

RIBET

Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten
Tunnelinnenschalen

Riss-Systematik

Deliverable D2

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
7.Ausschreibung der Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF 2017)

Version 0.4, 22.08.2019

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Erstentwurf	GRUNICKE
0.2	Einarbeitung Kommentare ÖBB	GRUNICKE
0.3	Ergänzung Kombinationen und Kurz-Nomenklatur	GRUNICKE
0.4	Einarbeitung Workshop 24.07.2019 mit ÖBB	GRUNICKE

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung.....	4
1 Risskatalog unbewehrter Innenschalen	6
1.1 Allgemeines.....	6
1.2 Phänomenologie der Rissbildung	7
1.3 Rissursachen.....	17
2 Tragverhalten der gebetteten Innenschale.....	26
2.1 Idealisierte Beanspruchungssituationen.....	26
2.2 Tragverhalten in Querschnittsrichtung unter äußeren Einwirkungen	26
2.3 Tragverhalten in Längsrichtung unter äußeren Einwirkungen	32
2.4 Tragverhalten unter kombinierten Einwirkungen längs und quer.....	35
3 Interpretation von Rissbildern	36
3.1 Zuordnung Rissphänomene zu Ursachen und Mechanismen	36
3.2 Rissinterpretation – Beispiel 1	37
3.2.1 Eckdaten zum Bauwerk.....	37
3.2.2 Rissbild.....	37
3.2.3 Weitere Beobachtungen	39
3.2.4 Interpretation	39
3.3 Rissinterpretation – Beispiel 2	40
3.3.1 Eckdaten zum Bauwerk.....	40
3.3.2 Rissbild.....	40
3.3.3 Weitere Beobachtungen	42
3.3.4 Interpretation	43
4 Identifikation relevanter Rissphänomene	44
4.1 Relevanz der Einzelphänomene	44
4.2 Relevanz von Risskombinationen	45

5	Auswahl relevanter Rissbilder für Monitoring hinter Verkleidungen	47
	Literaturverzeichnis.....	50
	Bildnachweis.....	51

Anhang 1: Beispielfotos

Anhang 2: Rissmatrix

Anhang 3: Auswahl potenziell relevanter Risskombinationen

Einleitung

In Österreich besteht eine lange Tradition schlanker unbewehrter und drainierter Tunnelinnenschalen. Gegenüber konventionellen Betonbauten liegen im Tunnelbau besondere Verhältnisse vor, wie z.B. kontinuierliche Bettung, enge Betoniertakte und sehr kurze Ausschallfristen, einhäuptige Gewölbeschalungen, Einsatz von Außenrüttlern, Zwang zwischen Widerlager und Gewölbe sowie zwischen Innenschale und Abdichtungssystem bzw. Außenschale u.dgl. mehr.

Bautechnisch entspricht der Einsatz der unbewehrten drainierten Innenschale dem heutigen Stand der Technik und wird planerisch, bautechnisch und betontechnologisch beherrscht. Die tunnelspezifischen Erfahrungen fanden u.a. in der ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton [2] oder in den DAUB-Empfehlungen „Unbewehrte Innenschalen“ [12] Eingang. Auch die Methoden der Berechnung und Bemessung unbewehrter Innenschalen ist nach heutigem Stand der Technik ausreichend entwickelt [10][11].

Die Bauwerksüberwachung hat zum Ziel, den Zustand des Tragwerkes hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu beurteilen. Über die Lebensdauer eines Tunnels ändern sich einerseits Einwirkungen, andererseits unterliegen die Bauwerkeigenschaften und -widerstände einer alterungsbedingten Veränderung, womit der Auslastungsgrad zeitabhängig wird.

Risse in Betonbauten sind oft wesentliche Indikatoren für viele sich ändernde Beanspruchungssituationen. Risse ab einer gewissen Größe sowie die Änderung des Rissbildes werden deshalb heute im Zuge der Bauwerksüberwachungen im Anwendungsbereich der RVS 13.03.31 bzw. des ÖBB-Regelwerks 06.01.02 erfasst und dokumentiert. Sie dienen dem fachkundigen prüfenden Ingenieur u.a. als Grundlage für eine objektspezifische Beurteilung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Innenschale. Der beurteilende Ingenieur versucht dabei, aus dem angetroffenen Bauwerkszustand auf frühere oder aktuelle Beanspruchungen zu schließen. Abgesehen von den Grenzwerten der Erfassungsgrenze und einem allfälligen Vergleich mit den Bemessungskriterien der seinerzeitigen Planung, bestehen dazu allerdings derzeit noch im Regelfall keine allgemeinen systematisierten Beurteilungskriterien.

Der Stellenwert des Rissbildes im Rahmen der Bauwerksüberwachung steht im Konflikt mit Maßnahmen, welche die Einsehbarkeit der Tunnelleibung einschränken. Neben Lärmschutzpaneelen oder elastischen rissüberbrückenden Beschichtungen ist dies bei den in den letzten Jahren vermehrt eingesetzten Brandschutzverkleidung der Fall, welche zur Erfüllung des baulichen Brandschutzes gem. RVS 09.01.45 eingesetzt werden.

Vor allem bei Verkleidungen mit Brandschutzplatten, welche häufiger aufgrund der raschen Umsetzbarkeit und der daher geringen Verkehrsbeeinträchtigung gegenüber im Spritzauftrag hergestellten und im monolithischen Verbund wirkenden Schutzschichten angewendet werden) kann die weitere Rissentwicklung des Bestandstragwerks visuell nicht oder nur sehr eingeschränkt beobachtet werden. Derzeit wird versucht, diesem Defizit durch die Vorgabe von de- und wiedermontierbaren Brandschutzplatten oder durch das Freilassen radialer Sichtschlitze zu begegnen. Dazu liegen jedoch zum einen noch keine Langzeiterfahrungen vor, zum anderen verbleibt die Leibung weiterhin räumlich und/oder zeitlich größtenteils verborgen.

Im Rahmen von RIBET werden daher die technischen Möglichkeiten eines Rissmonitorings hinter Brandschutzplatten untersucht. Für die Konzeptionierung des Monitorings ist zu definieren, welche potenziellen Rissbilder im Rahmen der Bauwerksüberwachung von Interesse sind und daher erfasst werden sollten.

Der gegenständliche Bericht fasst die Aufbereitung der entsprechenden tunnelstatischen und konstruktiven Grundlagen zusammen:

- Risskatalog: Strukturierte Erfassung typischer und häufiger Rissbilder bei unbewehrten Innenschalen in phänomenologischer und kausalistischer Hinsicht
- Zuordnung von Rissphänomenen zu Rissursachen und vice versa
- Einschätzung der Relevanz von Rissphänomenen und Rissursachen
- Auswahl relevanter Rissbilder, welche hinter nachträglich angebrachten Verkleidungen erfasst werden sollten

1 RISSKATALOG UNBEWEHRTER INNENSCHALEN

1.1 Allgemeines

Ziel ist es, die im Bauwerksbestand der ÖBB und ASFiNAG an unbewehrten Innenschalen häufig auftretenden Rissbilder strukturiert zusammenzufassen.

Bestehende Risskataloge sind in der Regel sehr allgemein gehalten und wurden oft für Ingenieurbauwerke in Stahlbetonbauweise, nicht jedoch spezifisch für unbewehrte Tunnelinnenschalen erstellt (z.B. [4] [5]). Die Kommentare zur DB-Richtlinie 853 [6] widmen einen Absatz der Rissbildung von Tunnelinnenschalen, fassen diese jedoch in nur vier phänomenologische Typen zusammen. Der Schadenskatalog der UIC [9] stellt eine strukturierte Systematik für die Schadensbeschreibung, den Rückschluss zu möglichen Schadensursachen, die weiteren Erkundungen, die Nachrechnung und die abschließende Risikoeinschätzung geschädigter Tunnelschalen. Der Katalog, der sich nicht allein unbewehrte Ortbetoninnenschalen beschränkt, beinhaltet diesbezüglich vier Risstypen.

Die Erfahrungen zeigen, dass für eine Beurteilung der Relevanz eines Rissbildes eine differenzierte Betrachtung erforderlich ist. Im Rahmen von RIBET wird daher ein Risskatalog an Rissbildern aufgestellt, die im österreichischen Kontext unbewehrter Innenschalen erfahrungsgemäß auftreten können.

Da für die Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Riss sowohl als Einzelphänomen als auch als Indikator für relevante Beanspruchungssituationen relevant sein kann, beschränkt sich der Risskatalog nicht nur auf eine deskriptive Darstellung möglicher Rissphänomene, sondern stellt auch mögliche Ursachen dar, welche eine Rissbildung auslösen können. Der Katalog besteht aus daher zwei Teilen. Teil 1 beschreibt die Rissphänomene, während Teil 2 beinhaltet eine Zusammenstellung möglicher Rissursachen bzw. dahinterliegende Mechanismen zusammenfasst.

1.2 Phänomenologie der Rissbildung

Risse lassen sich durch zahlreiche Attribute beschreiben. Die im Zusammenhang mit unbewehrten Tunnelinnenschalen wesentlichen Attribute sind in nachstehender Abbildung zusammengefasst.

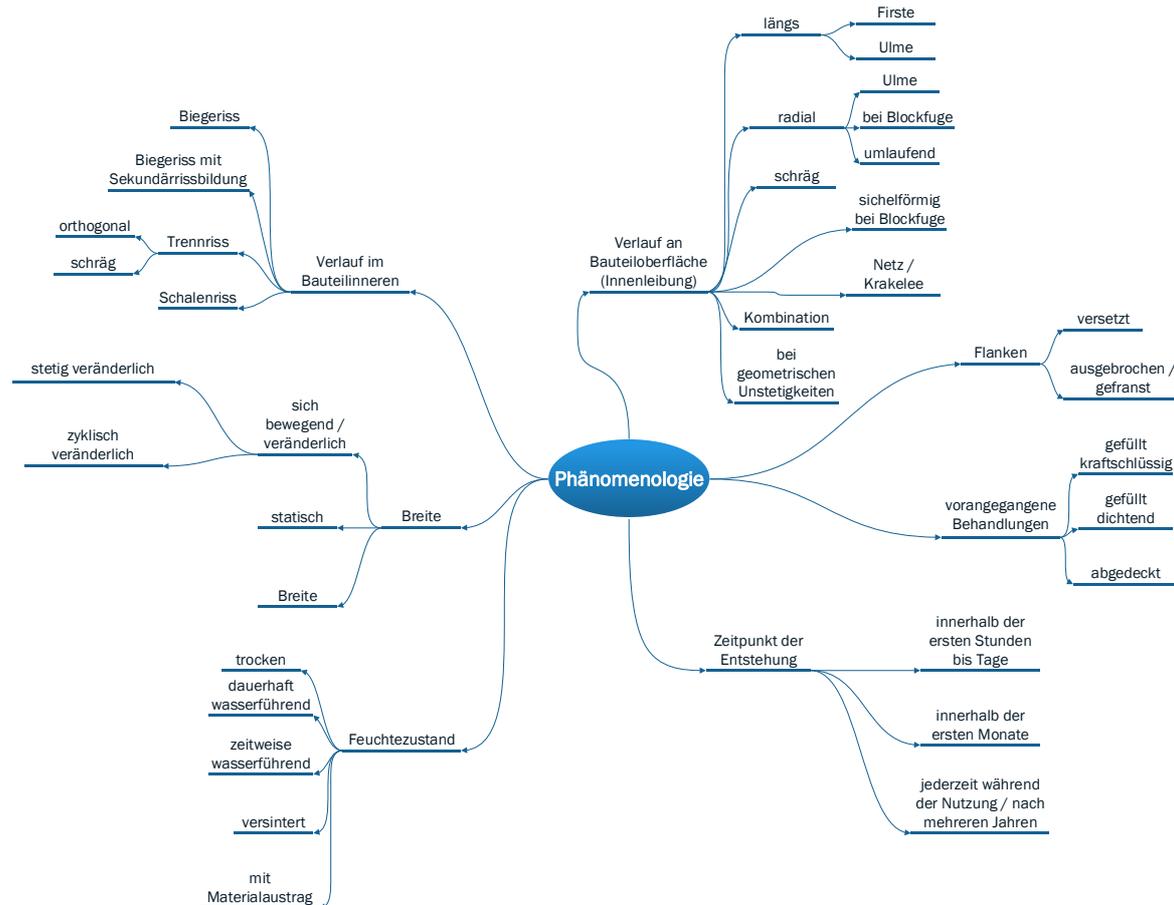
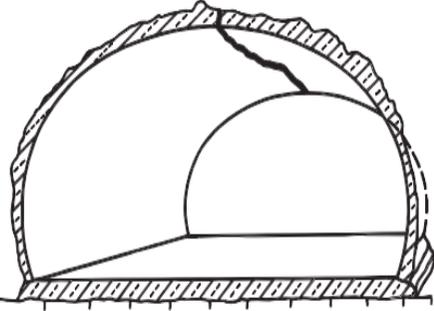
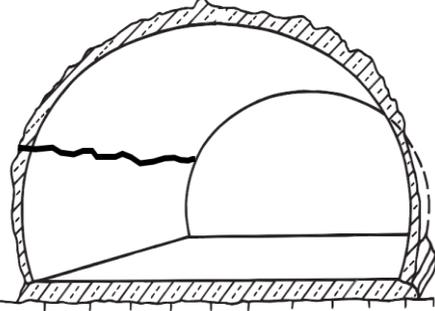
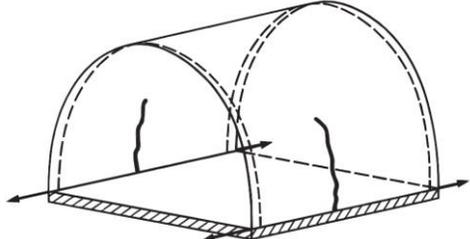
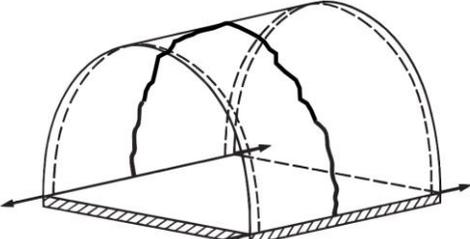
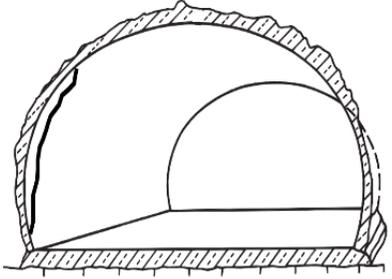


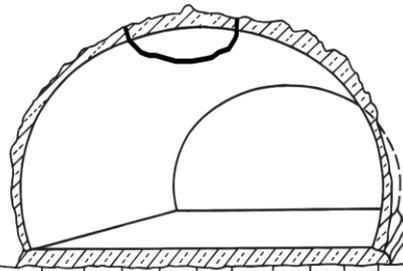
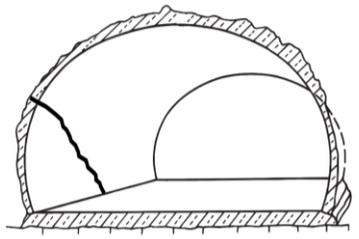
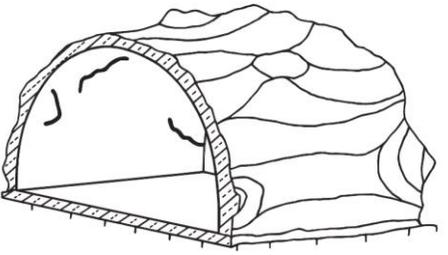
Abbildung 1: Rissphänomenologie

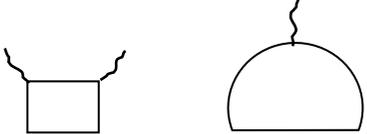
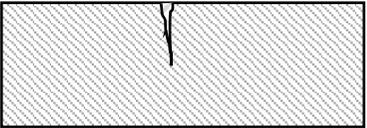
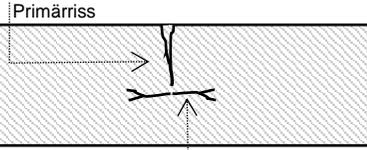
Nachstehende Tabelle 1 beinhaltet den Katalog der Rissphänomene, deren Beschreibung und eine Auswahl möglicher Ursachen. Rissphänomene können - unabhängig vom dahinter liegenden rissauslösenden Mechanismus – unter Umständen bereits eine Relevanz für Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit aufweisen (z.B. Eiszapfenbildung bei wasserführendem Riss oder Herabfallen von Betonbruchstücken). Die Tabelle enthält daher auch eine allfällige diesbezügliche Relevanz des (nicht instandgesetzten) Einzelphänomens.

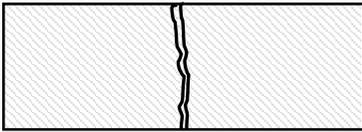
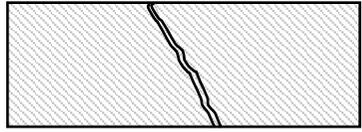
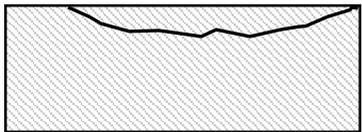
Tabelle 1: Katalog Rissphänomene

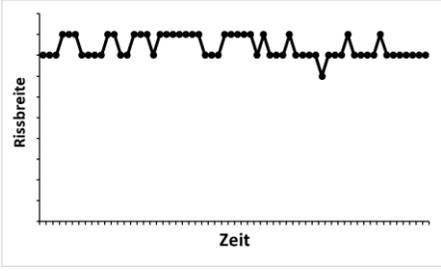
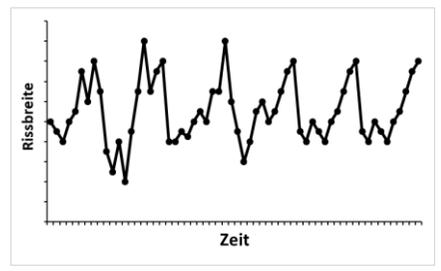
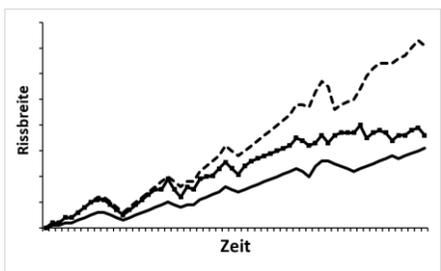
Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
P1 Rissverlauf an Innenleibung	P1.1.1 Längsriss Firste	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4]</p>	Längslaufende Risse, bei Biegerissen mit Rissufer orthogonal zur Längung und Risstiefe bis zur Nulllinie, in Firste oder häufig auch leicht außermittig zwischen 11 und 1 Uhr; Risse können auch als parallele Längsrisscharen auftreten.	Überschreitung der geringen Biegezugspannungen des jungen Betons beim Ausschalen, Geringe seitliche Bettung, Vertikale Belastung	<p><u>Tragfähigkeit:</u> Oft unproblematisch, wenn Rissbreite stationär, kein Rissflankenversatz und Rotation nicht größer als 4-8 mrad (entspricht bei üblichen Schalenstärken rd. 1-2mm).</p> <p><u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Bei Fehlen sonstiger Charakteristika (trocken, keine Flankenausbrüche, keine Versätze) und bei Rotationen <4-8mrad oft unproblematisch. Darüber potenzielle Gefahr des AblöSENS von kleineren bis mittleren Teilen zufolge Sekundärrissbildung</p>
	P1.1.2 - Längsriss Ulme	 <p>Bildquelle: [B.4]</p>	Längslaufende Risse, bei Biegerissen mit Risstiefen bis zur Nulllinie, bei Schubrisen Durchtrennung der gesamten Schale und ggf. mit Versatz der Rissflanken. Biegerisse können auch als parallele Längsrisscharen auftreten.	Hoher Seitendruck, einseitiger Gebirgsdruck/ Lehnlage Einseitiger Bettungsverlust Erdbeben	<p><u>Tragfähigkeit:</u> Oft unproblematisch, wenn Rissbreite stationär, kein Rissflankenversatz und Rotation nicht größer als 4-8 mrad (entspricht bei üblichen Schalenstärken rd. 1-2mm)</p> <p><u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Bei Fehlen sonstiger Charakteristika (trocken, keine Flankenausbrüche, keine Versätze) und bei Rotationen <4-8mrad oft unproblematisch. Darüber potenzielle Gefahr des AblöSENS von kleineren bis mittelgroßen Teilen (Sekundärrissbildung); u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand</p>

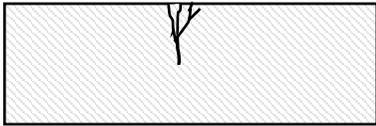
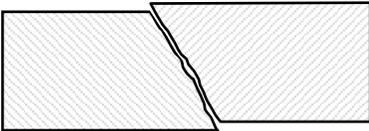
Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
	P1.2.1 Radialrisse Ulme	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4]</p>	Vertikale bis subvertikale Risse bis auf halbe Schalenhöhe, oft in Blockmitte oder in den Drittelpunkten; meist Trennrisse	Überschreitung der Zugfestigkeit zufolge behinderter Dehnung bei frühem Zwang und spätem Zwang (v.a. Temperaturwechsel) Intensität der Rissbildung steigt mit Rauigkeit/Unebenheit der Kontaktfläche Innenschale zu Außenschale	<u>Tragfähigkeit:</u> Einzelne Radialrisse wirken wie zusätzliche Blockfugen, oft ohne Einfluss auf das Tragverhalten und die Lastabtragung <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand; sofern trocken und ohne Flankenausbrüchen oft unproblematisch.
	P1.2.2 Radialrisse umlaufend	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4] (modifiziert)</p>	Vertikale bis subvertikale Risse, innerhalb des Blocks	Überschreitung der Zugfestigkeit zufolge behinderter Dehnung bei frühem Zwang und spätem Zwang (v.a. Temperaturwechsel) Intensität der Rissbildung steigt mit Rauigkeit/Unebenheit der Kontaktfläche Innenschale zu Außenschale. Ggf. auch Folge von Zerrungen in Tunnelachse aus Bergsenkung/ Talzusub, Setzungen oder Erdbeben.	<u>Tragfähigkeit:</u> Einzelne Radialrisse wirken wie zusätzliche Blockfugen, oft ohne Einfluss auf das Tragverhalten und die Lastabtragung <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand
	P1.2.3 Radialrisse an Blockfugen	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4] (modifiziert)</p>	Risse parallel und im Nahbereich zur Blockfuge	Differenzielle Bewegungen zwischen Blöcken aus frühem Zwang, spätem Zwang, Fugenverzahnung, Talzusub, Setzungen, Erdbeben	<u>Tragfähigkeit:</u> oft ohne Einfluss auf Tragverhalten und Lastabtragung <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Gefährdung durch potenziell herausfallende Bruchstücke, u.a. auch abhängig von Wasserführung und Flankenzustand prüfen

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
	P1.3 Sichelförmiger Riss an Blockfuge in Firste	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4] (modifiziert)</p>	Halbmondförmiger Verlauf im Firstbereich mit Verschnitt zur Blockfuge, oft Trennrisse mit schrägem Rissufer, Stichmaß zur Blockfuge bei üblichen Querschnittsgrößen meist nicht mehr als 1-2m.	Bauherstellung: Verkanten des Schalwangenüberstandes beim Ausschalen, Betonierfehler: Lufteinschluss und reduzierte Schalenstärke am höher liegenden Blockende.	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei örtlicher Begrenzung (z.B. Ausdehnung nur 1-2m) meist ohne Einfluss auf Tragverhalten <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand
	P1.4 Schrägriss	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4] (modifiziert)</p>	Schräger Verlauf, meist im Verschnitt mit Blockfugen, meist Trennrisse; ggf. auch Ergebnis des Zusammenwachsens von Längsrissen mit Radialrissen	Setzungsdifferenzen in Tunnelängsrichtung, später Zwang, lokal höherer einseitiger Gebirgsdruck Erdbeben	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei ansonsten unauffälligem Rissbild (kein Versatz) oft unproblematisch <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand
	P1.5 Verteilte Risse	 <p>Beispielfoto siehe Anhang Bildquelle: [B.4]</p>	Starke „Zerlegung“ der Schale mit sich verbindenden Rissen in allen Richtungen	Betondegradation, Betoniermangel, intensiver Gebirgsdruck Gewölbe ggf. in Kombination mit Verlust der Bettung, Erdbeben	<u>Tragfähigkeit:</u> ggf. reduzierte Tragfähigkeit, bei intensiver Zerlegung potenzielles Ausbrechen größerer Schollen bis hin zur Ausbildung einer kinematischen Kette <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Gefährdung durch potenziell herausfallende Bruchstücke; ggf. Querschnittsverformung prüfen

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
	P1.6 Netzrisse	 <p>Beispielfoto siehe Anhang</p>	Oberflächlich mit geringer Risttiefe, meist ungeordnet mit unorientierten Rissverläufen und -abständen im dm-Bereich	Betoniermangel/ mangelhafte Nachbehandlung Betondegradation Ablösung Beschichtung	<u>Tragfähigkeit:</u> Gering (Betondruckfestigkeit ist ggf. reduziert) <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand, ggf. Beeinträchtigung der aufhellenden Funktionalität eines Tunnelanstrichs
	P1.7 bei geometrischen Unstetigkeiten	 <p>Nische Querschlag</p> <p>Beispielfoto siehe Anhang</p>	Risse, welche bei geometrischen Unstetigkeiten wie Nischen oder Querschlägen auftreten, in der Regel Trennrisse	Kerbspannungen Querzugspannungen zufolge Spannungsumleitungen	<u>Tragfähigkeit:</u> abhängig von der Konfiguration der Nischen / Querschläge/ Geometrieverschnitte; meist gering, sofern ansonsten unauffällig. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand
P2 Rissverlauf im Bauteil	P2.1.1 Biegeriss	 <p>Beispielfoto siehe Anhang</p>	Risstiefe < Bauteilstärke	Biegung, Zugfestigkeit auf Rissseite überschritten, verbleibender Querschnitt=Druckzone	<u>Tragfähigkeit:</u> Ausbildung eines imperfekten Gelenks und Lastumlagerung im Gewölbe, vor Ausschöpfung der Rotationskapazität (vgl. P2.1.2) unproblematisch
	P2.1.2 Biegeriss mit Sekundärrissbildung	 <p>Primärriss</p> <p>Sekundärriss</p> <p>Beispielfoto siehe Anhang</p>	Risstiefe < Bauteilstärke, Sekundärrisse an Risswurzel Potential der Sekundärrissbildung nimmt ab Rotation $\omega > 4$ mrad zu. Dies entspricht folgenden Rissbreiten w: Schalenstärke d=30cm -> w=1,2mm Schalenstärke d=60cm -> w=2,2mm	Biegeriss mit großer Rissbreite und Überschreitung der Rotationsfähigkeit des unbewehrten Betonquerschnitts	<u>Tragfähigkeit:</u> vor Ausschöpfung der Rotationskapazität und bevorstehendes Erreichen der zulässigen Betonstauchungen in der verbleibenden Druckzone; potenzielles Abscheren des Restquerschnitts; <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Bei Zusammenwachsen der Sekundärrisse ggf. Gefahr des Herausbrechens von Schalenteilen

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
	P2.2.1 Trennriss orthogonal		Riss verläuft über gesamte Schalensstärke in ca. rechtem Winkel zur Bauteiloberfläche/ Schalennachse	Überschreitung der Zugfestigkeit bei annähernd zentrischem Zug (z.B. zufolge Zwang)	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei Kombination mit anderen Rissen/Blockfugen potenzielle Schwächung des Gewölbes im Einzelfall zu prüfen <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung und Flankenzustand
	P2.2.2 Trennriss schräg		Riss verläuft über gesamte Schalensstärke in ausgeprägt nicht-orthogonaler Richtung zur Bauteiloberfläche	Örtliches Querkraftversagen / Schubriss	<u>Tragfähigkeit:</u> potenzielles Schubversagen des Gewölbes, v.a. bei tunnelparallelem Rissverlauf <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> potenzielles Herausfallen von Schollen, welche durch den Rissverlauf umschrieben werden, prüfen
	P2.3 Abschalung /Schalenriss		Anriss von Ablösungen / Abplatzungen, Riss setzt sich im Bauteilinneren parallel zur Schalennachse fort	Abplatzungen zufolge Überschreitung der Druckfestigkeit (z.B. Biegung mit Druckzone innen ggf. in Kombination mit hoher Normalkraft), Betondegradation Ausgeprägte Sekundärrissbildung Bauherstellung (Ausschalen)	<u>Tragfähigkeit:</u> potenzielle Überschreitung der Druckfestigkeit (innenliegende Druckzone) oder der Quertragfähigkeit: im Einzelfall zu prüfen <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> potenzielles Herausfallen von Schollen, welche durch den Rissverlauf umschrieben werden, prüfen
P3 Rissbreite	P3.0 Geometrisch		Maß der Rissöffnung an der Bauteiloberfläche gemessen rechtwinkelig zum Riss Maß der Risslänge an der Innenleibung	Rissbreite und -länge abhängig vom Maß der Last oder Zwangsbeanspruchung	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei reinen Biegerissen in Längsrichtung und ohne Sekundärrissbildung (vgl. P2.1.2) geringer Einfluss auf Tragfähigkeit <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> u.a. abhängig von Wasserführung, Flankenzustand und Rotation. Bei Sekundärrissbildung Gefahr von Schalenablösungen; Potential der Sekundärrissbildung (vgl. P2.1.2) nimmt ab Rotation $\omega > 4$ mrad zu. Dies entspricht folgenden Rissbreiten w: Schalensstärke d=30cm -> w=1,2mm Schalensstärke d=60cm -> w=2,2mm

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
	P3.1 statisch		Die Rissbreite und -länge bleiben über den Beobachtungszeitraum unverändert	Hinweis auf stationäre Verhältnisse, sofern Nachbarrisse ebenfalls statisch.	-
	P3.2 sich bewegend, zyklisch veränderlich		Die Rissbreite ändert sich zyklisch (wiederholtes Öffnen und Schließen) z.B. unter Last oder mit der Temperatur	Zeitlicher Verlauf in der Regel affin zur Tages- und Jahrestemperaturganglinie (Bauteiltemperatur) Ggf. dynamische Lasten aus Druck/Sog des Verkehrs	<u>Tragfähigkeit:</u> Progressive Schädigung des Betonquerschnitts prüfen. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Potenzielles Lösen von Bruchstücken entlang der Rissflanken
	P3.3 sich bewegend, stetig veränderlich		Stetig zunehmende Rissbreite, bei Rissen mit begrenzter Risslänge in der Regel verbunden mit Zunahme der Risslänge, ggf. Kombination aus zyklischem Verhalten mit langfristigem Trend zunehmender Rissbreite: <ul style="list-style-type: none"> • progressiv / beschleunigend • gleichbleibend • stabilisierend 	Langfristige Gebirgslast Lastumlagerung, Talzus Schub, Hangkriechen, Quellen/Schwellen	<u>Tragfähigkeit:</u> Tragreserven werden durch nachdrängend und zunehmende äußere Belastung aufgezehrt. Beschleunigender Trend kann Hinweis auf bevorstehende Umlagerung oder Versagen sein <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Gefährdung durch potenziell herabfallende Bruchstücke zufolge zunehmender Teilbeweglichkeit und Sekundärrissbildung prüfen

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
P4 Flankenzustand	P4.1 Flanken ausgebrochen / ausgefranst	<p>Schnitt über Bauteiltiefe:</p>  <p>Ansicht Innenleibung:</p>  <p>Beispielfoto siehe Anhang</p>	Die Flanken zeigen an den Kanten kleine Ausbrüche und Abplatzungen.	Hinweis auf meist zyklisches Öffnen und Schließen des Risses	<p><u>Tragfähigkeit:</u> Evt. progressive Schädigung des Betonquerschnitts.</p> <p><u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Potenzielles Lösen kleinerer Bruchstücke entlang der Rissflanken</p>
	P4.2 Flanken versetzt	 <p>Beispielfoto siehe Anhang</p>	Bauteiloberflächen auf beiden Seiten des Risses sind zueinander versetzt.	Hinweis auf erhöhte Teilbeweglichkeit bei Trennrissen, nachdrängende Schubbeanspruchung	<p><u>Tragfähigkeit:</u> Bei tunnelparallelem (längslaufendem) Rissverlauf potenzielles Schubversagen des Gewölbes; potenzielles Herausfallen von Schollen, welche durch den Rissverlauf und Blockfugen umschrieben werden</p> <p><u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Potenzielles Lösen kleinerer Bruchstücke aus Rissflanken bis hin zu Schollen, welche durch den Rissverlauf und Blockfugen umschrieben werden, prüfen</p>

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
P5 Feuchtezustand des Risses	P5.1.1 dauerhaft wasserführend	Beispielfoto siehe Anhang	Permanenter Wasserzutritt (feucht, tropfend, rinnend bis schießend) durch Riss ggf. begleitet durch Schimmelbildung.	Schaden in der Abdichtung, mangelhafte Transmissivität bergseits der Abdichtung und/oder verlegte Drainagen, ggf. lokal erhöhter Wasserdruck	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei lokalem Aufbau eines Wasserdrucks ggf. beeinträchtigt. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Beeinträchtigung durch Tropfwasser, Wasser auf betriebsrelevante Tunnelausrüstung oder Fahrbahn/Fahrbahnweg; im Frosteinwirkungsbereich Gefahr durch Eisbildung (Eiszapfen und Vereisung Fahrbahn). Gefährdung durch herabfallende Betonstücke zufolge Frostsprengdruck in Rissen und Fugen.
	P5.1.2 zeitweise wasserführend		Temporärer oder zeitweilige Wasserzutritt (feucht, tropfend, rinnend bis schießend) durch Riss (z.B. Hinweis auf durch Verfärbungen, Sinterspuren) ggf. begleitet durch Schimmelbildung.		
	P5.2 Sinter	Beispielfoto siehe Anhang:	Aussinterung wassergelöster Minerale, somit in der Regel stets in Kombination mit zumindest zeitweiliger Wasserführung des Risses	Schaden in der Abdichtung, mangelhafte Transmissivität bergseits der Abdichtung und/oder verlegte Drainage, ggf. lokal erhöhter Wasserdruck; Bergwässer mit erhöhtem Sinterpotential ggf. auch in Kombination mit zementgebundenen Baustoffen (z.B. Spritzbeton kurz nach Baufertigstellung	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei lokalem Aufbau eines Wasserdrucks zufolge mangelnder Druckentlastung ggf. beeinträchtigt. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Potenziell abnehmende Funktionstüchtigkeit der primären und sekundären Entwässerungselemente können zu zunehmenden Wasserzutritten im Fahrraum und im Frosteinwirkungsbereich zu Eisbildung führen. Ggf. Gefährdung durch herabfallende Betonstücke zufolge Frostsprengdruck in Rissen und Fugen.
	P5.3 mit Materialaustrag	-	Austrag von Feststoffen durch das eintretende Wasser	Erosion des anstehenden Gebirges durch konzentriert eintretendes Wasser	<u>Tragfähigkeit:</u> Aufgrund lokal fehlender Bettung ggf. beeinträchtigt. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Beeinträchtigung der Bettung kann zu Verformungen, Rissbildungen und Blockfugenabplatzungen Abplatzungen führen. Darüber hinaus ggf. Beeinträchtigung durch Wasser auf Ausrüstungsteile/Fahrbahnweg und durch Eisbildung.

Eigenschaft	Typ	Bild	Beschreibung	Mögliche Ursache	Relevanz des Rissbildes
P6 Zeitpunkt der Rissentstehung	P6.1 Innerhalb der ersten Stunden bis Tage	-	Häufig als Längsriss in Firste, Radialriss an Ulme oder Sichelriss. (Früher aufgetretene Risse können durch Instandsetzungsmaßnahmen kaschiert sein, sodass diese erst später wieder zutage treten.)	Überschreitung der Zugfestigkeit des jungen Betons als Ergebnis der Abstimmung zwischen Betonrezeptur, Betonierkonzept, Ausschalzeitpunkt und Nachbehandlung (vgl. Hinweise in ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton)	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei Längsrissen bei Rotationen 4-8mrad (1-2mm Rissbreite bei üblichen Schalenstärken) meist unbedenklich, ebenso Radialrisse. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Bei Sichelrissen: ggf. Gefährdung durch potenziell herunterfallende Scholle, sofern diese nicht instandgesetzt werden.
	P6.2 Innerhalb der ersten Monate	-	Häufig als Längsriss in Firste, Radialrisse an Ulme (Früher aufgetretene Risse können durch Instandsetzungsmaßnahmen kaschiert sein, sodass diese erst später wieder zutage treten.)	Wie oben, Risse sind meist bereits im jungen Betonalter angelegt und vergrößern sich aufgrund von Schwinden und Temperaturwechsel	<u>Tragfähigkeit:</u> Bei Längsrissen bei Rotationen 4-8mrad (1-2mm Rissbreite bei üblichen Schalenstärken) meist unbedenklich, ebenso Radialrisse. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> Bei Sichelrissen: ggf. Gefährdung durch potenziell herunterfallende Scholle, sofern diese nicht instandgesetzt werden.
	P6.3 Jederzeit während Nutzung / nach mehreren Jahren	-	Bei den beschriebenen typischen Längs- und Radialrisse wird oft eine Zunahme bestehender Risse bzw. ein verzögertes Öffnen angelegter Haarrisse zufolge der hysteretischen Zyklen aus langjährigen Temperaturwechseln beobachtet. Alle anderen Rissphänomene treten in Abhängigkeit des Eintretens der Ursachen auf. (Bereits früher aufgetretene Risse können durch Instandsetzungsmaßnahmen kaschiert sein, sodass diese erst später wieder zutage treten.)	Junger und später Zwang, Bei anderen Ursachen entsprechend den sich zeitabhängig ändernden Randbedingungen (z.B. langfristige Gebirgsumlagerungen)	<u>Tragfähigkeit:</u> In Abhängigkeit vom jeweiligen Rissbild und den jeweiligen spezifischen Randbedingungen zu beurteilen. <u>Gebrauchstauglichkeit:</u> In Abhängigkeit vom jeweiligen Rissbild und den jeweiligen spezifischen Randbedingungen zu beurteilen.

1.3 Rissursachen

Risse können durch vielfältigste Beanspruchungsszenarien verursacht werden, wie in Abbildung 2 illustriert wird.

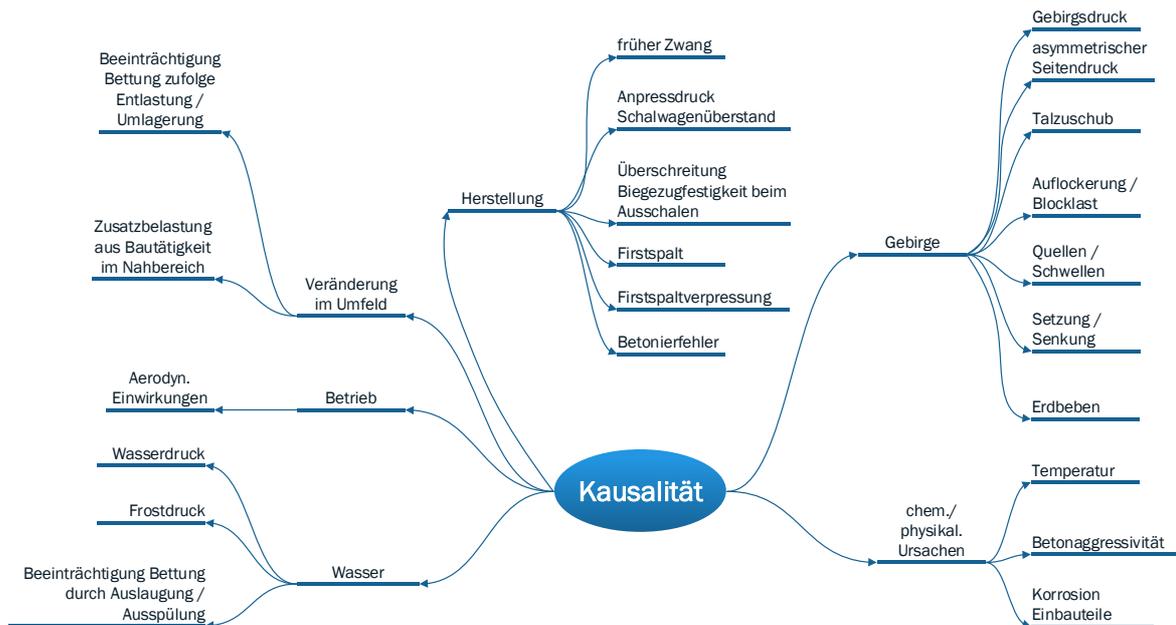
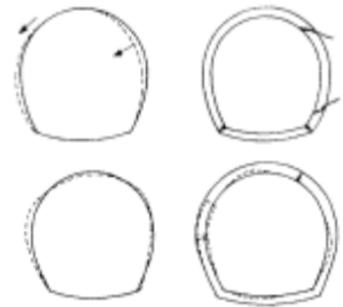


Abbildung 2: Kausalität der Rissbildung

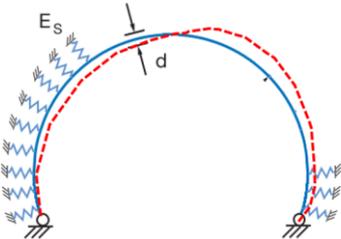
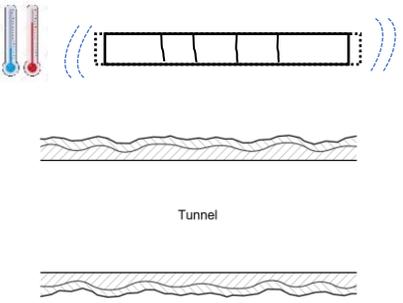
Nachstehende Tabelle 2 beinhaltet einen Katalog möglicher Rissursachen und den dahinterliegenden Mechanismus sowie die damit einhergehenden Phänomene und Auswirkungen. Zum besseren Verständnis der Mechanismen sind in Kap. 2 ausgewählte idealisierte Beanspruchungssituationen beschrieben.

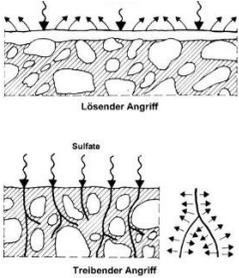
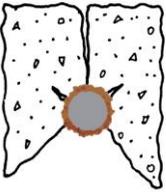
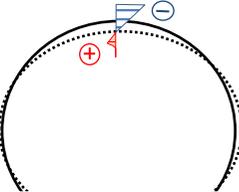
Tabelle 2: Katalog Rissursachen

Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
K1 Gebirge	K1.1 Gebirgsdruck	 <p data-bbox="577 707 703 727">Bildquelle: [B.6]</p>	<p data-bbox="1028 336 1536 405">Druckhafte Gebirgsverhältnisse führen zu einer langfristig zunehmenden Beanspruchung der Innenschale durch einen Gebirgsdruck.</p> <p data-bbox="1028 408 1536 480">Der Gebirgsdruck muss dabei nicht gleichmäßig (radial) auftreten, sondern ist von der Anisotropie des Gebirgsbaus und der vorherrschenden Primärspannung beeinflusst.</p>	<p data-bbox="1556 336 2121 480">Druckhafte Gebirgsdrücke können zu Biege- und Scherbeanspruchungen führen, welche auch mit Formänderungen des Querschnitts (Konvergenzen) einhergehen. Die Folge können <u>Längsrisse als Biege- oder Trennrisse</u> mit oder ohne Versatz sein. Aufgrund der meist zu erwartenden Anisotropie können die Längsrisse über den gesamten Umfang auftreten (Firste, Kämpfer, Ulme).</p> <p data-bbox="1556 483 2121 555"><u>Querrisse und Schrägrisse</u> können Folge der Wechselhaftigkeit in Längsrichtung und des differentiellen Verformungsverhaltens zwischen benachbarten Blöcken sein.</p> <p data-bbox="1556 558 2121 606">Aufgrund hoher Schalenkräfte können <u>Schalenrisse</u> als Folge einer Überlastung der Druckzone auftreten.</p> <p data-bbox="1556 635 2121 707">Wurde der Gebirgsdruck im Bauwerksentwurf unterschätzt und ist kein Ringschluss (Sohlgewölbe, Sohlplatte) vorhanden, sind größere Konvergenzen und ein Ausweichen der Widerlager zu erwarten.</p> <p data-bbox="1556 735 2121 783">Das Systemverhalten ist auch beeinflusst durch allfällig mangelnde Bettung.</p>
	K1.2 Asymmetrischer Seitendruck	 <p data-bbox="577 1278 703 1299">Bildquelle: [B.6]</p>	<p data-bbox="1028 860 1536 959">Einseitiger höherer Seitendruck kann u.a. in Lehnenlage (z.B. bei Kriechhängen oder ausgeprägt bei hangparalleler Schichtung), entlang von Störungen auftreten oder auch bei späteren Baumaßnahmen im Nahbereich des Tunnels.</p>	<p data-bbox="1556 860 2121 1007">Biege- und/oder Scherbeanspruchung, meist in Form von <u>Längsrissen</u> auf der Seite des Seitendrucks (Kämpfer, Ulme), in weiterer Folge auch auf der passiven Seite als Folge der aktivierten Bettung; asymmetrische Querschnittsverformungen und Blockfugenversätze (ggf. gemeinsam mit <u>blockfugenparallelen Radialrissen</u>) sind wahrscheinlich.</p> <p data-bbox="1556 1035 2121 1083">Das o.a. Systemverhalten kann bei mangelnder Bettung markant abweichen.</p>

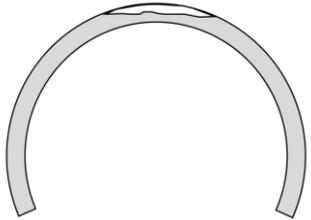
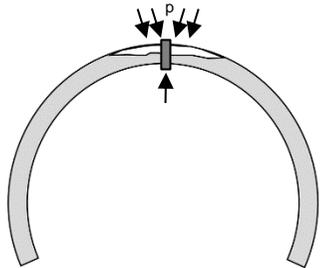
Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
	K1.3 Quellen, Schwellen		Volumenzunahme des Gebirges, meist im Zusammenhang mit dessen Durchfeuchtung unter der der Sohle (Anhydritschwellen, Tonmineralquellen, Pyritoxidation).	Sohlhebungen und bei deren Behinderung (z.B. durch Sohlgewölbe) Quell- bzw. Schwelldrücke in der Sohle. Der Sohldruck kann zu Biegebeanspruchung in Sohle (<u>Längsrisse</u> , in der Regel nicht erkennbar) und Scherbeanspruchungen im Übergang zwischen Sohle und Ulme führen (<u>Trennrisse</u> , ggf. mit <u>Versatz</u>) Die hohen Schalenkräfte können auch Ursache für Abplatzungen und <u>Schalensrisse</u> an den Ulmen sein. Ggf. Beeinträchtigung der Gleislage. Das o.a. Systemverhalten kann bei mangelnder Bettung markant abweichen.
	K1.4 Auflockerungsdruck, Blocklast	<p>Bildquelle: [B.6] (modifiziert)</p>	Kluftkörper relevanter Größe oder generelle Gebirgsauflockerung in der Firste können sich langfristig auf das Gewölbe legen - z.B. als Folge des Ausfalls primärer Stützmittel (Anker)	Biege- und Scherbeanspruchung mit <u>Längs- und Querrissen</u> , welche gemeinsam mit Blockfugen ggf. einzelne Schollen umschreiben. Das o.a. Systemverhalten kann bei mangelnder Bettung markant abweichen.
	K1.5 Talzuschub / Längs- zerrung		Eine anhaltende Kriechende Hangtektonik im Portalbereich führt zu einer Längszerrung des Tunnelquerschnitts.	<u>Querrisse</u> , bei Kriechhängen mit <u>stetig zunehmenden Rissbreiten</u> . Öffnen der Blockfugen ggf. begleitet durch Blockfugenversatz Ggf. Beeinträchtigung der Gleislage.

Ursachengruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
	K1.6 Setzung / Senkung		Vertikale Setzung des Gebirges unter dem Widerlager/Sohlgewölbe, z.B. zufolge Hangtektonik, Gebirgsentfestigung zufolge Durchnässung oder Erdfall (z.B. zufolge Auslaugung oder Karst)	Ausweichen des Auflagers bzw. der Bettung führt zu einer Umlagerung der Schalenkräfte Richtung der Bereiche mit intakter Lagerung - > <u>Schrägrisse</u> , Blockfugenversätze mit ggf. <u>blockfugenparallelen Querrissen</u> Ggf. Beeinträchtigung der Gleislage.
	K1.7 Erdbeben		Verformung des Untergrundes führen zu einer aufgezwungenen Verformung der Tunnelröhre	Rissbild abhängig von der Intensität und Orientierung des Tunnels zur seismischen Welle. Ggf. Beeinträchtigung der Gleislage.
K.2 Wasser	K2.1 Wasserdruck		Ausfall der Drainagewirkung des primären und/oder sekundären Entwässerungssystems und mangelnde Transmissivität bergseitig entlang der Abdichtung. Der Wasserdruck kann sich entweder allseitig aufbauen (z.B. wenn die Drainagewirkung über eine relevante Tunnellänge verloren geht) oder lokal aufbauen (z.B. über ein lokales Kluftsystem ohne druckentlastende Kommunikation mit dem Drainagesystem)	Bei allseitigem Wasserdruck ist eine reine Normalkraftzunahme in der Regel im Gewölbe nicht in Form von Rissen erkennbar, da Querschnitt überdrückt). Bei lokalen Wasserdrücken ist primär eine lokale Scherbeanspruchung (<u>Trennrisse</u> , ggf. mit <u>Versatz</u>) denkbar. Die Wahrscheinlichkeit von Wasserzutritten in den Fahrraum ist erhöht.

Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
	K2.2 Frostdruck	 <p>Bildquelle: [B.9]</p>	Bei durchnässten Wassertaschen oder laufend Wasserführenden Rissen oder Fugen kann das Abfließen des Wassers durch das fahrraumseitige Abfrieren unterbunden werden und sich in weiterer Folge ein Sprengdruck zufolge des Volumenzunahme beim Übergang des Aggregatzustandes von Flüssig zu Fest) einstellen. Die gehinderte Ausdehnung des Eises in wassergefüllten Hohlräumen (z.B. Risse, Fugenspalt) führt zu einer lokalen Beanspruchung der angrenzenden Bauteile (z.B. Rissflanken).	Lokale Abplatzungen und <u>Ablösungen entlang von Rissflanken und Blockfugen</u> Risiko der Eisbildung im Fahrraum und herabfallender Eisstücke
	K2.3 Beeinträchtigung der Bettung zufolge Auslaugung / Ausspülung		Teilweiser Verlust oder Beeinträchtigung der Bettung des Gewölbes zufolge Auslaugung, Ausspülung bzw. innerer Erosion bei Wasserzutritten	Wasserzutritte mit Materialeintrag in Fahrraum oder in das sekundäre Entwässerungssystem. Umlagerung der Schnittgrößen, v.a. der Biegemomente und Querkräfte zufolge des örtlichen Bettungsverlustes. Das allfällige Rissbild (<u>Längsriss, Radialrisse, Schrägriss, Trennrisse, Biegeriss</u>) ist abhängig vom spezifischen örtlichen Ausmaß des Bettungsverlustes, der Schalengeometrie und von den wirkenden äußeren Lasten (Gebirgsdruck, Blocklasten).
K3 Chemisch- physikalische Ursachen	K3.1 Temperatur		Die wechselnde Temperatureinwirkung auf die Innenschale führt zu entsprechenden Temperaturänderungen in der Schale (gleichmäßig und Gradient). Je nach Portalnähe sind die Temperaturverläufe mehr oder weniger affin zum Tages- und Jahreszeitengang der Außentemperatur. Wenn sich die Temperaturdehnungen nicht einstellen können, kommt es zu Zwangsbeanspruchung, deren Intensität u.a. von der Ebenföchigkeit des Abdichtungsträgers und der Blocklänge abhängt.	Überschreitung der Zugfestigkeit bei Abkühlung und behinderter Dehnung, Einstellung von <u>Querrissen/Trennrissen mit zyklisch veränderlicher Rissbreite</u> . Zusätzliche neue Risse aus Temperatur können auch erst nach vielen Jahren auftreten. Auch bereits vorhandene Längsrisse können zufolge der wechselnden Temperatureinwirkung eine zyklische Rissöffnung aufweisen.

Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
	K3.2 Betonaggressivität	 <p data-bbox="577 667 741 691">Bildquelle: [B.8][B.6]</p>	Entfestigung des Zementsteins zufolge lösenden oder treibenden Angriffs. Mögliche betonaggressive Stoffe sind beispielsweise lösende Kohlensäure im Bergwasser, weiches Bergwasser, treibender Sulfatangriff (Ettringitbildung) oder lösender Sulfatangriff (Thaumasitbildung)	Entfestigung des Betons, ggf einhergehend mit Abschaltungen, <u>Schalenrisse</u> , <u>Netzrisse</u> , <u>Krakeleee</u>
	K3.3 Sprengdruck aus Korrosion von Einbauteilen		Die Volumenvergrößerung der Korrosionsprodukte aus flächiger Korrosion an metallischen Einbauteilen kann zu einem Sprengdruck am umliegenden Beton führen.	<u>Oberflächenrisse</u> in Abhängigkeit von der Lage, Orientierung und Betondeckung der Einbauteile.
K.4 Bauherstellung	K4.1 Überschreitung Biegezugfestigkeit beim Ausschalen		Die aus wirtschaftlichen Gründen erforderlichen kurzen Betonierakte von meist nur 12h bedingen, dass die Biegezugfestigkeit des jungen Betons entsprechend gering ist. Die Innenschale ist zu diesem Zeitpunkt in der Regel nur durch Eigengewicht sowie erhöhte Temperatur zufolge Hydratation beansprucht. Das Eigengewicht bedingt Biegezug in der Firste bei gleichzeitig nur geringer Normalkraft, welche mit Abkühlung noch weiter abnimmt. Die Überschreitung der Biegezugfestigkeit des jungen Betons resultiert in Längsrisse im Firstbereich. Das Ausmaß der Biegezugspannungen ist auch abhängig von der tatsächlichen Schalenstärke (Überprofil) und den Bettungsverhältnissen.	<u>Längsrisse (Biegerisse) im Firstbereich</u> , wobei der Riss oft nicht exakt im Scheitel, sondern meist etwas seitlich versetzt verläuft. Bei entsprechender korrekter Abstimmung des Betonierkonzepts (Betonrezeptur, Baufortschritt, Temperatur) bleibt die Rissbreite in der Regel <1mm. Der resultierende Längsrisse ist innerhalb der o.a. Grenzen bei Abwesenheit weiterer Beanspruchungen unproblematisch. Häufiges Phänomen, welches bei unbewehrten Innenschalen in der Regel systemimmanent ist.

Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
	K4.2 Früher Zwang	<p>Bildquelle: [B.7]</p>	<p>Folgende Effekte führen zu Dehnungen im jungen Beton: Abfließen der Hydratationswärme Schrumpfen (Frühschrumpfen und Trocknungsschrumpfen). Dieses Schrumpfen wird u.a. behindert durch die Verzahnung / Unebenheiten zwischen Außen- und Innenschale oder vorangegangene Betonierabschnitte (z.B. zwischen Sohlgewölbe und Gewölbe).</p> <p>Ergebnis sind Zwangskräfte und Eigenspannungen über den Betonquerschnitt. Die Intensität der Beanspruchung durch frühen Zwang ist u.a. vom Betonierkonzept, der Ebenförmigkeit des Abdichtungsträgers und der Blocklänge abhängig.</p>	<p>Überschreitung der Zugfestigkeit bei annähernd zentrischem Zug (z.B. zufolge Abkühlung) und Einstellung von <u>Querrissen/Trennrissen</u>. Bei mangelhaftem Betonierkonzept und mangelhafter Nachbehandlung auch <u>Oberflächenrisse, Krakelee</u> bis hin zu <u>Schalenspalten</u> aus Ab-schalungen zufolge Eigenspannungszuständen über die Schalendicke.</p>
	K4.3 Anpressdruck Schal- wagenüberstand		<p>Lokale Überbeanspruchung des bereits betonierten Gewölbes beim Ausschalen des Schalwagens des Nachbarblocks, wenn sich dieser beim Ausschalen und Absenken verankert.</p>	<p><u>Sichelförmiger Riss</u> im Ausmaß entsprechend dem Schalwagenüberstand und/oder Abplatzung</p>

Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
	K4.4 Betonierfehler: Nester, Kalte Fugen		Örtliche Schwächung der Schalenintegrität zufolge von Nestern, Entmischungen, Lufteinschlüssen, mangelhafter Verdichtung	Rissbild und sonstige Begleitphänomene abhängig von den spezifischen Randbedingungen
	K4.5 Firstspalt		Eine örtlich reduzierte Schalenstärke im Firstbereich (z.B. zufolge mangelhafter Firstspaltverpressung) reduziert örtlich die Querschnittstragfähigkeit gegenüber äußeren Einwirkungen (Zustand Ausschalen, Montagelasten aus Befestigungen)	Begünstigte <u>Längsrisbildung im Firstbereich</u> , <u>Sichelriss</u> an Blockfuge, sonstige Risse bei Befestigungen in der Firste
	K4.6 Firstspaltverpressung		Örtliche Überlastung zufolge Überschreitung der maximal zulässigen Verpressdrücke bei Firstspaltverpressung	Biege- und Scherbeanspruchung mit <u>Längs- und Querrissen</u> im Nahbereich der Verpressstelle.

Ursachen- gruppe	Typ	Bild	Beschreibung Mechanismus	Mögliche Phänomene und Auswirkungen
K5 Veränderungen im Umfeld	K5.1 Beeinträchtigung der Bettung zufolge Entlastung / Umlagerungen		Teilweiser Verlust oder Beeinträchtigung der Bettung des Gewölbes zufolge Entlastung oder Umlagerungen bei Bautätigkeiten im Nahbereich des Tunnels (z.B. Baugrubenaushub)	Umlagerung der Schnittgrößen, v.a. der Biegemomente und Querkräfte zufolge des örtlichen Bettungsverlustes. Das allfällige Rissbild (<u>Längsriss</u> , <u>Radialrisse</u> , <u>Schrägriss</u> , <u>Trennrisse</u> , <u>Biegeriss</u>) ist abhängig vom spezifischen örtlichen Ausmaß des Bettungsverlustes, der Schalengeometrie und von den wirkenden äußeren Lasten (Gebirgsdruck, Blocklasten). Ggf. Beeinträchtigung der Gleislage.
	K5.2 Zusatzbelastung zufolge Bautätigkeit im Nahbereich		Bei geringer Überlagerung im Lockergestein: Veränderung Oberfläche oder neue Fundamente im Nahbereich des Tunnels	Geänderte/Zusätzliche äußere Belastung der Tunnelschale beeinflussen den Schnittgrößenverlauf. Das allfällige Rissbild (<u>Längsriss</u> , <u>Radialrisse</u> , <u>Schrägriss</u> , <u>Trennrisse</u> , <u>Biegeriss</u>) ist abhängig von der spezifischen Konfiguration der Belastung, der Schalengeometrie und der daraus resultierenden Beanspruchung.
K6 Betrieb	K6.1 Aerodynamische Einwirkungen		kurzfristige, periodische aerodynamische Druck- Beanspruchungen aus dem Verkehr im Fahrraum können reduzieren die Normalkraft im Gewölbe reduzieren; aerodynamische Beanspruchung auf Einbauten und über deren Befestigung auf den Betonuntergrund; In der Regel nur bei Bahntunneln (Hochleistungsstrecken) relevant.	ggf. Fördern des Aufatmens vorhandener <u>Längsrisse</u> , ggf. Fördern der <u>Ausbreitung vorhandener Risse</u> ;

2 TRAGVERHALTEN DER GEBETTETEN INNENSCHALE

2.1 Idealisierte Beanspruchungssituationen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Beanspruchungssituationen sind als idealisierte Schemadarstellungen unter ebenso idealisierten Bedingungen zu verstehen. Im Tragverhalten unter tatsächlichen Bedingungen lassen sie sich je nach Abweichung von den idealisierten Randbedingungen wiederfinden. Da jedoch im Tunnelbau nahezu alle Randbedingungen aufgrund von räumlichen und ggf. auch zeitlichen Streuungen unterliegen, weicht das tatsächliche Verhalten von diesen Basismodellen naturgemäß ab. Bei der Interpretation von Rissbildern und dem Rückschluss auf die dahinterliegenden Beanspruchungen sollte dies stets bedacht werden.

2.2 Tragverhalten in Querschnittsrichtung unter äußeren Einwirkungen

Bei Ortbetoninnengewölben handelt es sich bei der in Österreich üblichen konventionellen Neuen Österreichischen Tunnelbauweise um gebettete Schalen. Äußere Lasten werden vornehmlich in Querschnittsrichtung abgetragen. Im Zusammenhang mit der Gesamtstandesicherheit ist daher das Verhalten des Gewölbes in Regelquerschnittsebene von besonderem Interesse.

Im planmäßigen Idealzustand ist die Schale kontinuierlich gebettet. Sobald sich ein Gewölbe unter äußeren Lasten deformiert oder ovalisiert, werden bei bergwärts gerichteten Verschiebungsvektoren stützende radiale Bettungsspannungen aktiviert. Innenwärts gerichtete Verschiebungen reduzieren bzw. eliminieren hingegen die Bettungsspannungen. Zugspannungen spielen aufgrund der glatten Abdichtungsebene in der Regel keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle, während der Einfluss tangentialer Bettungsreaktionen von der Ebenflächigkeit der Abdichtungsebene bzw. der Kontaktfläche zwischen Außen- und Innenschale abhängt. Auch beeinflusst ein mangelhafter Kraftschluss zwischen Innenschale und Gebirge zufolge eines Spalts, Hohlraums o.ä. sowie die Kompressibilität des Abdichtungssystems zu einem gewissen Grad die Bettung.

Die auf die Schale wirkenden äußeren Lasten setzen sich somit aus den aktiven Anteilen (z.B. Eigengewicht, Auflockerungslast, echter Gebirgsdruck) und den passiven Anteilen der

aktivierten Bettung zusammen. Solange die Stützlinie der äußeren Lasten der Systemlinie des Regelquerschnitts folgen, resultiert im Idealfall eine überwiegende Normalkraftbeanspruchung. Eine unbewehrte Innenschale kann in diesem Fall sehr hohe Lasten aufnehmen. Eine abweichende Stützlinie führt zu einer Biegebeanspruchung, welche zwar Verformungen und wiederum eine stützende Bettungsreaktion auslöst. Ist die Normalkraft gering und der Betonquerschnitt somit unter Biegung nicht überdrückt, wird das Rissmoment bald überschritten. Somit sind Einwirkungskombinationen bei geringem Lastniveau hinsichtlich der Rissbildung kritischer. Die bei unbewehrten Innenschalen in der Regel zu beobachtende und üblicherweise unkritische Längsrissbildung im Firstbereich ist eine unmittelbare Konsequenz aus geringem Lastniveau (nur Eigengewicht der Innenschale) in Kombination mit geringer Betonfestigkeit und -steifigkeit zum Zeitpunkt des Ausschalens.

Statisch betrachtet handelt es sich bei der unbewehrten Innenschale um ein hochgradig statisch unbestimmtes System. Wenn das Rissmoments des Betonquerschnitts überschritten wird, bilden sich ein Längsriss und ein Gelenk aus [10][11]. Die Folge sind weitere Verformungen und die Aktivierung weiterer Bettungsreaktionen. So können äußere Einwirkungen aufgrund der hohen statischen Unbestimmtheit auch nach mehrfacher derartiger Umlagerung aufgenommen werden. Theoretisch ist eine Vielzahl an Gelenken möglich, bevor sich ein kinematisch unverträgliches Versagensbild einstellt. Stark vereinfacht betrachtet, besteht eine Analogie zu einem Mauerwerksgewölbe mit einer Kette zahlreicher Gelenke entsprechend der Anzahl seiner Längsfugen. So ist ein reiner Biegelängsriss auch bei großen Rissbreiten für sich allein betrachtet noch kein Hinweis auf ein bevorstehendes Versagen des Gewölbes. Dieses verhältnismäßig gutmütige Verhalten einer in Querschnittsrichtung biegebeanspruchten gebetteten Schale führt dazu, dass sich Umlagerungen und die Bildung neuer Gelenke durch Längsrisse meist lange vor einem tatsächlichen Versagen bemerkbar machen.

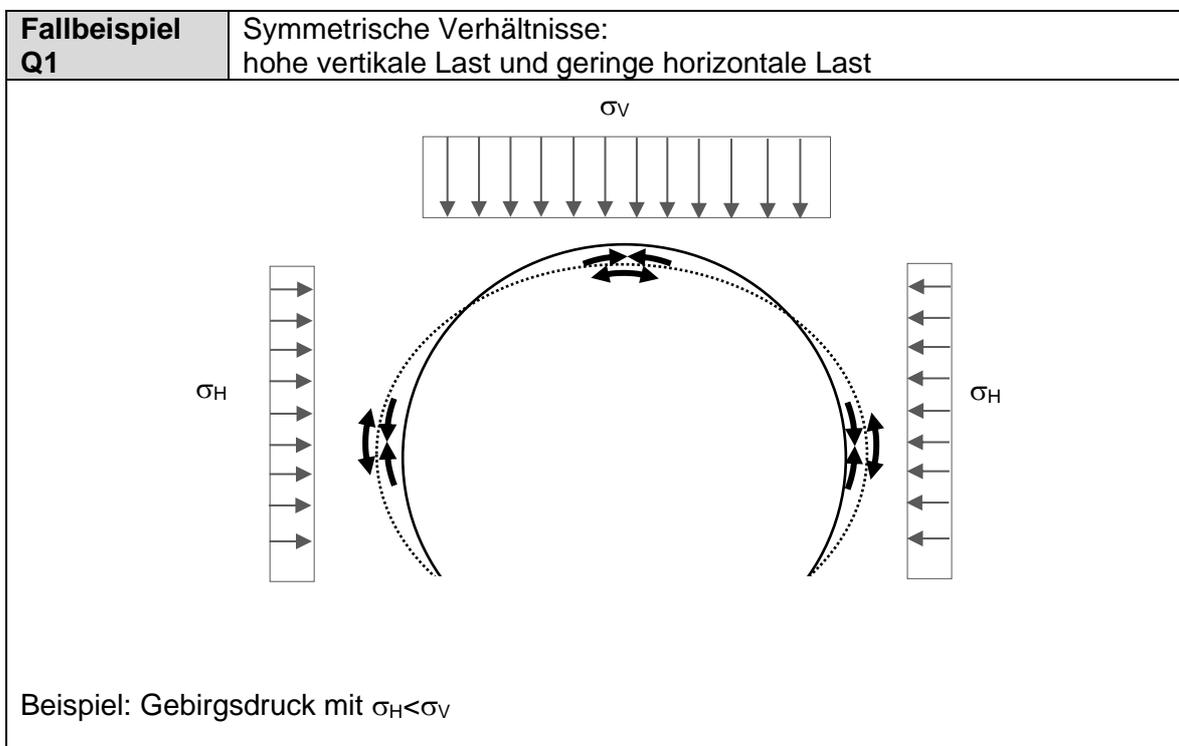
Den möglichen Umlagerungen sind allerdings Grenzen gesetzt durch die begrenzte Rotationsfähigkeit des Gelenks am gerissenen Querschnitt oder die aufnehmbare Druckspannung im verbleibenden ungerissenen Betonquerschnitt. In der Literatur wird die maximale zulässige Rotation des gerissenen Betonquerschnitts oft mit $\omega=4$ mrad angegeben. Bei größeren Rotationen ist zwar nicht zwangsläufig mit einem Tragfähigkeitsproblem verbunden [10], es steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit von Sekundärrissen und Abplatzungen. Die einem Rotationsbetrag entsprechende Rissbreite hängt von der tatsächlichen örtlichen Schalenstärke und der Risstiefe ab. Nach [10] kann einer Schalenstärke von 30 cm eine Grenzzrissbreite von 1,2 mm und einer Schalenstärke von 60 cm eine Grenzzrissbreite von 2,2 mm zugeordnet werden.

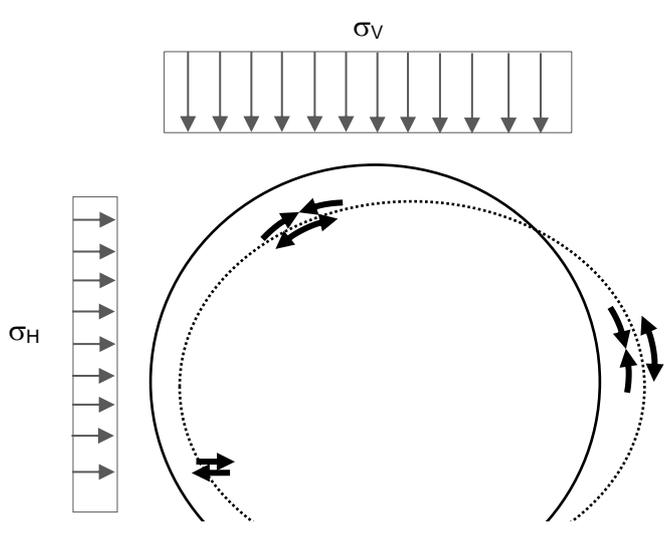
Bei Überschreitung der Schubtragfähigkeit besteht im Gegensatz zur Biegebeanspruchung weniger Umlagerungspotenzial und somit ein geringerer Grad an Vorankündigung.

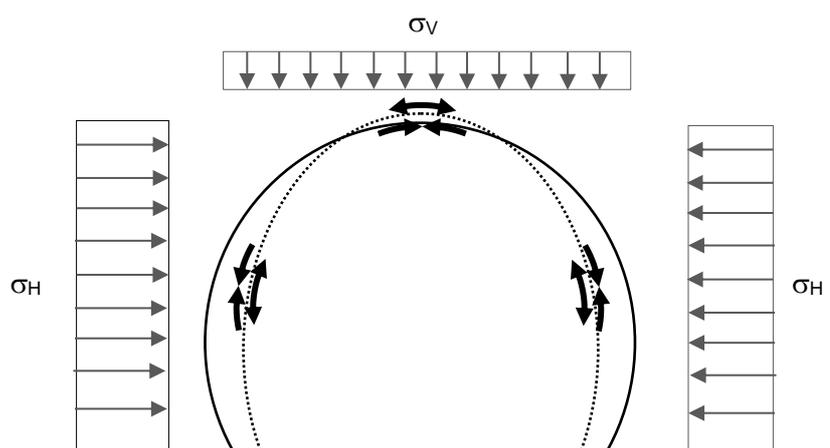
Nachstehend sind ausgewählte Situationen idealisierter Einwirkungssituationen skizziert. Sie unterstellen einen ebenen Spannungszustand und gelten für den vereinfachten Fall, dass die Konfiguration von Last, Bettung und Schalengeometrie in Tunnellängsachse (z.B. mindestens über eine gesamte Blocklänge) konstant ist. In diesen Fällen ist auch das Tragverhalten in Tunnellängsrichtung konstant, d.h. Verformungen, Schnittgrößenverlauf und durchgehende Längsrisse.

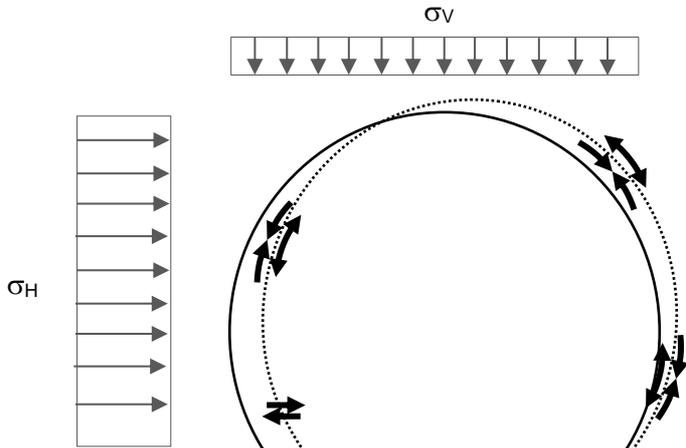
Legende zu nachstehenden Schemata:

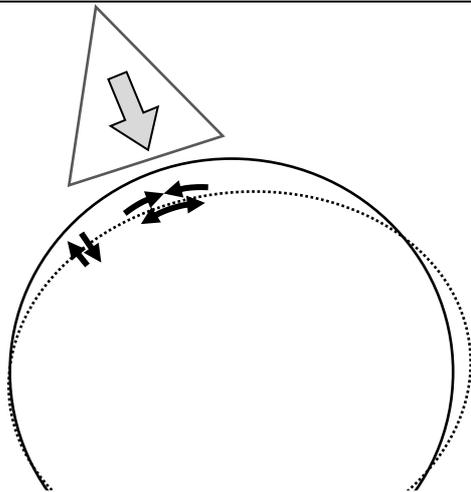
	Schalengeometrie unverformt
	Schalengeometrie verformt unter der gegebenen Beanspruchung
	Biegezugspannungen und mögliche Längsrissbildung
	Biegedruckspannungen, bei hoher Auslastung mögliche Abplatzung
	Scherbeanspruchung, mögliches Schubversagen (schräger Trennriss mit Versatz)



Fallbeispiel Q2	Asymmetrische Verhältnisse: hohe vertikale Last einseitig geringe horizontale Last; oder hohe vertikale Last und einseitig verminderte Bettung
<div style="text-align: center;">  <p>The diagram shows a semi-circular arch. A horizontal bar at the top contains ten downward-pointing arrows labeled σ_v. On the left side, a vertical bar contains ten rightward-pointing arrows labeled σ_H. The arch is shown with a solid line and a dotted line. Curved arrows on the arch indicate internal forces: upward and inward at the top, and downward and outward at the base.</p> </div> <p>Beispiel: asymmetrischer Gebirgsdruck, einseitig verminderte Bettung</p>	

Fallbeispiel Q3	Symmetrische Verhältnisse: geringe vertikale Last höhere horizontale Last
<div style="text-align: center;">  <p>The diagram shows a semi-circular arch. A horizontal bar at the top contains ten downward-pointing arrows labeled σ_v. On both the left and right sides, vertical bars contain ten arrows pointing inward toward the arch, labeled σ_H. The arch is shown with a solid line and a dotted line. Curved arrows on the arch indicate internal forces: downward and inward at the top, and upward and outward at the base.</p> </div> <p>Beispiel: Gebirgsdruck mit $\sigma_H > \sigma_v$</p>	

Fallbeispiel Q4	asymmetrisch Verhältnisse: geringe vertikale Last einseitig höhere horizontale Last oder einseitig verminderte Bettung
<div style="text-align: center;">  </div> <p>Beispiel: einseitig erhöhter Gebirgsdruck (Lehnenlage), einseitig beeinträchtigte Bettung</p>	

Fallbeispiel Q5	Lokal konzentrierte Last in Firste oder Kämpfer
<div style="text-align: center;">  </div> <p>Beispiel: Lokale Blocklast aus ungünstigem Trennflächenverschnitt</p>	

Fallbeispiel Q6	Stark geneigte Hautspannung und verminderte Bettung normal zur Hauptspannung
Beispiel: Tunnel Lehenlage mit hangparallelen aktiven Gleitflächen/Schichtflächen	

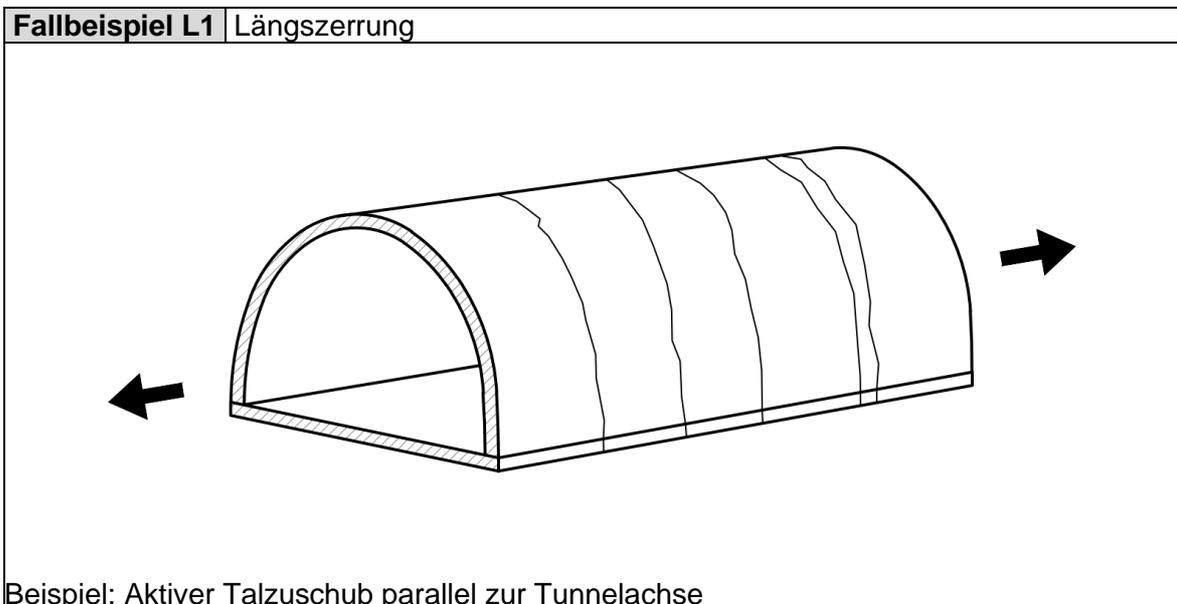
Fallbeispiel Q7	Sohlendruck aufgrund behinderter Volumenausdehnung des Gebirges
Beispiel: Quelldruck / Schwellendruck auf Sohlgewölbe	

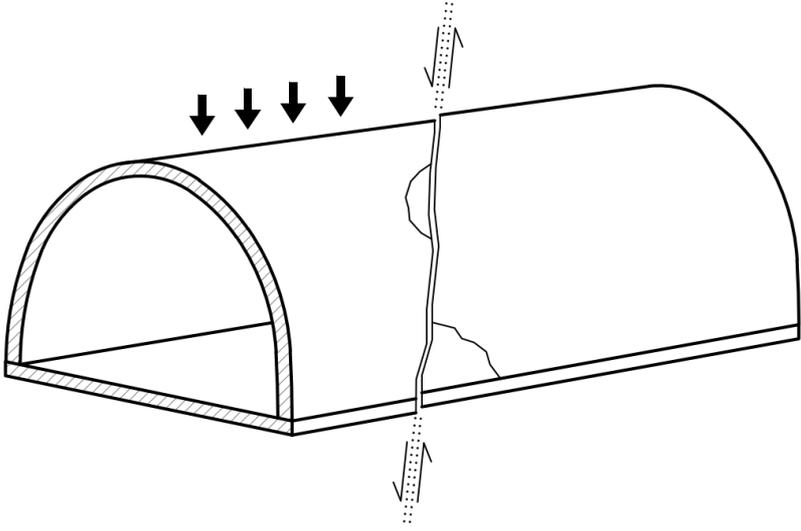
2.3 Tragverhalten in Längsrichtung unter äußeren Einwirkungen

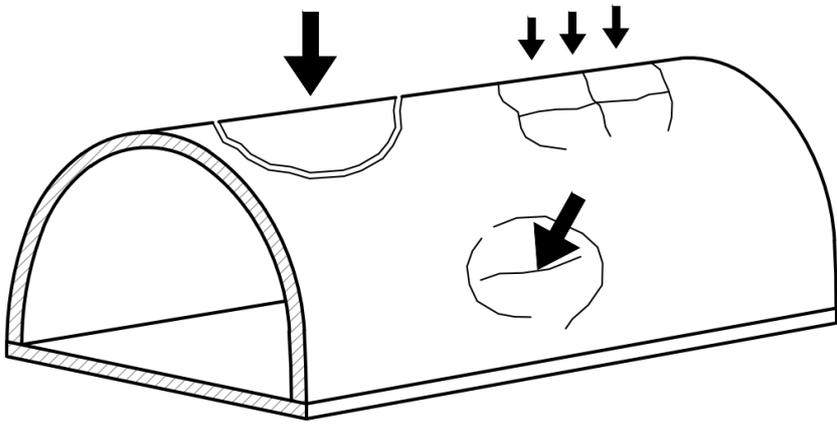
Die Tunnelschale unterliegt meist auch Beanspruchungen in Längsrichtung. Einwirkungen, Bettungsverhältnisse und Schalenstärke können in Tunnellängsrichtung mehr oder weniger veränderlich sein. Eine Auswahl idealisierter Einwirkungssituationen, welche Beanspruchungen in Tunnellängsrichtung hervorrufen, sind in nachstehenden Tafeln illustriert.

Sie können auch innerhalb eines Blocks variieren. Es wäre beispielsweise denkbar, dass an einem Blockende eines der obigen Querschnittsszenarien zutrifft, während am anderen Ende desselben Blocks ein anderes Querschnittsszenario vorherrscht. Die Folge sind Zwängungen zufolge der Unverträglichkeiten zwischen den jeweiligen Tragwerksreaktionen. Wenn diese Sekundärspannungen die Zugfestigkeit überschreiten, kommt es zu weiteren Rissbildungen, welche die Verformungsunverträglichkeit des ungerissenen Querschnitts ausgleichen.

Im Gegensatz zu reinen Mauerwerks- oder Spritzbetonausbauten ist bei unbewehrten Ortbetoninnenschalen deren Tragverhalten Längsrichtung durch die Segmentierung ihrer Blockfugen beeinflusst, über welche in der Regel kaum Zugspannungen übertragen werden.

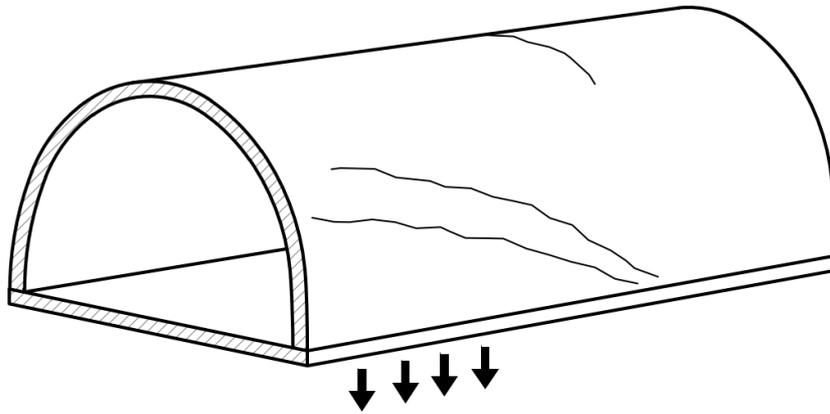


Fallbeispiel L2	Abscheren
 <p data-bbox="225 958 1005 987">Beispiel: Tunnel quert eine aktive Trennfläche oder Störung</p>	

Fallbeispiel L3	Lokale Last oder Last mit begrenzter Längserstreckung
 <p data-bbox="225 1684 1402 1747">Beispiele: Einzelne Blocklast, unsachgemäß hoher Druck bei Firstspaltverpressung, lokal wirksamer Kluftwasserdruck</p>	

**Fallbeispiel
L4**

Ungleichmäßige Setzung



Beispiel: Differentielle Setzung unter dem Sohlgewölbe (aktive Rutschmasse, Karst, Aufweichung der Sohle)

3 INTERPRETATION VON RISSBILDERN

3.1 Zuordnung Rissphänomene zu Ursachen und Mechanismen

Wie die obigen Ausführungen verdeutlichen, kann selbst unter idealisierten Beanspruchungsszenarien ein Rissphänomen von mehreren Schadensmechanismen verursacht sein. Rissphänomene und Rissursache stehen somit in keiner eindeutigen 1:1-Beziehung. Mehrere Rissursachen können auch in Kombination auftreten und sich gegenseitig beeinflussen, wie z.B. die Interaktion zwischen Gebirgslast und Bettung. Auch kann nicht davon ausgegangen werden, dass Rissbilder anhand einer einfachen Superposition verschiedener Rissursachen rekonstruierbar sind, da ein Schadensbild aufgrund des nichtlinearen Systemverhaltens pfadabhängig, also beeinflusst von der Belastungsgeschichte, sein kann. Die früher wirksame Rissursache (z.B. Längsrissbildung in der Firste zum Zeitpunkt des Ausschalens) ist möglicherweise nicht mehr vorhanden, wirkt sich aber durch das dadurch angelegte Gelenk auf die Schnittgrößenverteilung aus späteren Einwirkungen (z.B. langfristig zunehmender Gebirgsdruck) weiterhin aus.

Die in den obigen Kapiteln 1.2, 1.3 und 2 geschilderten Einzelursachen und Einzelphänomene können daher lediglich als Indizien und Hilfestellung bei der Interpretation eines Rissbildes dienen.

Für die Interpretation eines Rissbildes und den Rückschluss zum rissauslösenden Mechanismus ist daher die Einbeziehung der Gesamtheit aller Phänomene und Randbedingungen erforderlich. Es sind dies unter anderem:

- Geologie
- Bauwerksgeometrie (Schalenstärke)
- Bauherstellung und Betoneigenschaften
- Verformungen
- Abplatzungen
- Bergwasserverhältnisse und Wasserzutritte
- obertägige Beobachtungen
- Temperaturregime
- betriebliche Randbedingungen
- zeitliche Entwicklung der jeweiligen Schäden

Die Interpretation von Rissbildern unter Einbeziehung aller bekannten Informationen wird im Folgenden anhand zweier Beispiele veranschaulicht.

3.2 Rissinterpretation – Beispiel 1

3.2.1 Eckdaten zum Bauwerk

Es handelt sich um einen zweigleisigen, rd. 2.000 m langen Eisenbahntunnel. Der Tunnel wurde Ende der 1990-iger Jahre errichtet. Der Vortrieb erfolgte sowohl abschnittsweise im Lockergestein als auch im Festgestein. Im Festgesteinsabschnitt beträgt die planmäßige Stärke der unbewehrten Innenschale 30 cm.

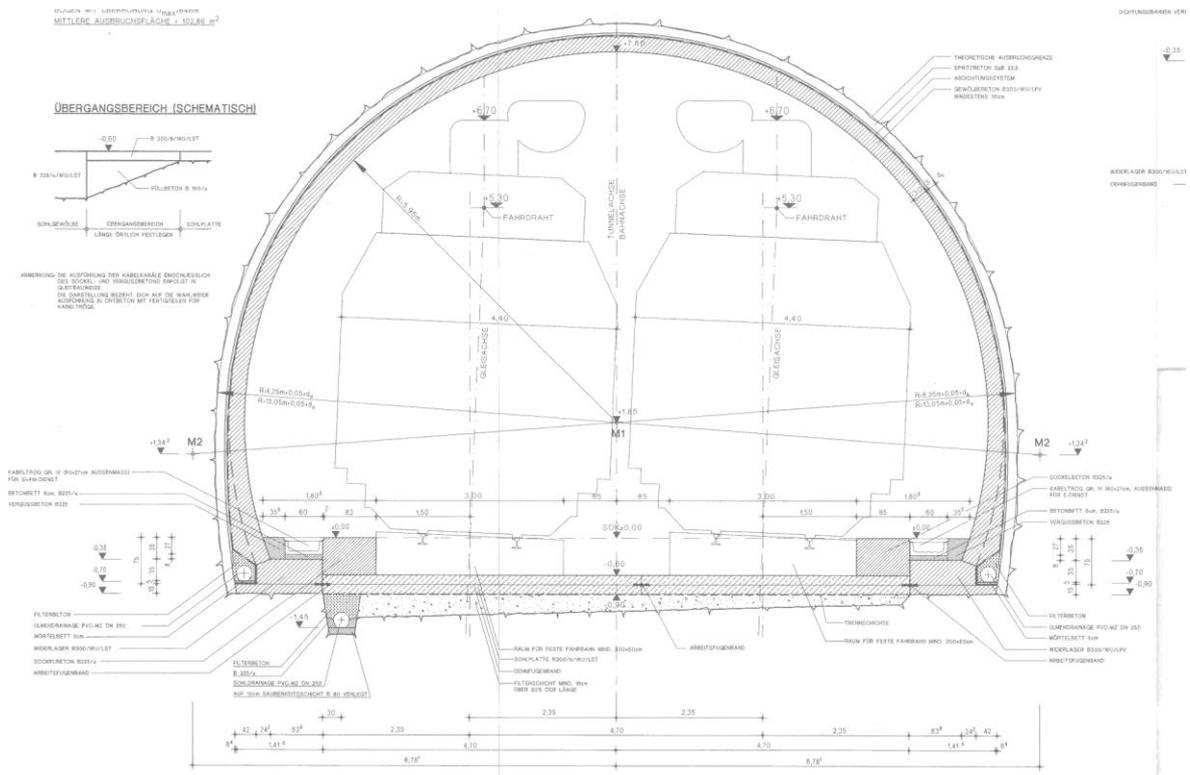


Abbildung 4: Regelquerschnitt Fallbeispiel 1 [B.1]

3.2.2 Rissbild

Das typische Rissbild im Festgesteinsabschnitt ist in nachstehendem Auszug aus dem Laserscan erfasst, welcher ca. 20 Jahre nach Inbetriebnahme erstellt wurde.

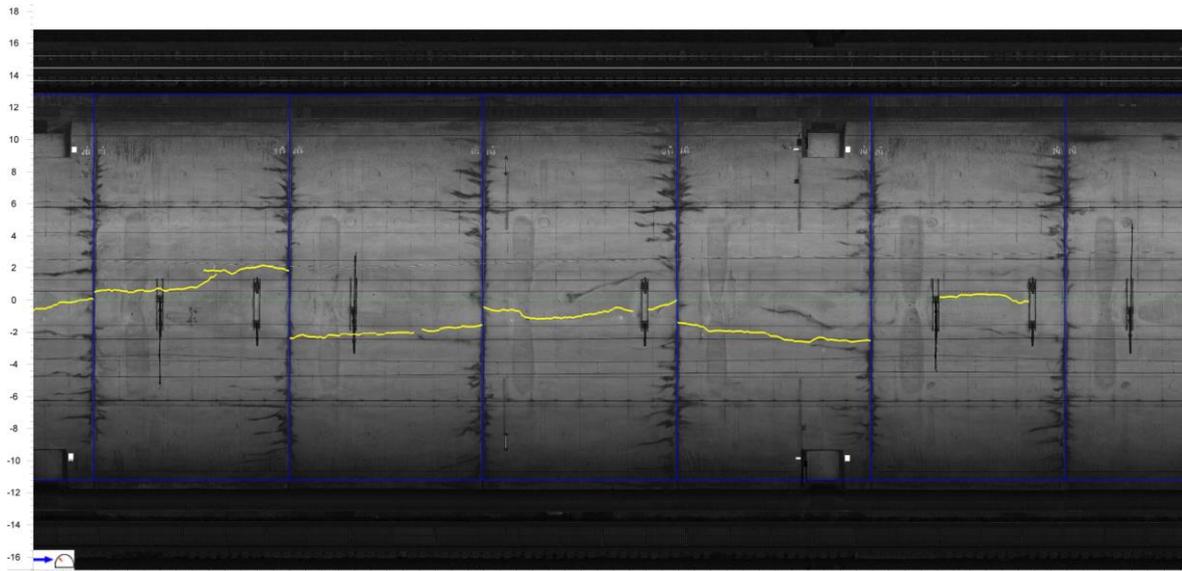


Abbildung 5: Rissaufnahme Fallbeispiel 1 [B.1]

Rissverläufe an Innenlaibung:

- durchgehender Längsriss in Firste (P1.1.1)

Rissverläufe im Bauteilinneren:

- Biegerisse (P.2.1.1)

Rissbreiten:

- Längsrissbreiten 1,0-1,5 mm, statisch ohne Veränderung (P3.1)

Flankenzustand:

- Rissflanken generell nicht versetzt und nicht ausgebrochen

Wasserführung:

- generell trockene Verhältnisse, keine Sinterspuren

Zeitpunkt der Rissentstehung:

- Erstdokumentation der Längsrisse 20 Jahre nach Inbetriebnahme (gelb in obiger Abbildung), die Risse sind möglicherweise bereits früher aufgetreten.

3.2.3 Weitere Beobachtungen

- keine weiteren Besonderheiten oder Auffälligkeiten wie Verformungen, Blockflankenversätze, Abplatzungen u.dgl.
- Lt. Baugeologischer Dokumentation liegt der Tunnelquerschnitt in frischem bis gering verwittertem Kristallin.

3.2.4 Interpretation

Wahrscheinliche Mechanismen: Die Längsrissbildung im Firstbereich ist ein typisches, teils systemimmanentes Phänomen der unbewehrten Innenschale zufolge der Überschreitung der Biegezugfestigkeit des jungen Betons beim Ausschalen -> Ursache K4.1.

Aufgrund des Fehlens weitere Phänomene oder sonstiger Hinweise auf andere Mechanismen sowie aufgrund der begrenzten Rissbreite unterhalb der Rotationsfähigkeit des Betonquerschnittes (keine Sekundärrissbildung P2.1.2) und der stabilen Verhältnisse (keine Risszunahme, keine Flankenversätze) wird das Rissbild im gegenständlichen Fall als unverdächtig eingestuft, solange keine weitere Veränderung verzeichnet wird.

3.3 Rissinterpretation – Beispiel 2

3.3.1 Eckdaten zum Bauwerk

Es handelt sich um einen zweigleisigen, ca. 250 m langen Eisenbahntunnel. Er besteht in der gegenwärtigen Form seit ca. 30 Jahren und entstand aus einer Profilaufweitung eines älteren Tunnels mit Mauerwerksausbau.

Der Tunnel wurde im Festgestein (Phyllit) in Lehnenlage entlang einer Talflanke vorgetrieben. Die Überlagerung beträgt bis zu vier Tunneldurchmesser über Firste.

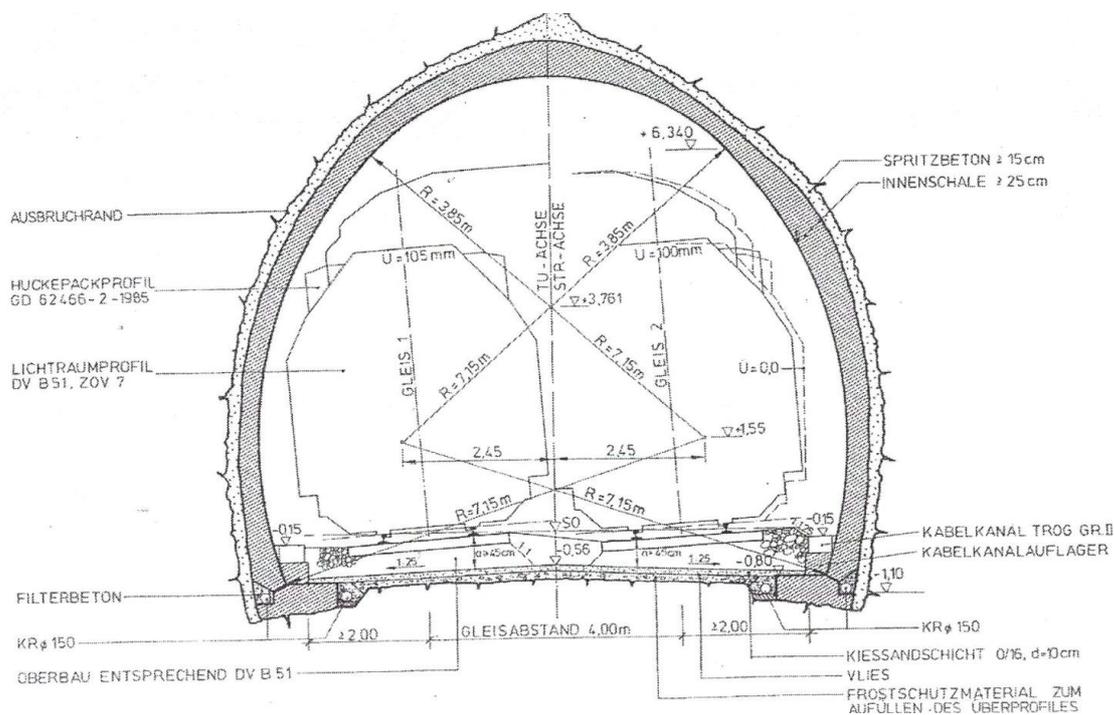


Abbildung 6: Regelquerschnitt Fallbeispiel 2 [B.1]

3.3.2 Rissbild

Das Rissbild ist in nachstehendem Laserscan erfasst. Die gelben Risse stammen aus der ersten Aufnahme ca. 20 Jahre nach Inbetriebnahme, die roten Risse aus einer Folgeaufnahme fünf Jahre später.

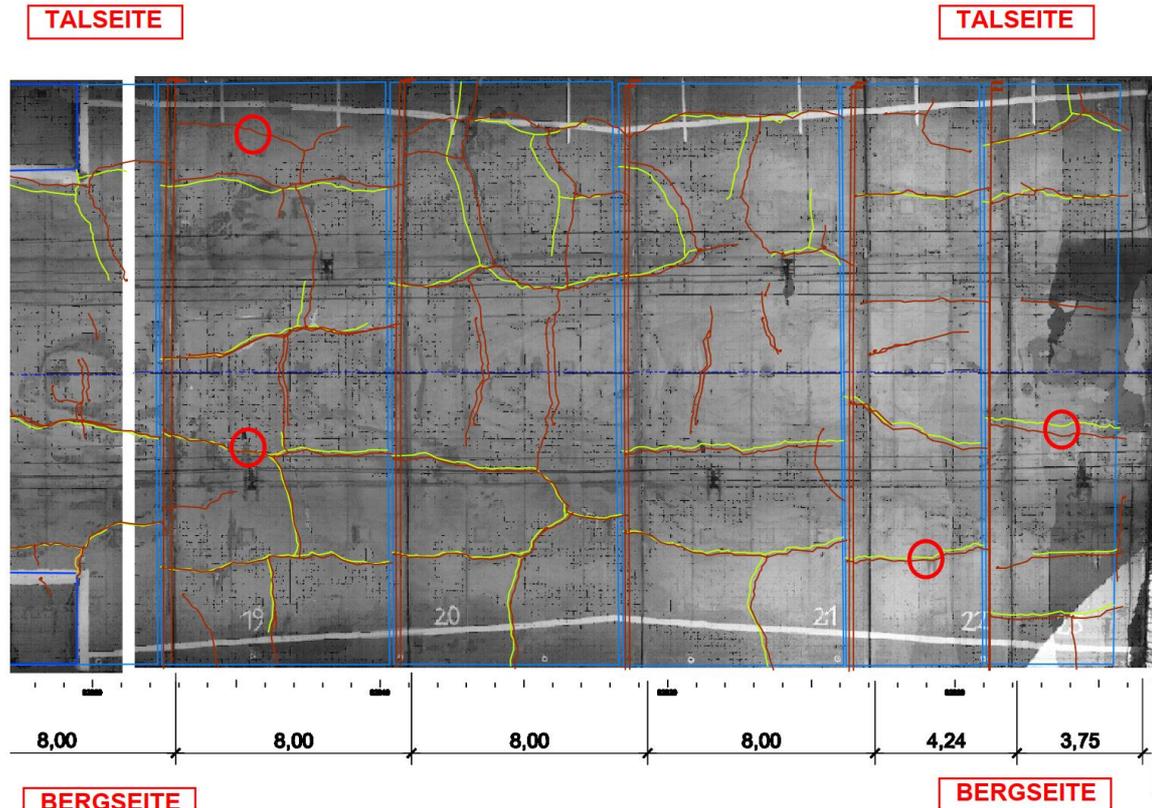


Abbildung 7: Rissaufnahme Fallbeispiel 2 [B.1]

Rissverläufe an Innenlaibung:

- durchgehende Längsriss in Firste (P1.1.1), Kämpfer und bergseitiger Ulme (P1.1.2)
- Radialrisse in tlw. Blockmitte und tlw. Drittelpunkten (P1.2.1), teilweise umlaufend (P1.2.2)

Rissverläufe im Bauteilinneren:

- Risswurzel der Längsrisse wurde über Kernbohrung im Bereich der Systemlinie erkundet; Biegerisse (P.2.1.1)
- Querrisse sind orthogonale Trennrisse (P2.2.1)

Rissbreiten:

- Längsrissbreiten > 2,0mm mit langjährig gering zunehmendem Trend (P3.3)

Flankenzustand:

- Rissflanken generell nicht versetzt und nicht ausgebrochen. Lediglich im Bereich der Blockfugen vereinzelte Ausfransungen (P4.1) und Versätze (P4.2) vorhanden

Wasserführung:

- generell trockene Verhältnisse, keine Sinterspuren

Zeitpunkt der Rissentstehung:

- Erstdokumentation der Längsrisse 20 Jahre nach Inbetriebnahme (gelb in obiger Abbildung)
- Zunahme der Risse nach weiteren 5 Jahren (rot in obiger Abbildung)

3.3.3 Weitere Beobachtungen

- Geodätische Verformungsmessung im Tunnel: talwärts gerichtete Verformung der bergseitigen Firste und Kämpfer im Ausmaß von 0,3-0,7 mm/Jahr
- Obertägiges Monitoring von Bauwerken an der Oberfläche zeigt kriechende talwärtige Hangbewegung
- Lt. Baugeologischer Dokumentation liegt der Tunnelquerschnitt in Phylliten mit wirksamen hangparallelen Schieferungsflächen und talwärtiger Kriechtendenz.
- Die Innenschalenstärke ist stark schwankend mit meist starkem Überprofil/Überstärke in der Firste und bergseitigem Kämpfer (bis 1m) und geringeren Stärken (>25cm) an der talseitigen Ulme.
- Die Hinterpackung des früheren Mauerwerksgewölbes wurde in der Firste nicht durchgehend vollständig entfernt oder verpresst.
- Zwischen Außen- und Innenschale wurde lediglich ein Vlies, jedoch keine Abdichtungsbahn eingebaut.

3.3.4 Interpretation

Wahrscheinliche Mechanismen: Längsrissbildung ist geprägt von bergseitigem, langjährig zunehmendem einseitigem Gebirgsdruck -> Basismechanismus Q6 bzw. Ursache K1.2.

Der gute Verbund zwischen Innenschale und Außenschale zufolge der fehlenden Abdichtung führt zu einer Empfindlichkeit der Schale gegenüber Zwangsbeanspruchungen und begünstigen Radialrissbildung zufolge der hohen Temperaturwechsel (kurzer Tunnel, K3.1). Es ist zu vermuten, dass sich v.a. die Radialrisse zyklisch öffnen und schließen (P3.2).

Die stark variable Schalenstärke bewirkt einen unstetigen Verlauf der Systemlinie und somit Biegebeanspruchungen bereits unter Eigengewicht, welche – begünstigt durch den guten Verbund – zu Rissbildung in Längs- und Querrichtung führen können.

Aus dem angetroffenen Rissbild und den sonstigen Beobachtungen erscheint eine langfristige Abnahme der Tragfähigkeit wahrscheinlich. Bei anhaltendem Talzusub wird die Rotationsfähigkeit entlang der Längsrisse langfristig aufgezehrt. Die Gebrauchstauglichkeit könnte durch Sekundärrissbildung (P2.1.2) und durch sich verbindende Risse (P1.5), welche bereits jetzt geschlossene Flächen/Betonschollen umschreiben, zukünftig beeinträchtigt werden.

4 IDENTIFIKATION RELEVANTER RISSPHÄNOMENE

4.1 Relevanz der Einzelphänomene

Ein Riss kann in zweierlei Hinsicht eine Relevanz für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Gewölbes haben. So kann einerseits vom Phänomen an sich und unabhängig vom dahinterliegenden rissverursachenden Mechanismus bereits eine Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit ausgehen (z.B: zufolge herausfallender Betonstücke), andererseits kann das Einzelphänomen ein Hinweis auf einen anlaufenden beanspruchungsrelevanten Umlagerungsprozess im statischen System sein. Bei den nachstehenden Einzelphänomenen der Tabelle 3 ist eine derartige entsprechende Relevanz für Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit auch ohne nähere Kenntnisse des dahinterliegenden Mechanismus denkbar. Auf diese Phänomene ist daher besonderes Augenmerk zu legen, wobei eine potenzielle Gefährdung aber stets im spezifischen Einzelfall zu beurteilen ist.

Tabelle 3: Einzelphänomene mit allfälliger möglicher Relevanz auf Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit

Nr.	Einzelphänomen	allfälliges Gefährdungsbild
P1.2.3	Radialrisse an Blockfugen	Herausfallen von Betonbruchstücken
P1.3	Sichelförmiger Riss an Blockfuge	Herausfallen von Schalenteilen
P1.5	Verteilte Risse	Herausfallen von Schalenteilen
P2.1.2	Biegeriss mit Sekundärrissbildung	Herausfallen von Betonbruchstücken
P2.2.2	Trennriss schräg	möglicher Hinweis auf örtliches Scherversagen und potenzielles Herausfallen von Schalenteilen
P2.3	Abschalung / Schalenriss	Herausfallen von Betonbruchstücken
P3.2	zyklisch veränderliche Risse	Herausfallen von Betonbruchstücken
P3.3	stetig veränderliche Risse	Herausfallen von Betonbruchstücken
P4.1	Flanken ausgefranst	Herausfallen von Betonbruchstücken
P4.2	Flanken versetzt	Hinweis auf örtliches Scherversagen und potenzielles Herausfallen von Schalenteilen
P5.1.1	Wasserführung dauerhaft	potenzielle Beeinträchtigung von betriebsrelevanten Ausrüstungsteilen
P5.1.2	Wasserführung zeitweise	potenzielle Beeinträchtigung von betriebsrelevanten Ausrüstungsteilen
P5.3	mit Materialaustrag	möglicher Hinweis auf Beeinträchtigung der Bettung
P6.3	Rissentstehung während Nutzung / nach Jahren	möglicher Hinweis auf anlaufenden oder anhaltende Umlagerungsprozesse

Die Einzelphänomene sind zudem Indikatoren für den verursachenden Mechanismus (vgl. Kap. 1.3 und Kap. 2), welcher mal von größerer, mal von geringerer Bedeutung für das Tragwerk sein kann. Der Mechanismus und seine Relevanz sind stets im Einzelfall und im Kontext des jeweiligen Bauwerks zu interpretieren und zu bewerten. Im Allgemeinen lassen sich Längsrisse häufig auf Mechanismen der Gruppe Q (Tragverhalten im Querschnitt, vgl. Kap. 2.2) zuordnen, während radiale Risse oft mit Basismodellen der Gruppe L (Tragverhalten in Längsrichtung, vgl. Kap. 2.3) assoziiert sind.

Die Rissmatrix in Anhang 2 stellt mögliche Zuordnungen zwischen Mechanismen und Rissphänomenen her und kann als Hilfsmittel bei einem ersten Schritt der Interpretation eines Rissbildes dienen (vgl. Kap. 3).

4.2 Relevanz von Risskombinationen

Rissphänomene an unbewehrten Tunnelinnenschalen treten in der Regel nicht isoliert sondern in Kombination mit weiteren Rissphänomenen auf. Für eine Interpretation des dahinter liegenden Mechanismus und in weiterer Folge dessen Relevanz für die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit des Gewölbes ist über das reine Rissbild hinaus die Heranziehung weitere Phänomene und Daten unabdingbar (vgl. Kap. 3.1).

Auf Grundlage der Kenntnis des Tragerhaltens der gebetteten Innenschale (vgl. Kap. 2) lässt sich jedoch – ohne Anspruch auf Vollständigkeit - eine Auswahl potenziell relevanter Kombinationen von Rissphänomenen aufstellen. Da unterschiedliche Mechanismen zu ähnlichen Rissbildern führen können, vermögen diese Rissbildkombinationen keine eindeutige Zuordnung zu einem bestimmten Mechanismus herzustellen, vielmehr indizieren sie lediglich die Möglichkeit eines einen potenziell relevanten Mechanismus. Die Sichtung einer Rissaufnahme auf potenziell relevante Risskombinationen ermöglicht es, vorläufige Verdachtsstellen zu aufzuzeigen, welche einer näheren Beurteilung bedürfen. Da es sich hier im Grunde um eine vergleichende Rissbildauswertung mit den als Schablonen dienenden Kombinationen handelt, wäre dieser Schritt als automatisierter Prozess vorstellbar. Unabdingbar ist jedoch jedenfalls eine sachverständige objektspezifische Interpretation und Beurteilung des Rissbildes im Einzelfall, wobei sich die rissbildgestützte Anfangsindikation auf Relevanz sich dabei entweder erhärtet oder sich möglicherweise auch entkräftet. In jedem

Fall ist aber zu unterstreichen, dass die Anwendung einer derartigen generischer „Verdachtsschablone“ keinesfalls eine ingenieurmäßige Beurteilung und Interpretation im Einzelfall ersetzt, sondern diese bestenfalls unterstützen kann.

Eine Auswahl potenziell relevanter Risikombinationen ist in Anhang 3 enthalten und erläutert (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

5 AUSWAHL RELEVANTER RISSBILDER FÜR MONITORING HINTER VERKLEIDUNGEN

Gegenstand dieses Kapitels ist die Auswahl bzw. Identifikation jener Mechanismen, die bei Installation einer späteren Verkleidung nicht bereits offensichtlich sind oder erst später auftreten können. Es kann davon ausgegangen werden, dass Schäden aus frühem Zwang oder aus der Bauherstellung in der Regel erhoben und beurteilt werden, zumal vor Installation einer später aufgetragenen Verkleidung für Brand- oder Lärmschutz zweckmäßigerweise eine eingehendere Inspektion der betreffenden Blöcke erfolgt. Derartige bekannte Mechanismen sind beispielsweise früher Zwang, Schäden aus der Bauherstellung (Anpressdruck Schalwagen, Firstspalt/-verpressung, Betonierfehler) sowie bekannte Einwirkungen wie Temperatur.

Von Interesse im Rahmen der gegenständlichen Fragestellung verbleiben somit jene Mechanismen, die sich erst später entwickeln und deren Anlaufen und Auswirkungen an der Laibung zufolge der Verkleidung nur erschwert oder zunächst gar nicht erkennbar sind. Es sind dies vor allem Mechanismen der Ursachen Gruppe K1 (Gebirge) und K2 (Wasser) (vgl. Tabelle 2 in Kap. 1.3), u.a.:

- Gebirgsdruck
- Auflockerungsdruck/Blocklast
- Quelldruck
- Wasserdruck
- Talzus Schub, Längszerrung
- Setzung, Senkung

Die Kombination aus den möglichen Rissphänomenen aus später aktivierten Mechanismen und aus Rissphänomenen, die für sich allein betrachtet als tragfähigkeits- oder gebrauchstauglichkeitsrelevant bewertet werden, ergibt jene Auswahl an Rissbildern, deren Erfassung durch das Rissmonitoring anzustreben ist.

Die Auswahl basiert auf der Rissmatrix in Anhang 2, wo jedem Mechanismus wahrscheinliche und mögliche Rissphänomene auf Basis der Tabelle 2 zugeordnet sind. Es sei daran erinnert, dass ein Mechanismus nicht zwangsläufig zu einem der ihm dort assoziierten Rissphänomene muss, sondern dessen Auftreten lediglich als „wahrscheinlich“ oder „möglich“ gilt. Umgekehrt lässt ein bestimmtes Rissphänomen nicht eindeutig auf einen bestimmten Mechanismus schließen. Die Rissphänomene sind somit als Indikatoren oder Indizien

zu sehen, welche gemeinsam mit anderen Informationen Hinweise zu einem möglichen Mechanismus liefern.

Eine Auswahl der potenziell für Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit relevanten Rissphänomene ist mit Tabelle 3 gegeben.

Aus der Kombination der beiden Gruppen ergeben sich folgende Schnittmenge an zu erfassenden Rissphänomenen, welche durch das Monitoring erfasst werden sollten, da sie ein Indiz für einen später auftretenden und potenziell sicherheitsrelevanten Mechanismus hinweisen oder da von den Rissphänomenen selbst (sprich unabhängig vom dahinterliegenden Mechanismus) eine potenzielle Gefährdung ausgehen kann:

- neue Längsrisse (Biege- und Trennrisse) Firste und Ulme
- neue Radialrisse (Biege- und Trennrisse), welche über die Kämpfer reichen
- neue Radialrisse an Blockfugen
- Rissbreitenveränderung alter und neuer Risse
- Versatz der Rissflanken alter und neuer Risse
- Kombination aus alten und/oder neuen Rissen (verteilte Risse)
- Wasserführung und Sinter

Jene Einzelphänomene, welche zwar eine Relevanz hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit haben, die aber nicht einem später auftretenden Mechanismus zuzuordnen sind und deren Auftreten nach Installation einer nachträglichen Verkleidung unwahrscheinlich ist, sind in obiger Liste nicht enthalten.

Die ausgewählten interessierenden und somit durch das Monitoring möglichst zu erfassenden Rissverläufe an der Innenleibung sind in Abbildung 8 skizziert.



Abbildung 8: relevante zu erfassende Rissverläufe hinter später montierten Verkleidungen

Anhang 1: Beispielfotos

Anhang 2: Rissmatrix

Anhang 3: Auswahl potenziell relevanter Risskombinationen

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnelbau, Arbeitsausschuss Leistungsbild Bestandsprüfung von Tunnel: „RVS 13.03.31 – Straßentunnel: Baulich konstruktive Teile“, Wien, 2013.
- [2] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“, Wien, 2012.
- [3] ÖSTERREICHISCHE VEREINIGUNG FÜR BETON- und BAUTECHNIK, ÖVBB-Richtlinie „Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen“, Wien, 2009.
- [4] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, ÖBV-Richtlinie „Vermeiden Erkennen und Bewerten von Rissen in Betonbauteilen“ – Gründruck April 2019, Wien, 2012.
- [5] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING: „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1079, RI-EBW-PRÜF“, Berlin, 2017.
- [6] DEUTSCHE BAHN AG, DB-Richtlinie 853 „Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten“ und Leitfaden und Kommentaren und Planungshilfen, Frankfurt, 2014.
- [7] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Brückenbau, Arbeitsausschuss Brückenprüfung, Brückenerhaltung und Brückendatenbank: „RVS 13.04.21 – Galerien und Tunnel in offener Bauweise“, Wien, 2009.
- [8] ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE, SCHIENE, VERKEHR (FSV), Arbeitsgruppe Tunnel, Arbeitsausschuss Erhaltung und Betrieb: „RVS 09.04.11 – Erhaltung und Betrieb“, Wien, 2018.
- [9] UIC Union Internationale des Chemins de Fer: „Katalog von Schäden und ihren Ursachen in alten Tunnel“. Working Group „Tunnel Maintenance“, Paris, 2003.
- [10] PÖTTLER, R.: Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich. Beton- und Stahlbetonbau 88 (1993), Heft 6. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1993.
- [11] SAURER, E.; HÖSER, S.; MATTLE, B.: Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 6. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011.

- [12] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRDISCHES BAUEN E.V.: „Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen“, Köln, 2007.

BILDNACHWEIS

- [B.1] ÖBB Infrastruktur AG, 1020 Wien, Österreich
- [B.2] ASFiNAG Service GmbH, 1030 Wien, Österreich
- [B.3] UHG Consult ZT Dipl.-Ing. Urs H. Grunicke, Ziviltechniker für Bauingenieurwesen, 5020 Salzburg, Österreich
- [B.4] DEUTSCHE BAHN, DB Netz AG: Richtlinie 853, 853.9140: Leitfaden zur Richtlinie 853. 60327 Frankfurt/Main, Deutschland
- [B.5] ANAGNOSTOU, G.; Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich, Band 201, 1992.
- [B.6] MÜLLER-SALZBURG, L.; Der Felsbau, Band 3. Springer-Verlag. 1978.
- [B.7] LOHMEYER, G.; EBELING, K.: Weisse Wannen. Verlag Bau+Technik. 2013.
- [B.8] LAMPRECHT, H.-O. et al.: Beton Lexikon. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1990.
- [B.9] GIFAS ELECTRIC GmbH; 5301 Eugendorf, Österreich

Anhang 1: Beispielfotos zu Rissphänomenen

Phänomen P1.1.1 Längsriss Firste



Bildquelle: [B.1]



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P1.1.1 Längsriss Firste



Bildquelle: [B.1]

Phänomen P1.1.2. Längsriss Ulme



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P1.2.1 Radialriss Ulme



Bildquelle: [B.3]



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P1.2.3. Radialrisse an Blockfugen



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P1.3. Sichelförmiger Riss an Blockfuge in Firste



Bildquelle: [B.3]



(Hinweis: hier bereits kraftschlüssig verpresst)

Bildquelle: [B.1]

Phänomen P1.4. Schrägriss



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P1.5. Verteilte Risse



Bildquelle: [B.1]

(Hinweis: hier bereits kraftschlüssig verpresst)

Phänomen P5.2. Sinter



Bildquelle: [B.3]



Bildquelle: [B.2]

Phänomen P1.6. Netzriss



Bildquelle: [B.3]



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P1.7. Risse bei geometrischen Unstetigkeiten



Bildquelle: [B.3]



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P2.1.1.Biegeriss



Bildquelle: [B.1]

Phänomen P2.1.2.Biegerisse mit Sekundärrissbildung



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P4.1 Flanken ausgebrochen/ausgefranst



Bildquelle: [B.3]



Bildquelle: [B.2]

Phänomen P4.2 Flanken versetzt



Bildquelle: [B.3]

Phänomen P5.1 Risse mit Wasserführung



Bildquelle: [B.3]

Anhang 2: Rissmatrix

x... "wahrscheinlich" o... "möglich"	Rissphänomene:	P1.1.1	P1.1.2	P1.2.1	P1.2.2	P1.2.3	P1.3	P1.4	P1.5	P1.6	P1.7	P2.1.1	P2.1.2	P2.2.1	P2.2.2	P2.3	P3.1	P3.2	P3.3	P4.1	P4.2	P5.1.x	P5.2	P5.3	P6.1	P6.2	P6.3	
		Längsriss Firste	Längsriss Ulme	Radialrisse Ulme	Radialrisse umlaufend	Radialrisse an Blockfugen	Sichelförmiger Riss an Blockfuge in Firste	Schräger Riss	Verteilte Risse	Netzrisse	bei geometrischen Unstetigkeiten	Biegeriss <4mrad	Biegeriss >4mrad (Sekundärrißbildung)	Trennriss orthogonal	Trennriss schräg	Abschalung /Schalenriss	Statisch	zyklisch veränderlich	stetig veränderlich	Flanken ausgebrochen / ausgefrant	Flanken versetzt	Wasserführung	Sinter	mit Material-austrag	Entstehung innerhalb der ersten Stunden bis Tage	Entstehung innerhalb der ersten Monate	Jederzeit während Nutzung / nach Jahren	
K1.1	Gebirgsdruck	ja	X	X																								
K1.2	Asymmetrischer Seitendruck	ja		X																								
K1.3	Quellen, Schwellen	ja																										
K1.4	Auflockerungsdruck / Blocklast	ja	X																									
K1.5	Talzusub / Längszerrung	ja																										
K1.6	Setzung / Senkung	ja																										
K1.7	Erdbeben	nein																										
K2.1	Wasserdruck	ja																										
K2.2	Frostdruck	nein																										
K2.3	Beeinträchtigung der Bettung zufolge Auslaugung / Ausspülung	nein																										
K3.1	Temperatur	nein																										
K3.2	Betonaggressivität	nein																										
K3.3	Sprengdruck aus Korrosion	nein																										
K4.1	Überschreitung Biegezugfestigkeit beim Ausschalen	nein	X																									
K4.2	Früher Zwang	nein																										
K4.3	Anpressdruck Schalwagenüberstand	nein																										
K4.4	Betonierfehler: Nester, Kalte Fugen	nein																										
K4.5	Firstspalt	nein																										
K4.6	Firstspaltverpressung	nein																										
K5.1	Beeinträchtigung der Bettung zufolge Entlastung / Umlagerung	nein																										
K5.2	Zusatzbelastung durch Bautätigkeit im Nahbereich	nein																										
K6.1	aerodynamische Einwirkungen	nein																										

Legende
x...Assoziierung des Rissphänomens/Rissattributs mit der Einwirkung ist "wahrscheinlich"
o...Assoziierung des Rissphänomens/Rissattributs mit der Einwirkung ist "möglich"
+... von dem Einzelphänomen geht eine potenzielle Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit (SLS) / Tragsicherheit (ULS) aus
++... von dem Einzelphänomen geht eine hohe potenzielle Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit (SLS) / Tragsicherheit (ULS) aus

Fußnote **) Die Erkennbarkeit eines Mechanismus gilt im Zusammenhang mit einer später ergänzten Verkleidung der Tunnelschale als nicht erschwert, wenn:
- das Auftreten des Phänomens bereits während des Baus innerhalb der ersten Tage bis Monate wahrscheinlich ist (z.B. Betonierfehler), oder
- die Kenntnis über den allfälligen Mechanismus ohnehin aus Informationen auch ohne Erkennen der assoziierten Phänomene gegeben ist (z.B. Erdbeben, Betonaggressivität)

Anhang 3: Auswahl potenziell relevanter Risskombinationen

P1.1.1	Längsriss Firste	eines oder mehreres dieser Phänomene	eines oder mehreres dieser Phänomene	X	X	X	
P1.1.2	Längsriss Ulme			X		X	
P1.2.1	Radialrisse Ulme						
P1.2.2	Radialrisse umlaufend						
P1.2.3	Radialrisse an Blockfugen						
P1.3	Sichelförmiger Riss an Blockfuge in Firste						
P1.4	Schrägriss			X			
P1.5	Verteilte Risse						
P1.6	Netzrisse						
P2.1.1	Biegeriss <4mrad						
P2.1.2	Biegeriss > 4mrad (Sekundärrissbildung)						
P2.2.1	Trennriss orthogonal			X			
P2.2.2	Trennriss schräg						
P2.3	Abschalung /Schalenriss						
P3.1	Statisch						
P3.2	zyklisch veränderlich						
P3.3	stetig veränderlich			X			
P4.1	Flanken ausgebrochen / ausgefranst						
P4.2	Flanken versetzt			X	X		X
P5.1.1	Wasserführung dauerhaft						X
P5.1.2	Wasserführung zeitweise						
P5.2	Sinter						
P5.3	Materialaustrag						
P6.1	Entstehung innerhalb der ersten Stunden bis Tage						
P6.2	Entstehung innerhalb der ersten Monate						
P6.3	Jederzeit während Nutzung / nach Jahren	X					
Kombination							
	Auftreten von Rissen (egal welcher Art) spät nach Inbetriebnahme: Eines oder mehrere Rissphänomene P1.x-P5.x in Kombination mit P6.3	eine oder mehrere Rissarten P1.x oder P2.x in mit zunehmender Tendenz der Rissbreite und -länge P3.3	Mehrere Trennrisse P2.2, deren Verläufe P1.x geschlossene Fläche umschreiben, in Kombination mit versetzten Flanken P4.2	Längsrisse P1.x mit versetzten Flanken P4.2	Parallele Längsrisse P1.x bzw. Längsrisscharen	dauerhaft oder zeitweise wasserführende Risse P5.1x, deren Flanken versetzt sind P4.2	
	(P1.1.1 oder P1.1.2 oder P1.2.1 oder P1.2.2 oder P1.2.3 oder P1.3 oder P1.4 oder P1.5 oder P1.6 oder P2.1.1 oder P2.1.2 oder P2.1.2 oder P2.2.2 oder P2.3 oder P3.1 oder P3.3 oder P4.1 oder P4.2 oder P5.1.1 oder P5.1.2 oder P5.2 oder P5.3) und P6.3	(P1.1.1 oder P1.1.2 oder P1.2.1 oder P1.2.2 oder P1.2.3 oder P1.3 oder P1.4 oder P1.5 oder P1.6 oder P2.1.1 oder P2.1.2 oder P2.1.2 oder P2.2.2 oder P2.3) und P3.3	P1.1 und P1.3 und P1.4 und P4.2	P1.x und P2.x und P4.2	P1.x und P1.x	(K5.1.1 oder K5.1.2) und P4.2	
Erläuterung Relevanz							
	Sämtliche Rissphänomene, welche erst spät nach Inbetriebnahme auftreten, können Hinweis auf anlaufende, andauernde oder wiederanlaufende Mechanismen sein; Es ist zu beurteilen, ob die Veränderungen und damit einhergehenden Umlagerungen eine Relevanz für Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit haben	Hinweis auf einen anhaltenden Mechanismus, der noch nicht abgeschlossen ist; es ist zu beurteilen, ob und ab wann die Veränderungen und damit einhergehenden Umlagerungen eine Relevanz für Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit haben	Die Risse umschreiben geschlossene Gewölbeschollen, welche herausfallen können.	Hinweis auf Querkraftversagen und plötzlichem Verlust der Tragfähigkeit in Querschnittsebene, ggf. ohne weitere Ankündigung	Hinweis auf Rissverteilung im Zuge eines zunehmenden Biegemomentes und fortgeschrittener Schnittgrößenumlagerung	Hinweis auf plötzliches lokales Querkraftversagen ohne weitere Ankündigung zufolge nachdrängender Last (Wasserdruck) - Risiko eines lokalen Einbruchs und Verlust der Gebrauchstauglichkeit	

...weitere Kombinationen möglich und ggf. zu ergänzen!