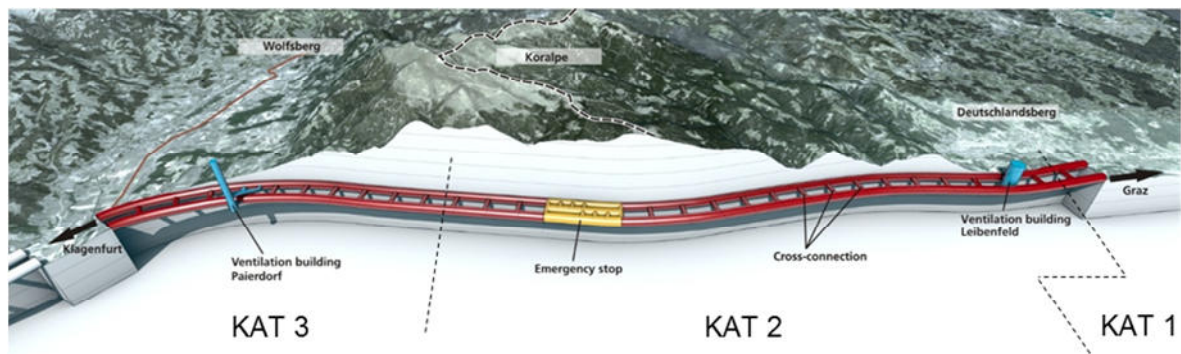


# KORALMTUNNEL

## AUSFÜHRUNG



Einsatz einer Doppelschildmaschine im druckhaften Gebirge am Beispiel des Koralmtunnels

Kolloquium Maschinelle Vortriebe, ETHZ, Donnerstag, 19. Mai 2016

-	19.05.2016	Fa/KK	KK, 19.05.2016
<b>Version</b>	<b>Datum</b>	<b>Erstellt</b>	<b>Geprüft</b>

**Lombardi AG** Beratende Ingenieure  
 Via R. Simen 19, Postfach 1535, CH-6648 Minusio  
 Telefon +41(0)91 735 31 00, Fax +41 (0)91 743 97 37  
 www.lombardi.ch, info@lombardi.ch

## INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	PROJEKTÜBERSICHT	2
3.	GEOLOGISCHE UND GEOTECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN	4
4.	GEOMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN	6
5.	ANFORDERUNGEN UND SPEZIFIKATIONEN BEI DER AUSSCHREIBUNG	8
5.1	Vorauserkundungsmassnahmen	8
5.2	Zusatz- und Sondermassnahmen zur Beherrschung von druckhaften Gebirgsverhältnisse	9
5.3	Durchfahren druckhafter Bereiche	10
6.	ERFAHRUNGEN AUS DEM VORTRIEB IM KRISTALLINEN GEBIRGE	12
7.	ERFAHRUNGEN AUS DEM VORTRIEB IN STÖRZONEN	14
8.	LESSONS LEARNED	16
9.	BIBLIOGRAPHIE	17

## 1. EINLEITUNG

Der vorliegende Beitrag behandelt die kontinuierlichen Vortriebe des Bauloses KAT 2 (Steiermark) des Koralmtunnels und stellt nach Darstellung des Projekts und der Spezifikationen bei der Ausschreibung die gewonnenen Erfahrungen während des Vortriebs, insbesondere mit der Durchörterung von druckhaften Störungszonen vor.

Die Lombardi AG, Mitglied der Projektgemeinschaft Koralmtunnel (PG KAT; bestehend aus Geoconsult, Bernhard Ingenieure, Basler & Hofmann AG, Lombardi AG und Ingenieurbüro Maidl + Maidl), ist im Jahr 2006 mit der Planung und Ausschreibung des maschinellen Vortriebs für das Baulos KAT2 beauftragt worden.

## 2. PROJEKTÜBERSICHT

Der ca. 32.9 km lange Koralmtunnel stellt das Hauptbauwerk der neuen Hochleistungstrecke „Koralmbahn“ zwischen Graz in Steiermark und Klagenfurt in Kärnten dar, welche Bestandteil der baltischen-adriatischen Achse „Pontebbana“ ist. Untergliedert in drei Baulose, wird die Koralpe überwiegend im kontinuierlichen Vortrieb durchörtert. Die Gleisführung erfolgt einspurig in zwei annähernd parallel verlaufenden Tunnelröhren. Der Ausbruchquerschnitt beträgt etwa 77 m<sup>2</sup>; alle 500 Meter sind die Tunnel durch Querschläge miteinander verbunden. Etwa in Tunnelmitte wird eine Nothaltestelle ausgebrochen. Die Überdeckung des Gebirges steigt maximal bis auf 1.250 Meter an.



Abbildung 1: Die baltische-adriatische Achse "Pontebbana"

Das Baulos KAT2 beinhaltet den konventioneller Ausbruch von zweimal 0.8 km Haupttunnel in Richtung Ostportal sowie von 1.1 + 1.8 km Haupttunnel Richtung Westen, 2 Montagekammern für die TBM, einer Nothaltestelle und von 38 Querschläge. Die kontinuierlichen Vortriebe mit Doppelschild-TBM sind 17.2 km (Nordröhre) resp. 16.2 km (Südröhre) lang.

Die Bauarbeiten des Bauloses KAT1 sind im Jahr 2011 abgeschlossen worden, während diejenigen der Baulose KAT2 und KAT3 noch im Gange sind. Die Hauptdurchschläge sind noch im Jahr 2016 erwartet.

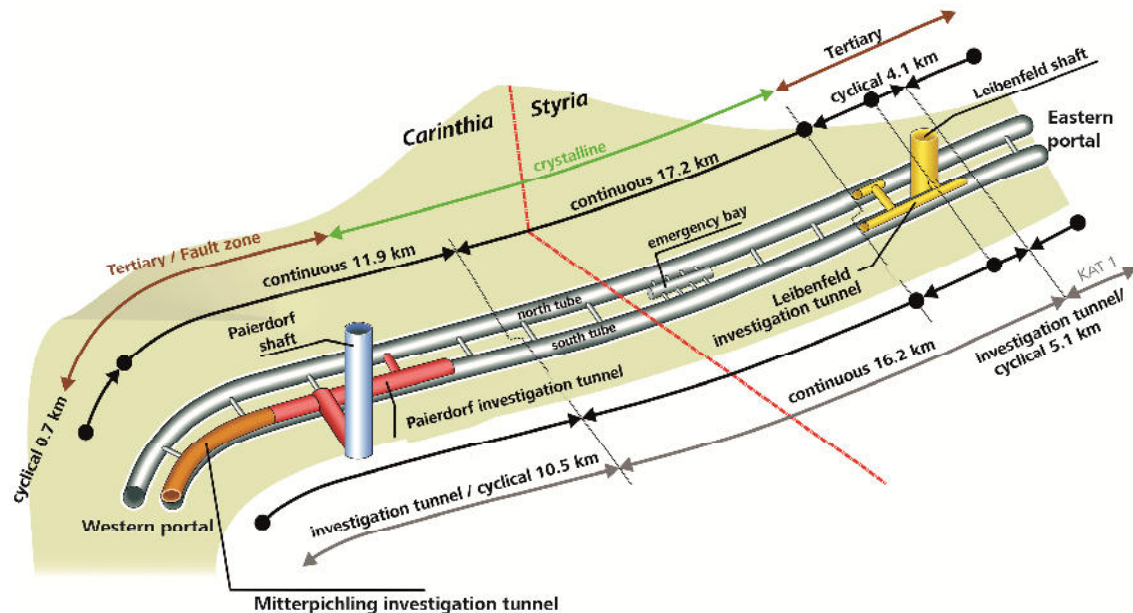


Abbildung 2: Projektübersicht Koralmtunnel

Die Ver- und Entsorgung der Untertagbaustellen des Bauloses KAT2 erfolgt ausschliesslich aus dem Installationsplatz Leibensfeld und der Zugang zum Untertagbereich erfolgt über einen 60 m tiefen Zwillingsschacht (Brillenform, in Summe 650 m<sup>2</sup>). Die Tübbingfabrik und das Tüblinglager befinden sich am Schachtkopf, während diverse weitere Baustelleneinrichtungen in den Kavernen und Profilerweiterungen am Schachtfuss auf Tunnelniveau untergebracht sind.



Abbildung 3: Zugang zum Untertagbereich über 2 Zwillingsschächten

### 3. GEOLOGISCHE UND GEOTECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN

Aus den geologischen Verhältnissen lassen sich für die kontinuierlichen Vortriebe insgesamt drei stark unterschiedliche geotechnische Randbedingungen identifizieren:

- Im Kristallinabschnitt, der den Zentralbereich der Koralpe darstellt, stehen überwiegend gering zerlegte Festgesteinsabschnitte mit stark bis extrem abrasiven Gesteinsarten und hohen Gebirgsüberlagerungen bis 1'250 m sowie lokal hohen Wasserdrücken an (undrainiert bis 100 bar). Die im Kristallin zutretenden Wassermengen sind üblicherweise an Bereiche mit stärkerer Zerlegung, Zerrüttungszonen oder Störungen gebunden, werden aber grundsätzlich drainiert.
- Die neogenen Sedimentgesteinsstrecken, die in den Tunnelanfangsbereichen dominieren, besitzen weitgehend Lockergesteinscharakter mit geringen Gesteinsdruck- und -zugfestigkeiten. Strömungsdrücke bis zu 2.5 bar und das Antreffen von kugeligen Konkretionen können den Vortrieb erschweren.
- Der dritte geotechnische Bereich umfasst tektonische Störungen, die in Mächtigkeiten von mehreren Dezimetern bis zu einigen Zehnermetern prognostiziert sind. Sie sind durch einen heterogenen Aufbau aus Kataklasiten, Blöcken und stark zerlegtem sowie ungestörtem Fels charakterisiert.

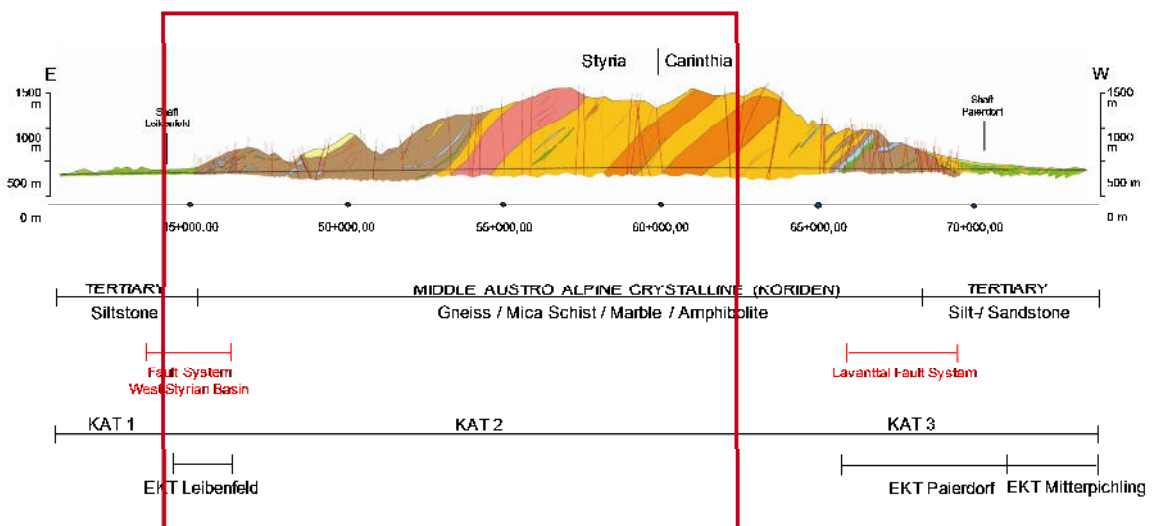


Abbildung 4: Geologischen Längenprofil Koralmtunnel

Die vorwiegend subvertikalen Störzonen wurde in 2 Gruppen unterteilt:

- Störungszonen vom Typ A und B, deren Anzahl, Lage und Aufbau aufgrund der vorhandenen Informationen und Erkundungsbohrungen aus der Oberfläche mehr oder wenig bekannt sind.
- Störungszonen vom Typ C, D und E, deren Anzahl, Lage und Aufbau mit Ausnahme der Erfahrungen aus dem Erkundungstunnel nahezu unbekannt sind.

Störungs- Typ	Geotechnische Charakterisierung
<b>A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sehr mächtig (Zehnermeter) mit stark heterogenem Internaufbau.</li> <li>– Große Mächtigkeiten an Kataklasiten und zerrüttetem Fels.</li> <li>– Hoher Anteil kompetenter Felsschollen.</li> <li>– Unterteilung in drei Subtypen (A1, A2 und A3, Unterscheidung hinsichtlich Normalmächtigkeit und Blockgröße)</li> </ul>
<b>B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mächtig (&lt; ca. 15 m) mit einem Internaufbau mäßiger Heterogenität.</li> <li>– Hohe Anteile an zerrüttetem Fels sowie Kataklasiten mit anastomosierenden, geringmächtigen Scherbahnen welche durch wellig/glatte Scherflächen und feinkörnigem, kataklastischem Material gekennzeichnet sind</li> </ul>
<b>C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geringmächtig mit einem Internaufbau geringer Heterogenität.</li> <li>– (Sehr) hohe Anteile an Kataklasiten.</li> </ul>
<b>D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geringmächtig mit einem Internaufbau geringer Heterogenität.</li> <li>– schieferungsparalleles Auftreten</li> <li>– Hohe Anteile an Kataklasiten.</li> </ul>
<b>E</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geringmächtig mit einem Internaufbau ohne nennenswerte Heterogenität</li> <li>– Zerrüttungszone, sehr geringe Anteile an Kataklasiten</li> <li>– Sehr hohe Anteile an stark zerlegtem bis zerrüttetem Fels bzw. tektonischen Brekzien.</li> </ul>

Tabelle 1: Geotechnische Charakterisierung der Störzonen-Typen A bis E

Massgebend für die Bewertung im Hinblick auf die Durchörterung mit einer TBM werden neben der Gesamtmächtigkeit und der Überlagerungshöhe auch der Internaufbau der Störungen sowie insbesondere die Mächtigkeit von zusammenhängenden Kataklasitlagen.



## 4. GEOMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN

Da für einen Grossteil der kontinuierlich aufgefahrenen Vortriebsstrecken von standfestem oder nur hohlraumnah überbeanspruchtem Gebirge ausgegangen werden kann, wird insbesondere auch aus wirtschaftlichen Gründen als Ausbausicherung beim Bau des Koralmtunnels eine „Einschaligkeit“ angestrebt, die durch eine gedichtete Tübbingauskleidung sichergestellt wird. Die geotechnischen Randbedingungen erlauben es somit aus statischer Sicht, auf den Einbau einer Innenschale weiträumig verzichten zu können. In bautechnisch relevanten Störungen sowie im stärker zerlegten Anfangsbereich des Kristallinabschnittes wird planmässig eine abgedichtete Innenschale eingebaut.

Die internen Strukturen der Störungen besitzen für Planung und Ausführung eine überaus grosse Bedeutung. In der ersten Phase der Ausschreibungsplanung wurden zusammen mit den Projektgeologen vertiefte Analysen der vorhandenen Daten zu den Störzonen zur Einteilung von Gruppen in Abhängigkeit der mutmasslichen räumlichen Ausdehnung (Störzonenlänge und die Orientierung) sowie der für die Bemessung zugrunde zulegenden geomechanischen Parameter vorgenommen.

Die weitere Aufgabenstellung war die Klärung der Frage, ob die prognostizierten Störzonen mit einer Einfach- oder Doppelschild-TBM überhaupt aufgefahren werden könnten, sowohl hinsichtlich des TBM-Vortriebs als auch hinsichtlich des erforderlichen Ausbauwiderstandes der Tübbing.

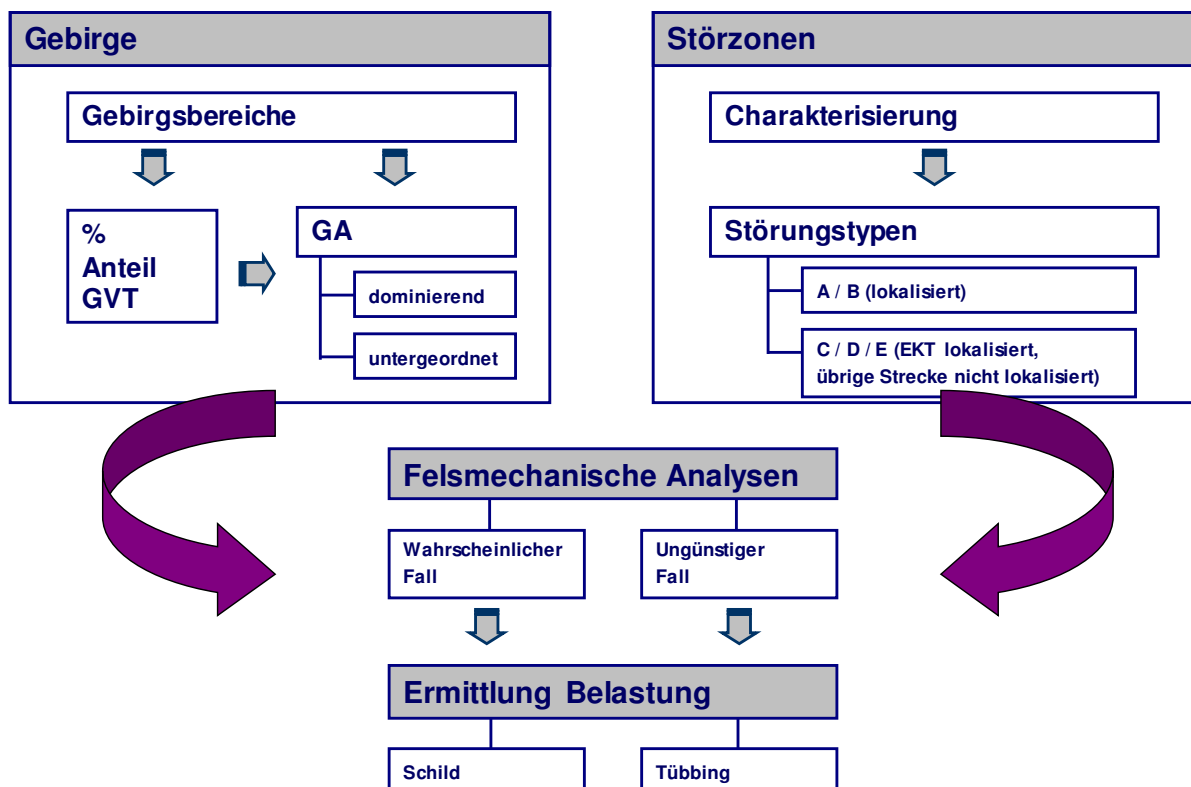


Abbildung 5: Charakterisierung des Gebirge und der Störzonen und felsmechanische Analysen

Für die eingeteilten Störungszonengruppen wurden sowohl für wahrscheinliche Fälle als auch für ungünstige Fälle geomechanische Untersuchungen durchgeführt; die kritischen prognostizierten Störzonen wurden gesondert betrachtet und mit numerischen Modellen untersucht.

Gebirgskennlinien wurden jeweils für den Ortsbrustbereich und entlang des Schildes bis zum Bereich hinter der TBM, wo die Tübbing-Ringe bereits eingebaut sind schrittweise erweitert und ausgewertet.

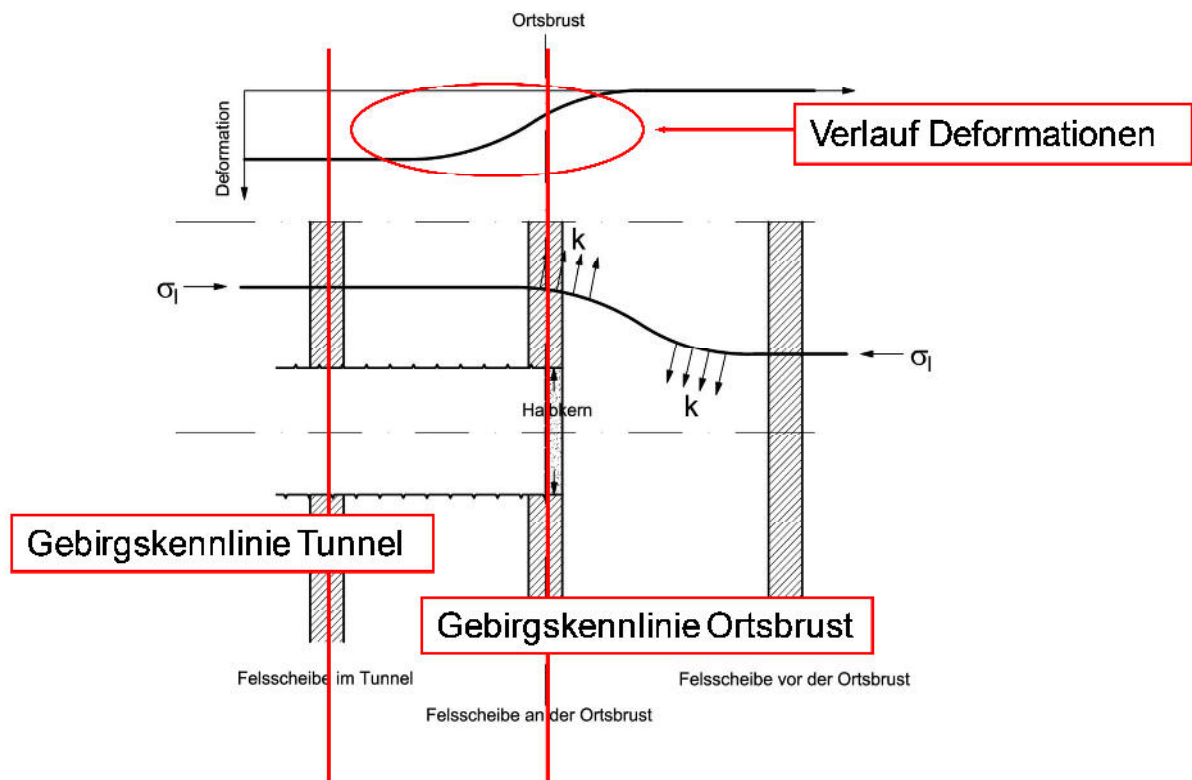


Abbildung 6: Gebirgskennlinien und Verlauf der Deformationen

Im konkreten Fall resultierte aus der felsmechanischen Analyse, dass das Auffahren gewisser Störungsazonen nur mit Bauhilfsmassnahmen als machbar eingestuft werden kann und die Bemessung eines gesonderten Tübbings zur Aufnahme hoher Biegebeanspruchung und hoher Vorschubkräfte erforderlich wird.

## 5. ANFORDERUNGEN UND SPEZIFIKATIONEN BEI DER AUSSCHREIBUNG

Der Entscheid bzgl. des in der Ausschreibung zugrunde zulegenden Maschinentyps, Einfach- oder Doppelschild-TBM, erforderte zahlreiche Diskussionen und Konfrontationen unter den Projektbeteiligten (Bauherr, Planer, Experten des Bauherrn). Die Nachteile einer Doppelschild-TBM im Vergleich zu einer Einfach-TBM, nämlich die um 1.5 bis 2.0 m grössere Maschinenlänge (Gesamtlänge von Schildschneide bis zum Schildschwanz) und das Gelenk zwischen den beiden Schildern, wurden den Vorteilen (z.B. Einbau des Tübbingrings während dem Vortrieb) gegenübergestellt. Aufgrund der zahlreichen Erfahrungen in anderen Ländern mit dem Einsatz von Doppelschild-TBM, wurde dieser Maschinentyp schlussendlich als „Stand der Technik“ bezeichnet und für Umsetzung in der Ausschreibung des Bauloses KAT2 gewählt.

### 5.1 Vorauserkundungsmassnahmen

Das Einfahren in eine unerkundete Störung kann insbesondere bei einer Doppelschild-TBM kostenintensive Vortriebsstillstände nach sich ziehen. Der kontinuierliche Vortrieb erfolgt beim Koralmtunnel deshalb grundsätzlich nur in vorauserkundetem Gebirge. Geologisch und bautechnisch kritische Gebirgsbereiche können über die Prognose hinausgehend somit rechtzeitig erkannt werden.

Zum Erzielen einer ausreichend hohen Erkundungsgenauigkeit werden verschiedene Vorauserkundungsmethoden miteinander kombiniert, die der nachfolgenden Übersicht zu entnehmen sind.

Erkundungsziel	Erkundungsmethode
Störungen Typ A und B	Schlagbohrung (Bohrwiderstand), Seismik, ggfs. Kernbohrung (Bohrkern)
Störungen Typ C bis E	Seismik, Kernbohrung (Bohrkern), Bohrlochscanner,
Bergwasser	Schlagbohrung (Offenes Bohrloch), Hydraulische Bohrlochversuche, Fluidloggings, Flowmeter
Lithologie	Kernbohrung (Bohrkern)
Gebirgsstruktur	Seismik, Kernbohrung (Bohrkern), Bohrlochscanner,
Gesteinseigenschaften	Laborversuche

Tabelle 2: Erkundungsziele und Erkundungsmethode

Ziel der Vorauserkundungen war und ist es:

- Lage und Aufbau der Störungszonen, insbesondere Störungszonen vom Typ A und B,
- feinkörnige Kataklastitbänder mit Mächtigkeiten > 1.0 m (für alle Störungstypen) und
- starke Bergwasserzutritte

zu erkunden, um ggf. erforderliche Zusatz- und/oder Sondermaßnahmen frühzeitig einleiten zu können.

## **5.2 Zusatz- und Sondermassnahmen zur Beherrschung von druckhaften Gebirgsverhältnisse**

Zur Unterstützung der Regelmassnahmen und damit zur Überwindung von lokalem Auflockerungs- oder erhöhtem Gebirgsdruck sowie zur Vermeidung von Vortriebsunterbrechungen sind für den kontinuierlichen Vortrieb beim Koralmtunnel nach Erfordernis folgende Zusatzmaßnahmen geplant und in der Ausschreibung integriert worden:

- Vorausb Bohrungen und Vorauserntwässerungen
- Außerordentliche Ertüchtigung des Vortriebssystems vor Störungszonen zur Verhinderung unplanmäßiger Vortriebsstillstände in diesen Zonen (Meisselwechsel, etc.)
- Zusätzlicher Bohrkopfüberschnitt (Überbohrmass)
- Schildmantelschmierung z.B. mit Bentonit
- Bohrkopfschmierung als Maßnahme gegen Verklebungserscheinungen (Konditionierung)
- Silikat-Schaum-Injektionen im Bereich des Bohrkopfes bei aufgelockertem Gebirge oder zum Verfüllen kleinerer Niederbrüche und
- Injektions-Bohrschirme.

Sondermassnahmen sind zusätzliche bautechnische Maßnahmen, die der Verbesserung des geomechanischen Verhaltens des Gebirges oder der Sicherstellung der Stand- und Tragfähigkeit dienen. Die Anordnung und Ausführung erfolgt nach geotechnischer Erfordernis.

Folgende Sondermassnahmen sind für die kontinuierlichen Vortriebe geplant und in der Ausschreibung integriert worden:

- Bohrlochinjektionen in Verwitterungszonen (nachträgliche Hochdruckinjektionen mit Packer bis 15 bar, entsprechend den Feststellungen während des Vortriebes),
- Systematische Kunstharzinjektion mit hohem Druck im Bereich von injizierbaren Zerrüttungszonen und stärker zerlegten Gebirgsbereichen,
- Stahlbogeneinbau und/oder Nachankerung der Tübbings bis zum Einbau des Innengewölbes.

Sollte der Tübbingausbau in druckhaften Bereichen dennoch überbeansprucht werden, wird die Innenschale im betroffenen Bereich zur Erzielung der normgemäßen Gesamtsicherheit bewehrt. Sollte diese Massnahme ebenso nicht ausreichen, wird der Tübbingausbau abgebrochen und es wird nach Abklingen der Verformungen eine konventionelle Auskleidung in der erforderlichen Stärke hergestellt.

Die zum Einsatz kommenden Massnahmen wurden während der Bauausführung im Rahmen des Sicherheitsmanagements weiter aufbereitet und analysiert, um einen für den Vortrieb händelbaren Entscheidungskatalog mit Darstellung der Entscheidungskriterien, unter Berücksichtigung der zeitlichen und baubetrieblichen Einflussfaktoren, zu erhalten.

### **5.3 Durchfahren druckhafter Bereiche**

Zum Auffahren druckhafter Bereiche werden die konzeptionellen Möglichkeiten der TBM ausgeschöpft. Durch den Überschnitt und die gewählte Konizität wird dem Gebirge mehr Freiraum für Konvergenzen gegeben. Der Einsatz von über den Schildmantel injizierten Schmiermitteln soll die Reibung reduzieren.

Die Durchörterung von Störungen erfolgt unter detaillierter Kontrolle und Analyse der Maschinendaten im Sinne eines Prozesscontrollings. Herauszuheben sind hier die Ausbruchmassenkontrolle, die Mörtelverpressdrücke, der Anpressdruck des Bohrkopfes an die Ortsbrust, die Stromaufnahme und das Kippmoment des Bohrkopfes.

Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass die in druckhaften Bereichen auftretenden Verformungen bereits im Bereich des Schildes den verfügbaren Verformungsraum deutlich übersteigen. Für die Doppelschild-TBM bedeutet dies die Überwindung des sich über den Schildumfang aufbauenden Reibungswiderstandes. Dieser ist abhängig von der Schildlänge, der TBM-Konfiguration (Überschnitt, Konizität) und des zeitlichen Deformationsverhaltens des Gebirges.

In parametrisch durchgeführten Untersuchungen unter Variation der TBM-Konfiguration und der Schildlänge wurden anhand von Gebirgskennlinien die prognostizierten Kennwertkombinationen im Hinblick auf die (ungünstige) Annahme ausgewertet, dass bei Austritt der Tübbinge aus dem Schildschwanz der theoretisch zur Verfügung stehende Deformationsraum bereits aufgebraucht wurde und das Gebirge sowohl an TBM und Tübbing aufliegt (siehe Abbildung 7 sowie Kap 4).

Für Störungen wurden mit Hilfe von rotationssymmetrischen numerischen Vortriebssimulationen der ungünstige Einfluss aus dem heterogenen Aufbau der prognostizierten Störungstypen sowie von unterschiedlich mächtigen Kataklastitlagen ermittelt.

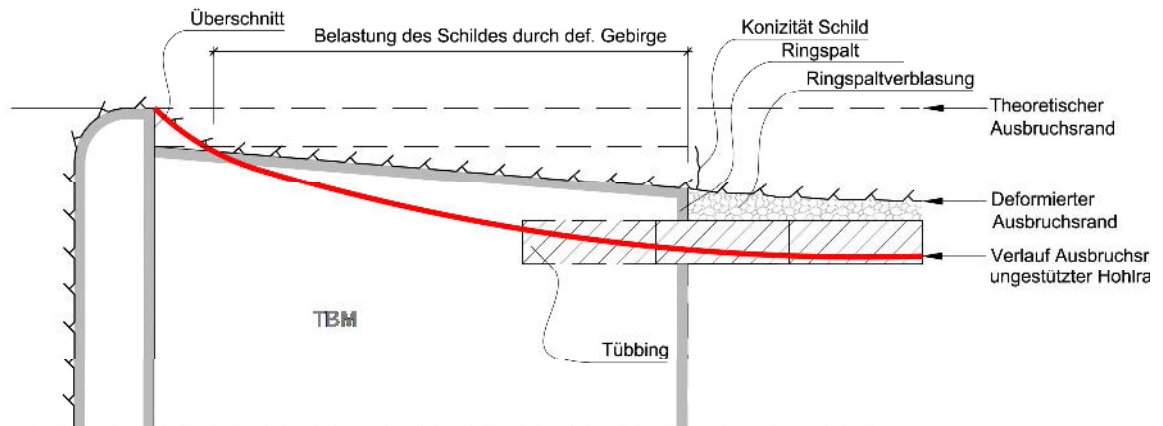


Abbildung 7: Schema TBM mit Deformationsverlauf Ausbruchrand

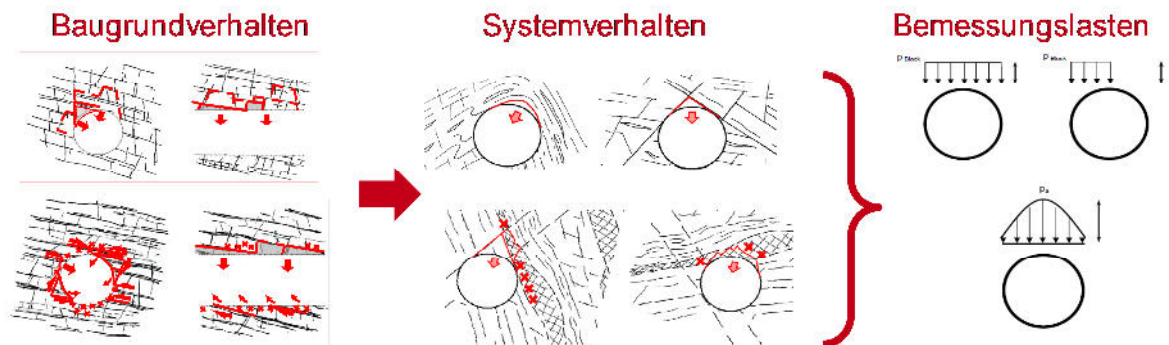
Auf Basis dieser Ergebnisse sowie unter Würdigung einer verträglichen Forderung leistungsstarker Vortriebspresen auf die Tübbinge ergaben sich folgende Eckdaten für die ganzheitliche Auslegung des Vortriebs- und Ausbausystems, welche die zum Zeitpunkt der Ausschreibung des Loses KAT2 technisch machbaren Möglichkeiten voll ausschöpfen haben:

Parameter	Wert	Bemerkungen
Vorschubkraft	150 kN	Festgelegter Wert. Theoretisch erforderliche Vorschubkräfte > 150 MN wurden mit dem Verklemmen der TBM gleichgesetzt
Deformationsraum	20 cm	Deformationsraum = Nenndurchmesser DN abzgl. Aussendurchmesser Tübbingring
Belastung des Tübbingausbaus (radial) ausserhalb von Störungen	850 kPa	-
Belastung des Tübbingausbaus (radial) in Störungen	2'000 kPa	Bei Ansatz von ungünstigen Kennwertkombinationen („worst-case“) können in Störungsbereichen Lasten auf die Auskleidung >> 1'500 kPa nicht ausgeschlossen werden. Als Ergebnis einer ganzheitlichen Betrachtung von Gebirge, Vortrieb (machbare Geometrie bzw. Leistungsdaten der TBM) und Auskleidung wurde ein Ausbawiderstand von 2'000 kPa als Grenzkriterium abgeleitet.

Tabelle 3: Erkundungsziele und Erkundungsmethode

## 6. ERFAHRUNGEN AUS DEM VORTRIEB IM KRISTALLINEN GEBIRGE

Die prognostizierten spannungsbedingten Ablösungen infolge lokaler Überbeanspruchung des hohlraumnahen Gebirges und/oder Blockfallmechanismen sind regelmässig überprüft worden: Die daraus resultierenden Belastungen befinden sich innerhalb der in der Planung errechneten Werte.



Jedoch verursacht die schnelle Bewegung des hinteren TBM-Schildes (Gripperschild) während des Re-Gripping bei aufliegendem Gebirge eine sofortige Belastung der Ausbruchsicherung (Tübbingringe) und einen kurzzeitigen Verlust der Bettung der Tübbing im Ringspalt zwischen 09:00-10:00 Uhr und zwischen 14:00-15:00 Uhr: Der in der letzten Etappe eingeblasene Perlkies bildet im Ringspalt eine „linear geneigte“ Verteilung und sobald sich der Gripperschild bewegt, rutscht der Perlkies im unteren Bereich nach vorne (siehe Abbildung 8), bevor er nachfolgend wieder aufgefüllt werden kann.

Die bauzeitliche Kombination zwischen sofortiger Belastung und ungünstiger Bettung der Tübbing im seitlichen Ringspaltbereich führte anfänglich in einzelnen Fällen zur Bildung von Rissen in den Tübbing. Um dieses Problem zu beherrschen wurden folgende Massnahmen umgesetzt:

- die Bewehrung der Normaltübbing, welche von dieser ungünstigen Belastung betroffen sind, wurde angepasst,
- Zusatzmassnahmen bzgl. Füllen des Ringspalt wurden ergriffen. Eine Mischung aus Perlkies und Mörtel kam zum Einsatz.

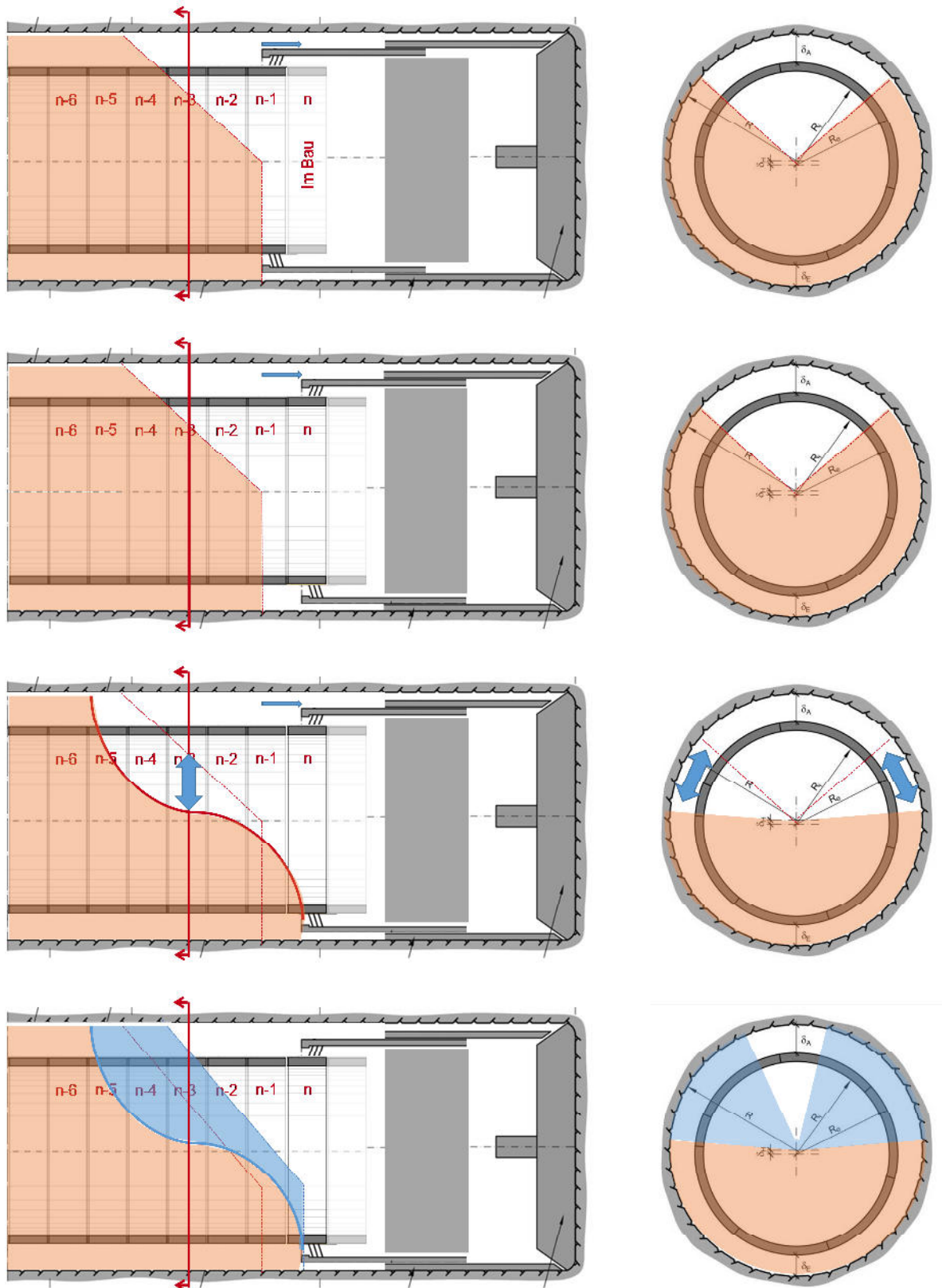


Abbildung 8: Verlust der Bettung der Tübbinge im Ringspalt infolge Re-Gripping



## 7. ERFAHRUNGEN AUS DEM VORTRIEB IN STÖRZONEN

Zwischen Mai und Dezember 2014 haben beide Vortriebe eine Serie von Störungen durchfahren, die zu teilweise längeren Stillständen und zur Umsetzung zahlreicher Zusatz- und Sondermassnahmen geführt haben. Die Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Vortrieb in diesen Störungen kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Störungen vom Typ A und B können anhand des im Kap. 5.1 beschriebenen Vorauserkundungskonzept erkannt werden.
- Das Systemverhalten in Störungszonen, insbesondere die Ortsbruststabilität, die Belastung des Schildes und der Ausbruchsicherung kann auf Basis der Vorauserkundung nicht einfach vorausgesagt werden.
- Bereiche mit wesentlichen Ortsbrustinstabilitäten und Überprofilen stellten für den Vorschub des Schildes und für den Tübbingausbau keine Probleme dar, während in anderen Fällen mit stabiler Ortsbrust die Überwindung der Schildreibung zu starken Belastungen sowie zu Beschädigungen der eingesetzten Tübbingringe geführt haben.
- Aufgrund der Komplexität des obenerwähnten Systemverhaltens, kann Erfordernis und Wirkung des Überbohrmasses von der Vortriebsmannschaft rein auf Basis der Vorauserkundungsergebnisse nicht zuverlässig identifiziert werden. Es wurde beobachtet, dass ein Überbohrmass zu keiner wesentlichen Reduktion der Schildreibung führt; die Umsetzung der Massnahmen erfordert jedoch eine lange Annäherungstrecke (schrittweise Konfiguration des Bohrkopfes) und hat somit einen wesentlichen Zeitbedarf zur Folge hat.
- Infolge der grossen Überlagerung und der hohen Primärspannungen ist eine vorseilende Behandlung der tektonischen Störungszonen mittels Injektionen nicht möglich. Wasserdrucktests haben gezeigt dass das Gebirge, selbst wenn sehr dicht zerlegt, eine sehr niedrige Durchlässigkeit aufweist, solange die Doppelschild-TBM nicht in der Störungzone eingefahren ist und noch keine Auflockerungen verursacht hat. Nur mit Bergwasser gesättigte Störungen, welche aufgrund der hohen Permeabilität zu einem grossen Wasserandrang führen (Drainagewirkung), können erfolgreich injiziert und konditioniert werden.
- Die bestmögliche „Art und Weise“ des Vortriebs in Störzonen basiert auf einer kontrollierten Einfahrt mit der TBM zum Auslösen einer begrenzten Vorentspannung der Ortsbrust. Nachfolgend werden über die Bohrgassen im Schild sowie durch den Bohrkopf Injektionsmassnahmen umgesetzt. Falls bei einer vorausgebrochenen Ortsbrust Hohlräume oder Überprofile entstanden sind, müssen ausgefüllt und das umgebende Material stabilisiert werden, damit eine sichere Wiederaufnahme des TBM-Vortriebs sichergestellt werden kann. Wird die TBM zu früh angehalten, ist der Spannungsabbau zu gering und die mögliche Konditionierung des Baugrundes nur ungenügend wirksam, was bei der Wiederaufnahme des TBM-Vortriebs zur Auslösung neuer, weitreichenderer Auflockerungen führen kann.

- Der Vortrieb verursacht in der Regel systematische Überprofile im Bohrkopfbereich, welche bei nachfolgender Durchfahrt des Schildes von herunterfallendem kataklastischem Material gefüllt werden. Dies erzeugt einerseits eine Auflast im Firstbereich und gleichzeitig relativ hohe seitliche Drücke in der Paramenten. Dieser Mechanismus führt zu Ovalisierungen mit Hebungen in der Firste und Konvergenzen im Parament (siehe Abbildung 9) und nachfolgend zu Rissbildungen. Diesem Mechanismus kann mit Radialinjektionen im Firstbereich erfolgreich entgegengewirkt werden, so dass eine wirksame Bettung erreicht wird ohne übermäßige Biegemomente aufzubauen.
- Durch die systematische Auswertung der geotechnische Messungen und Vortriebsaufzeichnungen konnten viele Störungszonen erfolgreich durchgequert bzw. geeignete Massnahmen getroffen werden, ohne die Tragsicherheit der Tübbinge zu gefährden.

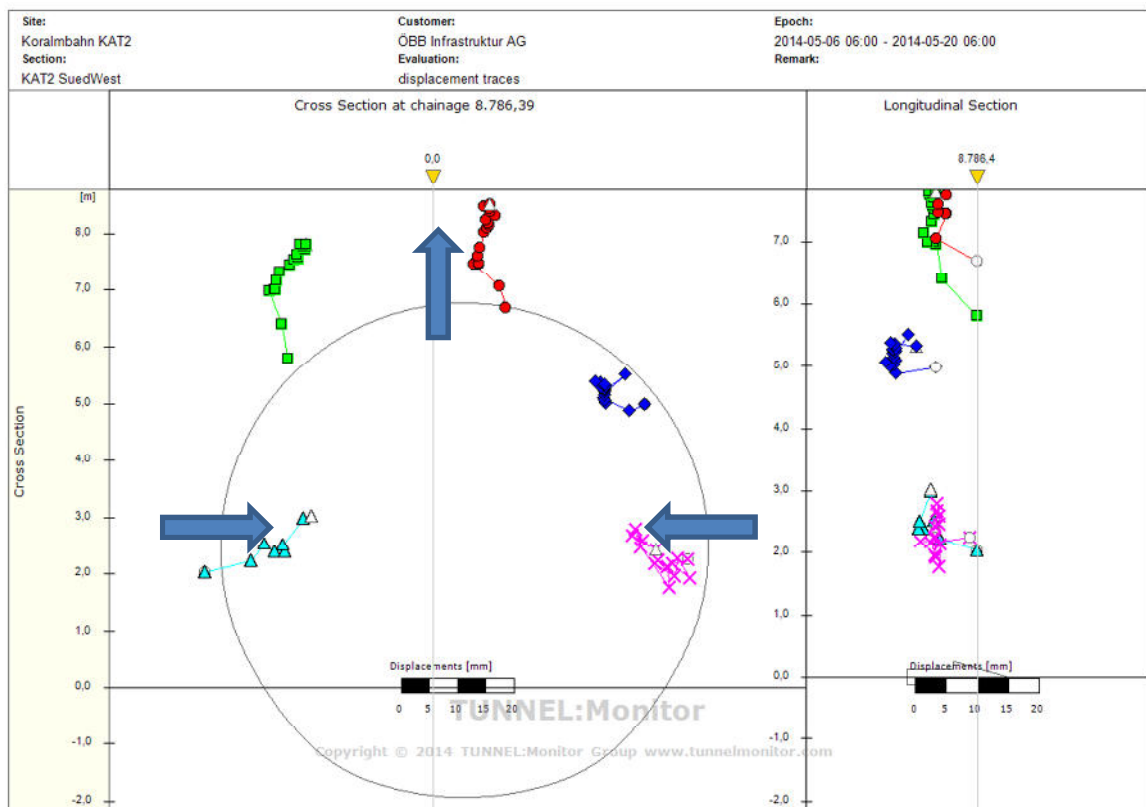


Abbildung 9: Absolute gemessene Verschiebungen bei Tm 8'786

- Die prognostizierten Belastungen in tektonischen Störzonen (bis 2'000 kPa) wurden nie überschritten, so dass die Bemessung der Störungs-Tübbinge als auf der sicheren Seite liegend angesehen werden darf.
- Die Gebirgsanisotropie, insbesondere im Einflussbereich von Störungen, führt zu einer asymmetrischen Belastung der Tübbinge, welche bei ungenügender Bettung (wie oben beschrieben) zu hohen Biegemomenten führt.

## 8. LESSONS LEARNED

Der Einsatz einer Doppelschildmaschine bei langen Tunneln mit hoher Überlagerung im druckhaften Gebirge ist möglich.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Konzepte und Erfahrungen zeigen, dass zur Bewältigung der erwarteten druckhaften Gebirgsverhältnisse sorgfältige Planungen und gezielte Anpassungen in der Ausführungsphase erforderlich sind. Dies betrifft einerseits die frühzeitige Herausarbeitung der geomechanischen Grundlagen für eine fundierte Bewertung der Durchörterung und statische Lösungen für einen sinnvollen Widerstand des Tübbingausbaus. Andererseits sind in der Ausschreibungsplanung schlüssige Konzepte für einen sicheren Vortrieb sowie für die stufenweise Vorauserkundung und für Ausführungsmöglichkeiten von Zusatz- und Sondermassnahmen zu entwickeln. Eine dem Vortrieb begleitende technische Unterstützung durch den Planer ist zu empfehlen.

Darüber hinaus sind für eine reibungslose technische und bauvertragliche Umsetzung der vorgesehenen Massnahmen konkrete und detaillierte Vorgaben und Mindestanforderungen für die Konstruktion und Ausstattung der Doppelschild-TBM, der Tübbingproduktion und der Bauverfahrenstechniken unerlässlich.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ferrari, A., Fabbri, D., Sidler, M., „Bewältigung von unerwarteten Störzonen beim TBM-Vortrieb im Gotthard-Basistunnel Baulos Bodio“, Veröff. BBT 2007 – Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck (2007)
- [2] Handke, D., Fabbri, D., Keiper, K., „Konzeptionelle Überlegungen zu den maschinellen Vortrieben beim Koralmtunnel“, Südbahntagung (2008)
- [3] Keiper, K., Fabbri, D., et. al., „Konzepte zur Bewältigung druckhafter Gebirgsverhältnisse beim Koralmtunnel“, 58. Geomechanisches Kolloquium, Salzburg (2009)
- [4] Keiper, K., Crapp, R., Amberg, F., „Bewertung der Interaktion von TBM und Gebirge im Felstunnelbau auf der Basis von geomechanischen Berechnungen“, Geomechanik-Kolloquium 2010 in Salzburg
- [5] Wagner, K., Keiper, K., Hölzl, H., Mussger, K., „The Koralm Tunnel Project - 33 km to connect Europe“, World Tunnel Congress 2013 Geneva (2013)
- [6] Keiper, K., Frodl, S., Lange, A., Moritz, B., Wagner, H., Handke, D., Matter, J., „ Segmental Lining in Squeezing Rock – Innovative Concepts for the Koralm Tunnel “, World Tunnel Congress 2013 Geneva (2013)
- [7] Keiper, K., Radoncic, N., Crapp R., Hölzl, H., Moritz, B., „TBM Tunnelling in tectonical faults – Design conclusions drawn from the observed system behavior“, EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium (2015)