

Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik	Band 8	4th Colloquium "Rock Mechanics - Theory and Practice"	p. 37-55	Wien 2008
---	--------	---	----------	-----------

Zyklischer Vortrieb versus kontinuierlicher Vortrieb - eine baubetriebliche Analyse

Hans Georg Jodl*, Ingo Heegemann* & Gernot Altinger**

Anschrift:

*Technische Universität Wien
Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement
A-1040 Wien, Karlsplatz 13
jodl@ibb.tuwien.ac.at
heegemann@ibb.tuwien.ac.at

**Bilfinger Berger Baugesellschaft m.b.H.
A-1150 Wien, Diefenbachgasse 5
g.altinger@bilfingerberger.at

1 Direkter Vergleich??

Leistungs- und Prozessvergleiche im Tunnelbau haben meist eines gemeinsam – sie hinken von vorn-herin. Jedes Bauvorhaben ist ein eigenständiges Projekt mit kaum wiederholbaren Randbedingungen. Dies gilt für das gesamte Bauwesen und im Besonderen für den von der Geologie dominierten Tunnelbau. Dennoch ist die Versuchung nach Vergleichen groß und auch die Nachfrage vorhanden. Unter Anwendung einiger Vorsichtsmaßnahmen können allgemeine Schlussfolgerungen gezogen und Tendenzen abgeleitet werden.

In diesem provozierten Versuch eines Vergleichs des zyklischen mit dem kontinuierlichen Vortrieb werden Vortriebe im Festgestein und solche im Lockergestein getrennt betrachtet. Ein direkter Vergleich ist nur unter einigermaßen gleichartigen oder zumindest ähnlichen Vortriebsbedingungen sinnvoll.

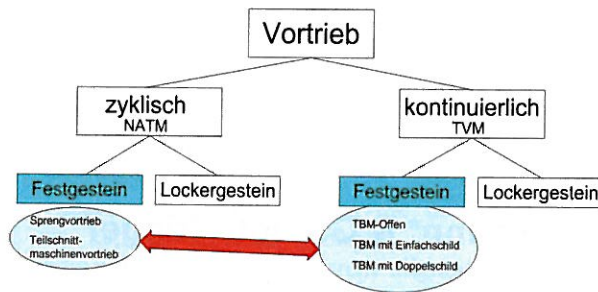


Abb. 1 Vergleichsbasis Festgesteinsvortrieb

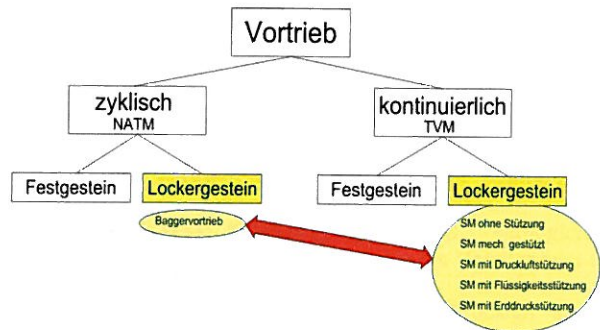


Abb. 2 Vergleichsbasis Lockergesteinsvortrieb

Aus diesem Grund werden der Sprengvortrieb und der Vortrieb mit TBM einander gegenübergestellt, ebenso wird der Baggervortrieb gegenüber dem Schildvortrieb mit SM betrachtet. Die wesentlichen Kriterien werden vereinfacht analysiert.

2 Schlüsselprozesse

Grundlage der Gegenüberstellung ist eine Betrachtung der wichtigsten, den Vortrieb bestimmenden Schlüsselprozesse. Die Teilprozesse eines Vortriebsverfahrens wiederholen sich mit jedem Abschlag und bestimmen die Vortriebsleistung. Eine Unterbrechung eines dieser Teilprozesse unterbricht in der Regel auch den gesamten Vortrieb. Lediglich im Bereich der Logistik sind Ersatzmaßnahmen begrenzt möglich.

Der Bauprozess beim zyklischen Vortrieb im Festgestein beginnt mit dem Lösen des



Abb. 3 Kalottenvortrieb Sprenglochbohrung

Gebirgsverbandes durch den Sprengschlag. Die gewünschte Profilform wird durch schonendes Sprengen in Abhängigkeit vom Bruchverhalten des Gebirges, das maßgebend vom Verlauf und der räumlichen Stellung der Gesteinsschichten, der Art und Beschaffenheit der Klüfte sowie der hydrogeologischen Situation bestimmt wird, hergestellt. Der Lösevorgang wird

von der Abschlagtiefe des Sprengschlags wesentlich beeinflusst sowie auch durch die Austeilung der Bohrlöcher im Querschnitt, der Sprengstoff Lademenge, der Brisanz des Sprengstoffes sowie der Zündfolge der einzelnen Ladungen. Der Profilrand wird zeitverzögert mit Hilfe geringer Lademengen in den sogenannten Kranzlöchern so schonend wie möglich gelöst. Nach einer kurzen Lüftungspause, in der die Bewerterungsanlage den giftigen Sprengnebel zum Portal drückt, beginnt die zeitkritische Schutterung. Das Ausbruchsmaterial wird von leistungsfähigen Ladegeräten aufgenommen und in die Transportfahrzeuge verladen, die den Ausbruch aus dem Tunnel verbringen. In Abhängigkeit von der Standfestigkeit bzw. der Standzeit der freigelegten ungesicherten Laibung und der Ortsbrust wird so rasch wie möglich mit dem Si-

chern des Hohlraumrandes begonnen. Hierzu werden die ungesicherten Flächen des Hohlraumrandes mit Spritzbeton versiegelt und anschließend geeignete Stützmittel wie Anker und Tunnelbögen eingebaut und nach Einbringen einer Netzbewehrung aus Baustahlgitter weiterer Spritzbeton in Schichten aufgetragen. Der weitere Zyklus beginnt wieder mit dem



Abb. 4 Lösevorgang mit Teilschnittmaschine

Abbohren der Sprenglöcher mit Hilfe des Bohrwagens (Abb. 3).

Der Lösevorgang beim zyklischen Vortrieb im Festgestein mit einer Teilschnittmaschine (TSM) im Festgestein beginnt im Firstbereich mit dem Einschnitt. Mit kontinuierlich geführten Schleifenbewegungen löst dann der mit Warzenmeißeln bestückte Quer- oder Längsschneidkopf das Gebirge in einem spanenden Fräsvorgang mit einer Unterschnitttiefe von ca. 20 cm (Abb. 4). Mit einer rechnergestützten Steuerung können TSM automatisch profilgenau und in der vorgegebenen Tunnelachse schneiden. Durch die schneidende Bearbeitung wird das Gebirge weitgehend geschont. Mit dieser Technik kann Gestein bis zu einer einaxialen Druckfestigkeit von 80 bis 120 Mpa und einem Profilquerschnitt bis etwa 40 m² wirtschaftlich aufgefahren werden. Der gelöste kleinstückige Abraum wird von speziellen Räumwerkzeugen auf ein durch die Maschine durchführendes Kratzförderband gezogen, hinter die Maschine gefördert und mit Transportgeräten zum Portal verbracht. Die Sicherung des Hohlraumrandes entspricht den Vorgängen beim Sprengvortrieb. TSM kommen aus dem Bergbau und ermöglichen einen schonenden profilgerechten Vortrieb in weichen bis mittelharten Gesteinen. Die TSM ist im Allgemeinen ein sehr großes und sehr schweres Schlüsselgerät (40 bis 130 Tonnen), das den Löse- und den Schutternvorgang kombiniert. Allerdings erlaubt diese Einzelstellung bei Ausfall kaum eine Kompensation durch Ersatzgeräte. TSM gelangen im Tunnelbau eher selten zum Einsatz.



Abb. 5 Kleinteiliger Baggervortrieb

Auch beim zyklischen Vortrieb im Lockergestein beginnt der Lösevorgang im Firstbereich. Hier übernimmt ein geeigneter Bagger die Lösearbeit. Durch die geringe Angriffsfläche der Baggerschaufel kann auch bei wenig standfesten Gebirgsverhältnissen vorgetrieben werden. Bei kleinräumigem Ausbruch kann mit sofortiger Spritzbetonversiegelung gesichert und in der Folge mit weiteren

Teilausbrüchen schrittweise auf den gesamten Querschnitt aufgeweitet werden. Aus Sicherheitsgründen wird bei diesen Gebirgsverhältnissen der Gesamtquerschnitt in Kalotte; Strosse und Sohle unterteilt. Das vom Bagger gelöste Ausbruchsmaterial wird von einem Radlader auf Transportmulden zur Abfuhr verladen. Der Abschlagsquerschnitt wird mit Tunnelbögen, Baustahlgitter und Spritzbeton gesichert, erforderliche Stützmittel, wie Spieße und Dielen werden überwiegend im Firstbereich als Voraussicherung von einem geeigneten Montagegerät eingebracht (Abb. 5). Bei

besonders schwierigen Bodenverhältnissen gelangen vorausseilende Zusatzmaßnahmen, wie Injektionen, DSV-Schirme, Entwässerungsbohrungen entweder von obertage oder aus dem Vortrieb von untertage zum Einsatz. Herausragender Vorteil dieser Vortriebsart ist deren nahezu unbegrenzte Flexibilität auch unter schwierigsten Bedingungen.

Der endgültige Ausbau erfolgt im zyklischen Vortrieb in der Regel zweischalig. In die erste temporär tragende Rohbauschale aus Spritzbeton wird eine zweite dauerhaft tragende Innenschale mit Hilfe einer verfahrbaren Stahlschalung eingezogen. Bei wasserundurchlässigen Tunneln wird entweder eine Folienabdichtung zwischen Außen- und Innenschale verlegt oder die Innenschale aus wasserundurchlässigem Beton hergestellt.

Im kontinuierlichen Vortrieb im Festgestein gelangen Tunnelbohrmaschinen (TBM) zum Einsatz. Diese Vortriebsart unterscheidet sich grundlegend vom zyklischen Vortrieb. Der Lösevorgang erfolgt im gesamten Querschnitt in einem Arbeitsgang und erzwingt daher eine kreisrunde Profilform. Der drehende Gebirgsabbau schont das Gebirge. Die Kraffteinleitung der Maschine in das Gebirge wird beim Typ TBM-O über hydraulische Verspannplatten, so genannte Gripper sichergestellt.

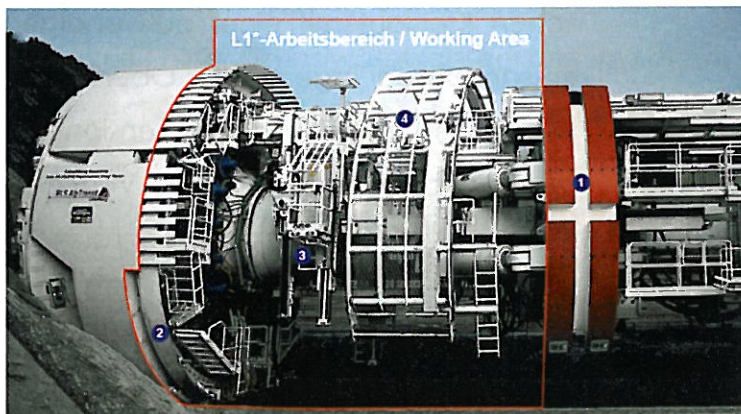


Abb. 6 Gripper TBM-O Raaron mit offenem Arbeitsbereich



Abb. 7 Durchschlag TBM-S Reiserbergtunnel Perschling

Ist das Gebirge für eine Kraffteinleitung über Gripper zu weich, wird eine TBM mit Schild (TBM-S) gewählt, die sich rückwärts auf den mitgezogenen Tübbingausbau abstützt. Der Maschinentyp TBM-DS verfügt über ein Doppelschild und Gripper und kann wahlweise im Hartgestein im Gripper Modus oder im weicheren Gestein im Schildmodus fahren. Die Abschlagstiefe entspricht bei TBM der Länge des Hubes der Vortriebspresen und beträgt größenabhängig 1,4 bis 2,4 m. Der gelöste Abraum wird

über Förderbänder durch die gesamte Bohrmaschine bis an das Ende der Nachlaufkonstruktion gefördert, wo auf Schienenfahrzeuge oder weiterführendes Abförderband übergeben wird. Bei offenen TBM können Stützmittel hinter dem Bohrkopf eingebaut werden. Bei geschlossenen TBM wird der Tübbingausbau kraftschlüssig verpresst. Bei Vortrieben mit offenen TBM im standfesten Festgestein wird meist einschalig durch Einzug einer Ortbeton Innenschale ausgebaut. Im nicht standfesten Gebirge bei Vortrieben mit TBM-S oder TBM-DS erfolgt der Ausbau in der Regel zweischalig. Die Tübbingaussenschale wird meist mit ungedichteten Tübbingsystemen aufgeföhren, eine Ortbetoninnenschale wird nachträglich eingebaut. [8]

Beim kontinuierlichen Vortrieb im Lockergestein mit dauerhaftem Grundwasserandrang werden druckwasserdichte Schildmaschinen (SM) eingesetzt. Die SM löst den Boden ebenfalls im Vollschnitt, jedoch ist eine Stützung der Ortsbrust in der Höhe des anstehenden Wasser- und Erddrucks erforderlich. Die Stützung kann hydraulisch mit Hilfe einer Stützsuspension (Hydroschild), als aktive Erdruckstützung (Erdruckausgleichsschild) oder mit Druckluft (Druckluftschild) erfolgen. Für die Abfuhr des Abraums werden bei Druckluft und Erddruck gestützten Vortrieben Gleis- oder Förderbandtransporte, bei kurzen Vortrieben auch Radtransporte verwendet.

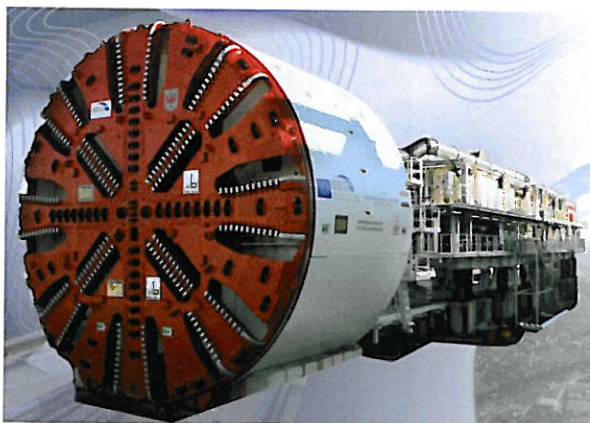


Abb. 8 Mixschild Münster-Wiesing H3-4 Inntal

Flüssigkeitsgestützte Schildmaschinen haben einen geschlossenen hydraulischen Kreislauf mit einer aufwendigen Entsandungsanlage an der Oberfläche, in der die verschmutzte Suspension gereinigt und erneuert wird. Die Vortriebsmaschine stützt sich auf den nachfolgenden druckdichten Tübbingausbau ab, der am Ende der ebenfalls druckdichten Schildmaschine im Schutze einer druckdichten Übergangskonstrukti-

on (Schildschwanz) eingebaut wird. Eine Sicherung vom Vortrieb aus ist bei Schildvortrieben im grundwasserführenden Lockergestein nicht möglich bzw. erforderlich. Der Ringraum über der Tübbingröhre wird kraftschlüssig verpresst. Bei Bedarf kann der aufzufahrende Baugrund durch voreilende Bodenverbesserungsmaßnahmen für den Schildvortrieb vergütet werden. Spezielle Sicherungsmaßnahmen gegen Auftrieb und Ausbläsergefahr können auch bei Gewässerunterquerungen zu Einsatz gelangen.

Der Ausbau kann grundsätzlich einschalig mit einem gedichteten Tübbingsystem oder zweischalig mit Einzug einer Innenschale ausgeführt werden.

Die Analyse der Schlüsselprozesse der Tunnelbauverfahren zeigt als Ergebnis, dass auf Grund der großen Unterschiedlichkeit der Verfahren in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Gebirgsverhältnissen eine direkte Vergleichbarkeit von Teilprozessen nicht zielführend ist. Eine sorgfältige Detailbetrachtung aller Abläufe und Abwägung aller Vor- und Nachteile der einzelnen Prozesse ist jedoch vor der Entscheidung für ein bestimmtes Verfahren unabdingbar. [9]

3 Randbedingungen und Aspekte

Die Randbedingungen und Aspekte – vor allem hinsichtlich der Geotechnik, Planung und des Baubetriebes – stellen für jedes Tunnelbauvorhaben wesentliche Entscheidungskriterien für die Wahl der Vortriebsart dar. Sie müssen bei der Projektierung eines Tunnelbauvorhabens sorgfältig analysiert und bewertet werden. Diese Bewertung kann für die vorhandenen Randbedingungen zu drei Ergebnissen führen:

- es ist technisch nur ein zyklischer Vortrieb möglich (z.B. extrem druckhaftes oder wechselhaftes Gebirge)
- es ist technisch nur ein kontinuierlicher Vortrieb möglich (z.B. durch Unmöglichkeit einer Grundwasserabsenkung im städtischen Lockergestein)
- es ist technisch sowohl ein zyklischer als auch ein kontinuierlicher Vortrieb möglich.

Die Technik der Vortriebsmaschinen hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, sodass sowohl immer größere Durchmesser als auch der geologische Anwendungsbereich des kontinuierlichen Vortriebs immer breiter werden. Aus diesem Grund tritt der dritte Fall immer häufiger auf, in dem technisch beide Vortriebsmethoden möglich sind und die Auswahl aufgrund einer wirtschaftlichen Bewertung erfolgen muss. Bei Projekten, in denen diese Kostenbewertung in der Projektierungsphase keine eindeutige Tendenz zu einer Vortriebsart bringt, wird in den letzten Jahren oft seitens des Auftraggebers die Möglichkeit genutzt, beide Vortriebsmethoden aususchreiben und die Entscheidung durch den Bieterwettbewerb herbeizuführen.

3.1 Geotechnik

Der kontinuierliche Vortrieb im kreisrunden Querschnitt führt durch die ideale Geometrie des ausgebrochenen Hohlraumes und den drehenden Lösevorgang in der

Regel zu einem gebirgsschonenden und profilgenauen Ausbruch mit einem geringen Überprofil [9]. Beim zyklischen Vortrieb ist ein profilgenauer und schonender Lösevorgang meist nur beim Baggervortrieb im Lockergestein möglich. Im Festgestein – wo der Lösevorgang vorwiegend mittels Sprengung durchgeführt wird – ist die Profilgenauigkeit meist gering, sodass in ungünstigen Fällen mit Überprofilen von 10 bis 15% der Ausbruchsfläche zu rechnen ist. Durch den Sprengvortrieb ist auch unter Einsatz modernster Sprengtechnik eine Gebirgsauflockerung nicht zu vermeiden. Auch der Wasserzutritt kann durch die Störung des Gebirgsverbandes im Vergleich zum kontinuierlichen Vortrieb doppelt so groß sein. [6]

Die prinzipiell möglichen Stützmittel sind bei beiden Vortriebsmethoden gleich. Der wesentliche Unterschied ist, dass der Stützmittelaufwand im kontinuierlichen Vortrieb zwar aufgrund des schonenden Lösevorgangs punktuell geringer ist, eine Anpassung an die anstehenden Gebirgsverhältnisse während des Vortriebes jedoch beim kontinuierlichen Vortrieb nur beschränkt möglich ist. Vor allem beim Schildvortrieb – wo die Sicherung mittels Tübbingen erfolgt – muss die Dimensionierung der Auskleidung auf die ungünstigsten Gebirgsverhältnisse erfolgen. Beim zyklischen Vortrieb kann theoretisch bei jedem Abschlag mit einer individuellen Ausbaufestlegung auf die tatsächlich angetroffenen Gebirgsverhältnisse reagiert werden und somit ein wirtschaftlicher Stützmitteleinsatz gewährleistet werden. In Extremfällen kann zusätzlich zu dem beim zyklischen Vortrieb üblichen Ausbruch in Teilquerschnitten (Kalotte, Strosse, Sohle) auch innerhalb des Querschnitts eine Ortsbrustverkleinerung durchgeführt werden bzw. der Ausbruch in Teilflächen erfolgen. Durch diese Anpassungsmöglichkeit ist im zyklischen Vortrieb auch ein Übergang vom Festgestein ins Lockergestein oder umgekehrt mit relativ geringem Aufwand durch den Wechsel der Lösemethode handhabbar. Sogar sogenannte „Mixed Face Bedingungen“ sind durch teilweisen Ausbruch durch Sprengen und Baggern innerhalb eines Querschnitts beherrschbar. Auch beim Auftreten von Störungszonen können beim zyklischen Vortrieb von untertage vorausseilende Maßnahmen ergriffen werden. Beim kontinuierlichen Vortrieb sind vorausseilende Maßnahmen meist nur von obertage oder aus Schächten möglich. Bei innerstädtischen Vortrieben erschwert oder verhindert die zumeist dichte Bebauung ein Agieren von obertage.

Vor allem bei nicht prognostizierten und somit unerwarteten Störungen kommt es bei kontinuierlichen Vortrieben zu einem Leistungseinbruch oder in Extremfällen sogar zu einem Vortriebsstillstand. Diese Stillstände können mehrere Monate andauern, falls es notwendig ist Sondermaßnahmen wie Injektionsschirme, DSV-Schirme oder Boden-

vereisung von konventionell vorgetriebenen Zugangsstollen zu ergreifen, um eine Weiterfahrt der Vortriebsmaschine zu ermöglichen.

Um dieses Risiko möglichst gering zu halten, ist vor allem beim kontinuierlichen Vortrieb eine detaillierte Baugrunderkundung unerlässlich. Die Vorauserkundung vom Vortrieb aus gestaltet sich beim zyklischen Vortrieb deutlich einfacher als beim kontinuierlichen.

3.2 Planung

Einen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Vortriebsarten stellt die Geometrie des Ausbruchsquerschnittes dar. Im zyklischen Vortrieb ist man in der Querschnittsgestaltung sehr flexibel. Innerhalb des verwendeten endgültigen Querschnittes (zumeist Hufeisenprofil vgl. Abb. 9) ist ein teilflächiger Abbau (Kalotten-/Strossen-/Sohlvortrieb, Kernbauweise,...) möglich. Wie anhand der Abb. 10 ersichtlich ist, stellt der Nutzraum beim kontinuierlichen Vortrieb nur etwa 2/3 des Ausbruchsquerschnittes dar. Dies führt vor allem bei mehrspurigen Tunneln (große Durchmesser) einerseits zu einem erheblichen Mehrausbruch und damit verbunden zu einem größeren Deponievolumen und andererseits zu einem erheblichen Mehrbeton, da die aufgrund der kreisrunden Geometrie ausgebrochenen und ungenützten Hohlräume zumeist mit Beton verfüllt werden.

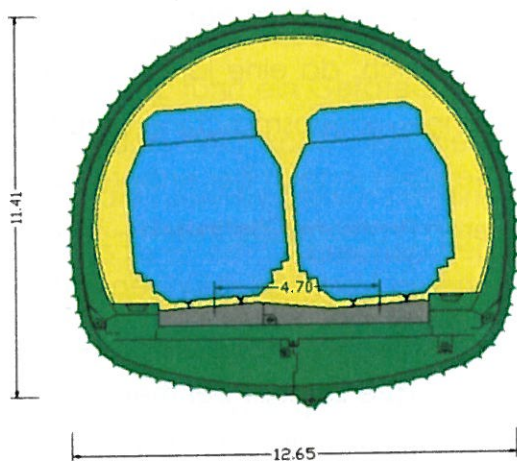


Abb. 9 Querschnitt konventioneller Vortrieb [17]

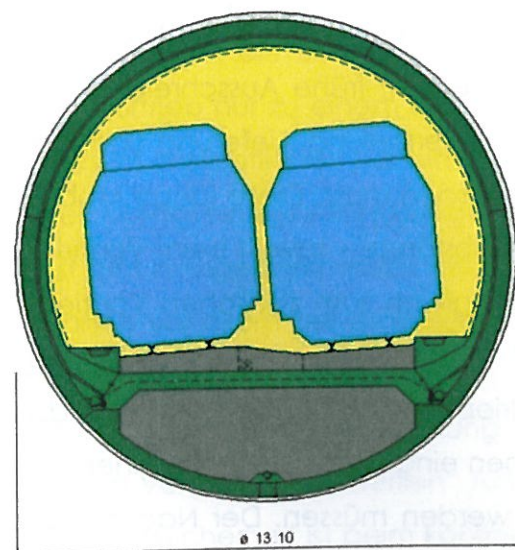


Abb. 10 Querschnitt kontinuierlicher Vortrieb [17]

Die lange voreilende Planung gestattet für kontinuierliche Vortriebe keine Änderungen, da der Querschnitt und die Tübbingkonstruktion nach der Auftragsvergabe meist nicht mehr geändert werden können. Beim zyklischen Vortrieb kann im Zuge

des Vortriebs in unterschiedlichen geologischen Zonen der Ausbruchquerschnitt auf geänderte Stützmaßnahmen (größere Dicke der Außen- oder Innenschale) bei gleichbleibendem Innenquerschnitt reagiert werden. Auch der Ausbruch von Sonderquerschnitten z.B. im Bereich von Abstellnischen stellt beim zyklischen Vortrieb keine Probleme dar und kann im Zuge des Vortriebs erfolgen. Bei kontinuierlichen Vortrieben werden diese meist nachfolgend zyklisch zum Teil mit Sondermaßnahmen ausgebrochen.

Hinsichtlich der Trassierung in Längsrichtung gibt es beim zyklischen Vortrieb keine Einschränkungen. Beim kontinuierlichen Vortrieb sind aufgrund der Länge der Tunnelvortriebsmaschine inklusive Nachläuferkonstruktion und der starren Konstruktion gewisse Mindestradien erforderlich. Dies kann vor allem bei innerstädtischen U-Bahntunneln zu Problemen führen.

Der Ausbau erfolgt im Falle eines zyklischen Vortriebs meist mit unbewehrtem Ort beton, welcher je nach Querschnittsgröße mittels Gewölbe- oder Full-Round-Schalwagen in Abschnittslängen von in der Regel 10 bis 12 Metern in die entsprechende Form gebracht wird. Dadurch entstehen konstruktionsbedingt relativ wenige Fugen, welche potentielle Fehlstellen darstellen. Beim kontinuierlichen Vortrieb ist vor allem beim einschaligen Tübbingausbau eine deutlich größere Fugenlänge vorhanden und somit das Risiko einer Undichtheit deutlich höher.

Bei der Planung eines kontinuierlichen Vortriebes ist eine (bezogen auf den Vortriebsbeginn) frühe Ausschreibung zwingend erforderlich, da eine lange Vorlaufzeit für die Herstellung, Lieferung und Montage der Tunnelvortriebsmaschine berücksichtigt werden muss. Diese lange Mobilisierungsphase kann jedoch bei entsprechender Vortriebslänge – soweit beim Vortrieb keine größeren Probleme auftreten – durch die im Vergleich zum zyklischen Vortrieb deutlich höheren Vortriebsleistungen kompensiert werden. Beim zyklischen Vortrieb ist die Dauer zwischen Zuschlagserteilung und Vortriebsbeginn deutlich geringer, da die Vortriebsgeräte zumeist bei mehreren Vortrieben eingesetzt werden können und nicht speziell für jedes Bauvorhaben angefertigt werden müssen. Der Nachteil der deutlich geringeren Vortriebsleistungen kann beim zyklischen Vortrieb nur durch mehrere Angriffspunkte (z.B. von beiden Portalen oder bei längeren Vortrieben auch von vorlaufend hergestellten Schächten, also Zwischenangriffspunkten) ausgeglichen werden.

3.3 Baubetrieb

Auch wenn beim zyklischen Vortrieb in den letzten Jahren in der Maschinenteknik große Fortschritte erzielt wurden, die sich sowohl auf die Leistungsfähigkeit als auch auf Arbeitsbedingungen auswirken, erfordert ein großer Teil des Stützmitteleinbaus nach wie vor Handarbeit. Im Gegensatz zum kontinuierlichen Vortrieb gibt es keine mechanisierten Versetzeinrichtungen. Beim zyklischen Vortrieb sind alle Stützmittel einsetzbar. Beim kontinuierlichen Vortrieb muss schon bei der Konstruktion der Maschine auf die einzubauenden Stützmittel Rücksicht genommen werden. Bei der Sicherung im Schildvortrieb ist es notwendig, den Spalt zwischen der Ausbruchslaubung und dem Tübbingaußendurchmesser – den sogenannten Ringspalt – mit Kies oder Mörtel zu verfüllen. Dieser Vorgang ist sehr sensibel und vor allem in den innerstädtischen Bereichen mit geringen Überdeckungen problematisch. Eine weitere Schwachstelle stellt die Schildschwanzdichtung dar, die bei Vortrieben unter dem Grundwasserspiegel dem Wasserdruck widerstehen muss.

Beim zyklischen Vortrieb erfolgen das Lösen, Laden und der Stützmitteleinbau im Wesentlichen zeitlich nacheinander unter Verwendung von verschiedenen Einzelgeräten (z.B. Bohrwagen, Radlader, Muldenhinterkipper, Spritzmanipulator,...). Bei dieser Vortriebsart gibt es also für jeden einzelnen Zyklus ein oder mehrere Schlüsselgeräte. Da jedoch beim Ausfall eines Einzelgerätes entweder ein Ersatzgerät auf der Baustelle vorgehalten wird oder zumindest in relativ kurzer Zeit auf die Baustelle gebracht werden kann, führt ein Geräteausfall im zyklischen Vortrieb nur zu einem kurzen Vortriebsstillstand. Beim kontinuierlichen Vortrieb gibt es im Wesentlichen nur ein Gerät – nämlich die Tunnelvortriebsmaschine – welche gleichzeitig einziges Schlüsselgerät ist. Kommt es zu einem Gebrechen bei der TVM, so ist dies zwingendermaßen mit einem Vortriebsstillstand verbunden. Diese Stillstände können vor allem bei größeren Schäden (z.B. Hauptlager) bis zu mehreren Monaten andauern.

Die Arbeitshygiene hat sich beim zyklischen Vortrieb durch die Verwendung von Nassspritzbeton zwar deutlich verbessert, ist jedoch im Vergleich zur „sterilen“ Tunnelvortriebsmaschine immer noch sehr schlecht. Die Arbeitssicherheit ist beim kontinuierlichen Vortrieb deutlich höher, da zumindest beim Schildvortrieb die Mineure nicht mit der ungesicherten Laibung in Berührung kommen. Aufgrund des nach wie vor hohen Anteils an manueller Arbeit sind die Anforderungen an das Personal beim zyklischen Vortrieb höher als beim kontinuierlichen.

Die höheren Investitionskosten, die lange Bereitstellungsphase und die im Vergleich zum zyklischen Vortrieb deutlich längere Einarbeitungsphase machen kontinuierliche

Vortriebe erst ab jener Vortriebslänge wirtschaftlich, bei der diese Nachteile durch die deutlich höhere erzielbare Vortriebsleistung aufgewogen werden. Diese Vortriebslänge ist von den jeweiligen Randbedingungen abhängig und liegt im Falle eines Festgesteinsvortriebs bei größer 3 Kilometern. [6]

4 Vortriebsleistungen

Eine Analyse der Vortriebsleistungen einiger ausgewählter Tunnelbauten im zyklischen Vortrieb zeigt ein sehr unterschiedliches Bild (Abb. 11). Bei standfester Geologie und mittleren Querschnittsgrößen sind durchschnittliche Vortriebsleistungen über 10 Meter pro Tag möglich, vor allem wenn die geologischen Verhältnisse über einen längeren Vortriebsabschnitt annähernd gleichbleibend sind. Wiederholende Einarbeitungs- und Umstellungsverluste entfallen und ermöglichen eine gleichmäßig hohe Leistung. Bestleistungen von weit über 15 Meter pro Tag sind möglich, bei Abschlags-tiefen von 4 Metern und mehr. Schlussfolgerungen auf einzelne Prozesse sind auf Grund der geringen Anzahl an Beispielen nicht verlässlich. Allerdings scheint sich die moderne Bohr- und Sprengtechnologie weniger deutlich niederschlagen als angenommen. Durchschnittliche Vortriebsleistungen von mehr als 10 Meter pro Tag sind auch bei modernen Hochleistungs-Sprengvortrieben mit optimaler Logistik nur schwer erreichbar. Die Spitzenleistungen liegen selten mehr als 70 bis 80% über den durchschnittlichen Tagesleistungen, eine Einstellung der Vortriebe auch unter schwierigen Verhältnissen ist selten.

Tunnel Name	Baulos Nutzung	Vortrieb Art	Profil m ²	Länge Km	Ø Lstg. m/d (24h)	max. Lstg. m/d (24h)	Durchschlag Jahr	Geologie
Ganzstein 2. Röhre	Ostvortrieb	NATM	70-102	0,8	2-2,5			2007 Karb., Phyllite
Geisswand	Traunkirchen	NATM	52,7/25,5	1,5	12,9/36,5			2006 Mergel, Dolomit
Lötschberg Nord	Mitholz	NATM	62-68	2x8,7	11,0	18		2005 Granit, Flysch
Lötschberg Süd	Raron	NATM		4,6	10,0	16		2003 Gneis, Granit
Luzerner Ring Basel	Strasse	Rohrschirm	95	0,2	0,8			2007 Molasse
Melach Stollen	Beileitung	NATM	10,5	11,5	15,0	25		1978 Kalkstein hart
San Cristóbal	Strasse	Drill & Blast	75	2x1,8	4,0			2007 hard rock
U6 München	Bahnsteigerw.	NATM+Vereis	50	2x0,2	2,0			2006 schluffiger Sand
Uetliberg	Strasse 2 Röhren	Spreng	148	2x0,5	6,0	8		2005 Molasse
Vereina Süd	Bahn	NATM	39-42	7,5	10,0	16		1997 Gneis, Granit
Wienerwald	Ost	NATM		1,8	4,0			2007 Flysch

Abb. 11 Gegenüberstellung ausgewählter zyklischer Vortriebe

Die Analyse der Vortriebsleistungen einiger ausgewählter Tunnelbauten im TBM-Vortrieb zeigt ein deutlich einheitlicheres Bild (Abb. 12). Durchschnittliche Leistungen von um die 20 Meter pro Tag sind häufiger erreichbar. Spitzenleistungen von mehr als 100% über den durchschnittlichen Vortriebsleistungen sind erzielbar, jedoch ist die

Gefahr der vorübergehenden Einstellung der Vortriebsarbeiten bei sehr schwierigen Gebirgsverhältnissen größer als bei zyklischen Vortrieben. Auch der häufige Wechsel der Vortriebsklassen wirkt sich bei kontinuierlichen Vortrieben stärker aus. Insgesamt kann aus diesem nicht repräsentativen Vergleich abgeleitet werden, dass kontinuierliche Vortriebe etwa doppelt so schnell wie zyklische Vortriebe sind.

Tunnel	Baulos	TBM/SM	DN	Länge	Ø Lstg.	max. Lstg.	Durchschlag	Geologie
Name	Nutzung	Typ	m	Km	m/d (24h)	m/d (24h)	Jahr	grob
Gotthard	Bodio Ost	2 TBM-O	9,3	13,4	9,6-25	38	2006	Gneis, Granit
Gotthard	Amsteg	2 TBM-O	9,5	11,3	18,0	40	2007	Gneis, Granit
Guadarrama	Eisenbahn	4 TBM-DS	9,5	2x28,4	16,8	64	2005	Granit, Gneis
Jökulsá Island	Triebwasser	TBM-O	7,2	8,7	40,0	106	2006	hard rock
Kops II	Triebwasser	TBM-DS	5,5	5,5	18,0	37	2006	Amphibolite
Lötschberg	Raron/Steg	2 TBM-O	9,4	10,9	20,0	33	2003	Gneis, Granit
Tizi Ouzou	Algier	TBM-O	3,7	2,8	16,7	24	2006	hard rock
Uetliberg	Pilotstollen	TBM	5,0	2,7	20,0	42,6	2003	Molasse
Uetliberg	Strasse	TBE	5,0 - 14,4	2,7	7,0	16,5	2005	Molasse
Wienerwald	West	2 TBM-S	10,7	10,7	25,0	51	2007	Flysch

Abb. 12 Gegenüberstellung ausgewählter kontinuierlicher TBM Vortriebe

Eine diesbezügliche Bestätigung ergibt die seltene direkte Vergleichsmöglichkeit beider Vortriebsarten in parallelen Vortrieben unter gleichen geologischen Bedingungen. Diese Erkenntnis konnte aus der Gegenüberstellung beider Vortriebsarten am Beispiel des Eisenbahnprojektes BLS Alptransit Lötschberg Basistunnel im südlichen Baulos Raaron/Steg gewonnen werden (Abb. 13, Abb. 14). Der ca. 33 km lange Lötschbergtunnel wurde im Dezember 2007 in Betrieb genommen. In der Gesamtbeurteilung konnten in Raaron auf den Vergleichsstrecken von je 4,6 km im zyklischen Sprengvortrieb mittlere Tagesleistungen von 10 m/AT bei Spitzenleistungen von 16 m/AT erreicht werden. Der kontinuierliche TBM-Vortrieb erzielte mittlere Tagesleistungen von 20 m/AT bei Spitzenleistungen von 33 m/AT. In einer berichtigten Vergleichsrechnung der Baustelle wird die Vergleichsdauer im zyklischen Sprengvortrieb von 19,5 Monaten, mit 1,0 Monat Mobilisierungsdauer und 18,5 Monaten Vortrieb angegeben, im kontinuierlichen TBM-Vortrieb betrug die Vergleichsdauer 15,5 Monate bei 4,5 Monaten Mobilisierungsdauer und 11,0 Monaten Vortriebsdauer. Der zyklische Sprengvortrieb dauerte somit 4,0 Monate oder 20% länger als der kontinuierliche TBM-Vortrieb. [4]

Mittlere Leistungen	Mergel	Ton-schiefer weich	Kalk	Diorit gneisig	Granit hart, abrasiv
SPV	5,6 m/AT	7,3 m/AT	10,0 m/AT	8,7 m/AT	10,2 m/AT
TBM	6,5 m/AT	17,8 m/AT	18,5 m/AT	22,2 m/AT	13,7 m/AT

Abb. 13 Leistungsvergleich geologiebezogen



Abb. 14 Vergleichsvortriebe je 4,6 km zyklisch (rot) und kontinuierlich (gelb)

5 Gegenüberstellung

Die Aufweitung zweier parallel geführter Sondierstollen beim Uetlibergtunnel (CH) einerseits mittels Tunnelbohr-Erweiterungsmaschine (TBE) und andererseits im zyklischen Vortrieb ließ ebenfalls einen direkten Vergleich von zyklischem und kontinuierlichem Vortrieb zu. Im Ergebnis wurden – bei vergleichbarer Arbeitszeit (aufgrund eines Nacht- und Wochenendverbots für das Sprengen) – im kontinuierlichen Vortrieb Vortriebsleistungen zwischen 25 und 35 m pro Woche, im zyklischen Vortrieb Wochenleistungen (unter Berücksichtigung des nach Abschluss des Kalottenvortriebs stattfindenden Restvortriebs) von ca. 20 m erzielt. Dennoch werden – wohl unter der Voraussetzung, dass eine TVM bereits auf der Baustelle vorhanden ist bzw. deren Kosten sich wirtschaftlich sinnvoll auf eine längere Vortriebsstrecke umlegen lassen – dem kontinuierlichen Vortrieb in diesem Fall geringere Kosten attestiert. [14]

Ein heutzutage typischer Grenzfall ist etwa die Tunnelkette Perschling mit drei in geschlossener Bauweise aufzufahrenden Tunnel mit Längen von 2,86 und 1,31 sowie 2,12 km. Hätte man bis vor wenigen Jahren in Österreich noch wenige Gedanken daran verschwendet, diese Bauwerke im kontinuierlichem Vortrieb herzustellen, so bewies die ÖBB als Bauherr das richtige Gespür für die Zeichen der Zeit, indem beide Methoden bei Einreichplanung und Ausschreibung berücksichtigt wurden, denn das ausführende Unternehmen legte unter Einsatz einer TVM das (knapp) beste Angebot. [2]

6 Entwicklungen und Entwicklungspotential

6.1 Zyklischer Vortrieb

Vermeehrt werden unter der Prämisse eines optimierten Bauablaufs gleichzeitig mehrere, oft voneinander (zumindest was die Versorgungslogistik betrifft) abhängige Angriffe beim zyklischen Vortrieb gewählt. Dies einerseits, um weiterhin konkurrenzfähig zum kontinuierlichen Vortrieb sein, und andererseits, um Bauzeitverkürzungen zu erreichen und dadurch zeitgebundene Kosten zu sparen (z.B. Tunnel Brixlegg [1]). Dies muss aber wohl geplant werden, vom Bauherrn abgesegnet sein und sollte Reserven enthalten, um im Falle von Änderungen der prognostizierten Geologie (und dadurch resultierende Änderungen der Vortriebsleistung) keine Gesamtverzögerungen zu verursachen. [1]

Nicht nur im kontinuierlichen (siehe unten), sondern auch im zyklischen Vortrieb wird die „Industrialisierung“ des Tunnelbaus vorangetrieben. Zu erwähnen ist hierbei im Besonderen die Verbesserung der Bohrtechnik durch computergesteuerte und leistungsfähige Bohrgeräte. Durch den Einsatz von Emulsionssprengstoffen (Pumpbeladung) konnte ebenfalls eine Rationalisierung erreicht werden. In diesem Bereich bedarf es einer weiteren Verbesserung der Sprengtechnik, was Einbruch und Abschlagstiefe betrifft.

Unter Industrialisierung kann nicht (nur) notwendigerweise der noch stärkere maschinelle Einsatz, sondern auch die Anwendung von aufwändigen Messprogrammen in Verbindung mit ausgeklügelten Rechenmodellen subsumiert werden. Darunter wird etwa von Lunardi mit dem System ADECO-RS (Analysis of the Controlled Deformation in Rocks and Soils) eine Rationalisierung des Vortriebs verstanden, indem – anders als bei der NATM für größere Querschnitte üblich – ein Vollausbuch ermöglicht wird. Dabei werden v.a. die Ortsbrust ständig bezüglich ihrer (horizontalen) Verformungen vermessungstechnisch überwacht sowie Spannungsmessungen in der Sohle durchgeführt. Die dabei ermittelten Parameter finden Eingang in ein Rechenmodell, nach welchem jeweils die vorausseilenden Sicherungsmaßnahmen bestimmt werden. [11] Obwohl dieses System mehr oder weniger erfolgreich auf der Eisenbahn-Hochleistungsstrecke Bologna-Florenz eingesetzt wurde, ist zweifelhaft, ob sich dieses System neben der NATM etablieren kann. Dies wird einerseits u.a. auch von der Kostenentwicklung der für ADECO-RS verstärkt einzusetzenden Sondermaßnahmen (v.a. zur Ortsbruststützung) und andererseits davon abhängen, ob diesem System weitere Möglichkeit zur Anwendung und dadurch zum Auffinden von Rationalisierungspoten-

zial geboten wird. Dazu gibt es bereits kritische Stimmen – wenig überraschend – besonders aus dem Lager der österreichischen Tunnelbauer. So wird der gegenständlichen Vortriebsmethode etwa für tiefliegende Tunnel mit druckhaftem Gebirgsverhalten – anhand eines theoretischen Vergleichs am Beispiel des Tunnels Strengen – eine im Vergleich zur NATM eklatante Unwirtschaftlichkeit attestiert. [5]

Bei langen Tunneln, welche im zyklischen Vortrieb hergestellt werden, zeichnet sich eine Tendenz für die Schutterung hin zum Förderband ab. So wurde diese Methode etwa bereits bei mehreren Vortrieben am Lötschbergtunnel in Verbindung mit einer Hängebühne für die Infrastruktur-Aufbauten erfolgreich installiert. Allgemein ist zu erwarten, dass Vorrichtungen, welche eine weitere Entkopplung von Kalotten- und dem nachfolgenden Strossen- und Sohlvortrieb ermöglichen, verstärkt zur Anwendung kommen werden.

Ebenfalls einen höheren Grad an Automatisierung, allerdings im kontinuierlichen Vortrieb, bietet die beim Gotthard-Tunnel eingesetzte Anlage zur Durchführung sämtlicher Reprofilierungsarbeiten sowie eine Folienverlegemaschine. Es gilt als wahrscheinlich, dass diese Methoden in Hinkunft auch im zyklischen Vortrieb zur Anwendung kommen.

Weiteres Verbesserungspotenzial wird ebenfalls noch im Bereich des Spritzbetons erkannt, wobei hier einerseits eine Weiterentwicklung der Rezepturen des Spritzbetons und andererseits verfahrenstechnische Verbesserungen (noch höherer Automatisierungsgrad) v.a. für den zyklischen Vortrieb erwartet werden. [16]

Darüberhinaus bedarf es einer Entwicklung der Automatisierung und Fernsteuerung von radgebundenen Transportgeräten, wie sie heutzutage schon teilweise im Bergbau angewandt wird, um die Wirtschaftlichkeit des zyklischen Vortriebs zu steigern. [9] Bei langen Tunneln mit gleisgebundenem Transport ist eine koordinierte computerunterstützte Steuerung der Züge in einer Leitstelle Stand der Technik [3]. Wenn es gelingt – vor allem bei langen Tunnelprojekten, wo von einem Angriffspunkt aus mehrere Vortriebe bedient werden müssen – die Transportlogistik noch weiter zu automatisieren, dann trägt dies ebenfalls zur Steigerung der Konkurrenzfähigkeit des zyklischen im Vergleich zum kontinuierlichen Vortrieb bei.

6.2 Kontinuierlicher Vortrieb

Länger, Tiefer, Größer – das ist die Devise im kontinuierlichen Vortrieb: Schildmaschinen mit einem Durchmesser von über 15 m, Vortrieb in Tiefenlagen bis 60 m in durchlässigem, grundwasserführendem Lockergestein bzw. Bewältigung von Stützdrücken

im Bereich von 15 bar und Längen von beinahe 60 km, wie Gotthart-, Lötschberg- und zukünftig der Brennerbasistunnel zeigen. Und eine noch weiterreichende Entwicklung ist, vor allem was die Querschnitte betrifft, noch nicht absehbar.

Damit einher geht eine noch stärkere „industrielle“ Fertigung aufgrund einer ausgeklügelten Logistik, v.a. was das Zusammenspiel von TVM, Separationsanlage, Ver- und Entsorgungslogistik der TVM und des Tübbingwerkes (im Idealfall auf der Baustelle) betrifft. Mit einzubeziehen in dieses System sind die zusätzlichen Aufwendungen und Vorkehrungen einer allfällig zeitgleich stattfindenden Herstellung von Querschlängen. Nicht nur das Zusammenspiel der Faktoren für Vortrieb und primären Ausbau, sondern auch der weitere Tunnelausbau (etwa der Sohlausbau in Ortbeton durch einen Gleitschalungsfertiger) mittels geeigneter Nachläuferkonstruktionen wurde bereits erfolgreich durchgeführt und scheint auf zusätzliche Arbeitsschritte (z.B. Ortbetoninnenschale) erweiterbar. [13], [16]

Die Hersteller der TVM sind – nicht zuletzt aufgrund steigender Energiepreise – im Interesse ihrer Kunden auf der Suche nach Energieeinsparungspotenzialen, zumal die Kosten dafür einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtkosten einnehmen. Durch einen elektrischen Antrieb des Schneidrades kann die Leistung aufgrund des höheren Wirkungsgrades im Vergleich zum hydraulischen Antrieb um ca. 20% reduziert werden (bei gleichem Durchmesser und ähnlicher Geologie). Exemplarisch sei weiters das abgeschottete Sohlsegment (Wesertunnel, H8-Unterinntal) angeführt, welches zu einer geringeren Verklebung des Schneidrades und damit ebenfalls zu einer Energieersparnis führt. [12]

Für heterogene Baugrundbedingungen werden immer stärker TVM mit Hydroschild eingesetzt, bei welchen einerseits Disken für den Abbau (sowie ein nachfolgender Gesteinsbrecher für die Zerkleinerung) von Gesteinsblöcken und andererseits Schälmesser (geometrisch etwas hinter den Disken angeordnet) zum Abbau des Lockermaterials zum Einsatz kommen. [12] Weiters sind konvertierbare Vortriebssysteme, bei welchem (offene) TBM und (geschlossene) SM in einem Gerät vereint sind, speziell für wechselhaften Untergrund geeignet.

Entwicklungsbedarf beim kontinuierlichen Vortrieb wird in der Nutzung der anfallenden gewaltigen Datenmengen zur Prozesssteuerung gesehen, wodurch eine automatisierte Verknüpfung der Maschinendaten mit der Vortriebssteuerung erreicht werden könnte. Außerdem könnte eine Verbesserung der Vorauserkundungsmöglichkeiten diesem weitere Vorteile gegenüber dem zyklischen Vortrieb bringen. [15]

Vor allem Projekte in dicht bebautem Gebiet und/oder Lockergestein weltweit einerseits und die Gebirgsquerungen in den Alpen andererseits sind zur Zeit das Maß aller Dinge. Nach der Querung des Kanals zwischen Frankreich und Großbritannien in den 1990er-Jahren werden weltweit gesehen sicherlich die Unterquerungen von Meeren und damit die Verbindung von Inseln mit dem Festland z.B. in Ostasien zu den nächsten Meilensteinen, bei denen zum heutigen Zeitpunkt vielfältige Fragen hinsichtlich der technischen Machbarkeit (Längen und Druck- sowie geologische Verhältnisse) und der wirtschaftlichen Rentabilität einer Lösung bedürfen.

7 Schlussfolgerungen

Ein direkter Vergleich unterschiedlicher Vortriebsarten ist nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Voraussetzung sind nahezu parallele Vortriebe unter weitgehend vergleichbaren geologischen Verhältnissen. Aus den wenigen Beispielen in diesem Aufsatz lassen sich kaum allgemeingültige Erkenntnisse gewinnen. Die Vortriebsgeschwindigkeit kann, unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren, im kontinuierlichen Vortrieb im Mittel etwa doppelt so hoch wie im zyklischen Vortrieb angenommen werden. Unerwartete geologische oder maschinentechnische Veränderungen können jedoch schlagartig zu sehr langen Stillständen führen. Die Stärken des zyklischen Vortriebs liegen in der Beherrschung widrigster geologischer Bedingungen mit entsprechenden Unterstützungsmaßnahmen sowie in der relativ freien Querschnittswahl und der Möglichkeit zu Veränderungen – also in seiner Flexibilität.

Dennoch wird die Mehrzahl der Tunnel in Zukunft im kontinuierlichen Vortrieb aufgeföhren werden. Die hohe Leistung, der fabrikmäßige Produktionsablauf, die gesicherten Arbeitsverhältnisse und die gute Arbeitsplatzhygiene erlauben bei entsprechend gesicherter geotechnischer Baugrunderkundung eine optimale Anpassung der Maschine auf die zu erwartenden Gebirgsverhältnisse [8]. Der zyklische Vortrieb bleibt aber bei sehr schwierigen und stark wechselhaften Gebirgsverhältnissen erste Wahl. Die alternative Ausschreibung nach gleichwertigen Genehmigungsverfahren für beide Vortriebsarten stellt für große Projekte aus heutiger Sicht eine gute Lösung mit offenem Ausgang nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien der Bieter dar.

8 Literatur

- [1] Bauer M./Leitner L. „Aufgabe und Herausforderung für Techniker bei Änderungen in der Bauleistung am Beispiel des Tunnels Brixlegg“ in Altinger/Heegemann/Jurecka (Hrsg), FS Jodl (2007), S 1-10

- [2] Benedikt J./Obermeier O./ Schiesser K. „New Vienna-St. Pölten Railway Line, Perschling Tunnels“ in Felsbau 25 (2005) Nr. 2, S 18-27
- [3] Berner F./ Jünger Ch. „Baubetriebliche Herausforderungen beim Bau des Gotthard-Basistunnels, Los Bodio“ in Altinger/Heegemann/Jurecka (Hrsg), FS Jodl (2007), S 11-26
- [4] Bertholet, F.: Vergleich TBM-Vortrieb/Sprengvortrieb im Baulos Raron aus der Sicht des Unternehmers
- [5] Burgstaller H./Mattle B./Schneider E. „Bauwirtschaftlicher Vergleich der Baumethoden ADECO-RS und NÖT am Beispiel Tunnel Strengen“ in Felsbau 23 (2005) Nr. 1, S 90-98
- [6] Girmscheid, G.: Hochleistungsvortrieb im Tunnelbau – Industrialisierungstendenz im Sprengvortrieb; Bauingenieur, Band 77, Juni 2002, S 266-276.
- [7] Göbl A./Köhler H. „Der Schildvortrieb H3-4 Münster/Wiesing im Unterinntal“ im Tagungsband BBT 2008, innsbruck university press, S 62-70
- [8] Jodl, H.G./Altinger, G./Bichler, M./Kriebaum, J.W./Schlosser, W.: „Vortriebsmethoden und Ausbau von Tunnels“ in Bergmeister, K./Wörner, J-D. (Hrsg), 2005 Betonkalender, ISBN 3-433-01670-4; S. 21-118
- [9] Jodl, H.G.: „Sprengen am Bau zeitgemäß? Mechanischer Vortrieb oder Sprengen im Tunnelbau“ in Der Sprengbefugte, Nr. 145, 09/2004, Teil 1 S. 7-12 und Nr. 146, 12/2004, Teil 2; S. 9-10 Herausgeber: Verband der Sprengbefugten Österreichs
- [10] Lauffer, H.: „Die Logistik langer Tunnelvortriebe“ in Altinger/Heegemann/Jurecka (Hrsg.), Festschrift Jodl (2007), ISBN 978-3-200-00959-2; S. 193-203
- [11] Lunardi P./Cassani G./Bindi R. „From the ADECO-RS approach to the tunneling industrialisation“ im Tagungsband BBT 2008, innsbruck university press, S 71-80
- [12] Rehm U./ Wehrmeyer G. „Maschinenkonzept für den maschinellen Tunnelvortrieb unter schwierigsten geotechnischen Bedingungen im Unterinntal“ im Tagungsband BBT 2008, innsbruck university press, S 55-61
- [13] Rehm U./Glatz W. „Einsatz von Großprofil-Tunnelbohrmaschinen im 21. Jahrhundert unter sehr schwierigen geo- und verfahrenstechnischen Randbedingungen“ in Altinger/Heegemann/Jurecka (Hrsg), FS Jodl (2007), S 251-260
- [14] Schnell O./Maurhofer S./Glättli M./Bolliger J. „Uetlibergtunnel: Erster Durchschlag mit der TBE“ in Tunnel 4/2005, S 66-75
- [15] Tentschert E./Brückl E./Chwatal W./Maurer Ch./Poisel R./Preh A. Vortriebsklassifizierung und Leistungsoptimierung von Tunnelbohrmaschinen mittels Auswertung von Maschinendaten und seismischer Vorauserkundung“ in Altinger/Heegemann/Jurecka (Hrsg), FS Jodl (2007), S 315-323
- [16] Thewes M. „Zukunft der Forschung für den Tunnelbau“ in Tunnel 5/2006, S 34-39
- [17] Vigl, A.; et al.: Vergleichende Risikoanalyse für konventionellen Vortrieb und TBM-Vortrieb; Felsbau 20, Nr. 5, 2002, S 56-64