

Entwurfskonzepte für die im anhydritführenden Gebirge liegenden Tunnel des Projekts

Design Concepts for Tunnels located in Swelling Claystone with Anhydrite

Dr.-Ing. Claus Erichsen

Zusammenfassung

Quellvorgänge im anhydritführenden Gebirge werden durch den Zutritt von Wasser in das Gebirge ausgelöst. Zur Vermeidung bzw. Begrenzung von Quelldrücken und Quellhebungen beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge ist es von Bedeutung, dass während der Bauzeit und dauerhaft während der Betriebszeit bzw. "Lebensdauer" des Tunnels kein Wasser in das Gebirge in der näheren Umgebung des Tunnelbauwerkes eingeleitet wird. Die Tunnel müssen deshalb trocken aufgefahren werden.

Für das Großprojekt Stuttgart - Ulm müssen ca. 20 km Tunnel im quellfähigen anhydritführenden Gebirge gebaut werden. Der Anhydritspiegel bildet die Grenze zum überlagernden nicht quellfähigen und grundwasserführenden Gebirge. Wenn ein ausreichend großer Abstand von der Tunnelfirste zum Anhydritspiegel gegeben ist, wird der anhydritführende, unausgelaugte Gipskeuper in der Regel trocken angetroffen. An den Übergängen von den wasserführenden zu den quellfähigen Schichten kann Wasser über die vortriebsbedingten Auflockerungszonen in die nähere Umgebung des Tunnelbauwerkes gelangen und dort Quellvorgänge auslösen. Um dies zu verhindern, ist an diesen Stellen der Bau von Abdichtungsbauwerken vorgesehen. Bei Tunneln, die im Übergangsbereich zwischen wasserführenden und quellfähigen Schichten liegen, sind darüber hinaus Injektionen zur Abdichtung des Gebirges vorgesehen. Die Injektionen zur Gebirgsabdichtung sollen mit Kunstharz ausgeführt werden.

Executive Summary

Swelling of claystone with anhydrite results from transformation of anhydrite to gypsum if water has access. Swelling pressures and corresponding heave of tunnels thus can be avoided and limited respectively, if the use of water is not allowed for during the construction of the tunnels and if ground water is kept away from the rock adjacent to the tunnels.

For the large-scale railway project Stuttgart - Ulm approximately 20 km of tunnels have to be constructed in this type of rock. The so-called anhydrite surface represents the transition from the swelling rock to the overlying rock, in which the transformation from anhydrite to gypsum has already occurred in nature. If a tunnel is located at a certain distance underneath the anhydrite surface, tunnel driving under dry conditions is feasible. Adjacent to the tunnel circumference, a disturbed rock zone exists, which results from stress redistribution around the opening.

If the tunnel penetrates the anhydrite surface and reaches the overlying rock with leached zones, then water can seep through the "disturbed rock zone" parallel to the tunnel until it

reaches the rock mass with swelling potential. This can be prevented by sealing structures of reinforced concrete, which are located close to the transition zones from the water-bearing rocks to the swelling rock. In addition, the rock mass around these structures is to be grouted and thus sealed with resin.

1. Einleitung

Quellvorgänge im anhydritführenden Gebirge werden durch den Zutritt von Wasser in das Gebirge ausgelöst (Wittke 1978). Zur Vermeidung bzw. Begrenzung von Quelldrücken und Quellhebungen beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge ist es von Bedeutung, dass während der Bauzeit und dauerhaft während der Betriebszeit bzw. "Lebensdauer" des Tunnels kein Wasser in das Gebirge in der näheren Umgebung des Tunnelbauwerkes eingeleitet wird. Die Tunnel müssen deshalb trocken aufgefahren werden.

Für das DB-Großprojekt Stuttgart - Ulm müssen ca. 20 km Tunnel im quellfähigen anhydritführenden Gebirge gebaut werden (Penn 2012, Wittke 2012). Die für den Bau dieser Tunnel von der WBI GmbH entwickelten Entwurfskonzepte werden im Folgenden vorgestellt.

2. Tunnel unter dem Anhydritspiegel

Die beiden vom neuen Durchgangsbahnhof in Stuttgart auf die Filderebene führenden Röhren des Fildertunnels und die Tunnel für die Anbindung Ober-/Untertürkheim durchörterten über lange Strecken den unausgelaugten, anhydritführenden und damit quellfähigen Gipskeuper (Bilder 1 und 2). Der Anhydritspiegel bildet die Grenze zum überlagernden nicht quellfähigen und grundwasserrührenden Gebirge und liegt deutlich oberhalb des Tunnelquerschnitts.

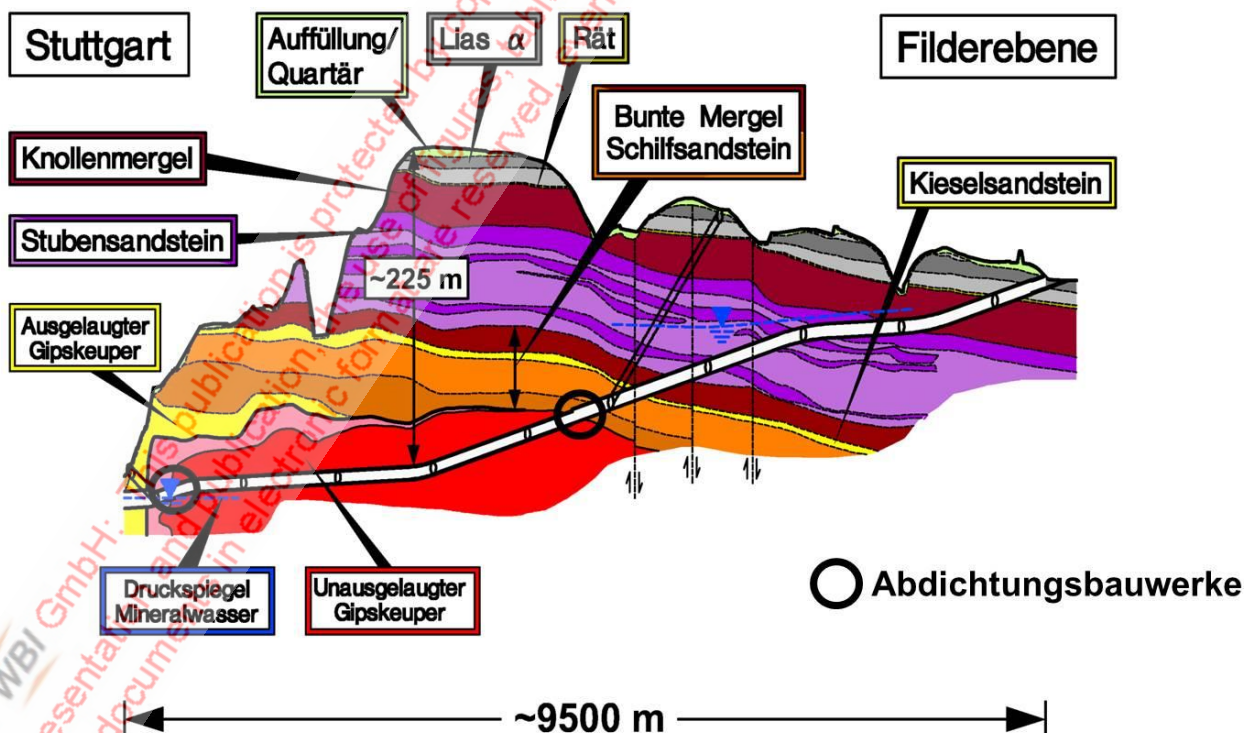


Bild 1: Fildertunnel

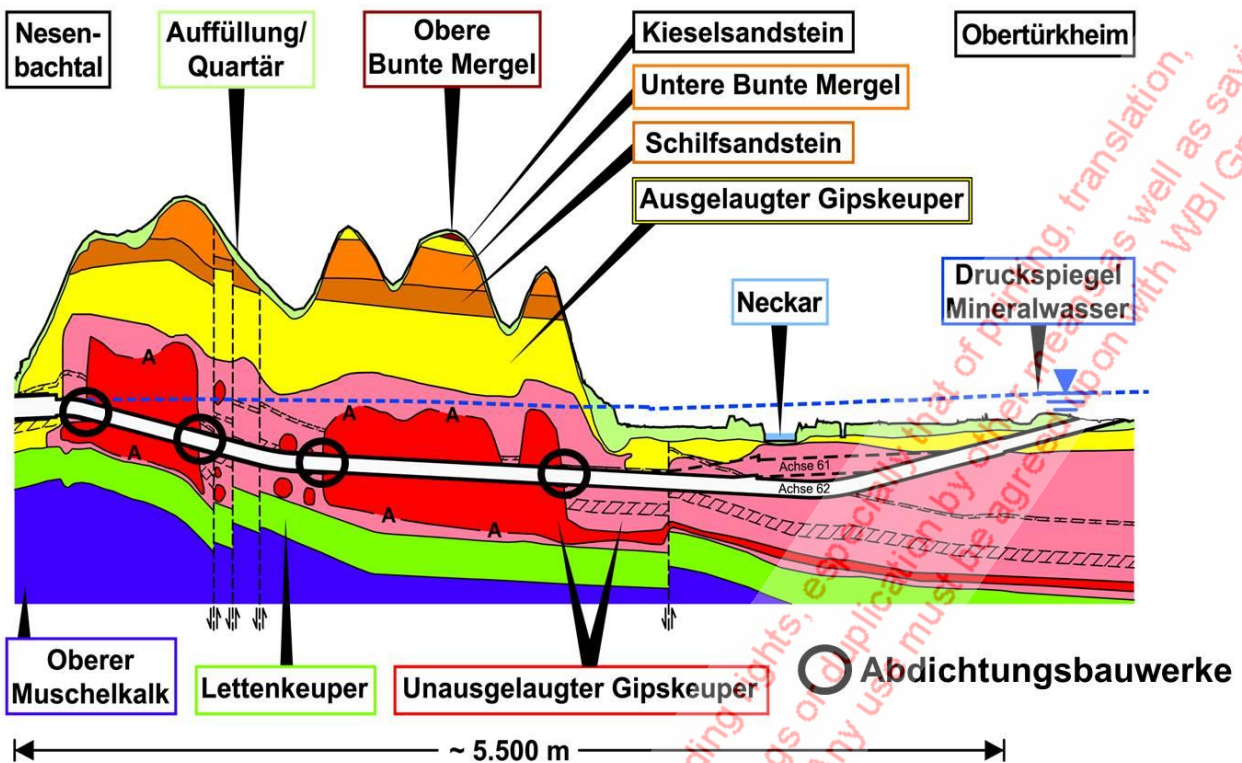


Bild 2: Tunnel nach Ober-/Untertürkheim

Wenn ein ausreichend großer Abstand von der Tunnelfirste zum Anhydritspiegel gegeben ist, wird der anhydritführende, unausgelaugte Gipskeuper in der Regel trocken angetroffen. Dieses wird durch Erfahrungen beim Bau der Wendeschleife der Stuttgarter S-Bahn (Los 12) bestätigt. Bild 3 zeigt einen Bauzustand beim Vortrieb dieses Tunnels im unausgelaugten Gipskeuper (Witke 1978). Der Abstand zwischen der Tunnelfirste und dem Anhydritspiegel beträgt ca. 15 m. Die Sicherung bestand lediglich aus einer Versiegelung mit einer dünnen Spritzbetonschicht. Das Gebirge war staubtrocken. Eine Erklärung hierfür wird in (Witke & Witke-Gattermann 2010) und (Witke 2014) gegeben. Das Grundwasser im Gebirge oberhalb des Anhydritspiegels kann in den unausgelaugten Gipskeuper eindringen und leitet dort Quellen ein. Durch das Quellen verringert sich die vertikale Wasserdurchlässigkeit innerhalb einer dezimeter- bis meterdicken Schicht unterhalb des Anhydritspiegels, und die Wasserzufuhr durch diese gering durchlässige Schicht wird nahezu unterbunden. Durch diese natürliche Abdichtung bedingt können Tunnel unterhalb und mit einem ausreichenden Abstand zum Anhydritspiegel trocken aufgeföhren werden.

Beim Vortrieb eines Tunnels entstehen allerdings aufgrund von Spannungsumlagerungen im Gebirge Auflockerungszonen, die im Vergleich zum ungestörten Gebirge eine erhöhte Wasserdurchlässigkeit besitzen. Bild 4 zeigt die Ergebnisse von FE-Berechnungen, die für einen ungesicherten Tunnel mit einem Durchmesser von 10 m durchgeführt wurden (Witke & Witke-Gattermann 2010). Im linken Teil des Bildes sind die Bereiche im Gebirge gekennzeichnet, in denen ausbruchbedingte Spannungsumlagerungen zur Überschreitung der Festigkeit auf horizontalen Schichtflächen und vertikalen Klüften führen. Durch dilatante Verschiebungen auf den vertikalen Klüften vergrößert sich die vertikale Wasserdurchlässigkeit in dem entsprechenden Bereich von ursprünglich 10^{-9} m/s auf Werte $> 10^{-3}$ m/s

(Wittke & Wittke-Gattermann 2010). Hierdurch entsteht in der näheren Umgebung des Tunnels eine Wasserwegigkeit in Tunnellängsrichtung.



- Durchmesser 10 m
- unausgelaugter anhydritführender Gipskeuper
- staubtrocken
- standsicher mit 2-5 cm Spritzbetonversiegelung

Bild 3: S-Bahn Stuttgart, Los 12, Wendeschleife

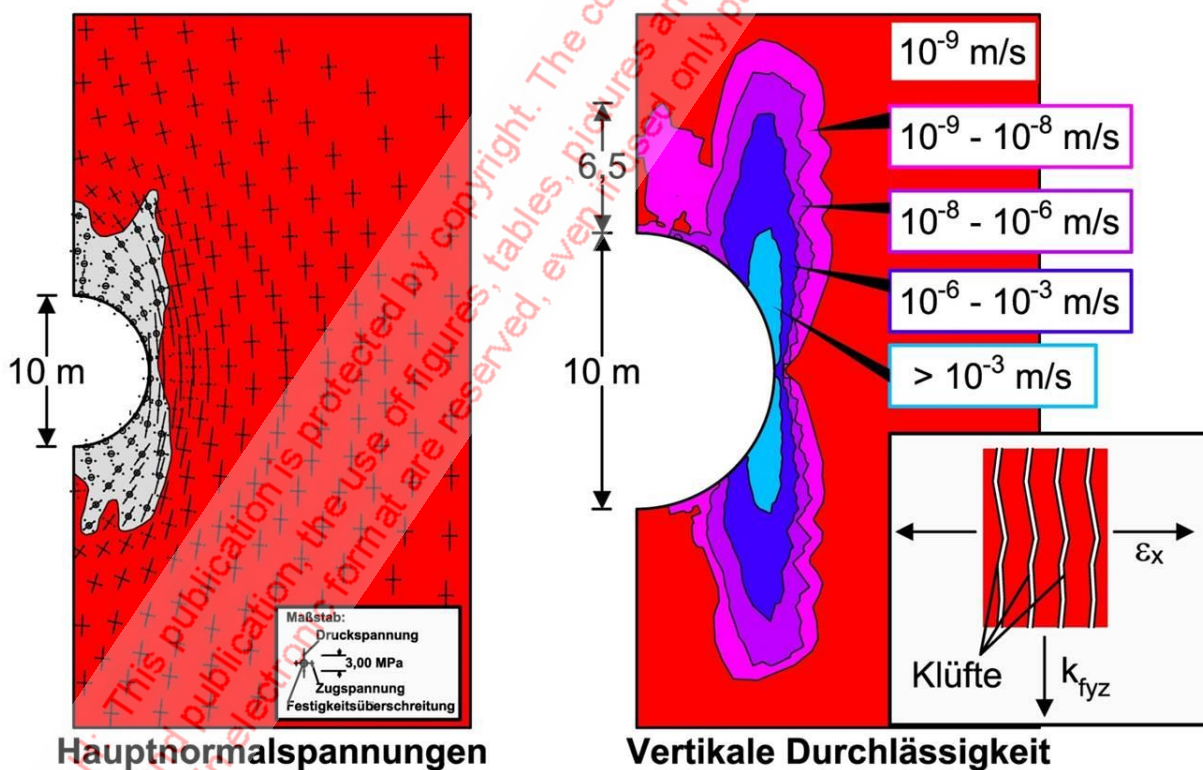


Bild 4: Tunnelvortrieb im unausgelaugten Gipskeuper, Vortriebsbedingte Auflockerungszonen, Beispiel

An den Übergängen von den wasserführenden zu den quellfähigen Schichten kann Wasser über diese Auflockerungszonen in die nähere Umgebung des Tunnelbauwerks gelangen und dort Quellvorgänge auslösen. Um dies zu verhindern, ist bei den Tunnels für das Projekt Stuttgart 21 an diesen Stellen der Bau von Abdichtungsbauwerken vorgesehen (Bilder 1, 2 und 5). Wenn der zwischen den Abdichtungsbauwerken liegende Teil des Tunnels einen ausreichenden Abstand zum Anhydritspiegel hat und das Gebirge trocken ist, kann dieser Teil des Tunnels für einen vergleichsweise geringen Quelldruck bemessen werden. Auf der "Wasserseite" sind bei der Bemessung der Innenschale allerdings Quelldrücke zugrunde zu legen, wie sie sich bei Berücksichtigung von Wasserzutritten ergeben (Wittke & Wittke-Gattermann 2010).

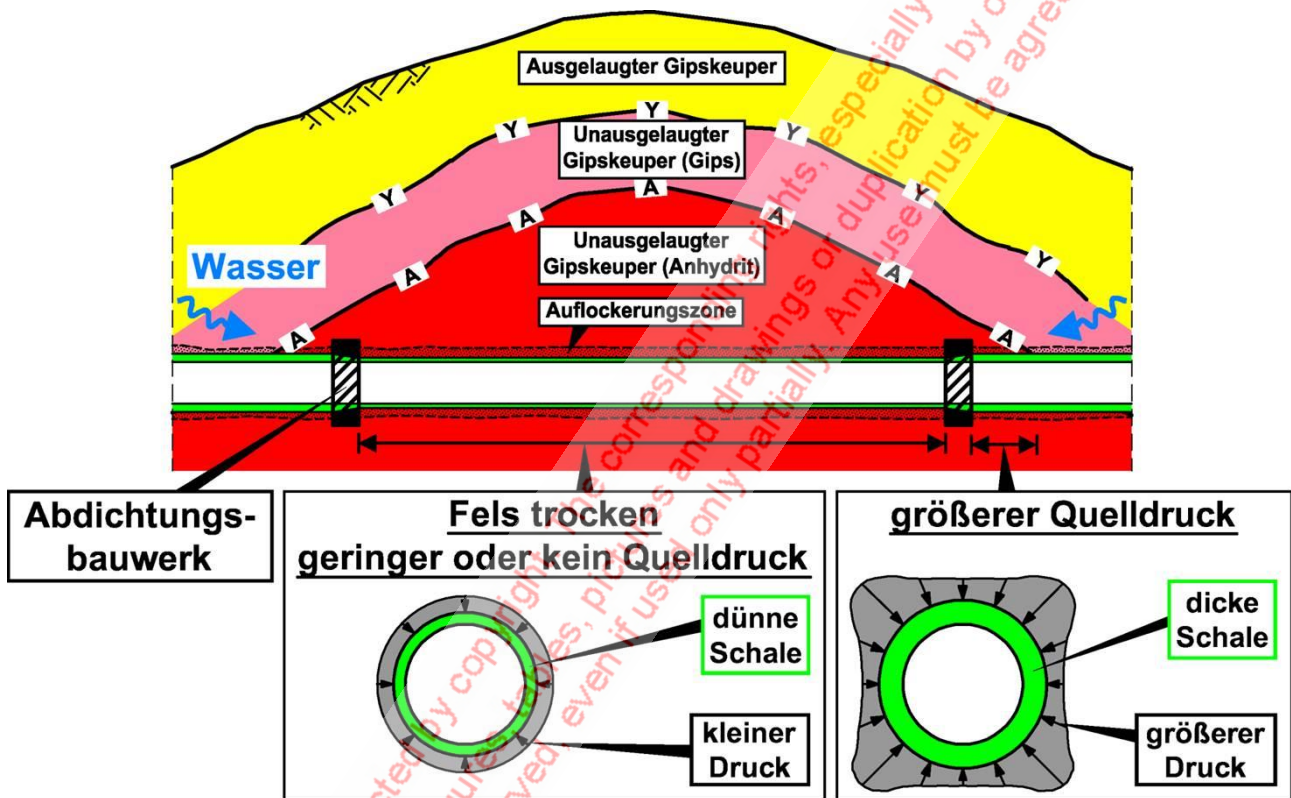


Bild 5: Lage von Abdichtungsbauwerken

Aus Gründen der Redundanz besteht ein Abdichtungsbauwerk aus 2 Abdichtungsringen (Bild 6). Zur Kontrolle der Dichtigkeit ist zwischen den Abdichtungsringen eine Kontrolldrainage vorgesehen. Hierdurch können Undichtigkeiten rechtzeitig erkannt und mittels Nachinjektionen behoben werden.

Im Bereich der Abdichtungsringe wird zunächst der durch den Tunnelausbruch gestörte Gebirgsbereich schonend ausgebrochen und durch bewehrten Beton ersetzt. Der Ringbalken dient als Widerlager für die Durchführung der anschließenden Abdichtungsinjektionen im Bereich der Auflockerungszonen. Als Injektionsgut wird Kunstharz verwendet. Anschließend erfolgt der Einbau der Innenschale. Die Innenschale wird mit einem Fugenband mit dem Ringbalken verbunden. Auf diese Weise entsteht eine wasserdichte Verbindung, die einen Wasserzutritt in den anhydritführenden Gipskeuper über die Fuge zwischen Innenschale und Ringbalken unterbindet.

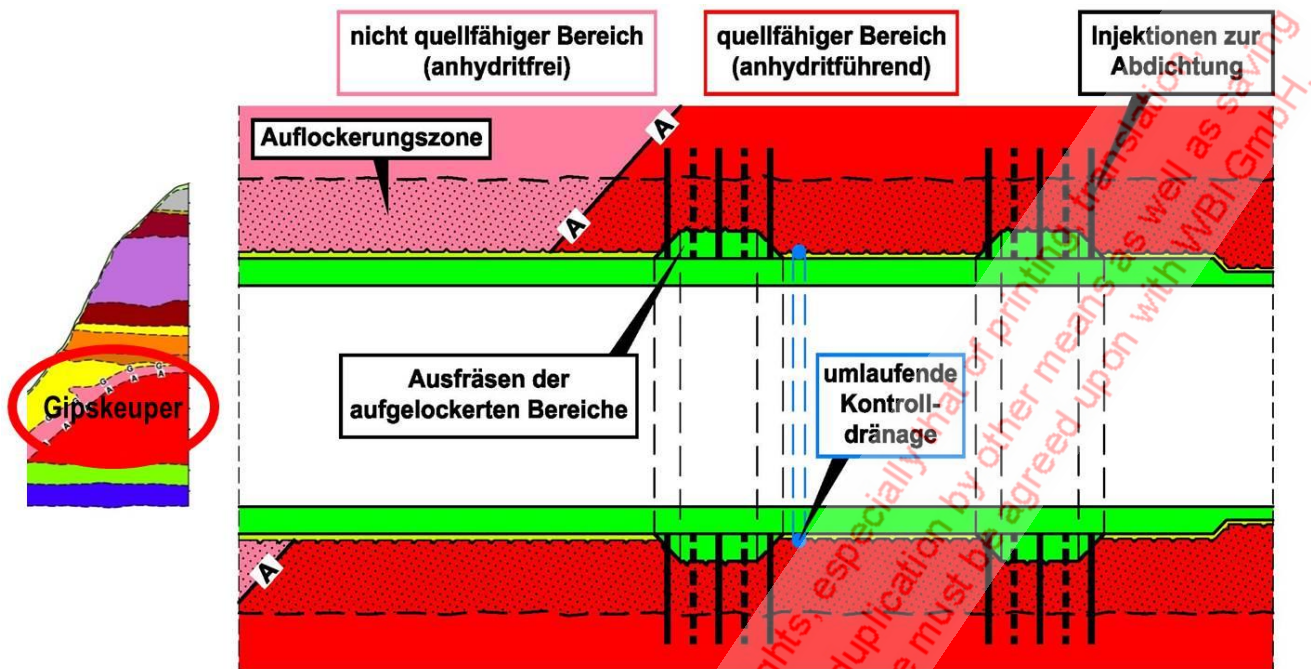


Bild 6: Abdichtungsbauwerk

3. Tunnel im Bereich des Anhydritspiegels

Bei den Tunnelröhren für die Anbindungen Feuerbach und Bad Cannstatt liegt der Anhydritspiegel über große Bereiche unterhalb bzw. in Höhe des Tunnelquerschnitts (Bilder 7 und 8). Hier kann Grundwasser aus den überlagernden wasserführenden Schichten über die vortriebsbedingte Auflockerungszone in den unausgelaugten Gipskeuper gelangen und Quellvorgänge auslösen (Bild 9, Wittke & Wittke-Gattermann 2010, Wittke 2014). In diesen Fällen sollen zusätzlich zur Errichtung von Abdichtungsbauwerken die Auflockerungszonen und das Gebirge in der Umgebung des Tunnels mit Injektionen abgedichtet werden, damit der Zufluss von Wasser in die nähere Umgebung des Tunnelbauwerks entsprechend unterbunden bzw. begrenzt wird (Bilder 10 und 11). Als Injektionsgut ist Kunstharz vorgesehen.

Oberhalb des Anhydritspiegels können im Gipskeuper in der Bleiglanzbank und im Bochinger Horizont Wasserwegigkeiten und Wasserführungen vorhanden sein. Um Wasserzutritte aus diesen Schichten in die vortriebsbedingten Auflockerungszonen in der näheren Umgebung der Tunnelröhren zu begrenzen, sollen die Wasserdurchlässigkeiten dieser Schichten mittels Einpressungen verringert werden. Auch hier ist als Injektionsgut Kunstharz vorgesehen (Bild 12).

Bei der Ermittlung der Quelldrücke und der Bemessung der Innenschalen wird Wasserzufluss berücksichtigt. Zur Vermeidung von unzulässigen Sohlhebungen kann in einigen Tunnelabschnitten der Bau einer Knautschzone (VNS-Prinzip) erforderlich werden (Bild 11).

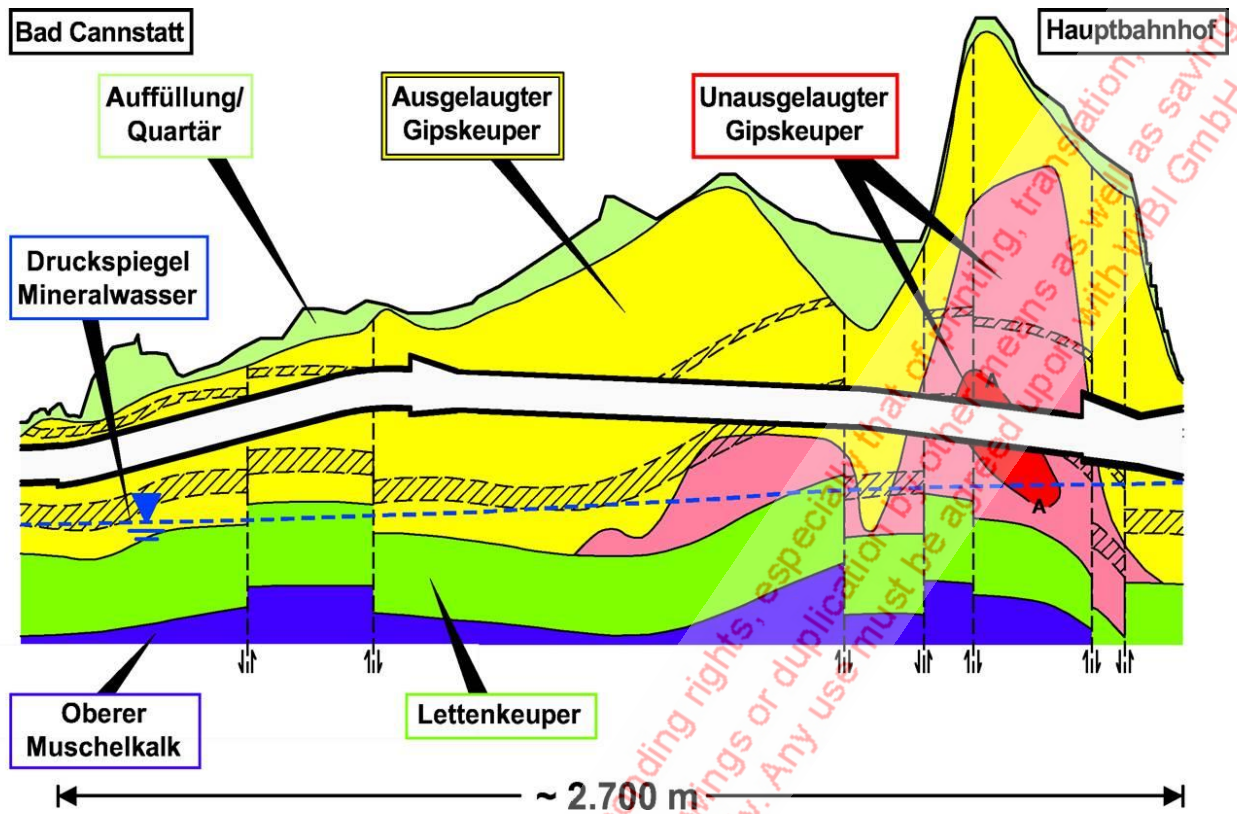


Bild 7: Tunnel nach Bad Cannstatt, A+I: Abdichtungen und Injektionen

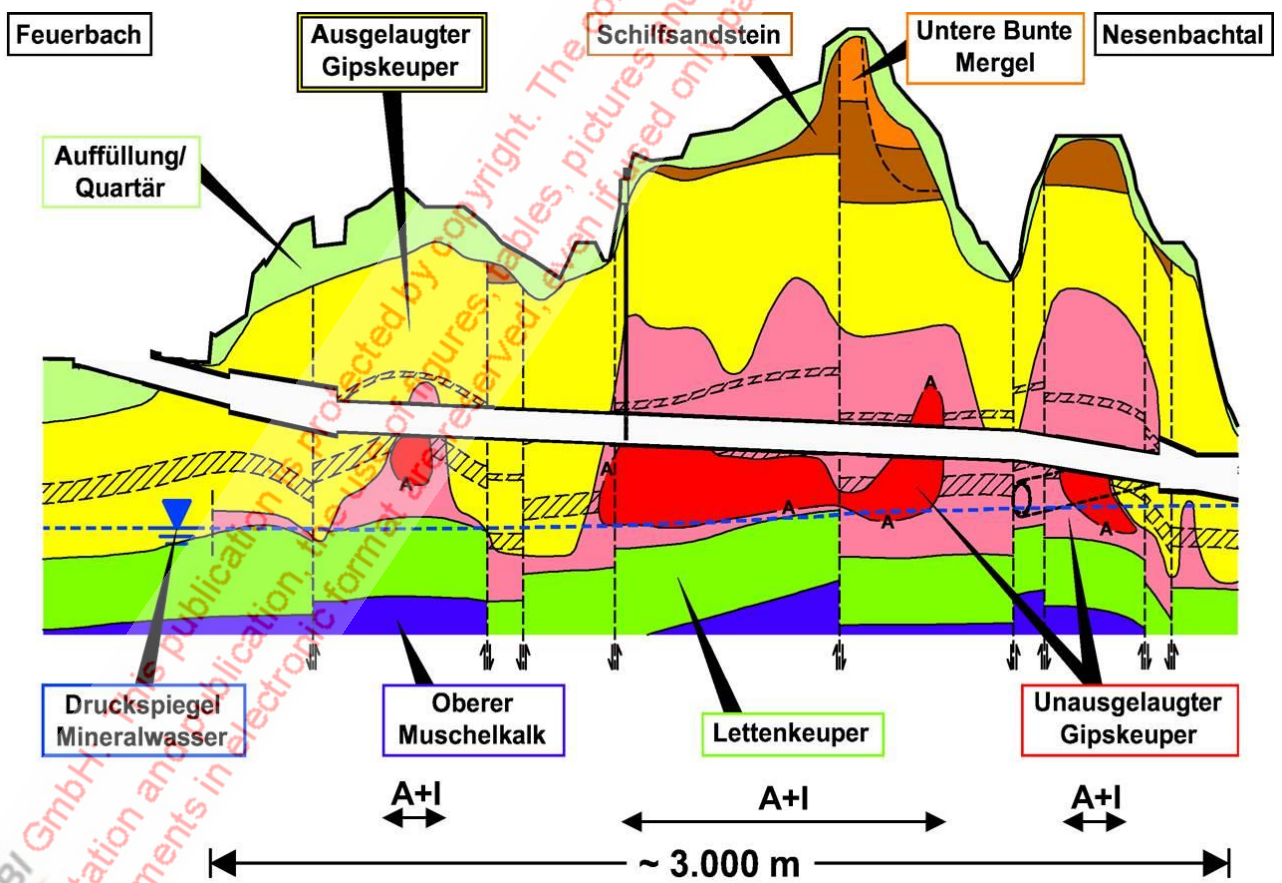


Bild 8: Tunnel nach Feuerbach, A+I: Abdichtungen und Injektionen

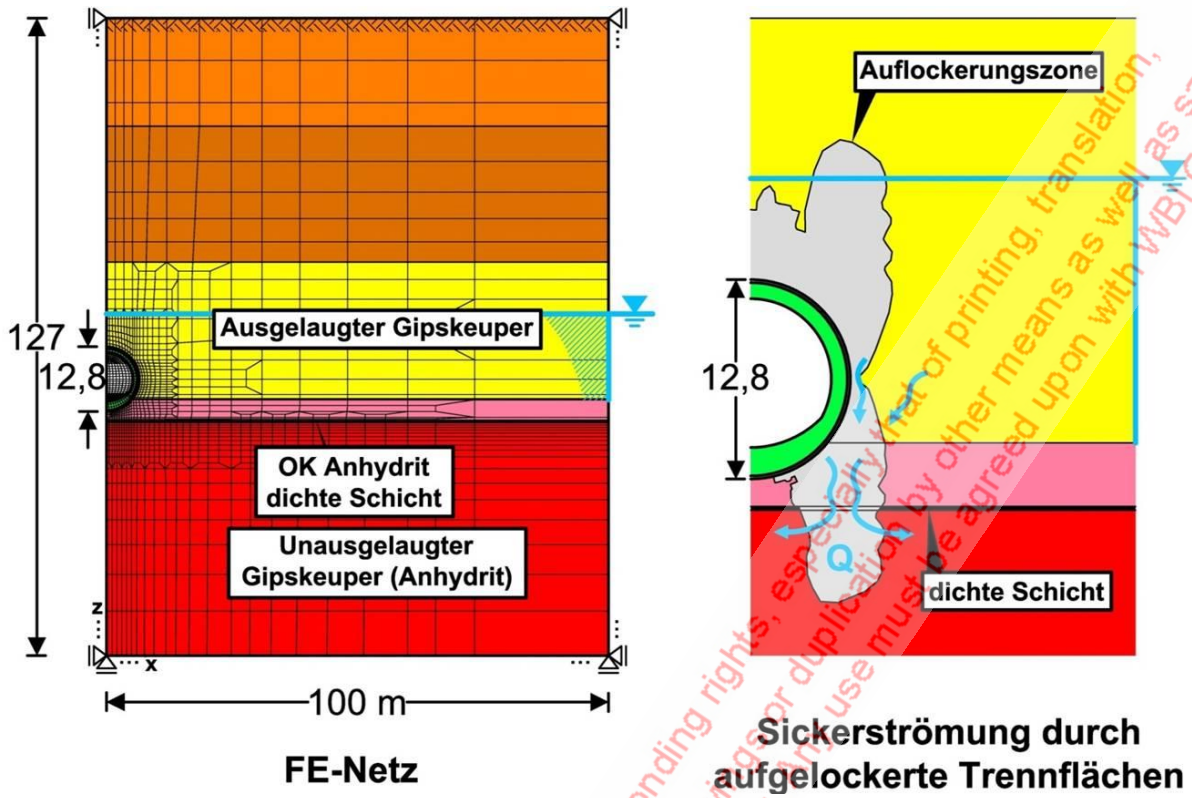


Bild 9: Anhydrit unterhalb der Tunnelsohle

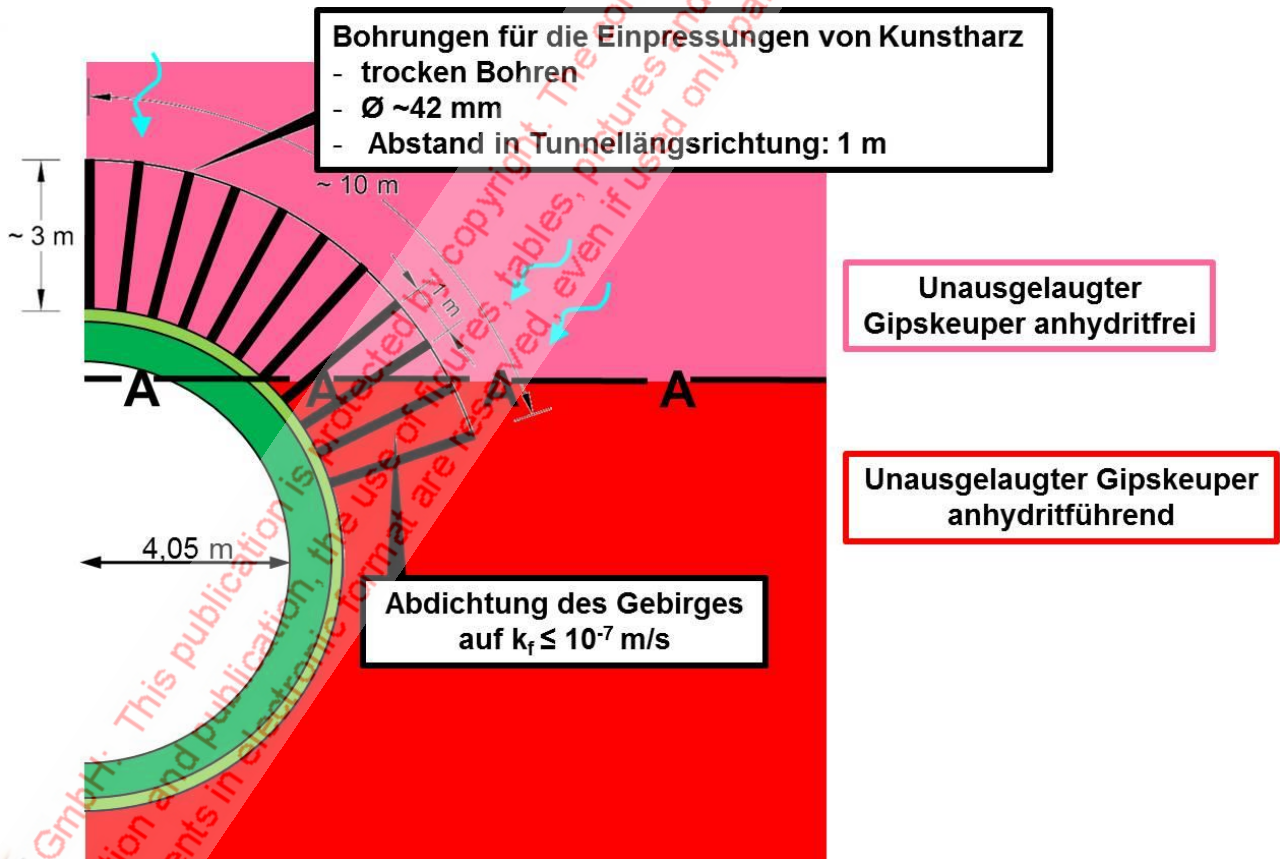


Bild 10: Anhydritspiegel im oberen Bereich des Querschnittes, Widerstandsprinzip und Injektionen

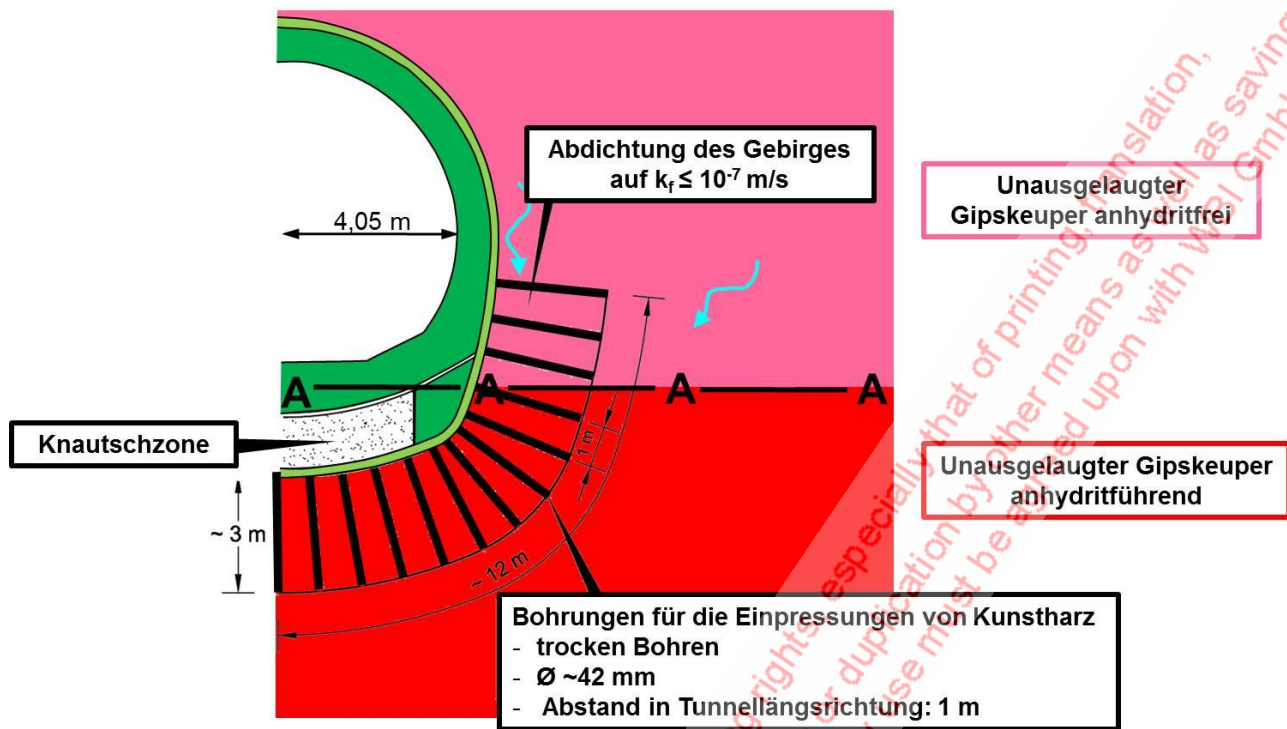


Bild 11: Anhydritspiegel im unteren Bereich des Querschnittes, Widerstandsprinzip und Injektionen

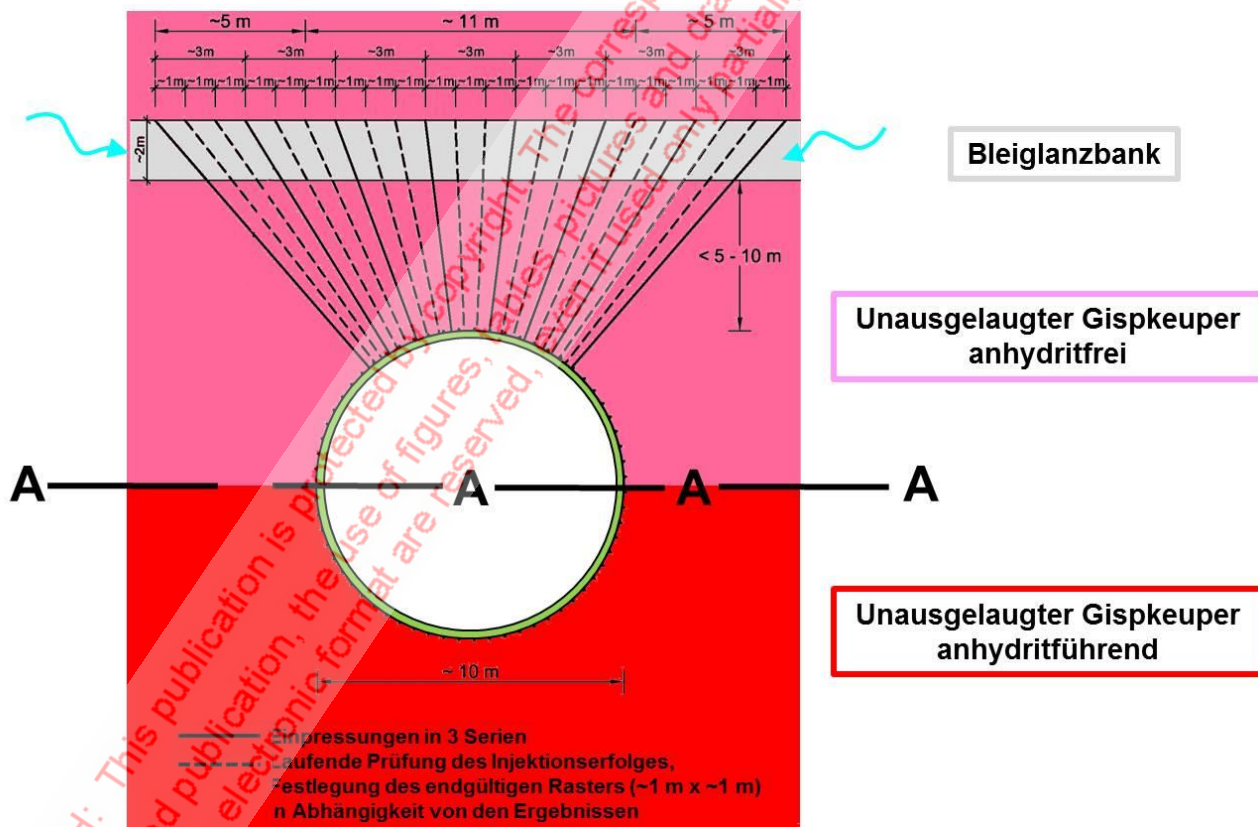


Bild 12: Injektionen im Bereich der Bleiglanzbank, wenn diese oberhalb oder im Bereich des Tunnelquerschnittes liegt

© WBI GmbH: This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplication by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved. Any use must be agreed upon with WBI GmbH.

4. Injektionsmittel

Als Injektionsgut für die Abdichtung des Gebirges ist Kunstharz vorgesehen, weil aufgrund der geringen Ausgangsdurchlässigkeit des Gebirges mit einer Injektion mit Zementsuspension oder Feinstbindemitteln keine nennenswerte Verringerung der Durchlässigkeit zu erreichen ist. Außerdem darf während des Baus der Tunnel im unausgelaugten Gipskeuper kein Wasser im Tunnel verwendet werden, damit während der Bauzeit kein Brauchwasser in den unausgelaugten Gipskeuper gelangt.

Die Injektionsmittel

- müssen ausreichend fließfähig sein, damit sie in das Gebirge eindringen.
- müssen eine ausreichend lange Verarbeitungszeit besitzen.
- dürfen nicht schäumen.
- dürfen beim Verarbeiten und Abbinden nur geringe Wärme entwickeln.
- müssen beim Abbinden volumenkonstant sein.
- müssen unter trockenen Bedingungen abbinden.
- müssen möglichst wasserfrei sein.
- müssen möglichst elastisch bzw. zäh sein, damit sie nicht reißen, wenn nach der Durchführung der Injektionen Verschiebungen im Gebirge auftreten sollten.
- müssen langzeitbeständig für die Lebensdauer des Tunnelbauwerks sein.
- müssen umweltverträglich sein.

Vor Durchführung der Injektionen sollen Injektionsversuche ausgeführt werden. Mit den Ergebnissen sollen u. a. das Injektionsgut, die Bohrlochabstände, die Injektionsdrücke und die Abbruchkriterien festgelegt werden.

Literatur

Penn, S.: Herausforderungen im Tunnelbau Stuttgart 21/ NBS Wendlingen - Ulm. 20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau, mining+geo, Nr. 3/2012, Seiten 644 - 648, 2012.

Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.: Tunnelbau im quellfähigen Gipskeuper. Geotechnik 33(2), Seiten 104 - 108, 2010.

Wittke, M.: Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge. 20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau, mining+geo, Nr. 4/2012, Seiten 644 - 648, 2012.

Wittke, W.: Grundlagen für die Bemessung und Ausführung von Tunneln in quellendem Gebirge und ihre Anwendung beim Bau der Wendeschleife der S-Bahn Stuttgart. Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 6, 1978.

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