten Tunnelvortriebstechnik – abgestimmt auf die komplexen geologischen Baugrundbedingungen – sowie die Projektausführung.


Die beschriebenen Maschinentypen verfügen über Innovationspotenzial, was ihre geologische und hydrologische Anwendungsbandbreite betrifft. Die Bewältigung höchst anspruchsvoller Bedingungen für Lockergesteinsvortriebe und im Hartgestein mit blockigen Ortsbrustverhältnissen, Gestein hoher Druckfestigkeit und Verschleißintensität sowie hohen Grundwasserzuflüssen und hohen Wasserdrücken erfordern ein gezielt auf die Baugrundverhältnisse abgestimmtes Maschinendesign.

Die in den genannten Projekten eingesetzten Maschinen werden den an den maschinellen Vortrieb gestellten Anforderungen gerecht und sind Ausdruck des heute erreichten


Tabelle: Technische Daten der TBM S-246 Hallandsas von Herrenknecht

Table: Technical details of the TBM S-246 Hallandsas from Herrenknecht

Maschinentyp/Machine type		Mixschild, 2 Betriebsarten/Mix-shield, 2 operating modes
Bohrdurchmesser/Bore diameter	[m]	10.60
Gesamtlänge/Total length	[m]	250
Gesamtgewicht/Total weight	[t]	3100
Gesamtleistung/Total output	[kW]	8600
Bohrkopf/Cutterhead		Hartstein, 2 Betriebsarten/Hard rock, 2 operating modes
Schneidrollen/Cutter discs		17", Backloading (zweiter Bohrkopf 19"-Schneidrollen) 17", backloading (second cutterhead 19" cutter discs)
Leistung/Output	[kW]	4000
Drehzahl Speed	[U/min] [rpm]	0 bis 5, hydraulischer Antrieb 0 to 5, hydraulic drive
Drehmoment/Torque	[MNm]	20.3/26.0
Anpressdruck/Driving force	[kN]	22 000 (max. 42 000)
Schilddurchmesser/Shield diameter	[m]	10,53
Max. Druck/Max. Pressure	[bar]	15
Vortriebskraft/Driving Force	[kN]	139.500 (max. 188.500)
System zur Materialabförderung im offenen Modus System for removing material in open mode	[t/h]	1000 (Streckenband im Tunnel) 1000 (belt conveyor in tunnel)
System zur Materialabförderung im geschlossenen Modus System for removing in closed mode	[m <sup>3</sup> /h]	1800 Steinbrecher (Separieranlage am Portal) 1800 Rock crusher material (separating plant at portal)
Tübbinghinterfüllsystem Segment backfilling system		2 Systeme: Mörtel und Perlkies 2 systems: mortar and pearl gravel
Spülsystem Flushing system		Separieranlage auf dem Nachläufer Separating plant on the trailer
Kapazität/Capacity	[m <sup>3</sup> /h]	600
Erkundungs- und Injektionsbohrungen Exploratory and grouting bores		3 permanent eingebaute Bohrgeräte (5 sind möglich) 3 permanently installed drilling units (5 are possible)
Bohrbild Drilling pattern		30 Positionen am Umfang, 33 Positionen an der Ortsbrust 30 positions at the perimeter, 33 positions at the face
Nachläuferwagen Back-up trailers		11 geschlossene Ausführung, Zugversorgung 11 Closed model, supply train

hohen Innovationsstandards. Mit den dargestellten Vortriebs- erfahrungen werden für zukünftig folgende maschinelle Tunnelvortriebe wertvolle Impulse gegeben und umfangreiche Detailoptimierungen beschrieben, die für die Konstruktion, die weitere Entwicklung, den Bau und für die noch ausstehenden Tunnelvortriebe richtungsweisend sind. 

The machines applied in the above-mentioned projects comply with the demands placed on mechanised driving and exemplify the high standard of innovation arrived at nowadays. Thanks to the findings obtained during driving invaluable impulses are provided for future follow-up tunnel drives and extensive detailed improvements described, which are trail-blazing as far as

the design, the further development, the construction and pending excavation are concerned. 

### Literatur

[1] Burger, Werner; Dudouit Francois, The Hallandsas Dual Mode TBM, RETC 2009 (Rapid Excavation and Tunnelling Conference), Las Vegas, June 2009.