

Linienkonzept Albula, Projektstudie Tunnelportale

Schlussbesprechung 5. Dezember 2023

Maximaler Erhalt des Bestands bei der Vergrösserung der Tunnelportale

Capaul & Blumenthal architects ETH BSA SIA mit Giachen Blumenthal Ingenieur dipl. Ing. HTL SIA FBH

Mitarbeit : Ramun Capaul, Gordian Blumenthal, Jaehee Shin mit Giachen Blumenthal

Maximaler Erhalt des Bestands bei der Ausweitung der Portalöffnung

- Erhalt der Portalwand in ihrer ursprünglichen Bauweise als Natursteinmauerwerk
- Situative Analyse und Beurteilung des Istzustands und individuelle Massnahmenempfehlung
- Sichern, Reparatur und Ertüchtigung des Bestands
- Ergänzungen und Erneuerung des Natursteinmauerwerks mit dem vorhandenem Abbruch-/ Lagermaterial in analoger Technik/Bauweise
- Bildung eines Abbruchbogens mittels Konsolsteinen (Abfangsteinen)
- Beibehalten der originalen, charakteristischen Hufeisengeometrie
- Wiederverwendung der Kranzsteine
- Ablesbarkeit der Vergrösserungsmassnahmen
- Vorsatzschale Tunnel als Verbundkonstruktion Naturstein/Beton
- Fliessender Übergang von der (formbaren) gemauerten Vorsatzschale zur (starren) Tübbinggeometrie

Die vorliegende Konzeption stützt sich grundsätzlich auf das Linienkonzept Albula 2020 der RhB mit dem Ingenieurbüro Conzett Bronzini Partner AG, wonach die vergrösserten Portale gänzlich als Natursteinmauerwerk ausgebildet und die Geometrie des typischen RhB-Hufeisentunnelprofils, Halbkreisbogen auf Paramentwänden mit Anzug, beibehalten wird.

Bei der Ausweitung der Portalöffnung soll jedoch vermieden werden, dass das bestehende Natursteinmauerwerk jeweils vollständig abgebrochen werden muss. Unter Beurteilung und Beachtung des Istzustands der gemauerten Portalwand soll diese in ihrer ursprünglichen Bauart integral erhalten werden.

Die Bereiche der Natursteinmauer am Fels/Gelände werden punktuell ausgebessert und verfestigt (Steinersatz und Fugen). Bei einzelnen Portalen wird die Portalwand erhöht, wenn die Ausweitung der Portalöffnung dies erfordert. Der Wandbereich über der Portalöffnung wird zur Aufnahme der Abdichtung bergseitig mit einer dünnen Ausgleichsschicht versehen. Grundsätzlich soll das unkontrollierte Eindringen von Wasser in die Tragstruktur vermieden werden.

Bildung eines Abbruchbogens mittels Konsolsteinen

Durch die Anwendung aufgehängter Konsolsteinen (Abfangsteinen) und dank des dadurch entstehenden Abbruchbogens (stützlinienförmigen Gewölbes), kann die Vergrösserung der Portalöffnung erfolgen, ohne dass das darüberliegende Mauerwerk abgebrochen werden muss. Der Zusammenhalt der Mauer wird durch temporäre Spannstangen gewährleistet, welche nach Fertigstellung der Profilausweitung entfernt werden. Die Konsolsteine bleiben indes im Mauerwerk integriert und lassen den baulichen Eingriff ablesen.



Istzustands des Touatunnels Seite Muot

Wiederverwendung der Kranzsteine beim vergrösserten Bogen

Die vorhandenen bossierten Kranzsteine werden in ihre ursprünglichen Form belassen und für den neuen Halbkreisbogens wiederverwendet. Die durch den grösseren Radius veränderte Geometrie des Bogens wird durch konisch ausgebildete Fugen ausgeglichen. Für die Druckfestigkeit sorgen konisch zugeschnittene Steinklötze (Drucksteine) in der Fugenmitte, welche frontal leicht über die Kranzsteine hervorstehen und als neues Element im neuen vergrösserten Kranzbogen ablesbar bleiben. Oberhalb und unterhalb der Drucksteine wird die Fuge mit Kalkmörtel geschlossen.

Asymmetrische Ausweitung der Portalöffnung

Bei einzelnen Tunnelportalen soll geprüft werden, ob die Ausweitung der Portalöffnung asymmetrisch erfolgen kann, wenn die entsprechende Anpassung der Linienführung dies zulässt. Wie beispielsweise beim Streda Tunnel zeigt sich, dass eine symmetrische Ausweitung der Portalöffnung den Abbruch der ganzen talseitigen Paramentwand zur Folge hätte. Mit der Verschiebung der Linienachse zum Hang kann dies vermieden und die charakteristische Eckausbildung des Portals erhalten werden.

Fliessender Übergang von der Portalgeometrie zur Tübbinggeometrie

Die Länge der im Betonverbund gemauerten, selbsttragenden Vorsatzschale im Tunnel orientiert sich bei längeren Tunnel an das erhöhte Mass von 10 m, wie es bei den zuletzt sanierten Tunnel zur Anwendung kam. Der Übergang zu den Tübbingelementen soll direkt und fliessend gestaltet werden, ohne Zwischenbereich aus Spritzbeton. Hierfür verformt sich die gemauerte Vorsatzschale von der Hufeisengeometrie in die starre Tübbinggeometrie.

Bei kürzeren Tunnel ist zu prüfen, ob die Ausmauerung mit Naturstein durchgehend sein kann und auf die Tübbingelemente gänzlich verzichtet wird. Die Tunnel ohne Instandsetzungsmassnahmen sind im Linienkonzept Albula 2020 behandelt und aufgeführt.

Ilanz, 30. 11. 2023
Ramun Capaul & Gordian Blumenthal, architects



Bergünertunnel



Bergünertunnel

KONZEPT MASSNAHMEN TUNNELPORTALE

Massnahmenkonzept und Tragverhalten der Portalwände

Vorbemerkungen

In der Vergangenheit wurden verschiedene Beiträge zu gemauerten Bogen- und Gewölbekonstruktionen veröffentlicht. Dabei wurden umfassende Angaben und Aspekte der Beurteilung von Natursteinbögen behandelt. Gleichzeitig werden Fragen der Tragfähigkeit und Sicherung von gewölbter Konstruktionen diskutiert und das Tragverhalten und Berechnung gemauerter Bögen und Gewölbe beleuchtet.

Tragverhalten von Mauerwerk

Im Ganzen entsteht ein allgemeiner Druckspannungszustand, während Zugspannungen nur begrenzt aufgenommen werden können. Aus diesem Ansatz für das Tragverhalten von Mauerwerk ergeben sich drei vereinfachenden Annahmen:
Mauerwerk besitzt keine Zugfestigkeit, einzelne Steine könne wohl eine beträchtliche Zugfestigkeit aufweisen, die des Mörtels ist jedoch unbedeutend.
Die Druckfestigkeit kann in erster Näherung als unbegrenzt angesehen werden.
Der Mörtel dient vorwiegend der Verfüllung von Zwischenräumen, ist weich und altert mit der Zeit und trägt nicht wesentlich zur Festigkeit der Konstruktion bei.

Diese grobe Annahmen reichen aus, um das durchschnittliche Verhalten von Mauerwerk zu betrachten und eine erste globale Abschätzung treffen zu können. Man kann zudem davon ausgehen, dass das Druckspannungsniveau im Vergleich zur Druckbruchtragfähigkeit bei den Bogenkonstruktionen der Portale vergleichsweise gering ist. Sicher können Spannungsspitzen auftreten, die zu einem lokalen Versagen in Form von Abplatzungen oder Absplittungen führen.

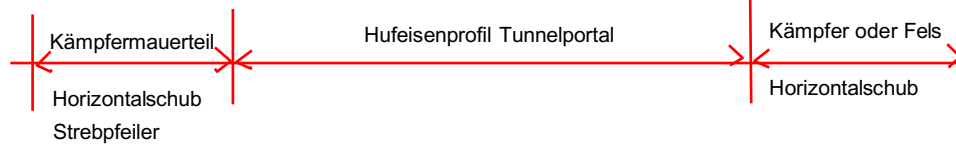
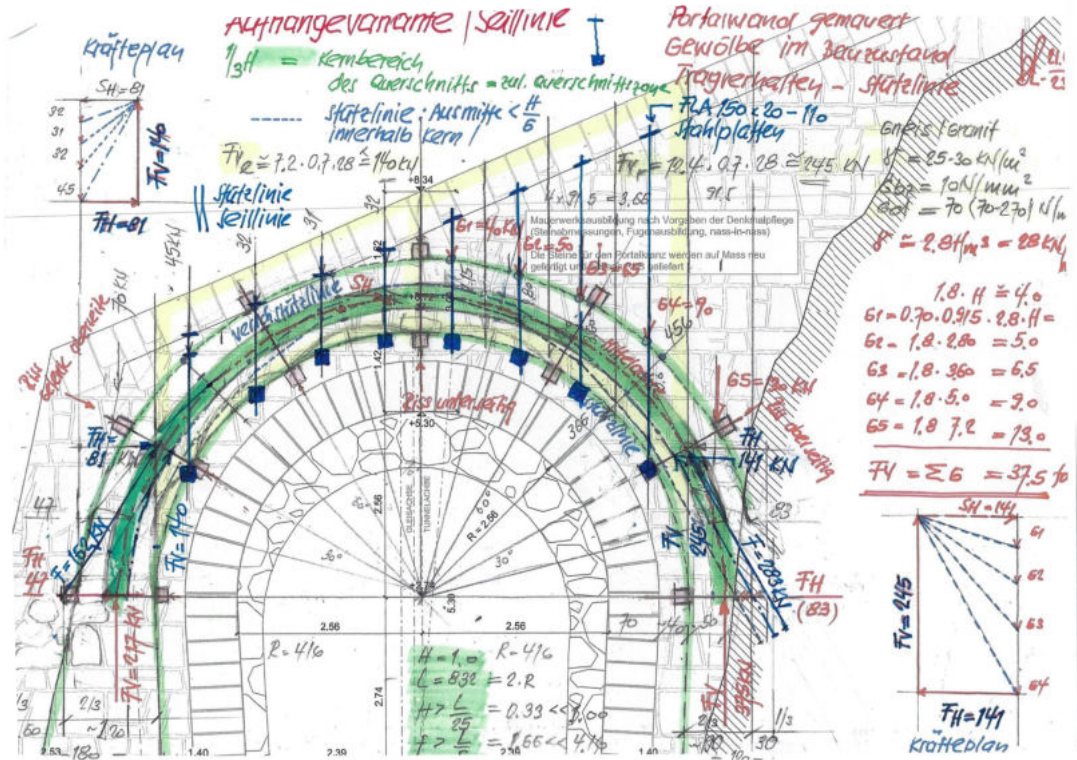
Allgemeines zum bestehenden Bogentragwerk aus Naturstein

Unter Beachtung der drei oben aufgeführten Annahmen zum Tragverhalten von Mauerwerk, ist es für die Standsicherheit ausreichend, wenn sich ein möglicher Gleichgewichtszustand im Bogentragwerk finden lässt.
Zum Tragverhalten von Mauerwerk muss nur eine **Stützlinie** gefunden werden, die vollständig innerhalb der Bogengeometrie liegt. In der Praxis muss aber eine zusätzliche Sicherheit eingehalten werden.
Ein Versagen infolge zu grosser Randspannungen oder etwaiger Imperfektionen muss ausgeschlossen werden, damit ein ausreichendes Sicherheitsniveau zu erreichen. Gleichzeitig müssen Massnahmen gegen ein lokales Versagen in Form von Abplatzungen oder Absplittungen ergriffen werden.
Die ermittelte Stützlinie aus Eigenlasten der Portalwand oberhalb des Bogenkämpfers muss innerhalb der ersten Kernweite liegen. Durch die Einhaltung der ersten Kernweite, Ausmitte von $e < H/6$ gleichbedeutend einem geometrischen Sicherheitsfaktor von 3, möchte man klaffende Fugen unter Eigenlasten ausschliessen.
Vielfach wird eine zulässige Ausmitte von $e \leq H/4$, gleichbedeutend einem geometrischen Sicherheitsfaktor von 2 als ausreichend betrachtet.
Das Ziel unserer Arbeit soll stets dem nachfolgenden Grundsatz entsprechen:
Ein Abriss und Wiederaufbau der Portale müssen als letzter Ausweg betrachtet werden, wenn es im Einzelfall keine Alternative Lösung gibt.

Der Weiterleitung der Auflagerkräfte muss höchste Beachtung geschenkt werden, vor allem bei der Grösse des Horizontalschubes am Kämpfer, denn ein Bogen reagiert auf bereits sehr kleine Veränderungen in seinen Auflagerbedingungen. Auflagerverschiebungen führen zu Rissbildungen ("exzentrische Gelenke"). Ein Bogen unter Eigengewicht, dessen Lager nachgeben, weist einen Riss an der Unterseite des Scheitels auf.

Stützlinie der Portalwand im Bauzustand Massnahmen

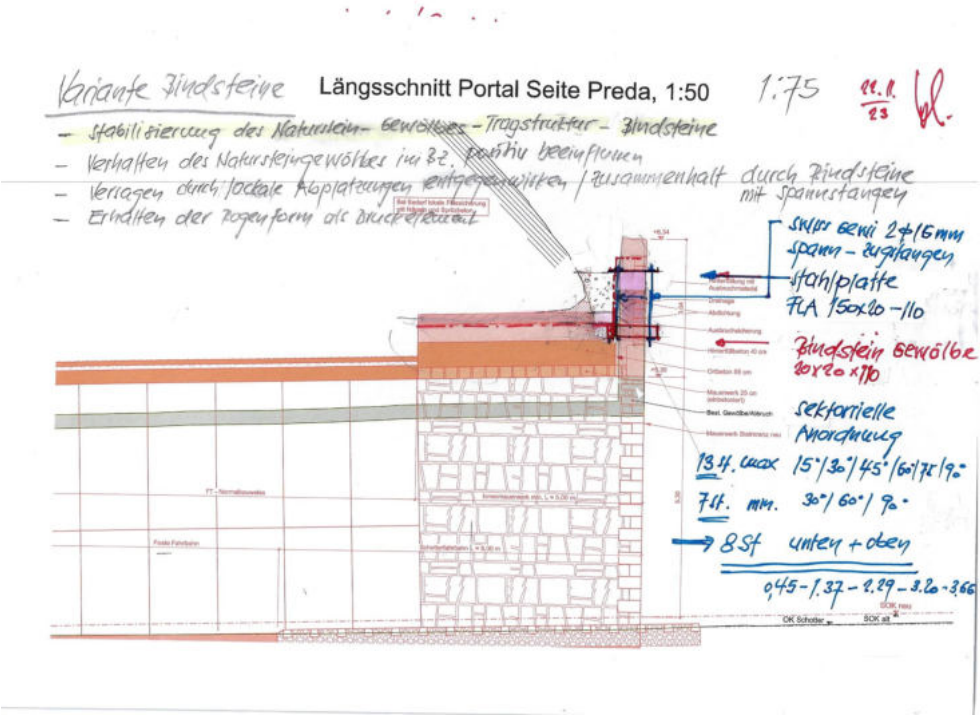
Gewölbe und Bogen mit kleiner Stützweite und günstigem Stichverhältnis können für ständige Lasten, wie in unserem Falle für den Bauzustand mit der notwendigen Tunnelausweitung, in ihrer Form untersucht werden.
Demzufolge haben wir anhand der Eigenlasten Portalwand (Lamelleneinteilung) die Konstruktion der Stützlinie (Seillinie) mit dem dazugehörigen Kräfteplan grafisch bestimmt resp. dargestellt. Die vereinfachte Darstellung der grafischen Stützlinienermittlung, mit Teilung des Bogens in Abschnitten und dem Kräfteplan erfolgte mit den dazugehörigen Auflagerkräften und Eigengewichten des jeweiligen Bogenabschnittes, resp. der darüber liegenden Portalwand. Die Kräfte verlaufen im Bogen in einer parabelförmigen Linie, der Stützlinie. Im Idealfall liegt diese Stützlinie deckungsgleich mit der geometrischen Achse des Bogens, also etwa in der Mitte.
Daraus ist ersichtlich, dass der Verlauf der Stützlinie und die verbleibende Konstruktionsform gut übereinstimmen. Durch ein Versatz zwischen der Konstruktionslinie- der Mittelachse des gebauten, fiktiven Bogengefüges - und der Stützlinie entsteht ein Moment mit lokalen Zugkraftanteilen im Querschnitt des Gewölbes. So lange dieser Versatz klein ist, die Stützlinie etwa im mittleren Drittel des Mauerquerschnittes zu liegen kommt, führt dies nicht zu Beeinträchtigungen an der Konstruktion.
In unserem betrachteten Fall liegt die Stützlinie im Kernbereich des fiktiven Bogenquerschnitts mit einer möglichen Höhe von 1.0 m. Dadurch treten im Gewölbe der Portalwand vorwiegend nur Druckkräfte auf, was bei allen Portalfällen der Albulastrecke als Bedingung für die vorgesehene Vorgehensweise gelten muss.
Selbstverständlich müssen dabei alle Fälle der Albulastrecke individuell betreffend Istzustand des Mauerwerks und Geometrie des Portals, örtliche Gegebenheiten der Topographie usw. beurteilt werden und die daraus folgenden baulichen Massnahmen umgesetzt werden.



In einigen Fällen der Tunnel auf der Albulastrecke stellt sich die Frage: Wie fangen wir den Schub am Auflager eines bogenförmigen Bauteils ab?
Die einfachste Möglichkeit besteht in den seitlichen Wänden der Portalwand. Die links und rechts liegenden Wandteile können in ihrer Schwerachse waagrechte Kräfte aufnehmen, wenn sie entsprechend massiv und steif sind. Ein Problem kann jedoch entstehen, wenn sich der Bogen im Bereich eines freien und schmalen Mauerteils befindet. Eine Sicherung kann nur durch aussenliegende, ergänzende Strebpfiler erfolgen oder eine sinnvolle Verschiebung der Tunnelachse, damit ein genügend massiver und dadurch steifer Wandteil vorhanden ist.

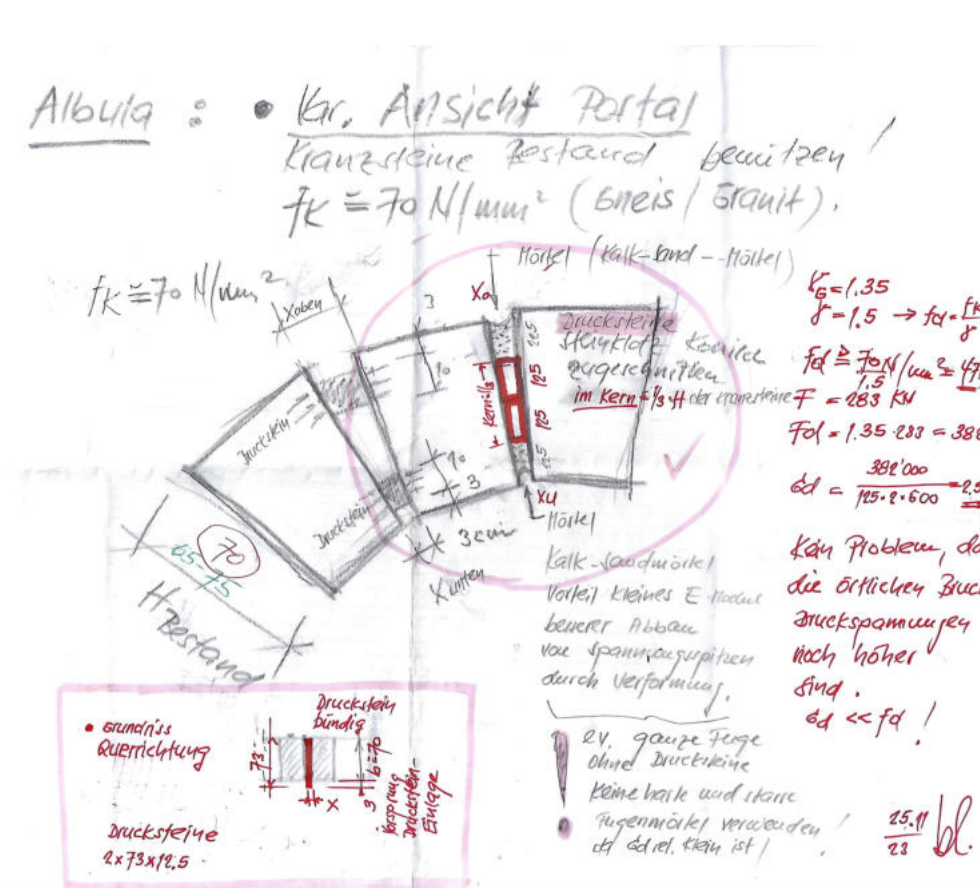
Die Scheibenwirkung der Portalwand wird dabei bewusst nicht berücksichtigt, da die Mauerwerkskonstruktion in der Art und Qualität nicht bekannt und wahrscheinlich je nach Bauwerkszustand sehr unterschiedlich sein wird.

Wir sind der Auffassung, dass die Portalwandscheibe vielmehr während des temporären Eingriffs durch die Tunnelausweitung gesichert werden muss und durch die Aufhängung von Konsolsteinen (Abfangsteinen) mit gespannten Zugstangen und Kopfplatten an der Maueroberseite versehen, zur Verhinderung von Ausbrüchen an der Bogenunterseite dienen soll und dadurch Restrisiken von Instabilitäten des Mauerwerksgewölbes vermieden werden kann.
Zudem dient diese Vorspannung mit Zugstangen und Spannmuffen der Erhaltung und Festigung des Mauerwerksgefüges der Tunnelportale in Zusammenhang mit der Profilausweitung.
Alle diese Massnahmen, Eingriffe ermöglichen einen Ausbruch des Hufeisenprofils ohne Unterstützungen im Bauzustand, bedürfen jedoch stets die individuelle Betrachtung und Beurteilung des Istzustands und der örtlichen Gegebenheiten des einzelnen Tunnelportals.



Kranzsteine beim Gewölbe Hufeisenprofil

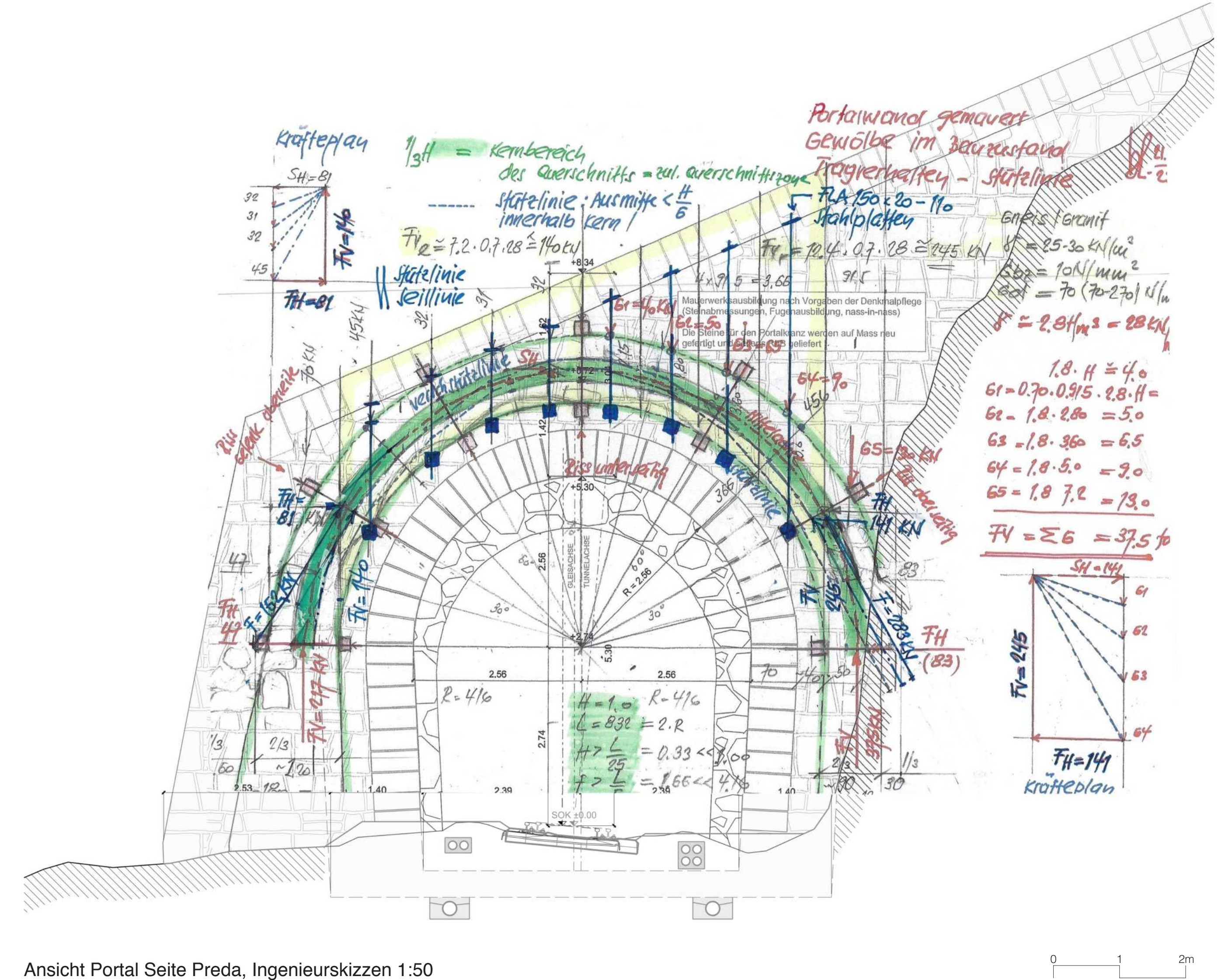
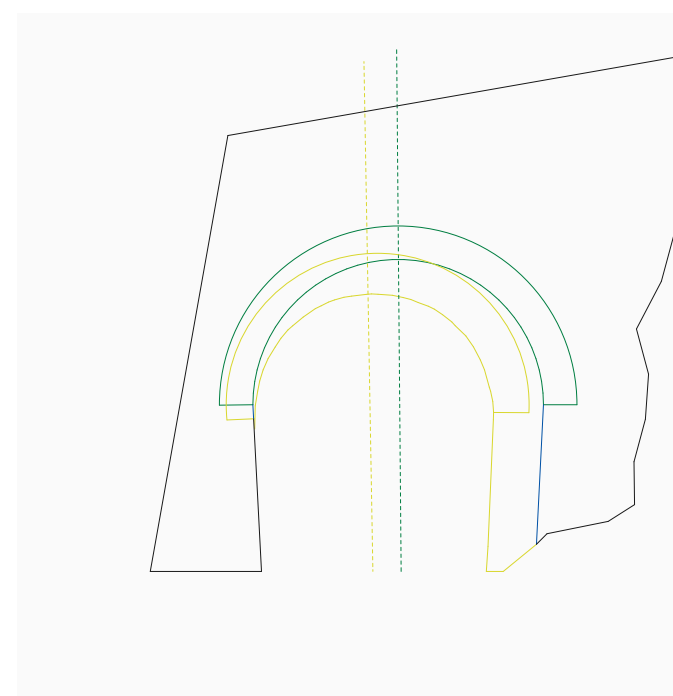
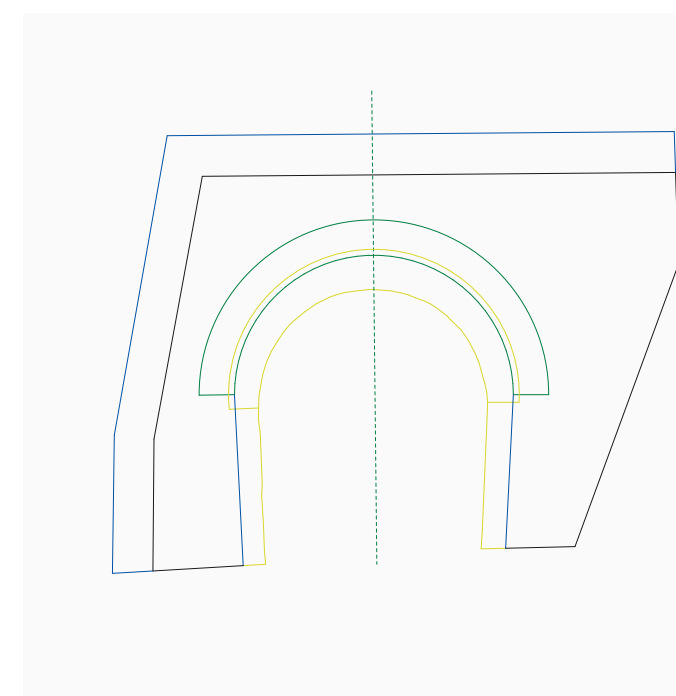
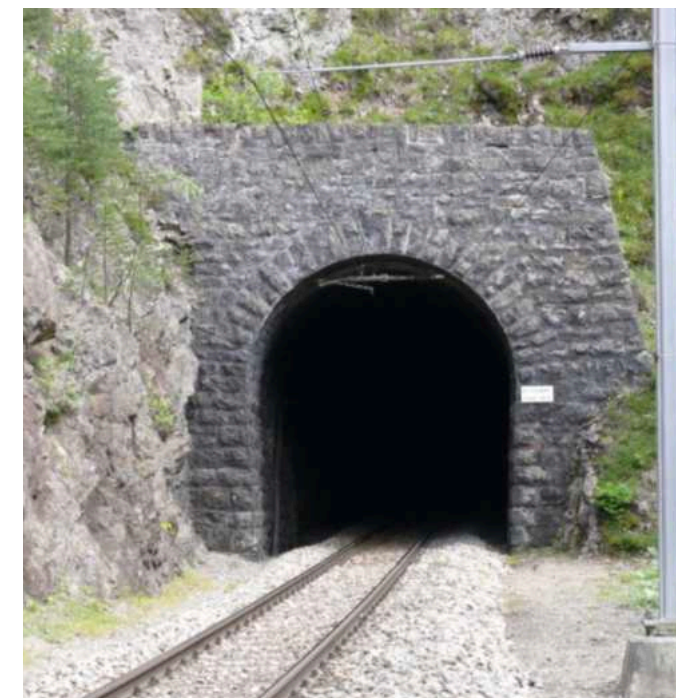
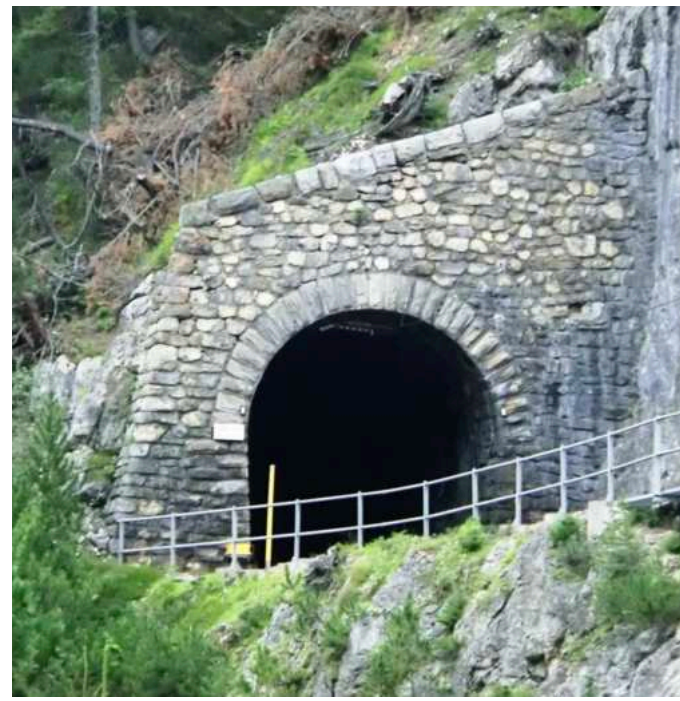
Grundsätzlich empfehlen wir die Wiederverwendung der vorhandenen bossierten Kranzsteine für die ausgeweitete Portalwand. Da der Kreisbogenradius der bestehenden Tunnelöffnung nicht mit der neuen Öffnung übereinstimmt, müssen die Kranzsteine mit Zwischenräume versetzt werden. Die vorhandenen Kranzsteine müssen beim Ausbruch des bestehenden Gewölbes sorgfältig ausgebaut- demontiert und für die Wiederverwendung gereinigt und vorbereitet werden.



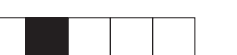
Die Zwischenräume an den Druckflächen der Kranzsteine müssen zur Übertragung der Gewölbe- Druckkräfte mit bearbeiteten Drucksteinen/Schiffsteinen oder Mörtel ausgefüllt werden. Die Platzierung der Drucksteine sollte im Kern der Kranz-Gewölbesteine erfolgen, im Bereich der erwünschten Stützlinie im Drittelpunkt des Gewölbequerschnitts. Bei einer Höhe der bestehenden Kranzsteine von ca. H= 70 cm müssen die Steine ca. 25 cm in der Höhe betragen. Die Länge im Grundriss kann nach ästhetischen Gesichtspunkten ca. der Breite der Kranzsteine entsprechen oder auf der Sichtseite einen kleinen Vorsprung aufweisen. Der Einbau von druckfesten Materialien, wie Natursteine mit gleichen Eigenschaften, weisen einen besseren Verformungsverhalten auf. Die erwünschte Gebrauchstauglichkeit wird dadurch besser erlangt, da der Einfluss auf das Rissverhalten positiv ist.

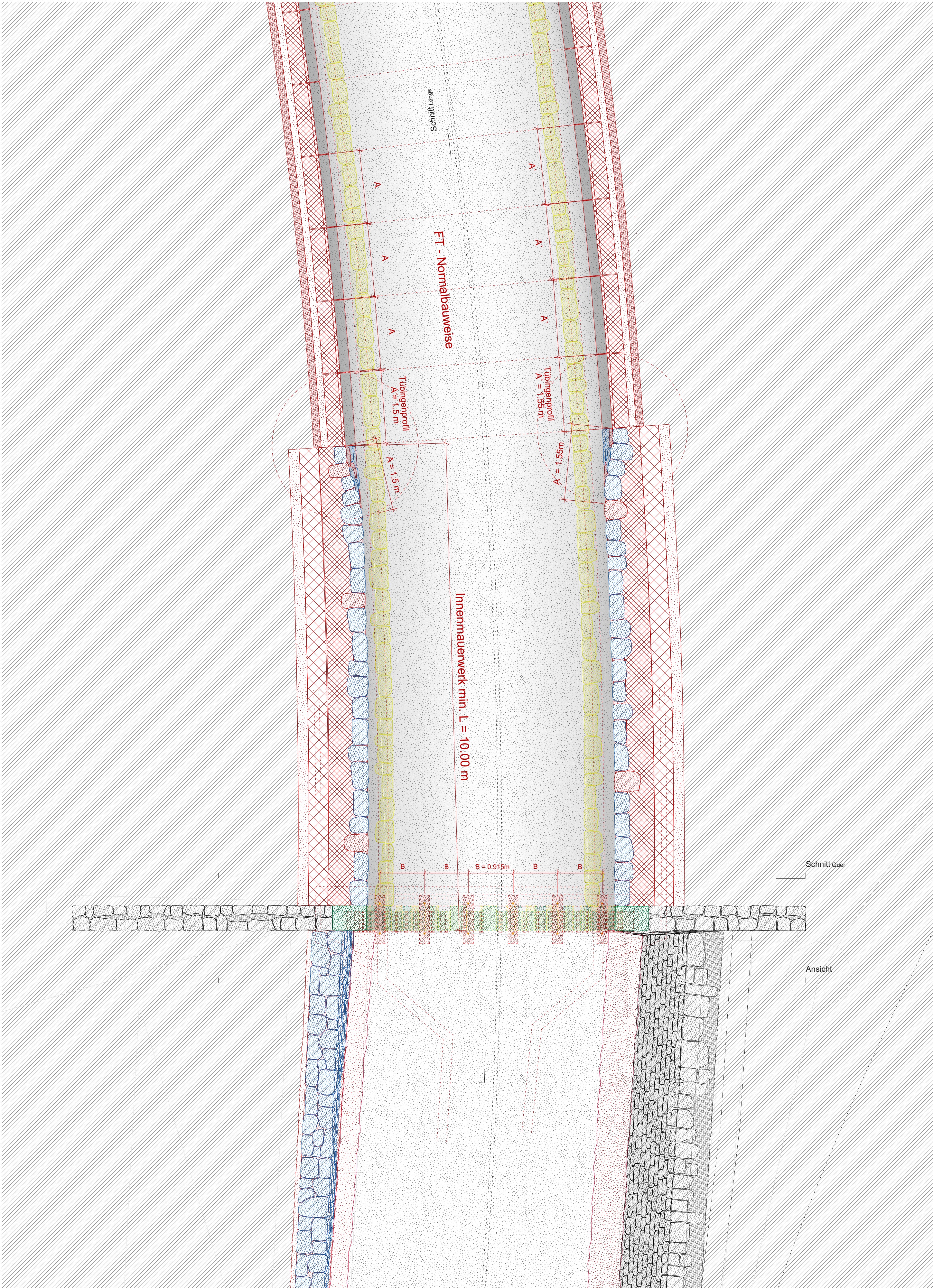
Eine Alternative dazu wäre die Ausfüllung- Verfüllung der ganzen Kontaktfläche- Zwischenräume mit Kalk- Sandmörtel ohne Einlage von Drucksteinen. Diese Ausführungsart hat jedoch zur Folge, dass durch den kleinen E-Modul vom Mörtel, der Abbau von Spannungsspitzen durch Verformungen besser erfolgt. Somit kann gesagt werden, dass bei dieser Lösung auch grössere Verformungen mit ev. Rissbildungen im Gewölbe und in der Portalwand auftreten können.

Ilanz, 28.11.2023
Giachen Blumenthal, inschignier

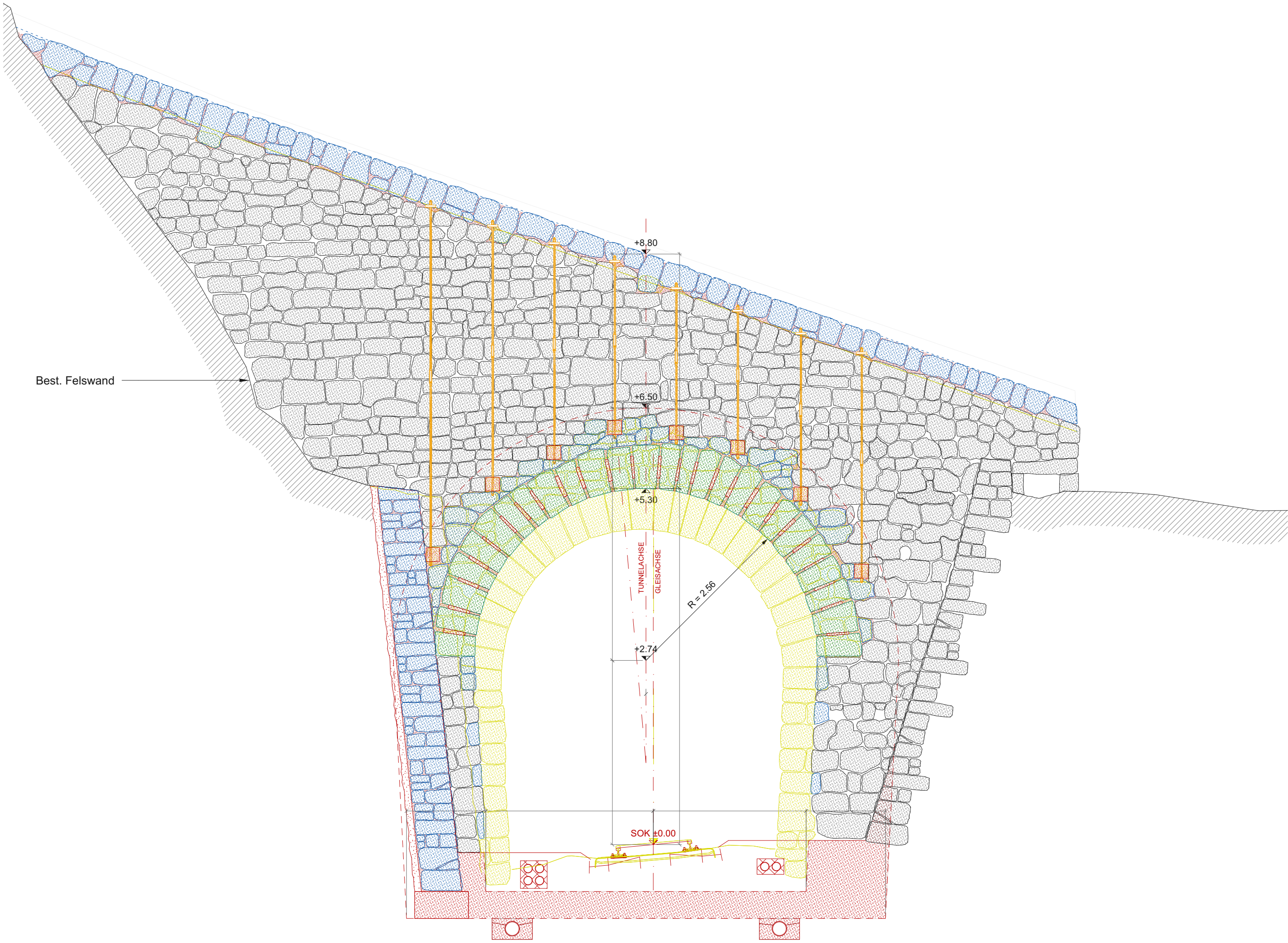


Umgang bei Tunnelportalen mit schmalen Paramentwänden : Verbreiterung / Erhöhung der Portalwand (links), Verschiebung der Achse (rechts)





Grundriss Portal Seite Muot 1:50



Ansicht Portal Seite Muot 1:50

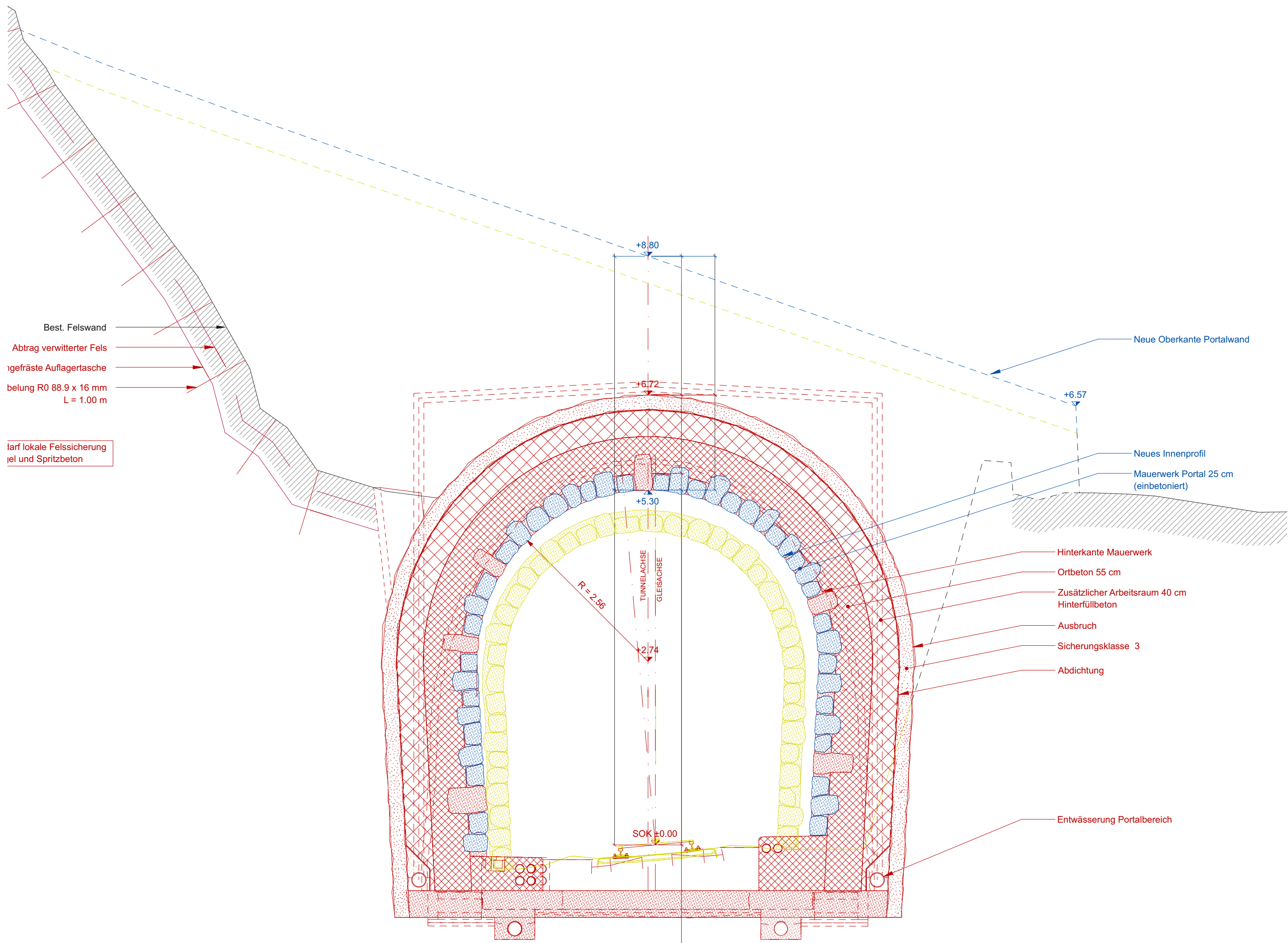


Istzustand



Neu
- Drucksteine (Granit)
- Konsolsteine (Granit)



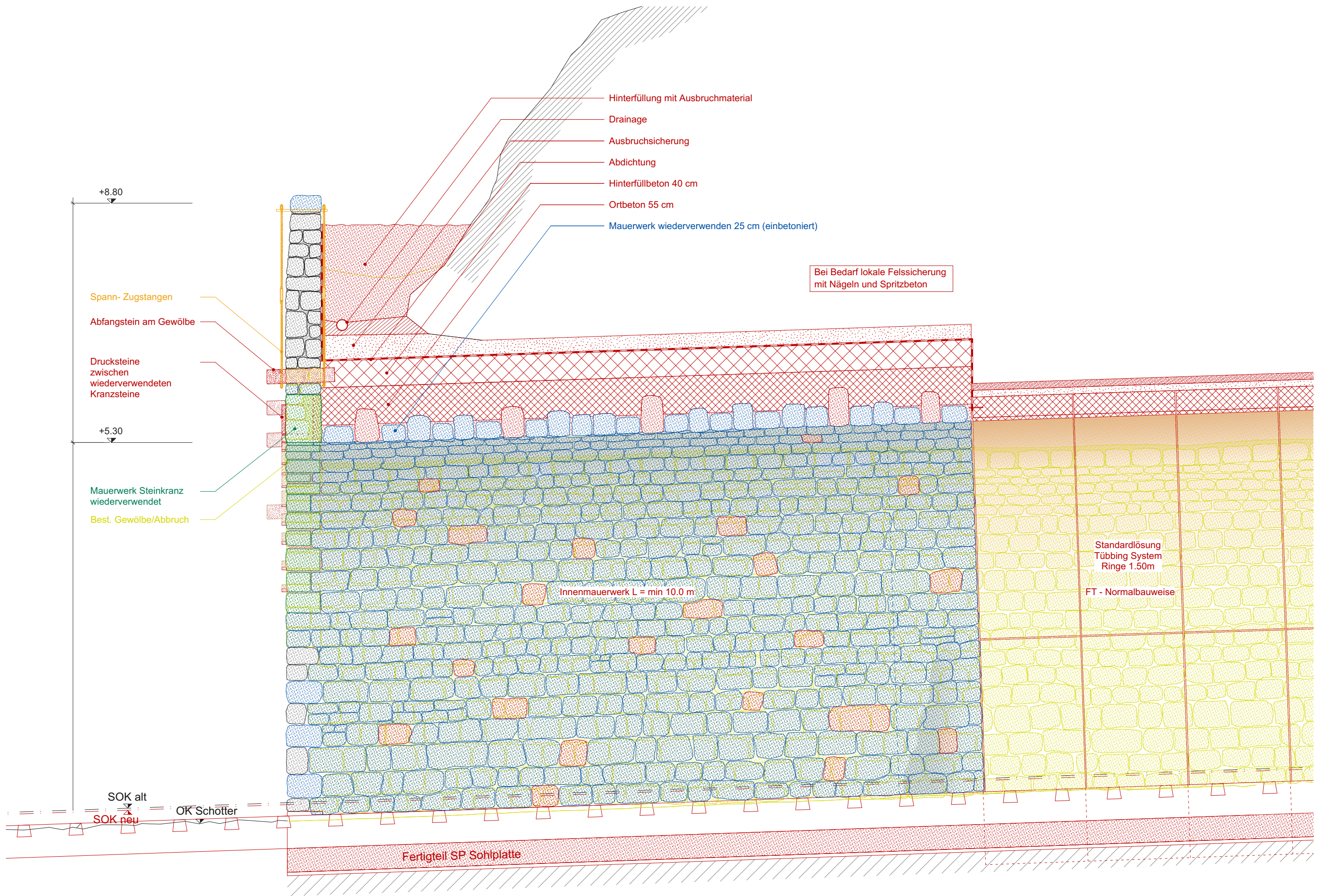


Querschnitt Portal Seite Muot 1:50

0 1 2m

Temporäre Konstruktionselemente
- Zugstangen

Abbruch / Demontage
zur Wiederverwendung

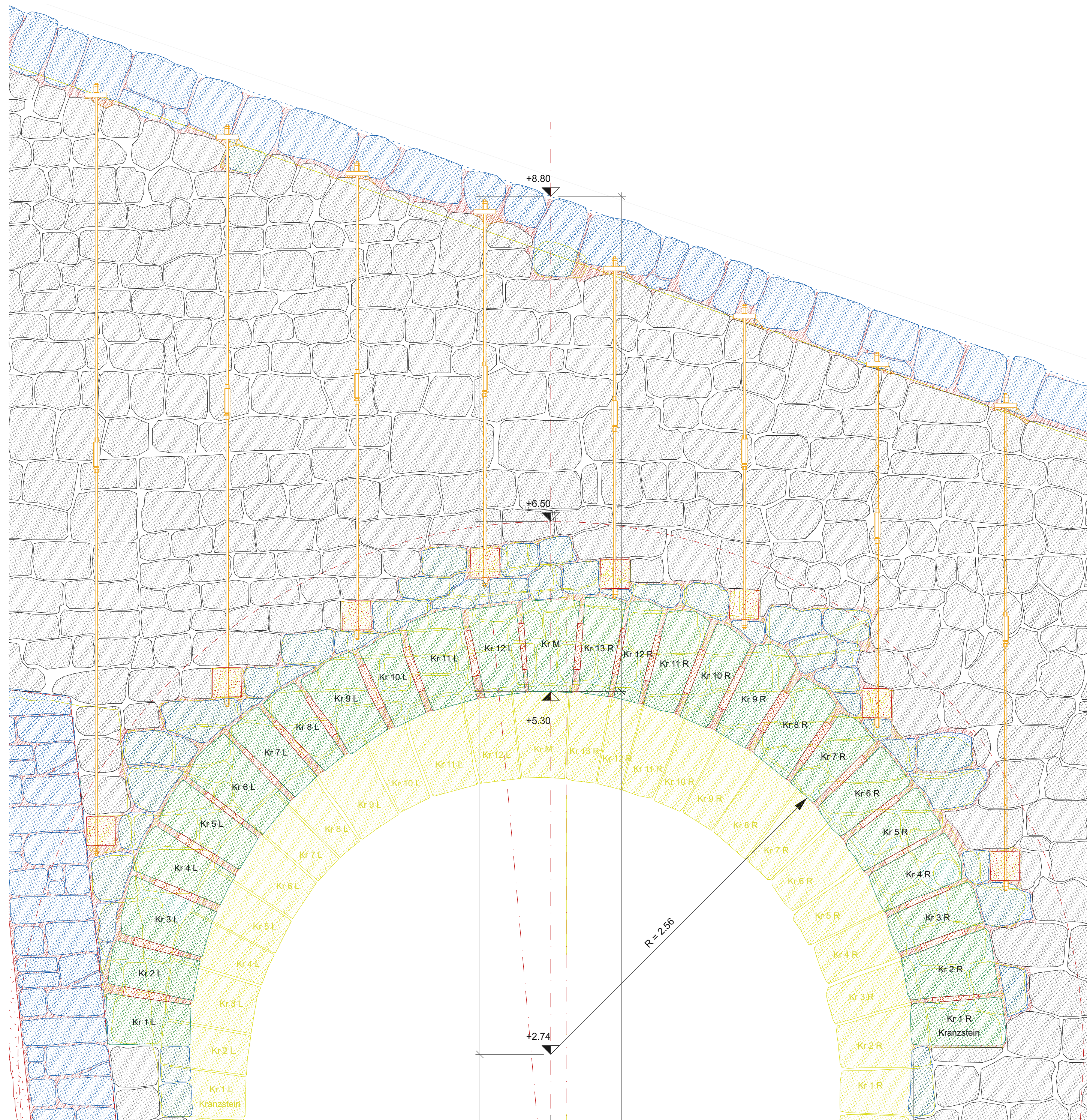


Längsschnitt Portal Seite Muot 1:50

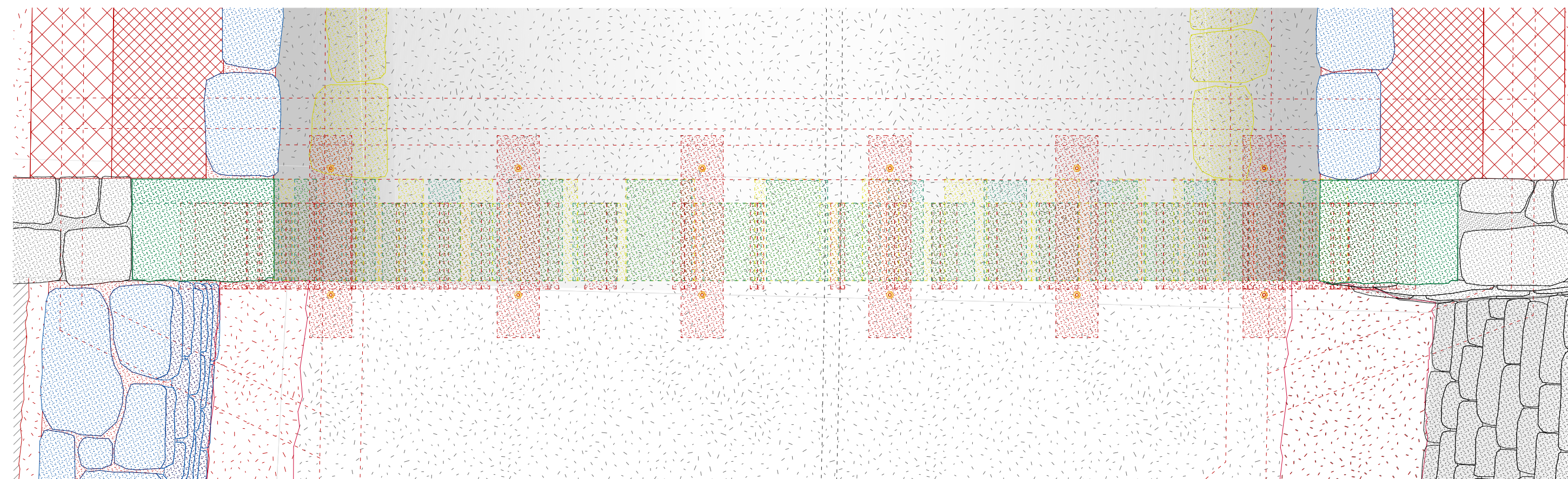
0 1 2m

Wiederverwendung (nummeriert)
- Kranzsteine

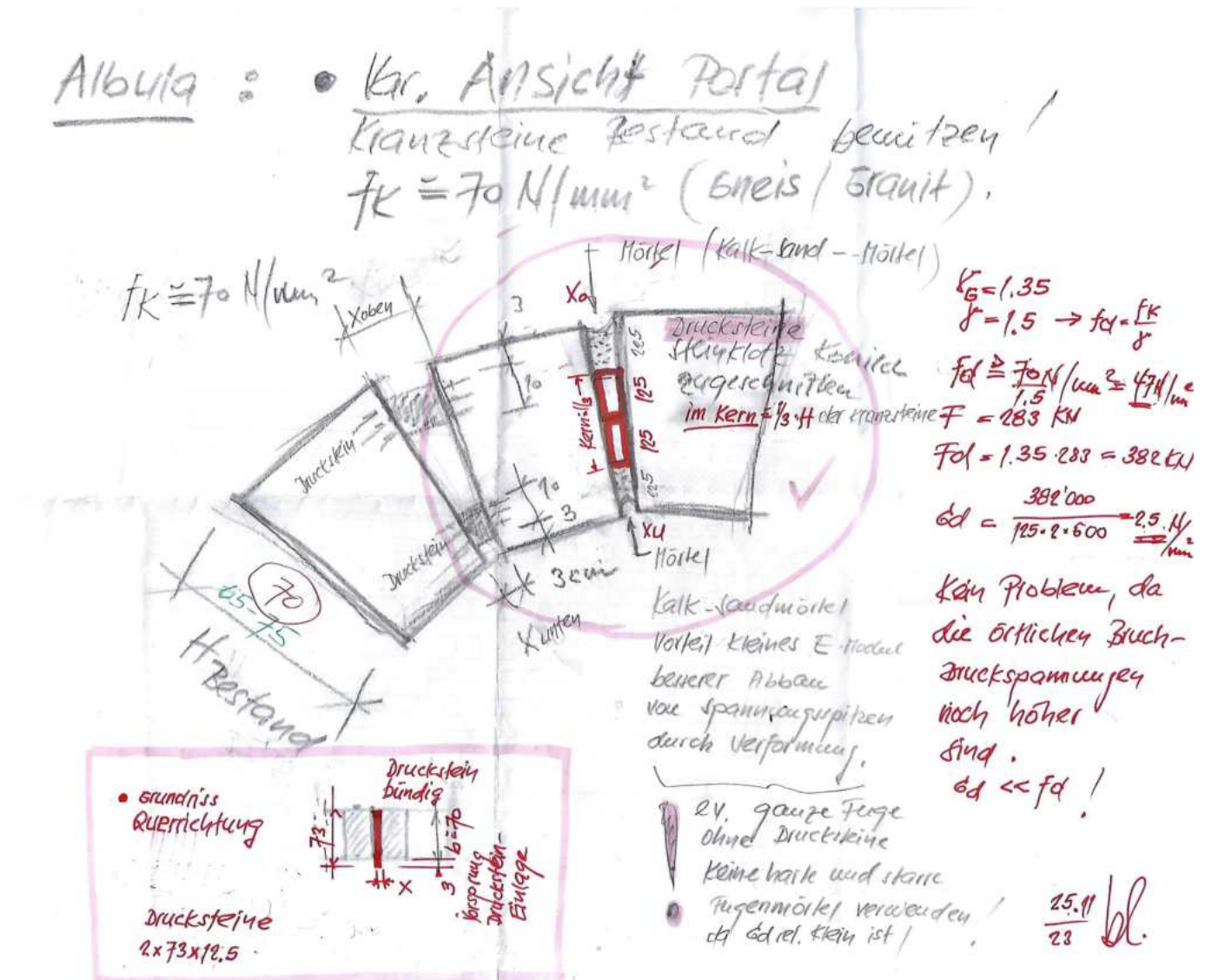
Wiederverwendung
- Mauersteine



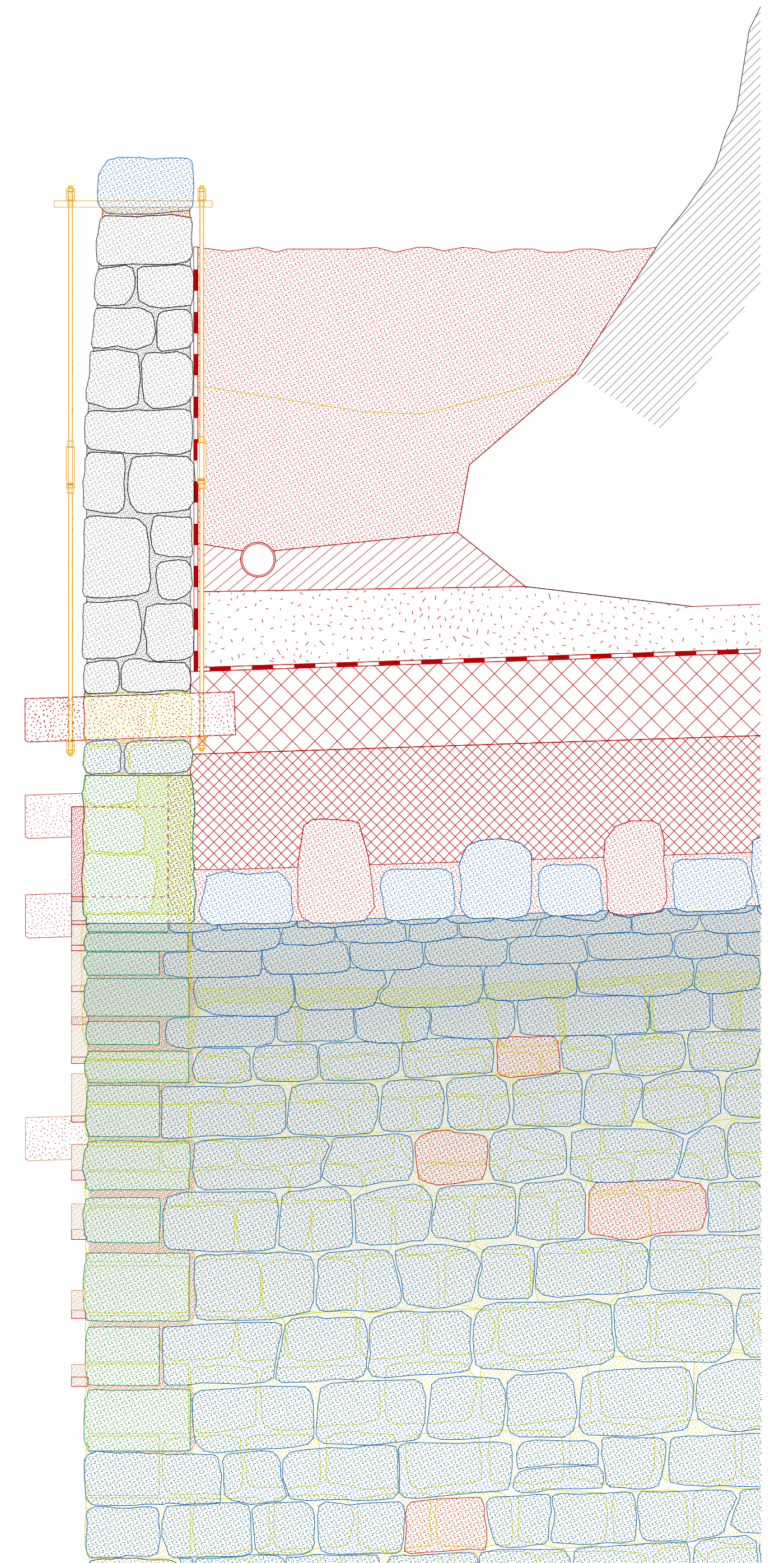
Detail Ansicht Portal Seite Muot 1:20



Detail Grundriss Portal Seite Muot 1:20



Wiederverwendung Kranzsteine
Fügenerstellung mit Drucksteinen



Detail Schnitt Portal Seite Muot 1:20