Multi-Mode-TBM – Stand der Technik und neue Entwicklungen

Werner Burger
Leiter Konstruktion Business Unit Traffic Tunnelling
Herrenknecht AG, Schwanau

Michael Strässer
Projektleiter, Business Unit Traffic Tunnelling
Herrenknecht AG, Schwanau

1 Einleitung

Klassische Vortriebsschilde können bei geologisch variantenreich aufgebauten Tunneltrassen an technische, aber auch wirtschaftliche Grenzen stoßen. So kann eine Tunneltrasse längere Passagen standfestes Gebirge enthalten, das in weiche, wasserführende Lockerböden wechselt sowie umgekehrt. Derartige Streckenverläufe gehören zu den anspruchsvollsten Anforderungen im Tunnelbau. Sie stellen immer öfter eine Herausforderung dar, da wichtige Infrastrukturen in solchen Formationen gebaut werden. Herrenknecht hat speziell für solche Baugründe und Projekthintergründe sogenannte Multi-Mode-Tunnelbohrmaschinen entwickelt. Es handelt sich hier um hybrid aufgebaute Vortriebsmaschinen, die einerseits die höchstmögliche Sicherheit und Flexibilität bei der Wahl des Stütz- und Abbauverfahrens bieten, also eine in Hinsicht auf den Streckenverlauf anpassungsfähige und möglichst optimale Vortriebsstrategie ermöglichen. Dies hat auch positive Effekte auf die gebotene Wirtschaftlichkeit. Multi-Mode-Maschinen sind hinsichtlich der Anpassungsschnelligkeit und des Anpassungsaufwandes unterschiedlich angelegt. Die folgenden Kapitel beschreiben die Funktionsweisen der Multi-Mode-TBM und entsprechende Referenzprojekte. Zudem geht der Beitrag auf das neuartige Konzept der Herrenknecht „Variable Density TBM“ ein, einer ersten universellen Vortriebsmaschine für Lockergestein.

2 Grundlagen

Im maschinellen Tunnelvortrieb wird grundsätzlich zwischen drei geschildeten Maschinentypen unterschieden. Jedes dieser erprobten Verfahren bietet in seinem speziellen Anwendungsgebiet Vorteile.

- 1. Offene Einfachschilde für standfesten und in der Regel nicht oder gering wasserführenden Baugrund: Der Abbau erfolgt unter atmosphärischen Bedingungen mit trockenem Materialaustrag aus der Abbaukammer mittels Förderband.
- 2. Geschlossene Erddruckschilde (EPB-Schilde) für feinkörnigen und in der Regel nicht standfesten wasserführenden Baugrund: Der Abbau erfolgt unter gesteuertem Stützdruck mit dickstoffartigem Materialaustrag aus der Abbaukammer mittels Förderschnecke.
- 3. Geschlossene Flüssigkeitsschilde für grobkörnigeren, nicht standfesten und in der Regel wasserführenden Baugrund: Der Abbau erfolgt unter gesteuertem Stützdruck mit Materialaustrag aus der Abbaukammer mittels eines hydraulischen Förderkreises mit Separationsanlage.

Technologischer Fortschritt hat das jeweilige geologische Einsatzspektrum in den letzten Jahren enorm erweitert. Das Ziel besteht darin, für die vorherrschende Geologie das Optimum an Vortriebsleistung und -sicherheit zu gewinnen und zudem die Wirtschaftlichkeit des Projekts zu optimieren.

Parallel zur Erweiterung des jeweiligen Einsatzspektrums der Vortriebsmodi entwickelte sich eine modulare Maschinentechnik, die den Wechsel der Betriebsart im Tunnel ermöglicht. Das Grundkonzept der umbaubaren Multi-Mode-Maschinen wurde bereits in den frühen 1980er Jahre entworfen und ist Ausgangspunkt für die Entwicklung des Mixschildes.

Das Grundkonzept der Multi-Mode-TBM erlaubt durch Modifikationen der Stützdrucksteuerung und der Abraumförderung den Wechsel zwischen Flüssigkeitsstützung, Erddruckstützung und offenem Modus. Auf dieser Grundlage sind grundsätzlich zwei konstruktive Umsetzungen möglich:

- Multi-Mode-TBM mit modularem Grundaufbau: Der Wechsel des Vortriebsverfahrens im Tunnel wird durch umfangreichere Modifikationen einzelner Baugruppen erreicht.
- Multi-Mode-TBM mit parallel integrierten Komponenten für mehrere Verfahrensarten: Der Wechsel des Vortriebsmodus ist mit geringerem Arbeits- und Zeitaufwand möglich, setzt aber ein erheblich komplexeres Maschinenkonzept voraus.

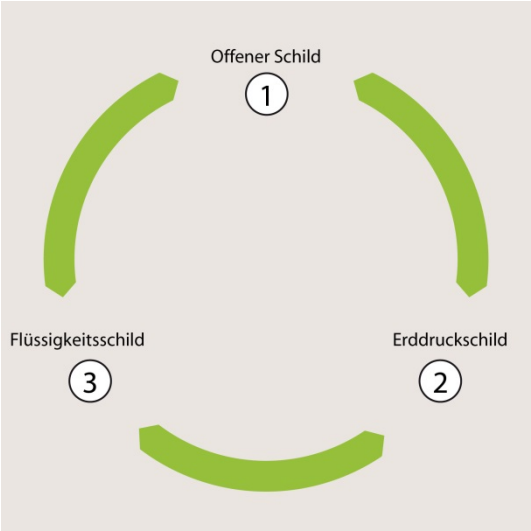

Abb. 1: Die drei grundsätzlichen Maschinentypen

Wechsel zwischen offenem Einfachschild und geschlossenem Erddruckschild (1↔2)

Erddruckschilde mit Förderschnecke im Sohlbereich können neben dem herkömmlichen geschlossenen EPB-Modus auch im offenen Modus gefahren werden. In beiden Fällen übernimmt die Förderschnecke den Materialaustrag aus der Abbaukammer und im geschlossenen Betrieb zusätzlich die Aufgabe des Druckabbaus. Insbesondere bei abrasiven Böden wirkt sich die Notwendigkeit nachteilig aus, in der

Abbaukammer eine Teilfüllung zur Speisung der Förderschnecke sicherstellen zu müssen. Ebenso erreicht ein massiver Schneckenförderer zur Abförderung von trockenem Haufwerk nicht die Effektivität alternativer Fördermethoden. Andererseits besteht ein wesentlicher Vorteil des Schneckenförderers darin, dass der Abwurfschieber der Förderschnecke jederzeit schnell geschlossen werden kann. Die Abbaukammer kann beispielsweise im Fall eines plötzlichen Wassereinbruchs oder einer Ortsbrustinstabilität sicher und zuverlässig vom hinteren Tunnelbereich isoliert werden.

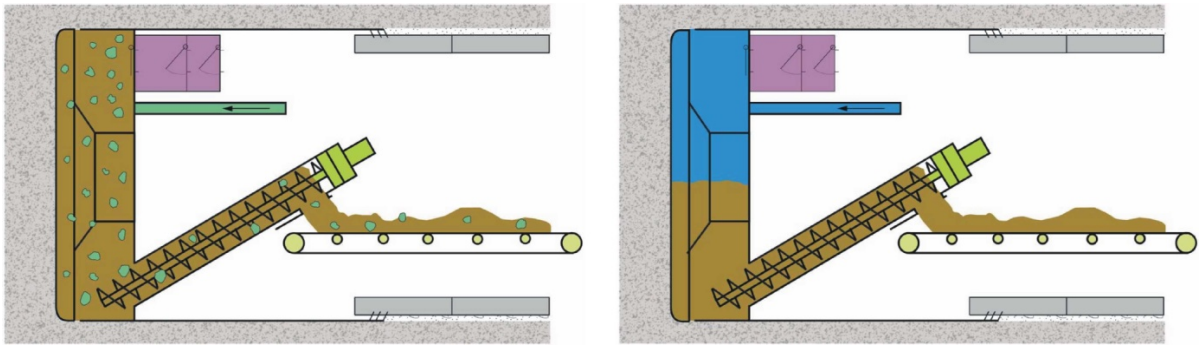

Abb. 2: Erddruckmaschine in geschlossenem Modus (links) und im Druckluftmodus (rechts)

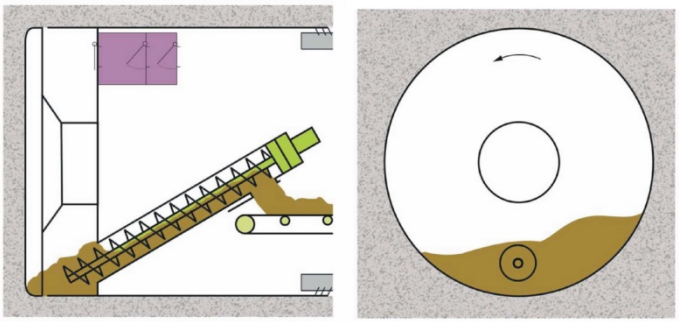

Abb. 3: Erddruckmaschine in offenem Modus mit teilgefüllter Abbaukammer

Um die oben beschriebenen Nachteile zu vermeiden, kann ein rückziehbarer Förderbandtrichter (Muckring) mit Förderband im Zentrum installiert werden. Hierbei sind zwei wesentliche Herausforderungen zu beachten.

- Der Erddruckbetrieb setzt die Drehdurchführung im Zentrum zwingend voraus, um die Konditionierungsmedien in das sich drehende Schneidrad einleiten zu können. Dies bedingt Kompromisse oder verursacht beträchtlichen Umbauaufwand bei der Umstellung auf einen Förderbandaustrag.
- Für den zentralen Förderbandaustrag werden Materialführungskanäle an der Schneidradrückseite benötigt. Sie beeinträchtigen den geschlossenen Erddruckbetrieb und können deshalb nicht permanent installiert bleiben. Ein- und Ausbau verursachen einen entsprechend höheren Aufwand.

Für den Katzenbergtunnel (Eisenbahn, Deutschland) waren zwei EPB-Schilde (Ø 11,12 m) sowohl im offenen als auch im geschlossenen Modus im Einsatz [1]. Der Baugrund entlang der 8,9 Kilometer langen Doppelröhren-Trasse war im Wesentlichen als weiches Felsgestein moderater Abrasivität prognostiziert. Die Portalzonen mit geringer Überdeckung im Lockergestein sowie einzelne mögliche Störzonen entlang der Trasse waren im geschlossenen Modus zu durchfahren. Aufgrund des erwarteten beherrschbaren Verschleißverhaltens und der Unsicherheit bezüglich der Häufigkeit der Störzonen wurde ein Maschinenkonzept vorgesehen, das den Förderschneckenaustrag für die geschlossene als auch für die offene Betriebsart vorsah.

Das entwickelte und eingesetzte Maschinenkonzept erwies sich als leistungsfähige Lösung für das Projekt Katzenbergtunnel. Beide Maschinen wurden sowohl im offenen als auch im geschlossenen Modus betrieben, ohne dass längere Stillstände bzw. Umbauzeiten beim Betriebsartenwechsel notwendig wurden. Einem erwarteten höheren Sekundärverschleiß an der Schneidradstruktur wurde Rechnung getragen, indem ein verstärkter Verschleißschutz aufgetragen wurde sowie eine Schneidradrevision auf etwa halber Strecke beim Durchfahren eines späteren Lüftungsbauwerks eingeplant wurde. Nach nur rund 22 Monaten erreichten beide EPB-Schilde das Zielportal.

Abb. 4: Zwei EPB-Schilde nach dem Durchstich für den Katzenbergtunnel

Eine gänzlich unterschiedliche Situation stellte sich beim maschinellen Vortrieb des Tunnel de Saverne (Eisenbahn, Frankreich) westlich von Straßburg dar [2]. Die beiden 3,8 Kilometer langen parallelen Tunnelröhren verlaufen durch weichen bis mittelharten Sandstein hoher Abrasivität. Zumindest eine der beiden Portalzonen musste in geschlossenem Modus mit aktiver Ortsbruststützung aufgefahren werden. Des Weiteren war auf etwa halber Strecke eine Lockergesteinszone prognostiziert, die ebenfalls eine geschlossene Betriebsweise vorsah.

Das Maschinenkonzept für den EPB-Schild (Ø 10,01 m) integrierte einen rückziehbaren zentralen Förderbandtrichter und ein Förderband für den offenen Betrieb sowie eine teleskopierbare Förderschnecke im Sohlbereich für den geschlossenen Betrieb. Beide fest installierten Materialaustragssysteme übergaben das Abbaumaterial direkt hinter dem Ringbaubereich auf ein gemeinsames Nachläuferband.

Für den Wechsel von geschlossener zu offener Betriebsart mussten die Zufuhrleitungen für Konditionierungsmittel im Zentrum demontiert werden. Nur so konnte der Förderbandtrichter mit dem Austragsband in seine vordere Arbeitsposition verschoben werden. An der Schneidradrückseite wurden Materialleitkanäle für den Materialtransport von den außen liegenden Räumern zum zentralen Aufgabetrichter installiert. Die speziell angepasste Ausführung dieser Materialleitkanäle erlaubte es, die Förderschnecke im Sohlbereich auch in zurückgezogener Position eingeschränkt arbeitsfähig zu halten.

Beim Auffahren der ersten Tunnelröhre wurde nach der Durchörterung der anfänglichen Lockergesteinsstrecke die Betriebsart vom geschlossenen zum offenen Modus gewechselt. Mit dem projektspezifischen Maschinenkonzept sowie einer hochleistungsfähigen Baustellenlogistik wurde die Systemumstellung in weniger als einer Woche erfolgreich durchgeführt – jeweils einmal beim Vortrieb der ersten Röhre und einmal in der parallelen zweite Röhre. Der Durchstich der ersten Tunnelröhre erfolgte im Juni 2012 und im Februar 2013 der Durchstich der zweiten Röhre.

Die unterschiedlichen Materialaustragsysteme für den offenen und den geschlossenen Modus bewährten sich in dem hoch abrasiven Baugrund als leistungsfähiges Konzept. Auch die im offenen Modus immer noch eingeschränkt einsetzbare Förderschnecke im Sohlbereich erwies sich als vorteilhaft. Sie diente sowohl der vollständigen Sohlreinigung in der Abbaukammer als auch dem Durchfahren kurzer Zonen mit gebrächiger Ortsbrust im offenen Modus.

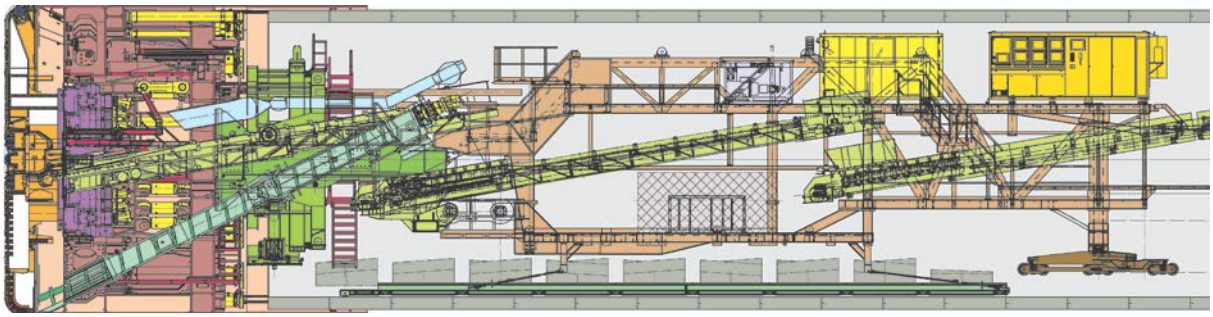

Abb. 5: Multi-Mode-Maschine für den Tunnel de Saverne

3 Wechsel zwischen geschlossenem Flüssigkeitsschild und offenem Einfachschild (1 ↔ 3)

Multi-Mode-TBM mit offenem und flüssigkeitsgestütztem Modus wurden bereits vielfach erfolgreich in Projekten eingesetzt. Vor allem für Tunneltrassen mit längeren Anteilen von Lockergesteinsstrecken unterhalb des Grundwasserspiegels als auch für trockene Festgesteinsstrecken ist dieses Maschinenkonzept passend. Die größte Herausforderung beim Wechsel des Vortriebsmodus besteht in der unterschiedlichen Förderung des Abraums. Beim flüssigkeitsgestützten Schild ist ein Förderkreislauf installiert; auch im Fall einer standfesten Ortsbrust und einem Druckluft- oder gar atmosphärischem Spülbetrieb mit teilgefüllter Abbaukammer würde der Materialaustrag noch immer auf einem hydraulischen Förderkreis beruhen. Ein trockener Materialaustrag im offenen Modus ist nur mit einem Förderband möglich. Für die Realisierung dieser Kombination müssen daher beide Fördersysteme auf der TBM und dem Nachläufer installiert werden.

Der Einbau eines zentral angeordneten Förderbands mit rückziehbarem Förderbandtrichter als zweites, trockenes Materialaustragssystem ist ohne wesentliche Kompromisse für das Abbausystem realisierbar. Gleiches gilt für das Schneidrad selbst mit zusätzlichen, zum Zentrum hin gerichteten Materialleitkanälen für den offenen Betrieb. Sie stellen keine wesentliche Beeinträchtigung für den geschlossenen, flüssigkeitsgestützten Betrieb dar und können daher fest eingebaut bleiben. Ein Steinbrecher vor dem Saugstutzen für den Betrieb als Flüssigkeitsschild beeinträchtigt wiederum die Wechsel auf den offenen Modus nicht.

Ein herausragender und bedeutender technischer und wirtschaftlicher Vorteil ergibt sich, indem der Betriebsartenwechsel als integrales Konzept ausgeführt werden kann. Der Wechsel der Vortriebsmodi kann dann abhängig vom betriebenen Aufwand für das Vorhalten zweier Materialtransportsysteme auf der Maschine, im Tunnel und über Tage innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden. Im offenen Modus kann die Abbaukammer innerhalb von rund zwei bis vier Stunden sicher zum hinteren Tunnelbereich hin abgeschlossen werden, indem der Förderbandtrichter und das Förderband zurückgezogen werden. Je nach betrieblicher Verfügbarkeit des Förderkreislaufs, der Druckluftversorgung und der übertägigen Separationsanlage kann der Vortrieb im geschlossenen Modus als Flüssigkeitsschild nach wenigen Schichten wieder aufgenommen werden.

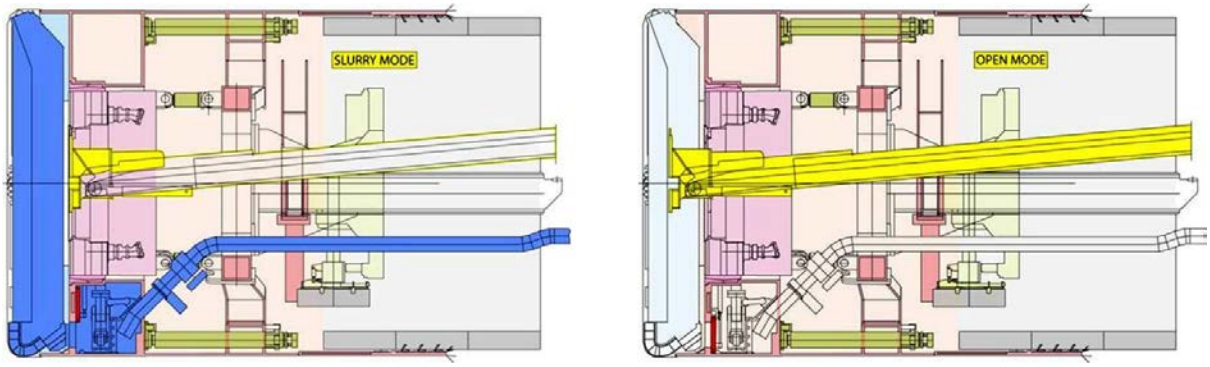

Abb. 6: Integrales Maschinenkonzept für den Wechsel von Flüssigkeitsschild (links) zu offenem Einfachschild (rechts)

Im Jahr 1989 wurde das System erstmals beim Grauholztunnel in der Schweiz erfolgreich eingesetzt [3] und anschließend bei den Projekten Thalwil und Önzberg, beide ebenfalls in der Schweiz, erfolgreich eingesetzt. Weitere erfolgreiche Projektreferenzen sind der Finnetunnel in Deutschland [4] sowie der Weinbergtunnel in der Schweiz (Zürich). Eine Multi-Mode-TBM für offenen Einfachschildvortrieb und geschlossenen flüssigkeitsgestützen Vortrieb befindet sich derzeit im Einsatz im Projekt Hallandsås (Schweden, Eisenbahn). Aufgrund des prognostizierten hohen Bergwasserdrucks wurde die Maschine für Hallandsås auf einen maximalen Betriebsdruck von 13 Bar im geschlossenen Modus ausgelegt.

Das Wassertunnelprojekt Lake Mead Intake N° 3 (Las Vegas, USA) zeichnet sich dadurch aus, dass auf der Tunneltrasse Störzonen mit extrem hohen Wasserdrücken vorhergesagt wurden. Entsprechend weist das Maschinenkonzept der derzeit eingesetzten Multi-Mode-TBM für offenen Betrieb und geschlossenen flüssigkeitsgestützten Betrieb zwei Besonderheiten auf [6]. Zum einen ist sie auf Stützdrücke bis 17 Bar ausgelegt. Zum anderen ist sie anstelle eines Förderbandes für den Materialaustrag im offenen Betrieb - mit einer rückziehbaren zentralen Förderschnecke - ausgerüstet. Die Förderschnecke gewährleistet, dass alleine durch das Schließen des Abwurfschiebers innerhalb weniger Augenblicke die Abbaukammer sicher verschlossen werden kann. Diese Maschinenkonzeption dient dazu, eine zwingende Forderung nach einer Systemverschließbarkeit innerhalb weniger Sekunden bei diesem komplexen Projekt umzusetzen.

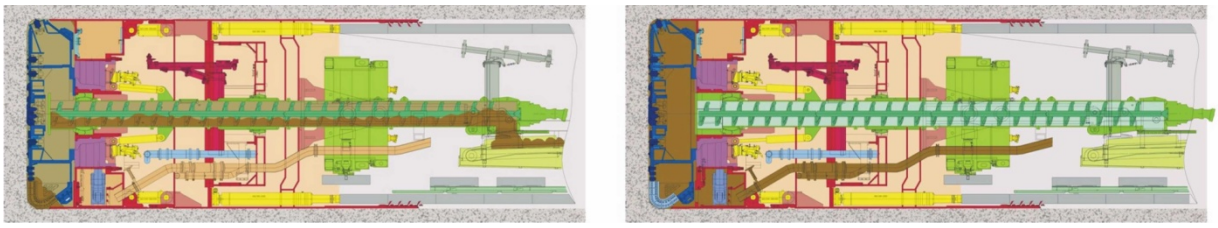

Abb. 7: Maschine für den Lake Mead Intake Tunnel N° 3, im offenen Modus mit zentraler Förderschnecke (links) und im geschlossenen Modus mit aktivem Förderkreis

4 Wechsel zwischen geschlossenem Flüssigkeitsschild und Erddruckschild (2 ↔ 3)

Sowohl Flüssigkeitsschilde als auch Erddruckschilde werden unter einem gesteuerten Stützdruck mit gefüllter Abbaukammer betrieben. Die beiden Betriebsmodi unterscheiden sich hinsichtlich der Eigenschaften des Materials in der Abbaukammer (Viskosität, Scherfestigkeit oder Dichte) sowie hinsichtlich des Prinzips der Stützdrucksteuerung. Bei der Konzeption einer Multi-Mode-TBM für erddruckgestützten und flüssigkeitsgestützten Vortrieb müssen bei der Ausgestaltung der Abbaukammer oder des Schneidrads keine grundlegenden Unterschiede berücksichtigt werden.

Der wesentliche Unterschied, der in der Multi-Mode-Maschinenkonzeption umgesetzt werden muss, besteht beim Materialtransport aus der Abbaukammer und im Tunnel. Das Konzept der Flüssigkeitsstützung sieht einen geschlossenen, druckbeaufschlagten hydraulischen Förderkreis mit übertägiger Separationsanlage vor. Bei einem Erddruckschild ist ein Schneckenförderer für einen kontrollierten Materialaustrag aus der Abbaukammer verantwortlich und im Tunnel ein offenes Transportsystem mit Schutterzügen oder Förderbändern. Ein weiterer zentraler Unterschied zwischen den Maschinentypen betrifft die Art der Stützdrucksteuerung. Bei einer Erddruckmaschine erfolgt die Stützdrucksteuerung vorwiegend über die Beeinflussung der Parameter Vortriebsgeschwindigkeit und Materialaustragsvolumen bzw. Förderschneckendrehzahl. Bei einer Flüssigkeitsmaschine hingegen erfolgt die Regulierung des Stützdrucks mittels eines automatisch geregelten Druckluftposters in der Druckkammer hinter der Tauchwand.

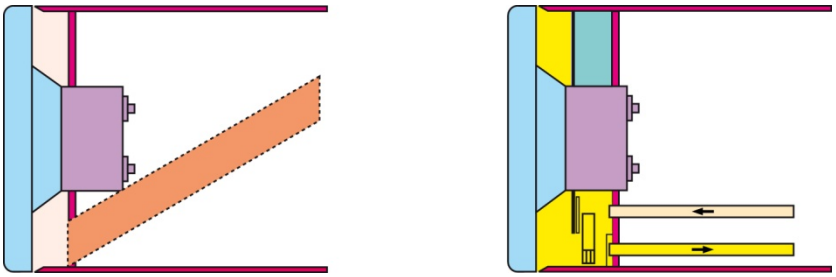

Abb. 8: Systemskizze zur Stützdruckregulierung bei einer Erddruckmaschine (links) und bei einer Flüssigkeitsmaschine mit Tauchwand und eines dahinter liegenden Druckluftpolsters (rechts)

Bei Maschinen mit Durchmessern über acht Metern können mit nur geringen Beeinträchtigungen beide Materialaustragsysteme parallel im Sohlbereich der Abbaukammer installiert werden. Sobald allerdings die Baugrundverhältnisse den Einsatz eines vor dem Saugstutzen angeordneten Steinbrechers im flüssigkeitsgestützen Modus erforderlich machen, entsteht bei einem Betriebsartwechsel ein erheblicher mechanischer Mehraufwand - verbunden mit einem manuellen Eingriff bzw. notwendigen

Druckluftarbeiten. Diese sind insbesondere bei Maschinendurchmessern unterhalb von acht Metern aufgrund beengter Platzverhältnisse lediglich eingeschränkt möglich.

Umbaubare Maschinen mittleren und kleineren Durchmessers wurden aus diesen Gründen bislang auf der Basis eines modularen Konzepts realisiert. Dies bietet die Möglichkeit, den Austausch einzelner Maschinenbaugruppen oder Funktionseinheiten in einem Zwischenschacht entlang der Trasse vorzunehmen. Ein modulares Umbaukonzept für einen Betriebsartwechsel im Tunnel wurde bis heute nicht realisiert. Es würde absehbare Arbeiten unter atmosphärischem Druck in der Abbaukammer erfordern und einen entsprechend hohen technischen und logistischen Aufwand verursachen.

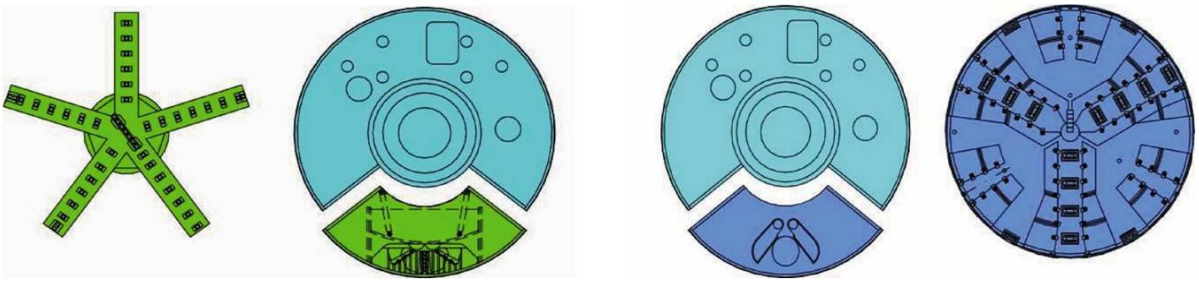

Abb. 9: Modulares Maschinenkonzept für einen Wechsel zwischen Flüssigkeitsschild (links) und Erddruckschild (rechts) durch den Austausch einzelner Module

Um den hohen Aufwand für ein Maschinenkonzept zu rechtfertigen, das den vollständigen Wechsel von flüssigkeitsgestütztem zu erddruckgestütztem Betrieb ermöglicht, müssen spezielle Projektvoraussetzungen gegeben sein. Beim Projekt SOCATOP in Paris [7] war dies beispielsweise der Fall. Bei einer Gesamtlänge von zehn Kilometern verlief die Trasse zu rund 60 Prozent durch Böden, die optimal geeignet für erddruck- oder druckluftgestützten Betrieb waren. Zu 40 Prozent verlief sie in Böden, die optimal für den Einsatz einer flüssigkeitsgestützten Maschine war. Das Maschinen- und Vortriebskonzept berücksichtigte darüber hinaus, dass die jeweiligen Formationen in längeren zusammenhängenden Trassenabschnitten auftraten. Insgesamt bestätigte der erfolgreiche Abschluss der Maschinenvortriebe den hohen technischen und logistischen Aufwand im Projekt SOCATOP, der durch das Maschinenkonzept der Multi-Mode-TBM verursacht wird.

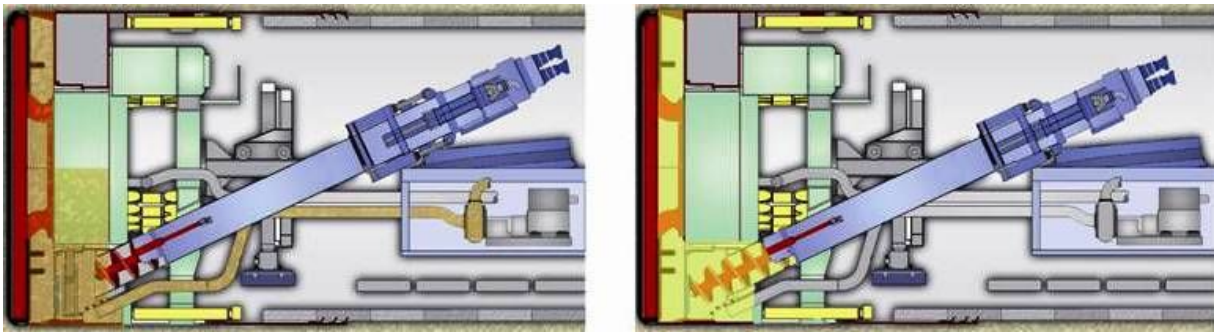

Abb. 10: Maschine für das Projekt SOCATOP im flüssigkeitsgestützten (links) und im erddruckgestützten Modus (rechts)

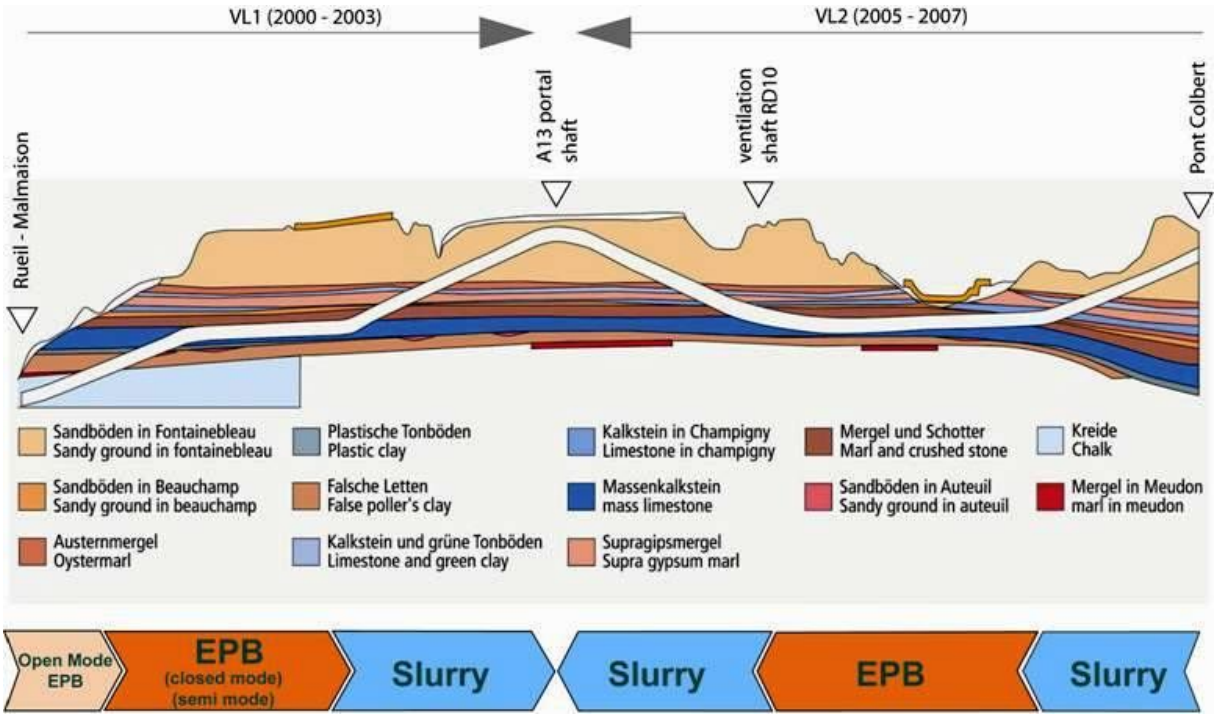

Abb. 11: Überblick über den Trassenverlauf und die jeweils eingesetzten Betriebsarten auf den Abschnitten VL1 und VL2 des Projekts SOCATOP.

5 Das Variable-Density-Konzept

Angesichts der Tatsache, dass ein Wechsel von flüssiggestützter Betriebsart zu erddruckgestützter Betriebsart sich in der praktischen Umsetzung als eine aufwändige Aufgabe erweist, entwickelte Herrenknecht ein neuartiges Maschinenkonzept. Es vereinigt die generischen Vorteile jedes der beiden Systeme in einem Maschinentyp. Die Zielvorgabe dabei war, den Vortriebsmodus anpassen zu können, ohne mechanische Modifikationen oder Umbauarbeiten in der Abbaukammer, an der Maschine selbst oder im Nachlaufbereich vornehmen zu müssen.

Dieser hochflexible Maschinentyp liegt mit der Herrenknecht „Variable Density Maschine“ vor, die sowohl in der klassischen flüssiggestützten Betriebsart unter Einsatz eines Druckluftpolsters zur Stützdrucksteuerung als auch in der klassischen erddruckgestützten Betriebsart unter Verwendung der Austragsvolumenkontrolle zur Stützdrucksteuerung betrieben werden kann. Der Übergang von der einen in die andere Betriebsart kann fließend, das heißt unter voller Beibehaltung einer sicheren Stützdruckkontrolle erfolgen. Die Notwendigkeit eines Kammereinstiegs entfällt dabei. Ein längerer Betrieb in einem Zwischenstatus mit höherer Kammerdichte (high density mode), die zu hoch für einen reinen Flüssigbetrieb ist, aber zu gering für einen Erddruckbetrieb, ist ebenfalls möglich.

Zur Funktionsweise der Maschine: Sowohl im erddruck- als auch im flüssigkeitsgestützten Modus wird der Abraum über einen Schneckenförderer aus der unter Druck stehenden Abbaukammer entnommen. Die Regelung des Stützdrucks erfolgt je nach Modus über Schneckendrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit oder über ein automatisch geregeltes Druckluftpolster. Kommunizierende Röhren ersetzen die fehlende Tauchwandöffnung. Im EPB-Modus wird der Abraum von der Schnecke auf ein Förderband abgeworfen. Im Flüssigkeitsmodus wird die TBM dank einer zusätzlichen Slurryfier-Box am Ende der Schnecke mit hydraulischem Förderkreislauf gefahren. Im Flüssigkeitsmodus kann entweder eine normale Bentonitsuspension oder alternativ eine Suspension mit hoher Dichte genutzt werden. Das erweitert den Einsatzbereich der Variable-Density-TBM zusätzlich und macht die Maschine zu einer universellen Lösung für Lockergestein-Vortriebe aller Art.

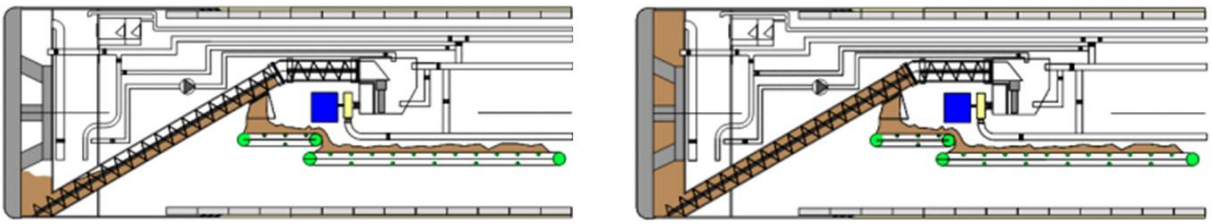

Abb. 12: Variable-Density-Maschine im offenen Betrieb (links) und im erddruckgestützten Betrieb (rechts)

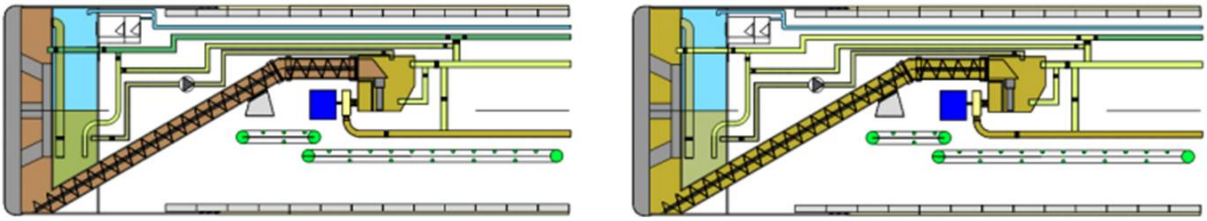

Abb. 13: Variable-Density-Maschine im High-Density-Betrieb (links) und im flüssigkeitsgestützten Betrieb (rechts)

Voll ausgerüstet benötigt eine Variable-Density-Maschine zwei Abraumtransportsysteme im Tunnel: einen hydraulischen Förderkreislauf für die flüssigkeitsgestützte Betriebsart und eine Wagenförderung oder ein Tunnelband für die erddruckgestützte Betriebsart. Allerdings kann auch je nach Projektgegebenheiten aus ökonomischen Gründen eines der beiden Fördersysteme als Hauptsystem mit voller Leistungsfähigkeit und das andere als Nebensystem mit verminderter Kapazität ausgelegt sein.

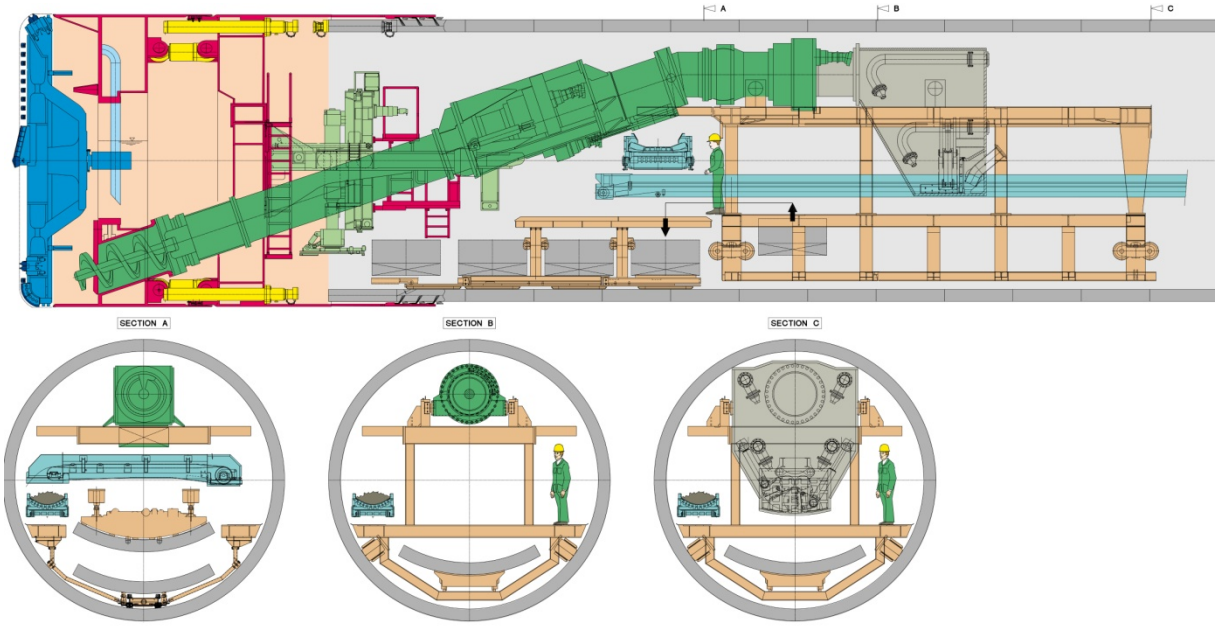

Abb. 14: Schematische Darstellung einer komplett ausgestatteten Variable-Density-Maschine

Der Materialaustrag aus der Abbaukammer erfolgt bei einer Variable Density Maschine in beiden Betriebsarten mittels einer Förderschnecke. Die Doppelschneckenanordnung mit einem Absperrschieber zwischen der vorderen Förderschnecke 1 und der hinteren Förderschnecke 2 verfügt am hinteren Ende der Schnecke 1 über einen Abwurfschieber zur Übergabe des Abraums auf ein Förderband im erddruckgestützten Betrieb. Im flüssigkeitsgestützten Betrieb ist dieser Abwurfschieber geschlossen und der Absperrschieber zwischen der vorderen und der hinteren Förderschnecke geöffnet. Hier wird der Abraum in einen geschlossenen Spülkasten (Slurryfier-Box) am Ende der Förderschnecke 2 abgeworfen. In diesem Spülkasten kann vor dem Saugstutzen ein konventioneller Zangenbrecher angeordnet werden. Er zerkleinert Korngrößen, die die Schneckenförderer passieren können, die aber zu groß sind für den Förderkreis. Nach dem Schließen des Absperrschiebers zwischen den beiden Schnecken kann der Spülkasten bzw. Brecherraum beispielsweise für Wartungsarbeiten auch unter atmosphärischen Bedingungen betreten werden.

Sowohl in der flüssigkeitsgestützten als auch in der High-Density-Betriebsart stellt der Abraumtransport mittels Förderschnecken eine Kombination aus mechanischer

und hydraulischer Förderung dar. Die im Flüssigkeitsbetrieb zur Stützdrucksteuerung notwendige Druckluft wird im Frontschild zwischen zwei Druckwänden beaufschlagt. Die bei klassischen Flüssigkeitsschilden integrierte Tauchwandöffnung im Sohlsegment ist hier nicht vorgesehen. Stattdessen wird die Verbindung zwischen der Druckkammer und der Abbaukammer über kommunizierende Röhren zwischen den Kammern hergestellt. Diese Technik entspricht dem Konzept des abgeschotteten Sohlsegments, das bereits bei reinen Flüssigkeitsschilden erfolgreich eingesetzt wurde. Im Erddruckbetrieb kann das Füllvolumen der Druckkammer auch als vorgespanntes Bentonitreservoir zur automatischen Nachspeisung in die Abbaukammer bei irregulären Stützdruckschwankungen verwendet werden.

Da das System nicht wie bei reinen Flüssigkeitsschilden über einen Brecher in der Abbaukammer verfügt, muss die Korngröße durch einen geeigneten Werkzeugbesatz und Korngrößenbegrenzungen am Schneidrad begrenzt werden. Die Korngröße des Materials, das hinter das Schneidrad gelangt, muss der Förderkapazität des eingesetzten Schneckenförderers entsprechen. Eine Vielzahl erfolgreicher EPB-Projekte belegt, dass auch Grobkornvorkommen beim Einsatz eines Schneckenförderers von mindestens 700 Millimetern Durchmesser ohne betriebliche Einschränkungen sicher beherrscht werden können.

In Abhängigkeit von den Projektanforderungen sind auch vereinfachte oder spezifisch angepasste Ausführungen der Variable-Density-Maschine möglich. Beispielsweise kann der große Spülkasten am Ende der hinteren Förderschnecke durch eine kleinere Variante mit Walzenbrecher ersetzt werden – wie derzeit beim Projekt OARS in Columbus in den USA. Ebenso ist eine Lösung mit nur einer Förderschnecke und einer Walzenbrecher-Spülkasten-Kombination an der Abwurföffnung möglich. Die Einzelschneckenversion benötigt allerdings einen etwas erhöhten Umbauaufwand in diesem Bereich, wenn die Betriebsart gewechselt wird. Die Walzenbrecher-Spülkasten-Kombination muss hierfür in eine Parkstellung verschoben werden, bevor das Förderband für den Erddruckbetrieb in Arbeitsposition gebracht werden kann. Eine solche Konfiguration hat sich beim Projekt Port of Miami Tunnel eindeutig bewährt. Sie ist derzeit auch bei den Maschinen für das Klang-Valley-MRT-Projekt in Kuala Lumpur (Malaysia) im Einsatz.

6 Zusammenfassung

Anspruchsvolle, stark wechselhafte Baugrundbedingungen – insbesondere hinsichtlich der Stützdruckverhältnisse oder Fördereigenschaften des Abraums innerhalb einzelner Tunneltrassen erfordern neue, innovative Vortriebstechniken. Die in den vergangenen Jahren ständig erweiterten Einsatzbereiche der klassischen Einfach-, EPB- und Mixschilde genügen unter bestimmten Projektbedingungen nicht mehr den Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsanforderungen. Multi-Mode-TBM von Herren-

knecht erfüllen diese hohen Anforderungen dank ihres flexibel ausgelegten Maschinenkonzeptes. Sie kommen zum Einsatz, wo herkömmliche Schilde an ihre technischen und wirtschaftlichen Grenzen stoßen. Neben der Weiterentwicklung der umbaubaren Schilde stellt das Konzept der Variable-Density-Maschine den entscheidenden Innovationsschritt dar, da es die Flexibilität und Sicherheit im Tunnel deutlich erhört und man einer in Lockergestein universell einsetzbaren Vortriebsmaschine sehr nahe kommt

Literatur

[1] M. Abele, 2012. Der Katzenbergtunnel. DB Projektbau GmbH

[2] A. Cuccaroni, P. Veyron, A. Lacroix, M. Russo, 2011. Eastern European High Speed Rail Line: Stretch 47 and Saverne Tunnel. AFTES Conference, Lyon 2011

[3] W. Steiner, C. Becker, 1991. Grauholz Tunnel in Switzerland: Large Mixed-Face Slurry Shield. RETC Conference, Seattle 1991

[4] K. Rieker, 2010. Construction of Long Tunnels Using Mixshields in Slurry and Hard-Rock Mode - Finnetunnel. ITA Conference, Vancouver 2010

[5] W. Burger, F. Dudouit, 2009. The Hallandsas Dual Mode TBM. RETC Conference, Las Vegas 2009

[6] J. McDonald, W. Burger, 2009. Lake Mead Intake Tunnel No. 3. TUNNEL 4/2009

[7] J.L. Toris, 2007. A86-West Ring Road – a bi-mode TBM. ITA Conference, Prag 2007