

FPREISIGAG

BAUINGENIEURE UND PLANER SIA USIC



Arosertunnel Rhätische Bahn – Vorbereitende Injektionsarbeiten

ETHZ, Professur für Untertagebau – Kolloquium vom 18.11.2021

Marco Galli und Andreas Zimmermann





**Arosertunnel der Rhätischen Bahn –
Vorbereitende Injektionsarbeiten**

Die Autoren



Marco Galli

Dipl. Bau-Ing ETHZ
F. Preisig AG, Zürich



Andreas Zimmermann

Dipl. Bau-Ing ETHZ
fretus ag, Bad Zurzach

Wo befinden wir uns?

Arosertunnel
(einspurig / 300m / gerade / 60‰)

Bahnhof Arosa

Arosa 1750 müM

RhB-Linie von Chur

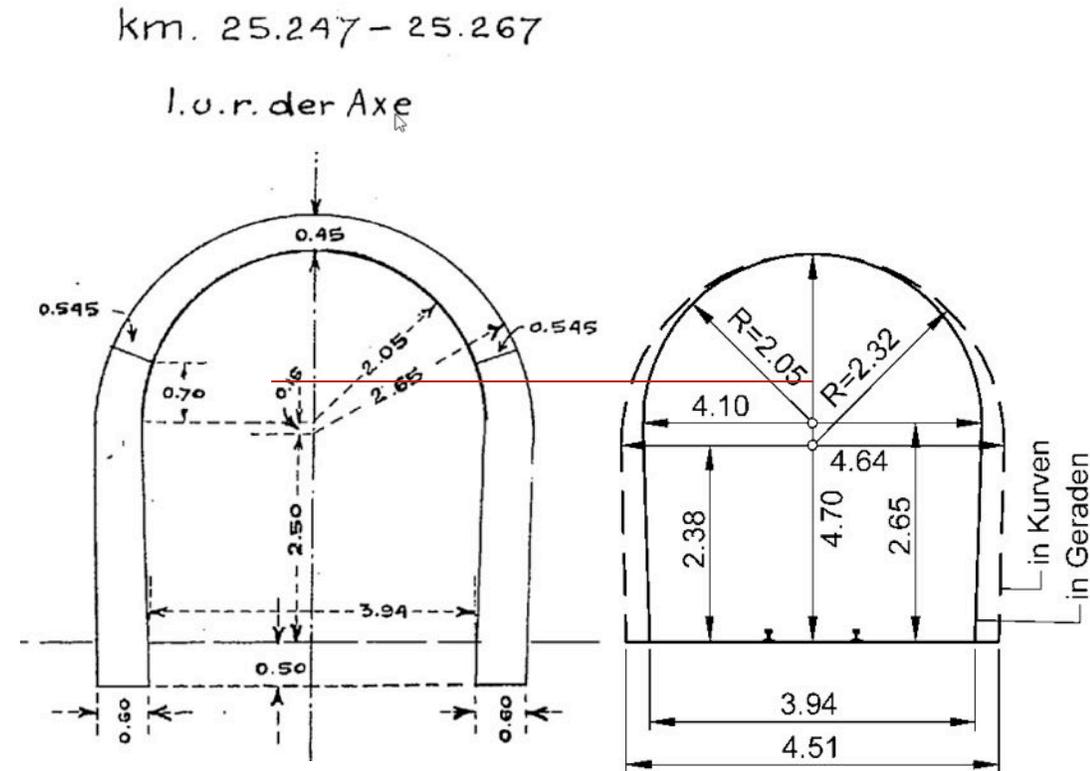
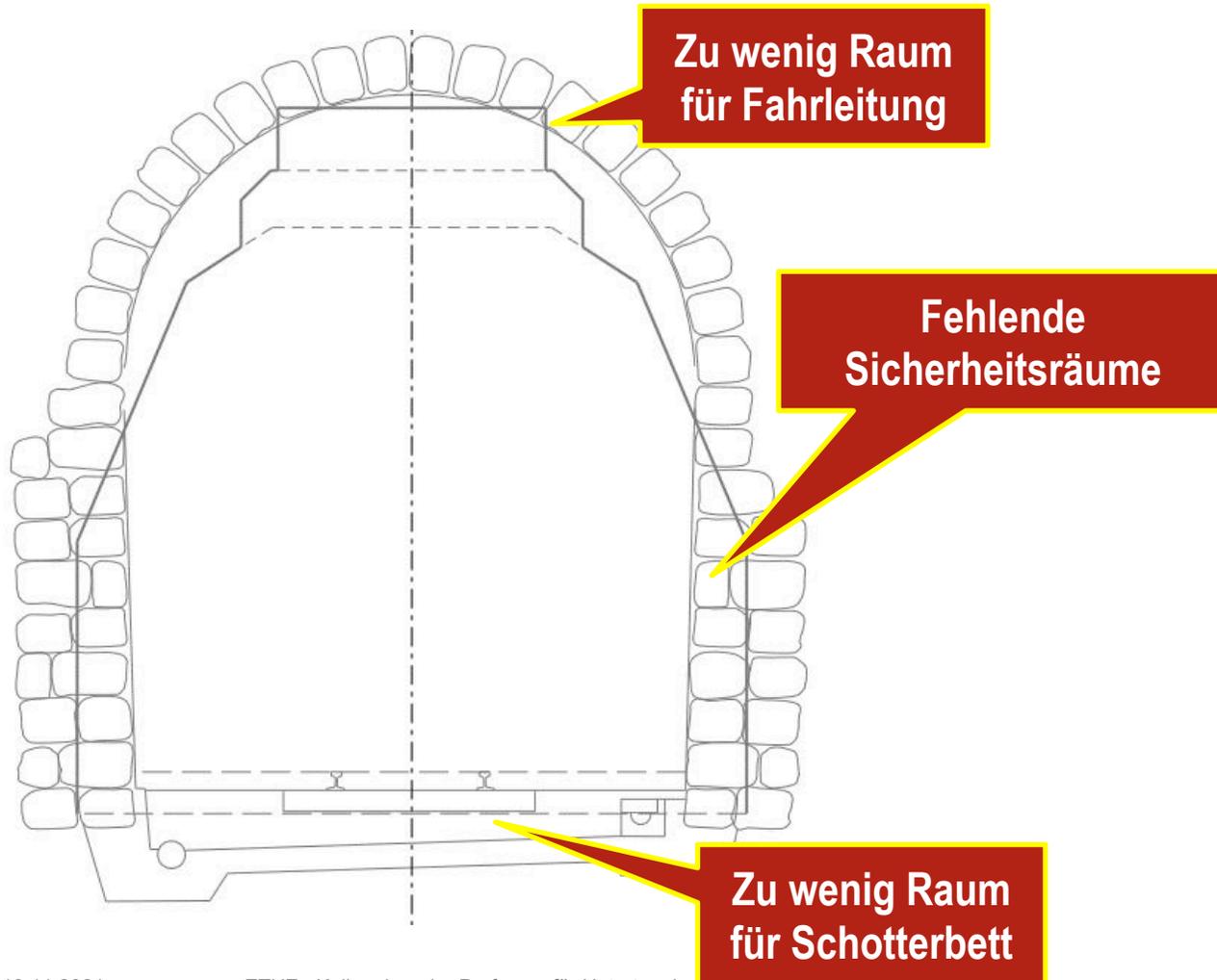
Bestand: Zustand



- Inbetriebnahme: 1914
- Verkleidung:
Naturstein-Mauerwerk

- Typische Schäden:
 - Defekte Fugen
 - Wassereintritte (Eisbildung!)
 - Deformationen

Bestand: Lichtraumprofil



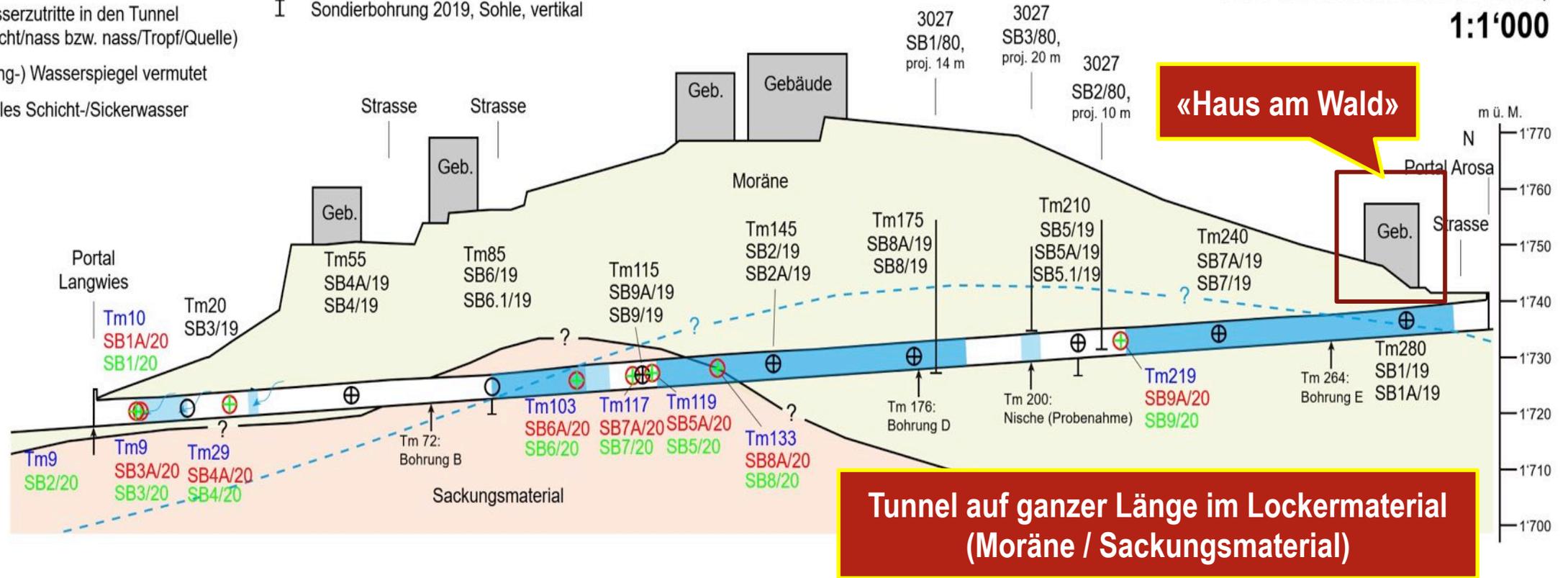
Standardnormalprofil Tunnel der Arosaline (1914)

Geologie

Legende

- Moräne
- Sackungsmasse (möglich)
- Wasserzutritte in den Tunnel (feucht/nass bzw. nass/Tropf/Quelle)
- (Hang-) Wasserspiegel vermutet
- lokales Schicht-/Sickerwasser
- / Sondierbohrung 2019 / 2020, Parament bergseits, 45° steigend / fallend
- / Sondierbohrung 2019 / 2020, Parament talseits, 45° steigend / fallend
- Sondierbohrung 2019, Sohle, vertikal

Anhang 2 Längsprofil mit Sondierstandorten, 1:1'000



Geologie

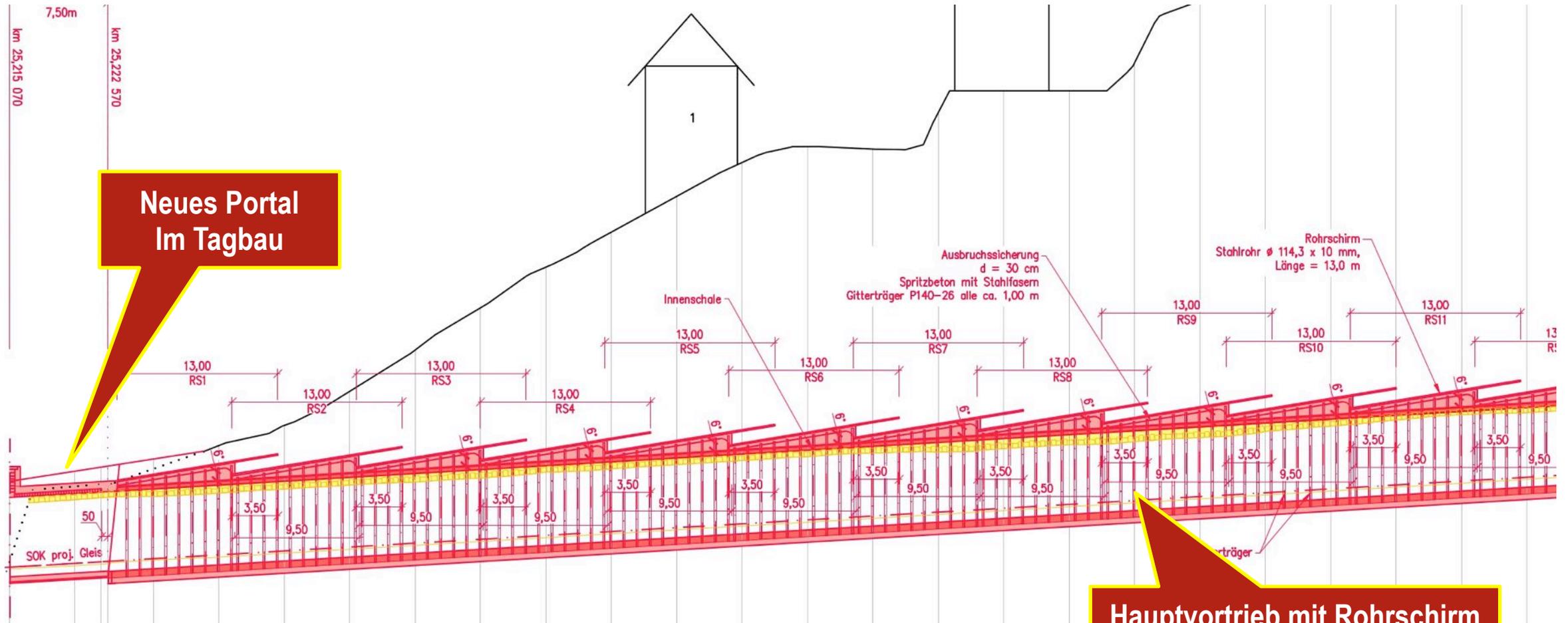
Tabelle 10: Abschätzung Baugrundwerte Lockergestein							
Locker- gestein	USCS	Feucht- raum- gewicht [kN/m ³]	Lagerungs- dichte / Konsistenz	M _E -Wert (3) [MN/m ²]	Reibungs- winkel [°]	Ko- häsion [kN/m ²]	Durch- lässigkeit [m/s]
Moräne (1)	GC-GM , GC, GM, GW-GM, SM, SC- SM	21 ± 1.0	dicht bis sehr dicht	70 (60 – 100)	36 (34 – 38)	5 (0 – 10)	1 x 10 ⁻⁴ bis 1 x 10 ⁻⁷
Sackungs- material (2)	GM , GW- GM, GC- GM, SM, SC-SM	21 ± 1.0	mitteldicht bis dicht	40 (30 – 70)	34 (32 – 36)	2 (0 – 5)	1 x 10 ⁻³ bis 1 x 10 ⁻⁷

Bemerkungen:

- (1) Kies, sandig, schwach siltig bis stark siltig, oft tonig, lokal Sand, siltig, schwach tonig bis tonig, reichlich Steine, wenig Blöcke.
- (2) Kies, sandig, schwach siltig bis siltig, lokal tonig, z.T. Sand, siltig, schwach tonig, reichlich Steine und Blöcke, lokal Blocklagen und mehrere Meter mächtige zerbrochene Felspakete.
- (3) Die angegebenen M_E-Werte sind Erstbelastungswerte. Für Wiederbelastungsverhältnisse kann erfahrungsgemäss der dreifache M_E-Wert der Erstbelastung eingesetzt werden.

Warum Injektionen?

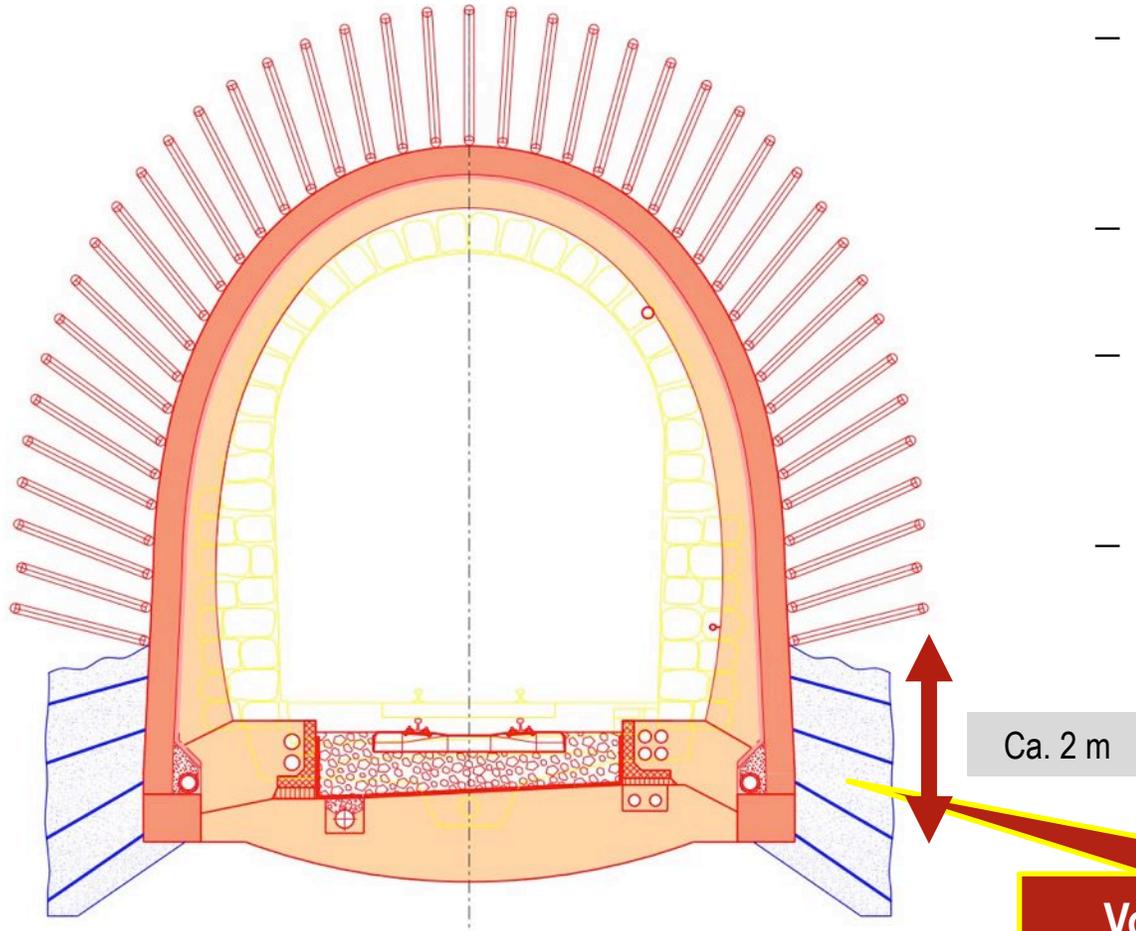
Rohrschirmvortrieb



**Neues Portal
Im Tagbau**

**Hauptvortrieb mit Rohrschirm
(Etappe 13m / 9.5m)**

Rohrschirmvortrieb



- Rohrschirm mit 41 Rohren
(Da $114.3 \text{ mm} / t = 1 \text{ mm} / L = 13.0 \text{ m}$)
- Ausführung ab bestehender Sohle
(bahn-/baubetriebliche Vorgabe)
- D.h. für Erstellung der neuen Widerlager fehlt der Schutz durch Rohrschirm
- Deshalb: Systematische Widerlagerinjektionen

**Voraus ausgeführte Injektionen
in den Widerlagerbereichen**

Warum Injektionen?

Unterquerung «Haus am Wald»

Liegenschaft «Haus am Wald» liegt
Direkt über Tunnel (Keller!)

Minimaler Abstand UK Fundament zu
Innenkante Tunnelgewölbe ca. 0.5 m



Deshalb: Vorab ausgeführte Injektionen
rund um den Tunnel
(Widerlager- und Kalotteninjektionen)

Gewünschte Wirkung der Injektionen

Ziele:

- Verbesserung der Standfestigkeit
- Erhöhung der Kohäsion

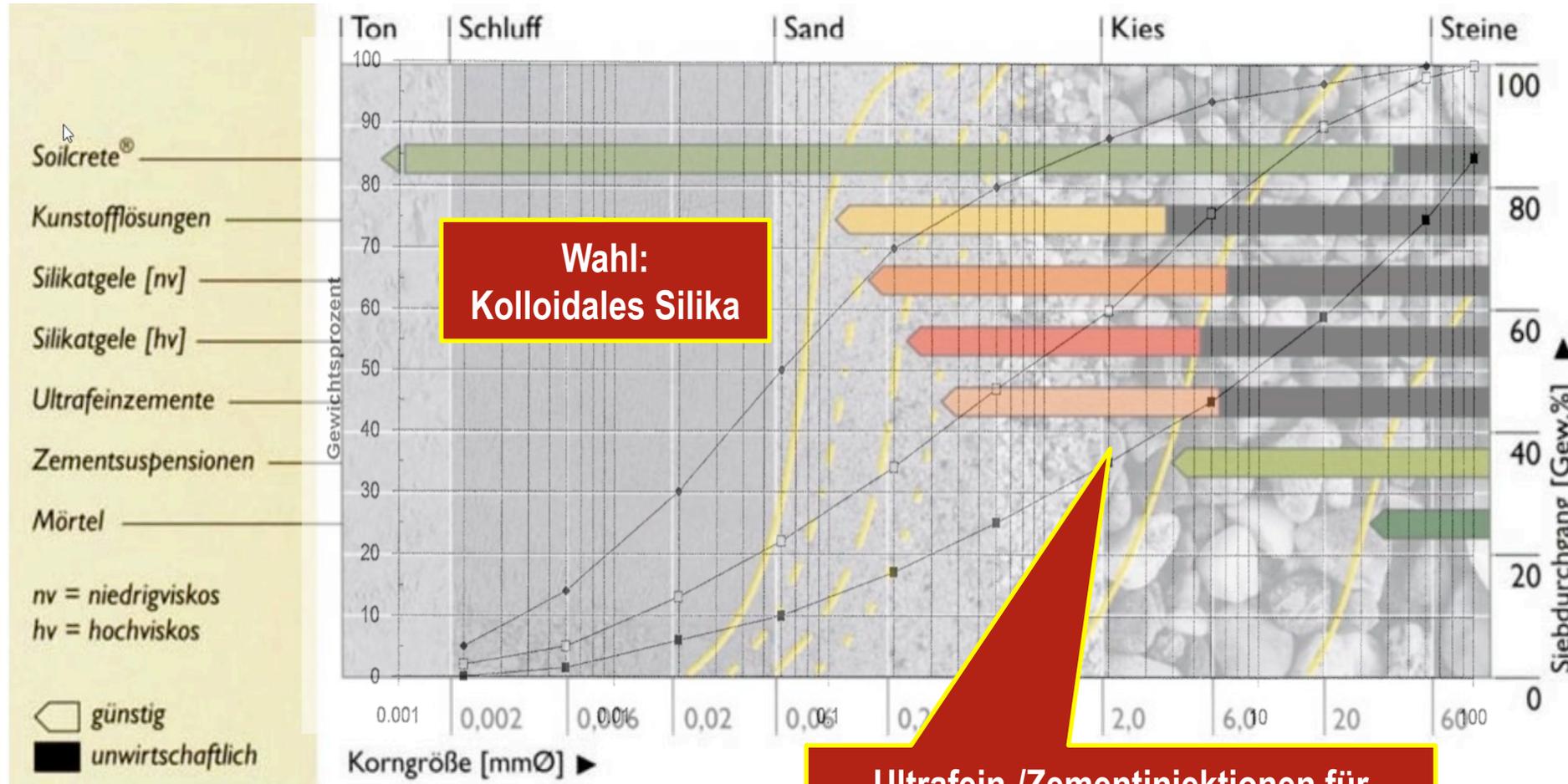
Konkret:

- Erreichen einer Standfestigkeit von einigen Stunden für Ausbruch und Sicherung mit Spritzbeton

**Parament / Widerlager-Bereich
unterhalb der untersten
Rohrschirm-Rohre**



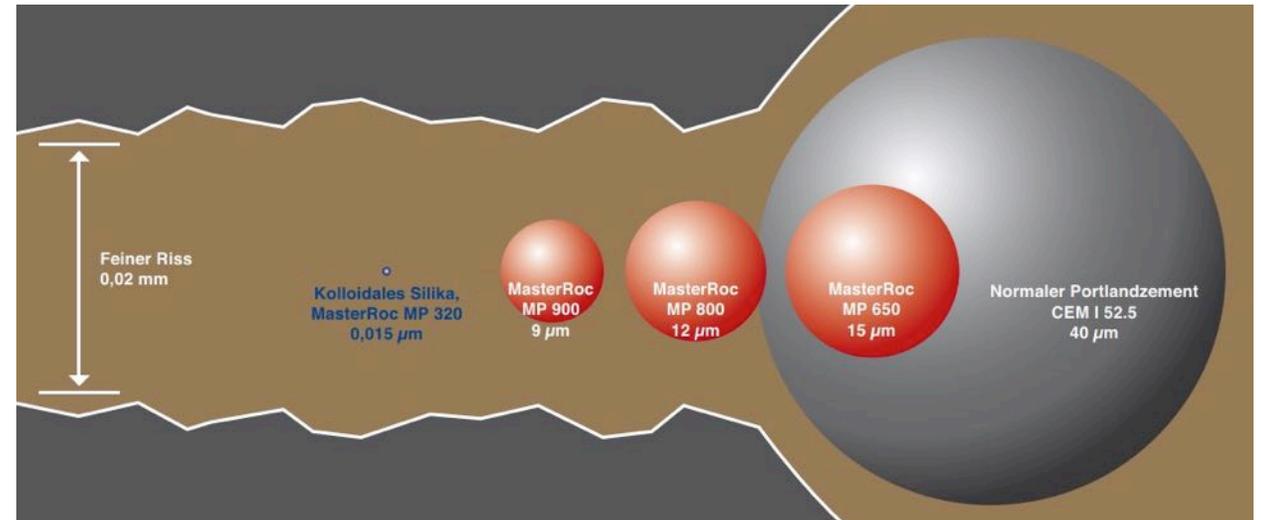
Problematik: Injizierbarkeit



- Resultate Baugrunduntersuchung
- Insb. Siebdurchgangslinie
- Beschreibung des Materials
- Einschätzung Geologe

Kolloidales Silika (MasterRoc MP 320)

- Silikat-Einstoff-System:
Suspension aus Siliziumdioxid und Wasser
- Verfestigung erfolgt durch Gelierung;
Auslösung durch Zugabe eines Salzes
- Gelzeiten steuerbar über Beschleuniger
(ca. 10 Minuten bis mehrere Stunden /
temperaturabhängig)
- Sehr kleine Partikel
(600 – 1000 x kleiner als Feinstzemente)
- Sehr tiefe Viskosität
(ca. 5 mPa·s, ähnlich Wasser)
- Dringt auch in sehr feine Risse und Öffnungen
- umweltfreundlich
- Verarbeitung mit Standardgeräten für Zement-Injektionen



Achtung: Undichtes Tunnelgewölbe

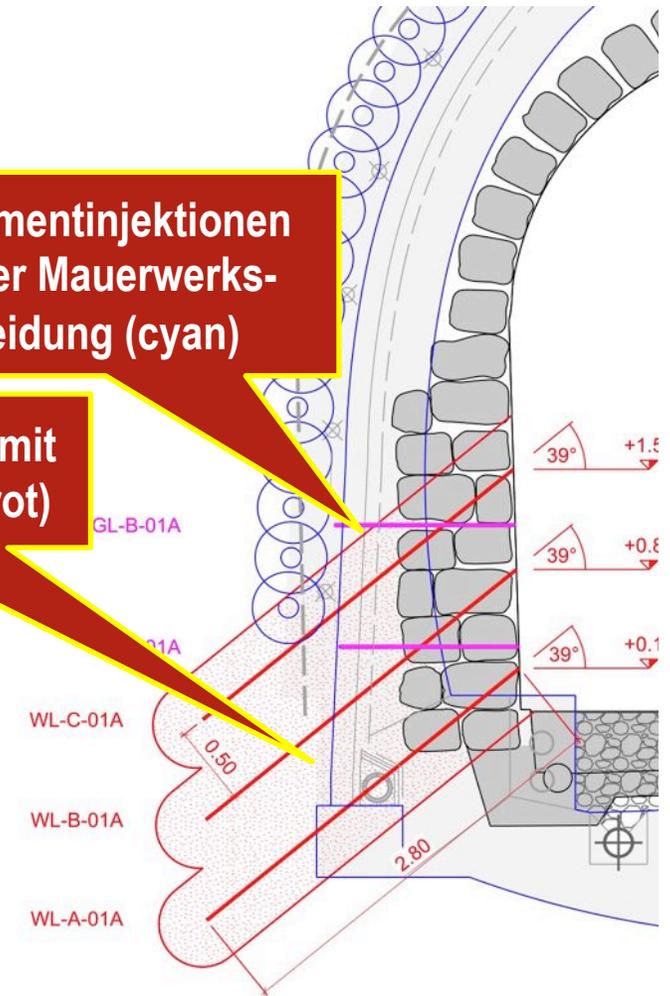


**Mauerwerk / Fugen undicht
→ Abdichtung nötig!**

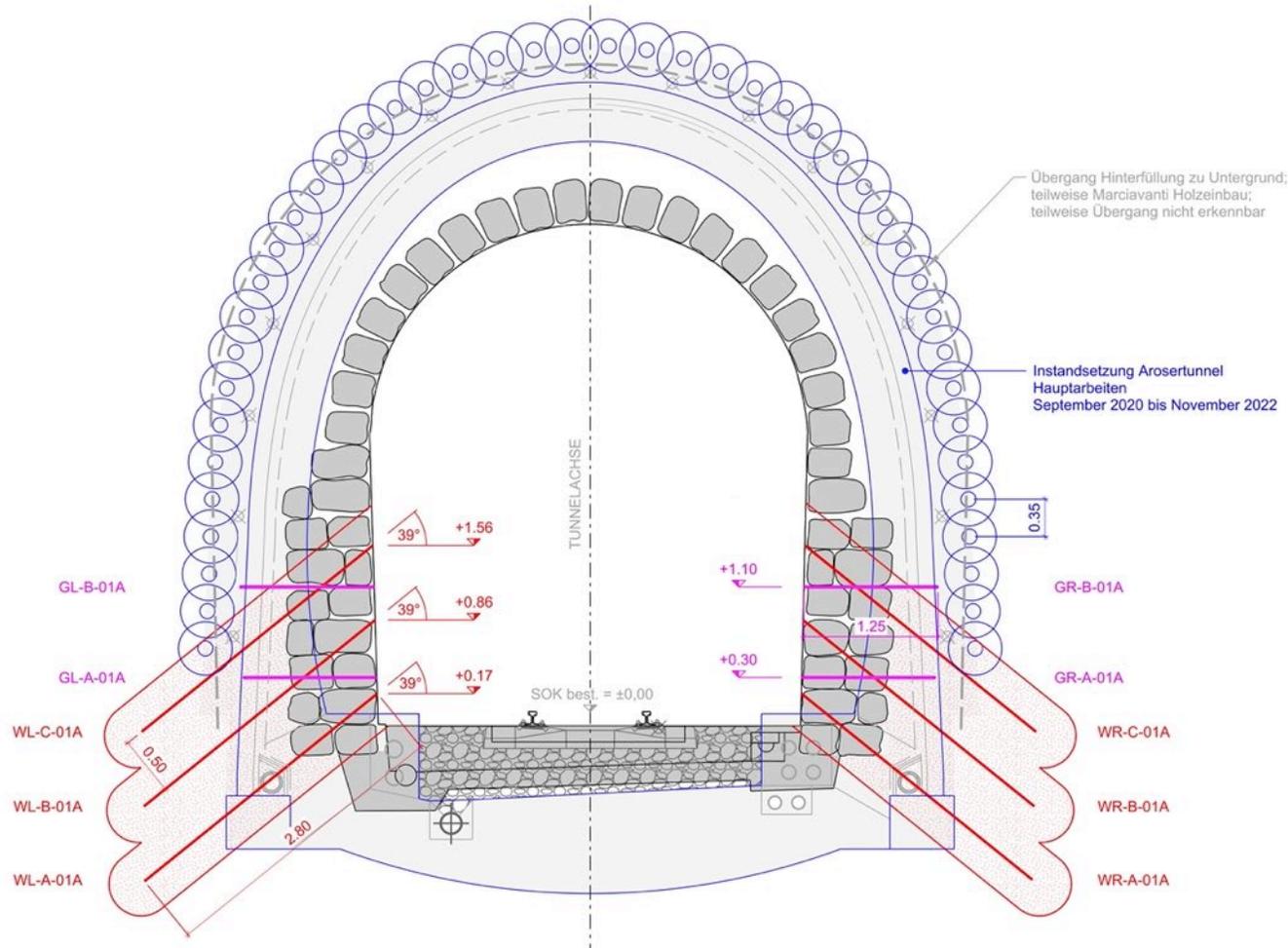


**Vorab Zementinjektionen
Hinter der Mauerwerks-
Auskleidung (cyan)**

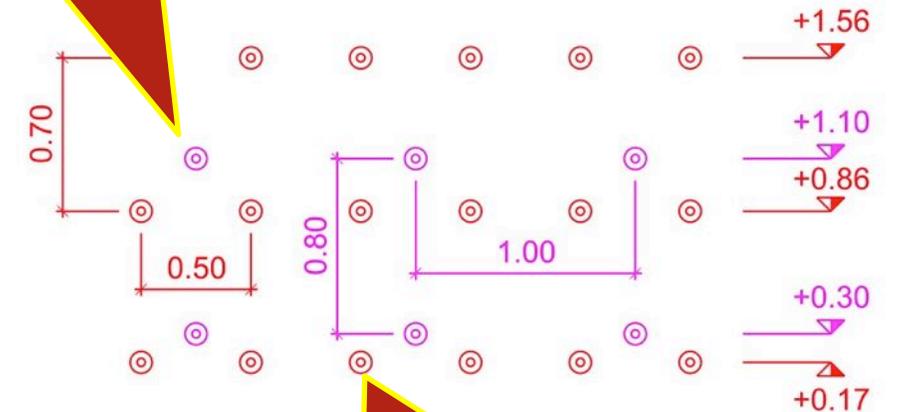
**Danach Injektionen mit
kolloidalem Silika (rot)**



Zweiphasige Injektionen im Widerlagerbereich (ganze Tunnellänge)

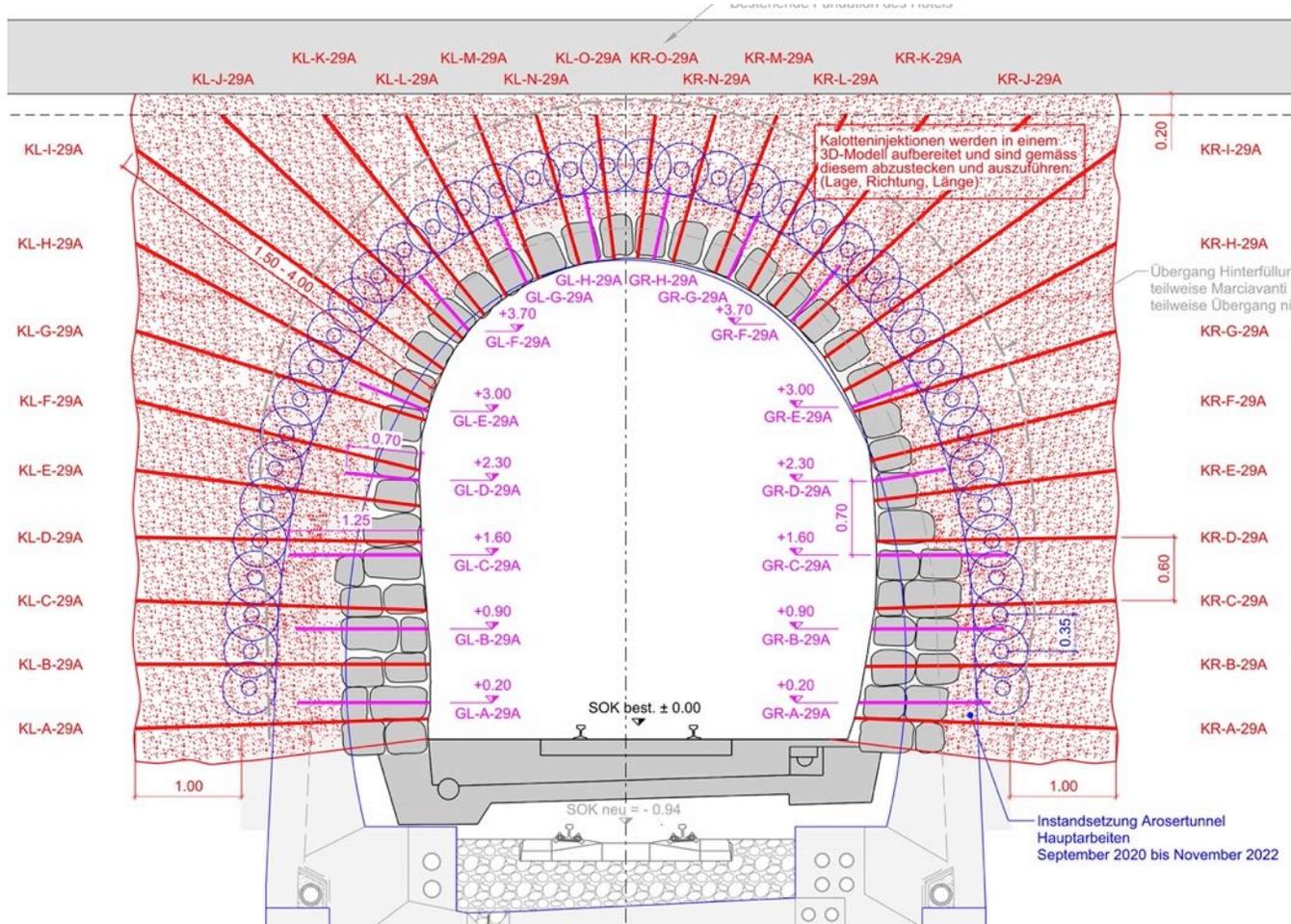


Zementinjektionen:
 beidseitig 2 Reihen
 $L = 1.25 \text{ m}$, $a = 1.0 \times 0.8 \text{ m}$

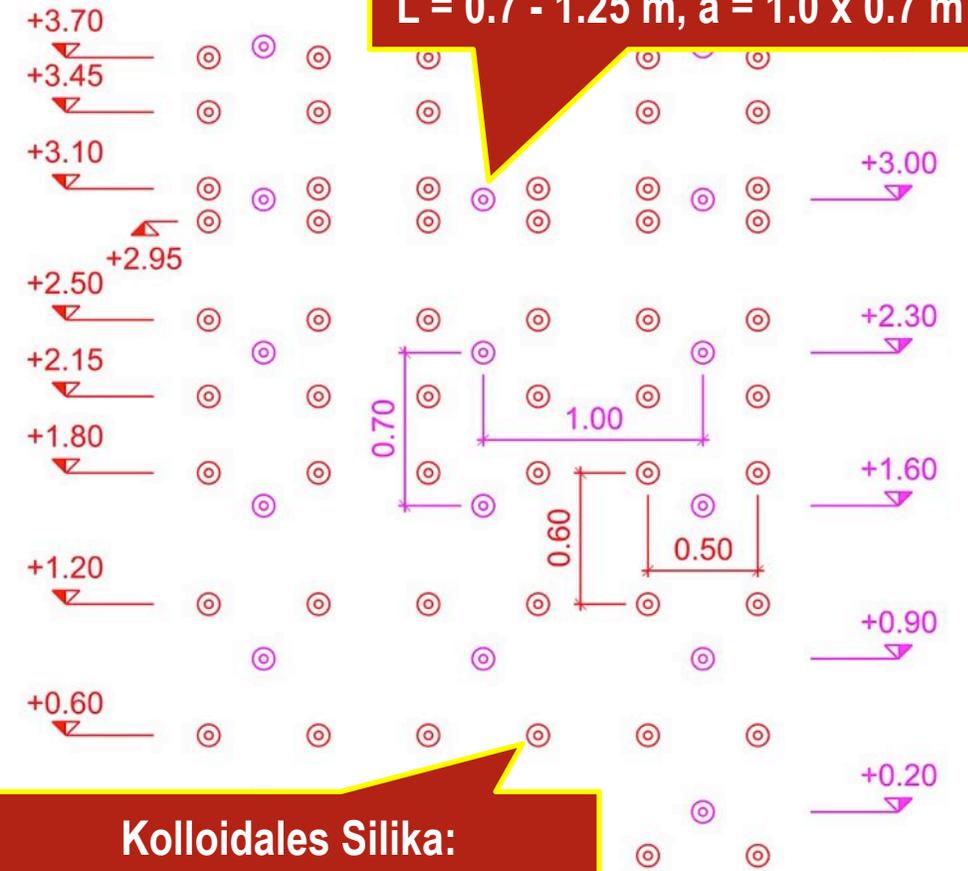


Kolloidales Silika:
 beidseitig 3-4 Reihen
 $L = 2.8 - 3.5 \text{ m}$, $a = 0.5 \times 0.7 \text{ m}$

Zweiphasige Injektionen in der Kalotte (unter «Haus am Wald»)

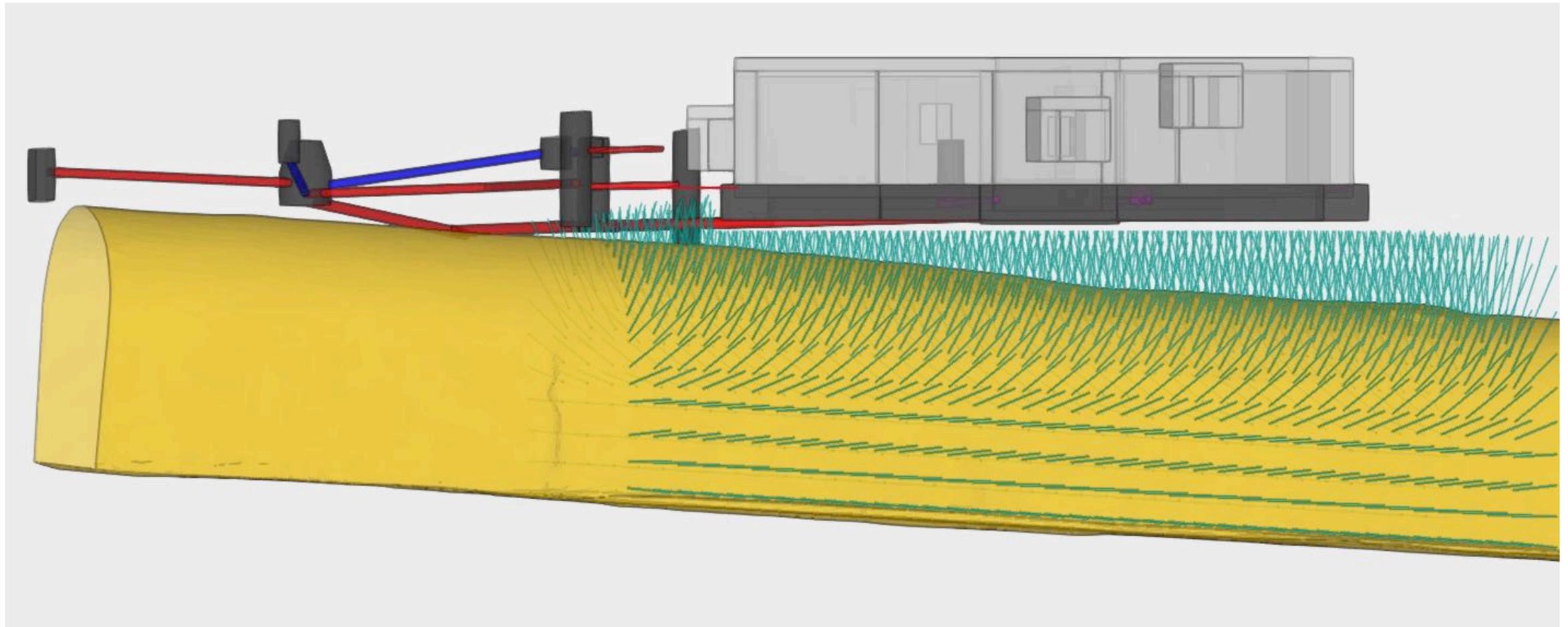


Zementinjektionen:
beidseitig 8 Reihen
 $L = 0.7 - 1.25 \text{ m}$, $a = 1.0 \times 0.7 \text{ m}$



Kolloidales Silika:
beidseitig 15 Reihen
 $L = 1.5 - 4.0 \text{ m}$, $a = 0.5 \times 0.6 \text{ m}$

«Igel» der Injektionsbohrungen (unter «Haus am Wald»)





Arbeiten in Nachtzugspausen

- Tagsüber Bahnbetrieb
- Deshalb: Arbeiten nur in den nächtlichen Betriebspausen
- Arbeitsstellen müssen jede Nacht eingerichtet und wieder vollständig geräumt werden

Einricht-/Abräumzeit schmälert
Arbeitszeit pro Nachtschicht



← Brutto 9 h
Netto 7h →



An den Portalen: Druckluft,
Zementsilo, Absetzbecken,
Neutralisation

Zementinjektionen

- Unverrohrte Bohrung
- Einfaches Injektionsröhrchen mit Einfachpacker am Bohrlochmund
- “Drucklose“ Injektion mit Zementsuspension



Einbau Manschettenrohre

- Bohrungen D90 mm, unverroht
- Sofortiger Einbau der Manschettenrohre: PP, D 1.5“, Manschettenabstand 0.33 m
- Ummantelung der Manschettenrohre mit Zementsuspension



Erstellen der unverrohrten Bohrungen

Manschettenrohre in nötiger Länge gemäss 3D-Modell vorbereitet und mit Injektionsschlauch ausgestattet

Bohrarbeiten



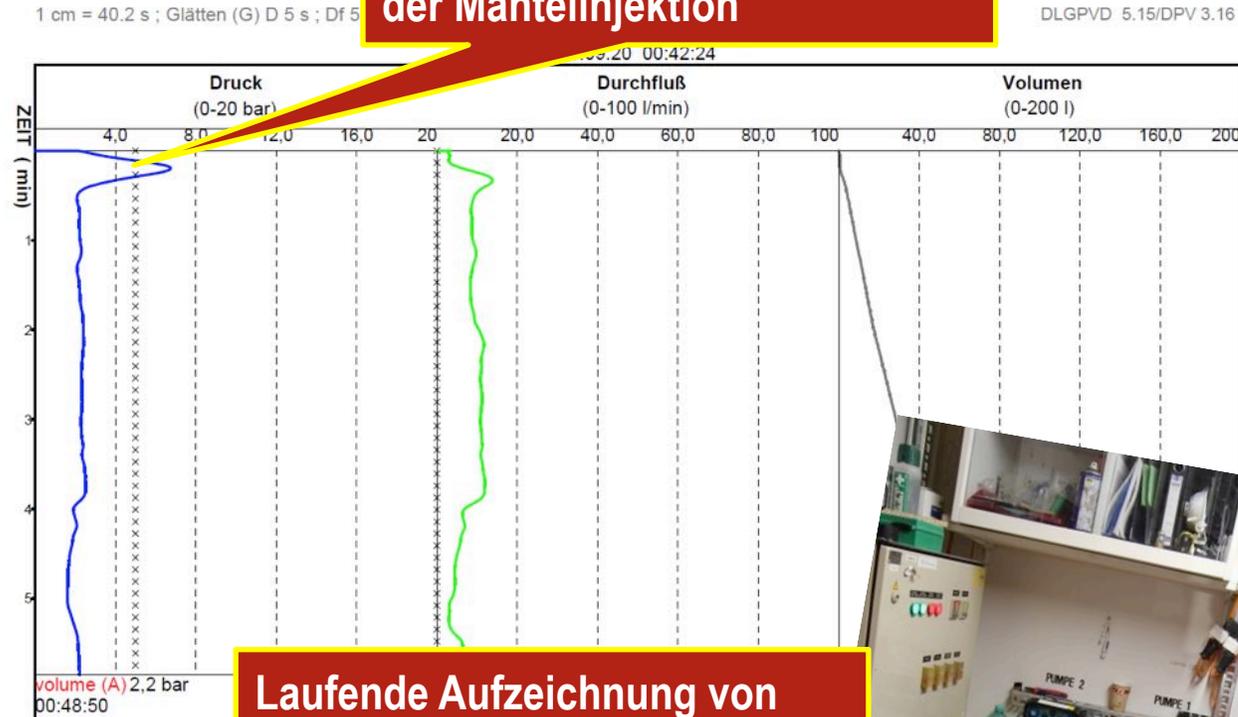
Im Parament:
Mit Bohrraupen ab Sohle



In der Kalotte:
Mit Bohrbagger ab Bahnwagen

Injektion Kolloidales Silika

- Mischung der Komponenten mit Kolloidalmischer
- Verpressung mit Plungerpumpen (2 pro Injektionsgruppe)
- Injektion mit kolloidalem Silika über hydraulischen Doppelpacker
- Abbruchkriterien: Druck, Injektionsmenge, Austritt (laufende Überprüfung und Anpassung durch PV)



Druckspitze beim Aufbrechen der Mantelinjektion

Laufende Aufzeichnung von Druck, Durchfluss und Volumen



Heikle Verhältnisse unter «Haus am Wald»

- Reihenfolge beachten
- Druck und Mengen-Kriterium strikt einhalten
- Überblick bewahren

Blick aus der Injektionsstation auf die Arbeitsstelle



Minutiöse Anweisungen In Checklisten

Rimpe 2

Anmerkung - Kalibrierungen	RECHTS	Reihenfolge	Bezeichnung für Baugliederung	Fächer / Klemmenführung	RECHTS Zone 20.1																		
					20A 25481.0	20B 25481.5	20C 25482.0	20D 25482.5	20E 25483.0	20F 25483.5	20G 25484.0	20H 25484.5	20I 25485.0	20J 25485.5	20K 25486.0	20L 25486.5							
DR-O	10	10	10	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-N	14	14	14	14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-M	117.55	117.55	117.55	117.55	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-L	15	15	15	15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-K	12.13	12.13	12.13	12.13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-P	16	16	16	16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-Q	17	17	17	17	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-R	18	18	18	18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-S	19	19	19	19	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-T	20	20	20	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-U	21	21	21	21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-V	22	22	22	22	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-W	23	23	23	23	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-X	24	24	24	24	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-Y	25	25	25	25	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-Z	26	26	26	26	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AA	27	27	27	27	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AB	28	28	28	28	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AC	29	29	29	29	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AD	30	30	30	30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AE	31	31	31	31	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AF	32	32	32	32	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AG	33	33	33	33	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AH	34	34	34	34	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AI	35	35	35	35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AJ	36	36	36	36	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AK	37	37	37	37	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AL	38	38	38	38	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AM	39	39	39	39	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AN	40	40	40	40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AO	41	41	41	41	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AP	42	42	42	42	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AQ	43	43	43	43	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AR	44	44	44	44	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AS	45	45	45	45	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AT	46	46	46	46	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AU	47	47	47	47	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AV	48	48	48	48	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AW	49	49	49	49	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AX	50	50	50	50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AY	51	51	51	51	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AZ	52	52	52	52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AA	53	53	53	53	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AB	54	54	54	54	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AC	55	55	55	55	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AD	56	56	56	56	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AE	57	57	57	57	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AF	58	58	58	58	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AG	59	59	59	59	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AH	60	60	60	60	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AI	61	61	61	61	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AJ	62	62	62	62	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AK	63	63	63	63	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AL	64	64	64	64	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AM	65	65	65	65	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AN	66	66	66	66	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AO	67	67	67	67	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AP	68	68	68	68	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AQ	69	69	69	69	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AR	70	70	70	70	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AS	71	71	71	71	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AT	72	72	72	72	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AU	73	73	73	73	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AV	74	74	74	74	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AW	75	75	75	75	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AX	76	76	76	76	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AY	77	77	77	77	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AZ	78	78	78	78	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AA	79	79	79	79	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AB	80	80	80	80	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AC	81	81	81	81	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DR-AD	82	82	82	82																			

Ausführung

Logistik



**Insgesamt rund 800 m³
verarbeitet (800 Gebinde!)**



**Transport zum Einbauort
mit Bauzug (8 m³ pro
Nacht und Arbeitsstelle)**

Wirkung

Ergebnis

Sondierbohrung SB10a/20:



Sondierbohrung SB10b/20:

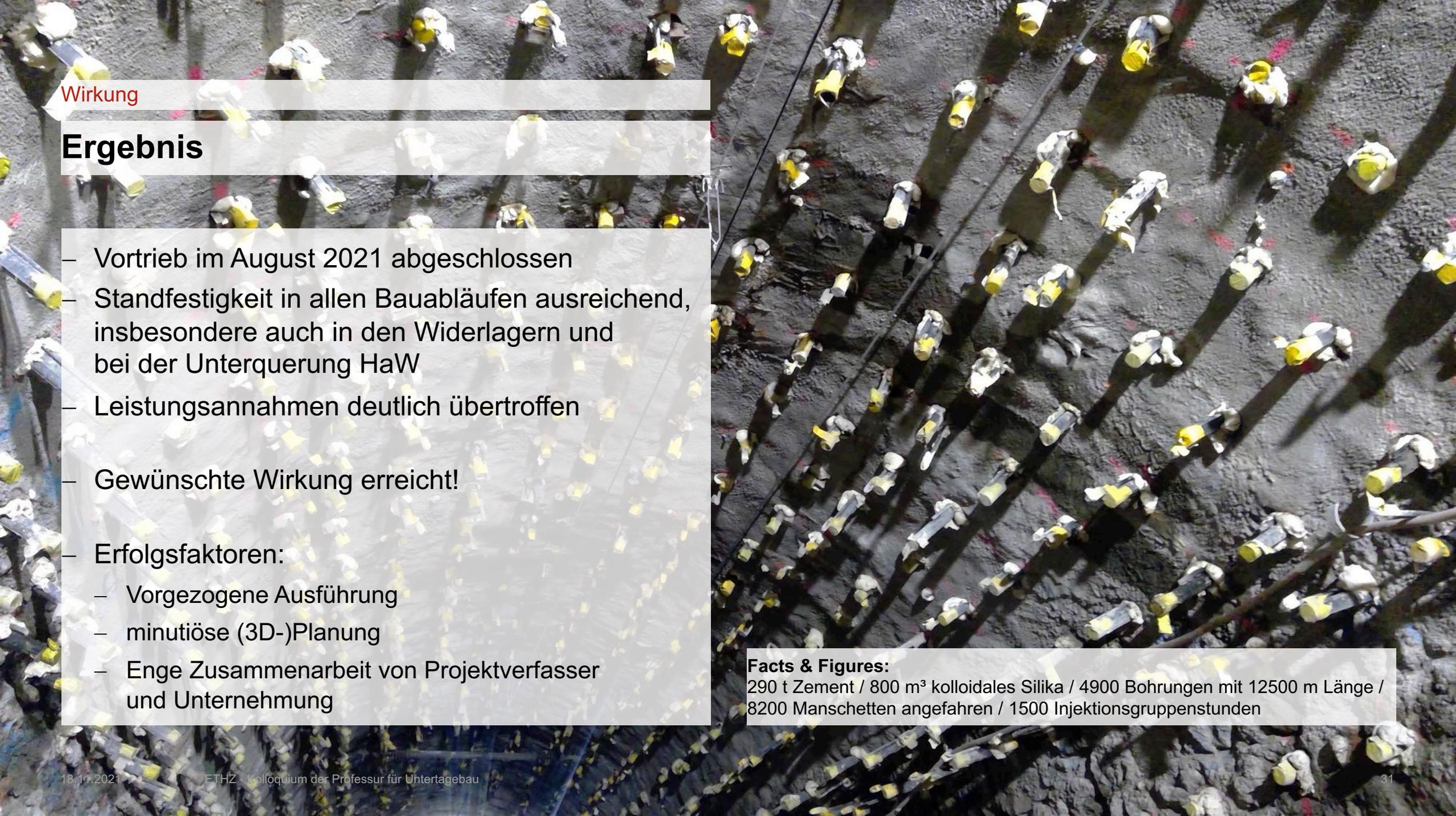


Wirkung im Ausbruchvorgang eindeutig: Standfestigkeit erreicht

Nachweis über Leitfähigkeit nicht eindeutig

Optisch war das kollidale Silika in den Bohrkernen praktisch nicht zu erkennen





Wirkung

Ergebnis

- Vortrieb im August 2021 abgeschlossen
- Standfestigkeit in allen Bauabläufen ausreichend, insbesondere auch in den Widerlagern und bei der Unterquerung HaW
- Leistungsannahmen deutlich übertroffen
- Gewünschte Wirkung erreicht!
- Erfolgsfaktoren:
 - Vorgezogene Ausführung
 - minutiöse (3D-)Planung
 - Enge Zusammenarbeit von Projektverfasser und Unternehmung

Facts & Figures:

290 t Zement / 800 m³ kolloidales Silika / 4900 Bohrungen mit 12500 m Länge / 8200 Manschetten angefahren / 1500 Injektionsgruppenstunden

Quellen

- Geologisch-Geotechnischer Bericht (Büro für Technische Geologie AG)
- Produkt- und Verfahrens-Dokumentationen BASF «Master Builders»
- Projektpläne F. Preisig AG
- Projektpläne Amberg Engineering AG
- 3D-Modell InfraDigital AG
- Fotos Projektverfasser, Bauleitung, Unternehmung, Geologe