

TBM-Vortrieb im Buntsandstein für den Neuen Schlüchterner Tunnel - Lessons learned

**Dipl.-Ing. Bernd Rosenberg, Dipl.-Ing. Holger Kammel
Dr.-Ing. Bettina Wittke-Schmitt**

Zusammenfassung

Der Neue Schlüchterner Tunnel liegt auf der DB-Strecke 3600 südlich von Fulda und damit im Bereich der geplanten NBS Hanau - Fulda - Eisenach. Er wurde im Jahr 2011 in Betrieb genommen. Der Tunnel kommt in den Schichten des mittleren und oberen Buntsandsteins zu liegen. Darüber hinaus wurden tertiäre Rinnen sowie Störungszonen durchörtert.

Mit einer Länge von etwa 4 km wurde der Neue Schlüchterner Tunnel im maschinellen Vortrieb aufgeföhren. Dabei wurden verschiedene Erfahrungen gesammelt, die für die Planung der Tunnel der NBS Hanau - Fulda - Eisenach sowie für die Auslegung etwaiger Tunnelvortriebsmaschinen sehr wertvoll sind.

In dem Beitrag wird beleuchtet, welche Aspekte für die jeweils angetroffenen Untergrundverhältnisse im Bereich der Ortsbrust, im Bereich des Schildes sowie im Bereich der Auskleidung zu berücksichtigen und untersuchen sind. Es wird deutlich, dass die Anforderungen an den maschinellen Vortrieb in den verschiedenen Schichtgliedern zum Teil gegensätzlich sind, dass es aber möglich ist, Lösungen zu finden.

Darüber hinaus wird herausgestellt, dass im Zuge der Planung eine Betrachtung des Gesamtsystems erforderlich ist und eine isolierte Betrachtung der Ortsbrust oder der Tübbing-Auskleidung nicht ausreicht.

1. Projekt und Baugrund

Der Neue Schlüchterner Tunnel wurde im Auftrag der Deutschen Bahn von einer ARGE aus den Firmen Hochtief und Ed. Züblin gebaut und im Jahr 2011 in Betrieb genommen. WBI war Berater der ARGE. Der Tunnel liegt an der DB-Strecke 3600 zwischen Gelnhausen und Fulda und folglich mitten im Projektgebiet der geplanten Neubaustrecken Hanau - Fulda - Eisenach (Bild 1).

Der etwa 4 km lange Tunnel wurde mit einer Tunnelvortriebsmaschine in den Schichten des oberen und mittleren Buntsandsteins aufgeföhren. Darüber hinaus wurden drei tertiäre Rinnen, mehrere Störungszonen sowie "mixed-face-conditions" durchörtert (Bild 2). Die Überlagerung beträgt zwischen wenigen Metern im Portalbereich und etwa 77 m im Bereich der Unterföhierung des Autohofs Schlüchterner. Mit dem Tunnel wurden die Bundesstraße B40 sowie die Bundesautobahn BAB A66 unterföhren. Zusätzlich wurden insgesamt drei Querverbindungen zum Alten Schlüchterner Tunnel in gegenseitigem Abstand von 1.000 m in Spritzbetonbauweise aufgeföhren.

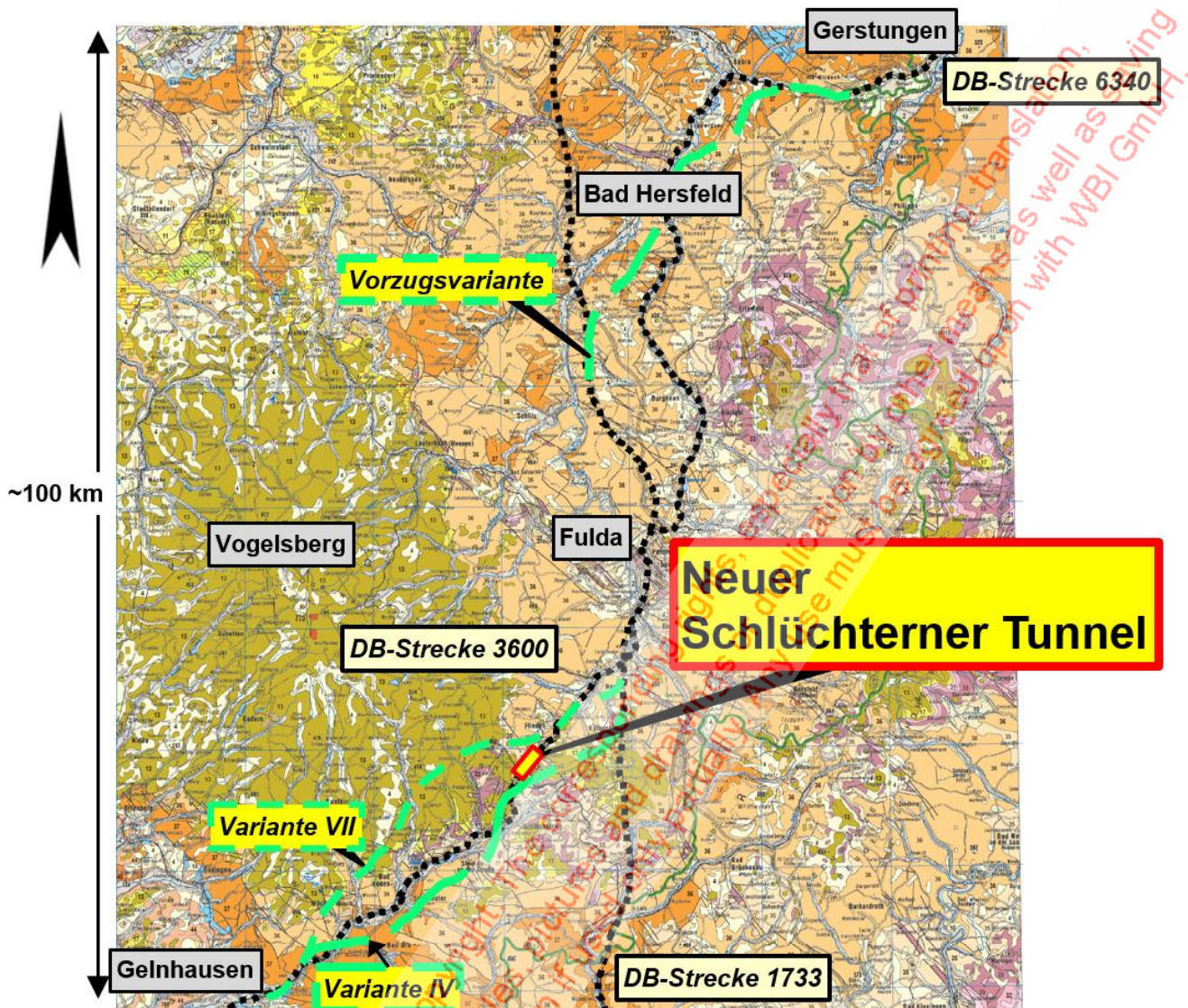


Bild 1: Lage des Neuen Schlüchterner Tunnels im Vergleich zu den Planungsräumen der NBS Hanau - Fulda - Eisenach (Geologische Karte aus HLUG 2007)

Im Mittleren Buntsandstein waren für den maschinellen Vortrieb im Wesentlichen die mittel- bis dickbankigen Sandsteinlagen entscheidend. Einen Eindruck von diesen geben die in Bild 3 dargestellten Bohrkern. Als Kennwerte für den Maschineneinsatz im Mittleren Buntsandstein wurden in dem Geotechnischen Gutachten (GTB Olpe 2002) und dem tunnelbau-technischen Gutachten (Tunnel Consult 2004) Druckfestigkeiten von ~40 bis 90 MN/m² sowie Quarzgehalte von ~65 bis 70 % prognostiziert. Es war ein Vortrieb im offenen Modus vorgesehen.

Im Oberen Buntsandstein wurden die Plattensandsteine und der Graue Basiston der Unteren Röt-Folge durchörtert. Bei den Plattensandsteinen handelt es sich um eine eng geschichtete Wechselfolge aus Sandsteinen und Tonschluffsteinen mit Schichtstärken von wenigen cm bis wenigen dm (Bild 4). Die Tonschluffsteine sind bereichsweise stark bis vollständig verwittert. Die Verwitterung kann bis ins Tunnelniveau reichen. Als Kennwerte für den Maschineneinsatz im Oberen Buntsandstein wurden in dem Geotechnischen Gutachten

(GTB Olpe 2002) und dem tunnelbautechnischen Gutachten (Tunnel Consult 2004) Druckfestigkeiten von ~20 bis 60 MN/m² sowie Quarzgehalte von ~30 bis 50 % prognostiziert. Es war auch hier ein Vortrieb im offenen Modus vorgesehen.

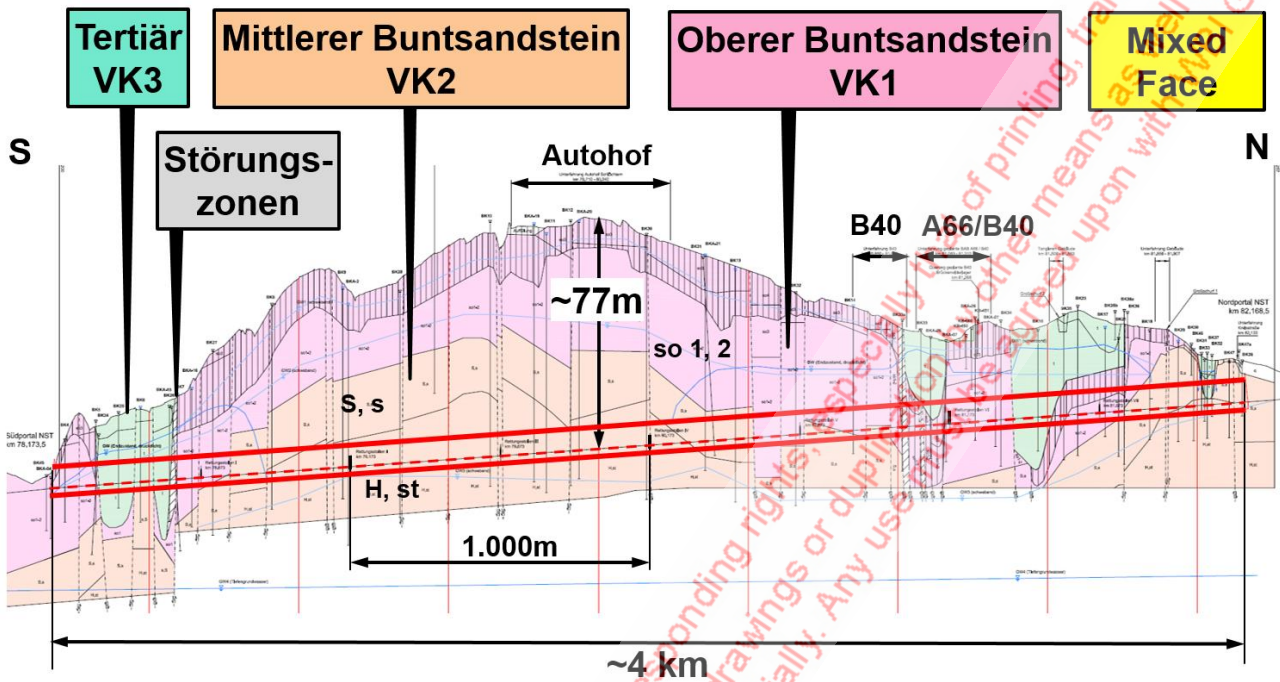


Bild 2: Tunnelbautechnischer Längsschnitt (GTB Olpe 2002)

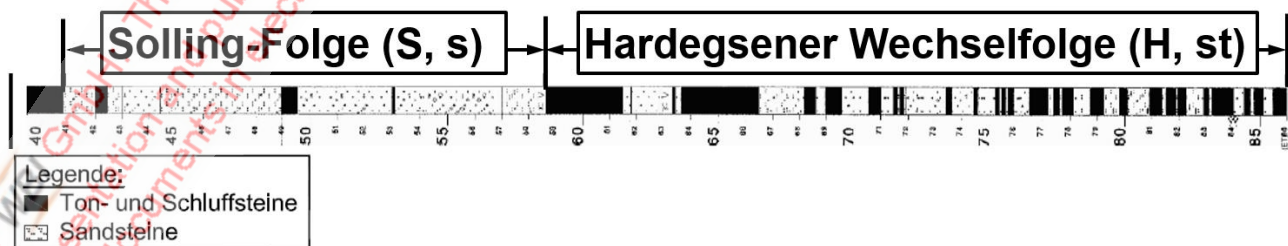


Bild 3: Mittlerer Buntsandstein gemäß Angaben in (GTB Olpe 2002 & Tunnel Consult 2004)

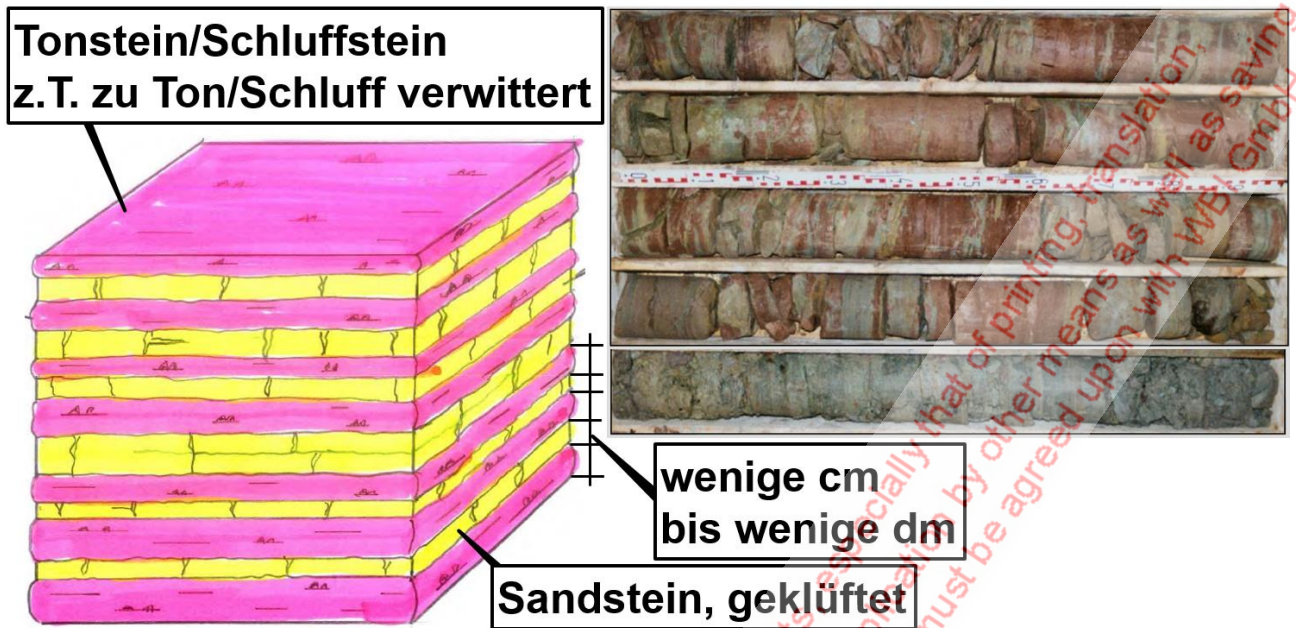


Bild 4: Plattensandsteine der Unteren Rötfolge des Oberen Buntsandsteins gemäß GTB Olpe 2004 und WBI 2007 bis 2013.

In den tertiären Rinnen standen im Wesentlichen tertiäre Tone, bereichsweise auch organische Tone an, in die lokal Braunkohlelagen, Sandlinsen und -lagen eingelagert waren (Bild 5). Für diese Bereiche war in der Ausschreibung ein Vortrieb im geschlossenen Modus mit Verbreiung vorgesehen (EPB-Vortrieb).



Bild 5: Tertiäre Rinnen gemäß GTB Olpe 2002, Tunnel Consult 2004 und WBI 2007 bis 2013

3. Tunnelvortriebsmaschine und Gesamtsystem Baugrund - TVM - Auskleidung

Der Vortrieb wurde mit einer Dual-Mode-Maschine der Firma Wirth durchgeführt. Als Vortriebs-Modi waren ein offener Modus mit Förderband sowie ein geschlossener Modus mit

Erdbrei-Stützung und Schneckenförderung vorgesehen (Bild 6). Der Bohrdurchmesser betrug 10,24 m, der lichte Durchmesser des Tunnels 9 m. Der Steuerspalt hatte planmäßig eine Dicke von 3 cm, der Ringspalt zwischen Tübbing-Außenkante und Felskontur eine Dicke von 17,5 cm. Im Schutze des Schildes wurde eine Tübbingauskleidung mit 45 cm Dicke eingebaut.

Die Erläuterungen in den nachfolgenden Kapiteln werden getrennt für die in Bild 6 dargestellten Teil-Bereiche Ortsbrust, Schild und Auskleidung dargestellt.

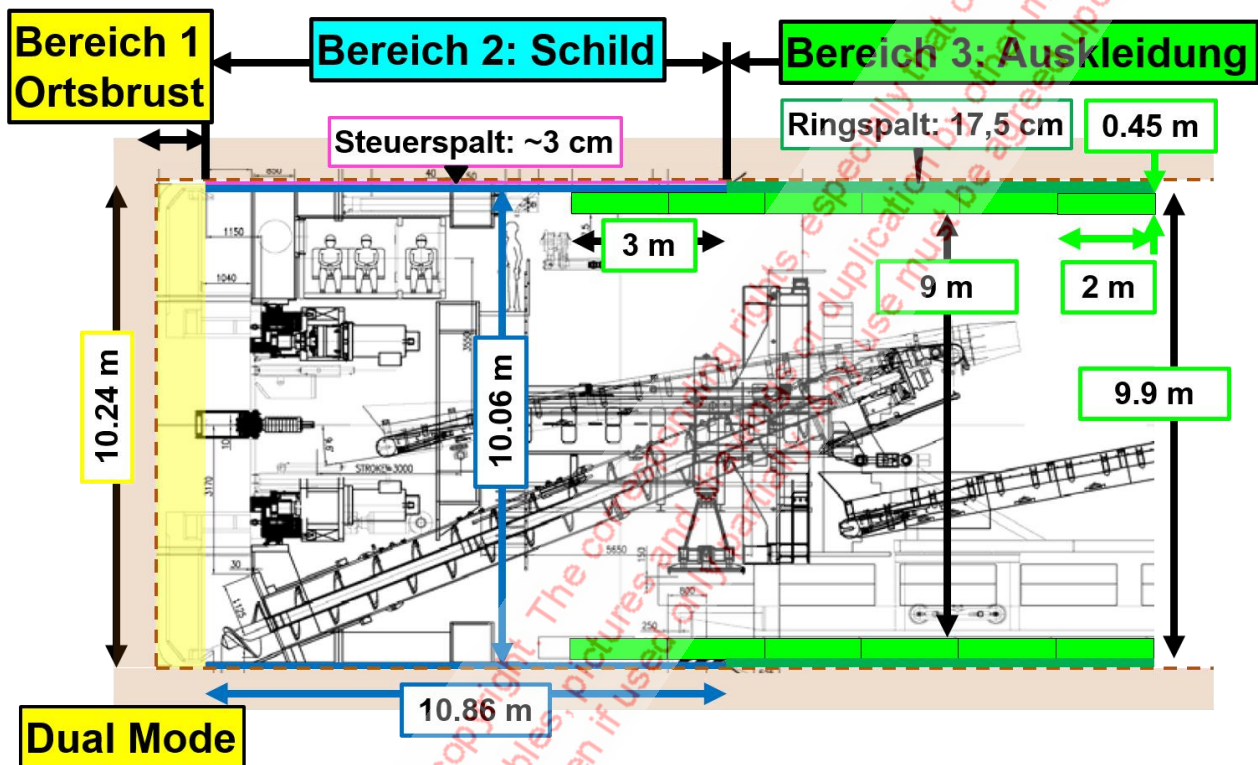


Bild 6: Tunnelvortriebsmaschine (Wirth) und Gesamtsystem

4. Teilbereich 1 - Ortsbrust

4.1 Mittlerer Buntsandstein

Wie bereits erwähnt, spielten bei dem maschinellen Vortrieb in dem Mittleren Buntsandstein insbesondere die mittel- bis dickbankigen Sandsteine eine Rolle. Einen guten Eindruck derselben vermittelt der in Bild 7 dargestellte Aufschluss aus einem Steinbruch im Projektgebiet. Das Hauptproblem beim maschinellen Vortrieb war das Phänomen des "Blocky Ground", welches schon bei verschiedenen TVM-Vortrieben im Fels aufgetreten ist (s. z. B. Lundmann & Rossel & Wittke & Wittke-Schmitt 2009). In solchen Fällen wird der Fels nicht wie gedacht an der Ortsbrust zu Gesteinsstücken (Chips) zermahlen. Vielmehr werden die durch Klüfte und Schichtfugen gebildeten Felsblöcke aus dem Verband gerissen und bewegen sich dann unkontrolliert vor dem Schneidrad. Das Schneidrad wirkt dann ähnlich wie ein Steinbrecher, und es kommt zu Schäden an den Abbauwerkzeugen. Hinzu kommt der Verschleiß infolge des hohen Quarzgehalts.



**Gestein c_G, φ_G
Quarzgehalt**

Klüftung c_K, φ_K

Schichtung c_S, φ_S

**Fels E, ν
(u.U. $E_1, E_2, G_2, \nu_1, \nu_2$)**

Bild 7: Mittlerer Buntsandstein, Aufschluss einer Felswand in einem Steinbruch im Projektgebiet (Foto aus Semprich 2013)

Um zu verhindern, dass die großen Gesteinsblöcke in die Abbaukammer geraten und dort sowie im nachgelagerten Fördersystem zu weiteren Schäden führen, hat man im Zuge des Vortriebs die Öffnungen im Schneidrad (Bild 8) mit sogenannten "Grill Bars" (Stahlstreben) verkleinert. Dadurch konnte die Größe der Gesteinsblöcke, die in die Abbaukammer transportiert werden, erfolgreich begrenzt werden.

Angesichts des hohen Quarzgehalts ist es weiterhin wichtig, sowohl am Bohrkopf selber als auch an den Werkzeugen einen ausreichenden Verschleißschutz vorzusehen. Auch sollten die Werkzeuge von innen aus der Abbaukammer heraus auswechselbar sein. Bei der Planung und Kalkulation sind Werkzeugwechsel entsprechend zu berücksichtigen.

Da die Ortsbrust im Mittleren Buntsandstein weitestgehend standsicher war, war ein Vortrieb im offenen Modus durchaus möglich, wenn die vorstehend erläuterten Aspekte und Maßnahmen berücksichtigt wurden.



Bild 8: Bohrkopf (Arge NST)

4.2 Plattensandstein

In den eng geschichteten, bereichsweise stark verwitterten Plattensandsteinen stellte die mangelnde Standsicherheit der Ortsbrust ein Problem für den maschinellen Vortrieb im offenen Modus dar. In Bild 9 ist beispielhaft eine Situation skizziert, bei der in die engständig geschichtete und geklüftete Wechselfolge aus Sand-/Tonschluffsteinen eine vollständig verwitterte Lage eingebettet ist. In der Folge des Versagens in dieser Schicht kommt es zum Nachbrechen der darüber liegenden Schichten. Auch ohne die vollständig verwitterte Schicht ist es denkbar, dass Felskeile ausgleiten und es in der Folge zum Nachbrechen der darüber liegenden Schichten kommt. Auch in den vollständig verwitterten Bereichen ließ sich die Standsicherheit der Ortsbrust weder rechnerisch nachweisen noch lag sie in der Realität vor. Die Ortsbrust war in weiten Bereichen des Oberen Buntsandsteins nicht stand-sicher, so dass ein Vortrieb im offenen Modus nicht möglich war.

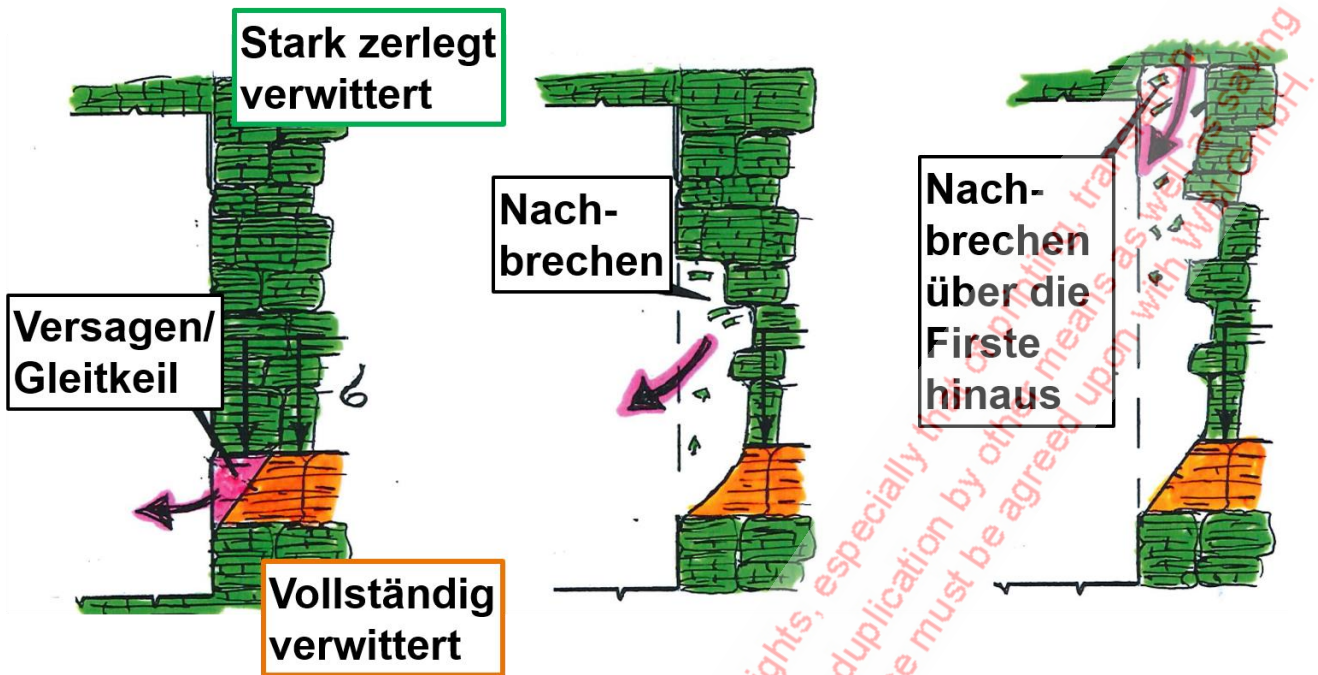


Bild 9: Standsicherheit Ortsbrust - Skizze eines beispielhaften Szenarios (WBI 2007 bis 2013)

Dem haben sich Schwierigkeiten mit der Steuerbarkeit der Maschine überlagert. Die Festigkeit der Tonschluffsteine, insbesondere im verwitterten Zustand, ist begrenzt. In der Folge kann an der Ortsbrust auch nur eine begrenzte Andruckkraft aufgebracht werden. Aufgrund des Kräftegleichgewichts in horizontaler Richtung (Andruckkraft - Mantelreibung - Pressenkräfte, siehe Bild 10) ergibt sich hieraus auch eine Begrenzung der aufbringbaren Pressenkräfte. Gleichzeitig sind Schildmaschinen in der Regel kopflastig, so dass das Eigengewicht und die Mantelreibung zu einem nach vorne unten gerichteten Moment führen (Bild 10). Wird dieses Moment nicht ausgeglichen, so neigen Schildmaschinen dazu, nach unten abzuwandern. Eine Möglichkeit des Ausgleichs ergibt sich daraus, im unteren Bereich des Querschnitts größere Pressenkräfte aufzubringen als im oberen Bereich. Gleichzeitig muss aber im oberen Querschnittsbereich ein Mindestmaß an Pressenkräften aufgebracht werden, um eine ausreichende Zusammendrückung der Dichtungsprofile in den Ringfugen zwischen den Tübbingringen zu gewährleisten. Ist das Maß der aufbringbaren Pressenkräfte durch kleine Andruckkräfte an der Ortsbrust begrenzt, dann kann die Schildmaschine nicht in der Spur gehalten werden. Dieses Problem mit der Steuerbarkeit ist auch beim Neuen Schlüchterner Tunnel aufgetreten.

Da die eingesetzte TVM auch einen Vortrieb im EPB-Modus erlaubte, lag es nahe, auf diesen umzustellen. Leider hat sich sowohl beim Vortrieb vor Ort als auch in umfangreichen Untersuchungen im Labor von WBI gezeigt, dass die Plattensandsteine nicht verbreibar sind. Bild 11 zeigt ausgewählte Ergebnisse der Verbreivungsversuche im Labor. Es wird deutlich, dass sich nur die stark verwitterten Tonschluffsteine sowie die engen Wechselfolgen aus Tonschluffsteinen und Sandsteinen mit starker Verwitterung in einen Erdbrei überführen lassen (siehe Bild 11 unten rechts). In den anderen Fällen blieben die Gesteinsstücke erhalten (Bild 11 unten links und Mitte), und auch die Menge an Abrieb reichte nicht aus,

um die Gesteinsstücke in demselben "schwimmen" zu lassen (Bild 11 oben rechts). Eine mit Gesteinsstücken gefüllte Abbaukammer führt nicht zur Stützung der Ortsbrust mit Erddruck. Weiterhin werden unzulässig hohe Drehmomente erforderlich, um diese zu drehen, und es entwickeln sich unzulässig hohe Temperaturen. Ein Vortrieb im EPB-Modus war deshalb in den Plattensandsteinen nicht möglich.

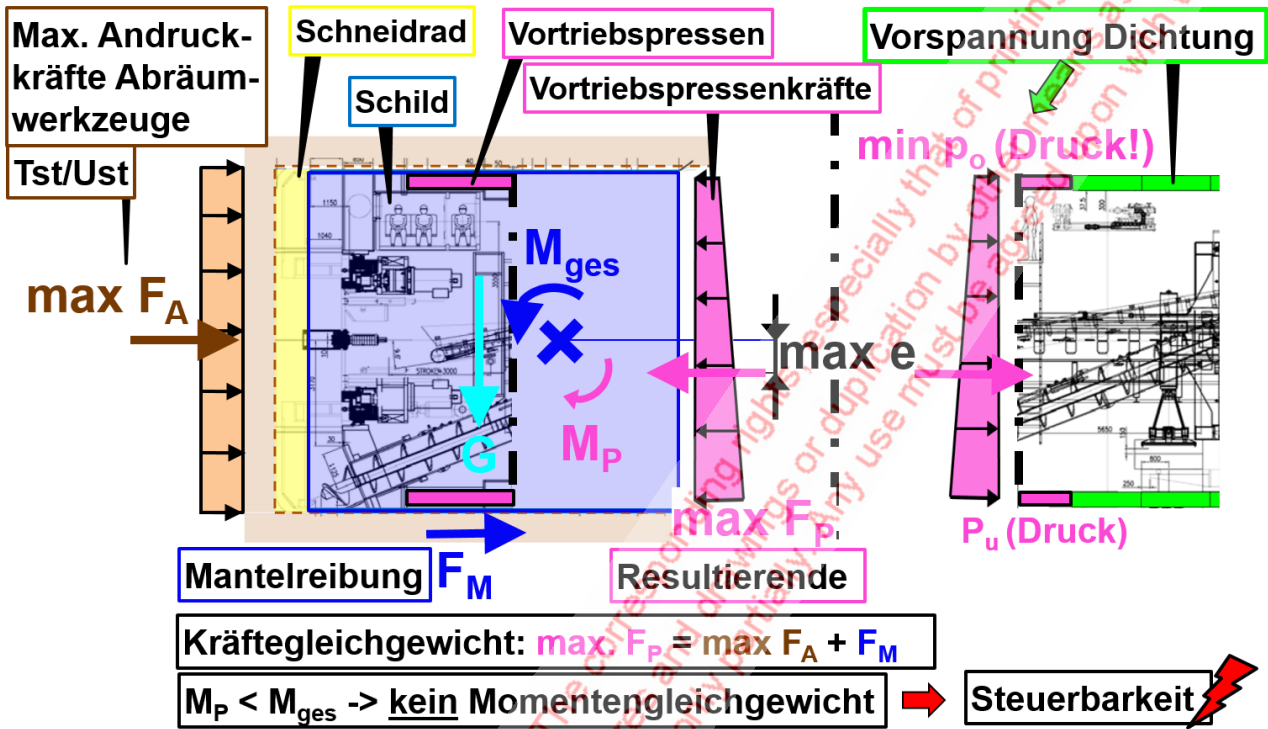


Bild 10: Steuerbarkeit der TVM im offenen Modus - wirkende Kräfte und Momente



Bild 11: Laborversuche zur Verbreitbarkeit der Plattensandsteine (WBI 2007 bis 2013)

Der Vortrieb in den Plattensandsteinen wurde schließlich mit einer teilgefüllten Abbaukammer und Schneckenförderung kombiniert mit einer Druckluftstützung der Ortsbrust durchgeführt (Bild 12). Auf diese Weise konnte die Standsicherheit der Ortsbrust gewährleistet werden.

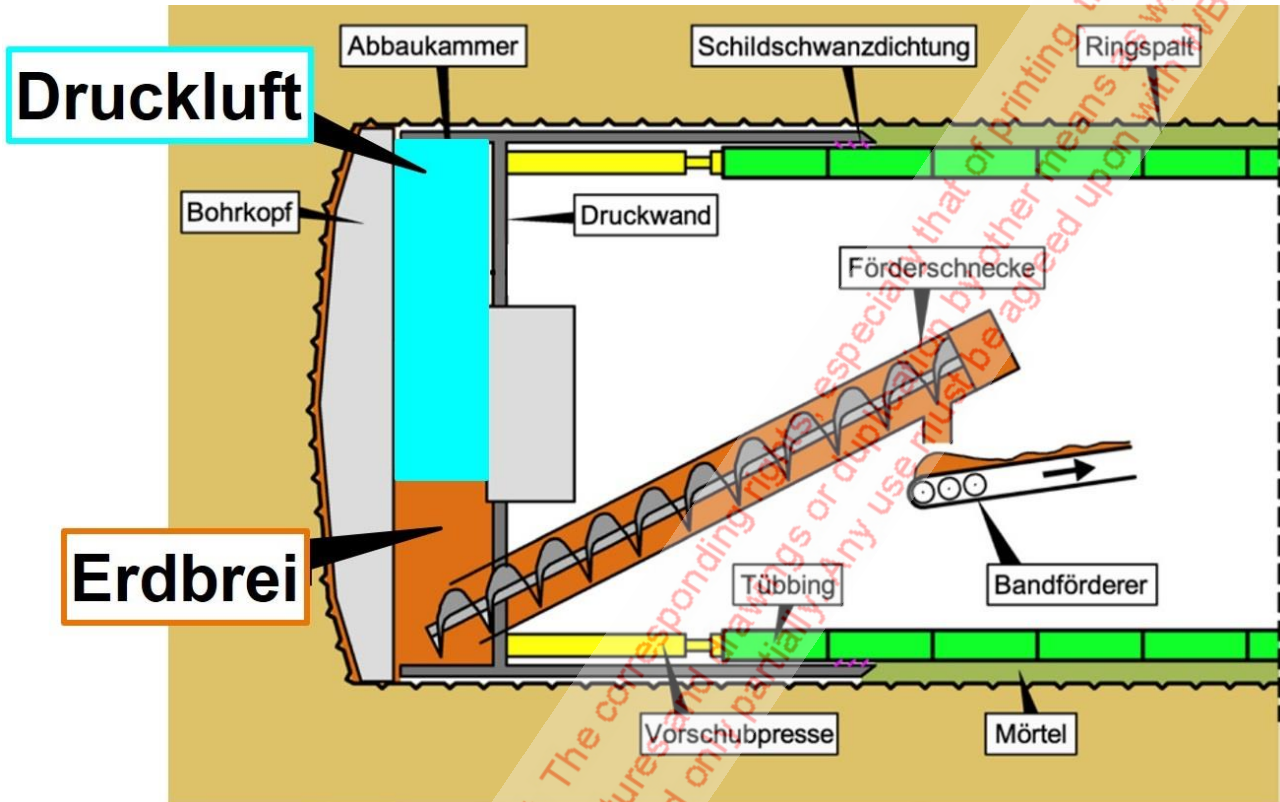


Bild 12: Vortrieb mit Teilfüllung, Schneckenförderung und Druckluftstützung (Witke 2014)

Weiterhin führte die Druckluft zu einer Erhöhung der aufbringbaren Pressenkräfte, so dass die Dichtungsprofile in den Ringfugen ausreichend zusammengedrückt und die Steuerbarkeit der TVM gewährleistet werden konnte. Damit waren die Probleme der mangelnden Ortsbruststandsicherheit und der mangelnden Steuerbarkeit gelöst (Bild 13).

Zu bedenken ist allerdings, dass es in der Wechselfolge der Plattensandsteine auch stärker durchlässige Sandsteinpakete gibt. Je nach zu erwartenden Randbedingungen muss für solche Lagen die Sicherheit gegen Ausbläser untersucht und nachgewiesen werden.

Es muss für den maschinellen Vortrieb weiterhin beachtet werden, dass die Tonschluffsteinlagen in den Plattensandsteinen und generell im Buntsandstein veränderlich fest sind. Wenn sie der Sonneneinstrahlung oder einer Erwärmung vorne am Bohrkopf ausgesetzt sind und dann bewässert werden, dann zerfallen sie zu Tonen und Schluffen, die - je nach Wassergehalt - verklebungsfähig sind. Das sollte bei der Planung und Auslegung der Maschine beachtet werden.

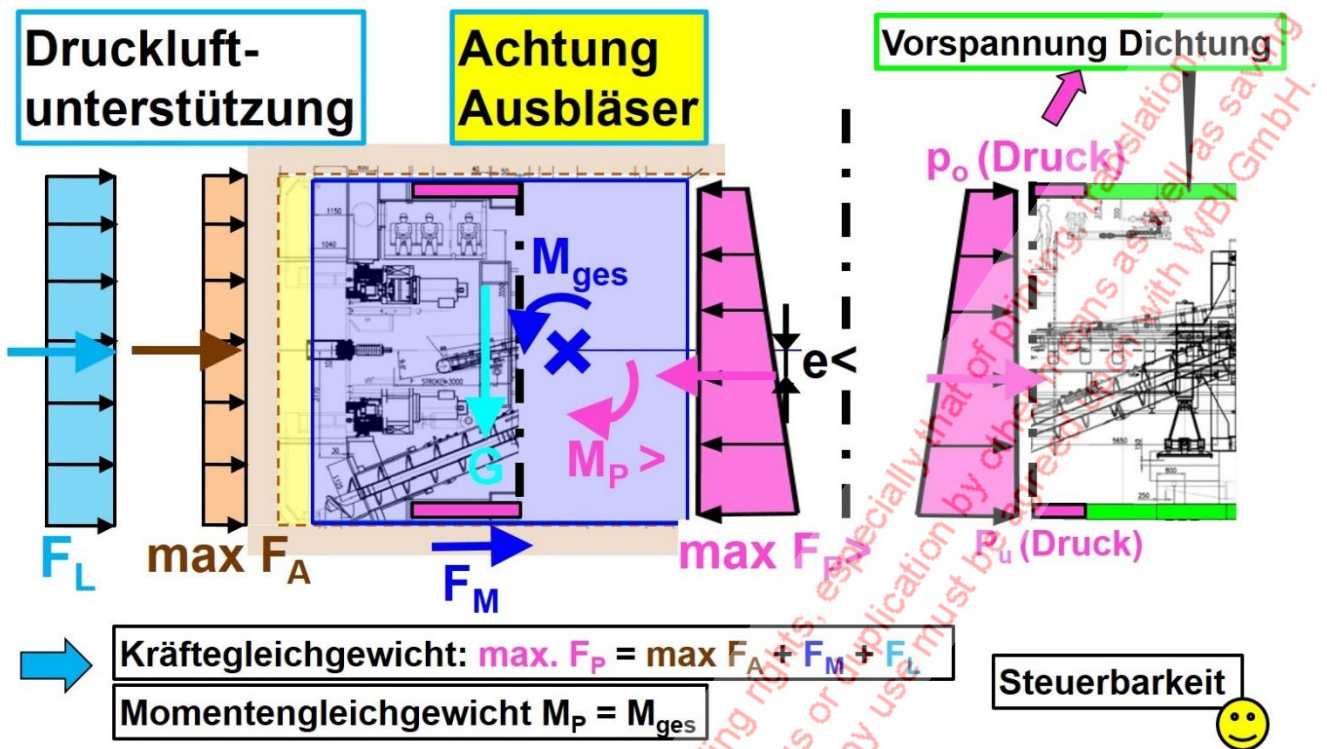


Bild 13: Steuerbarkeit der TVM mit Druckluftstützung - wirkende Kräfte und Momente

4.3 Tertiär

Wie beschrieben, wurden in den tertiären Rinnen, die mit dem Neuen Schlüchtern Tunnel durchfahren wurden, überwiegend tertiäre Tone mit Sandlagen angetroffen. Diese können mit einem klassischen EPB-Vortrieb aufgefahren werden. Dabei ist das Risiko der Verklebung und eine angemessene Konditionierung zu berücksichtigen. Hierzu liegt umfassende Erfahrung vor, so dass an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden soll.

4.4 Mixed Face

Bild 14 zeigt ein Detail aus dem Längsschnitt in dem Bereich der Unterfahrung der B40 und der BAB A66. Hier wurden innerhalb eines Querschnitts oder auch in enger Wechselfolge tertiäre Böden, Störungszonen mit Felsblöcken und die Plattensandsteine des Oberen Buntsandsteins angetroffen.

In den vorhergehenden Abschnitten wurde deutlich, dass jeder dieser Baugrundbereiche für sich völlig verschiedene Anforderungen an den maschinellen Vortrieb stellt. Das gemeinsame Antreffen in sogenannten mixed-face conditions stellt insofern eine Herausforderung für den maschinellen Vortrieb dar. Aus Sicht der Autoren gibt es hierfür keine allgemeingültige Standardlösung. Vielmehr müssen für jede Situation Einzelfallbetrachtungen angestellt werden unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen sowie Untersuchung der relevanten Fragestellungen.

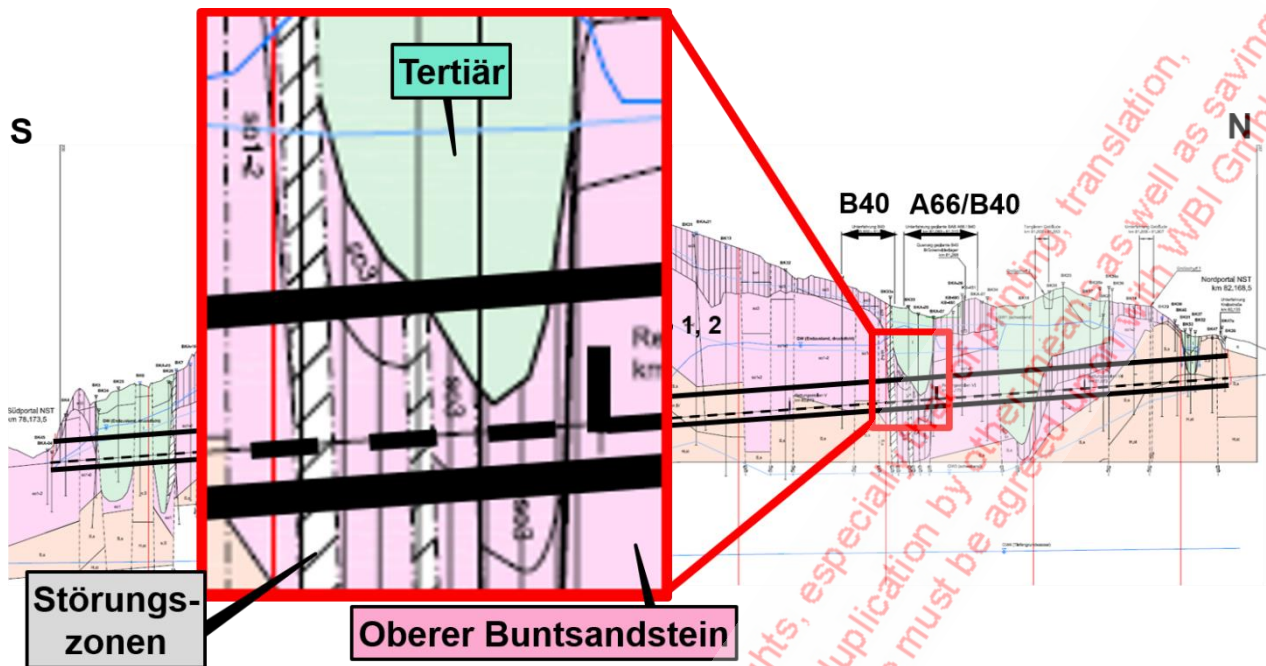


Bild 14: Tunnelbautechnischer Längsschnitt (GTB Olpe 2002), Detail mit Beispiel für Mixed-Face conditions

4.5 Grundwasser

Ein Vortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels kann in den Buntsandsteinen auch mit Druckluftstützung durchgeführt werden, wenn es möglich ist, die Sicherheit gegen Ausbläser zu gewährleisten.

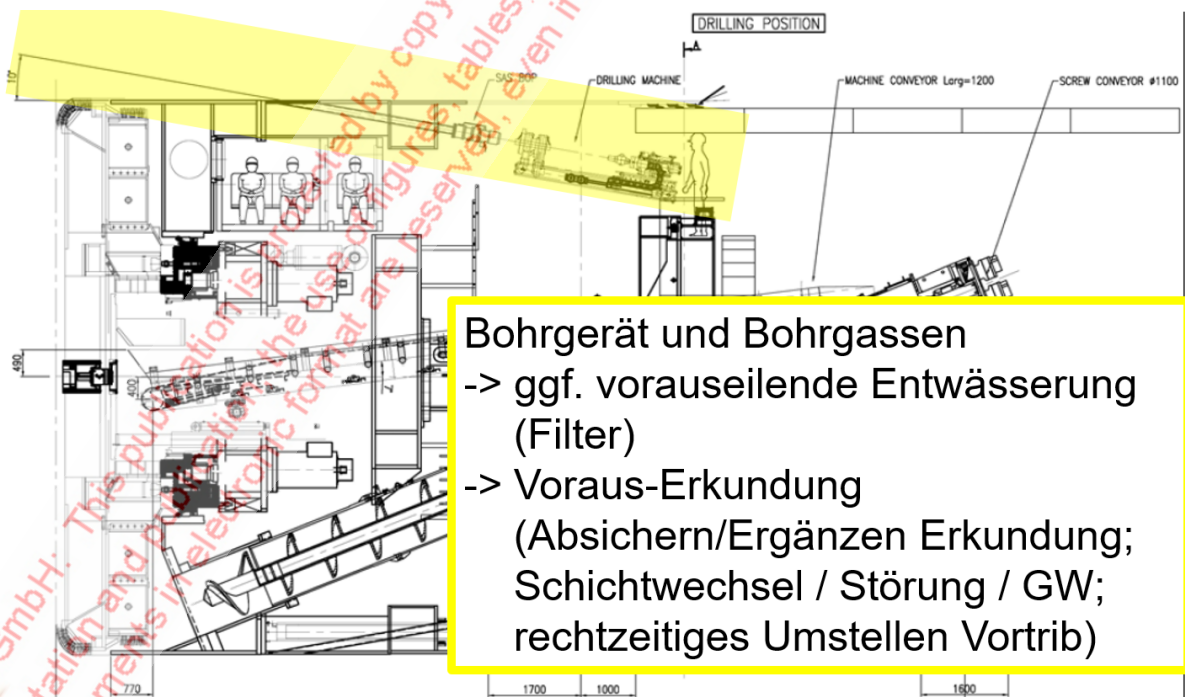


Bild 15: Möglichkeit der vortriebsbegleitenden vorauseilenden Erkundung und ggf. Entwässerung: Bohrgerät und Bohrgassen

Ist dies nicht möglich, dann kommt ggf. eine vorausseilende, kontrollierte Entwässerung über Bohrungen in Frage (vgl. Skizze in Bild 15). Unter Umständen müssen diese vorausseilenden Bohrungen verfiltert werden, da die feinkörnigen Böden erosionsanfällig sind.

In jedem Fall sollte die Tunnelvortriebsmaschine mit entsprechenden Bohrgeräten sowie Bohrgassen ausgerüstet werden (Bild 15). Dieses ist zwingend erforderlich, um vortriebsbegleitend vorausseilende Erkundungen ausführen zu können. Wie erläutert, ist mit wechselnden Untergrundverhältnissen zu rechnen, die unterschiedliche Anforderungen an den maschinellen Vortrieb stellen. Die genaue Lage der Übergänge kann nicht auf ökonomische Weise mit Bohrungen von der Geländeoberfläche im Rahmen der Erkundungsphase bestimmt werden. Sie muss deshalb vortriebsbegleitend durch Vorauserkundungen in den kritischen Bereichen abgesichert werden, damit der Vortrieb rechtzeitig umgestellt werden kann.

5. Teilbereiche 2 "Schild" und 3 "Auskleidung" im Buntsandstein

In den Teilbereichen "Schild" und "Auskleidung" (Bild 6) spielt im Mittleren und Oberen Buntsandstein vor allem folgender Sachverhalt eine Rolle: die Horizontalspannungen im mittleren und oberen Buntsandstein sind ebenso wie die Scherfestigkeiten auf den Trennflächen klein. Deshalb kann sich oberhalb des Tunnels und um den Tunnel kein Gewölbe ausbilden. In der Folge kommt es zu einem Aufblättern der Schichten und Auflegen der Felsblöcke auf den Schild bzw. die Tübbingauskleidung (Bild 16). Die damit verbundene Auflockerung kann sehr weit nach oben reichen. Die daraus resultierenden Lasten in der Firste müssen sowohl bei der Bemessung des Schildes als auch bei der Bemessung der Tübbingauskleidung berücksichtigt werden. Ein Vortrieb mit Druckluftstützung kann dem in gewissem Rahmen entgegenwirken, da die Druckluft nicht nur an der Ortsbrust, sondern auch im Steuerspalt wirkt. Gegebenenfalls könnte man auch den Steuerspalt mit Bentonit stützen. Aber vollständig vermeiden lässt sich die Auflockerung nicht.

In diesem Zusammenhang ist es deshalb von besonderer Bedeutung, den Ringspalt unmittelbar am Schildschwanz vollumfassend zu verfüllen (Bild 17). Anderenfalls werden die Felsblöcke und Gesteinsstücke auch in den Bereich des Ringspalts nachbrechen, so dass eine vollständige Ringspaltvermörtelung nicht mehr gewährleistet werden kann und der Tübbingring nicht ausreichend gebettet ist. Das ist im Hinblick auf das Tragverhalten unzulässig.

Die Anwendung eines Bikomponentenmörtels kommt in diesen Fällen aus Sicht der Autoren nicht in Frage. Einerseits, weil der Steuerspalt bereichsweise offen bleibt, so dass der Bikomponentenmörtel nach vorne zum Schneidrad abfließen kann. Andererseits, weil die Trennflächen in den Sandsteinen bereichsweise Öffnungsweiten haben, über die der Bikomponentenmörtel ebenfalls abfließen kann. Unter diesen Randbedingungen kann die vollständige Füllung des Ringspalts, die für die Bettung des Tübbingrings erforderlich ist, nicht gewährleistet werden.

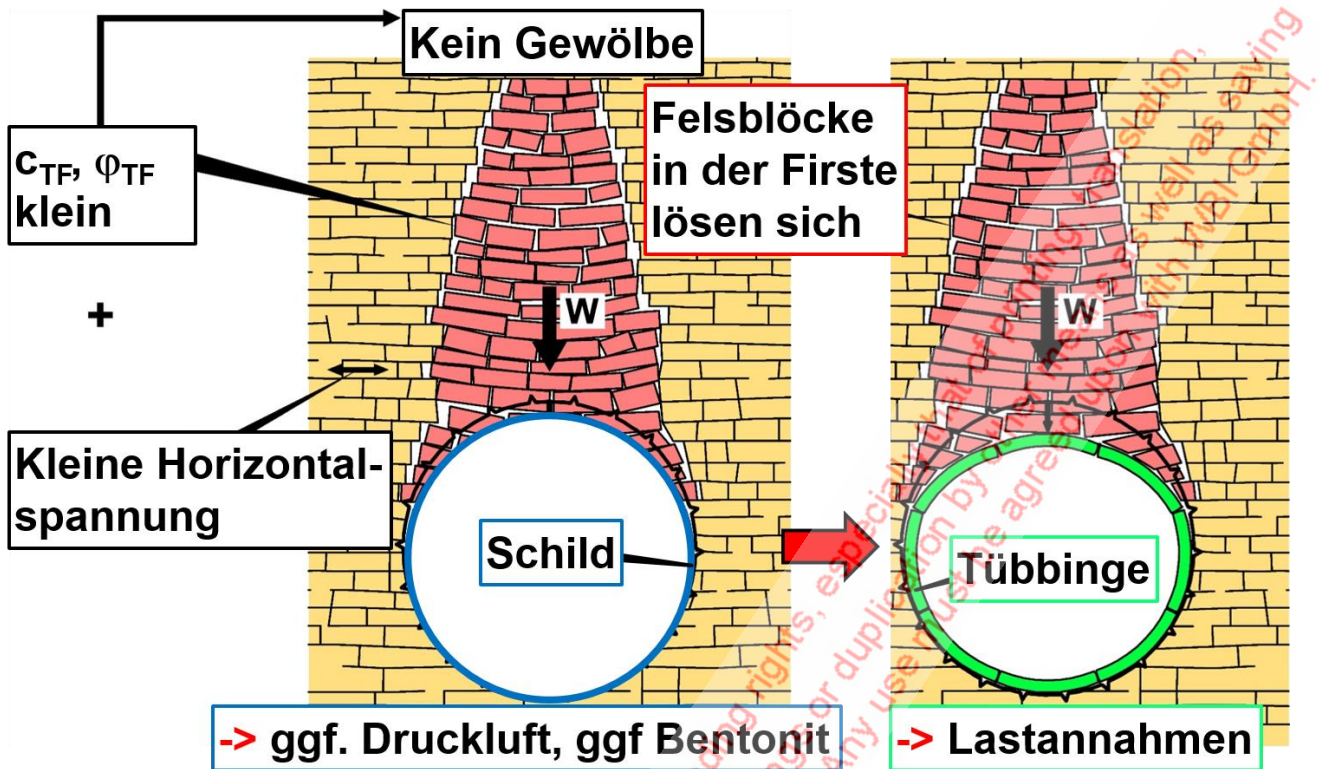
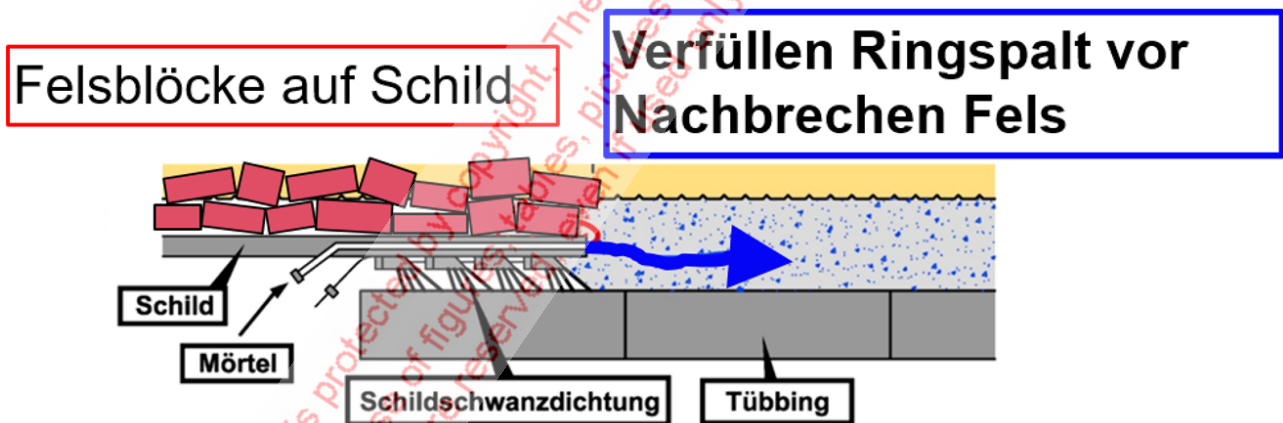


Bild 16: Begrenzte Gewölbebildung im Buntsandstein (in Anlehnung an Wittke 2014)



- **Direkt am Schildschwanz**
- **Kein Bikomponentenmörtel**
(offener Ringspalt, Trennflächen im Sst)
- **Konventioneller Mörtel, Druck halten**
(keine Entwässerung in Tst/Ust)

Bild 17: Ringspaltverfüllung

Aus diesem Grund muss für die Ringspaltverfüllung in den Buntsandsteinen aus Sicht der Autoren ein konventioneller Mörtel verwendet werden. Bei der Auslegung muss man aber bedenken, dass der Mörtel in den Tonschluffsteinen, die eine geringe Durchlässigkeit haben, kein Wasser abgeben kann, so dass sich seine Steifigkeit erst mit seinem Abbinden mit der Zeit entwickelt. Der Druck muss entsprechend lange aufrechterhalten werden.

6. Schlussfolgerungen

Der Neue Schlüchterner Tunnel wurde mit einer Tunnelvortriebsmaschine in den Schichten des mittleren und oberen Buntsandsteins, tertiären Rinnen, Störungszonen sowie mixed-face conditions aufgefahren. Dabei hat sich gezeigt, dass die Anforderungen an den maschinellen Vortrieb in den verschiedenen Untergrundverhältnissen verschieden und zum Teil gegensätzlich sind.

Im mittleren Buntsandstein wird in der Regel ein Vortrieb im offenen Modus möglich sein, wenn das Phänomen des blocky grounds sowie der Verschleiß bei Planung, Maschinenauslegung und Vortrieb angemessen berücksichtigt werden. Dahingegen ist die Ortsbrust in den Plattensandsteinen des Oberen Buntsandsteins häufig nicht standsicher. Hier hat sich ein Vortrieb mit Teilfüllung, Schneckenförderung und Druckluftstützung bewährt, wenn die Sicherheit gegen Ausbläser nachgewiesen werden kann. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Ton-/Schluffsteine veränderlich fest sind und nach Zerfall zur Verklebung neigen können. In den tertiären Rinnen wiederum ist ein EPB-Vortrieb geeignet.

Folglich müssen Tunnelvortriebsmaschinen vorgesehen werden, die entsprechend unterschiedliche Vortriebsmodi ermöglichen (siehe z. B. multi mode Maschine der Firma Herrenknecht). Die Tunnelvortriebsmaschinen müssen mit Bohrgeräten und Bohrgassen für eine vortriebsbegleitende vorausseilende Erkundung ausgerüstet sein. Darüber hinaus wird es Bereiche geben, in denen zusätzlich Sondermaßnahmen ergriffen werden müssen.

Wenn die unterschiedlichen Verhältnisse und Randbedingungen bei der Planung, bei der Ausschreibung, bei der Auslegung der Tunnelvortriebsmaschine und bei der Bauausführung in angemessener Weise berücksichtigt werden, ist ein maschineller Vortrieb in diesen Baugrundverhältnissen möglich und für lange Tunnel, wie sie z. T. für die Neubaustrecken Hanau - Fulda - Eisenach vorgesehen sind, auch geboten.

Aus Sicht der Autoren ist es im Zuge der Planung maschineller Vortriebe generell, und insbesondere in solchen Verhältnissen, notwendig, eine Betrachtung des Gesamtsystems durchzuführen. Die isolierte Betrachtung z. B. der Ortsbrust oder der Tübbing-Auskleidung reicht nicht aus. Baugrund, Tunnelvortriebsmaschine in den verschiedenen Bereichen und Auskleidung beeinflussen sich gegenseitig (Bild 18). Dies kann mit entsprechenden räumlichen FE-Berechnungen angemessen erfasst werden, deren Ergebnisse dann der weiteren Planung zugrunde gelegt werden müssen. Beispielhaft zeigt Bild 19 eines der für den Neuen Schlüchterner Tunnel erstellten 3D-FE-Netze sowie die Nachbildung mehrerer Tübbingringe

und einer Ring- und Längsfuge im Detail. Erforderliche Art und Detailgrad der 3D-FE-Berechnungen hängen von der jeweiligen Aufgabenstellung ab und sind im Einzelfall festzulegen.

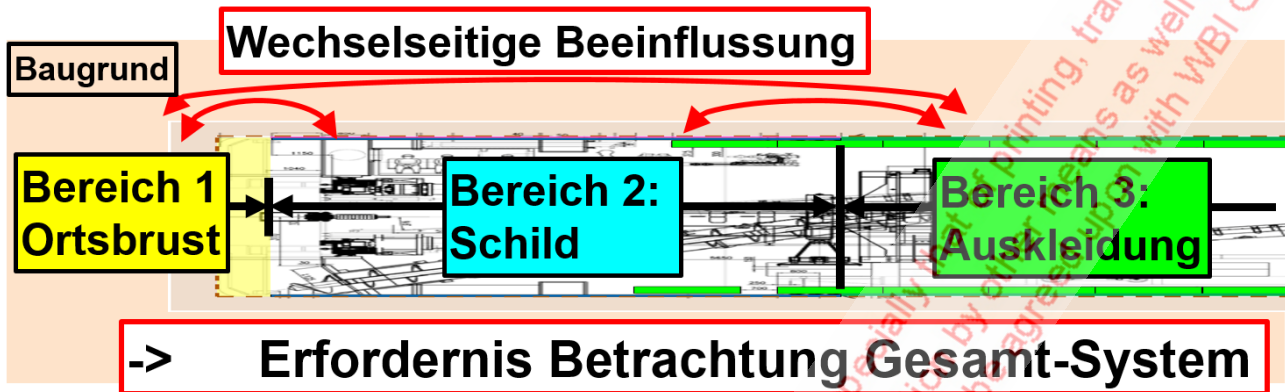
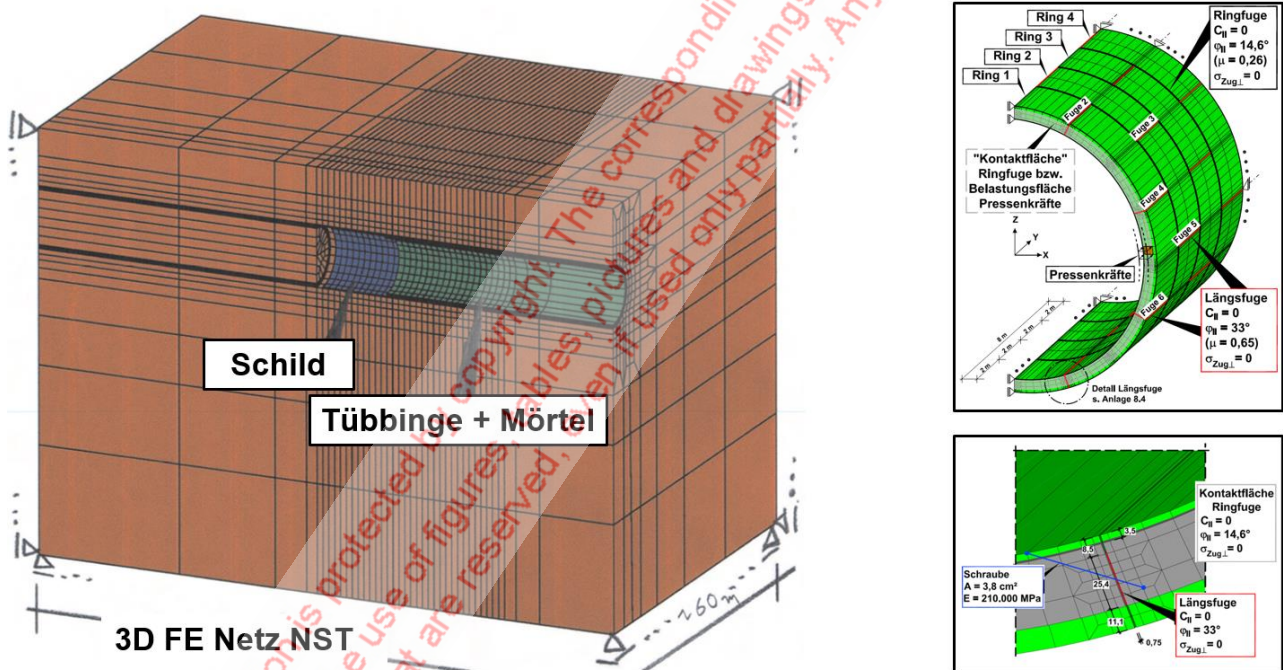


Bild 18: Betrachtung Gesamtsystem und Berücksichtigung der Wechselwirkungen



Art + Detailgrad abhängig von Aufgabenstellung

Bild 19: Beispiel eines 3D-FE-Netzes mit Details zur Betrachtung des Gesamtsystems für den Neuen Schlüchterner Tunnel (WBI 2007 bis 2013)

Literatur

Arge NST: Eigene Projektunterlagen (unveröffentlicht).

GTB Olpe: Neubau und Erneuerung Schlüchterner Tunnel, Geotechnisches Gutachten (unveröffentlichte Projektunterlagen). November 2002.

HLUG: Geologische Übersichtskarte von Hessen, 08/2007.

Lundmann, P.; Rossel, K.; Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.: Railway Tunnel Hallandsås, Sweden: Technical Problems, Reasons for Increase of Costs and Construction Time (viewpoint of the client). Vortrag anlässlich der STUVA-Tagung. Forschung + Praxis Heft 43, STUVA Köln, Dezember 2009.

Semprich, S: Gutachten, 1. Ergänzung (unveröffentlichte Projektunterlage). Dezember 2013.

Tunnel Consult: Tunnelbautechnisches Gutachten, Teil 1: Neuer Schlüchterner Tunnel (NST) (unveröffentlichte Projektunterlage). Dezember 2004.

WBI: Eigene Projektunterlagen, Erarbeitungen und Berichte zum Neuen Schlüchterner Tunnel (unveröffentlichte Projektunterlagen). 2007 bis 2013.

Wirth: Pläne und Unterlagen zur Tunnelvortriebsmaschine (unveröffentlichte Projektunterlagen).

Wittke, W.: Rock Mechanics based on Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co KG. Berlin 2014.