

Validation of longitudinal displacement profiles by measurement at the Brenner Base Tunnel

Validierung der Radialverschiebungen im Längsprofil durch Messungen beim Brenner Basistunnel

Longitudinal displacement profiles describe the displacement history during tunnel excavation, including that occurring ahead of the tunnel face. These deformations have an influence on the structural design of tunnel support. Theoretical approaches are used to estimate these deformations. However, as the approaches are based on assumptions, they should be applied with caution, particularly in case of deep tunnels. Therefore, experimentally determined longitudinal displacement profiles provide a valuable data basis for validation of the approaches. This study compares 40 m long horizontal chain inclinometer measurements in two lithologies in the exploration tunnel of the Brenner Base Tunnel with theoretically calculated profiles. The chain inclinometers were installed above the tunnel before the start of tunnelling. A measured radial displacement profile was created for each round, the statistical mean value curve was calculated and finally compared with the theoretical approaches. The measurement results show good qualitative agreement ahead of the tunnel face.

1 Problem

In conventional tunnelling, convergence measurement points are installed behind the face after excavation and initial support. These survey pins thus record all displacements experienced by the system of rock mass and support from this time. This displacement is recorded using theoretical calculation approaches and is displayed as a radial displacement profile in the longitudinal direction. Knowledge of this displacement is important for the structural design of the tunnel lining. The larger the share of displacements that have already declined, the less is the required support resistance. The initial displacement also has an influence on the selection of a machine type (open TBM or shield machine) since the danger scenario of jamming the shield results from the shield length. At the Brenner Base Tunnel, most of the tunnels are being driven by machines.

2 Measurement of the displacement profile in the longitudinal direction

Initial displacements can be measured with inclinometers installed in advance of tunnelling. Several application examples are known, although mostly for shallow tunnels in soft ground [1] [2] [3] [4]. In the Ahrental and Wolf areas of the Brenner Base Tunnel (Figure 1), the

Das Längsprofil der Radialverschiebungen beschreibt die gesamte Verschiebungshistorie während eines Tunnelvortriebs, einschließlich jener vor der Ortsbrust. Diese Verformungen haben großen Einfluss auf die Gestaltung des Tunnelausbaus. Zur Abschätzung werden in der Regel Berechnungsansätze verwendet. Da diese Ansätze jedoch auf Annahmen beruhen, müssen sie, insbesondere bei tiefen Tunneln, mit Vorsicht angewandt werden. Experimentell ermittelte Radialverschiebungsprofile in Längsrichtung liefern eine wertvolle Datengrundlage für eine Validierung der theoretischen Ansätze. Dieser Beitrag vergleicht die in zwei Lithologien im Erkundungstunnel des Brenner Basistunnels experimentell mit 40 m langen horizontalen Ketteninclinometern ermittelten Radialverschiebungsprofile mit theoretisch berechneten Profilen. Die Inclinometer wurden vor Beginn des Vortriebs oberhalb der Tunnelnische installiert. Für jeden Abschlag konnte ein Radialverschiebungsprofil erstellt werden, aus diesen Kurven eine statistische Mittelwertkurve gebildet werden und die Mittelwertkurve mit theoretischen Ansätzen verglichen werden. Die Messergebnisse zeigen eine qualitativ gute Übereinstimmung im Bereich vor der Ortsbrust.

1 Problemstellung

Im konventionellen Vortrieb erfolgt der Einbau der Konvergenzmesspunkte nach Ausbruch und Erstsicherung hinter der Ortsbrust. Diese Messbolzen erfassen damit sämtliche Verformungen, die das System Gebirge und Ausbau ab diesem Zeitpunkt erfährt. Die Erfassung dieser Vorverformung erfolgt über theoretische Berechnungsansätze und wird als Radialverschiebungsprofil in Längsrichtung dargestellt. Für die Bemessung des Tunnelausbaus ist die Kenntnis dieser Vorverformung wichtig. Je größer der Anteil an bereits abgeklungenen Verformungen, desto geringer ist der erforderliche Ausbauwiderstand. Die Vorverformung hat zudem einen Einfluss auf die Wahl des Maschinentyps (offene TBM, oder Schildmaschine), da das Gefahrenszenario des Einklemmens des Schilds aus der Schildlänge resultiert. Am Brenner Basistunnel werden ein Großteil der Tunnel und Stollen in maschineller Bauweise aufgeföhren.

2 Messtechnische Erfassung des Verschiebungsprofils in Längsrichtung

Die Erfassung der Vorverformungen ist mit Horizontalinclinometern, die dem Vortrieb vorausgehend eingebaut werden, möglich. Einige Anwendungsbeispiele, aber meist

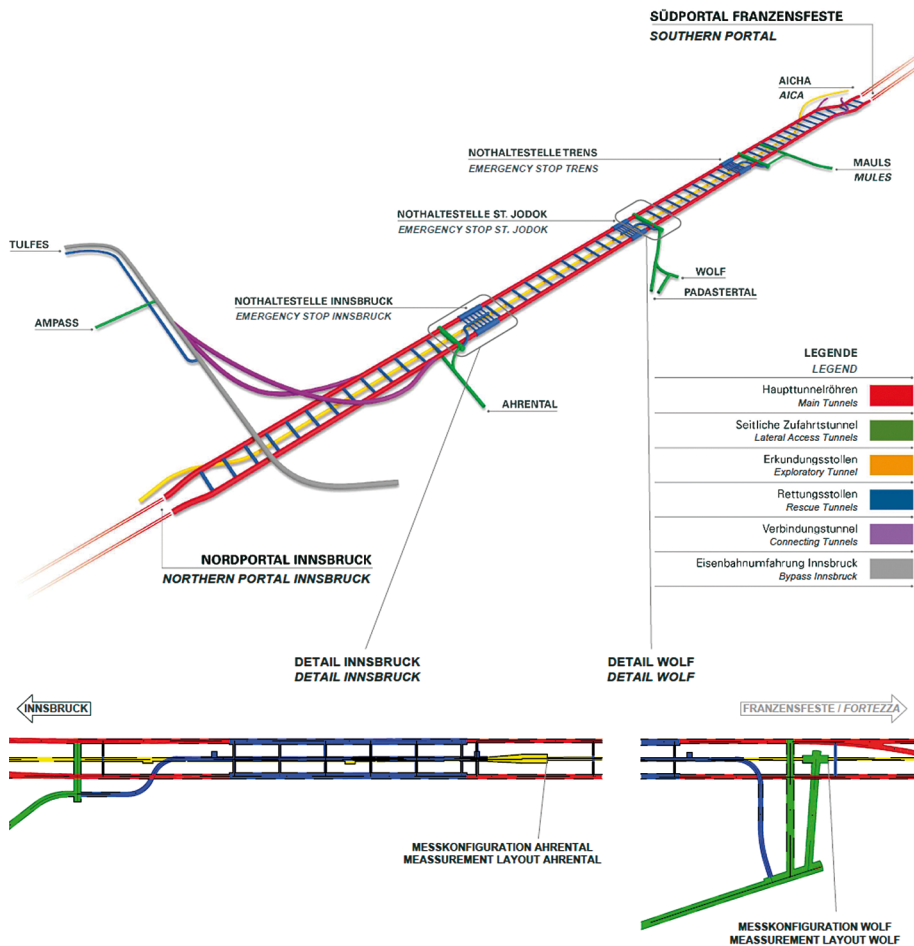


Fig. 1. Location of the measuring section at the site plan of the Brenner Base Tunnel
 Bild 1. Lage der Messquerschnitte im Lageplan des Brenner Basistunnels

advantageous situation arose that these instruments could be installed in face walls at the transition from larger to smaller excavation profiles. The chain inclinometers could be installed horizontal and parallel to the future tunnel crown without seriously interrupting tunneling work. In the Ahrental area, the exploration tunnel drive to the south was selected for the measurement section (Figure 2), and in the Wolf area the excavation of the transition cavern between the exploration tunnel and the Wolf Süd access tunnel (Figure 3). In order to provide redundancy, two parallel horizontal chain inclinometers were installed at a spacing of 1.5 m at each location (Details in Table 1).

für seichte Tunnel im Lockergestein, sind bekannt [1] [2] [3] [4]. In den Bereichen Ahrental und Wolf des Brenner Basistunnels (Bild 1) ergaben sich die vorteilhaften Situationen, dass der Einbau dieser Messelemente im Bereich von Stirnwänden, beim Übergang von größeren zu kleineren Ausbruchprofilen, erfolgen konnte. Die Inclinometerketten konnten horizontal und parallel zur zukünftigen Tunnelnische hergestellt werden, ohne den Vortrieb maßgeblich zu verzögern. Im Bereich Ahrental wurde für die Messstrecke der Erkundungsstollenvortrieb in Richtung Süden gewählt (Bild 2) und im Bereich Wolf der Vortrieb der Übergabekaverne zwischen Erkundungsstollen und Zugangstunnel Wolf Süd (Bild 3). Zur Schaffung einer

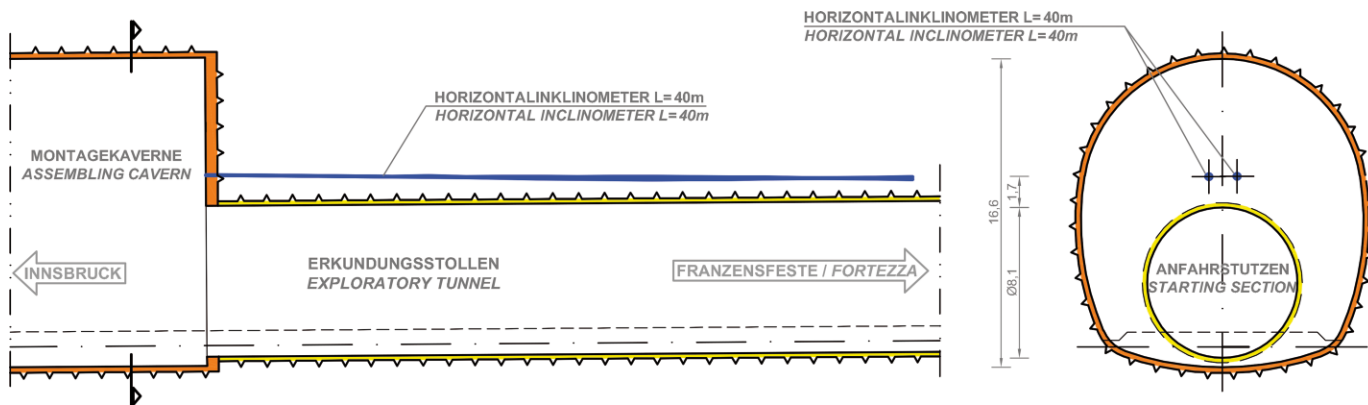


Fig. 2. Measurement layout Ahrental
 Bild 2. Messkonfiguration Ahrental

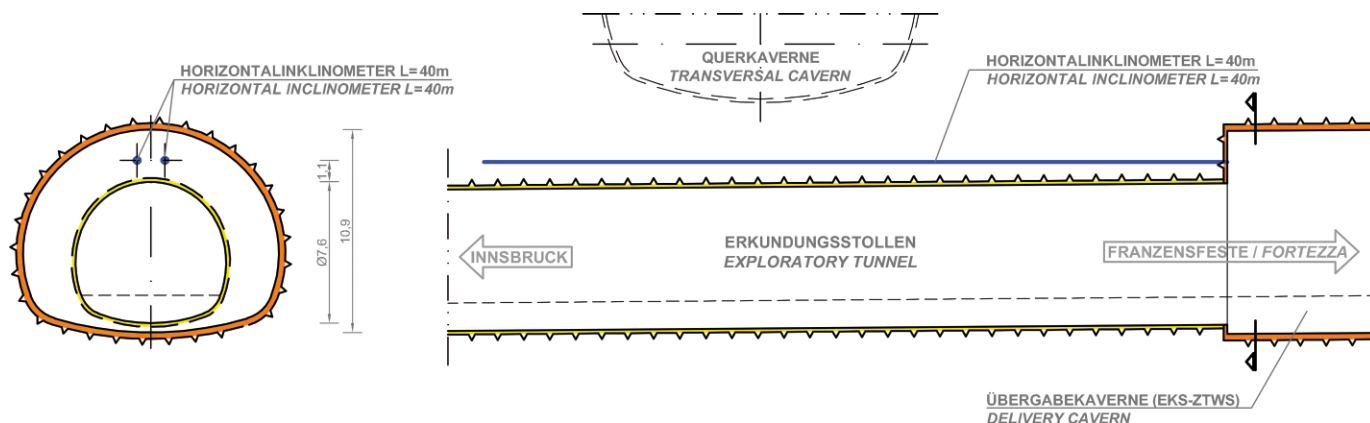


Fig. 3. Measurement layout Wolf
Bild 3. Messkonfiguration Wolf

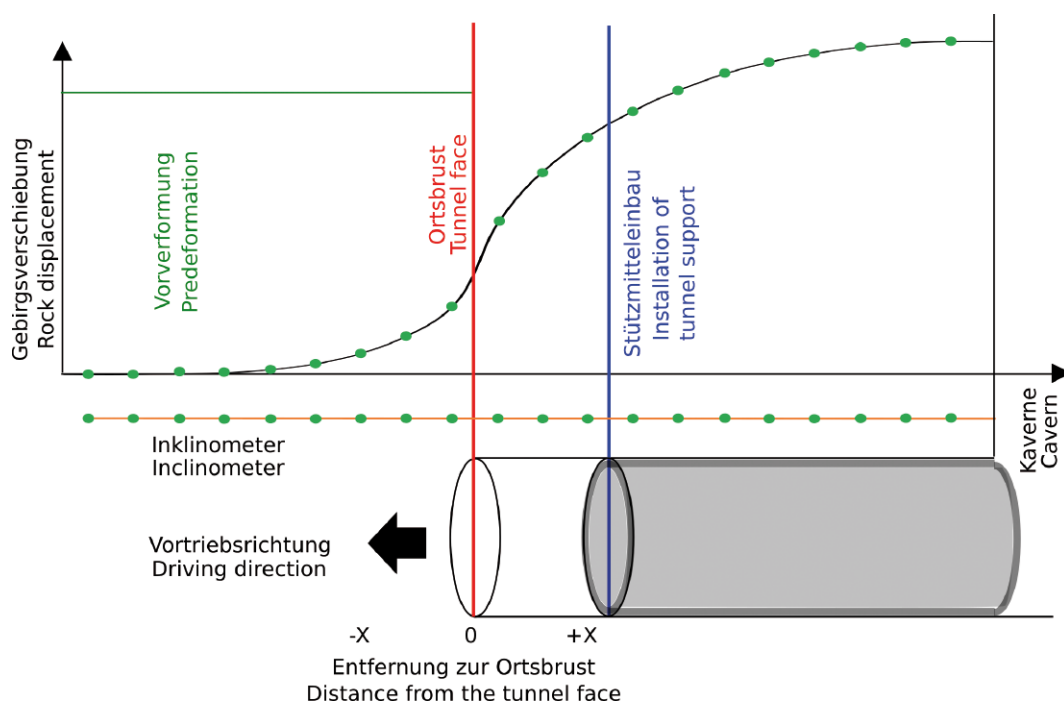


Fig. 4. Results at a specific moment, schematic sketch, after [6]
Bild 4. Ergebnisse eines Messzeitpunktes, schematische Darstellung, nach [6]

3 Evaluation of the measurements

From the measured data, a radial displacement profile was determined for each round, as shown in Figure 4. Each measurement section was then evaluated relative to the distance from the face (shown as a red line in Figures 4 to 8). In the later records of the radial displacement profile in Ahrental, heavy and implausible fluctuations of the cavity were measured (Figure 5). According to [5], the inclinometers had been damaged during the advance so only the measurements shortly behind the face delivered plausible results. For the measurement section in Wolf, the starting point of the inclinometer was also geodetically monitored, which enabled the precision of the measurement configuration to be determined (Table 2) [6]. An increase of the measurement error of the right-hand inclinometer from chainage 14 led to this data being excluded.

The mean curves of the evaluated radial displacement profiles for both investigation areas with their devia-

Redundanz wurden jeweils zwei parallel verlaufende horizontale Ketteninclinometer im Abstand von 1,5 m zueinander eingebaut (Details in Tabelle 1).

3 Auswertung der Messungen

Aus den Messdaten wurde für jeden Abschlag ein radiales Verschiebungsprofil entsprechend Bild 4 ermittelt. Für jede Messstrecke erfolgte nachfolgend die Auswertung relativ zum Abstand zur Ortsbrust (dargestellt als rote Linie in den Bildern 4 bis 8). Bei den zeitlich späteren Aufzeichnungen der Radialverschiebungsprofile in Ahrental wurden starke, unplausible Schwankungen im Bereich des Hohlraums gemessen (Bild 5). Laut [5] wurden die Inclinometer während des Vortriebs beschädigt und daher liefern die Messungen nur bis kurz hinter der Ortsbrust plausible Ergebnisse. Bei der Messstrecke in Wolf wurde zusätzlich der Ansatzpunkt des Inclinometers in der Kaverne geodätisch überwacht. Daraus lässt sich die Genauigkeit der

Table 1. Details of the measurement
Tabelle 1. Daten der Messkonfigurationen

	Ahrental	Wolf
Length of the measurement section: <i>Länge der Messstrecke:</i>	40 m	40 m
Cross-section of the cavern, tunnel <i>Querschnitt Kaverne – Tunnelstrecke</i>	230 – 60 m ²	210 – 60 m ²
Excavation sequence <i>Vortriebsabfolge</i>	top heading bench + invert <i>Kalotte-Strosse + Sohle</i>	top heading bench + invert <i>Kalotte-Strosse + Sohle</i>
Rock bolts <i>Anker</i>	SN 250 kN, 12 No. 4 m long <i>SN 250 kN, 12 Stk. à 4 m</i>	SN 250 kN, 6 No. 6 m long + 4 No. 4 m long <i>SN 250 kN, 6 Stk. à 6 m + 4 Stk. à 4 m</i>
Support <i>Ausbau</i>	22 cm shotcrete <i>22 cm Spritzbeton</i>	20 cm shotcrete with 2 deformation slots <i>20 cm Spritzbeton mit 2 Verformungsschlitzten</i>
Drilling process <i>Bohrverfahren</i>	horizontal directional drilling Ø250 <i>Gerichtete Horizontalbohrung DN250</i>	cased core drilling Ø124 <i>Verrohrte Kernbohrung DN124</i>
Sundry <i>Sonstiges</i>	the casing was withdrawn after the installation of the inclinometer pipes <i>Verrohrung wurde nach Einbau der Inclinometerrohre wieder gezogen</i>	the casing remains as protection for the inclinometer <i>Verrohrung verbleibt als Schutz der Inclinometer</i>
Measuring instruments used <i>Verwendete Messelemente</i>	2 horizontal chain inclinometers, element length 2 m Geodetic convergence monitoring <i>2 Horizontalinklinometerketten, Gliedlänge 2 m</i> <i>Geodätisches Konvergenzmonitoring</i>	2 horizontal chain inclinometers, element length 2 m Geodetic convergence monitoring <i>2 Horizontalinklinometerketten, Gliedlänge 2 m</i> <i>Geodätisches Konvergenzmonitoring</i>
Tectonic unit <i>Tektonische Einheit</i>	Lower east Alpine, Innsbruck quartz phyllite zone, top series <i>Unterosstalpin, Innsbrucker Quarzphyllitzone, hangende Serie</i>	Lower Bündner shist of the Glocknerdecke, Tauern window <i>Untere Bündnerschiefer der Glocknerdecke, Tauernfenster</i>
Lithology <i>Lithologie</i>	quartz phyllite intercalated with quartzite shists <i>Quarzphyllite in Wechsellagerung mit Quarzitschiefern</i>	graphitic calcareous phyllite, calcareous shists with black phyllite <i>Graphitische Kalkphyllite, Kalkschiefer und Schwarzphyllite</i>
Orientation of the cleavage <i>Orientierung Schieferung</i>	flat (mean 15°) to NNE nearly transverse, flat against the advance direction <i>flach (im Mittel 15°) nach NNE</i> <i>nahezu querschlällig, flach gegen die Vortriebsrichtung</i>	medium steep, cleavage dipping inclined into the advance direction <i>Mittelsteil, schräg in die Vortriebsrichtung einfallende Schieferung</i>
Orientation of faults and joints <i>Orientierung Trennflächen</i>	Interface systems dipping both to east and west, also dipping against the advance direction, no predominant orientation <i>Trennflächensysteme sowohl ost- als auch westfallend, in als auch gegen die Vortriebsrichtung einfallend, keine Vorzugsorientierung</i>	Fissures and faults predominantly dipping medium steeply to steeply to the east and striking (sub)parallel to glancing to the tunnel axis (predominant orientation) <i>Klüfte und Störungen überwiegend mittelsteil bis steil nach Osten einfallend und streichen (sub) parallel bis schleifend zur Tunnelachse (Vorzugsorientierung)</i>
Overburden <i>Überlagerung</i>	950 m	500 m
Rock mass behaviour (derived from the observed system behaviour) <i>Gebirgsverhalten (abgeleitet aus dem beobachteten Systemverhalten)</i>	Interface-dominated rock mass behaviour characterised by jointed bodies falling or sliding out <i>Trennflächendominiertes Gebirgsverhalten, geprägt durch das Herausfallen bzw.-gleiten von Klufkkörpern</i>	Interface-dominated rock mass behaviour, only insignificant small volume ruptures in the form of surface spalling <i>Trennflächendominiertes Gebirgsverhalten, nur kleinvolumige, unbedeutende Nachfälle in Form von oberflächlichen Ablösungen</i>

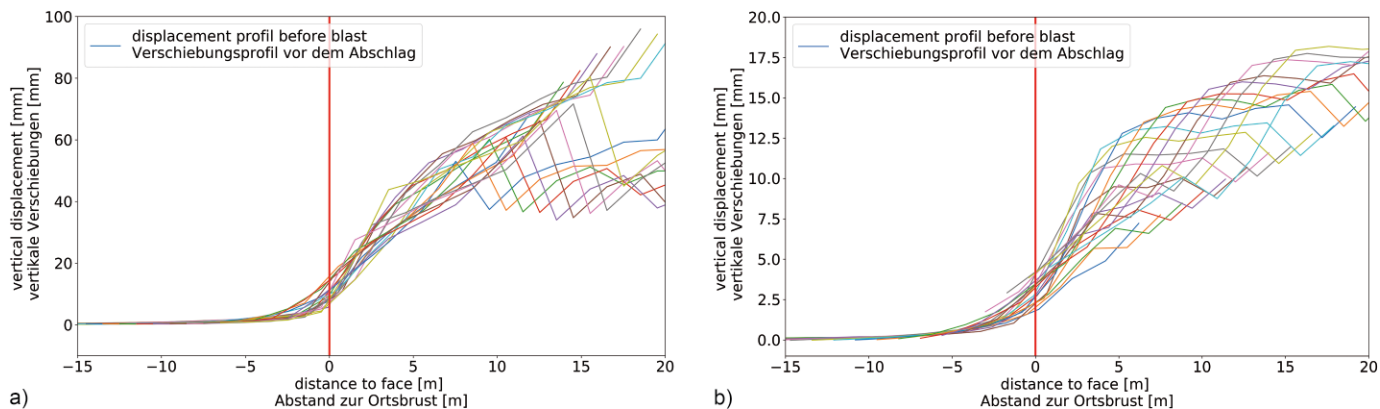


Fig. 5. Results of all measured time steps, displayed relative to the tunnel face: a) Ahrental; b) Wolf
 Bild 5. Ergebnisse aller gemessenen Zeitpunkte, dargestellt relativ zur Ortsbrust: a) Ahrental; b) Wolf

Table 2. Evaluation of the inclinometers and error
 Tabelle 2. Auswertung der Inklinometer und Messfehler

	Ahrental	Wolf
Measurement section influenced by advance stress relief of the cavern excavation <i>Messstrecke beeinflusst durch Vorentspannung des Kavernenausbruchs</i>	ca. 12 m	ca. 10 m 3.2 m of the measurement section was excavated before the installation of the inclinometers ca. 10 m 3,2 m der Messstrecke wurde vor dem Einbau des Inklinometers ausgebrochen
Evaluated rounds chainage <i>Ausgewertete Abschlage TM</i>	11,9 – 30,5	9.7 – 30.5 (only left inclinometer) right inclinometer faulty 9,7 – 30,5 (nur linker Inklinometer) rechter Inklinometer fehlerhaft
Measurement error <i>Messfehler</i>	could not be determined by geodetic monitoring of the inclinometer setting point <i>nicht ermittelbar ohne geodtische berwachung des Inklinometeransatzpunkts</i>	from 9.7 – 20.1 ca. ±1 mm from 20.1 – 30.5 ca. ±2 mm von 9,7 – 20,1 ca. ±1 mm von 20,1 – 30,5 ca. ±2 mm

tions (confidence limits) are shown in Figure 6. Comparison with the geodetic surveying of the cavity (Figure 7) for the inclinometers in Wolf show agreement, which however was not to be expected due to the different measurement positions. FE calculations in [7] show that only half of the displacement is to be expected in the area of the distance of the inclinometers to the tunnel crown (about

Messkonfiguration bestimmen (Tabelle 2) [6]. Ein Anstieg des Messfehlers des rechten Inklinometers ab TM 14 fhrte zum Ausschluss dieser Daten.

Die Mittelwertkurven der ausgewerteten Radialverschiebungsprofile fur beide Untersuchungsgebiete mit deren Abweichung (Konfidenzgrenzen) sind in Bild 6 dargestellt. Die Vergleiche mit den geodatischen Messungen im

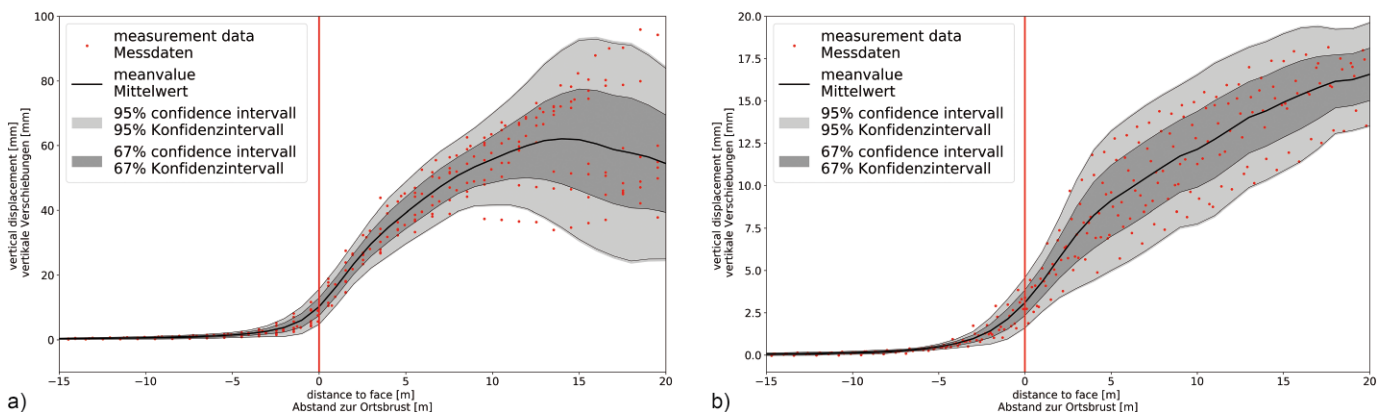


Fig. 6. Mean value and standard variation of the LPDs: a) Ahrental; b) Wolf
 Bild 6. Mittelwert und Standardabweichung der Verschiebungsprofile: a) Ahrental; b) Wolf

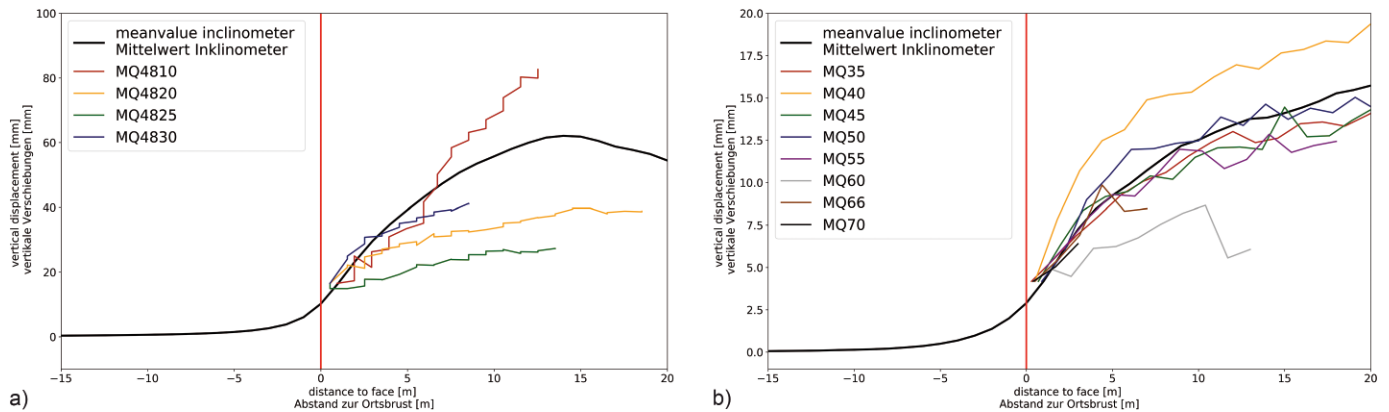


Fig. 7. Mean value of the measured LPDs in comparison to the geodetic measurements: a) Ahrental; b) Wolf
 Bild 7. Mittelwert der Verschiebungsprofile im Vergleich mit geodätischen Hohraummessungen: a) Ahrental; b) Wolf

1.5 m). The inclinometer in Ahrental showed increased displacements of the cavity.

4 Comparison of the measured data with theoretical approaches

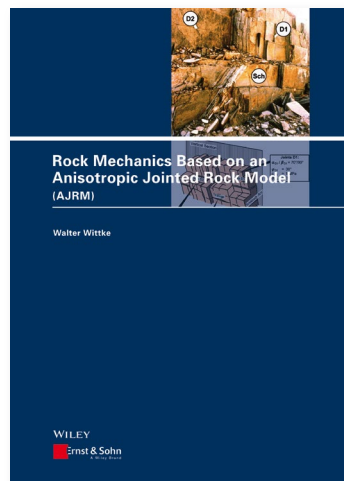
All calculation procedures assume as a simplification a circular, unsupported tunnel under an isotropic primary stress state and a homogeneous, isotropic rock mass. From approaches for the calculation of the radial displacement profile in the longitudinal direction [8] [9] in combination with the procedure for the determination of the maximum displacement and the plastic radius [10] [11]

Hohlraum (Bild 7) zeigen für den Inclinometer in Wolf Übereinstimmungen, was allerdings aufgrund der unterschiedlichen Messpositionen nicht zu erwarten war. FE-Berechnungen in [7] zeigten, dass im Bereich des Abstands der Inclinometer zur Tunnelfirste (ca. 1,5 m) nur die Hälfte der Verformungen zu erwarten sind. Der Inclinometer in Ahrental zeichnete überhöhte Verschiebungen im Bereich des Hohlrums auf.

4 Vergleich der Messergebnisse mit theoretischen Ansätzen

Alle Berechnungsverfahren gehen vereinfachend von einem kreisförmigen, unausgebauten Tunnel unter isotro-

Ernst & Sohn
 A Wiley Brand



Walter Wittke

Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)

2014. 876 pages.

€ 149,-*

ISBN 978-3-433-03079-0

Also available as eBook

Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)

This book focuses on the fundamentals of rock mechanics as a basis for the safe and economical design and construction of tunnels, dam foundations and slopes in jointed and anisotropic rock. It is divided into four main parts:

- Fundamentals and models
- Analysis and design methods
- Exploration, testing and monitoring
- Applications and case histories.

The rock mechanical models presented account for the influence of discontinuities on the stress-strain behavior and the permeability of jointed rock masses.

Order online:
www.ernst-und-sohn.de

Ernst & Sohn
 Verlag für Architektur und technische
 Wissenschaften GmbH & Co. KG

Customer Service: Wiley-VCH Tel. +49 (0)6201 606-400
 Boschstraße 12 Fax +49 (0)6201 606-184
 D-69469 Weinheim service@wiley-vch.de

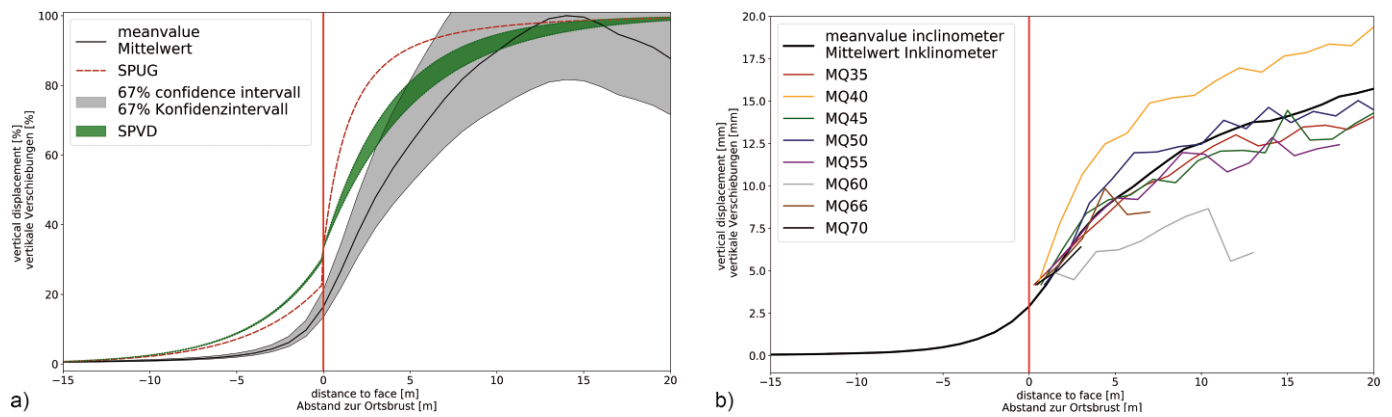


Fig. 8. Comparison of the mean curve of the measured LPDs with theoretical approaches: a) Ahrental; b) Wolf
 Bild 8. Vergleich der Mittelwertkurve der gemessenen Radialverschiebungsprofile in Längsrichtung mit den theoretischen Berechnungsverfahren: a) Ahrental; b) Wolf

[12]), two radial displacement profiles in the longitudinal direction have been evaluated for this article:

- SPUG: Maximum convergence according to *Sulem* and *Panet* [8] and radial displacement profile according to *Unlu* and *Gereck* [11]
- SPVD: Maximum convergence according to *Sulem* and *Panet* [8] and radial displacement profile according to *Vlachopoulos* and *Diederich* [12].

Figure 8 shows a comparison of the theoretical calculation procedure with the experimentally determined radial displacement profile in the longitudinal direction as a percentage of the maximum radial displacement (input parameters in Table 3). Considering the heavy scatter of the measured maximum radial displacement in the cavity, the mean curve is shown relative to the upper (76.03 mm Ahrental; 17.85 mm Wolf) and the lower (48.13 mm Ahrental; 14.92 mm Wolf) limit of the 67% confidence interval of the maximum displacement of the mean value.

In the area in front of the face and at the face, the theoretical calculations overestimate the measured displacements in the standardised display. The absolute values of the displacements at the face with measured values

Table 3. Parameters for the calculations
 Tabelle 3. Parameter der Berechnungen

	Ahrental	Wolf
Modulus of elasticity <i>Elastizitätsmodul</i>	6.000 – 8.000 MPa	4.000 – 6.000 MPa
Poisson's ratio <i>Querdehnzahl</i>	0,18	0,18
Friction angle <i>Reibungswinkel</i>	34 – 38°	29 – 32°
Cohesion <i>Kohäsion</i>	1,5 – 2,5 MPa	1,3 – 2,1 MPa
Angle of dilation <i>Dilatanzwinkel</i>	5°	5°
Primary stress state <i>Primärspannungszustand</i>	27.000 MPa	12.500 MPa

pem Primärspannungszustand und homogenen, isotropen Gebirge aus. Aus Ansätzen zur Berechnung des Radialverschiebungsprofils in Längsrichtung [8] [9] in Kombination mit den Verfahren zur Ermittlung der maximalen Verschiebung und des plastischen Radius [10] [11] [12]) wurden in diesem Beitrag zwei Radialverschiebungsprofile in Längsrichtung ausgewertet:

- SPUG: Maximale Konvergenz nach *Sulem* und *Panet* [8] und Radialverschiebungsprofil nach *Unlu* und *Gereck* [11]
- SPVD: Maximale Konvergenz *Sulem* und *Panet* [8] und Radialverschiebungsprofil nach *Vlachopoulos* und *Diederich* [12].

In Bild 8 ist der Vergleich der theoretischen Berechnungsverfahren mit dem experimentell ermittelten Radialverschiebungsprofil in Längsrichtung prozentuell zur maximalen Radialverschiebung dargestellt (Eingangsparameter Tabelle 3). Unter Berücksichtigung der starken Streuungen der gemessenen maximalen Radialverschiebung im Hohlraum wurde die Mittelwertkurve relativ zu der oberen (76,03 mm Ahrental; 17,85 mm Wolf) und der unteren (48,13 mm Ahrental; 14,92 mm Wolf) Grenze des 67%-Konfidenzintervalls der maximalen Verschiebung des Mittelwerts dargestellt.

Im Bereich vor der Ortsbrust und an der Ortsbrust überschätzen die theoretischen Berechnungen die gemessenen Verschiebungen in der normierten Darstellung. Die Absolutwerte der Verschiebungen an der Ortsbrust stimmen mit gemessenen Werten von 4,9 bis 12,1 mm (Berechnet: 8 bis 17 mm) in Ahrental und von 2,5 bis 3,8 mm (Berechnet: 1 bis 4,4 mm) in Wolf gut mit den berechneten überein (Tabelle 4). Die größeren Abweichungen im Bereich des Hohlraums können durch den Tunnelausbau (Spritzbetonsicherung mit Ankern) bedingt sein. Trotz der eingebauten Verformungsschlitze (in Wolf) liegt ein gewisser Ausbauwiderstand vor.

5 Zusammenfassung

Die Vorverschiebungen und die Gebirgsvorentspannungen im noch nicht ausgebrochenen Teil des Tunnels vor der Ortsbrust sind wichtige Parameter bei der Dimensionierung des Tunnelausbaus. Die bekannten Berechnungs-

Table 4. Comparison of displacements at tunnel face and at the distance of one tunnel radius in % of the maximal displacement

Tabelle 4. Vergleich der Radialverschiebungen an der Ortsbrust und in Entfernung eines Tunnelradius in % der maximalen Verschiebung

	Ahrental			Wolf		
	$-r_0$	Face Ortsbrust	$+r_0$	$-r_0$	Face Ortsbrust	$+r_0$
Measured <i>Gemessen</i>	3,10	16,43	56,08	4,14	18,66	49,88
SPUG <i>SPUG</i>	9,01	32,86	87,76	9,01	32,86	87,76
SPVD <i>SPVD</i>	11,10 – 11,40	33,19 – 33,30	68,64 – 75,53	11,04 – 11,34	33,18 – 33,27	70,12 – 76,71

of 4.9 to 12.1 mm (calculated: 8 to 17 mm) in Ahrental and of 2.5 to 3.8 mm (calculated: 1 bis 4.4 mm) in Wolf agree well with the calculated values (Table 4). The larger deviations in the area of the cavity can be due to the tunnel support (shotcrete with rock bolts). Despite the installed deformation slots (in Wolf), there is a certain support resistance.

5 Summary

The initial displacements and the advance stress relief in the rock mass in the not yet excavated part of the tunnel in front of the face are important parameters for the structural design of the lining. The known calculation procedures for the determination of the radial displacement profiles in the longitudinal direction are based on simplified mechanical approaches or are derived from FE calculations. The monitoring of this procedure with instruments is difficult since the measurements have to be made in the not yet excavated part of the tunnel and near the blasting.

Two application examples of experimentally determined displacement profiles in the longitudinal direction in two different lithologies at the Brenner Base Tunnel are presented in this article. The displacement profiles show a qualitatively good agreement with the theoretical procedure in the not yet excavated part of the tunnel. The rock mass displacements at the face are also represented well by the calculation approaches. In the already excavated part of the tunnel, the theoretically determined radial displacement profiles differ more from the experimentally determined profiles. This may be due to the effective support resistance of the support measures.

The experimentally determined displacement profiles presented in this article can naturally only be a spot check of the theoretical calculation procedure. It would be interesting in this regard to investigate further areas in various lithologies and under various overburden depths. One next step, which is already under consideration, is the calculation of displacement profiles in the longitudinal direction with 3D FE calculations. Immediately above the measurement section in Wolf, the transverse cavern will be built at main tunnel level. In order to record the interaction and the zone of influence of this excavation, the

verfahren zur Bestimmung der Radialverschiebungsprofile in Längsrichtung basieren zum einen auf vereinfachten mechanischen Ansätzen oder leiten sich aus FE-Berechnungen ab. Die messtechnische Überprüfung dieser Verfahren gestaltet sich schwierig, da Messungen im noch nicht ausgebrochenen Teil eines Tunnels und nahe an der Sprengung stattfinden müssen.

Zwei Anwendungsbeispiele experimentell ermittelter Verschiebungsprofile in Längsrichtung in zwei unterschiedlichen Lithologien am Brenner Basistunnel werden in diesem Beitrag vorgestellt. Diese Verschiebungsprofile zeigen eine qualitativ gute Übereinstimmung mit den theoretischen Verfahren im noch nicht ausgebrochenen Teil des Tunnels. Auch die Gebirgsverschiebungen an der Ortsbrust werden von den Berechnungsansätzen gut wiedergegeben. Im bereits ausgebrochenen Tunnel weichen die theoretisch ermittelten Radialverschiebungsprofile in Längsrichtung stärker von den experimentell ermittelten Profilen ab. Dies kann am wirksamen Ausbauwiderstand der Stützmittel liegen.

Die in diesem Beitrag vorgestellten experimentell ermittelten Verschiebungsprofile können natürlich nur eine punktuelle Überprüfung der theoretischen Berechnungsverfahren sein. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Erfassung noch weiterer Untersuchungsgebiete in verschiedenen Lithologien und bei verschiedenen Überlagerungshöhen. Ein nächster und bereits angedachter Schritt liegt in der Berechnung der Verschiebungsprofile in Längsrichtung mit 3D FE-Berechnungen. Unmittelbar oberhalb der Messstrecke in Wolf wird zukünftig die Querkaverne auf Haupttunnelniveau aufgeföhren. Zur Erfassung der Wechselwirkung und des Einflussbereichs dieses Vortriebs, werden die Inklinometermessungen während der Vortriebarbeiten fortgeföhrt und bieten eine wichtige Datengrundlage für das dreidimensionale Verformungsverhalten des Gebirges.

inclinometer measurements will be continued during the tunnelling works and offer an important data basis for the three-dimensional displacement behaviour of the rock mass.

References

- [1] *Volkman, G., Schubert, W.*: Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling. In Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds): *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*. London: Taylor & Francis 2007.
- [2] *Oke, J., Vlachopoulos, N., Diederichs, M.*: Semi-analytical model for umbrella arch systems employed in squeezing ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology* 56 (2016), pp. 136–156.
- [3] *Zhang, Z.X., Liu, C., Huang, X., Kwok, F., Teng, L.*: Three-dimensional finite-element analysis on ground responses during twin-tunnel construction using the URUP method. *Tunnelling and Underground Space Technology* 58 (2016), pp. 133–146.
- [4] *Lisjak, A., Garitte, B., Grasselli, G., Müller, H.R., Vietor, T.*: The excavation of a circular tunnel in a bedded argillaceous rock (Opalinus Clay): Short-term rock mass response and FDEM numerical analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology* 45 (2015), pp. 227–248.
- [5] *Unteregger, D.*: In situ Messprogramm Anfahrtsstützen EKS BBT. Technischer Bericht. Innsbruck, 2015. Unpublished.
- [6] *Huter, M.*: Vergleich der experimentell ermittelten Verschiebung durch Gebirgsvoertenspannung mit analytischen Ansätzen. Masterarbeit Universität Innsbruck, 2018.
- [7] *Hofstetter, G., Neuner, M., Schreter M., Unteregger, D.*: Numerical Modeling of Deep Tunnels. Final report on the interim research project, BBT, 2016. Unpublished.
- [8] *Sulem, J., Panet, M., Guenot, A.*: An analytical Solution for time dependent displacement in a circular tunnel. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 24 (1987), pp. 155–164.
- [9] *Salencon, J.*: Contraction Quasi-Statique d'une Cavite a Symetrie Spherique ou Cylindrique dans un Milieu Elasto-Plastique. *Ann. Des Ponts et Chaussee* 4 (1969), S. 231–236.
- [10] *Panet, M.*: Calcul des Tunnels par la Methode de Convergence-Confinement. Press. L'Ecole Natl. Des Ponts et Chaussee, 1995.
- [11] *Unlu, T., Gereck, H.*: Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacement occurring around the Face of a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18 (2003), pp. 547–553.
- [12] *Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S.*: Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mech. Rock Eng.* 42 (2009), pp. 131–146.



Dr. Dipl.-Ing. Barbara Schneider-Muntau
Universität Innsbruck
Technikerstr. 13
6020 Innsbruck
Austria
Barbara.Schneider-Muntau@uibk.ac.at



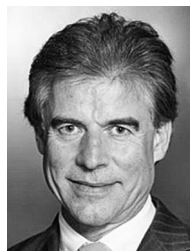
Dr. Dipl.-Ing. Chris Reinhold
Brenner Basistunnel BBT SE
Amraser Str. 8
6020 Innsbruck
Austria
chris.Reinhold@btt-se.com



Dr. Dipl.-Ing. Tobias Cordes
Brenner Basistunnel BBT SE
Amraser Str. 8
6020 Innsbruck
Austria
Tobias.Cordes@btt-se.com



Iman Bathaeian, MSc.
Universität Innsbruck
Technikerstr. 13
6020 Innsbruck
Austria
Iman.Bathaeian@uibk.ac.at



o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. MSc. Ph.D. Dr. phil. Dr. techn. Konrad Bergmeister
Brenner Basistunnel BBT SE
Amraser Str. 8
6020 Innsbruck
Austria
Konrad.Bergmeister@btt-se.com