

Die Neubaustrecken Hanau–Fulda und Fulda–Eisenach, Herausforderungen beim Bauen im Buntsandstein

**Dipl.-Ing. Jochen Stüting, Dipl.-Ing. Bert Bohlmann
Dr.-Ing. Martin Wittke, Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke**

Zusammenfassung

Die Deutsche Bahn (DB) befindet sich seit 2013 in den Planungen zur Neubaustrecke Gelnhausen–Fulda. Nach einem langjährigen Planungsprozess zur Streckenführung und einer umfangreichen frühen Öffentlichkeitsbeteiligung hat sich die DB im Jahr 2018 auf die Vorzugsvariante IV festgelegt. Die Vorzugsvariante "Variante IV" hat eine Länge von ca. 45 km, davon befinden sich rund 30 km der Strecke in mehreren Tunnelbauwerken.

Die Planungen der DB für die Aus-/Neubaustrecke Fulda–Gerstungen haben 2018 begonnen. Nach einem umfassenden Prüf- und Auswahlverfahren und einer umfangreichen frühen Öffentlichkeitsbeteiligung hat die DB am 11. März 2022 die Vorzugsvariante Langenschwarz-Bad Hersfeld-Hönebach bekannt gegeben. Die Streckenführung zeichnet sich durch einen sehr hohen Tunnelanteil aus. Auf einer Gesamtlänge von etwa 41 km verlaufen ca. 28 km in zum Teil mehr als 10 km langen Tunnelbauwerken.

Die Neubaustrecke Gelnhausen–Fulda und die Aus-/Neubaustrecke Fulda–Gerstungen weisen aufgrund der Mittelgebirgslage und der damit verbundenen Topografie einen hohen Tunnelanteil auf. Hieraus ergeben sich unterschiedliche geologische Besonderheiten, die in der Planung zu berücksichtigen sind.

Die geplanten Neubaustrecken werden über den größten Teil der Trasse in den Schichten der Buntsandsteinformation zu liegen kommen. Über den Erd- und Tunnelbau in dieser Formation liegen aus ausgeführten Bauvorhaben des Eisenbahnbaus, des Straßenbaus und des Wasserbaus umfangreiche Erfahrungen vor, die es zu nutzen gilt. Im Beitrag wird auf die daraus resultierenden Herausforderungen hingewiesen.

Bei der Planung und dem Bau von Böschungen für Voreinschnitte ist beispielsweise die örtlich geringe Scherfestigkeit der Schichtfugen zu beachten. Diese kann bei geneigter Schichtung zu Rutschungen führen.

Beim Tunnelbau ist aufgrund der geringen horizontalen Primärspannungen darauf zu achten, dass sich im Gebirge oberhalb des Hohlraums ein tragendes Gewölbe nur begrenzt ausbilden kann. Außerdem ist der Einfluss der häufig vorkommenden Störungen auf die Standsicherheit eines Tunnels zu beachten, insbesondere wenn die Störungen im schiefen Schnitt durchfahren werden müssen.

Die Wasserdurchlässigkeit der Schichten der Buntsandsteinformation ist stark inhomogen und anisotrop. Das ist bei der Planung von Grundwasserabsenkungsmaßnahmen zu beachten. Schließlich wird auf die in Tonlagen der tertiären Rinnen eingelagerten, isolierten

Sandlinsen hingewiesen, die beim Tunnelbau unkontrolliert ausfließen können, wenn es nicht gelingt, sie vorseilend gezielt zu entwässern.

Aufgrund von Auslaugungsvorgängen im tiefliegenden Salinar können örtlich rezente Erdfälle auftreten. Schließlich werden im Projektgebiet auch tertiäre Rinnen aus Sanden und Tonen erwartet.

1. Einleitung

Die Metropolregion Frankfurt Rhein-Main boomt. Heute leben und arbeiten hier rund 5,8 Millionen Menschen, die täglich unterwegs sind. Um die Mobilität all dieser Menschen zu sichern und die Leistungsfähigkeit des Nahverkehrs im Rhein-Main-Gebiet sowie der Zulaufstrecken im Nah- und Fernverkehr zukunftsfähig zu machen, arbeitet die Deutsche Bahn in der Region Mitte an zahlreichen Aus- und Neubauprojekten.

Der Bund ist laut Grundgesetz (Art. 73 (6a) und 87e) für den Ausbau der Eisenbahninfrastruktur in Deutschland zuständig. Mit dem Bundesverkehrswegeplan (BVWP) ermittelt und priorisiert der Bund den Aus- und Neubaubedarf der Verkehrsinfrastruktur. Der Bedarfsplan für die Bundesschienenwege ist eine Anlage zum Bundesschienenwegeausbaugesetz, die die Aus-/Neubaustrecke (ABS/NBS) Hanau–Würzburg/Fulda–Erfurt im vordringlichen Bedarf aufführt.

Der BVWP 2030 bestimmt für beide Projekte die folgenden projektspezifischen Ziele:

- Entmischung von schnellen und langsamen Verkehren,
- Angebotsausweitung im Personenverkehr
- Beschleunigung, Fahrzeitreduzierung durch Geschwindigkeitserhöhung
- Schaffung der infrastrukturellen Voraussetzungen für eine Verkehrslenkung zur Lärmentlastung (nächtliche Verkehrslenkung der Bestandsstrecken durch Verlagerung des Güterverkehrs auf die zweigleisige Neubaustrecke)

2. Neubaustrecke Gelnhausen–Fulda

Die Bahnstrecke zwischen Hanau und Fulda ist überlastet. Verspätete Nah- und Fernverkehrszüge sind die Folge. Deshalb müssen zusätzliche Gleise gebaut werden.

Erstmals hat die DB Netz die Öffentlichkeit von Anfang an - d. h. noch vor dem Raumordnungsverfahren - beteiligt. Viele Beteiligte im Dialogforum haben seit dem Projektstart im Jahr 2013 daran gearbeitet, die verträglichste Strecke zu finden - betroffene Landkreise, Kommunen, Fachbehörden, regionale Interessengruppen, Bürgerinitiativen, Umwelt- und Fachverbände waren und sind in dem gesamten Prozess mit eingebunden. Insgesamt fanden seit Beginn der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung 21 Sitzungen des Dialogforums und

über 30 Arbeitsgruppensitzungen statt. Während der Pandemie konnte der Dialog in Form von digitalen Sitzungen fortgeführt werden.

Gemeinsam mit der Region hat die DB tragfähige Lösungen gefunden, wobei auch der weitere Projektfortschritt von Dialog- und Informationsangeboten begleitet wird (siehe auch www.hanau-fulda.de).

Aus rund 1.000 Linien-Kombinationen hat die DB mittels Raumwiderstandsklassen 13 aussichtsreiche Varianten in vier Grobkorridoren identifiziert. Anschließend erfolgte ein Variantenvergleich anhand von 64 Kriterien. Wie viele Menschen werden von Lärm betroffen? Wie viele Naturschutzgebiete werden durchfahren? Welche Kostenunterschiede gibt es? Beim zahlenmäßigen (dem formellen, quantitativen) Vergleich erwiesen sich die Varianten IV und VII als ähnlich gut geeignet und sind daher als Vorzugsvarianten für die weitere Planung hervorgegangen. Beim qualitativen Vergleich innerhalb einer verbal-argumentativen Alternativenprüfung der beiden Vorzugsvarianten hat Variante IV insgesamt Vorteile gegenüber der Variante VII erreicht - sowohl bei der Raumordnung als auch bei den Umweltschutzgütern. Nur bei der Risikobewertung Artenschutz schneidet Variante VII besser ab. Überdies hat Variante IV Vorteile bei den verkehrlich-volkswirtschaftlichen Aspekten. Deshalb stellt Variante IV die Antragsvariante der DB Netz für die neue Bahnstrecke zwischen Gelnhausen und Fulda bzw. dem Verknüpfungspunkt an der bestehenden Schnellfahrstrecke in Kalbach dar. Damit werden zukünftig mehr Züge pünktlicher und schneller fahren - auch im Nahverkehr. Das nutzt den vielen Pendlern in der Region und den Reisenden in Deutschland. Mehr Menschen und Güter können dann die Bahn nutzen - statt Auto, LKW oder Flugzeug. Das nützt ebenfalls dem Klima und der Umwelt.

Die Lärmbelastung wird für die Menschen in der Region zudem insgesamt geringer - und das, obwohl insgesamt mehr Züge fahren. Die zukünftig leiseren Güterzüge fahren nachts über die neuen Gleise mit besserem Lärmschutz. Die neuen Gleise sind überdies weiter von den Siedlungen entfernt und befinden sich häufig in Tunneln.

Seit 2020 befindet sich das Projekt im Raumordnungsverfahren, mit einem Abschluss des Verfahrens rechnet die DB Anfang 2023. Im nächsten Schritt beginnt die Erstellung der technischen Vorplanung.

2.1 Antragsvariante IV

Die Vorzugsvariante IV verläuft von Gelnhausen nach Norden. Nördlich von Wirtheim verläuft die Strecke im Bogen nach Osten und quert die Kinzig in niedriger Höhenlage südlich von Wächtersbach. Es folgt südlich von Aufenau ein leichter Schwenk nach Nordosten. Ab Bad Soden-Salmünster verläuft die Strecke parallel zum Kinzigtal und umfährt südöstlich den Kinzigstausee, um anschließend erneut das Kinzigtal westlich von Niederzell (Schlüchtern) zu queren. Bei Schlüchtern ist die Verknüpfung mit der Bestandsstrecke möglich, anschließend führt die Strecke in einem langen Tunnel nach Nordosten, mit Anbindung an die Schnellfahrstrecke 1733 bei Mittelkalbach.

Die geplante Neubaustrecke hat eine Länge von ca. 44,5 km. Die Besonderheit: ca. 32 km der Strecke befinden sich in Tunneln. Der längste Tunnel liegt mit ca. 10 km zwischen Schlüchtern und Mittelkalbach. Insgesamt befinden sich auf der Strecke 15 Tunnel, davon sind sieben Tunnel länger als 1.000 Meter. Der Großteil der Tunnel wird voraussichtlich aus zwei eingleisigen Tunnelröhren bestehen.

Grundsätzlich soll die Neubaustrecke mit einer Geschwindigkeit von bis zu v_{max} 250 km/h befahren werden. Die verkehrliche Aufgabenstellung sieht vor, in den Nachtstunden Güterverkehr über die Neubaustrecke zu führen (tageszeitlich entmischerter Verkehr). Es wird dadurch eine Annäherung an den Streckenstandard einer Mischverkehrsstrecke erforderlich. Die maximale Streckenlängsneigung wird auf 12,5 ‰ begrenzt.

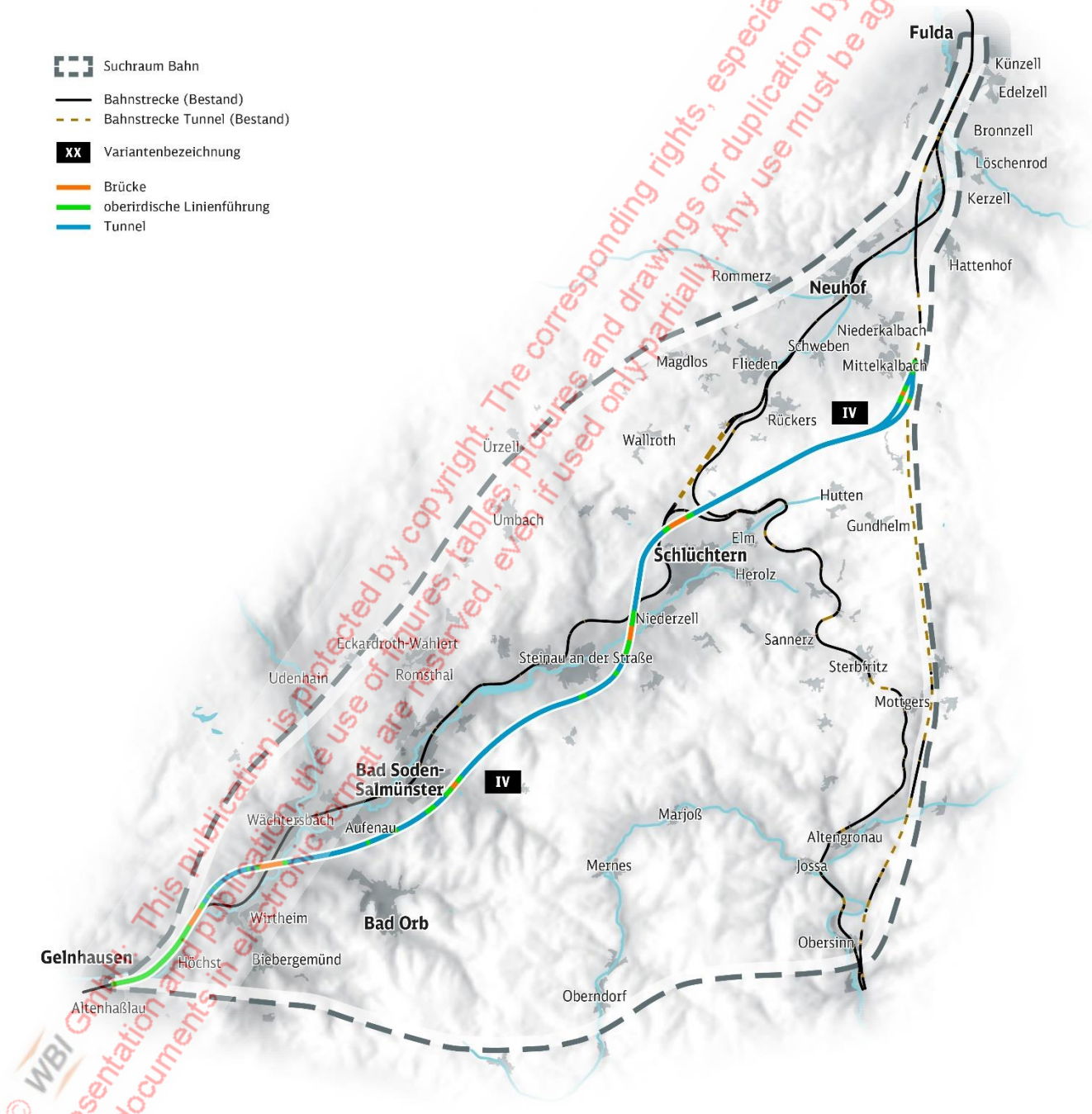


Bild 1: Neubaustrecke Gelnhausen–Fulda, Variante IV

2.2 Variante VII

Die Streckenführung der Variante VII verläuft von Gelnhausen nach Norden, am Rande des Vogelsbergs entlang und westlich von Wächtersbach, Eckardroth-Wahlert und Umbach. Ab Ürzell schwenkt der Streckenverlauf nach Osten an Wallroth vorbei. In Flieden führt die Strecke durch den vorhandenen Bahnhof, welcher folglich umfangreich angepasst werden müsste, und anschließend weiter in Richtung Nordosten zur Schnellfahrstrecke in Richtung Fulda.

Variante VII hat eine Länge von ca. 48 km und ist somit die zweitlängste Variante. Insgesamt befinden sich auf der Strecke 10 Tunnel, davon sind sieben Tunnel länger als 1.000 Meter. Der längste Tunnel hat eine Länge von ca. 7 km.

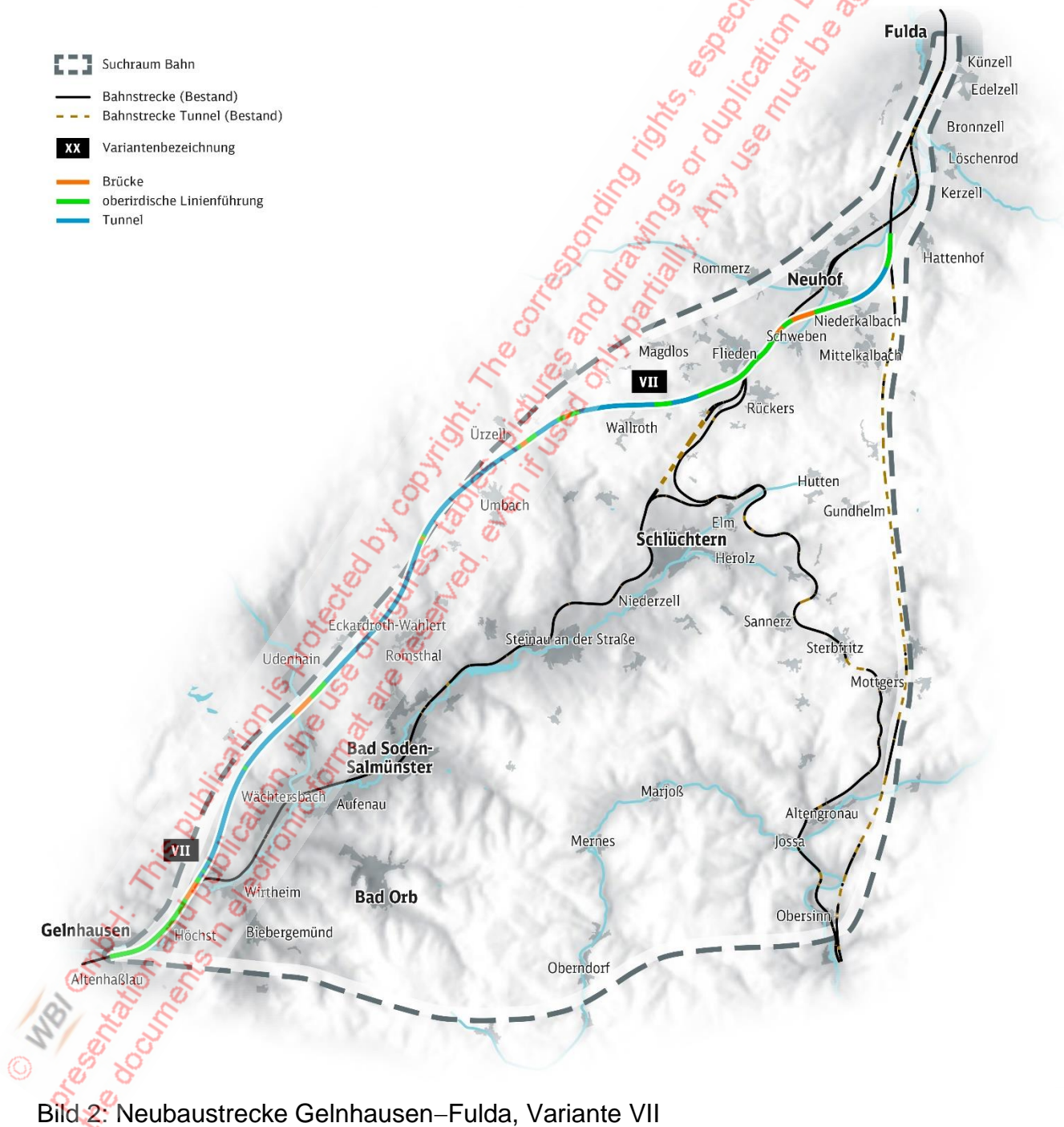


Bild 2: Neubaustrecke Gelnhausen–Fulda, Variante VII

Wie bei Variante IV der Neubaustrecke soll auch Variante VII mit einer Geschwindigkeit von bis zu v_{\max} 250 km/h befahren werden können und auch der Güterverkehr soll die Strecke in den Nachtstunden nutzen (tageszeitlich entmischter Verkehr). Die maximale Streckenlängsneigung wird ebenfalls auf 12,5 ‰ begrenzt.

3. Aus-/Neubaustrecke Fulda–Gerstungen

Mit dem Aus-/Neubauprojekt Fulda–Gerstungen sollen die infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden, um im Fernverkehr mit mindestens zehn Minuten einen deutlichen Fahrzeitgewinn von Fulda nach Erfurt zu erreichen und den Engpass auf der bestehenden Strecke zwischen Fulda und Bebra aufzulösen. Eine wichtige Voraussetzung, um den Deutschlandtakt umzusetzen.

Die DB Netz hat die Region auch hier von Beginn an intensiv in die Projektplanung eingebunden und für die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung verschiedene Formate implementiert. Seit 2018 kommen im sogenannten Beteiligungsforum Vertreterinnen und Vertreter aller Interessengruppen aus der Region regelmäßig zusammen, um sich über den Planungsstand zu informieren und Anregungen und Ideen einzubringen. Auf der Projektwebseite (www.fulda-gerstungen.de) und in Informationsveranstaltungen informiert die DB Netz alle Interessierten und stellt Unterlagen bereit. Dieser Weg wird fortgesetzt.

In einem umfangreichen Prüf- und Auswahlverfahren hat die DB Netz von 2018 bis 2022 die Vorzugsvariante Langenschwarz-Bad Hersfeld-Hönebach erarbeitet. Ziel war es, eine Strecke zu finden, die die geringsten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hat und zugleich die im Bundesverkehrswegeplan geforderten wirtschaftlichen und verkehrlichen Anforderungen erfüllt. Zu Beginn des Trassenfindungsprozesses hat die Bahn anhand der Raumwiderstandsklassen die drei Grobkorridore Nord, Süd und Ost ermittelt. Innerhalb dieser Grobkorridore wurde ein Trassenkorridorspektrum entwickelt, das aus umweltfachlicher und raumordnerischer Sicht mit geringeren Widerständen belegt und gleichzeitig technisch realisierbar ist. Im abschließenden Variantenvergleich wurden zuletzt vier mögliche Varianten in mehr als 80 Kriterien in den Zielsystemen Umwelt, Raumordnung und Wirtschaft/Verkehr bewertet. Alle vier Varianten zeichnen sich durch einen hohen Tunnelanteil aus. Damit sind die Auswirkungen auf die Umwelt insgesamt gering.

Nach umfassender Abwägung präsentierte die DB Netz die Vorzugsvariante am 11. März 2022 im Beteiligungsforum. Die Vorzugsvariante Langenschwarz-Bad Hersfeld-Hönebach erfüllt die wirtschaftlichen und verkehrlichen Anforderungen aus dem Bundesverkehrswegeplan. Durch den hohen Tunnelanteil belastet die neue Strecke Mensch und Umwelt verhältnismäßig wenig. Der siedlungsferne Verlauf führt in Verbindung mit zusätzlichem Lärmschutz im Bereich der bestehenden Strecken zu einer verhältnismäßig geringen Lärmbelastung. Der Fernverkehrshalt bleibt in Bad Hersfeld. Die kürzeren Fahrzeiten in die Metropolen Frankfurt und Berlin stärken die Landkreise Hersfeld-Rotenburg und Fulda. Durch den Kostenvorteil gegenüber den übrigen drei Varianten erweist sich die Vorzugsvariante zudem als am wirtschaftlichsten.

Die DB Netz beginnt nun mit der Vorplanung und bereitet derzeit die Ausschreibung der Planungsleistungen Verkehrsanlagen, konstruktiver Ingenieurbau und Tunnelbau vor. Als nächster Schritt steht die Baugrunduntersuchung entlang der Vorzugsvariante an. Diese soll im Sommer 2022 beginnen.

Die Vorzugsvariante Langenschwarz-Bad Hersfeld-Hönebach

Die neue Bahnstrecke verlässt die Schnellfahrstrecke Hannover–Würzburg bei Langenschwarz und verläuft im Tunnel nach Bad Hersfeld, danach weiter im Tunnel bis zur Bestandsstrecke 6340. Hier fädelt sie östlich der Gemeinde Ronshausen vor dem Hönebachtunnel auf die bestehende Strecke Richtung Erfurt ein.

Die geplante Neubau-/Ausbaustrecke hat eine Länge von ca. 41 km. Davon verlaufen etwa 28 km im Tunnel. Mit 14,5 km ist der Tunnel zwischen Langenschwarz und Unterhaun einer der längsten Eisenbahntunnel, die derzeit in Deutschland geplant werden. Mit dem Tunnel zwischen Bad Hersfeld und Ronshausen entsteht mit ca. 9,5 km ein weiterer langer Tunnel. Insgesamt sind vier der neun geplanten Tunnel länger als ein Kilometer. Der Großteil der Tunnel wird voraussichtlich aus zwei eingleisigen Tunnelröhren bestehen.

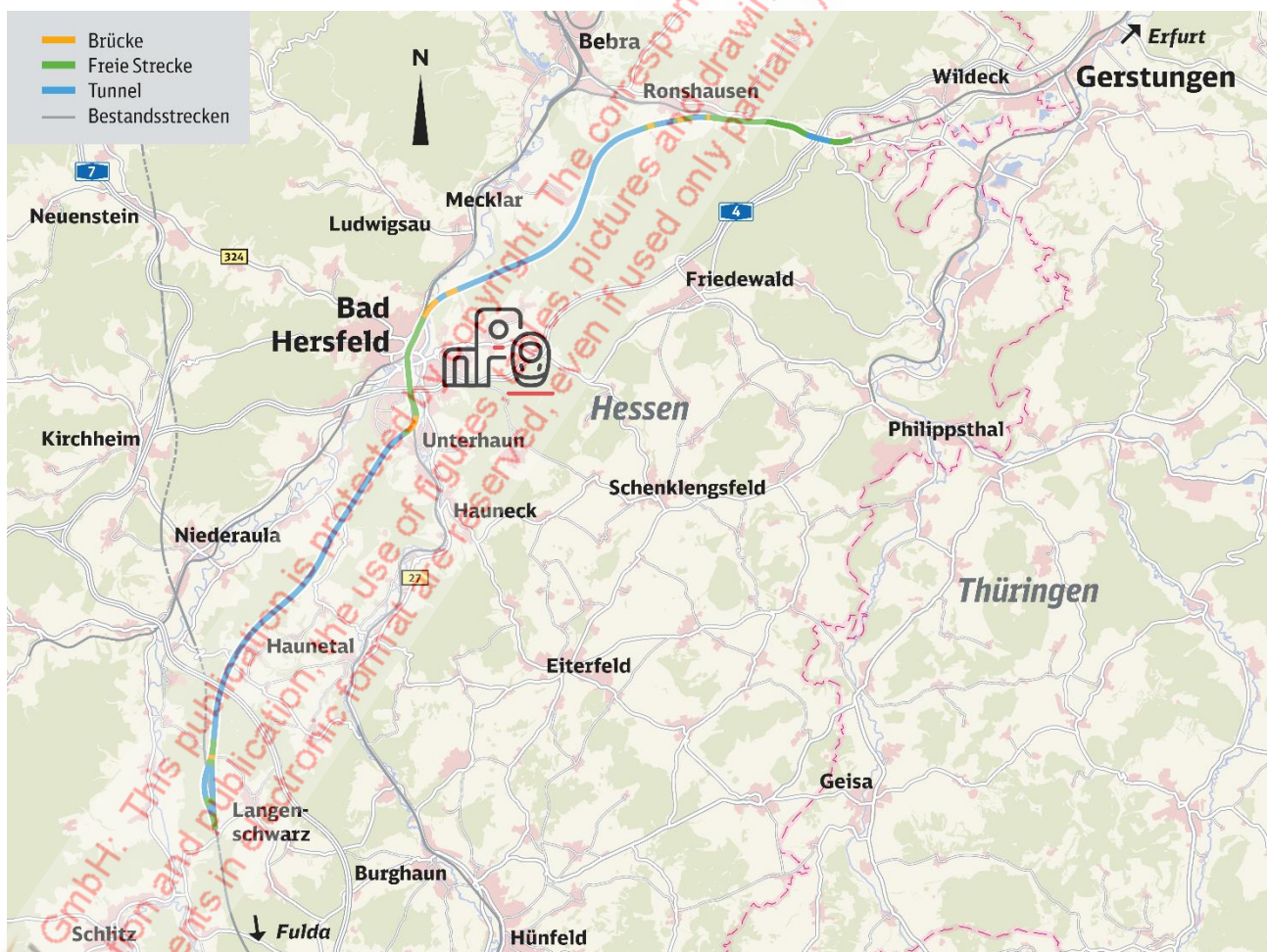


Bild 3. Vorzugsvariante Langenschwarz-Bad Hersfeld-Hönebach

Grundsätzlich soll die Neubaustrecke mit einer Geschwindigkeit von bis zu v_{max} 230 km/h befahren werden. Um die Bestandsstrecke zwischen Fulda und Bebra zu entlasten, soll der Güterverkehr in den Nachtstunden ab Bad Hersfeld über die Neubaustrecke geleitet werden. Die maximale Streckenlängsneigung wird auf 12,5 ‰ begrenzt.

4. Ausblick

Die Verkehrswende und die Klimaziele lassen sich nur mit einem besseren und verlässlicheren Angebot auf der Schiene erreichen. Um den Aus- und Neubau der Schieneninfrastruktur in den nächsten 20 Jahren erfolgreich umsetzen zu können, gilt es jetzt, die Voraussetzungen zu schaffen.

Allein in Osthessen wird die DB Netz im Korridor Frankfurt-Fulda-Erfurt Tunnelröhren in der Länge von mehr als 100 Kilometern bauen. Dafür bereitet die DB Netz jetzt die Ausschreibungen und die Vergaben der Ingenieur- und Gutachterleistungen vor, um die geologischen Besonderheiten bereits in der Planungsphase umfassend zu berücksichtigen.

5. Geologie im Projektgebiet

Eine Übersicht über die geologischen Verhältnisse im Projektgebiet zeigt das Bild 4. Hier sind auch die Varianten IV und VII des Streckenabschnitts von Gelnhausen nach Fulda und die Vorzugsvariante der NBS von Fulda nach Gerstungen eingetragen. Man erkennt, dass der überwiegende Teil der geplanten Strecken in den Schichten der Buntsandsteinformation zu liegen kommen wird.

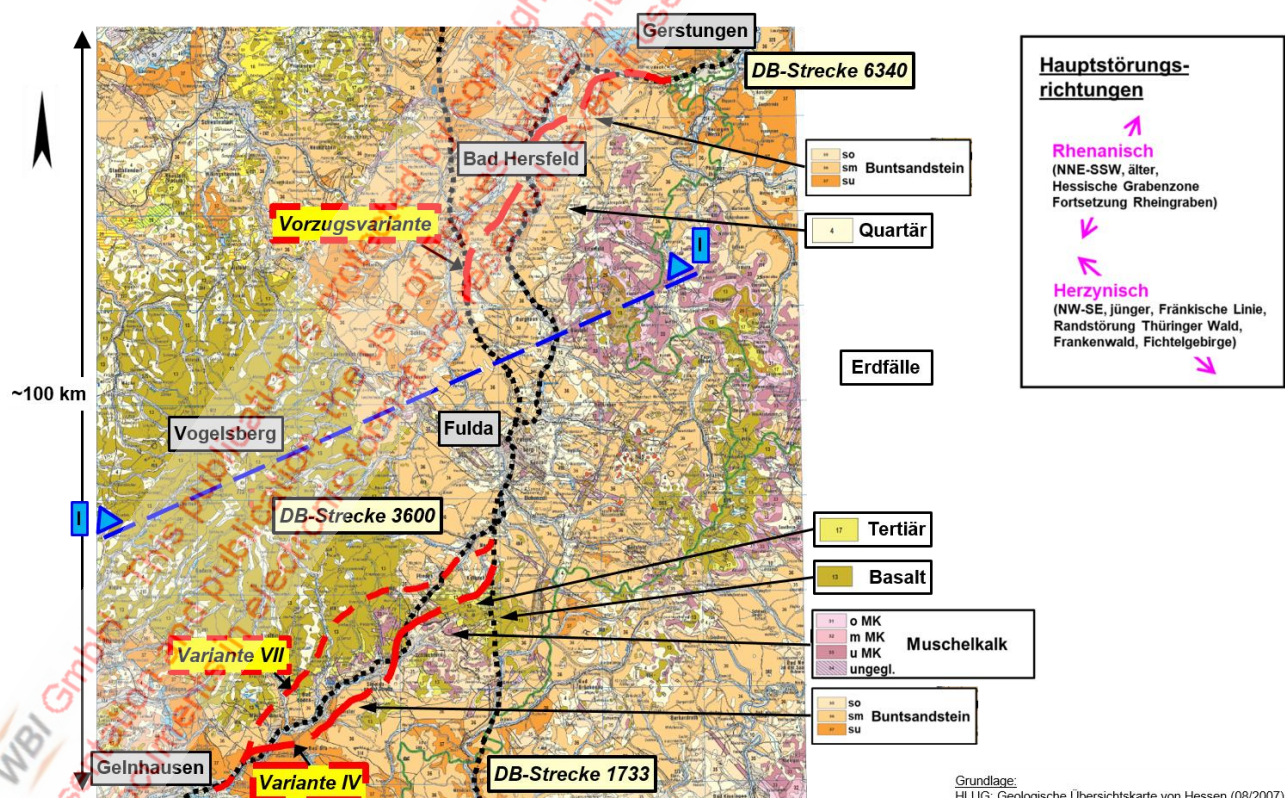


Bild 4: Geologische Karte Projektgebiet

Nur sehr begrenzt ist mit den Schichtgliedern der darüber liegenden Formation des Muschelkalks und in der Nähe des Vogelsbergs mit Basalt zu rechnen (Bilder 4 und 5). Örtlich treten Erdfälle auf, die als Folge von Subrosion der tief liegenden Salinarformation entstanden. Außerdem muss man lokal mit tertiären Senken rechnen (Bilder 4 und 5).

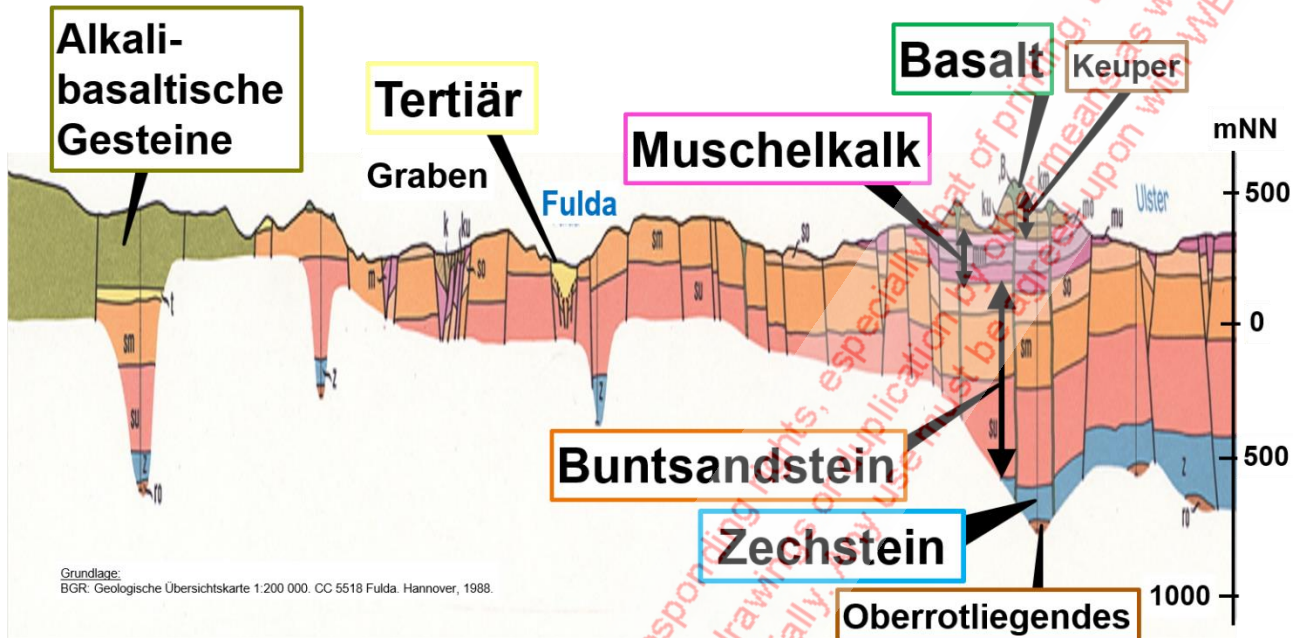


Bild 5: Schnitt I-I

Wesentlich für das Bauen im Buntsandstein sind darüber hinaus die Störungen. Dabei stellen die rheinische NNE-SSW streichende Richtung und die NW-SE streichende herzynische Richtung die Hauptstörungssysteme dar (Bilder 4 und 5).

6. Erfahrungen

Die im Abschnitt 7 dargelegten Herausforderungen, denen man sich beim Bauen im Buntsandstein stellen muss, resultieren im Wesentlichen aus Erfahrungen, die im Zusammenhang mit der Planung und dem Bau von Tunneln, Hangsicherungen, Dämmen und Stauanlagen gesammelt wurden (Bild 6). Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Autobahntunnel in Hessen und Thüringen und einem Eisenbahntunnel in der Nähe von Fulda (Wittke-Gattermann & Druffel 2015, Rosenberg & Kammel & Wittke-Schmitt & Wittke 2022, Wittke & Glitsch & Schmitt 2009, Wittke & Hermening 1997).

Auch zum Bauen im Muschelkalk liegen Erfahrungen aus Bauvorhaben in Südwestdeutschland und Thüringen vor, während zum Bauen im Basalt im Wesentlichen auf Bauvorhaben im Ausland zurückgegriffen werden müsste (Bild 6). Der Fokus dieses Beitrags liegt jedoch auf dem Tunnelbau im Buntsandstein (Wittke & Glitsch & Schmitt 2009, Wittke & Hermening 1997).

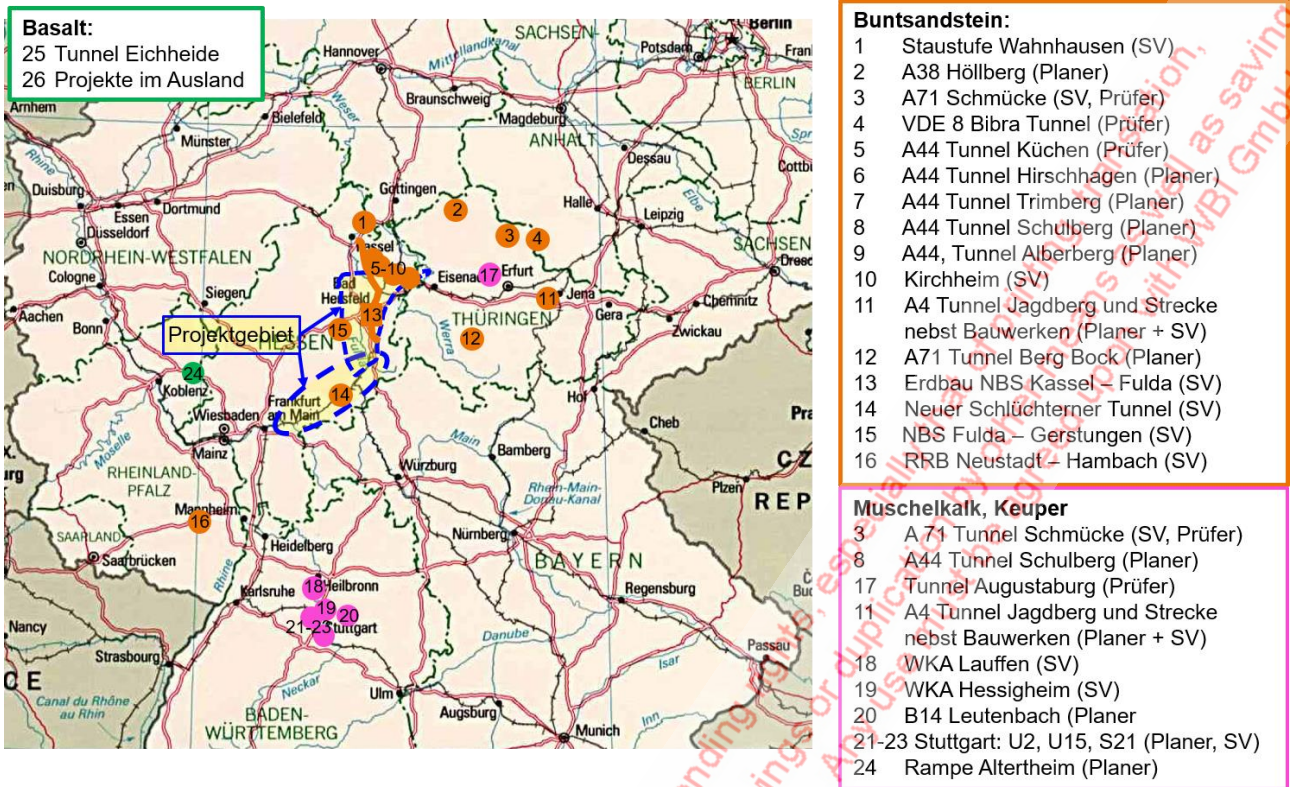
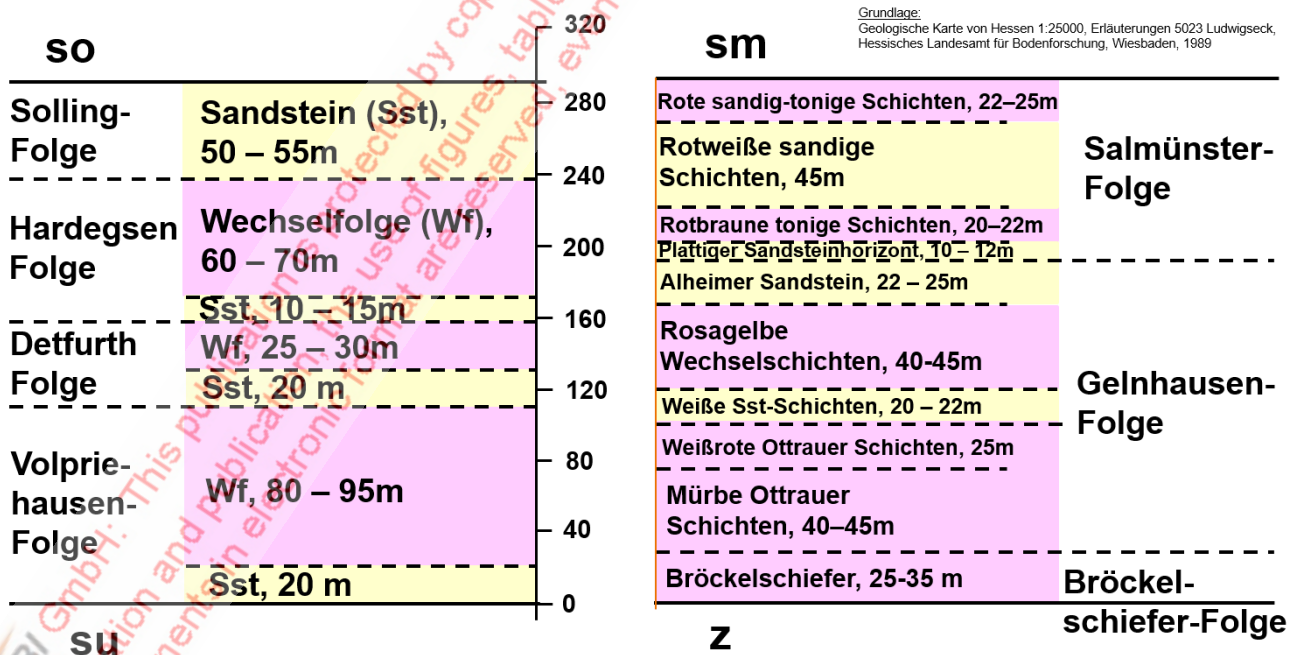


Bild 6: Referenzprojekte mit vergleichbaren Baugrundverhältnissen

7. Buntsandstein

7.1 Grundlagen

Die Schichtenfolge des Unteren und Mittleren Buntsandsteins ist im Bild 7 dargestellt.



Mittlerer Buntsandstein (sm)

Unterer Buntsandstein (su)

Bild 7: Typische Schichtenfolgen Buntsandstein

Daraus ergibt sich beispielhaft für den Mittleren Buntsandstein eine Untergliederung in die untenliegende Volpriehausenfolge, die darüber liegende Detfurth Folge, die Hardeggen und die Solling-Folge. An der Basis dieser Folgen liegen jeweils Sandsteine mit Dicken von 10 - 55 m, während darüber Wechselfolgen aus Tonsteinen und Sandsteinen mit größeren Dicken liegen (Bild 7).

Ein Foto einer Kalottenortsbrust aus dem Tunnel Hirschhagen an der BAB 44 zeigt Tonsteine aus der Hardeggen Folge und den darüber liegenden Sollingsandstein (Bild 8).

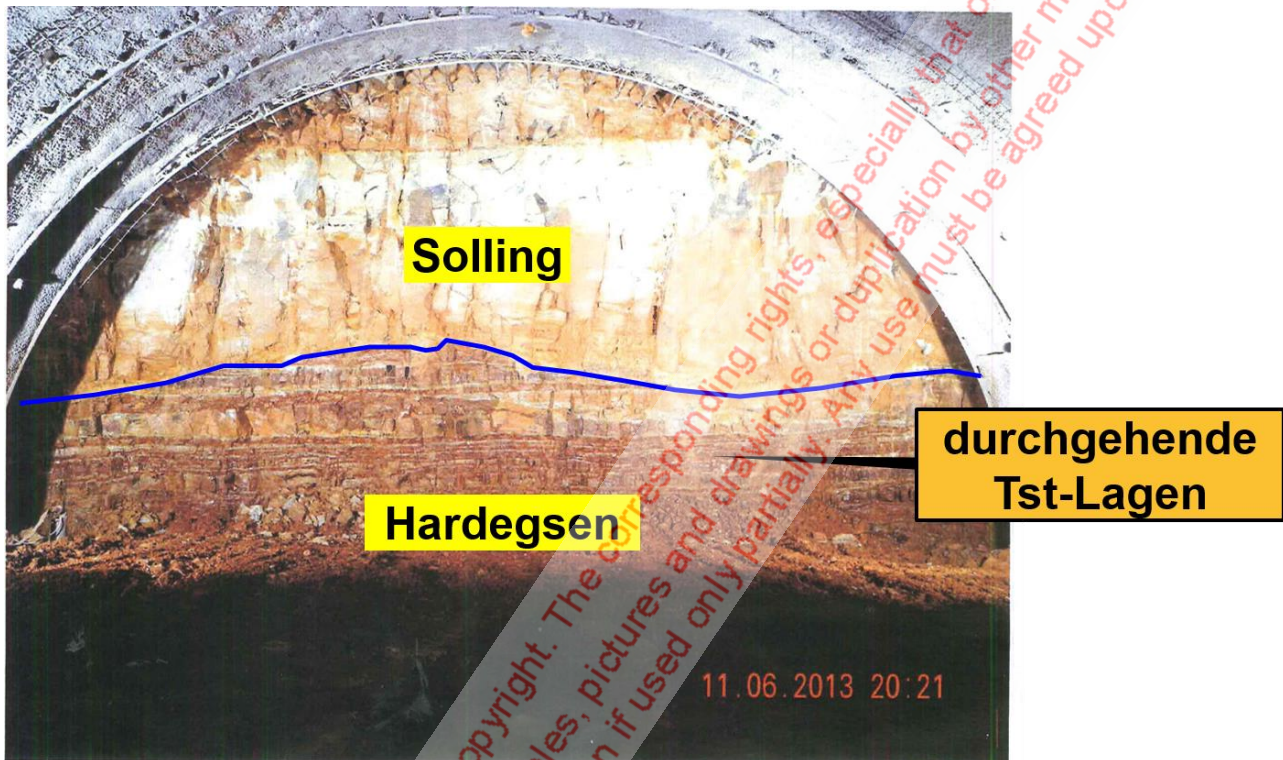


Bild 8: Ortsbrust im Buntsandstein, Tunnel Hirschhagen, BAB A44

Fotos einer Kalottenortsbrust aus dem ebenfalls an der BAB 44 liegenden Tunnel Trimberg zeigen einen dünnbankigen Sandstein mit leicht geneigter Schichtung (Bild 9).

Anhand vieler Beispiele aus den oben genannten Projekten kann gezeigt werden, dass die Schichtfugen meist horizontal bis flach geneigt sind und sehr weit durchgehen, während die senkrecht auf der Schichtung stehenden Klüfte das Gestein meist nur über eine oder mehrere Bänke durchtrennen und dann an den Schichtfugen absetzen. Das zeigt auch das im Bild 10 dargestellte Beispiel, für das auch Kennwerte für die Verformbarkeit des Gebirges und die Scherparameter des Gesteins sowie der Schichtung und der Klüftung angegeben sind (Wittke 2014).

Wesentlich für die Planung und den Bau von Tunneln im Buntsandstein ist in vielen Fällen auch die Wasserdurchlässigkeit. Diese ist durch die Trennflächen bestimmt. Sie lässt sich, wie in Bild 11 skizziert, für eine Trennflächenschar durch das Gesetz von Darcy beschreiben.

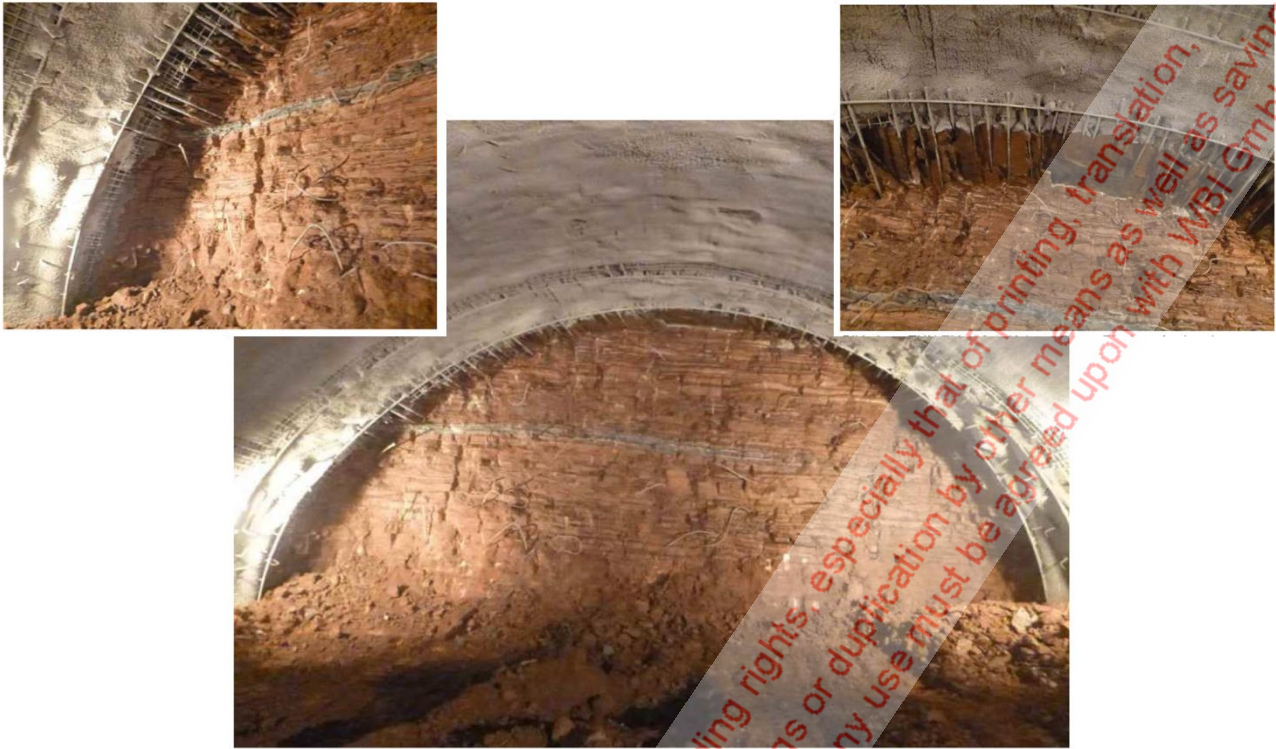
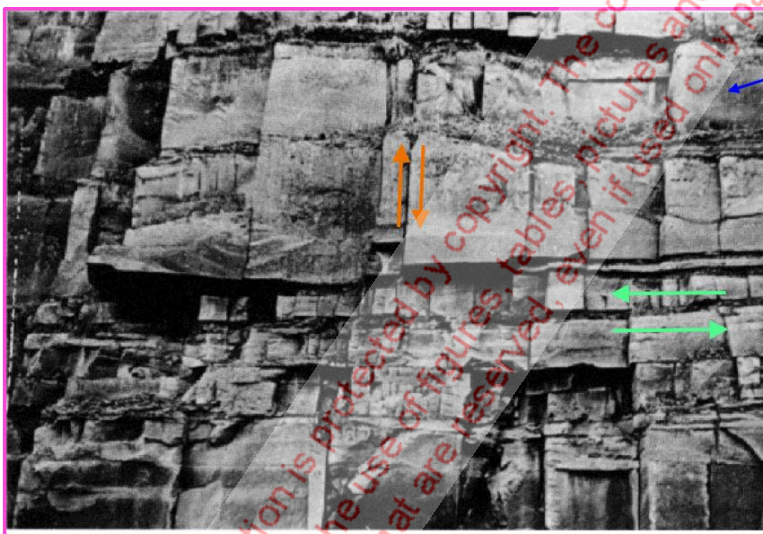


Bild 9: Ortsbrust im Buntsandstein, Tunnel Trimberg, BAB A44



Gestein c_G, φ_G

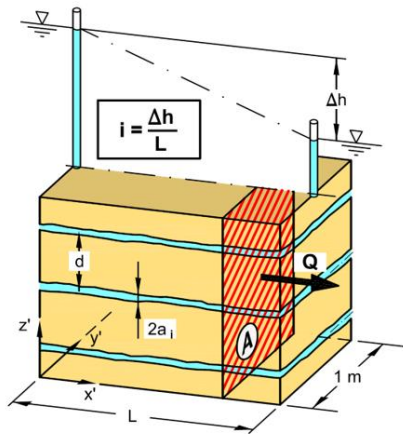
Klüftung c_K, φ_K

Schichtung c_S, φ_S

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

Bsp. Trim- berg	Verformbarkeit Fels		Festigkeit Gestein		Scherfestigkeit Trennflächen			
	E [MN/m ²]	ν [-]	c_G [kN/m ²]	φ_G [°]	c_S [kN/m ²]	φ_S [°]	c_K [kN/m ²]	φ_K [°]
Typ II	300	0,33	86	30	10 - 15	12 - 25	10 - 15	12 - 25
Typ I	800	0,25	200	27,5	50	35	20	25

Bild 10: Felsmechanische Kennwerte



$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = k_f \cdot i$$

$$k_f = \frac{g}{12 \nu} \cdot \frac{(2 a_i)^3}{d}$$

$$n = \frac{2 a_i}{d} < 0,001$$



$2\bar{a}_i$	k_D [m/s]	$\triangleq k_{soil}$
0.025 mm	$1,0 \cdot 10^{-8}$	clay
0.05 mm	$0,8 \cdot 10^{-7}$	
0.1 mm	$0,6 \cdot 10^{-6}$	silt
0.2 mm	$0,5 \cdot 10^{-5}$	
0.4 mm	$0,4 \cdot 10^{-4}$	sand
0.7 mm	$0,2 \cdot 10^{-3}$	
1.0 mm	$0,6 \cdot 10^{-3}$	gravel

Bild 11: Wasserdurchlässigkeit

Wie ebenfalls in Bild 11 dargestellt, ist die Wasserdurchlässigkeit einer Kluft und einer Kluft-schar sehr stark von der Öffnungsweite abhängig. Dementsprechend ist die Durchlässigkeit eines Felses aufgrund unterschiedlicher Spaltweiten der verschiedenen Trennflächenscharen meist stark anisotrop (Wittke 2014, Wittke & Wittke-Schmitt & Wittke-Gattermann 2019).

7.2 Böschungen

7.2.1 Standsicherheit

Insbesondere bei den Tonsteinen ist die Scherfestigkeit entlang der Schichtfugen meist sehr gering. In Abhängigkeit von den Füllungen und der Oberflächenform der Wandungen kann man von Reibungswinkeln zwischen 8° und 20° ausgehen. Damit besteht schon bei geringen Schichtneigungen das Risiko von Rutschungen entlang von Schichtfugen (Bild 12, links).

Ein Beispiel für den Beginn einer Rutschung im Voreinschnitt des Tunnels Trimberg zeigt das mittlere Foto im Bild 12. Hier musste man von einem Reibungswinkel von 17° auf der Schichtung ausgehen. Das rechte Foto in Bild 12 zeigt einen Bauzustand des Überholungsbahnhofs Körle an der NBS Hannover–Würzburg. Hier wurde die Böschung über eine große Länge mit Vorspannankern gesichert. Versuchsweise wurde in einem bestimmten Bereich die Ankerung weggelassen, und es kam zur Rutschung.

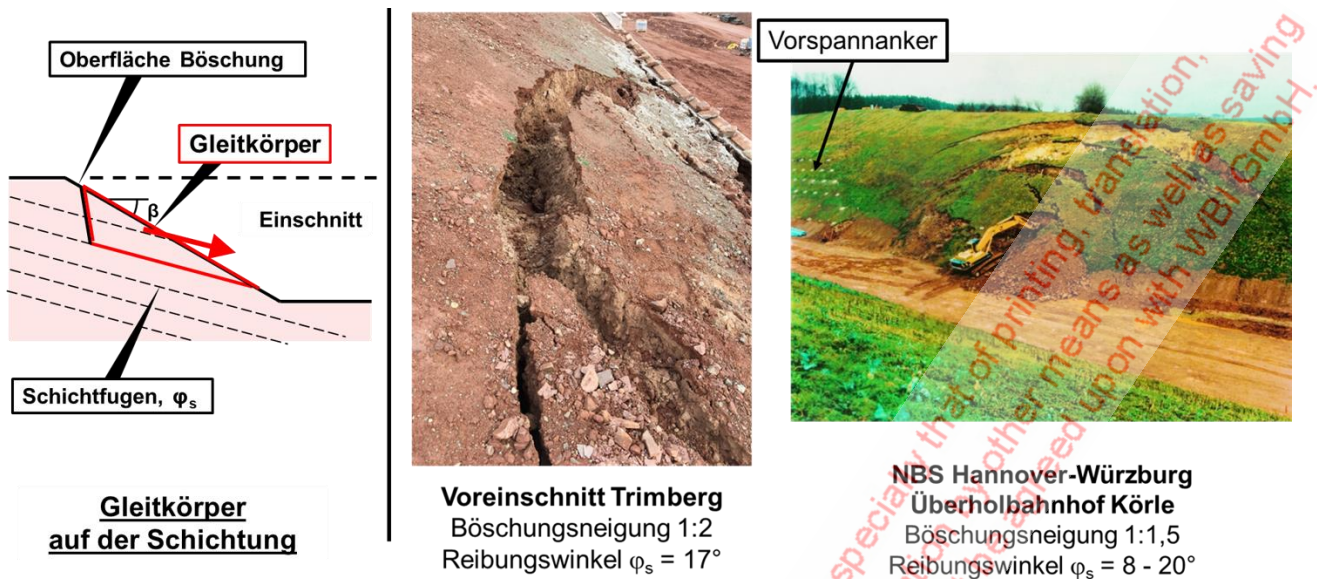


Bild 12: Einfluss der Schichtung auf die Standsicherheit von Böschungen

7.2.2 Erdfälle

Beim Bau der NBS Hannover–Würzburg wurde in einem Einschnitt zwischen Kassel und Fulda ein Erdfall angetroffen. Hier wurden erdbautechnische Maßnahmen zur Sicherung der NBS getroffen, auf deren Erläuterung hier verzichtet werden soll.

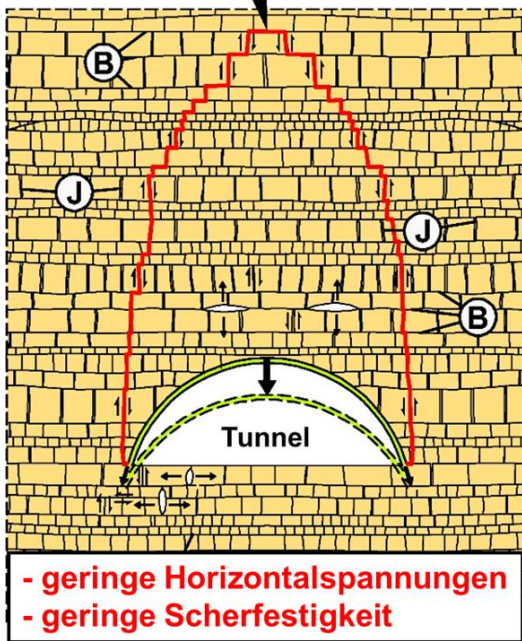
7.3 Tunnelbau

7.3.1 Gewölbewirkung

In den Schichten der Buntsandsteinformation sind vermutlich aufgrund der starken Zerlegung nach Störungen und Klüften erfahrungsgemäß relativ geringe horizontale Primärspannungen wirksam. Dieser Umstand erschwert beim Auffahren von Hohlräumen die Ausbildung eines tragenden Gebirgsgebölbes oberhalb der Öffnung. Die von den vertikalen Klüften aufnehmbaren Reibungskräfte sind wegen der geringen horizontalen Spannungen vergleichsweise klein, und es kann leicht zur Ausbildung eines Bruchkörpers kommen, wie er im Bild 13 dargestellt ist. Das ist ein Phänomen, das bei Kalottenvortrieben mit offener Sohle im Zusammenhang mit dem Tunnelbau der NBS Hannover–Würzburg häufiger aufgetreten ist. Durch die aus der großen Auflast resultierenden großen Normalkräfte in der Spritzbetonschale kommt es in solchen Fällen zu einem Einstanzen der Kalottenfüße und damit zu großen vertikalen Verschiebungen (Bild 13, rechts). Darüber hinaus treten in bestimmten Fällen große Biegemomente in der Spritzbetonschale auf, die zur Überbeanspruchung und damit zum Verbruch des Tunnels führen können (Bild 13, rechts).

Als Maßnahme dagegen werden häufig Elefantenfüße in Höhe der Kalottensohle ausgebildet. Diese haben jedoch nur eine begrenzte Wirkung. Wirkungsvoller ist die Ausbildung einer gut ausgerundeten temporären Kalottensohle aus Spritzbeton (vgl. Bild 14).

Bruchkörper entlang von Trennflächen



Grundlage:
Wittke, W.: Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Wiley, 2014.

Beanspruchung Spritzbetonschale

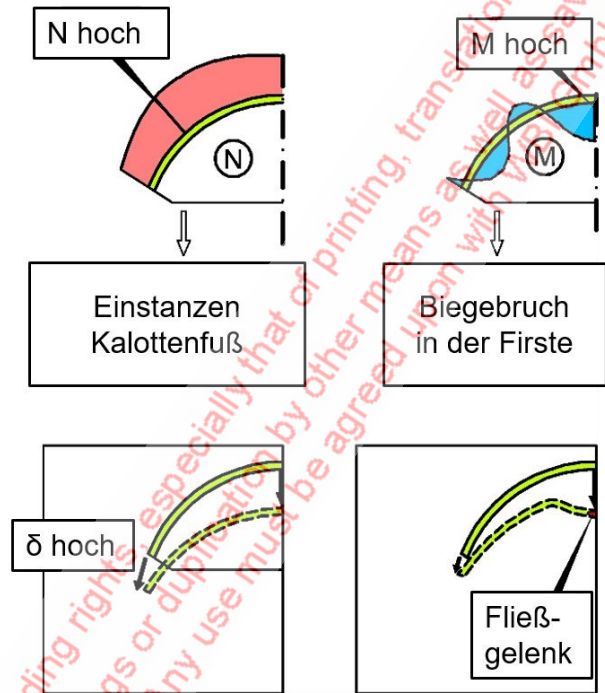


Bild 13: Trennflächen → Standsicherheit, Versagensmechanismen Kalottenvortrieb mit offener Sohle



Bild 14: BAB A 44, Tunnel Küchen, Stabilisierung durch ein temporäres Sohlgewölbe

Eine statische Alternative zu dieser Lösung besteht aus einem Vollausbuch mit aufgerundeter Sohle. Diese Lösung hat darüber hinaus den Vorteil, dass die temporäre Kalottensohle eingespart und damit auch der CO₂-Fußabdruck verringert werden kann. Sie muss sich allerdings baubetrieblich durchsetzen (Wittke & Wittke-Schmitt & Wittke & Wittke-Gattermann & Druffel 2022).

7.3.2 Störungen

Nicht immer ist es möglich, alle im Gebirge ausgebildeten Störungen im Zuge der Vorerkundungen aufzuschließen. Ein solcher Fall ist beim Bau des Tunnels Küchen an der BAB A 44 aufgetreten. Hier näherte sich eine steil einfallende Störung beim Vortrieb der Nordröhre von der rechten Seite und wurde erst an der Verschneidungslinie mit der rechten Ulme erkannt (Bild 15).

Für diesen Fall wurden pseudo 3D-FE-Berechnungen mit dem in Bild 16 dargestellten Elementennetz durchgeführt. Die gewählten Kennwerte sind ebenfalls in diesem Bild zusammengestellt. Die aus den Berechnungen resultierenden Verschiebungen sind für einen Kalottenvortrieb mit offener und geschlossener Sohle in Bild 17 links dargestellt. Man erkennt, dass es im Falle einer offenen Kalottensohle zu großen Verschiebungen und einem Abgleiten des Felses auf der Störung und damit zu einer Gefährdung der Standsicherheit des Tunnels kommt.

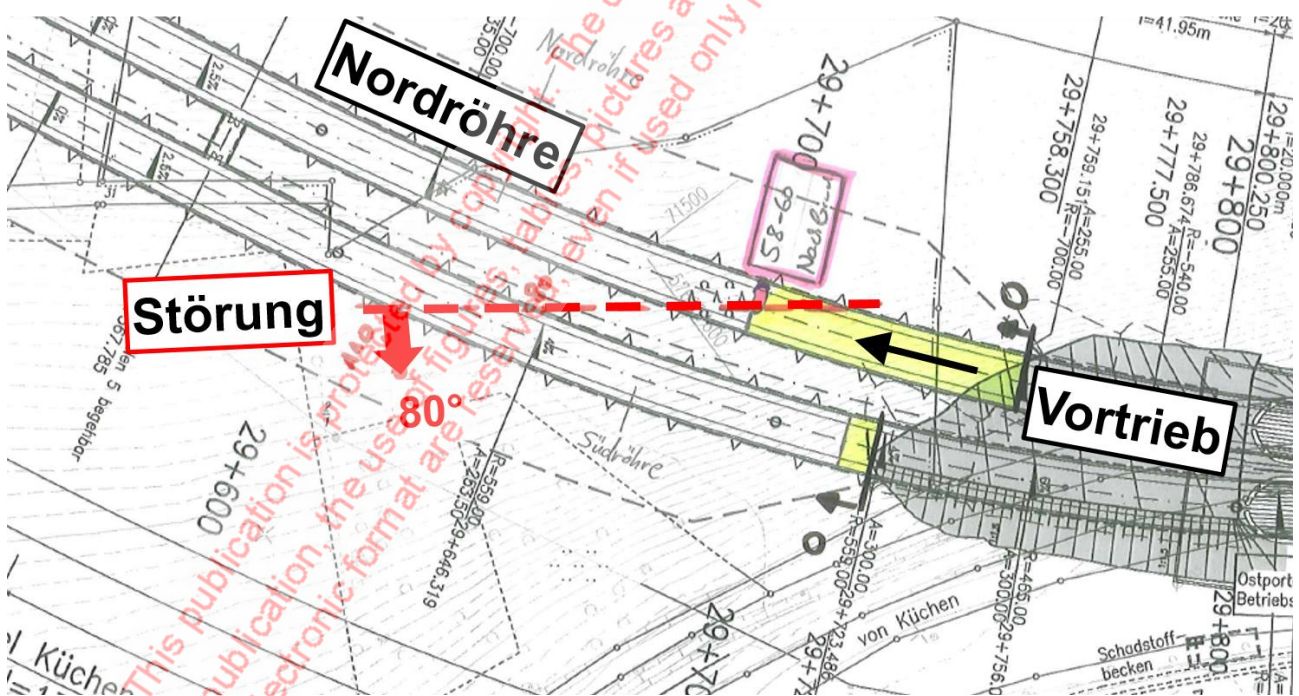


Bild 15: Störung im Bereich Tunnel Küchen, BAB A 44

Im Falle der Anordnung einer geschlossenen Kalottensohle sind die auftretenden Verschiebungen dagegen begrenzt und die Standsicherheit des Tunnels kann nachgewiesen werden.

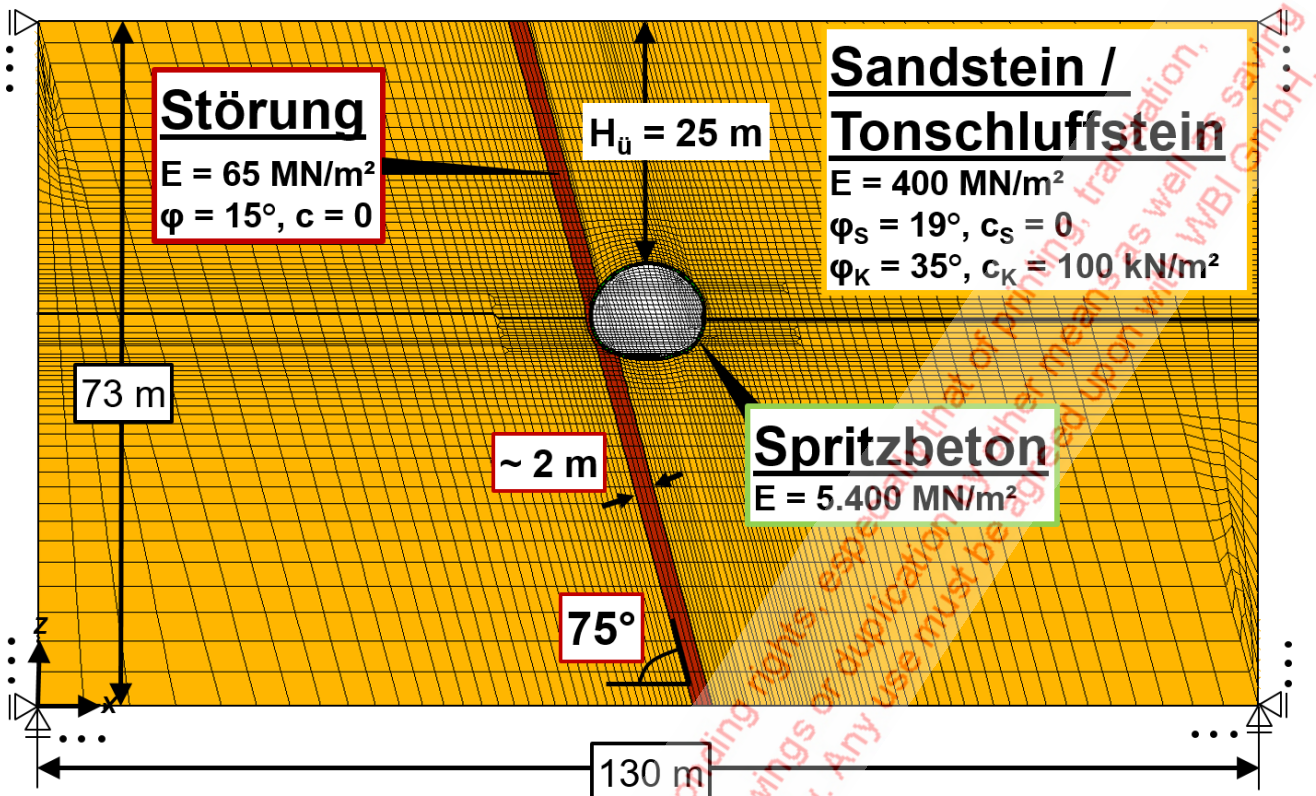


Bild 16: Detail FE-Netz für Standsicherheitsnachweis

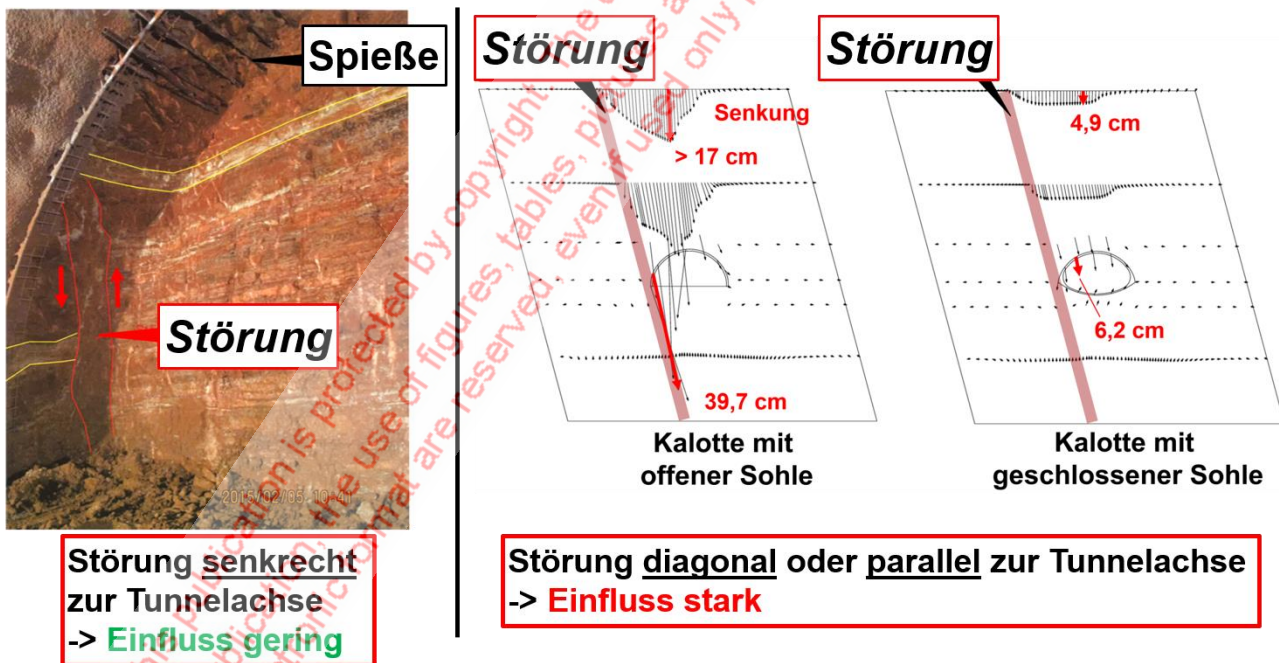


Bild 17: Einfluss von Störungen auf die Standsicherheit

Aus weiteren hier nicht dargestellten Nachweisen hat sich ergeben, dass man das Herannahen der Störung an den Tunnel an einer Zunahme der horizontalen Verschiebungen der Ulmen erkennen kann. Daran wird deutlich, wie wichtig vortriebsbegleitende Messungen, Kartierungen und auch ergänzende Erkundungen sind. Im Bild 17 links ist ergänzend der

Fall einer senkrecht zum Tunnel streichenden, steilen Störung erkennbar. Bei entsprechender, dem Vortrieb vorausseilender Sicherung durch Rohrschirme oder Spießschirme lassen sich solche Fälle meist sicher beherrschen.

7.3.3 Grundwasserhaltung beim Tunnel Hirschhagen

Mit dem Tunnel Hirschhagen an der BAB A 44 wurde das Tal der Losse mit vergleichsweise geringer Überdeckung unterfahren (Bilder 18 und 19). Im Unterfahrungsbereich liegen auch der Steinbach und der Mühlegraben sowie die B7 und eine Bahnstrecke.

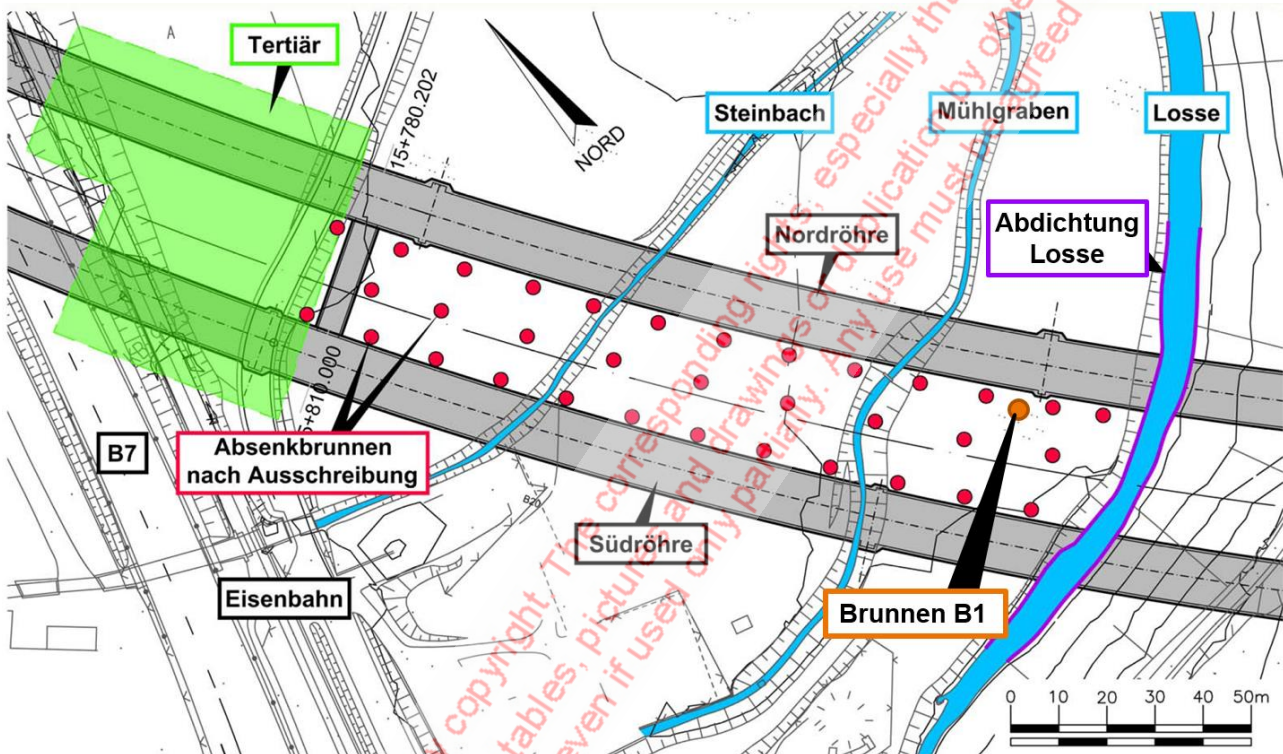


Bild 18: Tunnel Hirschhagen, Grundwasserabsenkung, Lageplan

Geologisch handelt es sich beim Lossetal um die Subrosionssenke Eschenstruth. An der Geländeoberfläche stehen Quartärablagerungen an. Die Tunnelröhren liegen im Buntsandstein. Quer zur Tunnelachse bzw. parallel zum Tal verlaufen einige Störungen, an denen die Schichten zum Teil gegeneinander versetzt sind.

Auf der nördlichen Talseite wurde eine tertiäre Senke aus Ton mit eingelagerten Sandlinsen erbohrt (Bild 19). Der Grundwasserspiegel steht in Höhe der Losse und damit deutlich oberhalb der Tunnelröhren an. Auf beiden Seiten der südlich des Tals angetroffenen Störung steht der Grundwasserspiegel in unterschiedlichen Höhen an. Daraus kann man schließen, dass zumindest diese Störung eine abdichtende Wirkung hat.

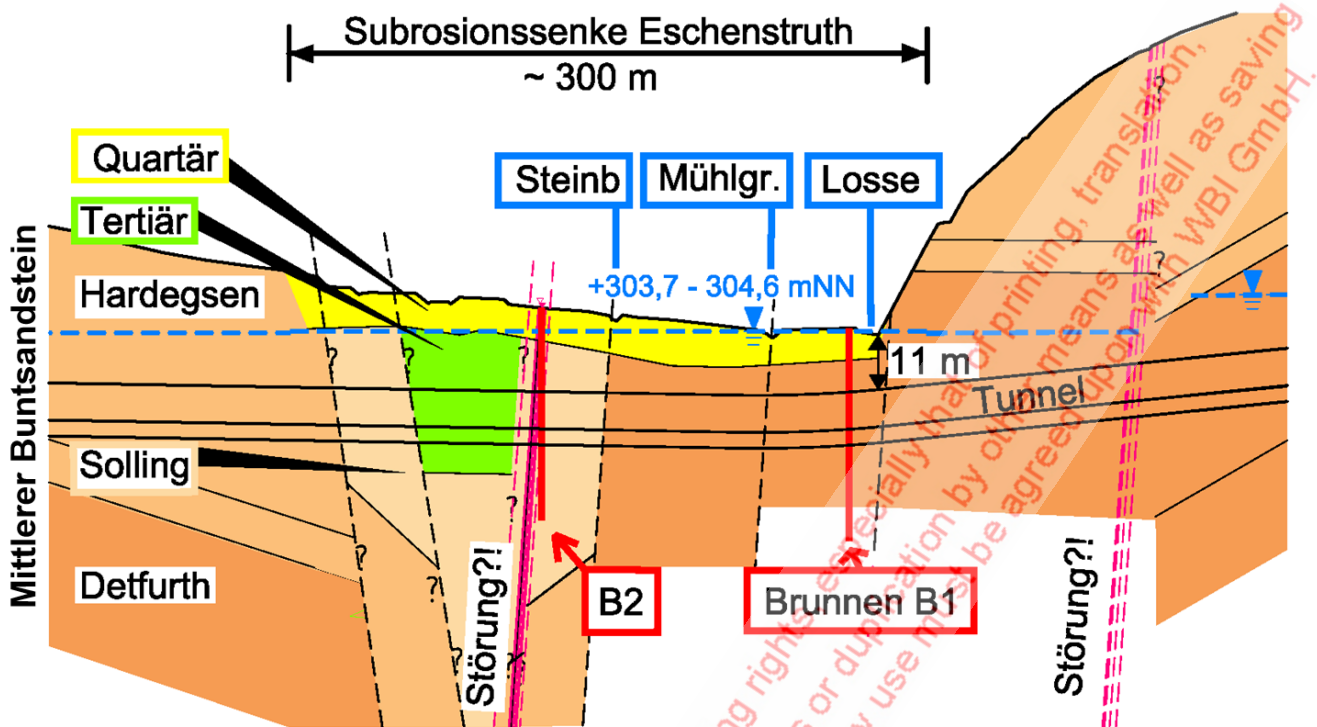


Bild 19: BAB A 44, Tunnel Hirschhagen, Längsschnitt, Detail

Die Planung sah vor, die Tunnelröhren im Schutze einer Grundwasserabsenkung aufzufahren. Die dazu konzipierte Brunnengalerie ist in Bild 18 dargestellt. Für die Dimensionierung wurde vor Beginn der Maßnahme im Versuchsbrunnen B1 ein Pumpversuch durchgeführt (Bild 18).

Da die gängigen Brunnenformeln aufgrund der Inhomogenität und Anisotropie der Wasserdurchlässigkeit des Buntsandsteins nicht zielführend sind, wurde zur Interpretation der Ergebnisse des Pumpversuchs ein 3D-FE-Netz erstellt, in dem die Untergrundverhältnisse der Wirklichkeit entsprechend nachgebildet sind (Bild 20). Auf diese Weise gelang es, die Wasserdurchlässigkeit des Buntsandsteins zahlenmäßig zu bestimmen (Witke-Gattermann & Druffel 2015).

Qualitativ ergab sich erwartungsgemäß, dass die Sandsteinlagen aufgrund der Klüftung parallel zur Schichtung sehr durchlässig sind, während der Durchlässigkeitsbeiwert senkrecht dazu deutlich geringer ist, weil die Klüfte meist an den Schichtfugen absetzen und die Schichtfugen häufig Tonfüllungen enthalten. Die Durchlässigkeit der Tonsteine ist erwartungsgemäß deutlich geringer als die der Sandsteine (Bild 21). Zahlenmäßig wurden für die Sandsteine in horizontaler Richtung Durchlässigkeitsbeiwerte von $0,7 - 3 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt, die denen eines Kieses entsprechen.

Ein interessanter Aspekt der Ergebnisse des Pumpversuchs ist in Bild 22 dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass sich Sandsteinlagen oberhalb von Tonsteinlagen bei horizontaler Lagerung mit vertikalen Brunnen nicht vollständig entwässern lassen.

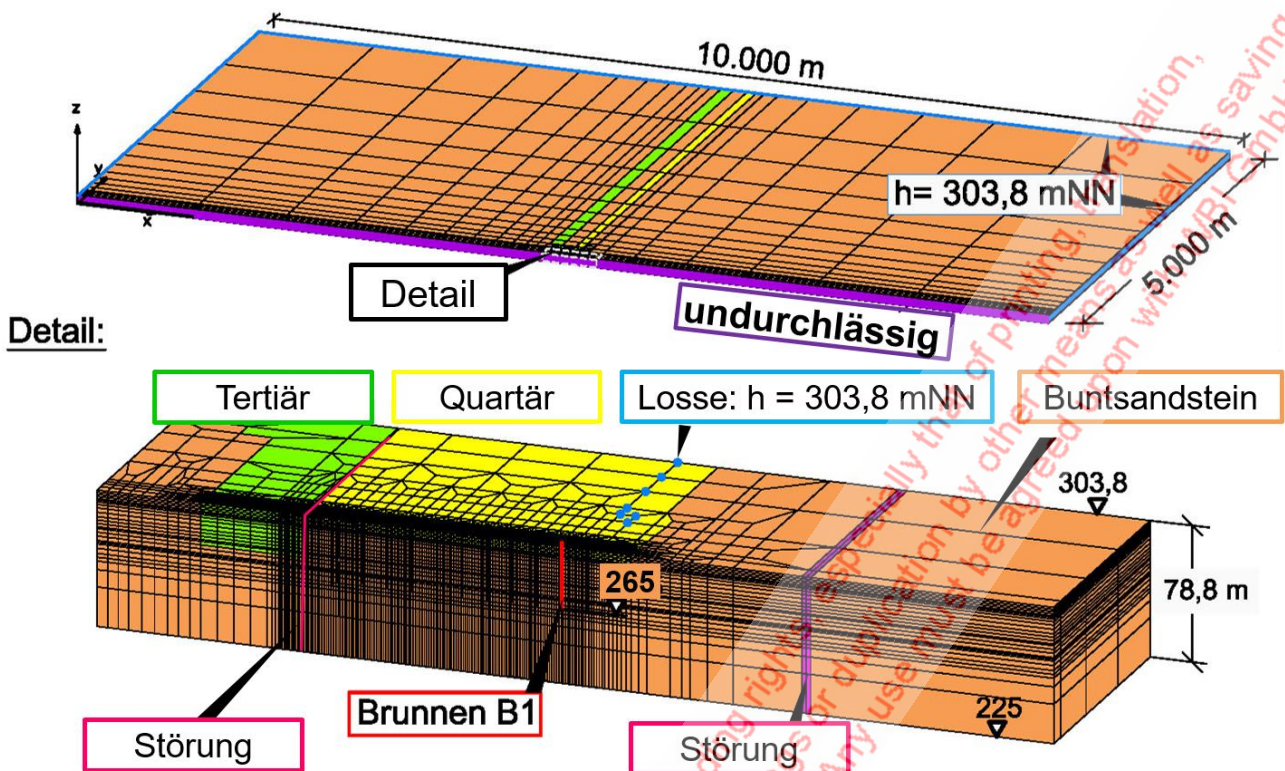


Bild 20: Nachrechnung Pumpversuch B1, FE-Netz und Randbedingungen

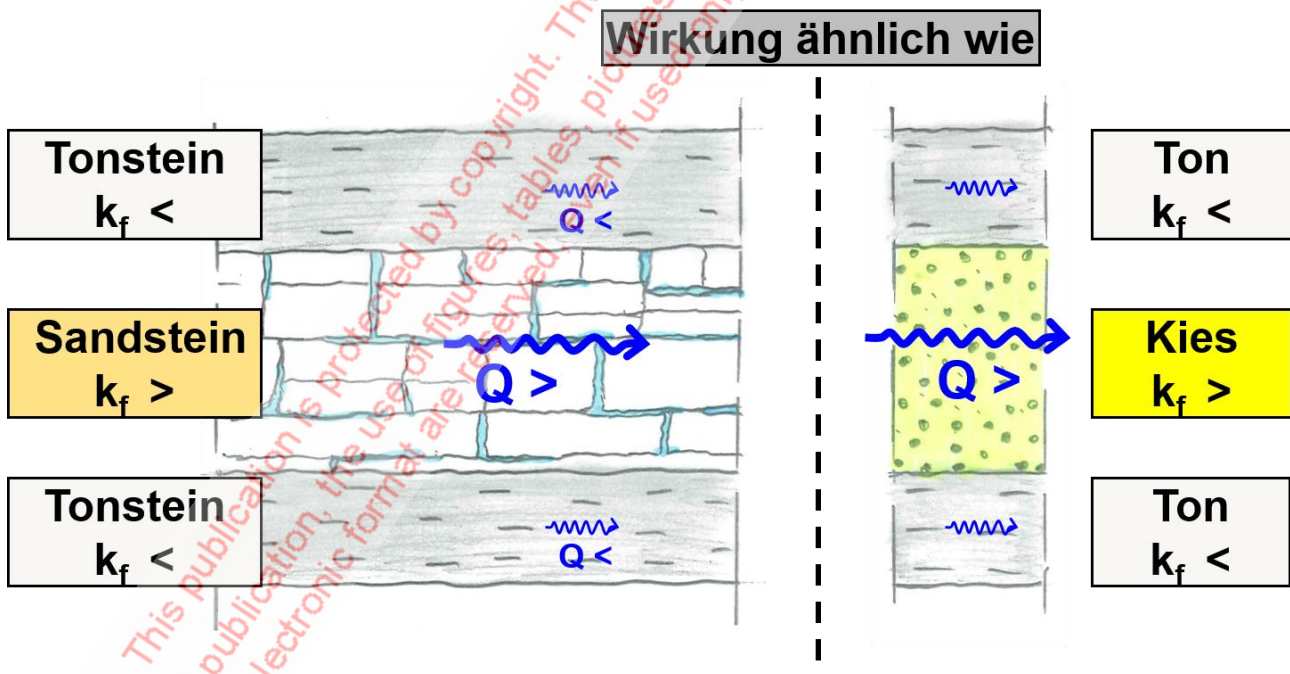


Bild 21: Durchlässigkeit Baugrund, inhomogen und anisotrop

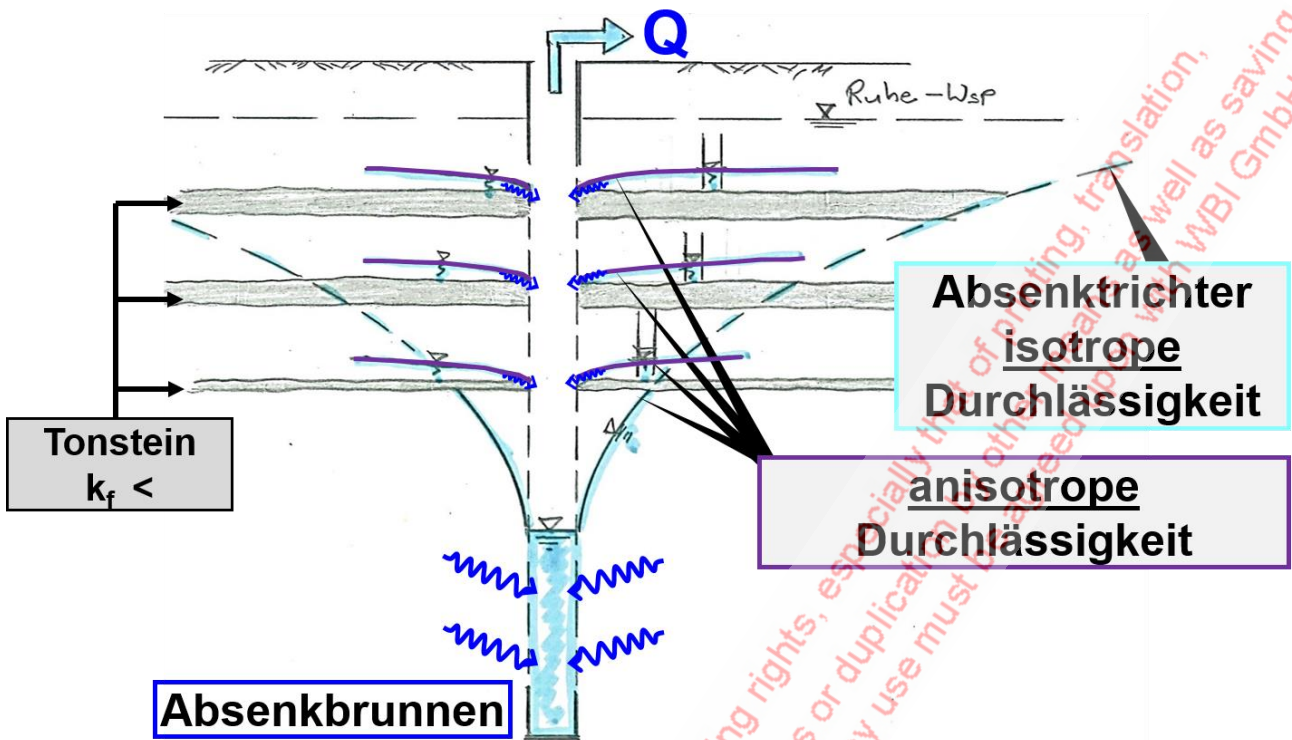


Bild 22: Einfluss der Inhomogenität und der Anisotropie auf den Absenktrichter

7.3.4 Tertiäre Rinnen

Das Tertiär und somit auch tertiäre Rinnen im Buntsandstein besteht aus Ton- und Sandlagen. Örtlich findet man auch in die Tonschichten eingelagerte Sandlinsen, in denen der dem ungestörten Grundwasserspiegel entsprechende Wasserdruck wirksam ist. Auch wenn man - wie beim Tunnel Hirschhagen geschehen - den Wasserspiegel im umgebenden Sandstein absenkt, erfolgt in benachbarten, isolierten Sandlinsen kein Abbau des Wasserdrucks, wenn man diese nicht gezielt anbohrt und entwässert. Ein solcher Fall hat sich beim Tunnel Hirschhagen ereignet. Beim Anfahren einer solchen Sandlinse mit einem der Ulmenstollen ist ein Gemisch von Sand und Wasser in den Tunnel gelaufen (Bilder 23).

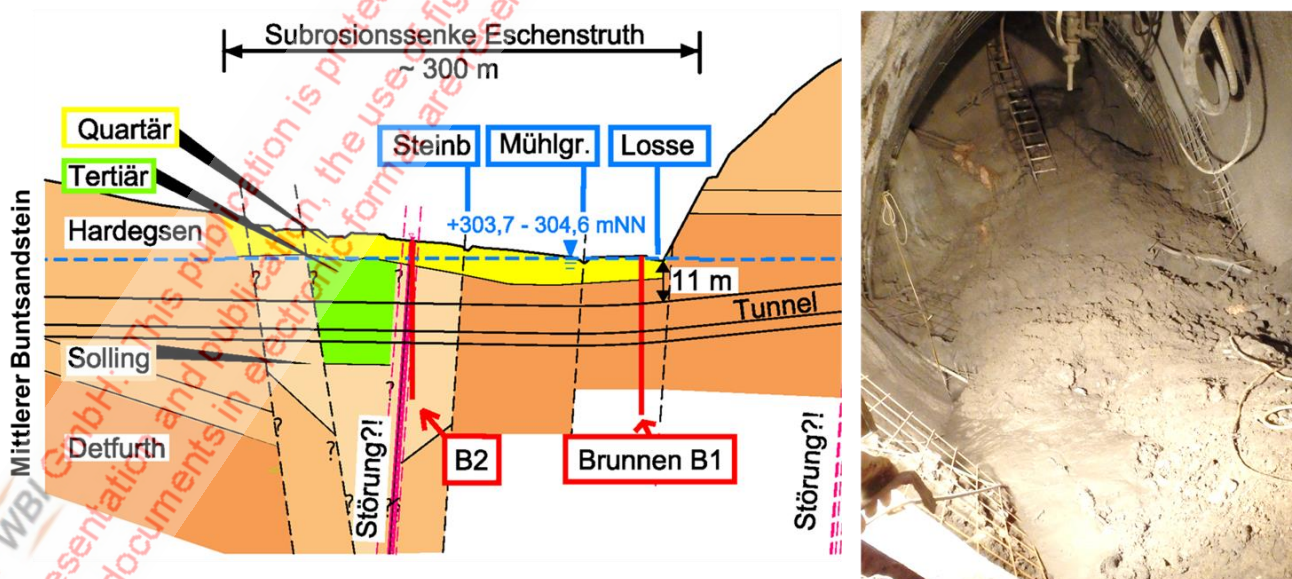


Bild 23: Im Tertiären Ton eingebettete Sandlinse durch Grundwasserabsenkung nicht erfasst

Literatur

Rosenberg, B.; Kammel, H.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke, W.: TBM-Vortrieb im Buntsandstein für den Neuen Schlüchtern Tunnel - Lessons learned. Vortrag anlässlich des 7. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.06.2022. WBI-PRINT 24, Weinheim, 2022.

Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2014. ISBN-Nr.: 978-3-433-03079-0.

Wittke, W.; Glitsch, W.; Schmitt, D.: Geotechnische Besonderheiten und bautechnische Bewältigung der Störungszonen beim Schmücketunnel (BAB A71 Thüringen). Taschenbuch für den Tunnelbau 2010. Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2009.

Wittke, W.; Hermening, H.: Grouting of cavernous Gypsum rock underneath the foundation of the weir, locks and powerhouse at Hessigheim on the river Neckar. Vortrag anlässlich des 19. ICOLD Congresses in Florenz, 1997.

Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.: Das Modell AJRM als Grundlage für wirtschaftliches und sicheres Planen und Bauen im klüftigen Fels. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-PRINT 22, Weinheim, 2019.

Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Druffel, R.: Einsparung von Energie und Rohstoffen und Verringerung des CO₂-Fußabdrucks durch Innovationen im Tunnelbau. Titelstory Zeitschrift Tunnel 3/2022, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2022.

Wittke-Gattermann, P.; Druffel, R.: Vortrieb eines Autobahntunnels unter einem Flusstal. Taschenbuch für den Tunnelbau 2015. Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2015.