

Analyse von Spannungszuständen in Tunnelbauwerken bei hoher Überlagerung am Beispiel Brenner Basistunnel

Analysis of stress conditions at deep seated tunnels – a case study at the Brenner Base Tunnel

Johanna Patzelt¹, Kurosch Thuro²

¹ Johanna Patzelt, M.Sc., Pöyry Infra GmbH, Salzburg, johanna.patzelt@poyry.com

² Prof. Dr. Kurosch Thuro, Technische Universität München, München, thuro@tum.de

Zusammenfassung

Bei Tunnelbauwerken mit hoher Überlagerung kommt es wegen der hohen Primärspannungen zu verschiedenen Problemen wie spannungsbedingten Nachbrüchen oder schlechter Gebirgslösbarkeit, insbesondere, wenn die Trennflächen nicht oder nur untergeordnet mechanisch wirksam sind. Des Weiteren spielt es gerade beim Brenner Basistunnel eine wichtige Rolle, dass die aus der Alpenbildung resultierenden tektonischen Restspannungen eine zusätzliche horizontale Spannungskomponente hinzukommt. Da im Zuge des Projekts bisher keine entsprechenden Spannungsmessungen durchgeführt wurden, musste die horizontale Spannungskomponente aus der vorhandenen Literatur abgeschätzt werden. Die resultierende Hauptnormalspannung weist deshalb üblicherweise eine steile Einfallrichtung auf, die hier mit 70° angenommen wurde. Die vorliegende Modellstudie wurde mit dem Finite Element Code Phase² (roscience) durchgeführt, wobei bei gegebenen z.T. sehr komplexen Lagen der unterschiedlichen Tunnelröhren die Neigung der Hauptnormalspannung und der k-Wert variiert wurden..

Schlüsselworte: Brenner Basistunnel, hohe Überlagerung, roscience

Abstract

Deep seated tunnels like the Brenner Base Tunnel suffer from high in-situ or primary stress conditions. This has significant effects on the deformation pattern and failure mode and therefore the construction of the tunnel. High in-situ stress conditions are a result of the rock cover which reaches approximately 1,700 m at the Brenner Base Tunnel. In a collaboration with the Brenner Base Tunnel Society BBT SE, in-situ stress conditions were modeled in a multitube tunnel system in different rock conditions. A rather ductile rock type, the Innsbruck Quartzphyllite, and a rather brittle rock type, the Tux Central Gneiss, were used to calculate several models with the 2D-finite element code Phase² (Rocscience). Due to residual tectonic stresses caused by the collision of the African and Eurasian plate horizontal stresses are often increased. Therefore, the main stress direction is usually not perpendicular, but can be assumed with an inclination of 70°, what had to be considered in the modeling. The most realistic results could be obtained within the Innsbruck Quartzphyllite section when taking the 70° dip angle into account.. Within the section of the Central Gneiss no deviation from the vertical was assumed due to geological and geophysical reasons. Apart from the rock cover and the direction of the main principle stress, further parameters were needed for modeling: Young's modulus, uniaxial compressive strength, Poisson ratio, friction angle and cohesion of the rock types have been used from site investigation reports. The performed numerical modeling showed that the secondary stresses have the same orientation as the primary stresses, hence the maximum stress appeared in the tunnel walls and minimum stress is concentrated in invert and crown.

Keywords: Brenner Base Tunnel, high rock cover, roscience

1 Einleitung

Im Zuge einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie mit der Brenner Basistunnelgesellschaft BBT SE wurden an ausgewählten Rechenquerschnitten im Homogenbereich des Innsbrucker Quarzphyllits und des Tuxer Zentralgneises Modellierungen der sekundären Spannungszustandes und den zugehörigen Deformationen mit dem 2D Finite Elemente Programm Phase² (roscience) durchgeführt. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Spannungsumlagerung beim schrittweisen Ausbruch der verschiedenen Tunnelröhren gelegt.

2 Lage und Charakteristika der Rechenquerschnitte

Es wurden fünf verschiedene Rechenquerschnitte im Homogenbereich des Innsbrucker Quarzphyllits modelliert, ebenso drei Rechenquerschnitte im Homogenbereich des Tuxer Zentralgneiskerns. Die Rechenquerschnitte im Innsbrucker Quarzphyllit unterscheiden sich aufgrund ihrer verschiedenen Röhrenanordnungen mit Seitenstollen und Verbindungsstollen sowie diversen Aufweitungen im Bereich der Multifunktionsstelle Innsbruck Ahrental.

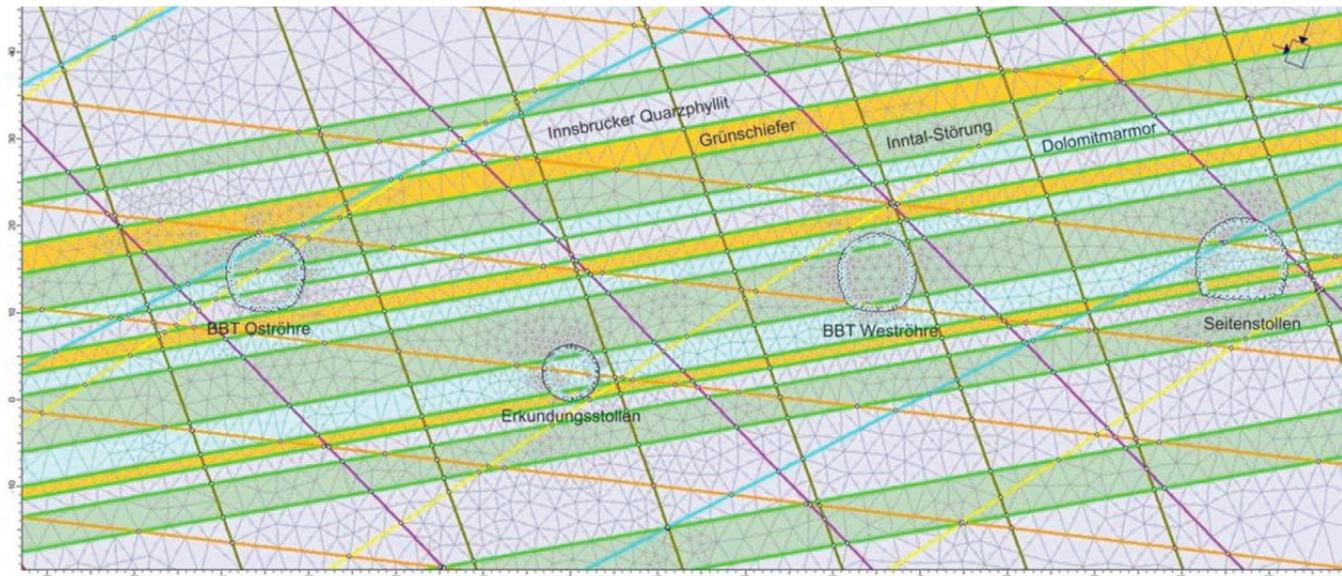


Abb. 1: Darstellung des Rechenquerschnittes B (verortet im Bereich der Multifunktionsstelle Innsbruck Ahrental) mit geologischen Verhältnissen (Innsbrucker Quarzphyllit, Grünschiefer, Inntal-Störung und Dolomitmarmor).

Fig. 1: Cross section B (part of multifunction station Innsbruck-Ahrental). Geological strata: Innsbruck Quartzphyllite, green shist, dolomit marble, Inntal fault.

3 Kennwerte

Im Zuge der Erstellung der Masterarbeit wurden Kennwerte aus der Erkundung des Brenner Basistunnels (BBT / GEOTEAM 2008) wie auch aus dem Vortrieb des Inntaltunnels (THURO 1996: 147) verwendet. In einer weiterführenden Parameterstudie wurden die verwendeten Kennwerte zusätzlich variiert (PATZELT 2010).

In die Modellierungen fanden folgende Gesteinskennwerte Eingang:

- Einaxiale Druckfestigkeit
- Poisson-Zahl
- m_i (Hoek-Brown Bruchkriterium, HOEK et al. 2002)

Für die Charakterisierung des Gebirges wurden verwendet:

- Elastizitätsmodul
- Auflockerungsfaktor D in Abhängigkeit der Vortriebsmethode (Sprengen, TBM)
- Geological Strength Index GSI (HOEK et al. 2002)

4 Modellierung

Die vorgegebenen Rechenquerschnitte wurden digitalisiert und die aus der Prognose übernommenen geologischen Verhältnisse wurden in Form von Lagen mit konstanter Mächtigkeit eingefügt (Abb. 1 und 2). Aufgrund der Geometrie mussten einige Gesteinsmächtigkeiten überhöht dargestellt werden, da es sonst aufgrund des verwendeten Netzes zur Berechnung der Finiten Elemente zu rechnerischen Artefakten gekommen wäre. Für die kompetenten Gesteine wurde das Hoek-Brown-Bruchkriterium verwendet. Für das Störungsmaterial der Inntal-Störung sind Kennwerte für Reibungswinkel und Kohäsion angegeben,

so dass dieses mit dem Mohr-Coulomb-Bruchkriterium charakterisiert werden kann.

Bei tiefliegenden Tunnels spielen Trennflächen bei den Spannungszuständen und der Lösbarkeit eine dominierende Rolle. So sind die Kluftbeschaffenheit und die mechanische Wirksamkeit von Klüften von besonderer Bedeutung. Bei großen Überlagerungen und geschlossenen Trennflächen weisen Trennflächen keine bis eine nur sehr untergeordnete Rolle beim Ausbruch auf, da sie dann meist nicht mehr mechanisch wirksam sind. In den Modellierungen wurden die Trennflächen, von denen ein Einfluss auf den Ausbruch erwartet wird so angeordnet, dass sie die Tunnelachse schneiden, oder die Tunnellaubung tangieren. In den Ergebnissen zeigt sich, dass die tangierenden Trennflächen einen großen Einfluss auf die Spannungumlagerung und Deformationsmuster haben und zu höheren Deformationsbeträgen führen. Trotzdem wurden lediglich Deformationsbeträge im Bereich von maximal 10er cm ermittelt.

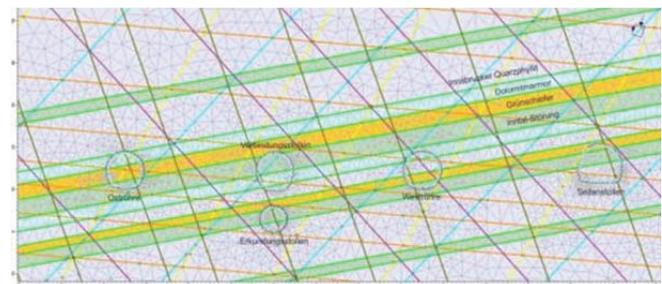


Abb 2: Darstellung des Rechquerschnittes D. Wie auch Querschnitt B verortet im Bereich der Multifunktionsstelle Innsbruck Ahrental.

Fig. 2: Cross section D (as well as cross section B) is part of the multifunction station Innsbruck Ahrental. Strata: Innsbruck Quartzphyllite, green shist, dolomit marble, Inntal fault.

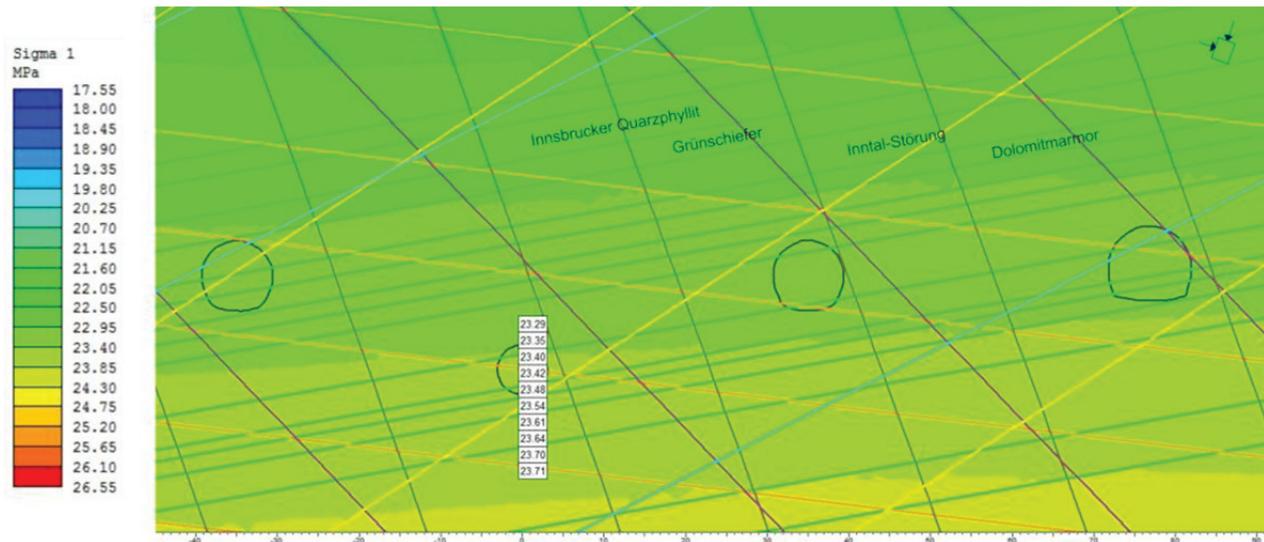


Abb. 3: Darstellung der Primärspannung des Rechenquerschnittes B.

Fig. 3: In-situ stress conditions at cross section B.

Nach dem schrittweisen Ausbruch der Tunnelröhren wurde im jeweils letzten „Stage“ der Modellierung ein Ausbau eingefügt. Allerdings besteht diese Sicherung lediglich aus unbewehrtem Spritzbeton ohne Anker. Dabei wurden Kennwerte verwendet, die einer Stärke von 20 cm, einem E-Modul von 30 GPa, einer Druckfestigkeit von 40 MPa und einer Zugfestigkeit des Spritzbetons von 3 MPa entsprechen. Hier könnten natürlich die Deformationen mit realitätsnahen Kennwerten für die Sicherung deutlich verringert werden. Dies war jedoch nicht das Ziel der vorliegenden Studie.

4.1 Verwendete Gesteins- und Gebirgskennwerte

Zusammenfassend sind die für die Modellierung verwendeten Parameter in nachfolgender Tabelle aufgeführt. Diese basieren alle auf den Unterlagen von BBT/GEOTEAM (2008). Die vollständige Übersicht der Kennwerte ist PATZELT (2010: 73 ff) zu entnehmen.

Tab. 1: Übersicht der verwendeten Kennwerte der Festgesteine.

Tab. 1: Summary of the used rock properties.

Gestein	UCS [MPa]	E-Modul [MPa]	m_i	ν	GSI
Innsbrucker Quarzphyllit	40	5087	12	0,19	50
Dolomitmarmor	30	7662	10	0,20	65
Grünschiefer	55	6187	15	0,15	45

Tab. 2: Verwendete Kennwerte für die Inntal-Störung.

Tab. 2: Summary of the used properties in the Inntal fault zone.

	E-Modul [MPa]	c [MPa]	ϕ [°]	ν
Inntal-Störung	1000	0,5	28	0,19

4.2 Primäre Spannungen

Die primären Spannungen setzen sich aus der Überlagerungsspannung und den tektonisch induzierten Spannungen der alpinen Plattenkollision zusammen. Die tektonisch induzierten Spannungen führen vor allem zu einer Inklination der resultierenden Hauptnormalspannung. Der Inklinationwinkel mit dem die realistischsten Ergebnisse erzielt wurden, liegt bei 70° (siehe 5.3). In Abb. 3 und 4 sind die Primärspannungszustände für die Rechenquerschnitte B und D abgebildet. Aus Hydrofracturing-Versuchen ist bekannt, dass das Verhältnis von Vertikal- zu Horizontalspannung im Bereich des Wipptals zwischen 0,3 und 1,2 variiert. Dies wurde als Variation der Inklination der Hauptnormalspannung berücksichtigt. Die Überlagerungsspannungen der hier gezeigten Modellierungen sind Tabelle 3 zu entnehmen.

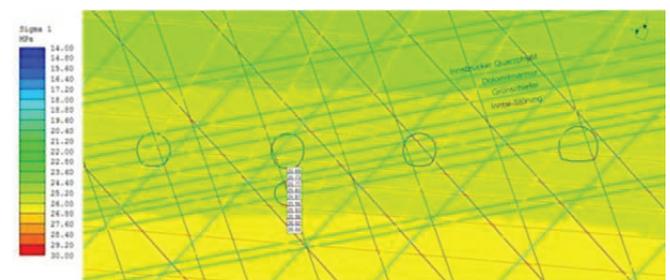


Abb. 4: Darstellung der Primärspannung im Rechenquerschnitt D.

Fig. 4: In-situ stress conditions at cross section D.

Tab. 3: Übersicht der in der Phase²-Modellierung verwendeten Werte der Vertikalspannung.

Tab. 3: Summary of the in-situ stress values used in the Phase² models.

Rechenquerschnitt	Überlagerungshöhe [m]	Primärspannung [MPa]
B (4 Röhren)	870	23,49
D (5 Röhren)	960	25,92



4.3 Spannungsverteilung beim schrittweisen Ausbruch der Tunnelröhren

Weiterführende Modellierungen sollten die Spannungsumlagerungen beim nacheinander folgenden Ausbruch der verschiedenen Tunnelröhren berücksichtigen. Beim konventionellen Vortrieb wurde der Ausbruch in Kalotte, Strosse und Sohle aufgeteilt und in der Modellierung umgesetzt zur Darstellung der Spannungsumlagerungen (Abb. 5).

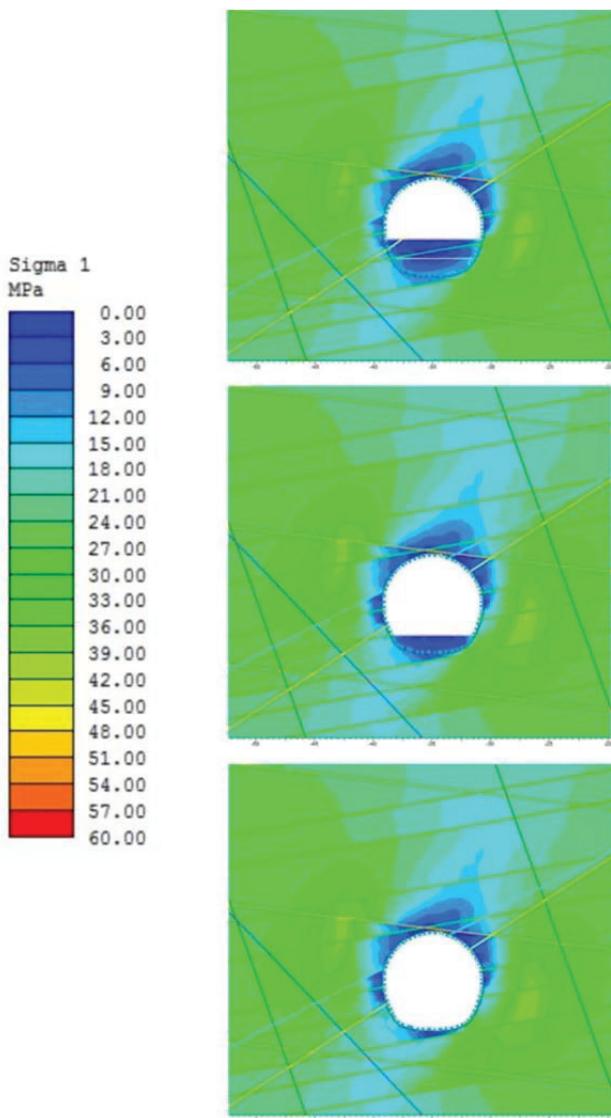


Abb.5: Darstellung der Spannungsumlagerung beim konventionellen Vortrieb mit Ausbruchsabfolge Kalotte - Strosse - Sohle.

Fig. 5: Stress re-distribution due to excavation of crown, side wall and invert applying conventional tunneling.

4.4 Sekundäre Spannungen

In den Modellierungen ist zu erkennen, dass die sekundären Spannungen in etwa die gleiche Orientierung aufweisen wie die Primärspannungen (vgl. Abb. 5, 6, 7). Die maximalen sekundären Spannungen treten durch den Inklinationswinkel etwas verschoben im Bereich des östlichen Kämpfers auf sowie am Übergang der westlichen Ulme zur Sohle auf. Die geringen Sekundärspannungen breiten sich vor allem entlang der Lagen mit geringer Festigkeit am weitesten aus.

Während sich die minimalen Hauptnormalspannungen (σ_1) (Abb. 5) bevorzugt in der als Lagen eingefügten Inntal-Störung ausbreiten, treten die minimalen Spannungen (σ_3) vor allem in den Lagen des Dolomitmarmors auf, der die geringste Gesteinsdruckfestigkeit der Gesteine besitzt. Diese wurden mit dem „Generalized Hoek-Brown“ Bruchkriterium modelliert,

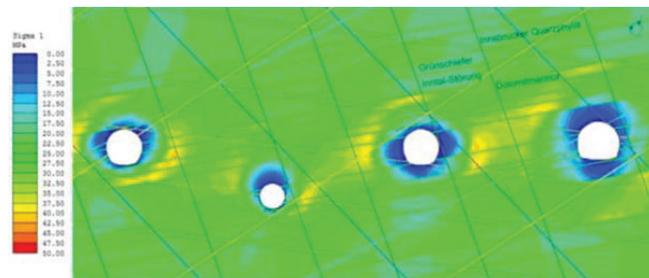


Abb.6: Darstellung der σ_1 -Spannungen. Geringe Spannungen sind blau dargestellt und umfassen den Bereich von 0-5 MPa. Die maximalen Spannungen sind gelb bis rot dargestellt und umfassen den Spannungsbereich von 40-50 MPa.

Fig. 6: Illustration of σ_1 stresses. Minimum stresses are plotted in blue, maximum stresses are shown in yellow to red..

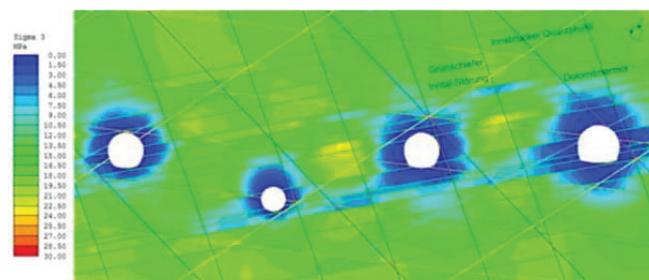


Abb.7: Darstellung der σ_3 -Spannungen. Die Ausbreitung der σ_3 -Spannungen überspannt bis zu einem Tunneldurchmesser zu beiden Seiten der Ulmen.

Fig. 7: Illustration of σ_3 stresses. They expand up to one tunnel diameter to both sides of the tunnel walls.

Die größten σ_3 -Spannungen (Abb. 6) sind dementsprechend 90° dazu angeordnet. Die maximalen Spannungen sind weniger deutlich ausgeprägt, dafür überstreichen die Spannungen den Bereich zwischen 0 und 4,5 MPa.

4.5 Deformationen (Konvergenzen)

Die ermittelten totalen Deformations- bzw. Konvergenzbeiträge – ohne Sicherungsmittel – streuen im Bereich von 10 cm bis im Extremfall zu maximal 2 m.- Dieser Extremwert wurde bei einer vollflächigen Öffnung eines großen Querschnitts ermittelt, bei einer Überlagerung von 890 m und ohne Querschnittsunterteilung in Kalotten-, Strossen- und Sohlausbruch. Die Deformationen sind außerdem abhängig von der Gesteinsdruckfestigkeit und der Überlagerungshöhe. Die Deformationen im Homogenbereich des Tuxer Zentralgneises nehmen dabei mit steigender Überlagerung nicht so stark zu wie im Innsbrucker Quarzphyllit, der beispielsweise eine deutlich geringere Gesteinsdruckfestigkeit aufweist.

Die größten Deformationsbeträge treten im Homogenbereich des Innsbrucker Quarzphyllits auf. Bei Überlagerung von 870 m ist deutlich zu erkennen, dass das ausgerundete Profil des Erkundungsstollens die günstigste Ausbruchsvariante darstellt. Bei den vorgegebenen Tunnelgeometrien der Haupttunneln ist vor allem am Übergang von Ulme zu Sohle zu erkennen, dass erhöhte Deformationen auftreten können (Abb. 7).

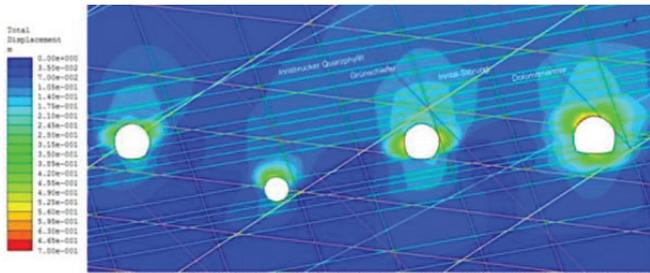


Abb. 8: Darstellung des Deformationsmusters. Die maximalen Deformationen im Bereich der Firste und Ulme belaufen sich auf 7-10 cm.

Fig. 8: Illustration of the deformation pattern. Maximum deformations add up to 7-10 cm at crown and tunnel walls.

5 Parameterstudien

Im Zuge des Projekts wurden Parameterstudien durchgeführt, um insbesondere den Einfluss von variablen Eingangsgrößen und Unsicherheiten sichtbar zu machen. Hierbei zeigte sich, dass gerade Homogenbereiche mit geringen Druckfestigkeiten bereits stark auf geringe Veränderungen von Kennwerten reagieren und zu starken Verformungen bzw. Spannungsumlagerungen führen.

5.1 Geological Strength Index

Die Änderung des GSI zeigt deutliche Auswirkungen auf den Gebirgs-Elastizitätsmodul. Dies wiederum hat deutliche Auswirkungen auf die Spannungsumlagerung und die Verformungen. Verwendet man die maximalen GSI Werte (BBT/GEOTEAM 2008), treten Spannungsspitzen nur in kleinen Bereichen auf (Abb. 9 oben). Reduziert man den GSI um 10 Punkte, ergeben sich ausgeprägte Spannungsspitzen zwischen den benachbarten Röhren (Abb. 9 unten). Auch reichen die Spannungskonzentrationen deutlich weiter in das Gebirge hinein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Spannungsmuster stark von der Lage und Ausprägung des Trennflächensystems getriggert wird. Bei den geringen GSI-Werten ist der Bereich mit Spannungen zwischen 0 MPa und 7,5 MPa bereits auf eine Mächtigkeit von rund 3 m rund um den Tunnelaußenring angewachsen.

5.2 Auflockerungsfaktor D

Auch der Auflockerungsfaktor D spielt eine entscheidende Rolle bei der Ermittlung des E-Moduls des Gebirges. Dieser Parameter wurde im Zuge der Parameterstudie zwischen den von Phase² angegebenen Maximal- und Minimalwert $D = 0$ (keine Auflockerung) bis $D = 0,5$ (starke Auflockerung) variiert. In der Ausbreitung der sekundären Spannungen und Deformationen sind dabei deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Auswahl des Wertes wurde mithilfe des Manuals von Phase² vorgenommen und iterativ mit den eigenen Modellierungsergebnissen abgeglichen. Für den

Innsbrucker Quarzphyllit, in dem nach BBT (2010) im Vortrieb nach konventionell vorgetrieben werden soll, wurde ein $D = 0,2$ gewählt (Auflockerungen durch Sprengerschütterungen trotz schonenden Sprengens). $D = 0$ wurde für die Modellierung im Homogenbereich des Tuxer Zentralgneises verwendet, da hier von einem reinen maschinellen Vortrieb ausgegangen wurde und dementsprechend von einer besonders „schonenden“ Vortriebsmethode.

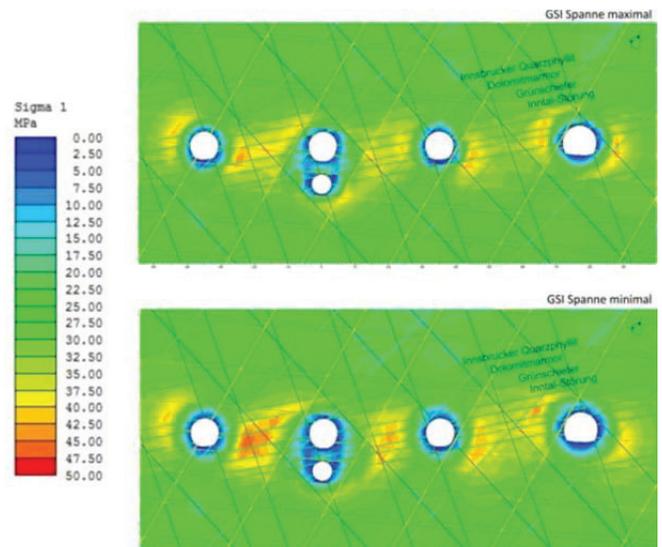


Abb. 9: Einfluss des GSI auf die Spannungsverteilung: Reduktion des GSI um 10 Punkte von oben nach unten. Dadurch ergeben sich deutlich ausgeprägtere Spannungsspitzen zwischen den benachbarten Tunnelröhren.

Fig. 9: Effect of the GSI on stress distribution: Reduction of the GSI value (upper figure) for 10 points (lower figure). Lower GSI results in stress peaks between the tunnel tubes.

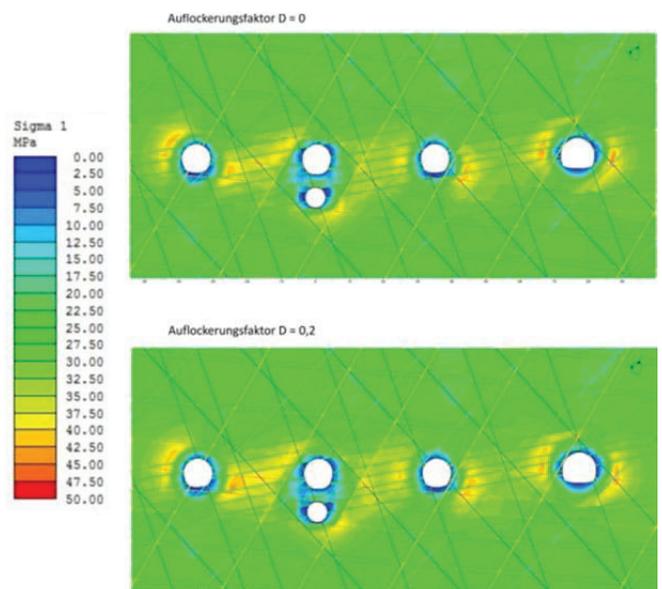


Abb. 10: Einfluss des Auflockerungsfaktors D (oben niedrig, unten hoch) auf die Spannungsverteilung. Mit zunehmender Auflockerung steigen die Maximalspannungen und reichen tiefer ins Gebirge.

Fig. 10: Illustration of the effect of disturbance factor D (upper figure low, lower figure high) on stress distribution. With increasing disturbance maximum stress increases and penetrate further into rock mass.



5.3 Einfluss der Orientierung der Hauptnormalspannung

Bei den vorliegenden tektonischen Verhältnissen, verursacht durch die Kollision der eurasischen und afrikanischen Platte bei der Alpenbildung, muss in einigen Bereichen des Brenner-Basistunnels mit erhöhten Horizontalspannungen gerechnet werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die größte Hauptnormalspannung in vielen Bereichen nicht mehr vertikal orientiert ist, wie die etwa die Überlagerungsspannung. Im Zuge einer weiteren Parameterstudie wurde daher der Einfallswinkel bzw. die Inklination der resultierenden Hauptnormalspannung variiert.

Für den Bereich des Brenner-Basistunnels liegen leider noch keine neuen Spannungsmessungen vor. Die World Stress Map weist praktisch keine Daten in diesem Bereich aus. Es konnten also nur realistische Einschätzungen der Projektpartner verwendet werden, die einerseits auf Erfahrungen der Projektpartner beruhen, andererseits auf der einschlägigen Literatur (BÖGEL & SCHMID 1976, TOLLMANN 1977, OBERHAUSER 1980, PFIFFNER 2010). Im Homogenbereich des Innsbrucker Quarzphyllits wurde der Einfallswinkel stufenweise variiert, wobei ein Einfallswinkel von 70° realistische Ergebnisse ergab (vgl. PATZELT 2010: 45 ff). Für den Homogenbereich des Tuxer Zentralgneiskerns wurden „normale“ Verhältnisse angenommen, da durch die zentrale Lage und die domartige Struktur, wie sie z.B. in BBT/GEOTEAM (2008) dargestellt ist, davon ausgegangen wird, dass die vertikale Spannungskomponente durch die Überlagerung deutlich größer als die horizontale ist..

6 Schlussbemerkung

In vorliegender Studie wurde der Einfluss der Primärspannung auf die Spannungsverteilung bei hohen Überlagerungen im Brenner-Basistunnel untersucht, insbesondere unter Berücksichtigung von

- komplexen geometrischen Verhältnissen (insb. den Lagen der Tunnelröhren in einer Multifunktionsstelle),
- vorgegebenen Gesteins- und Gebirgskennwerten aus den Berichten der Voruntersuchungen,
- der Orientierung und Ausbildung des Trennflächengefüges und von Störungszonen,
- des Auflockerungsfaktors (Sprengen/TVM-Vortrieb),
- und der Orientierung der Hauptnormalspannung.

Die Parameter wurden dabei so variiert, dass Unsicherheiten bei der Bestimmung oder einer natürlichen Streuungen abgebildet werden konnten.

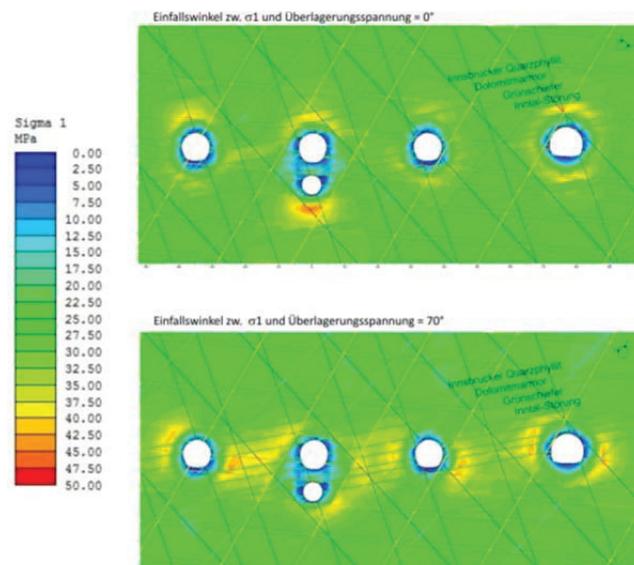


Abb.11: Einfluss der Orientierung der Hauptnormalspannung auf die Spannungsverteilung vor dem Hintergrund des Trennflächengefüges.

Fig. 11: Influence of the orientation of the principle stress on the stress distribution including discontinuity pattern.

Literatur

- BBT (2010): Zusammenfassung der Berechnungsquerschnitte Layout2 (1) und (2) (1). – 2 Pläne (unveröff.).
- BBT/GEOTEAM (2008): Ausbau Eisenbahnachse München – Verona. Brenner Basistunnel. UVE. Technische Projektaufbereitung. Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie. Haupttunnel. Gebirgsarten, Gebirgsverhaltenstypen, Störzone – Haupttunnel. – 137 S., Technischer Bericht und Längenschnitt G1.2i-01. – 1 Plan, 1: 25 000.
- BÖGEL, H. & SCHMIDT, K.(1976): Kleine Geologie der Ostalpen. – 231 S., Thun (Ott-Verlag).
- HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., CORKUM, B. (2002): Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. – Proc. NARMS-TAC Conference, 1: 267 - 273, Toronto.
- OBERHAUSER, R. [Hrsg.] (1980): Der geologische Aufbau Österreichs. – 700 S., Wien (Springer).
- PATZELT, J. (2010): Modellierung des sekundären Spannungszustandes tiefliegender Tunnelbauwerke am Beispiel des Brenner-Basistunnels. – Unveröff. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, 84 S., München.
- PFIFFNER, O.A. (2010): Geologie der Alpen. – 360 S., 2. Aufl., Bern (Haupt).
- ROCSCIENCE (2010): Phase² Version 7. Manual (digital).
- THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. – 149 S., Münchner Geol. Hefte, B1, München (Technische Universität München).
- TOLLMANN, A. (1977): Geologie von Österreich. Bd.1. Die Zentralalpen. – 766 S., Wien (Deuticke).