



# ERFAHRUNGEN BEIM VORTRIEB DES EVOUETTES TUNNELS UNTER DEM SIEDLUNGSGEBIET – BEHERRSCHUNG DER SETZUNGEN

ETIENNE GARIN, BG INGENIEURE UND BERATER AG

GILLES LEQUERTIER, INFRA TUNNEL SA

[www.bg-21.com](http://www.bg-21.com)

■ INGENIOUS SOLUTIONS

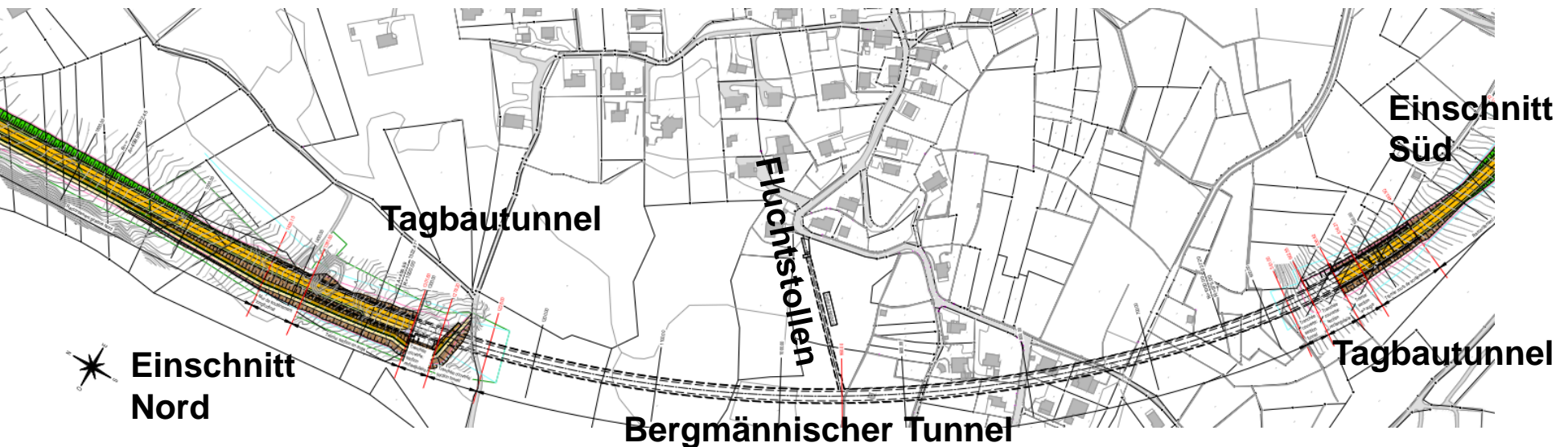
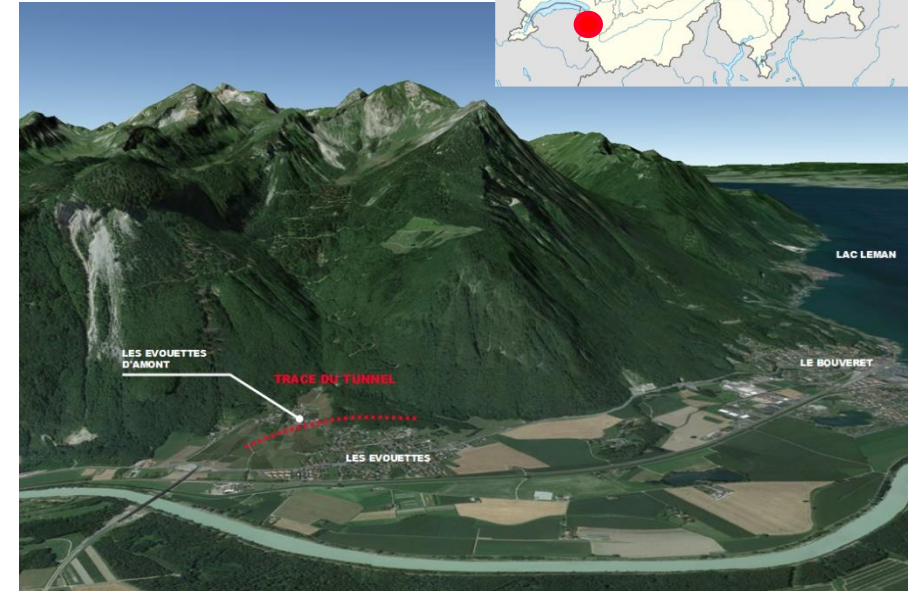
# EINLEITUNG

- Das Projekt umfasst einen konventionell vorgetriebenen Tunnel in einem kohäsionslosen und lockeren Boden in geringer Tiefe unter einem bebauten Gebiet
- Es ist daher zwingend notwendig:
  - Einen Verbruch der Ortsbrust oder des Gewölbes zu vermeiden (Sicherheit der Arbeiter und der Gebäude)
  - Setzungen an der Oberfläche zu begrenzen, um Schäden an Gebäuden zu vermeiden
- Die Bestlösung zur Erreichung dieser beiden Ziele war eine vorausseilende Sicherung mit einem Jetting-Schirm und Jetting-Ortsbrustsäulen
- Das erste Ziel wurde erreicht, das zweite jedoch nicht, da sich eine unerwartete Verdichtung des Bodens während des Jetting-Vorgangs ereignete

# PROJEKT BESCHREIB

- 1.4 km lange neue Umfahrungsstrasse des Dorfes Les Evouettes
- 657 m langer bergmännischer Tunnel
- 100 m Tagbautunnel
- 120 m langer Fluchtstollen

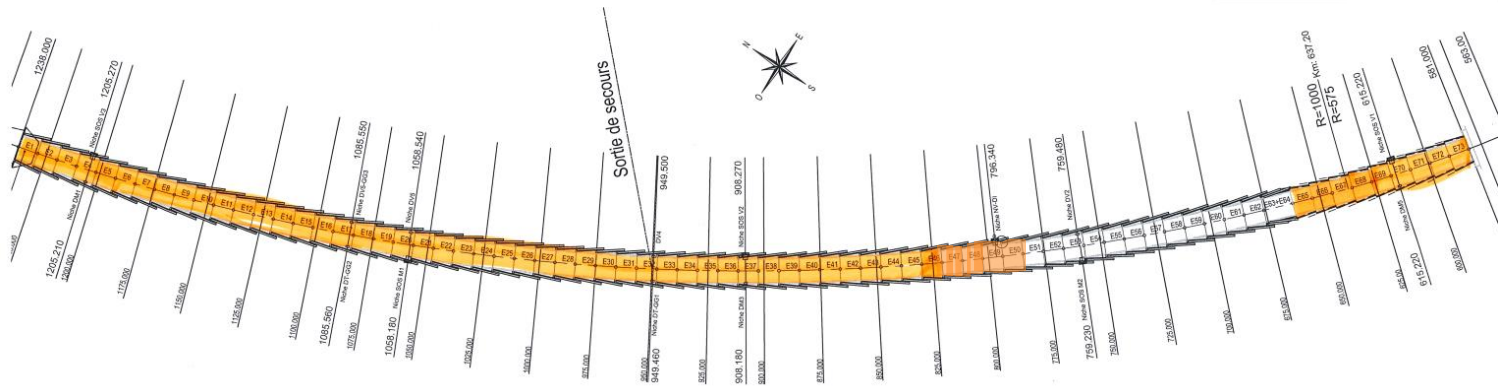
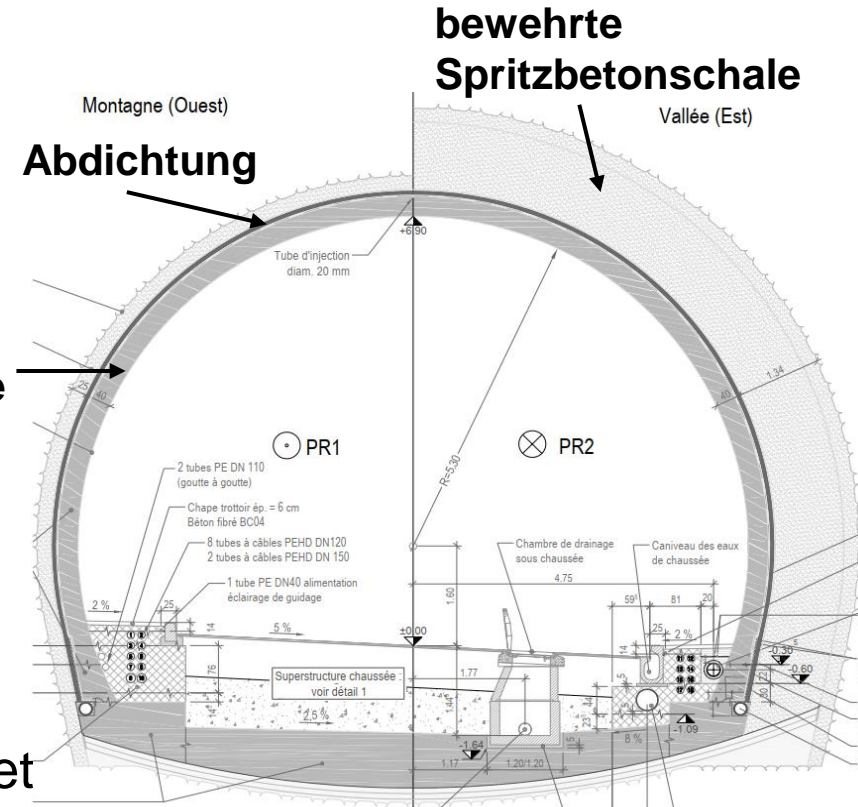
Lage der Umfahrung  
Les Evouettes



# PROJEKT BESCHREIB

- Zweispuriger Strassentunnel im Gegenverkehr (ASTRA-konform)
- Beginn der Arbeiten 2017
- Gesamtkosten 130 Mio. CHF
- Rohbaukosten 70 Mio. CHF
- Vortriebsstand: 445 m von Norden, 81 m von Süden
- Fluchtstollen ausgebrochen und verkleidet

Ortbeton-Innenschale



# PROJEKTORGANISATION

- Bauherr: Kanton Wallis  
Dienststelle für Strassen, Verkehr und Flussbau (DSVF)



- Planergemeinschaft: IG GITEV  
Bestehend aus PRA (federführend), BG (Tunnelbau), SRP, Bruchez, Nunatak (Architekt)

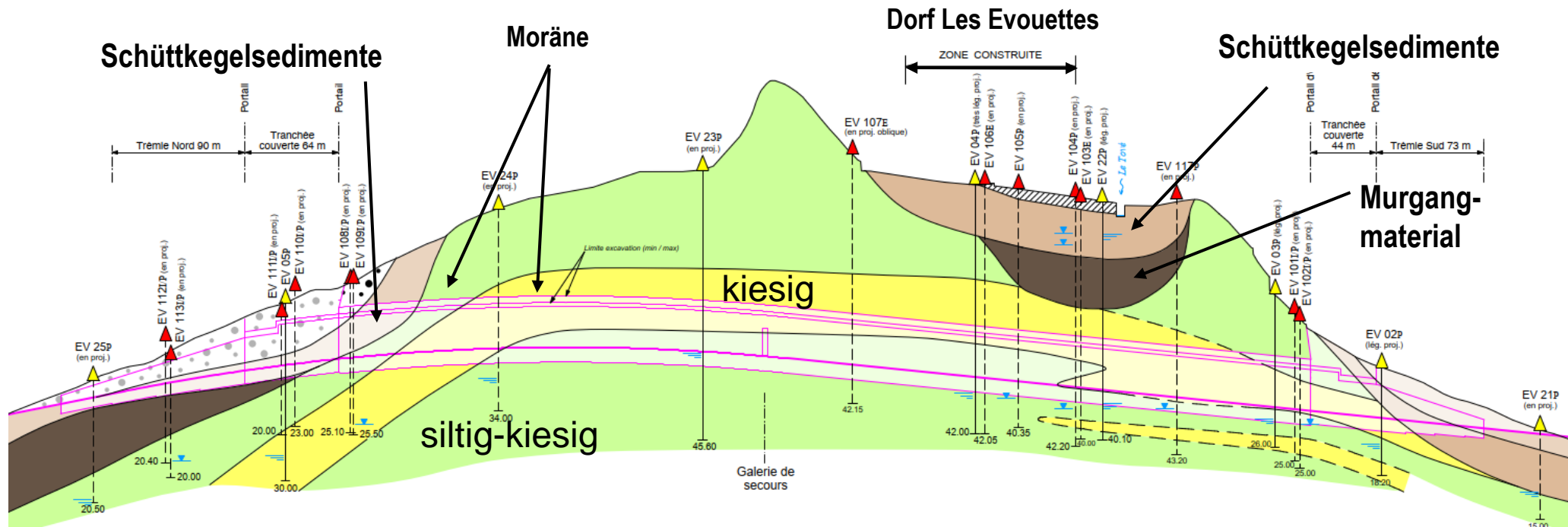


- Unternehmer: Arbeitsgemeinschaft CIG  
Bestehend aus Infra Tunnel (federführend) und Gasser



# GEOLOGISCHE BEDINGUNGEN

- Geologisches Längsprofil unter dem Evouettes-Hügel bestehend aus Lockergestein: locker gelagerte Moräne, Schüttkegelsedimente und Murgangmaterial
- Über dem Grundwasserspiegel
- Im Schüttkegel aufgestautes Grundwasser



# GEOLOGISCHE BEDINGUNGEN

Schüttkegel-  
sedimente



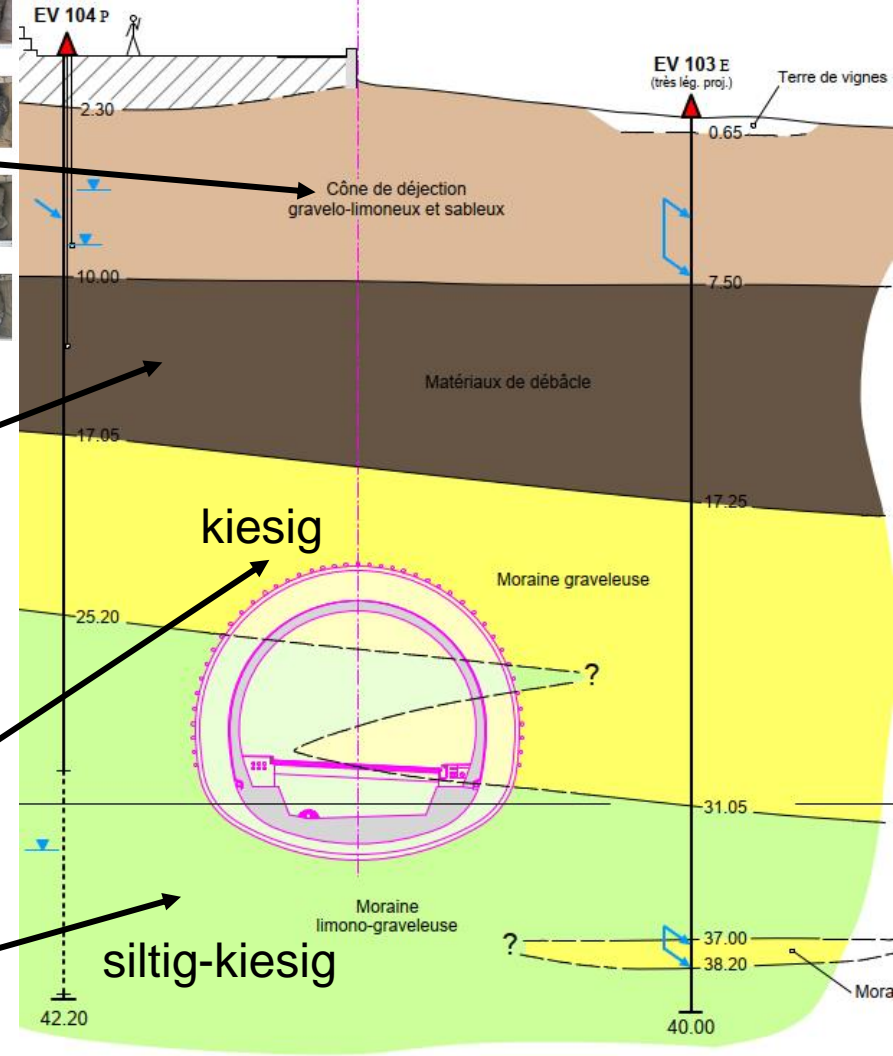
Murgang-  
Material



Moräne

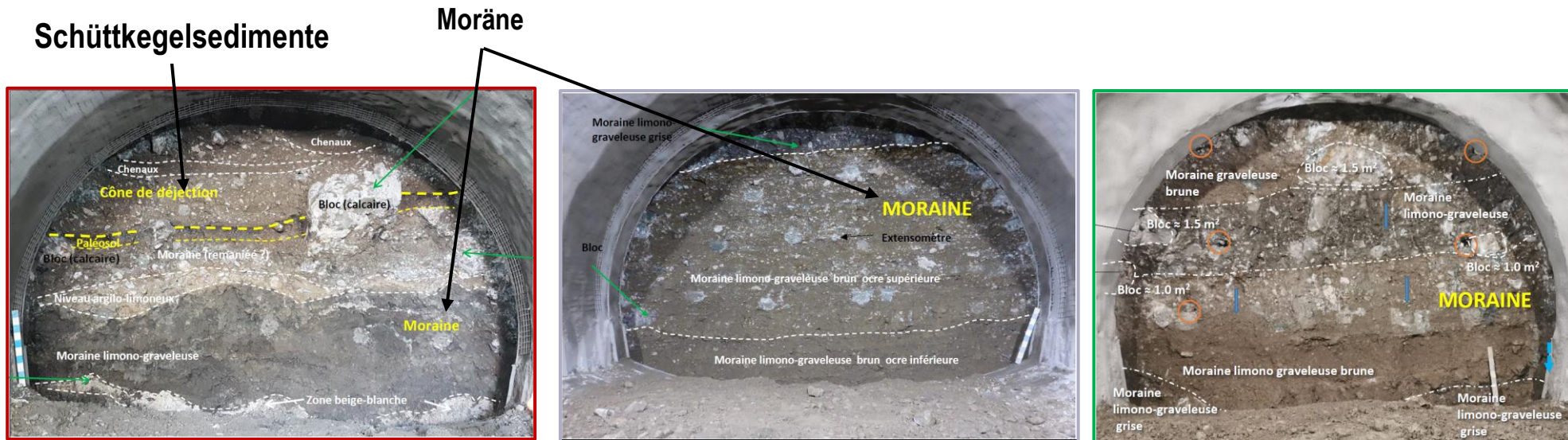


## Profil unter dem Dorf



# GEOLOGISCHE BEDINGUNGEN

- Nach einem Bergsturz um das Jahr 560 n. Chr. finden sich in den verschiedenen Bodenschichten eine Vielzahl grosser Blöcke.



- Bei dieser Art von Baugrund ist es nicht möglich, durch Versuche Baugrundparameter zu erhalten, die das Verformungsverhalten im Massstab des Gebirges zuverlässig beschreiben.



# GEOTECHNISCHE VERSUCHE

- 17 Kernbohrungen mit Probenentnahme für Laborversuche: einaxiale und triaxiale Druckfestigkeit, Direkter Schertest, Ödometertests
- In-situ-Prüfungen: Standard-Penetrationstests, Pressiometer, Flügelsonde, Penetrometer
- Siebkurven, Atterberg-Grenzen
- Laboruntersuchungen mussten an gestörten Proben durchgeführt werden, nachdem das grobe Material über 4 mm abgesiebt worden war.

# GEOTECHNISCHE KENNWERTE

	Kennwert	Einheit	Schüttkegel	Murgang-Material	Siltig-kiesige Moräne	kiesige Moräne
SPT-Versuche	$N_{SPT,k}$	[Hits/30cm]	21	3	28	35
Steifigkeit (langfristig)	$E_k$	[MPa]	18	4.5	30	27
	$\nu_k$	[-]	0.34	0.38	0.3	0.29
Steifigkeit (kurzfristig)	$E_{uk}$	[MPa]	21	5	34	31
Raumgewicht	$\gamma_k$	[kN/m <sup>3</sup> ]	24	24.6	24.7	24.4
	$\gamma_d$	[kN/m <sup>3</sup> ]	22.5	23.3	23.5	22.7
Mohr-Coulomb Scherfestigkeit (langfristig)	$\phi'_k$	[°]	33	23	34	36
	$\psi_k$	[°]	3	0	4	6
	$c'_k$	[kPa]	2	0	2	3
Mohr-Coulomb Scherfestigkeit (kurzfristig/undrainiert)	$\phi_{u,k}$	[°]	0			
	$\psi_{u,k}$	[°]				
	$c_{u,k}$	[kPa]	40	25	38	55
Erdruchdruck	$K_{0x,k}$	[-]	0.455	0.61	0.441	0.413

- Lockermaterial mit geringer Kohäsion und hoher Heterogenität, locker gelagert, mit Hohlräumen, wasserempfindliches Material, Konsistenz stark schwankend.

- Die Überkonsolidierung der Moräne durch den Gletscher ist gering ( $OCR = 2$ ), reicht aber aus, um ein undrainiertes Verhalten während dem Vortrieb zu berücksichtigen.
- An gestörten Proben ermittelte Verformungsparameter, die durch Korrelation mit In-situ-Tests und durch Berechnungen unter Verwendung der Homogenisierungsmethode zur Berücksichtigung der Grobfraktion und der Blöcke korrigiert wurden.

# TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN

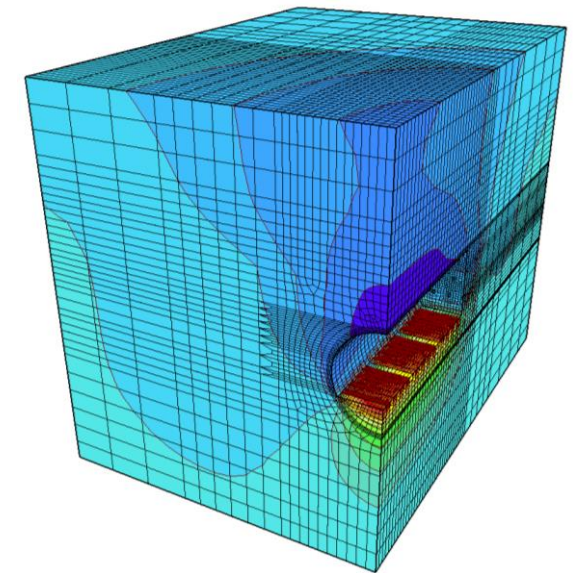
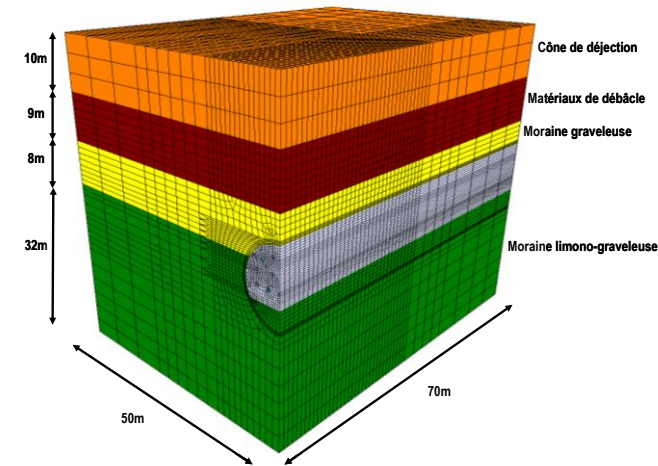
- Tunnel zu kurz für TBM → konventioneller Tunnelbau
- geringe Kohäsion bedeutet hohe Gefahr für die Arbeiter → Notwendigkeit von Bauhilfsmassnahmen an der Ortsbrust und am Gewölbe, welche die Kohäsion erhöhen
- Rohrschirm ungeeignet wegen der Einsturzgefahr zwischen den Rohren (Sanduhreffekt) → Jetting-Gewölbe sichert die Stabilität des Bodens um den Tunnel vor dem Vortrieb
- zur Verbesserung des Kohäsion wurden auch Jetting-Säulen in der Ortsbrust vorgeschrieben, um die Baustellenlogistik zu vereinheitlichen
- das Jetting-Verfahren begrenzt die Setzungen an der Oberfläche dank der Steifigkeit des Ausbruchsrandes und der Ortsbrust
- das Jetting-Gewölbe bildet auch einen wirksamen Schutz gegen das Eindringen von Wasser und verflüssigtem Material und verhindert so die Entstehung von Hohlräumen in der nicht kohäsiven sandig-kiesigen Moräne
- grosse Blöcke im Ausbruchrand stellen ein Risiko während des Aushubs dar, da sie das Jetting-Gewölbe unterbrechen

# AUSWAHL DER BAUMETHODE

Bauhilfsmassnahme	Arbeitssicherheit	Begrenzung Oberflächensetzungen	Kosten
Rohrschirm mit GFK-Ortsbrustanker	Sanduhreffekt: Einsturzgefahr von losem Material zwischen den Rohren	Starke Setzungen aufgrund des nicht verfestigten Bodens vor der Ortsbrust	Mässige Kosten für Bauhilfsmassnahme, hohe Kosten für steifen Ausbau
Jetting-Säulen in Gewölbe und Ortsbrust	Sehr gut durch die Zementierung des Bodens, Gewölbewirkung	Nur geringe Setzungen durch hohe Steifigkeit des Jetting-Bodens	Hohe Kosten für Jetting-Ausrüstung und Zement, geringere Kosten für den Ausbau
Dichte lange GFK-Anker in der Ortsbrust und am Ausbruchrand	Geringes Verbruchsrisiko von losem Material, das nicht mit den GFK-Ankern gehalten ist	Mässige Setzungen (bei ausreichender Ankerdichte) aufgrund der des nicht vollständig verfestigten Bodens vor der Ortsbrust	Geringe Kosten für Bauhilfsmassnahmen, hohe Kosten für steifen Ausbau

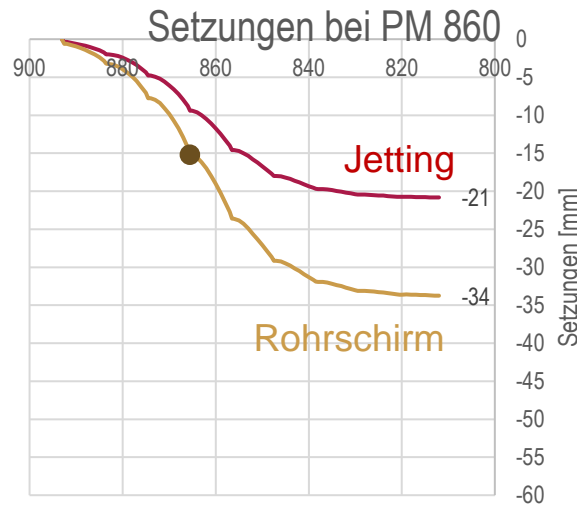
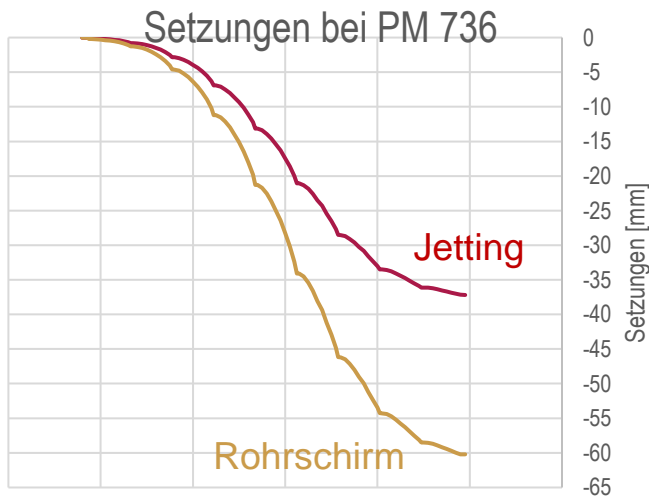
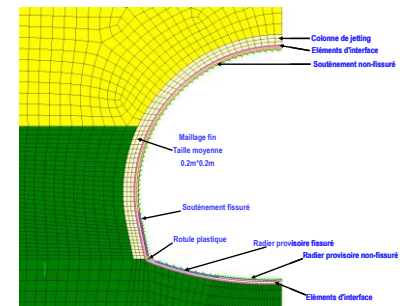
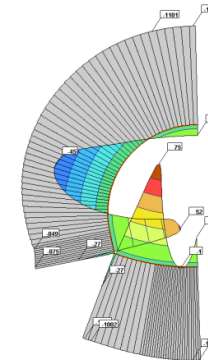
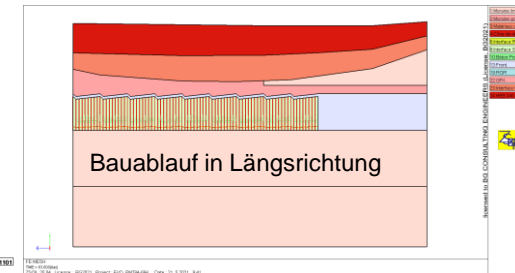
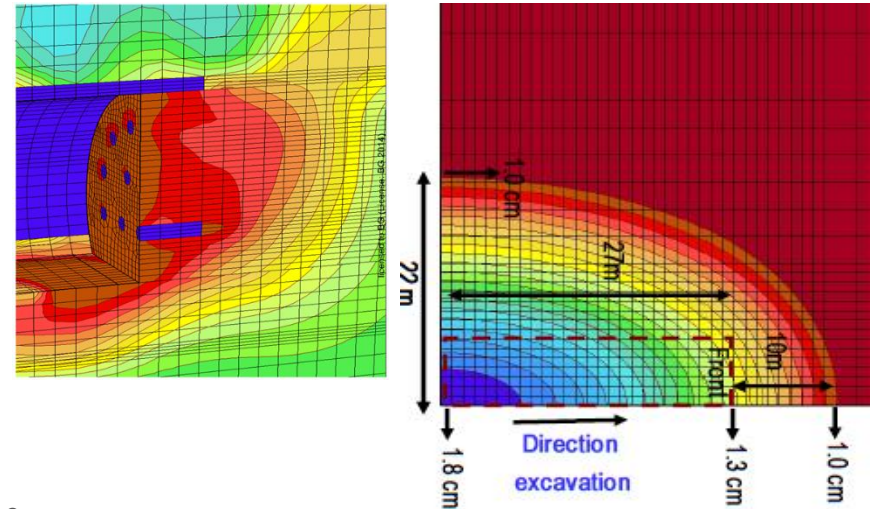
# BAUHILFSSMASSNAHMEN UND AUSBAUKONZEPT

- Entwurf der vorausseilenden Bauhilfsmassnahmen, der Ausbruchsicherung und des Innengewölbes mit 2D- und 3D-Finite-Elemente-Modellen
- Modellierung der Boden-Bauwerk-Interaktion, einschliesslich des Bauablaufs und der Analyse der Ortsbruststabilität
- HSS-Stoffgesetz (Hardening Small Strain), das anhand von bodenmechanischen Tests kalibriert wurde und das Verhalten des umgebenden Bodens widerspiegelt
- Die Eingangsparameter wurden während der gesamten Bauphase des Tunnels entsprechend den Beobachtungen der Verformungen kalibriert
- Gründe für das 3D-FE-Modell: Bestimmung der Überlappungslänge der Jetting-Säulen, Setzungsmulde, Bestimmung der Vorentlastung (Input für die 2D-FEM-Berechnungen)



# BAUMETHODEN UND TUNNELAUSBAUKONZEPT

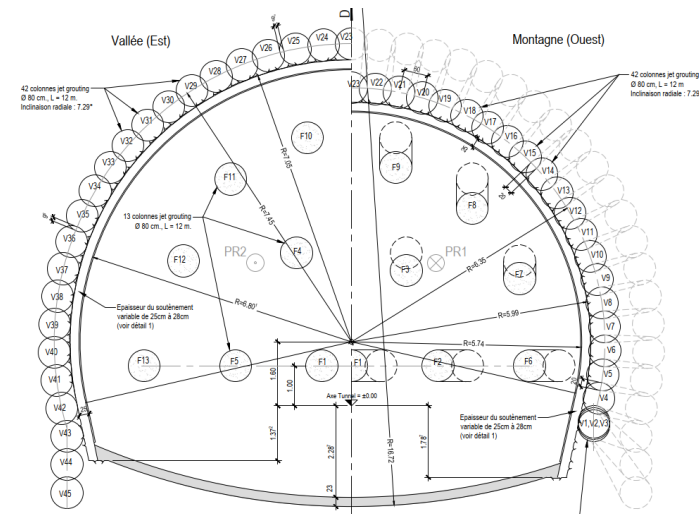
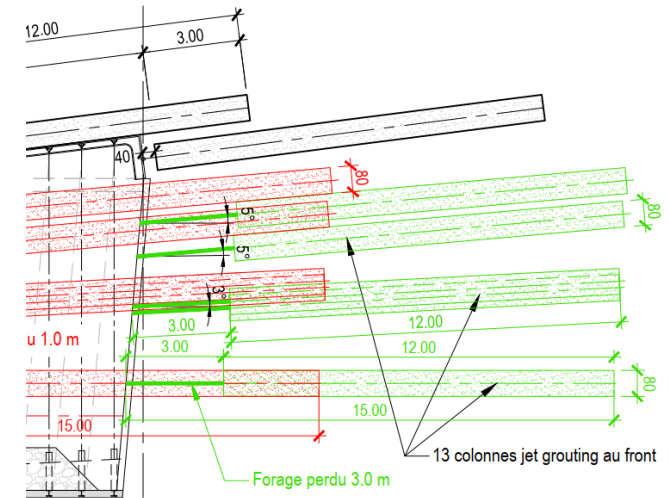
- Berechnete Setzung unter dem Dorf mit Jetting-Verfahren: 2 cm
- Berechnete Setzung unter dem Dorf mit Rohrschirmvortrieb: 6 cm



# VORTRIEB NORD: JETTING

64 Etappen von je 9 m:

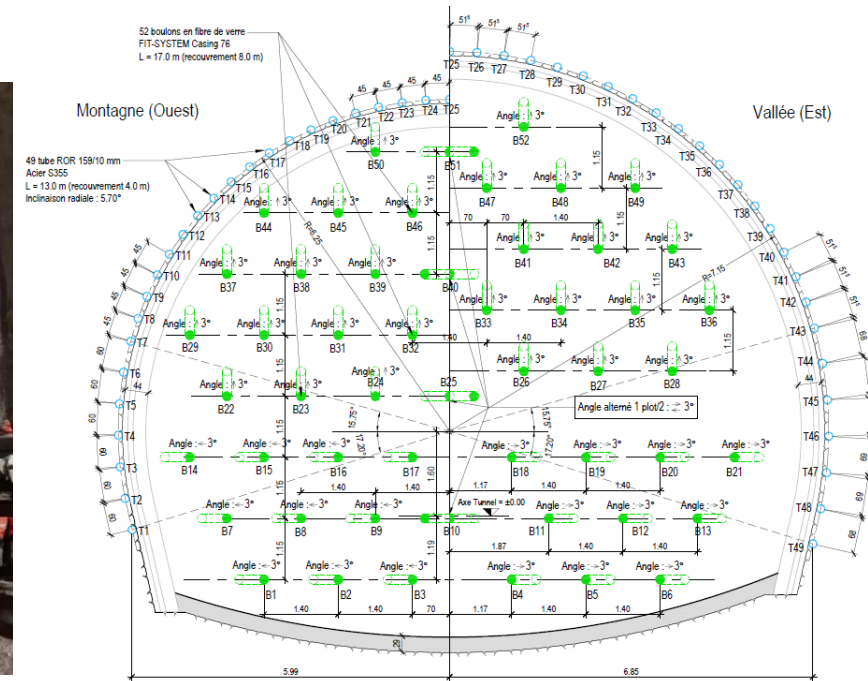
- Gewölbe aus 45 Jetting-Säulen  $\varnothing$  80 cm, L=12 m
- Ortsbrustsicherung mit 13 Jetting-Säulen  $\varnothing$  80 cm, L=12 m
- Ausbruchsicherung: Gitterträger, 25 cm Spritzbeton



# VORTRIEB SÜD: ROHRSCHEIRMVORTRIEB

Beschleunigungsmassnahme: Gegenvortrieb  
9 Etappen von je 9 m:

- Rohrschirm mit 49 Stahlrohren 159x10, L=14 m
- 52 GFK-Ortsbrustanker Ø 76 mm, L=17 m
- Stahlausbau HEB 240 und 47 cm Spritzbeton





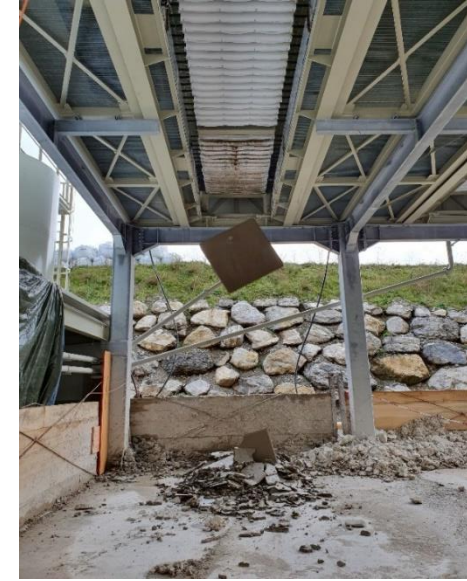
# AUSFÜHRUNG

- Eine Grout-Mischung um 80 cm Säulendurchmesser zu erhalten
- DTH-Bohrungen mit Rückschlagventilen (verhindern das Wiederaufsteigen von Zementmörtel während der Injektion) mit innovativem Bohrgestänge und Doppelströmungsmonitoren (Druckluft/Zementmörtel) zur Bewältigung von Blöcken
- CEM III-B 42,5 LH-SR zur Einhaltung der gesetzlichen ChrVI-Grenzwerte im Aushub
- Einaxiale Druckfestigkeit min. 10 MPa nach 14 Tagen aus Kernbohrungen
- Verfeinerung der Injektionsparameter durch Beobachtung des Säulendurchmessers, der Druckfestigkeiten und der Aushubmengen (Know-How des Unternehmers)
- 24 MJ/m Energie für Gewölbesäulen und 30 MJ/m für Ortsbrustsäulen
- Bohr- und Injektionsarbeiten mit einer 65-Tonnen-Elektorraupe von Soilmec, ausgestattet mit einem 25-Meter-Ausleger und einem Drehkopf mit 21'000 Nm Drehmoment
- Jetting-Ablauf im Pilgerschritt, um die Bildung grosser verflüssigter Bereiche im Baugrund zu vermeiden



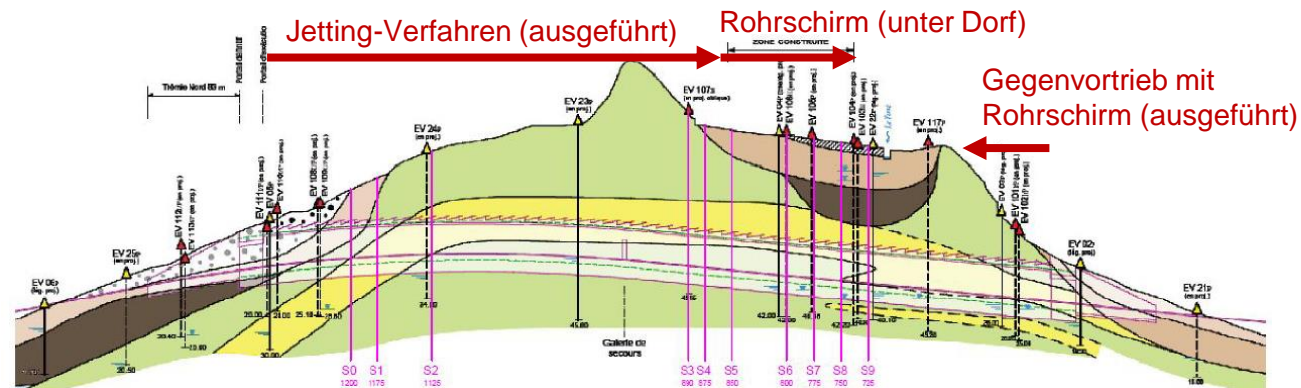
# AUSFÜHRUNG

- Ausserhalb des Tunnels installierte Anlage zur Herstellung von 20 m<sup>3</sup>/h Zementmörtel: Mischer/Rührwerk, das von zwei 50-Tonnen-Zementsilos gespeisen wird
- Zementmischung wird mit einer 500-kW-Pumpe zur Ortsbrust gepumpt und mit 450-525 bar injiziert
- Der Aushub wird in einem Sammelbecken direkt an der Ortsbrust aufgefangen und nach draussen in ein Absetzbecken gepumpt, von wo aus er in eine Aufbereitungsanlage (Zyklon und Filterpresse) geleitet wird.
- Das Wasser wird für die Mörtelherstellung wiederverwendet.



# MONITORING DER SETZUNGEN

- Ein umfangreiches Überwachungskonzept der Oberflächensetzungen wurde umgesetzt, um die Verformungsparameter des Baugrundes zu kalibrieren, da es nicht möglich ist, diese durch Versuche genau zu bestimmen.
- Die im Einflussbereich des Tunnelvortriebes liegenden Nivellier-Querprofile werden regelmässig gemessen.
- Da der Tunnelvortrieb unter einem Wald begann, war es möglich, die Eingabeparameter anzupassen, um zuverlässige Vorhersagen für die Unterquerung des Dorfes zu erhalten.
- Hebungsinjektionen waren bereits in den Ausschreibungsunterlagen vorgesehen und werden unter den Gebäudefundamenten ausgeführt



# MONITORING DER SETZUNGEN

Für die 7 von berechneten Oberflächensetzungen betroffenen Gebäude wurde eine Risikoanalyse durchgeführt, die auf einem Spitzenwert von 5 cm bei den Bewertungskriterien über der Tunnelachse basiert:

- differenzierte Setzungsprognosen für jedes Gebäude
- Empfindlichkeit der einzelnen Gebäude, je nach Art der Fundamente, des Aufbaus, des Gebäudezustands, der Nutzung und der Form des Gebäudes
- 5 Empfindlichkeitsklassen von sehr unempfindlich (Klasse V1) bis sehr empfindlich (Klasse V5).

Ergebnisse:

- Keine strukturellen Schäden erwartet
- funktionelle Schäden bei 4 Gebäuden erwartet (Gegengefälle, Schwierigkeiten beim Schliessen der Türen, ...)

Tassement pronostiqué (différentiel)	V1 très peu sensible	V2	V3	V4	V5 très sensible
< 1/750		24			
1/750 à 1/500	11, 25	23, 26	8/19		
1/500 à 1/250					
1/250 à 1/150					
> 1/150					

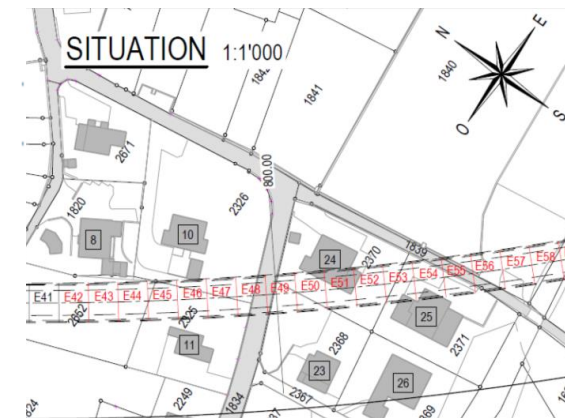
esthétique

fonctionnel

structurel

Bâtiment No	Tasst diff	Vulnérab	Points
8	546	V4	24
10	529	V3	24
11	531	V2	17
23	700	V3	21
24	873	V2	19
25	579	V2	19
26	700	V3	22

V1	10 à 14 points
V2	15 à 19 points
V3	20 à 24 points
V4	25 à 29 points
V5	30 à 34 points

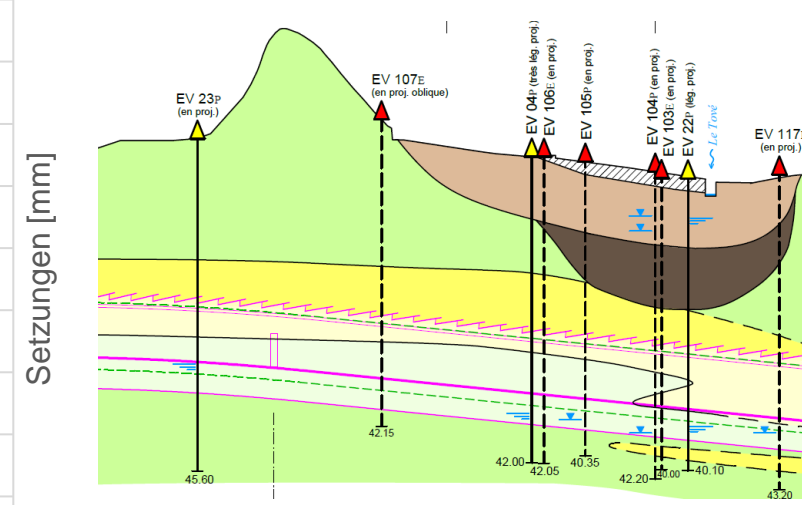
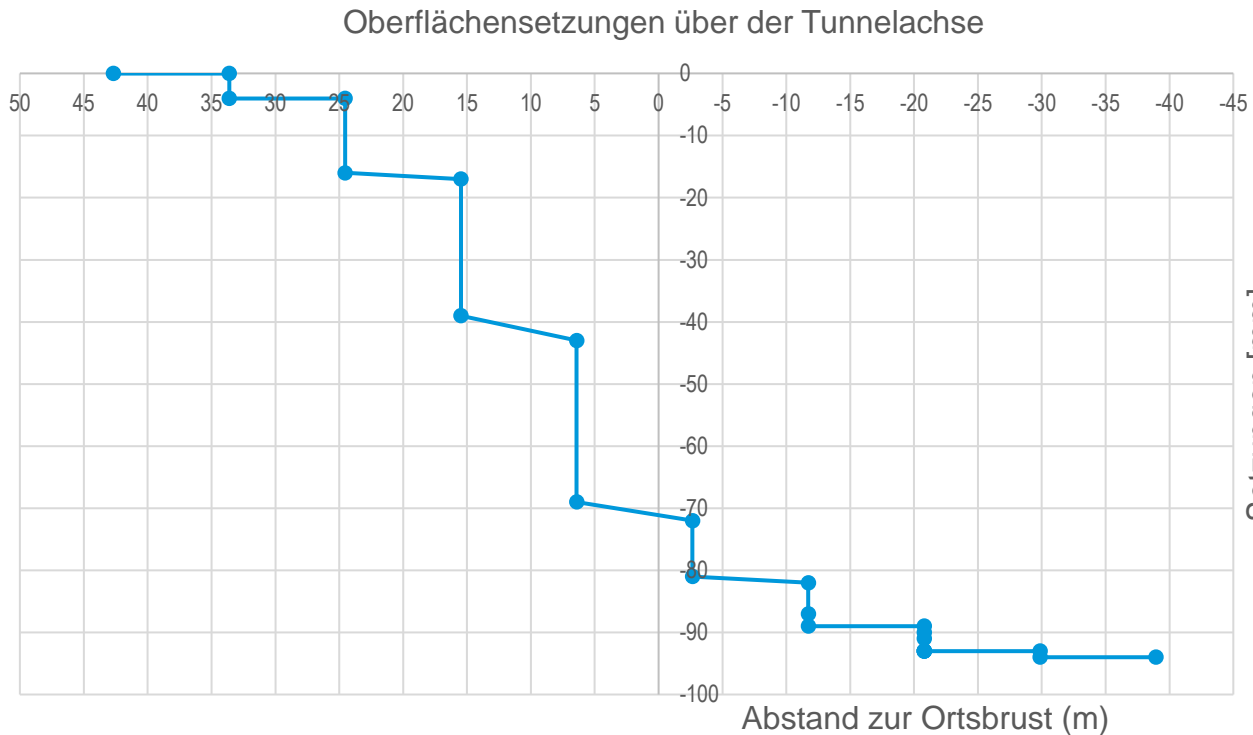


# MONITORING DER SETZUNGEN

- Ab Beginn des Tunnelvortriebs wurden bei der Überwachung unerwartete Setzungen festgestellt.
- Die an der Oberfläche gemessenen Setzungen übertrafen die Vorhersagen der Berechnungen, auch wenn sie mit zunehmender Überdeckung abnehmen sollten.
- Die im Tunnel gemessenen Verformungen der Ausbruchsicherung, die Setzungen der Bogenfundamente sowie die Extrusion der Ortsbrust blieben jedoch im Millimeterbereich, genau wie erwartet.
- Anschließend wurde eine Setzungsmessung vor und nach der Injektionsphase sowie vor und nach der 9-m-Etappe durchgeführt.
- Diese Messungen ergaben, dass fast 90 % der Setzungen während der Jetting-Injektionsphase auftraten.
- Die ersten Bewegungen werden festgestellt, wenn die Ortsbrust mehr als 30 m von der Messstrecke entfernt ist.
- Wenn die Ortsbrust unter der Messstrecke durchläuft, finden dagegen fast keine Bewegungen statt.

# MONITORING DER SETZUNGEN

## Vortrieb Nord – Jetting-Gewölbe und Ortsbrustsäulen als Bauhilfsmassnahmen



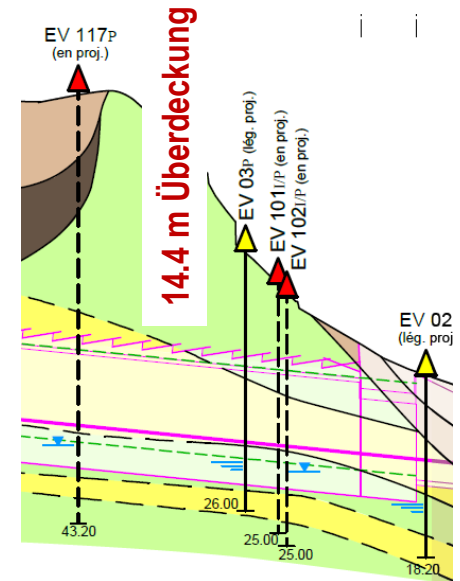
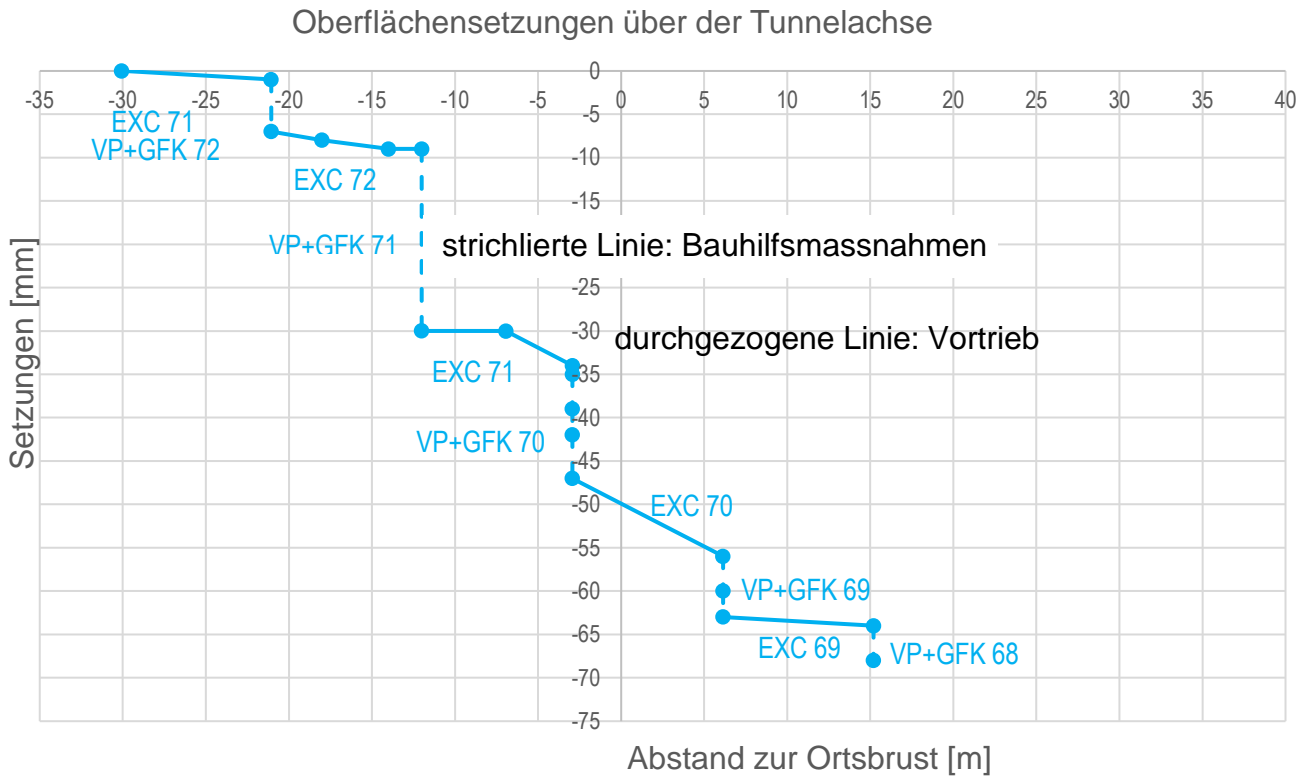
# MONITORING DER SETZUNGEN

- Es scheint wahrscheinlich, dass der Bohrvorgang eine Vibro-Verdichtung des grobkörnigen Bodens am Ausbruchrand erzeugt
- Die Beobachtungen an den in der Nähe des Tunnels installierten Vertikalextensometern zeigen, dass der grösste Teil der Setzungen in einem Bereich von wenigen Metern um das Gewölbe herum stattfindet, wobei die darüber liegenden Schichten der Bewegung folgen
- Die Überwachung des südlichen Vortriebes mit Rohrschirm zeigt das gleiche Phänomen, wobei die Setzungen leicht abnehmen, was wahrscheinlich auf die geringere Intensität der durch den Bohr- und Injektionsvorgang erzeugten Vibrationen zurückzuführen ist.

# MONITORING DER SETZUNGEN

## Vortrieb Süd – Rohrschirmvortrieb und GFK-Ortsbrustanker

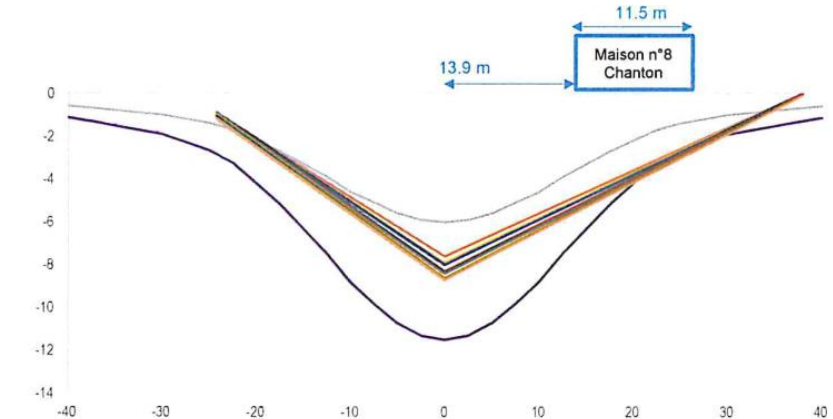
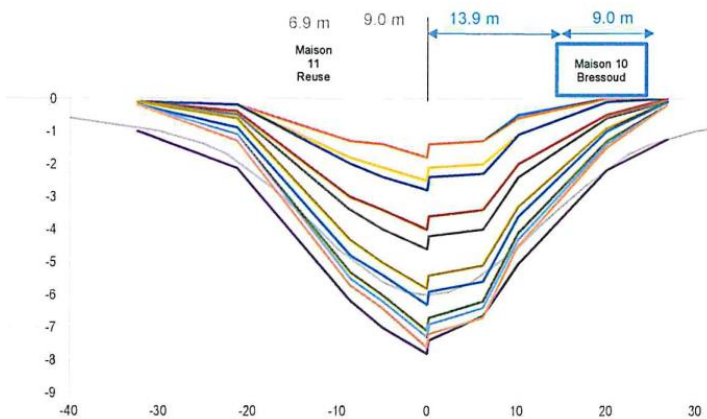
75% der Setzungen entstehen beim Bohren und Injizieren





# MONITORING DER SETZUNGEN

- Bei der Annäherung an das Dorf wurde befürchtet, dass die Grenzwerte für Oberflächensetzungen überschritten werden könnten, was zu grösseren Schäden an den Gebäuden führen würde.
- Darüber hinaus gab es Unsicherheiten über das zu erwartende Verhalten des Murgangmaterials und des Schüttkegelsedimente, dessen Mächtigkeit unter dem Dorf zunimmt
- Daher wurde beschlossen zu prüfen, welche Änderungen bei den Bauhilfsmassnahmen die Oberflächensetzungen verringern könnten.

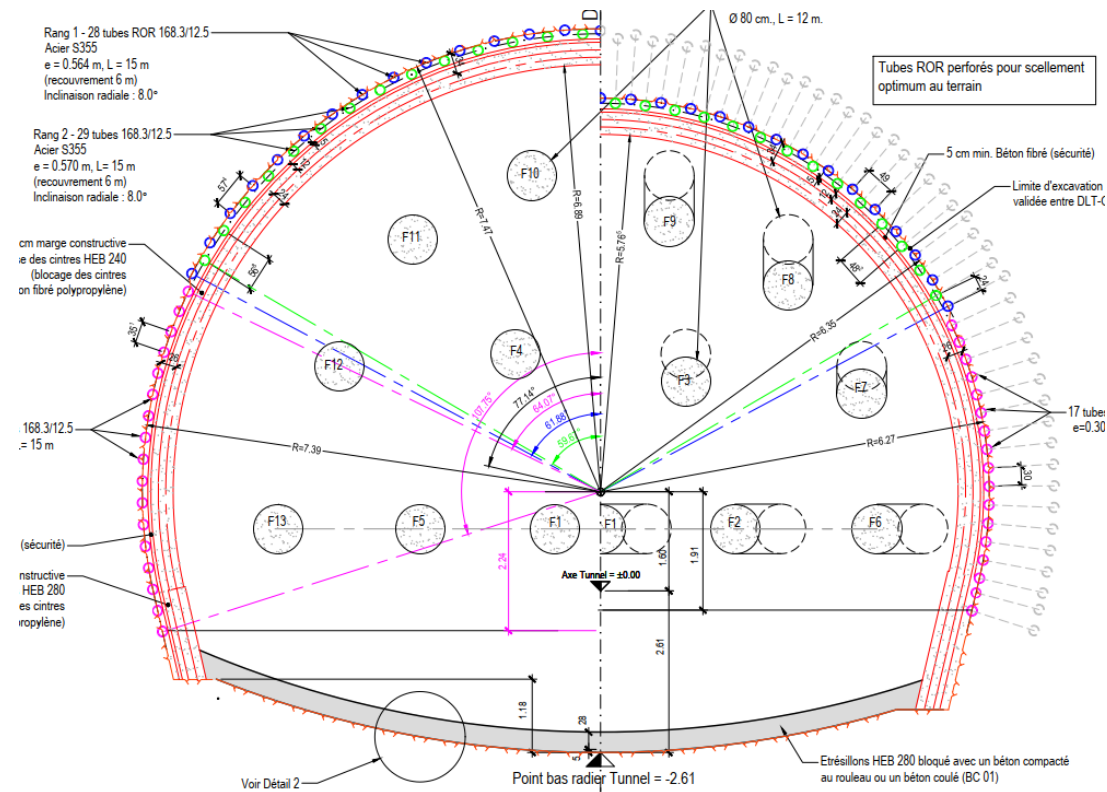




# ROHRSCHEM-VORTRIEB

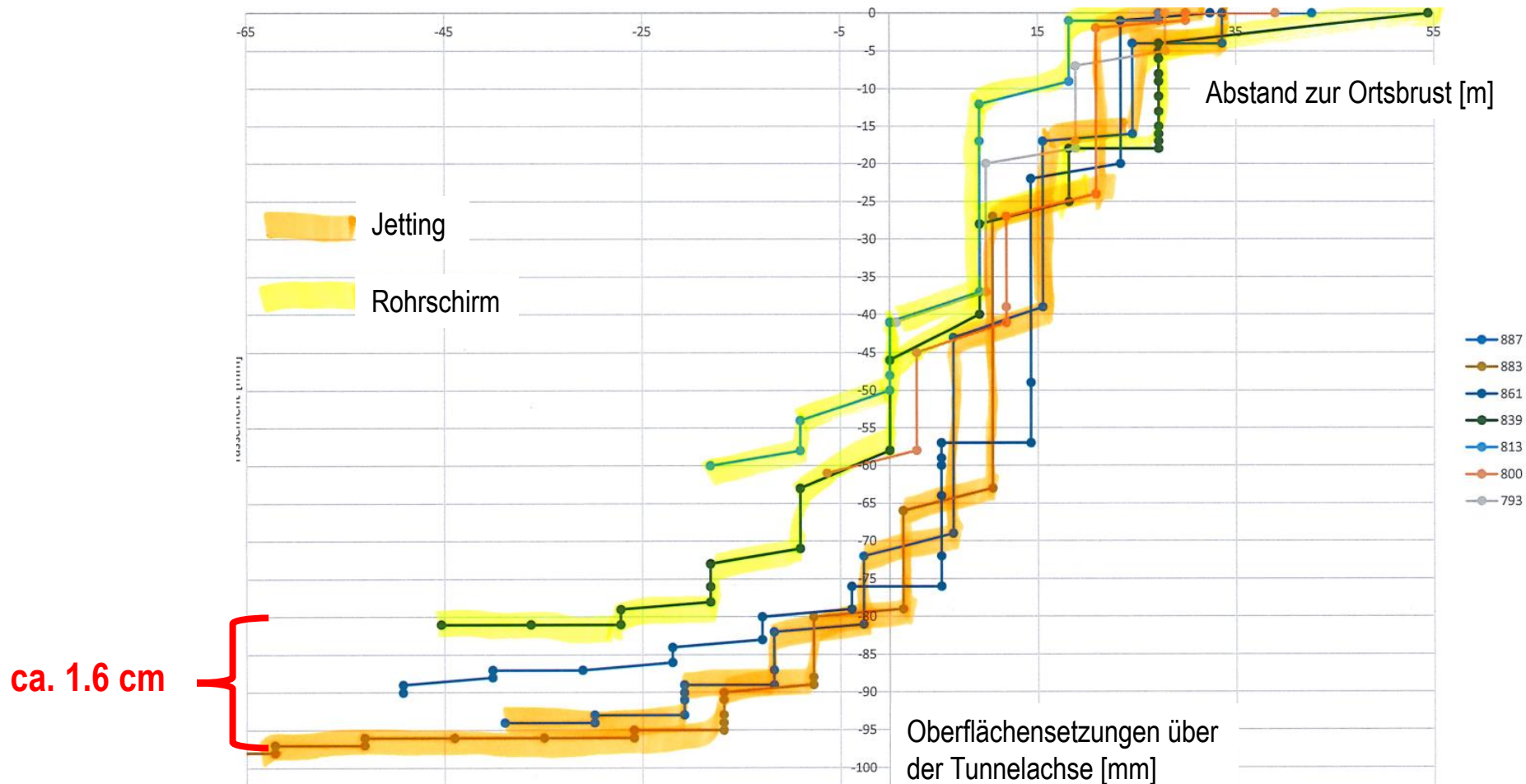
Ab Etappe E42:

- Doppelter Rohrschirm mit 91 Stahlrohren 168x12,5, L=15 m,
- Ortsbrustsicherung mit Jetting-Säulen (ab Etappe E42)
- GFK-Ortsbrustanker 35 x Ø76mm L=17 m (ab Etappe E43)
- Ausbruchsicherung mit HEB 260 Stahlträger und 45 cm Spritzbeton



# SETZUNGEN: VERGLEICH JETTING-ROHRSCHIRM

- Etwa 1.6 cm geringere Setzungen mit Rohrschirm als mit Jetting-Verfahren  
Setzungen beim Rohrschirmvortrieb im Vergleich zum Jetting-Verfahren:



# SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Gegen aller Intuition und Berechnungen wurden beim Tunnelvortrieb mit Jetting-Gewölbe und Jetting-Ortsbrustsicherung, deutliche Oberflächensetzungen festgestellt.
- Stabilität der Ortsbrust und des Tunnelausbaus sind gewährleistet, keine Bewegung feststellbar
- Es scheint wahrscheinlich, dass der Bohrvorgang eine Art Vibro-Verdichtung des grobkörnigem Bodens am Ausbruchrand erzeugt
- Getestete Optimierungen im Jetting-Verfahren erwiesen sich als unwirksam
- Die Umstellung der Bauhilfsmassnahmen auf Rohrschirm reduzierte die Setzungen um weniger als 25%

**DANKE FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT**

