

Hagen, Lange, Erichsen und Maidl:

Bibra- und Finnetunnel – Vergleich von Spritzbetonbauweise und TVM-Vortrieben in ähnlichen Baugrundverhältnissen



## Bibra- und Finnetunnel – Vergleich von Spritzbetonbauweise und TVM-Vortrieben in ähnlichen Baugrundverhältnissen

**Dipl.-Ing. Holger Hagen, DB ProjektBau GmbH, Leipzig, Deutschland, Dipl.-Ing. H. Lange, Eisenbahn-Bundesamt, Außenstelle Halle, Dr.-Ing. Claus Erichsen, WBI - Prof. Dr.-Ing. W. Wittke GmbH Worldwide Engineerin, Aachen, Deutschland, Dipl.-Ing. Reinhold Maidl, IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Bochum, Deutschland**

Das Verkehrsprojekt VDE 8 umfasst die Eisenbahnneu- und -ausbaustrecke Berlin-Leipzig/Halle-Nürnberg/München und hat ein Kostenvolumen von 10 Mrd. €. Zentrale Bauwerke dieser Strecke sind der rund 7.000 m lange Finne- und der rund 6.500 m lange benachbarte Bibratunnel. Die beiden Röhren des Finnetunnels wurden mit TVM aufgeföhren, im Bereich der Finnestörung mit Keuper, Muschelkalk und Unteren Buntsandstein und über der Firste liegendem Grundwasserspiegel im „Closed Mode“ (Hydroschild), im übrigen Bereich im Mittleren Buntsandstein nach Absenkung des Grundwasserspiegels und Umbau der Maschine im „Open Mode“. Die beiden Röhren des Bibratunnels im Mittleren Buntsandstein und unter der Tunnelsohle liegendem Grundwasserspiegel wurden mit der Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Um einen Vergleich beider Bauverfahren zu ermöglichen, werden in diesem Beitrag die Bauzeiten und die Baukosten für den Finnetunnel und für den Bibratunnel unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen gegenübergestellt. Im Hinblick auf die Kosten ergeben sich bei den 6,5 und 7 km langen Tunneln keine signifikanten Unterschiede. Beide Tunnel wurden erfolgreich innerhalb der vorgesehenen Bauzeit und ohne nennenswerte Kostenüberschreitungen hergestellt.

**Bibra and Finne tunnels – comparison of shotcrete construction and driveage by tunnelling machine in similar subsoil conditions:** *The VDE 8 transport project comprises the Berlin-Leipzig/Halle-Nuremberg/Munich new and extended tracks and has a cost volume of 10 bn €. Important structures on these tracks are the approx. 7000 m long Finne tunnel and the approx. 6500 m long adjacent Bibra tunnel. The two tubes of the Finne tunnel were driven by tunnelling machines in the "closed mode" (hydro shield) in the area of the Finne fault with keuper, shell limestone and lower variegated sandstone and ground water level above the roof and by the "open mode" in the remaining area in the middle variegated sandstone after lowering of the ground water level and conversion of the machine. The two tubes of the Bibra tunnel in the middle variegated sandstone with ground water level below the tunnel were driven with the shotcrete construction method. In this contribution the construction times and costs of the Finne and Bibra tunnels taking into account the respective boundary conditions are compared. With regard to the costs no significant differences result in the 6.5 and 7 km tunnels. Both tunnels were successfully completed within the envisaged construction time and without appreciable increases in costs.*

**D**as Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8 – abgekürzt als VDE 8 – umfasst die im Bild 1 dargestellte Eisenbahnneu- und -ausbaustrecke Berlin-Leipzig/Halle-Nürnberg/München [1, 2]. Es gehört mit einem Kostenvolumen von 10 Mrd. € zu den größten Bauvorhaben Deutschlands und Europas. Die Strecke ist Teil des Transeuropäischen Netzes – konkret des Teilprojekts Nr. 1 der Achse Berlin-Verona/Mailand-Palermo-Messina. Die Strecke ist auf eine Entwurfsgeschwindigkeit von 300 km/h ausgelegt. Die Fertigstellung im Rohbau ist für das Jahr 2012 geplant, die Inbetriebnahme der Strecke ist für 2015 vorgesehen.

Zentrale Bauwerke der Teilstrecke Erfurt-Leipzig/Halle sind der Finne- und der Bibratunnel (Bild 1). Beide gehören mit rund 7.000 und rund 6.500 m zu den langen Tunneln in Deutschland. Sie liegen in direkter Nachbarschaft, die Entfernung zwischen den Tunneln beträgt nur etwa 1 km. Sie wurden in den vergangenen Jahren erstellt und werden derzeit für die VOB-Abnahme vorbereitet.

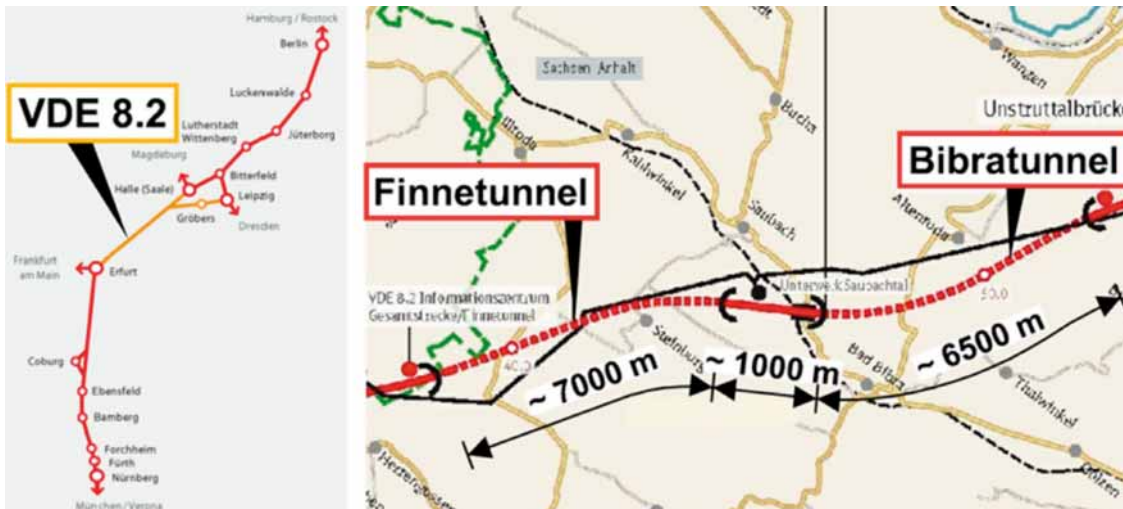
Für beide Tunnel sind aus Sicherheitsgründen zwei eingleisige Tunnelröhren konzipiert, die mit

rund 20 bis 25 m Achsabstand hergestellt werden. Die Bahnanlagen entsprechen den Vorgaben der EBO [3] und der Ril 853 [4]. Das ausgeführte Sicherheitskonzept entspricht der aktuellen Vorschriftenlage [5, 6].

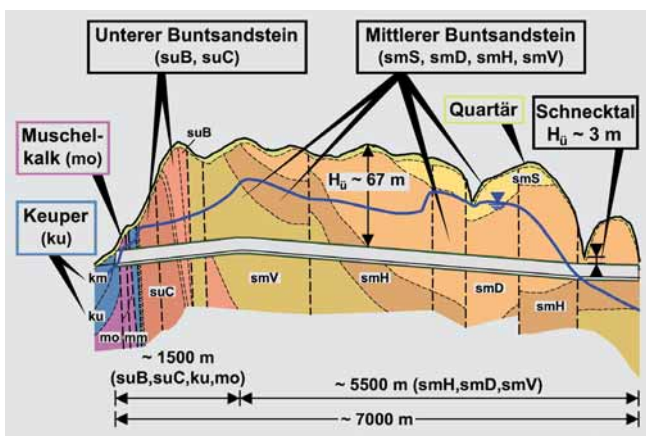
### Finnetunnel

Der Finnetunnel stellt mit fast 6.970 m Länge den längsten Tunnel des Abschnitts der VDE 8.2 dar. Die zwei parallel geföhrenen Röhren sind alle 500 m über Querschläge miteinander verbunden. Beide Tunnelröhren wurden maschinell aufgeföhren. Die Tunnelvortriebe starteten jeweils am wesentlichen Angriffspunkt mit zwei versetzt fahrenden Schildmaschinen.

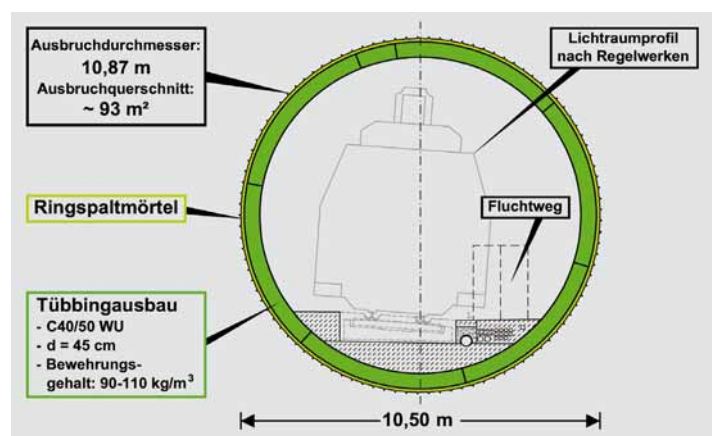
Die eingleisigen Tunnelröhren für den Finnetunnel verlaufen auf rund 1.500 m Länge im Einflussbereich der Finnestörung. In diesem Abschnitt werden Keuper, Muschelkalk und Unterer Buntsandstein durchfahren (Bild 2). Der Grundwasserspiegel steht rund 50 m oberhalb der Tunnelfirste an und eine Absenkung ist nicht erlaubt. Dieser Abschnitt wurde



**Bild 1. VDE 8 Berlin-Leipzig/Halle-Nürnberg/München – Finne- und Bibratunnel.**



**Bild 2. Finnetunnel – Geologischer Längsschnitt.**



**Bild 3. Finnetunnel – Querschnitt und Ausbau.**

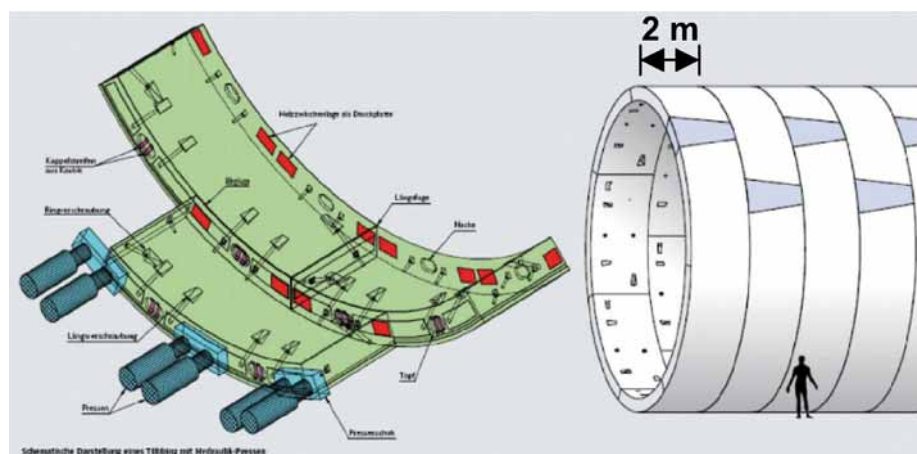
mit TVM im „Closed Mode“ (Hydroschild) aufgeföhren. Im folgenden Tunnelabschnitt mit einer Länge von rund 5.500 m liegen die Tunnelröhren im Mittleren Buntsandstein unter dem Grundwasserspiegel (Bild 2). Das Grundwasser wurde vorab durch Brunnen abgesenkt [7]. Die Überlagerung beträgt maximal rund 67 m und minimal 3 m im Bereich der Unterfahrung des Schnecktals [8]. Diese Tunnelabschnitte wurden mit TVM im „Open Mode“ aufgeföhren. Die Tunnelvortriebsmaschinen wurden hierfür umgebaut.

Die in einschaliger Bauweise erstellten Tübbingröhren bestehen aus 45 cm dicken und 2 m breiten Tübbingsegmenten. Die Ringteilung beträgt 6 + 1/2 Tübbingsteine, das Einzelgewicht eines Tübbings rund 12 t. Die Tübbings sind aus Beton der Güte C40/50 hergestellt, die Bewehrungsgehalte betragen 90 bis 110 kg/m³. Zur Koppelung der Tübbingringe ist ein Topf-Nocke-System ausgeföhrt. Die Wasserdichtigkeit der Röhre wird durch umlaufende Dichtprofile erzielt. Ein vorab bereits in den Tübbing integriertes Nachdichtsyste wird zur Sanierung einzelner Schadstellen genutzt (Bilder 3 und 4).

Die Bilder 5 und 6 stellen die Auslegung der Schildmaschinen im „Closed Mode“ (Hydroschild) und im „Open Mode“ dar. Nach rund 1.500 m Vor-

trieb im „Closed Mode“ im Einflussbereich der Finnestörung wurden die TVM für Vortrieb im „Open Mode“ umgebaut. Die Hydroschildkomponenten (Förder- und Speisepumpen sowie Steinbrecher)

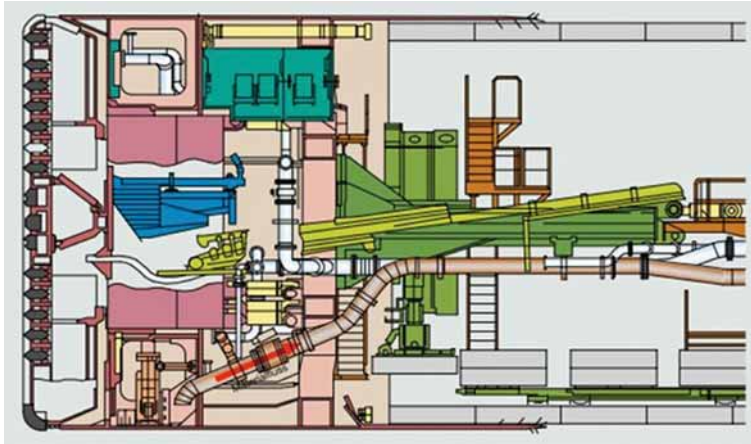
Topf-Nocke System mit temp. Verschraubung  
Ringteilung: 6 + 1/2  
Gewicht: rund 12 t je Tübbing  
Ringkonizität: 40 mm  
Umlaufendes Dichtprofil mit Nachdichtsyste  
**Bild 4. Finnetunnel – Tübbingdesign.**





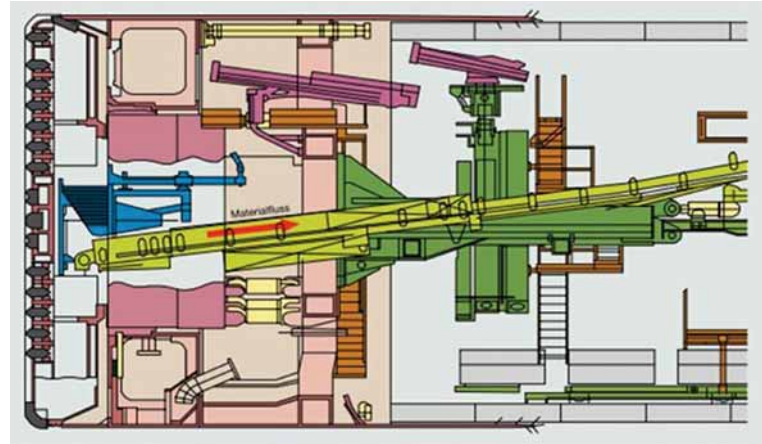
Hagen, Lange, Erichsen und Maidl:

Bibra- und Finnetunnel – Vergleich von Spritzbetonbauweise und TVM-Vortrieben in ähnlichen Baugrundverhältnissen



Hydroschild mit aktiver OB-Stützung  
hydraulische Försderung  
Schleusen, Steinbrecher, DL-Anlagen etc.

**Bild 5. TVM in der Betriebsart „Closed Mode“.**



Hartgesteinsschild mit offenem Vortrieb  
Bandförderung  
Entfall der Hydrokomponenten

**Bild 6. TVM in der Betriebsart „Open Mode“.**

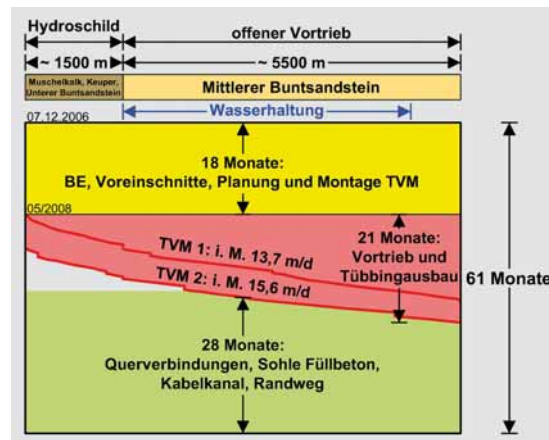
wurden demontiert. Durch den Vorlauf der ersten TVM konnten diese Komponenten in der nachlaufenden TVM für Vortrieb im „Closed Mode“ genutzt werden. Im „Open Mode“ wurde der abgebaute Fels direkt über das Förderband entsorgt.

Das Schneckental wurde im offenen Modus bei minimalen Gebirgsverformungen problemlos be-

wältigt. Dies war aus maschinentechnischer Sicht maßgeblich auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- Eine optimale Arbeitsvorbereitung.
- Ein weitgehend geschlossenes Schneidrad mit Besatz von Rollenmeißeln.
- Die Möglichkeit, Vorausinjektionen aus der Maschine heraus auszuführen.
- Das Schneidrad über die Längsverschieblichkeit zur Minimierung von Gebirgsverformungen zurückziehen zu können.

Bild 7 zeigt die für den Rohbau der beiden Tunnelröhren benötigten Bauzeiten. Nach 18 Monaten Vorbereitungen für beispielsweise die Baustelleneinrichtungen (BE), das Herstellen der Voreinschnitte sowie die Planung und Montage der Tunnelvortriebsmaschinen wurden die beiden Tunnelröhren in einem Zeitraum von 21 Monaten aufgeföhren. Durch optimale Anpassung an die geotechnischen Verhältnisse wurden im „Closed-Mode“ (Hydroschild) Vortriebsleistungen von im Mittel 9,2 m/Tag erzielt, denen Leistungen von 18,5 m/Tag im „Open Mode“ gegenüberstehen. Die Vortriebsmaschinen erzielten über die Gesamtlänge in der Nordröhre eine Leistung von 13,7 m/Tag und in der Südröhre 15,6 m/Tag. Mit Durchschlag der Maschinen waren bei dieser Bauweise die Röhren im Rohbau erstellt. Danach wurden in einem Zeitraum von 28 Monaten die Querverbindungen hergestellt (Bild 8), Füllbeton in die Tunnelsohle eingebaut sowie Kabelkanäle verlegt und Randwege hergestellt. Beide Tunnelröhren konnten im Rohbau nach insgesamt 61 Monaten Bauzeit fertiggestellt werden (Bild 7).



**Bild 7. Finnetunnel – Bauzeitenplan.**

**Bild 8. Tunnelröhre im Rohbau mit Querschlag.**



Durch konsequente Anwendung der präventiven Risikostrategie konnte beim Finnetunnel gezeigt werden, dass mit einem Maschinenvortrieb auch bei schwierigsten Randbedingungen hohe Vortriebsleistungen bei höchster Ausbauqualität und geringen Baugrundverformungen realisierbar sind.

## Bibratunnel

Die Länge des Bibratunnels beträgt 6.466 m. Die zwei parallel geföhrenen Tunnelröhren sind alle

500 m über Querschläge miteinander verbunden. Beide Tunnelröhren wurden konventionell in Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Vier Tunnelvortriebe wurden zeitlich parallel jeweils von den Tunnelportalen aus durchgeführt.

Der Bibratunnel liegt auf seiner ganzen Länge in Gesteinsformationen des Mittleren Buntsandsteins, und zwar hauptsächlich in der Hardegsen-Folge (Bild 9). Das Gebirge besteht aus Wechsellagerungen von Sandsteinen, Tonsteinen und untergeordnet Schluffsteinen. Lediglich im östlichsten Teil werden die Schichten der Solling-Folge durchfahren. Der Tunnel hat Überdeckungen von etwa 15 bis 50 m. Der Bergwasserspiegel liegt etwa 30 m unter der Tunnelsohle. Die Ausbruchfläche der eingleisigen Tunnelröhren beträgt rund 86 m<sup>2</sup> (Bild 10).

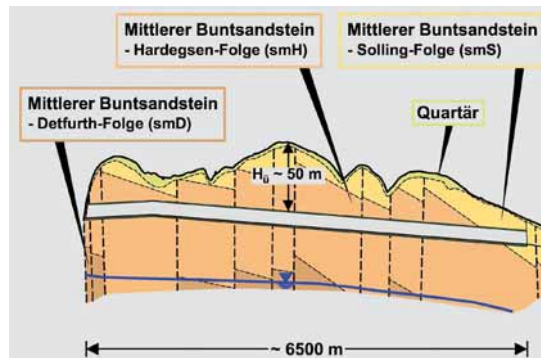
Der Vortrieb der Tunnelröhren erfolgte konventionell als Sprengvortrieb in Spritzbetonbauweise mit Teilausbrüchen bestehend aus Kalotte, Strosse und Sohle. Je nach geologischen Randbedingungen variierten die Abschlagslängen der vorausschiebenden Kalottenvortriebe zwischen 1,2 und 1,8 m. Die Sicherung erfolgte überwiegend mit vergleichsweise gering bewehrtem Spritzbeton und einer Systemankerung.

Der Ausbau besteht aus einer 35 cm dicken Innenschale aus WU-Beton der Güte C 30/37, die Bewehrungsgehalte betragen rund 75 kg/m<sup>3</sup> (Bild 11). Die Wasserdichtigkeit der Blockfugen wird durch umlaufende Fugenbänder erzielt. Zur Trennung von Spritzbeton und Innenschale wurden Luftpolsterfolien eingebaut. Vorab integrierte Nachdichtsysteme wurden vorgesehen, um gegebenenfalls undichte Fugen nachträglich abdichten zu können.

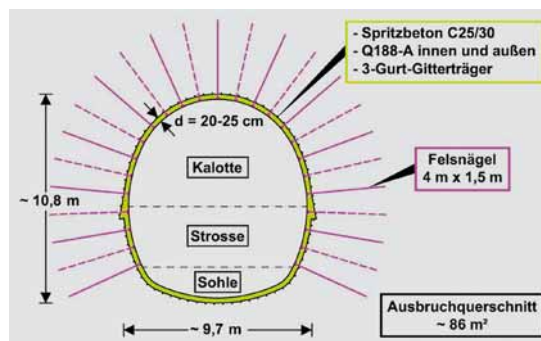
Bild 12 zeigt einen Blick in eine im Rohbau fertiggestellte Tunnelröhre. Im Vordergrund ist die Aufweitung für ein Portalbauwerk zu erkennen, mit dem Sonic-Boom-Effekte bei Zugein- und -ausfahrten vermieden werden sollen.

Bild 13 zeigt die für den Rohbau der beiden Tunnelröhren benötigten Bauzeiten. Nach acht Monaten Vorbereitungen für die Baustelleneinrichtungen (BE) und für das Herstellen der Voreinschnitte wurden die Tunnelröhren in einem Zeitraum von 18 Monaten aufgeföhren. Die Vortriebe erfolgten von den Tunnelportalen aus, das Aufföhren eines Zwischenangriffs war nicht erforderlich. An allen vier Vortriebsorten wurden Vortriebsgeschwindigkeiten von im Mittel 6,3 m/Tag erzielt, damit wurden pro Tag rund 25 m vorgefahren. Die Querverbindungen wurden bereits parallel mit den Vortrieben der Fernbahntunnelröhren aufgeföhren. Dadurch konnte bereits vor den Durchschlägen der Tunnelröhren mit dem Herstellen der Innenschalen begonnen werden. Die Andienung der Baustellen in den Tunnelröhren erfolgte jeweils über die Querverbindungen und die Nachbarröhre. Auf die gleiche Weise konnte auch mit dem Innenausbau begonnen werden, bevor die Innenschale vollständig in den Tunnelröhren fertiggestellt war. Auf diese Weise konnten die beiden Tunnelröhren und die Querverbindungen im Rohbau nach insgesamt 45 Monaten Bauzeit fertiggestellt werden (Bild 13).

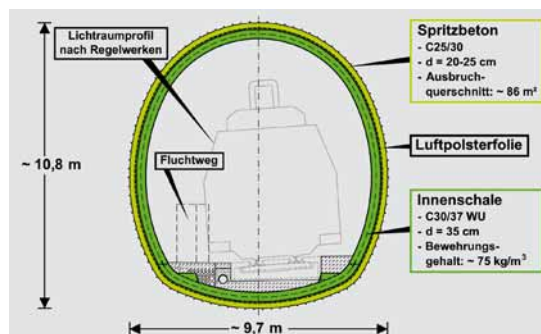
Entscheidend für diese vergleichsweise kurze Bauzeit war neben der Tunnelbautechnik das von der ausführenden Arbeitsgemeinschaft entwickelte modifizierte Baukonzept, das nach dem Entfall eines



**Bild 9. Bibratunnel, Geologischer Längsschnitt.**



**Bild 10. Bibratunnel – Kalottenvortrieb, Ausbruch und Sicherung.**



**Bild 11. Bibratunnel – Querschnitt und Ausbau.**

**Bild 12. Bibratunnel – Tunnelröhre mit Innenschale.**





Hagen, Lange, Erichsen und Maidl:

Bibra- und Finnetunnel – Vergleich von Spritzbetonbauweise und TVM-Vortrieben in ähnlichen Baugrundverhältnissen

Zwischenangriffs folgende Charakteristika aufwies:

- Vergrößerung der Querschnittsfläche der Verbindungsbauwerke zur Sicherstellung der Logistik für Ver- und Entsorgung.

- Zeitlich parallele Ausführung von Vortriebs- und Innenschalenarbeiten in beiden Tunnelröhren.
- Modifizierung des Materialtransports aus den Tunnelröhren durch Schutterung über Dumper, Übergabe an Förderbänder über mobile Brecheranlagen im Tunnel (Bild 14) und Abtransport des Tunnelausbruchmaterials über Förderbänder (Bild 15).
- Modifizierung des Bewetterungssystems durch Erstellung von zwei Lüftungsschächten.

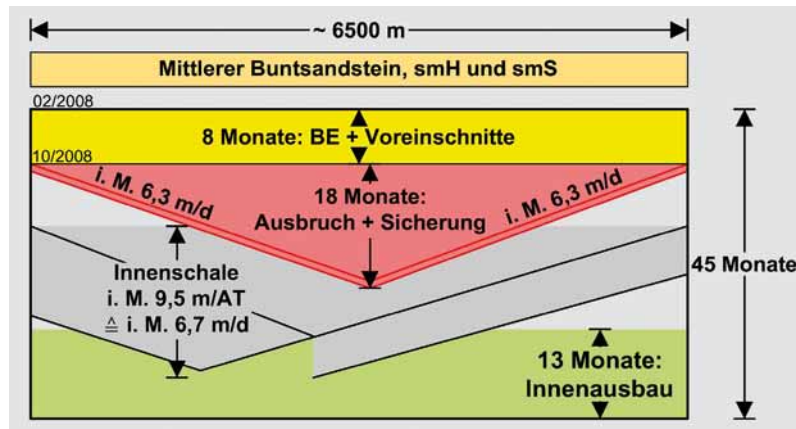


Bild 13. Bibratunnel – Bauzeitenplan.



Bild 14. Mobile Brecheranlage.

Bild 15. Voreinschnitt Ost und Förderband für die Schutterung.



### Vergleich beider Tunnel und gewonnene Erfahrungen

Beide Tunnelbauwerke wurden erfolgreich innerhalb der vorgesehenen Bauzeit und ohne nennenswerte Kostenüberschreitungen hergestellt.

Für den Vergleich der Tunnelbauweisen werden die Tunnelabschnitte betrachtet, die im Mittleren Buntsandstein liegen (Bilder 2 und 9). Der Bibratunnel liegt oberhalb des Grundwasserspiegels. Beim Finnetunnel wurde das Grundwasser vorab mit einer Wasserhaltung bis unter die Tunnelsohle abgesenkt, sodass beim Vortrieb in diesen Streckenabschnitten annähernd die gleichen Grundwasserverhältnisse vorlagen.

### Bauzeiten

Der Bibratunnel wurde konventionell in Spritzbetonbauweise in 45 Monaten und der Finnetunnel maschinell in 61 Monaten ausgeführt (Bilder 7 und 13). Setzte man beim Finnetunnel fiktiv den im Mittleren Buntsandstein ausgeführten „Open Mode“ auch für den Einflussbereich der Finnestörung an, so ergäbe sich eine Zeitersparnis von vier Monaten. Ursache hierfür ist neben den höheren Vortriebsleistungen auch der Entfall der Umbauzeiten der TVM vom „Closed Mode“ in den „Open Mode“. Die Bauzeit hätte sich um weitere zwei Monate reduziert, da beide Maschinen mit einem geringeren Längsversatz hätten fahren können. In Summe hätte sich die Bauzeit um rund sechs Monate reduziert. Somit stehen 55 Monate Bauzeit für den fiktiven, vereinfachten Finnetunnel den 45 Monaten Bauzeit für den Bibratunnel gegenüber. Daraus ergibt sich ein klarer Vorteil für die Spritzbetonbauweise, der sich im Wesentlichen im Nachlauf der Querschläge begründet. Ein Mitziehen der Querschläge während der TVM-Vortriebe sowie ein teilweises Vorziehen der Herstellung des Sohlbetons und der Randwege sollte aber grundsätzlich ähnliche Bauzeiten ermöglichen.

### Kosten für den Tunnelrohbau

Den realisierten Rohbaukosten des Bibratunnels von rund 192 Mio. € beziehungsweise 14.900 € pro Laufmeter Tunnel stehen zunächst rund 253 Mio. € beziehungsweise 18.200 € pro Laufmeter Tunnel für den Finnetunnel gegenüber (Tabelle 1). Diese Kostendifferenz von rund 20 %, die der Finnetunnel mehr kostet, fällt zunächst recht ordentlich zugunsten des Bibratunnels aus.

Für den Vergleich der Kosten der Tunnelbauweisen in ähnlichen Baugrundverhältnissen (hier Mittlerer Buntsandstein) wurden die Kosten für die Wasserhaltung und alle Kosten, die im Zusammenhang mit den Vortrieben im „Closed Mode“ angefallen sind, von den Gesamtkosten des Finnetunnels abgezogen. Im Einzelnen sind dies:

- ➔ Die Mehrkosten für die Tunnelvortriebsmaschinen, um beide Vortriebsmodi zu ermöglichen.
- ➔ Die bauzeitgebundenen Mehrkosten infolge der geringeren Vortriebsgeschwindigkeit im „Closed Mode“.
- ➔ Der Mehraufwand beim Werkzeugwechsel im „Closed Mode“, der teils unter Druckluft erfolgte.
- ➔ Der Mehraufwand für die Separierung inklusive der Separieranlage sowie für die Einrichtung zweier Transportsysteme.
- ➔ Der Mehraufwand für den Einbau der Erdmassen aus der „Closed Mode“-Strecke. Hier waren die Zugabe erheblicher Mengen von Kalk sowie entsprechende spezielle Transportfahrzeuge erforderlich.

Der Vergleich ergibt, dass sich die Kosten für den Rohbau der Tunnelröhren in den Tunnelabschnitten mit ähnlichen Baugrund- und Grundwasserverhältnissen (Mittlerer Buntsandstein) für konventionelle und für maschinelle Vortriebe nicht nennenswert voneinander unterscheiden (Tabelle 1).

Zusammenfassend wird festgestellt, dass beide Tunnel mit den gewählten Vortriebsverfahren erfolgreich innerhalb der vorgesehenen Bauzeit und ohne nennenswerte Kostenüberschreitungen hergestellt wurden.

### Literatur

- [1] Drescher, O.: Erfahrungen beim Bau von 25 Tunnels für die VDE 8 Bahnmagistrale Nürnberg – Erfurt – Halle/Leipzig – Berlin.
- [2] Feldwisch, W.: Die Großprojekte der DB Netz AG. Geotechnik 33, Nr. 2, (2010).
- [3] DB Netz AG: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO).
- [4] DB Netz AG: Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten. 01.03.2011.
- [5] EBA-Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln, 01.07.2008 und Konzern-Richtlinie 123 – Notfallmanagement und Brandschutz in Eisenbahntunneln, gültig ab 01.01.2006.
- [6] Europäische Union: Richtlinie 2001/16EG – Interoperabilität des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems. Richtlinie 96/48/EG über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems. Entwurf technische Spezifikation für die Interoperabilität. Teilsysteme: „Infrastruktur“, „Energie“, „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung“, „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung“, „Fahrzeuge“. Teilbereich: „Sicherheit in Eisenbahntunneln“: Amtsblatt der Europäischen Union, 07.03.2008.
- [7] Mühlkamp, M.; Heitfeld, M.; Klünken, J.; Schetelig, K.: Wasserhaltung am Finnetunnel – Planung und Durchführung einer 4,5 km langen Tiefbrunnen-Wasserhaltung in einem Festgesteinsaquifer. Geotechnik 33 (2010) Nr. 2.

**Tabelle 1. Kosten für den Rohbau der bergmännischen Tunnelröhren.**

Tunnel beziehungsweise Tunnelabschnitt	Kosten <sup>1)</sup>	
	Gesamt in €	in €/m Röhre
Bibratunnel, gesamt	ca. 192 Mio.	ca. 14.900
Finnetunnel, gesamt	ca. 253 Mio.	ca. 18.200
Finnetunnel, Abschnitt im mittleren Buntsandstein	ca. 212 Mio. <sup>2)</sup>	ca. 15.200 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> In Kosten enthalten: Tunnelröhren, Querverbindungen, Portalbauwerke, Verbringung Ausbruch, Wasserhaltung, Sohlbeton, Randwege, zugehörige Nachträge

Nicht in Kosten enthalten: Voreinschnitte, Zufahrten, Hochbauten, Rettungswege und -plätze, Tunnelausbau, Oberbau

<sup>2)</sup> Nicht in Kosten enthalten: Umbau TVM und Separierung sowie Wasserhaltung

[8] Hagen, H.; Otten, B.; Maidl, R.; Handke, D.: Unterfahung des Schnecktals durch den Finnetunnel. Tunnel 7/2010, S. 19–32.

[9] Wittke, W.; Pierau, B.; Erichsen, C.: Statik und Konstruktion der Spritzbetonbauweise. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 5, Verlag Glückauf, Essen, (2002).

[10] Wittke, W.; Druffel, R.; Erichsen, C.; Gattermann, J.; Kiehl, J.; Schmitt, D.; Tegelkamp, M.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke-Schmitt, B.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 6, Verlag Glückauf, Essen, 2006.