

Beilage Nr. 10.05.03

Kanton Bern

Gemeinde Grosshöchstetten

BLS-Strecke 15 BTB (Hasle) - (Konolfingen) - (Thun)

Grosshöchstetten

Erneuerung Grosshöchstettentunnel

km 13.475 – 14.533

IC/003635

Auflageprojekt 2026

Materialtechnische Untersuchung Grosshöchstettentunnel I

BLS Netz AG Projekte & Technologie Freiburgstrasse 130, CH-3001 Bern		Verfasst: Name: Dr. Giuliano Krättli		Geprüft: Name: Dr. Philipp Rück	
Yves Zollinger Leiter Multiprojekte & Ingenieurbau BLS Simon Peter GPL BLS		Rev.	Bemerkungen	Datum:	
			Erstausgabe	01.07.2026	
		A			
VERFASSER: Materialtechnik am Bau AG Gäbigasse 3 5107 Schinznach-Dorf Projektallianz Grosshöchstentunnel  		B			
		C			
		D			
		E			
		F			



Bericht

Nr.:24090/1

Auftraggeber	BLS Netz AG Genfergasse 11 3001 Bern
Auftrag	Materialtechnische Beurteilung des Tunnels GHT I
Objekt	Eisenbahntunnel Grosshöchstetten I Linie 15 BTB (Hasle-Konolfingen-Thun) km 13'887-14'065
Baustoffe	Beton, Stampfbeton, Spritzbeton
Probenmaterial	14 Bohrkerne

Inhalt

1. Auftragsbeschreibung



2. Ergebnisse und Kommentar



3. Zur Instandsetzung



4. Untersuchungsprotokolle



1. Auftragsbeschreibung



Die BLS Netz AG mit Sitz in Bern beauftragten uns, den Tunnel Grosshöchstetten I (GHT I) zwischen Biglen und Grosshöchstetten aus materialtechnischer Sicht zu beurteilen. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt beim Tunnelgewölbe. Im Zentrum steht die Frage nach dem Zustand bzw. welche Massnahmen notwendig sind, um eine langfristige Weiterverwendung sicherzustellen. Die Aussagen des Berichtes stützen sich auf Beobachtungen vor Ort, auf Sondierungen mittels Kernbohrungen (Firma Transbohr aus Gretzenbach) sowie auf labortechnische Untersuchungen an den entnommenen Bohrkernen/Proben. Die Arbeiten am Gewölbe erfolgten teils ab Hebebühne, ab Boden, sowie von einem Flachwagen aus. Die Aufnahmen und Bohrungen fanden in den drei Nächten zwischen dem 21. und dem 24. Mai statt. Das Portal Seite Grosshöchstetten ist nicht Teil des Untersuchs.

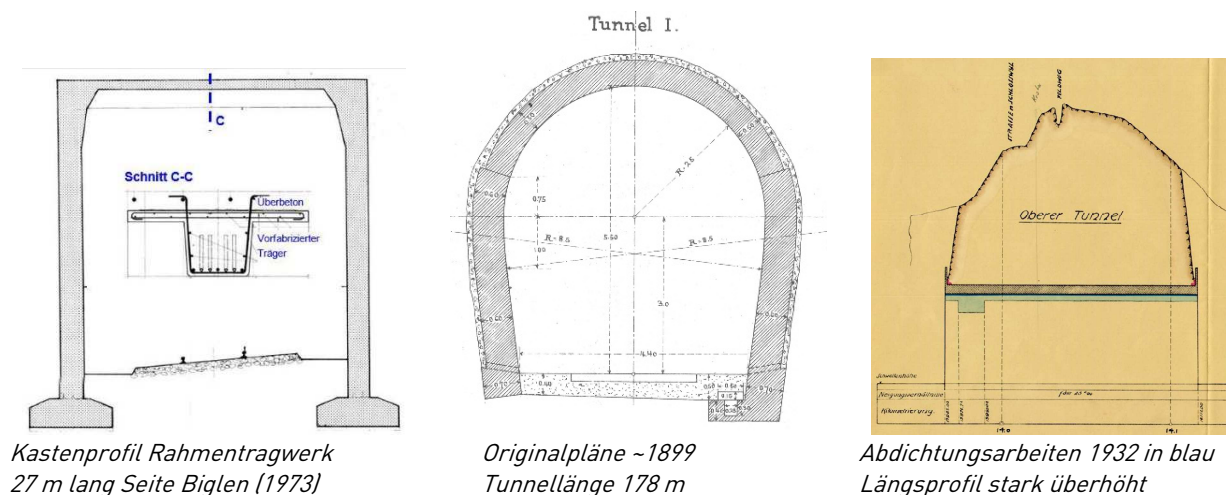
2. Ergebnisse und Kommentar



Allgemeines

Die Amberg Infra 7D hat 2022 eine Hauptinspektion durchgeführt. Zu den beiden Tunnels GHT I und GHT II gibt es eine Vorstudie/Studienbericht die von der Rothpeltz | Lienhard + Cie AG im 2023 erstellt wurde. In der Studie sind die Eckpunkte zum Bau und den Sanierungsetappen zusammengefasst, sowie die vorhandenen Quellen angegeben.

Der Tunnel GHT I wurde 1899 in Betrieb genommen. Aufgrund der Bauweise wird vermutet, dass der Tunnel im Untertagbau erstellt wurde. 1932 wurde der Scheitel des Bogens auf der gesamten Tunnellänge mit Spritzbeton überzogen. Das Rahmentragwerk am Portal Biglen wurde 1973 erstellt. 1991 wurden weitere Stellen mit Spritzmörtel überzogen. Weitere dokumentierte Sanierungsarbeiten sind dem Schreibenden nicht bekannt.



Im Tunnel wurde fast die gesamte Gewölbe Fläche abgeklopft. Als Planbasis dienen die sehr ausführlichen Aufnahmen der Amberg Engineering AG aus dem Jahr 2016. Diese können Grossteils bestätigt werden. Zur besseren Übersicht werden in Plan 1 nur Risse und grössere Hohlstellen dargestellt.



Beobachtungen und Messungen vor Ort (Plän 1 bis 2, Fotos 1-7 im Kapitel 4)

Rahmentragwerk (1973), Plan 1

Der Rahmentragwerk am Portal Biglen besteht aus Ortbeton-Widerlagerwänden und einer Decke aus vorgefertigten Betonelementen (Vergleiche Figur oben). Das Rahmentragwerk wurde im Tagbau erstellt. Die Betonkonstruktion wurde kurz visuell begutachtet. Die Oberflächen erscheinen allg. intakt. Im Bericht Amberg erwähnten, freiliegende Eisen an den Trägern sind anlässlich der Aufnahmen nicht aufgefallen.

Karbonatisierungstiefe vor Ort

Die Karbonatisierung wurde entlang von zwei Profilen an den beiden Wänden und an vier Trägeruntersichten (Vergleiche Plan 1) mit Trockenbohrungen vor Ort gemessen. Die gemessenen Werte sind gering und variieren zwischen 2 und 10 mm Tiefe bei den Wänden und liegt zwischen 3 und 5 mm an den Untersichten der Fertigelemente.

Betonüberdeckung (Messungen mit Profometer PM650 von Proceq) GHT I

An den Ortbetonwänden wurde an je zwei Profilen die Eisenüberdeckung gemessen, horizontal auf Brusthöhe und vertikal in der Zone 2. Die jeweilige Überdeckung ist im Kapitel 4 grafisch dargestellt. Im Vergleich mit den gemessenen Karbonatisierungstiefen zwischen 1-16 mm (vor Ort und an den Bohrkernen) liegen grundsätzlich alle gemessenen Eisen noch deutlich im nicht karbonatisierten Bereich.

Bauteil	Mittlere Karbonatisierung	max. Karbonatisierung	Mittlere Bewehrungstiefe	min. Bewehrungstiefe	% Bewehrungen im Bereich der max. Karbonatisierung
links, horizontal	8	10	41	34	keine
recht, horizontal	2	3	41	24	keine
links, vertikal	8	10	48	29	keine
rechts, vertikal	2	3	50	36	keine
Trägeruntersicht	4	5	33	25	keine

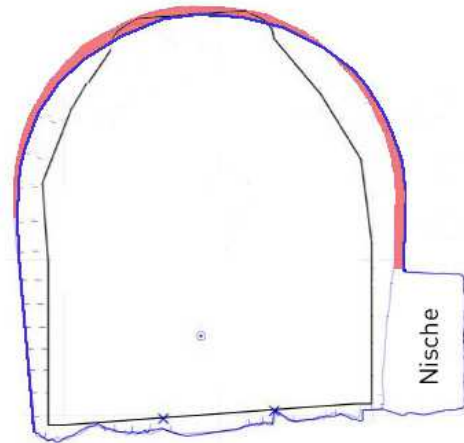
**Karbonatisierungstiefen aus den Messungen vor Ort, vergleiche Plan 1*

Tunnel (1899) (Plan 2 und 3)

Der Tunnel besteht aus verputzten Stampfbeton Paramenten und einem aus Betonsteinen gemauertem Gewölbe. Der Scheitel des Tunnels wurde 1932 auf der ganzen Länge mit Spritzbeton überzogen (Vergleiche Figur oben). Später sind noch verschiedene weitere Generationen von Spritzmörtel dazugekommen, abschnittsweise ist die ganze Sichtfläche mit Spritzbeton überzogen (Zone 5 und 6, ab Zone 9 ganze rechte Seite des Gewölbes und ab Zone 13 das gesamte Gewölbe). Die neusten Generationen bilden im vorderen Tunnelabschnitt (Zonen 6 und 8-10) mit Spritzbeton und Noppenmatten geformte Halbschalen um drückendes Wasser abzuleiten. Diese sind an der helleren Farbe gut zu erkennen. Auch davon hat es mindestens zwei Generationen, die letzte folgte nach den Aufnahmen von Amberg 2017.



Vor Ort erscheint das Bauwerk geometrisch intakt. Rein visuell werden keine Verformungen festgestellt. Im Bereich der Nische (Zone 8/9) zeigt die Lichtraumkarte von Amberg (2011) eine deutliche Delle im Scheitel. Das Gewölbe erscheint hier auf einer Länge von ca. 15 m um max. ca. 14 cm abgesenkt und die Paramente um ca. 10 cm auseinandergedrückt (Fig.5 rechts: rot = Differenz). Die «Delle» koinzidiert mit erhöhter Feuchtigkeit. In den Bohrkernen, welche mit Absicht in dieser Zone entnommen wurden, gibt es keine Hinweise auf Auflockerungen des Mauerwerks oder Schwächungen der Baustoffe, welche ursächlich oder eine Folge einer nachträglichen Verformung sein könnten.



Der Verputz an den Paramenten aus der Bauzeit ist relativ dünn (<1cm) und haftet an den meisten Stellen gut. Hohlstellen sind in der Regel relativ klein (< A3-Format), folgen jedoch häufig feinen Rissen oder Grenzen von Betonieretappen. Bei den sichtbaren Rissen und auch entlang der Betonieretappen wurde kein Versatz festgestellt, jedoch sind sie oft feucht bis nass. Der Stampfbeton selbst ist, abgesehen von zwei kleineren Bereichen mit Ausbrüchen nicht sichtbar.

Der gemauerte Gewölbebogen ist teilweise in den Zonen 4, 6-13 zwischen Höhe Widerlager und dem Spritzbeton des Scheitels sichtbar. Im Scheitelsbereich zeichnet sich das Mauerwerk unter der dünnen Spritzbeton (1932) oft noch ab.

Die Betonsteine haben ein rechteckiges Format (ca. 50x20x20cm). Die Fugen sind zwischen 2 und 3 cm breit. Die Sichtfläche wurde separat verfugt, mit weit über die Mauersteine gezogenem Mörtel und mit Fugenstrich. Ob diese Verfugung ursprünglich ist oder nach Erstellung als aufgebracht wurde, z.B. um Tropfstellen zu reduzieren, ist unklar.

Die Mauersteine sind allg. intakt. Nur ganz vereinzelt (<2%) sind an der Sichtfläche Abwitterungen zu erkennen (z.B. in der Nische). Vereinzelt fehlt feldweise der Verfugmörtel (Foto 5, max. 10 % der Fugen). In einzelnen Abschnitten sind auf den Mauersteinen Sinterkrusten vorhanden (Foto 6).

Die Nische in Zone 8 ist ebenfalls gemauert - hier sind einzelne Steine gerissen und/oder abgeplatzt, die vielen Sinterstellen weisen auf erhöhten Wasserfluss hin.

Die verschiedenen Spritzbetonschichten haften in der Regel noch gut, in den Zonen 8 bis 13 gibt es im Scheitelsbereich grössere Hohlliegende Stellen. In der Zone 8 wurde eine grössere Schale (~ 1m²) entfernt (Foto 7). Unter dem Ausbruch ist eine weiche, einige mm dicke Sinterschicht auszumachen. Darunter folgt eine weitere Spritzbetonschicht.

Grosse Teile des Tunnels sind feucht, grosse, abstehende, Versinterungen sind ausser in der Nische nicht aufgefallen.

Wie das alte Portal, Seite Biglen, aufgebaut ist kann nicht gesagt werden, am und dem Portal zu gibt es viele lose Putz/Spritzbetonschalen. Der klaffende Riss aus dem Bericht von Amberg ist durch eine neue Spritzbetonhalbschale verdeckt.



Visueller Zustand der Bohrlöcher und der Bohrkerne (BK)

Die Position der Bohrungen, sowie die Bohrkerne sind im Kapitel 4 dargestellt. Die Bohrungen in den Wänden des Rahmentragwerkes erfolgten mit Ø 100 mm. Die vier kleinen Bohrungen an der Decke haben einen Durchmesser von 50 mm. Die Bohrungen im Tunnel erfolgten mit Ø 100 mm in den Paramenten und mit Ø 150 im Bogenviertel bzw. im Scheitel. Insgesamt wurden mit den Bohrungen zwei Profile erstellt. Eins in der Zone 9 auf der linken Seite, eins in der Zone 15 auf der rechten Seite.

Der Originalplan zeigt eine Wandstärke in den Paramenten von 60 cm, 70 cm im Fundamentbereich. Der Gewölbebogen hat eine Stärke von 50 cm. Die Geometrie kann mit den Bohrungen bestätigt werden. Die Wände des Rahmentragwerkes sind rund 50 cm dick, und bestehen aus intaktem dichtem Beton.

Der Beton in den Bohrkernen 3 und 4 sowie 7 und 8 bestehen ebenfalls aus intaktem Beton mit jedoch variablem teils hohem Holraumanteil (Vergleiche die Darstellung der Bohrkerne im Kapitel 4). Die Bohrungen im Gewölbebogen (5 und 6, 9 und 10) zeigen intakte Betonmauersteine die mit grob 2 cm breiten Fugen aneinandergefügt wurden. Die Fugen sind parallel, zwischen Mörtel und Betonsteinen gibt es verbreitet primäre Hohlräume, beide Baustoffe sind intakt. Bei Bohrkern 5 folgt hinter dem Betonsteinmauerwerk noch 10 cm Natursteinmauerwerk. Der Spritzbeton haften bei den Bohrkernen 9 (trotz den Sinterschichten) und 10 gut am Untergrund, bei Bohrkern 6 ist er leicht abgelöst.

Laboruntersuchungen

Die Einzelresultate der Laboruntersuchungen sind unter Kapitel 4 einsehbar.

<i>Baustoff</i> (Anz. Druckfestigkeitsmessungen)	<i>Druckfestigkeit (N/mm²)</i> <i>Mittelwert</i>	<i>Kapillarporosität (Vol%)</i> <i>Mittelwert</i>
Ortbeton, Rahmentragwerk (1973) (3)	78	14.7
Elementbeton, Rahmentragwerk (1973) (4)	92.7	9.8
Stampfbeton, Tunnelparamente (1899) (4)**	40.1	10.9
Betonsteine Mauerwerk, Tunnelgewölbe (1899) (5)	51.22 ± 13.14	15.4
Mörtel Mauerwerk, Tunnelgewölbe (1899) (4)*	28.6	17.5
Mischproben, Tunnelgewölbe (1899) Betonstein und Mörtel (5)	29.67 ± 7.49	-
Spritzbeton, Tunnel (4)*	99.8	14.5

**kleine Probekörper, ** eher dichte Probekörper*

- Der Ortbeton der Wände des Rahmentragwerkes besteht aus kompaktem, intaktem Beton. Die Druckfestigkeit ist für den Baustoff hoch, die Kapillarporosität im normalen Bereich. Mikroskopisch gesehen besteht der Beton aus einer eher fetten Mischung mit PC und einem gut sortierten Zuschlag.



- Die Elementbetonteile der Decke des Rahmentragwerkes bestehen aus einem sehr gut verdichteten Beton. Die an den Bohrkernen gemessene, mittlere Karbonatisierungstiefe liegt zw. 4 und 6 mm), die Werte sind vergleichbar mit den Werten die vor Ort gemessen wurden.
- Die Betonsteine bestehen aus einer ausgewogenen Mischung aus Portlandzement, leicht gerundetem Sand und gut gerundeten grösseren Komponenten (bis 40 mm). Die Druckfestigkeit ist für einen Stampfbeton aus der Bauzeit mit 40 N/mm² beachtlich. Im Dünnschliff sind keine Gefügeschäden zu erkennen. Die Porenkennwerte deuten auf unregelmässige Wasserzugabe (Baustellenmischung), d.h. einen z.T. einen hohen W/Z-Faktor, was die an der Sichtfläche vereinzelt vorhandenen Frostschäden erklärt.
- Der Mauermörtel ist von der Zusammensetzung den Betonsteinen ähnlich, jedoch feinkörniger (0-10 mm). Die Druckfestigkeit ist eher hoch, nahe beim Mauerstein, was das Gewölbe zu einem mechanisch monolithischen Gebilde macht. Die Beständigkeit ist ausreichend. Mikroskopisch gesehen sind vereinzelte Mikrorisse auszumachen.
- Die Qualität der Spritzbetonschichten sind aufgrund der unterschiedlichen Alter, Auftragstechniken bzw. Spritzeinstellungen sehr heterogen. Vergleiche den Beschrieb des Dünnschliffes 6.7 im Kapitel 4. Beobachtbar ist, dass die neueren Schichten tendenziell fetter (Mischungsverhältnis PC-Zuschlag) und entsprechend dichter sind. Miteinher sind auch Schwindrisse häufiger. In BK6 ist der Verbund zwischen den einzelnen Schichten nicht immer gewährleistet. Zudem wird zwischen der vorletzten und letzten Spritzbetonschicht in BK6 eine Art Dichtschicht (1-2 mm), Typ Acryldispersion, festgestellt.

Einstufung der Mauerwerksfestigkeit (f_{xk}) gemäss SIA 266/2

Die Einstufung der Normaldruckfestigkeit des Betonstein-Mauerwerks wird gemäss Figur 5 der Natursteinmauerwerks-Norm eingeschätzt. Aufgrund der Bauweise ist diese auch auf das Betonstein Mauerwerk anwendbar. Allgemein sind die Werte als orientierende Schätzung zu betrachten. Gewissheit kann nur durch experimentelle Bestimmung erlangt werden. Die Druckversuche an den Mischproben zeigen etwas höhere Werte als der Mörtel selbst und lassen, bei gegebener Mauersteindruckfestigkeit (~50 N/mm²), einen hohen Wert im Feld des Schichtenmauerwerks zu. Die Schätzung berücksichtigt den aktuellen Zustand des Mauerwerks.

Verbandsart	Bauteile	f_{xk} [N/mm ²]
Schichtenmauerwerk	Gewölbebogen Tunnel (1899)	15



Vergleich der Schadenskartierungen

Aus dem Vergleich mit den Aufnahmen auf dem bestehenden, detaillierten Plan der Amberg Engineering AG aus dem 2016, können folgende Schlüsse gezogen werden:

Beobachtungen wie, Rissflächen, können nachvollzogen werden, haben aber untergeordnete Aussagekraft und wurden nicht weiterverfolgt.

Die Nass- und Feuchtstellen (vergleiche Bild 2) werden bestätigt, sind auf unserem Plan übersichtshalber nicht nachgezeichnet. Wo genau sich im Winter Eiszapfen bilden könnten müsste bei geeigneter Witterung vor Ort festgestellt werden.

Eingezeichnete Risse können ebenfalls nachvollzogen werden. Bei den vertikalen Rissen in den Paramenten handelt es sich wahrscheinlich um Betonieretappen. Die Versätze sind vernachlässigbar. Die Amberg Infra AG beschreibt in der Hauptinspektion einen klaffenden Riss unmittelbar nach dem alten Portal, Seite Biglen. Dieser ist heute mit einer Spritzbetonhalbschale überdeckt (Foto 1).

Viele der vor Ort eingezeichneten und auf dem Plan dargestellten hohlliegenden Stellen in den verputzten bzw. den mit Spritzmörtel überzogenen Bereichen sind klein. Sie stellen keine Gefährdung dar, d.h. da besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf.

Zusammenfassende Beurteilung

Rahmentragwerk (1973):

Die Betonkonstruktion ist allgemein in einem guten Zustand (Zustandsklasse 1). Gemessene Karbonatisierungstiefen sind alle noch deutlich kleiner als die entsprechende Betonüberdeckungen der Bewehrung. Die Chloridgehalte sind unkritisch. Die von Amberg Infra AG an einem Träger erwähnten freiliegende Eisen müssen vor der Ausführung nochmals gecheckt werden. Falls dies zutrifft sollten diese entsprechend fachgerecht behandelt werden. Ansonsten stehen, abgesehen von der fachgerechten Reprofilierung der Bewehrungssondage, aus materialtechnischer Sicht am Rahmentragwerk mittelfristig keine Arbeiten an.

Tunnel (1899):

Das Tragwerk des Tunnels ist aus materialtechnischer Sicht in einem annehmbaren bis guten Zustand (Zustandsklasse 2). Die Baustoffe (Stampfbeton, Mauersteine, Mörtel) sind überwiegend intakt und eher robust. Die «Delle» bei der Nische (Zone 8/9) könnte noch aus der Bauzeit stammen. Sie beeinträchtigt die Geometrie des Querschnitts kaum. Bei Eingriffen in die Überdeckung in dieser Zone soll dennoch vorsichtig vorgegangen werden (Auswaschungen, Hohlstellen etc.).

Die vorliegende Bauweise kann kein trockenes Bauwerk sicherstellen. Teile der Abdichtungen mit Spritzbeton, die Nische und das alte Portal, Seite Biglen sind in einem schadhaften Zustand (Zustandsklasse 3). Aus materialtechnischer Sicht und auf das Mauerwerk bezogen kann Staunässe im Zusammenhang mit Frost den Baustoffen zusetzen, allerdings nur langsam und räumlich beschränkt, wie die vor Ort feststellbaren Erscheinungen zeigen.



Aufgrund der unregelmässigen Verdichtung des Stampfbetons und der tendenziell guten Probekörper soll von einer von einer etwas tieferen Druckfestigkeit von 16 N/mm² ausgegangen werden (f_{ck} , charakteristische Wert der Zylinderdruckfestigkeit; Druckfestigkeitsklasse C16/20 (vergleiche unter anderem SIA-Norm 262, Tabelle 3 und 269/2, Tabelle 1)).

Hohlliegende Spritzbetonschalen müssen entfernt werden. Wir empfehlen diese nur im Scheitelbereich zu erneuern.

Eine Instandsetzung der originalen Bausubstanz kann ins Auge gefasst werden, ist aber aus materialtechnischer Sicht noch nicht dringend. Es gibt aus Sicht der Schreibenden keinen Anlass, von einer Beschleunigung der Schadensentwicklung (am Tragwerk) auszugehen. Eine langfristige weitere Nutzung ist aus materialtechnischer Sicht möglich. Das Hauptproblem ist loser Spritzmörtel.

3. Zur Instandsetzung



Die treibende Kraft der Zerfallerscheinungen ist die von oben eindringende Feuchtigkeit. Eine Trockenlegung des Tunnelgewölbes ist mit vernünftigem Aufwand nicht realisierbar. Positiv wäre eine Versiegelung aller Flächen über dem Tunnel (siehe Bild 1). Folgende Massnahmen sind in der derzeitigen Situation aus unserer Sicht angebracht:

- Entfernung grösserer hollliegende Stellen des Spritzbetons (>A3-Format). Die Stellen sind in der Regel mit Spray markiert, jedoch sind auch viele kleine oder sogar nicht hollliegende Stellen, ohne Handlungsbedarf, markiert.
- Fehlstellen sollen nur am Scheitel erneuert werden, um direktes Tropfen auf die Fahrbahn zu vermeiden. In den Paramenten sollen Spritzmörtellücken belassen werden. Es sollen Mörtel mit einem günstigen Saug- und Verdunstungsverhalten bevorzugt werden – Festigkeit ist hier nicht das erste Gebot.
- Reprofilierungen von Betonsteinen sollen nur bei Abwitterungstiefen >5cm erfolgen. Schadhafte Fugen werden grosszügig ausgekratzt und mit einem mittelharten (15-25 N/mm²), frostsicheren und vorzugsweise sulfatbeständigen Fugenmörtel gestopft.
- Instandsetzung des alten Portals sowie der Nische (Hohlstellen, Fugen etc.)

***Bemerkung:** Eine alles dichtende Spritzbetonschale verstärkt wegen der Staunässe die Frostbelastung. Um die Frostsituation im Mauerwerk des Tunnels zu erfassen, könnte man über die nächsten Jahre in den Wintermonaten die Temperatur z.B. in 5 cm Tiefe messen und tracken. LoRaWAN Systeme sind praktisch wartungsfrei und würden sich in dieser Situation anbieten. Zeigt sich, dass Frost im Mauerwerk kein Thema ist, darf langfristig auch eine komplette Abdichtung des Tunnels mit Spritzbeton in Erwägung gezogen werden.*

Materialtechnik am Bau AG

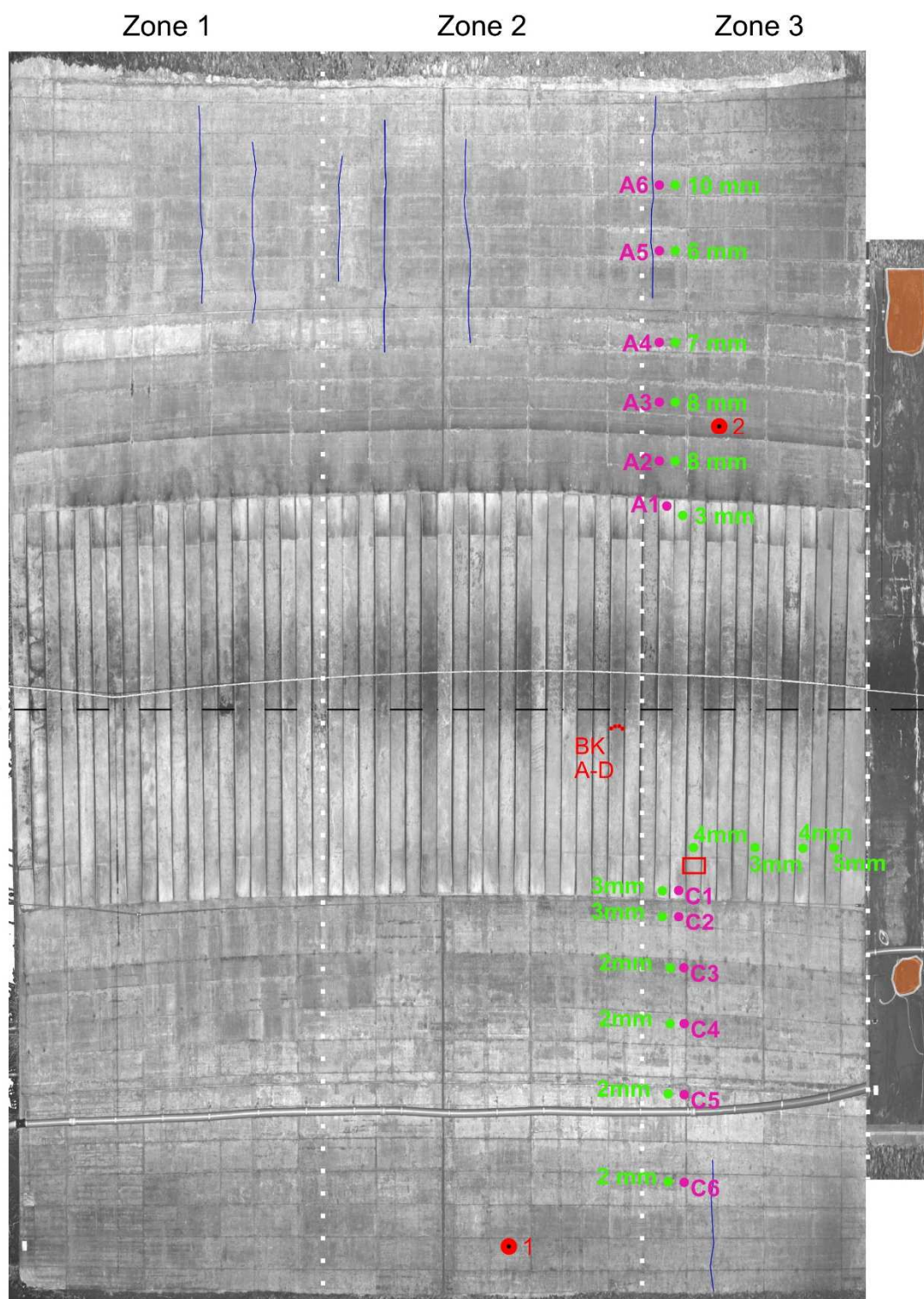
Giuliano Krättli

Dr. Giuliano Krättli

Ph. Rück

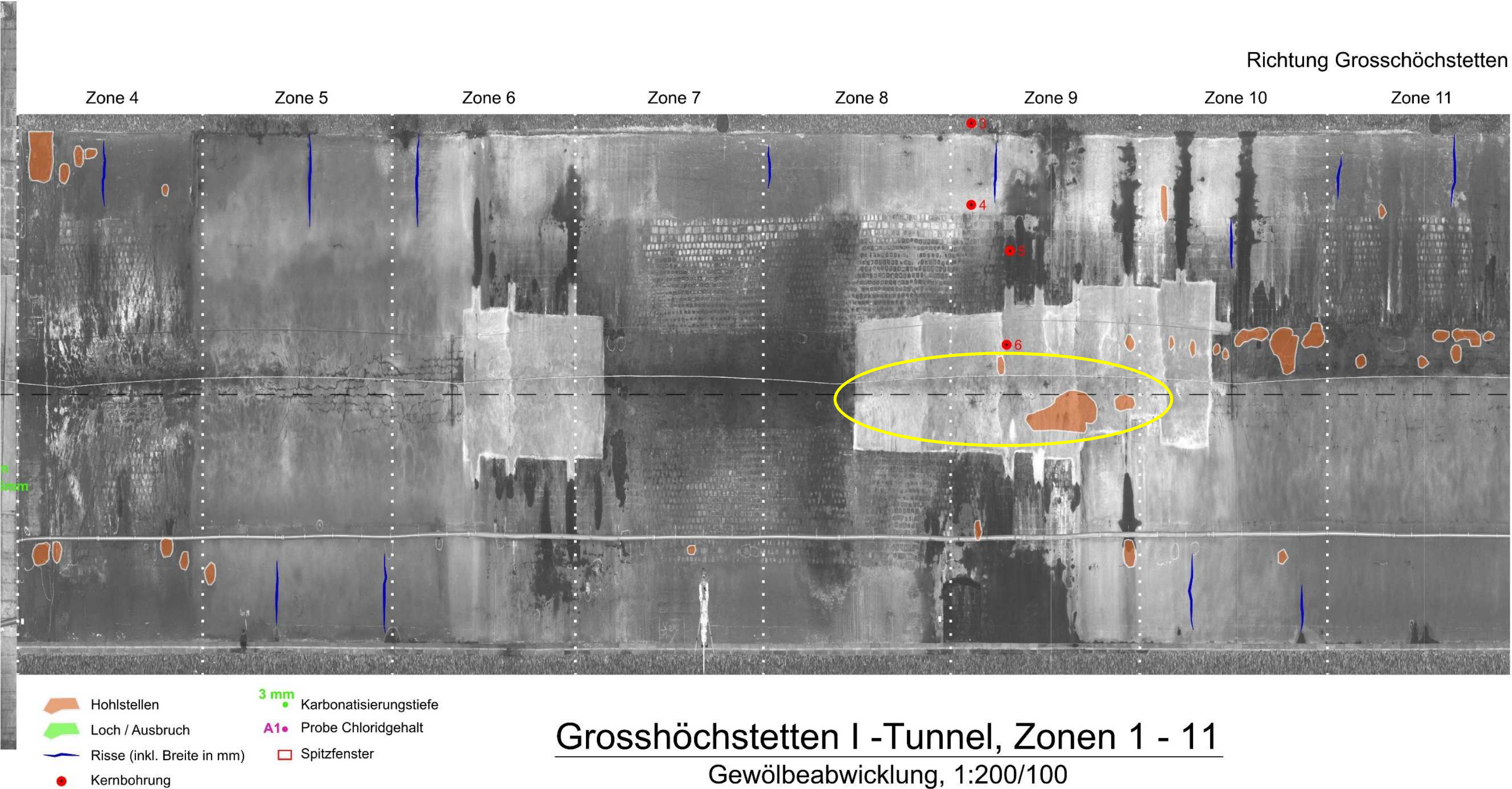
Dr. Philipp Rück

Aufnahme der Schäden, Probenstandorte, Plan 1, Rahmentragwerk, Portal Biglen

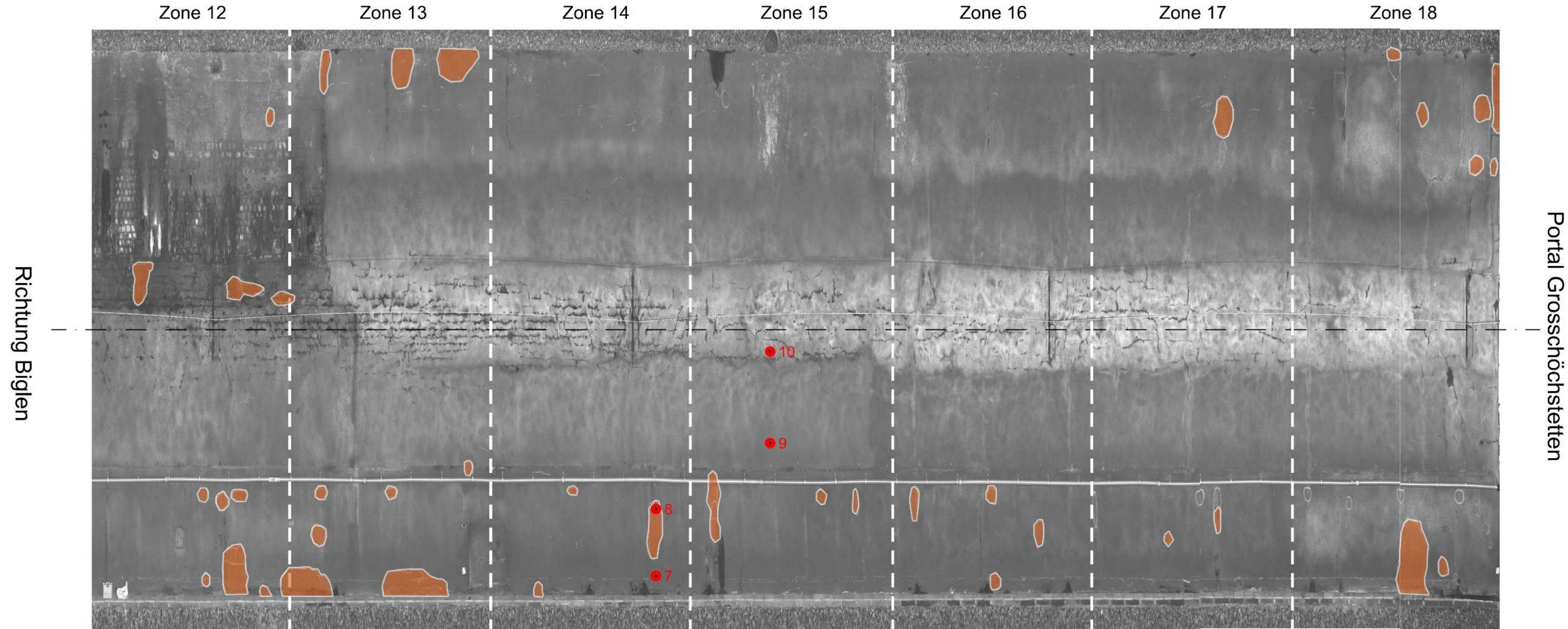


Portal Biglen

Plan 2, Tunnel Grosshöchstetten I, Seite Biglen (gelb umrahmt: «Delle» im Gewölbe)



Plan 2, Tunnel Grosshöchstetten I, Seite Grosshöchstetten



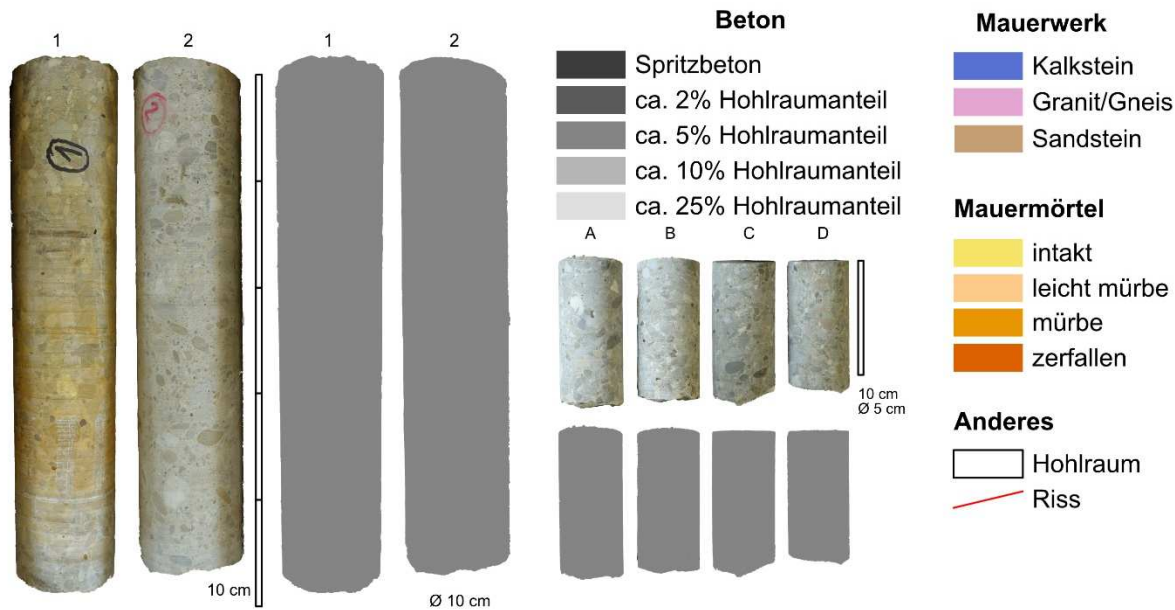
Grosshöchstetten I -Tunnel, Zonen 12 - 18
Gewölbeabwicklung, 1:200/100

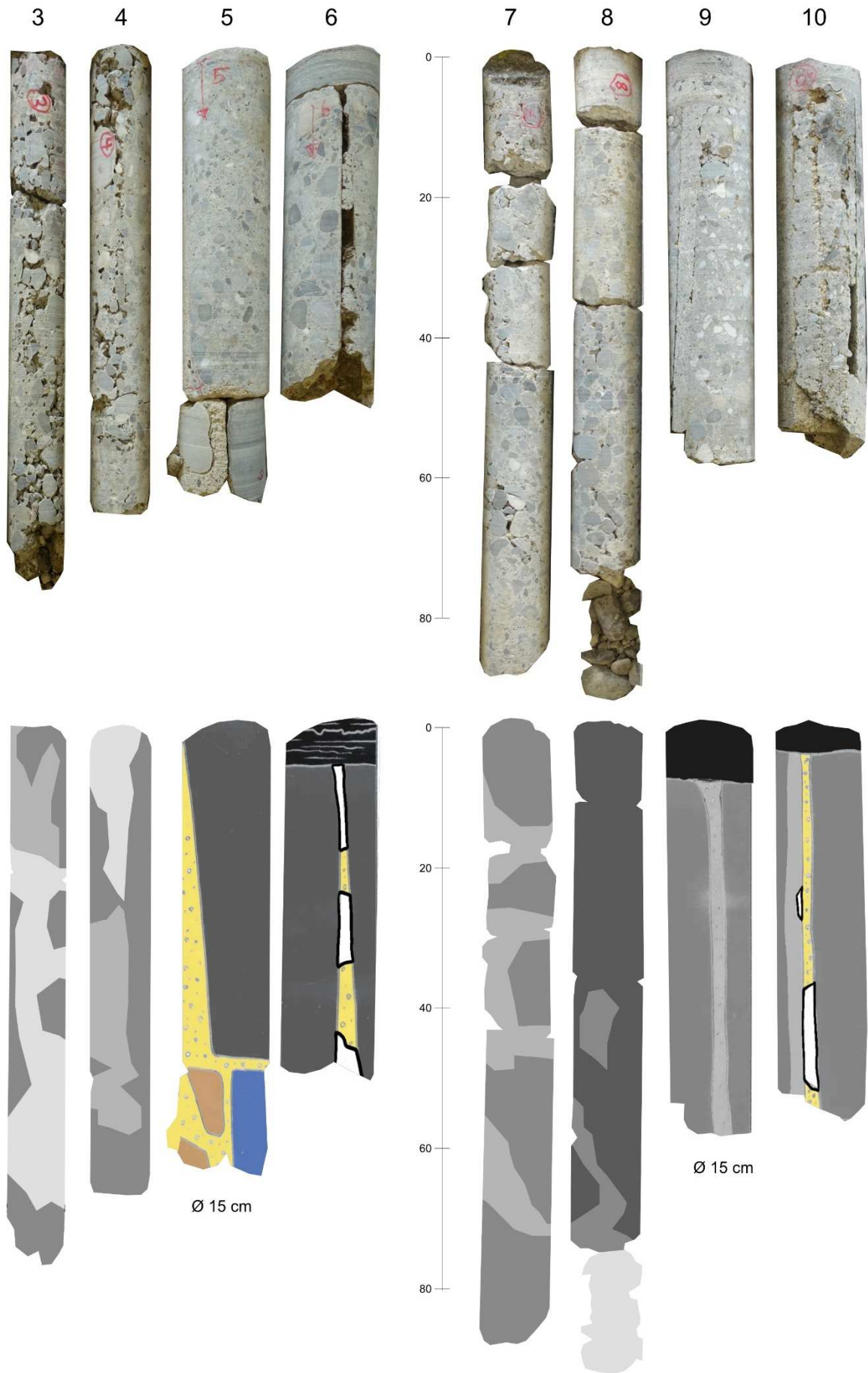


Bohrkernliste

Nr.	Durchmesser (mm)	Länge (cm)	Material (Materialstärke)	Bauteil	Hintergrund
1	100	50	Ortbeton (50)	Widerlagerwand Rahmentragwerk	k. A.
2	100	48	Ortbeton (48)	Widerlagerwand Rahmentragwerk	k. A.
A	50	13	Werkbeton (-)	Träger, Rahmentragwerk	Nicht durchgebohrt
B	50	13	Werkbeton (-)	Träger, Rahmentragwerk	Nicht durchgebohrt
C	50	12	Werkbeton (-)	Träger, Rahmentragwerk	Nicht durchgebohrt
D	50	12	Werkbeton (-)	Träger, Rahmentragwerk	Nicht durchgebohrt
3	100	75	Stampfbeton/Ortbeton (75)	Parament Tunnel, unten	k. A.
4	100	65	Stampfbeton/Ortbeton (65)	Parament Tunnel, oben	Sand
5	150	62	Betonsteine, Mörtel (48) Naturstein, Mörtel (14)	Gewölbeviertel	Rundes Geröll (> 5 cm) Sand
6	150	50	Spritzbeton (5) Betonstein, Mörtel (45)	Scheitel	Kies/Sand
7	100	86	Stampfbeton/Ortbeton (86)	Parament Tunnel, unten, <u>35° nach unten</u>	k. A.
8	100	75	Stampfbeton/Ortbeton (75)	Parament Tunnel, oben	Grobes rundes Kies
9	150	58	Spritzbeton (4) Betonstein, Mörtel (54)	Gewölbeviertel	Rundes Geröll (> 10 cm)
10	150	56	Spritzbeton (2) Betonstein, Mörtel (54)	Scheitel	Rundes Geröll (> 10 cm) Kies, Sand

die Positionen der Bohrkerne können dem Plan entnommen werden







Fotographische Dokumentation



Foto 1, Zone 3/4

Betonfertigelemente

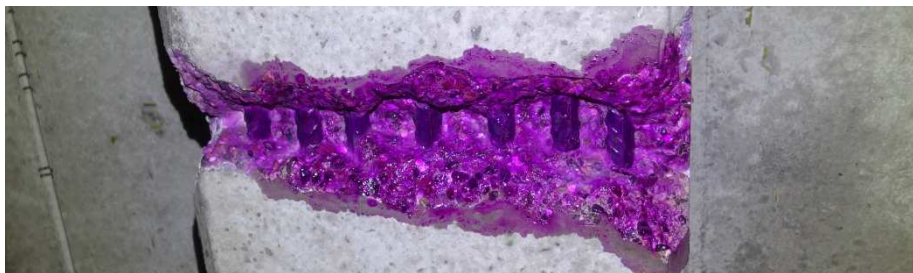
Ortbetonwände

Wahrscheinlich handelt es sich in der Ansicht um das alte Tunnelportal. Die Verputzte Sichtfläche weist verbreite Hohlstellen auf

Relativ neue (nach 2017) Spritzbetonhalbschale

Auf den Aufnahmen von Amberg im 2017 sind die noch nicht vorhanden.

Verdecken sie den in der Hauptinspektion beschriebenen klaffenden Riss?



**Foto 2
Zone 3**

Spitzfenster an der Untersicht eines Trägers

Violett eingefärbter Bereich: alkalischer Bereich



Foto 3, Zone 14/15

komplett mit Spritzbeton überzogenen

Bohrkernentnahme BK10, 9 und 8



**Foto 4,
Zone 9, BK6**

Im Mauerwerk ausgefräster Schlitz mit Spritzbeton verfüllt

Hohlraum, absichtlich zur Entwässerung?

Sehr einheitlich breite Fugen

Betonsteinmauerwerk

Dicht/Acrylschicht



Fotographische Dokumentation



Foto 5
Zone 9

Vereinzelt fehlt der
Verfugmörtel und der
Mauermörtel liegt an der
Oberfläche



Foto 6
Zone 9

Soweit intakte
ursprüngliche
Gewölbeoberfläche

Ausblühungen an den
Betonsteinen



Foto 7
Zone 9

Abgeplatzter Spritzbeton

Darunter rel. weiche
Trennschicht,
Sinterschicht



Foto 8

Abgewitterter
Beton-Mauerstein



Fotographische Dokumentation

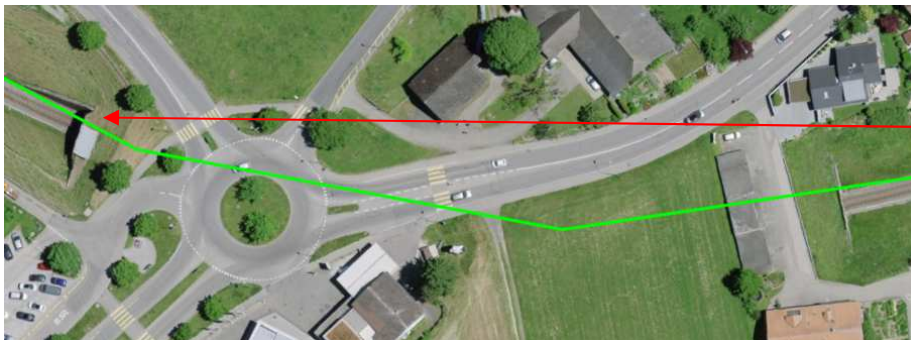


Bild 1
Luftbild der Situation über dem Tunnel

Das Rahmentragwerk

Unter dem Kreisverkehr hat es tendenziell weniger Feuchtstellen

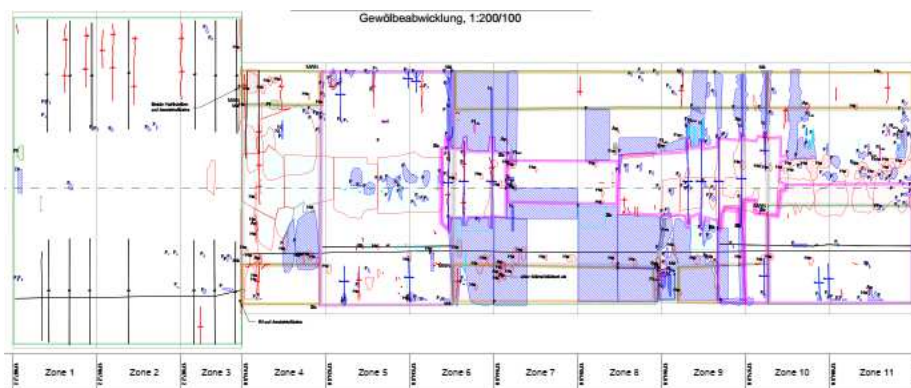


Bild 2
Schadenkartierung von Amberg Engineering aus dem 2016

Feucht/Nassstellen in blau
Diese korrelieren teilweise mit der Situation darüber

K201 Druckfestigkeit Bohrkernproben, Rahmentragwerk

Prüfung Beton gemäss EN 12504-1

Probe	Entnahmetiefe cm	Druckfestigkeit N/mm ²	Rohdichte kg/m ³
Ortbeton Rahmentragwerk (1973)			
1.1	20	87.72	2445
1.2	30	88.17	2462
2.1	20	58.46	2303
Mittelwert		78.12	2403
Elementbeton Rahmentragwerk (1973)			
A1	5	103.17	2374
B1	5	101.83	2380
C1	5	109.00	2386
D1	10	57.04	2390
Mittelwert		92.76	2383

K201 Druckfestigkeit Bohrkernproben

Prüfung Beton gemäss EN 12504-1



Probe	Entnahmetiefe cm	Druckfestigkeit N/mm ²	Rohdichte kg/m ³
Stampfbeton Tunnelparamente (1899)			
3.1	30	44.60	2286
4.1	20	41.39	2297
7.1	80	33.49	2287
8.1	30	40.92	2339
Mittelwert		40.10	2302
Betonsteine Mauerwerk Tunnelgewölbe (1899)			
5.1	15	57.30	2286
5.2	30	45.75	2287
6.4	25	44.19	2281
9.3	50	73.49	2295
10.3	40	35.37	2071
Mittelwert		51.22 ± 13.14	2244 ± 86
Mörtel Mauerwerk Tunnelgewölbe (1899)			
5.3	60	10.83	1741
6.3	10	30.62	2119
9.2	20	42.71	2061
10.2	-	30.28	2056
Mittelwert		28.61	1994
Mischproben Gewölbe (1899) Betonstein und Mörtel			
6.10	-	36.79	
9.6	-	36.30	
9.7	-	34.11	
10.5	-	19.96	
10.6	-	21.21	
Mittelwert		29.67 ± 7.49	
Spritzbeton			
6.1	5	139.62	2260
6.2	5	98.68	2258
9.1	5	77.42	2196
10.1	5	82.63	2107
Mittelwert		99.59	2205

P301 Poren-Sättigungskennwerte

Prüfkondition: A5/AV



Probe	Kapillar- porosität [Vol.%]	Gesamt- porosität [Vol.%]	Hohlraum- gehalt [Vol.%]	Trockenroh- dichte [kg/m³]	S-Wert [-]
Ortbetonwand Rahmentragwerk (1973)					
2.2	14.70	14.81	0.10	2247	0.99
Elementbeton Rahmentragwerk (1973)					
B2	9.80	10.53	0.73	2373	0.93
Stampfbeton Tunnelparamene (1899)					
4.2	9.11	11.17	2.06	2358	0.82
8.2	12.73	14.13	1.40	2281	0.90
Mittelwert	10.92	12.65	1.73	2320	0.86
Betonsteine Mauerwerk Tunnelgewölbe (1899)					
5.4	11.96	14.28	2.32	2254	0.84
10.4	18.88	20.99	2.11	2107	0.90
Mittelwert	15.42	17.64	2.21	2181	0.87
Mörtel Mauerwerk Tunnelgewölbe (1899)					
6.6	17.54	20.57	3.02	2078	0.85
Spritzbeton Tunnel					
6.5	14.89	16.72	1.82	2183	0.89
9.4	14.04	16.77	2.72	2296	0.84
Mittelwert	14.47	16.74	2.27	2240	0.86

C609 Chloridgehalt Beton (Salpeteraufschluss kalt)
Prüfung Beton gemäss EN 14629



Probe	Tiefe mm	(P) Einwaage Pulver mg	Chloridgehalt gemessen mg/l	Chloridgehalt Beton M % v. Beton	Chloridgehalt PC M % v. PC
Beton					
A1	0-5	2018	1.19	0.0018	0.01
A2	0-5	2016	0.00	0.0000	0.00
A3	0-5	2007	0.00	0.0000	0.00
A4	0-5	2006	3.88	0.0058	0.04
A5	0-5	2003	0.13	0.0002	0.00
A6	0-5	2007	1.91	0.0029	0.02
C1	0-5	2013	1.17	0.0017	0.01
C2	0-5	2004	2.54	0.0038	0.03
C3	0-5	2013	0.21	0.0003	0.00
C4	0-5	2012	1.20	0.0018	0.01
C5	0-5	2010	0.06	0.0001	0.00
C6	0-5	2010	None	0.0000	0.00

Jede Probe mit 30 ml HNO₃ (18%) vorbereitet

Grenzwert schlaff armierter Beton (bei PC-Gehalt: 300 kg/m³; Rohdichte: 2300 kg/m³): 0.40

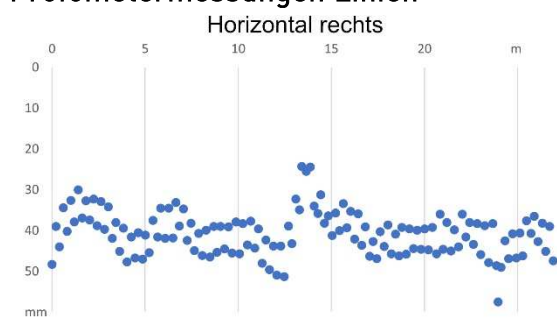
Grenzwert Vorgespannter Beton (bei PC-Gehalt: 300 kg/m³; Rohdichte: 2300 kg/m³): 0.20



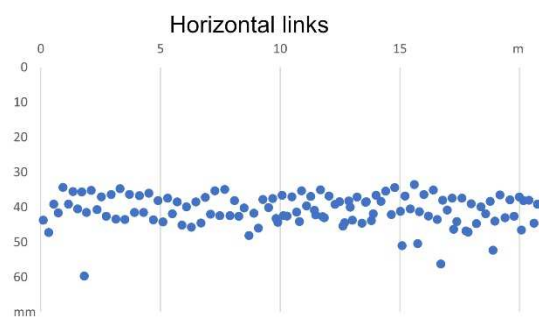
C611 Karbonatisierung Rahmentragwerk am Portal

Messung am Bohrkern	mittlere Karbonatisierungstiefe mm	Maximale Karbonatisierungstiefe mm	Grösstkorn mm
Ortbetonwände Rahmentragwerk			
BK1, rechts	1	2	32
BK2, links	14	16	25
	7.5	9	28.5
Betonfertigelemente / Träger Rahmentragwerk			
BKA	4	6	18
BKB	5	7	22
BKC	5	10	20
BKD	6	9	18
	5	8	19.5

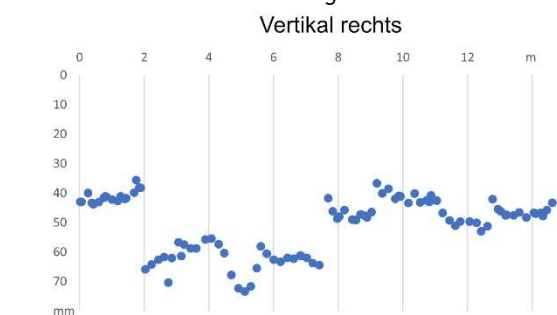
Profometermessungen Linien



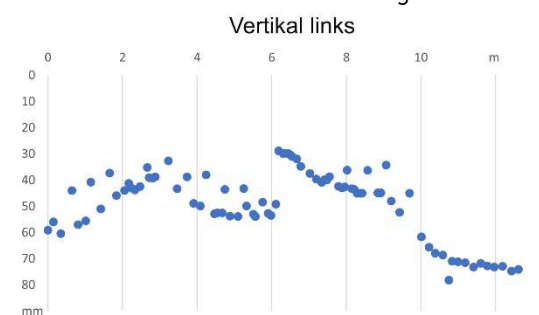
mittlere Karbonatisierungstiefe = 2 mm
maximale Karbonatisierungstiefe = 3 mm



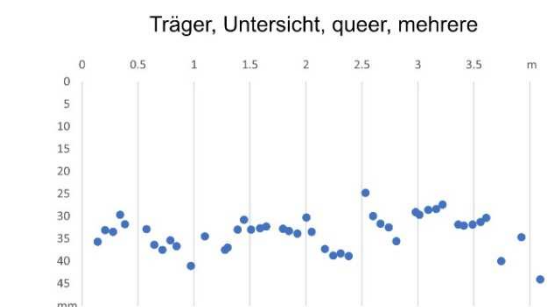
mittlere Karbonatisierungstiefe = 8 mm
maximale Karbonatisierungstiefe = 10 mm



mittlere Karbonatisierungstiefe = 2 mm
maximale Karbonatisierungstiefe = 3 mm



mittlere Karbonatisierungstiefe = 8 mm
maximale Karbonatisierungstiefe = 10 mm



mittlere Karbonatisierungstiefe = 4 mm
maximale Karbonatisierungstiefe = 5 mm

Karbonatisierungstiefen Werte vergl. Plan 1



M102 Mikroskopische Beobachtungen

Bohrkern Nr. / Probe Nr.	Material / Beobachtungstiefe	Beobachtungen
D2	Ortbeton Rahmentragwerk / 5 cm 	Bindemittel: PC Zuschlag: silikatisch und karbonatisch, lithische Fragmente, kantig bis gerundet, 0 - 10 mm Mischung: eher fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: eher tief Makroporen: einzelne Poren bis 3 mm Gefügeschäden: keine
2.3 10	Beton Rahmentragwerk / 10 cm 	Bindemittel: PC Zuschlag: silikatisch, karbonatisch, lithische Fragmente, gebrochener Sand, 0 - 5 mm, grössere Komponenten gerundet bis 20 mm Mischung: eher fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: tief Makroporen: wenige kleine Poren bis 1 mm Gefügeschäden: keine
6.8 20	Mauermörtel Tunnelgewölbe / 20 cm 	Bindemittel: PC Zuschlag: silikatisch und karbonatisch, kantig bis gerundet, 0 - 10 mm, wenige grosse Komponenten Mischung: eher fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: eher tief Makroporen: Poren bis 1 mm Gefügeschäden: einzelne Mikrorisse <0.1 mm



M102 Mikroskopische Beobachtungen

Bohrkern Nr. / Probe Nr.	Material / Beobachtungstiefe	Beobachtungen
6.7	Spritzbeton Tunnelgewölbe/	Ca. 6 cm dicke Spritzbetonschicht, Kontakt zum Mauerwerk nicht im Dünnschliff, Makroskopisch abgelöst, Vergleiche Foto 4
	Spritzbeton I 0-10 mm/	<u>Spritzbeton I (0-10 mm):</u> Bindemittel: PC Zuschlag: vorwiegend karbonatisch, vereinzelt silikatisch, gebrochener Sand, 0 - 2 mm Mischung: fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: sehr tief Makroporen: wenige grössere Poren bis 1 mm Gefügeschäden: keine
	Sinterschicht 10-12cm	<u>Haftvermittler oder Dichtsicht? (1-2 mm dick):</u> <u>Bindemittel:</u> hauptsächlich organisch, Typ Acryldispersion <u>Füllstoff:</u> Kalksteinmehl Kapillarporosität: nicht durchgängig Makroporen: viele Luftülporen bis 1 mm, künstlich porosiert Kontakt: intakt
	Spritzbeton II 12-20 mm	<u>Spritzbeton II (12-20 mm):</u> Bindemittel: PC Zuschlag: karbonatisch, leicht gerundeter Sand, 0 – 0.5 mm Mischung: fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: tief Makroporen: ganz vereinzelt bis 0.5 mm Gefügeschäden: keine Kontakt: zu SPBIII gut
	Spritzbeton III	<u>Spritzbeton III (20-50 mm):</u> Verschiedene Schichten mit dem gleichen Material und variierender Mischung Bindemittel: PC Zuschlag: silikatisch, wenig karbonatisch, gebrochener Sand gerundete grössere Komponenten, 0 - 4 mm Mischung: ausgewogen bis mager Gefüge: kompakt Kapillarporosität: im Bindemittel mittel Makroporen: einzelne magere Schichten bis 0.5 mm Gefügeschäden: einzelne Schwindrisse





M102 Mikroskopische Beobachtungen

Bohrkern Nr. / Probe Nr.	Material und Beobachtungstiefe	Beobachtungen
8.3 10	Stampfbeton Tunnelparamente / 10 cm 	<u>Stampfbeton:</u> Bindemittel: PC Zuschlag: silikatisch, wenig karbonatisch, leicht gerundete Komponenten, 0 - 20 mm Mischung: eher fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: eher tief Makroporen: wenige regelmässig verteilte Poren bis 2 mm Gefügeschäden: keine
9.5	Spritzbeton Betonstein Mörtel Tunnelgewölbe/ 5 cm 	<u>Spritzbeton</u> Bindemittel: hydraulisch Zuschlag: karbonatisch, leicht gerundet, 0 - 5 mm Mischung: fett Gefüge: kompakt Kapillarporosität: tief Makroporen: grössere primäre Poren bis 5 mm <u>Betonstein</u> Bindemittel: PC Zuschlag: silikatisch und karbonatisch, leicht gerundeter Sand, gut gerundete grosse Komponenten, 0 - 40 mm Mischung: ausgewogen Gefüge: kompakt Kapillarporosität: eher tief Makroporen: wenige regelmässig verteilte Poren bis 2 mm Gefügeschäden: keine Kontakt: zum Mörtel teilweise Hohlstellen <u>Mörtel</u> Wie Dünnschliff 6.8