



**Geotechnische Aspekte
beim Entwurf und Bau grosser Kavernen
am Beispiel des
Pumpspeicherwerks Linth-Limmern**

Projekt «Linthal 2015»

Bauherr:

KLL Kraftwerke Linth-Limmern AG, Linthal

Projektleitung:

Axpo Power AG, Hydroenergy, Baden

Geologe:

Axpo Power AG, Baden

BTG Büro für Technische Geologie, Sargans

Planergemeinschaft «IG Alpenstrom»:

IM Maggia Engineering AG, Locarno (Federführung)

IUB Engineering AG, Bern

ILF Beratende Ingenieure AG, Zürich und Rum b. Innsbruck

kbm SA environnement naturel et construit, Sion

alp Andenmatten Lauber & Partner, Visp



Besonders verdankt wird die vorbildliche Zusammenarbeit im Geotechnik-Team zwischen Projektleitung und IG mit den Kollegen Marclay, Dr. John, Dr. Marcher, Dr. Wachter, Fellner, Senti und Dr. Mohr.

Projektgeschichte

Bestehende KW-Anlagen

- Staumauer Limmern (146 m), 1963
- KW Muttsee (4.4 MW)
- KW Tierfehd (261+40 MW)
- PSW Tierfehd (120/140 MW), 2009

Studien PSW Limmern ab 2003

- Vergrösserung Muttsee (9 → 24 Mio. m³)
- 1 km lange Gewichtstaumauer
- 2 km langes Triebwassersystem (Nutzgefälle = 560 - 709 m)
- Kavernenkraftwerk mit 4×250 MW

Projektierungsmeilensteine

- Konzessionserneuerung 2006 (2016-2096)
- Bauprojektauftrag an IG Alpenstrom 2007
- Baubeschluss und Ausschreibung Sept. 2009

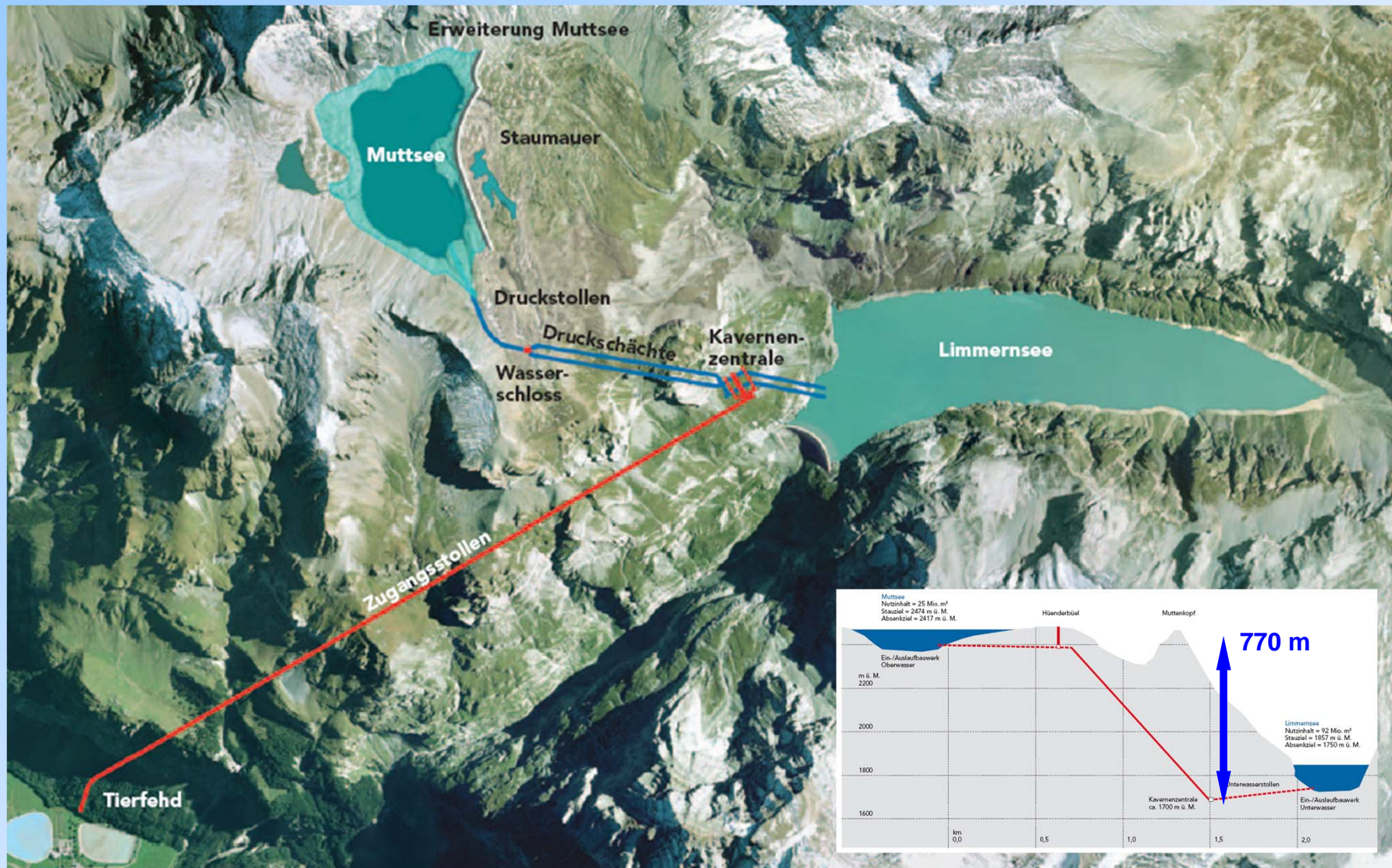
Realisation ab Okt. 2009

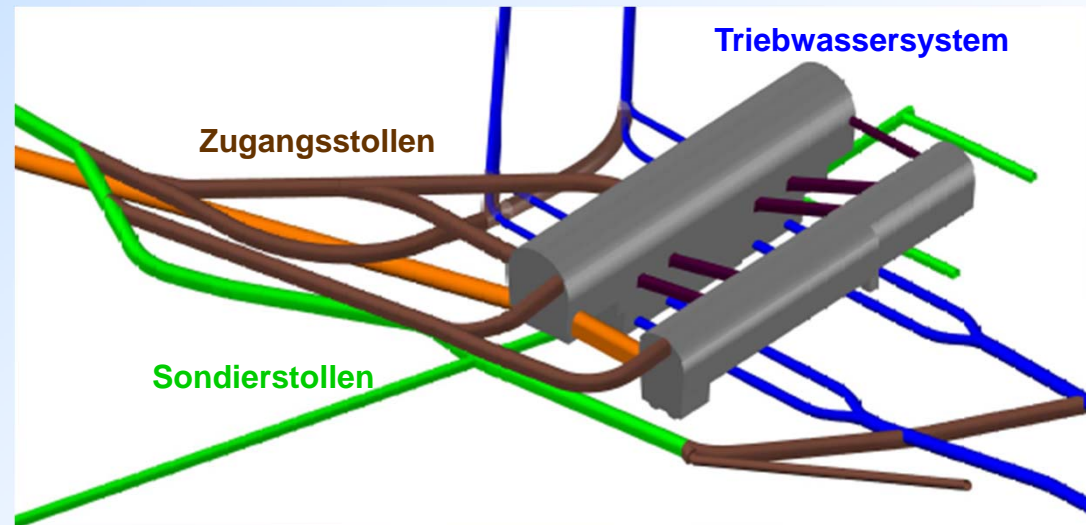
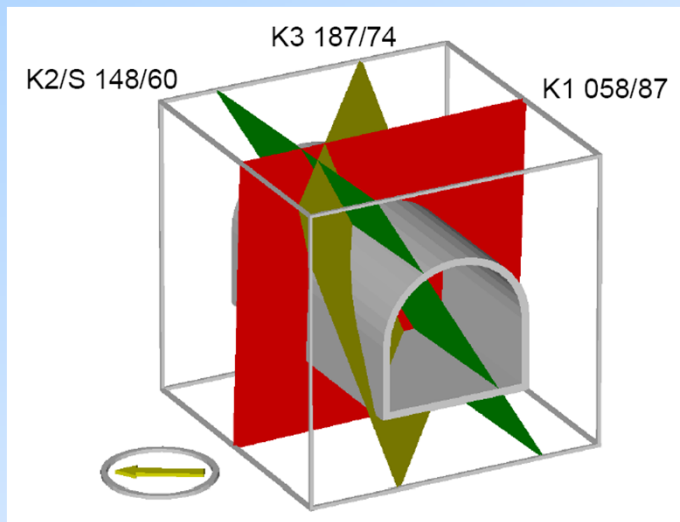
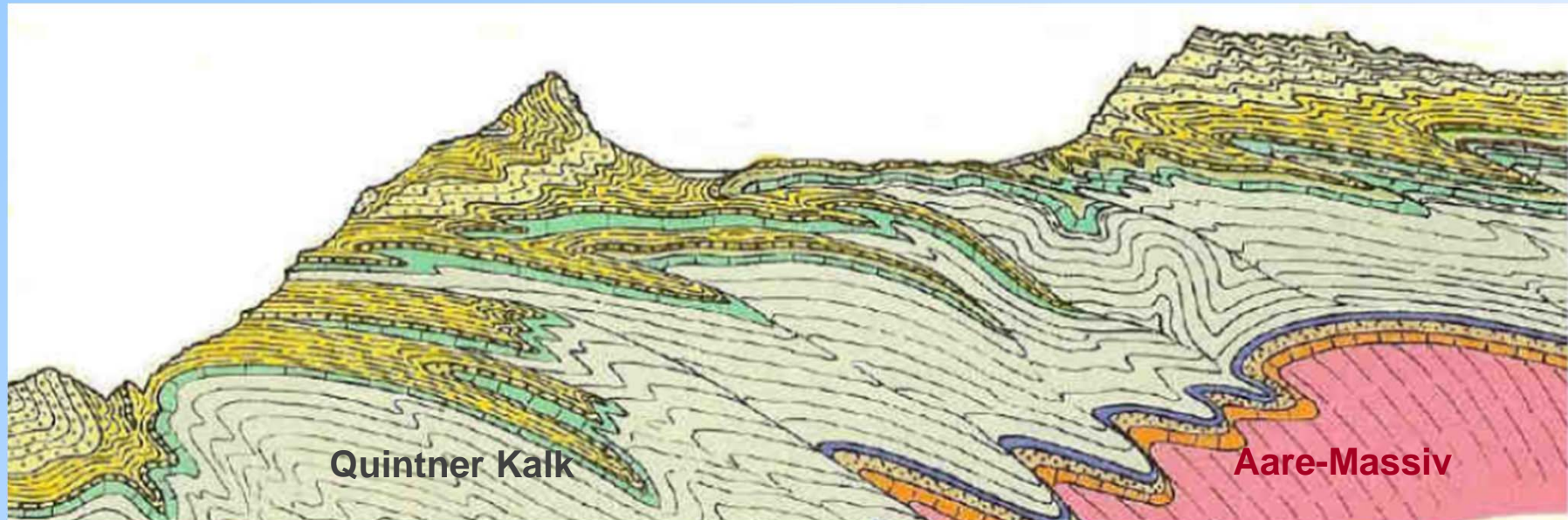
- Ausbruch Kavernenzentrale Frühj. 2010 – Frühj. 2012
- Abschluss Rohbau Kavernenzentrale Herbst 2013
- Beginn Hauptmontage

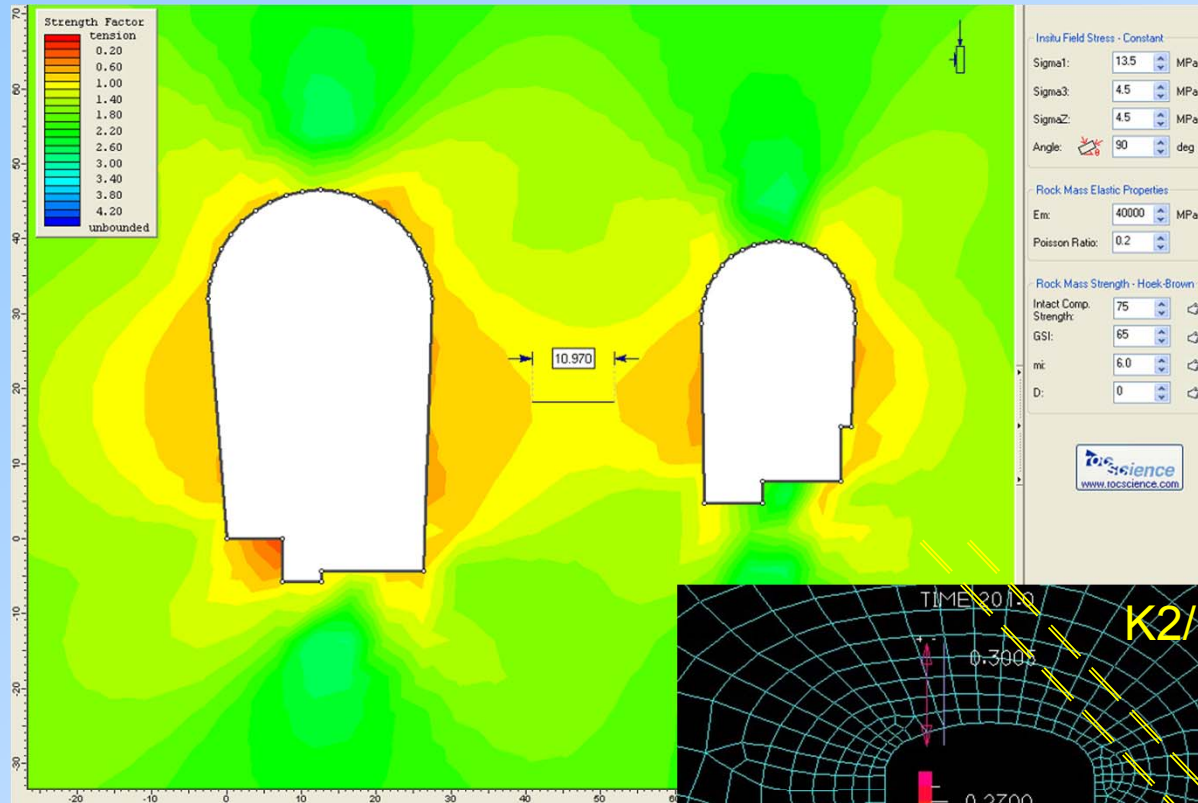
Inbetriebnahme 1. Maschinengruppe Ende 2015

[http://www.srf.ch/player/tv/schweiz-aktuell/video \(05.-12.10.2012\)](http://www.srf.ch/player/tv/schweiz-aktuell/video (05.-12.10.2012))



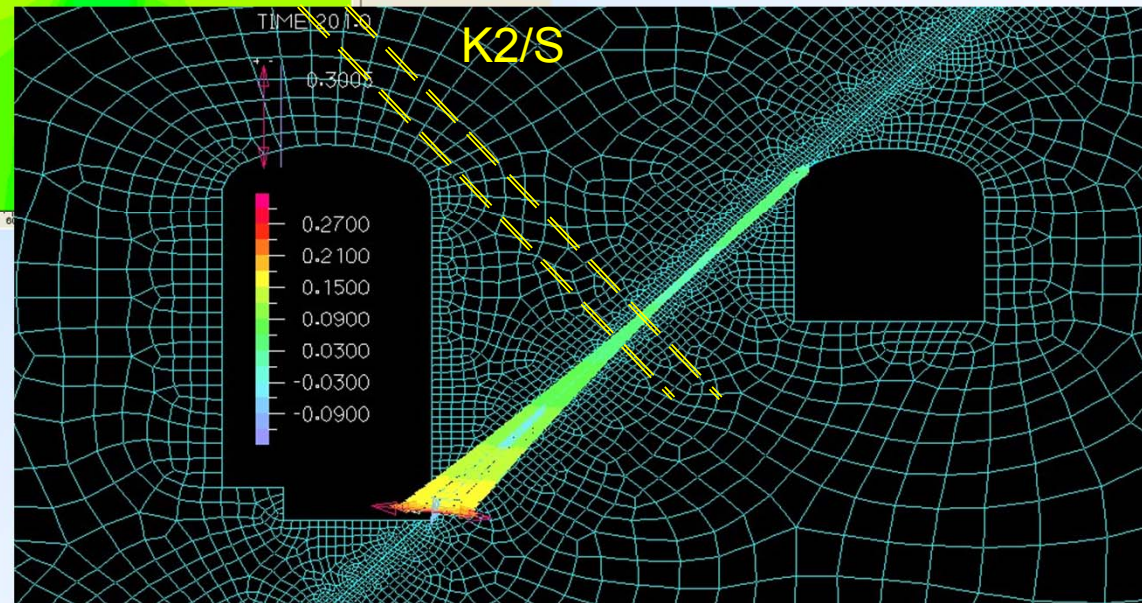




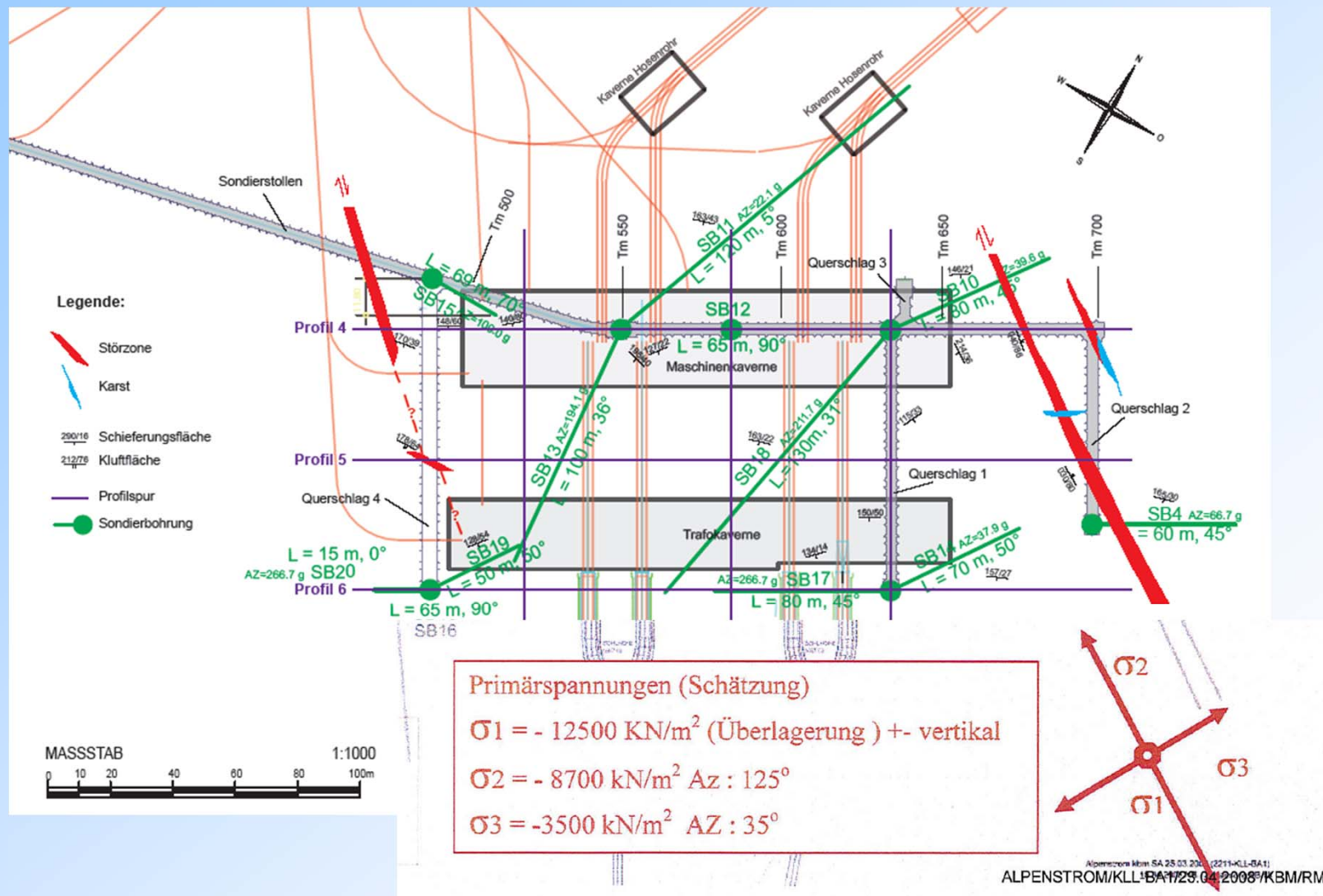


Vorprojekt:
Formfindung + Abstand
mit elast. Berechnung
[EXAMINE]

Bauprojekt:
Überlegungen zum
Versagensmodus [ADINA]

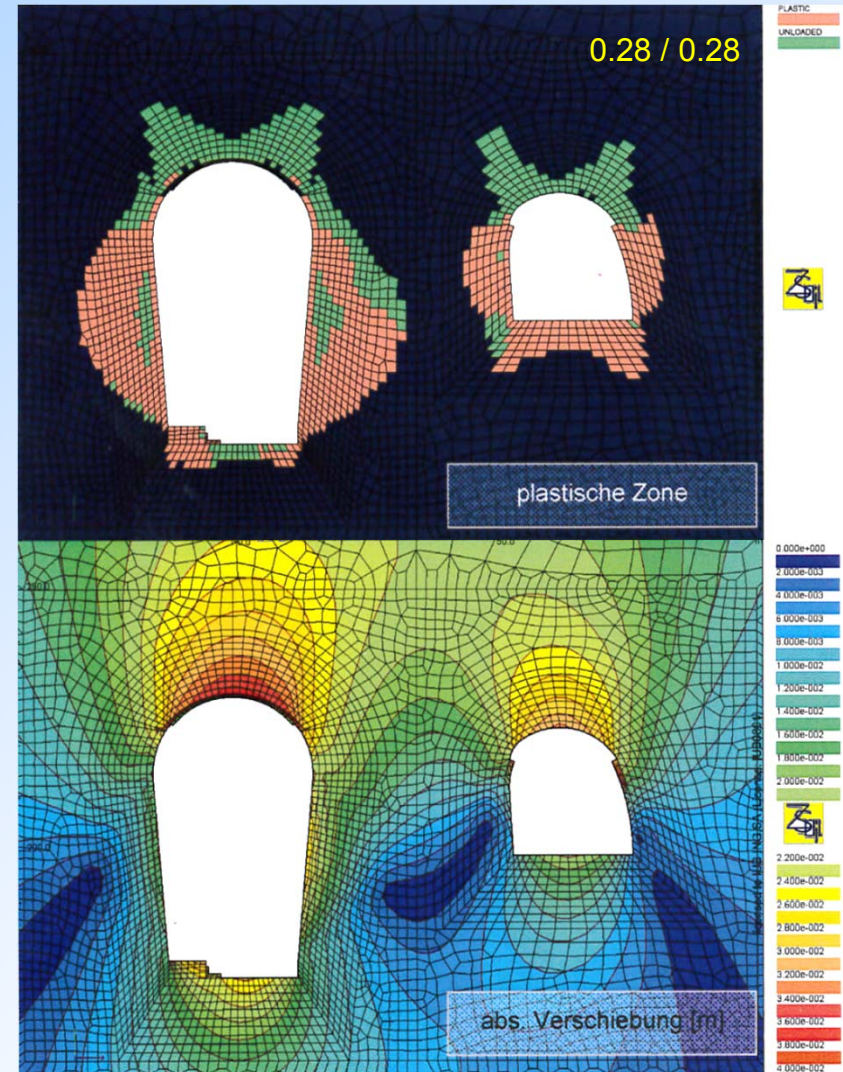
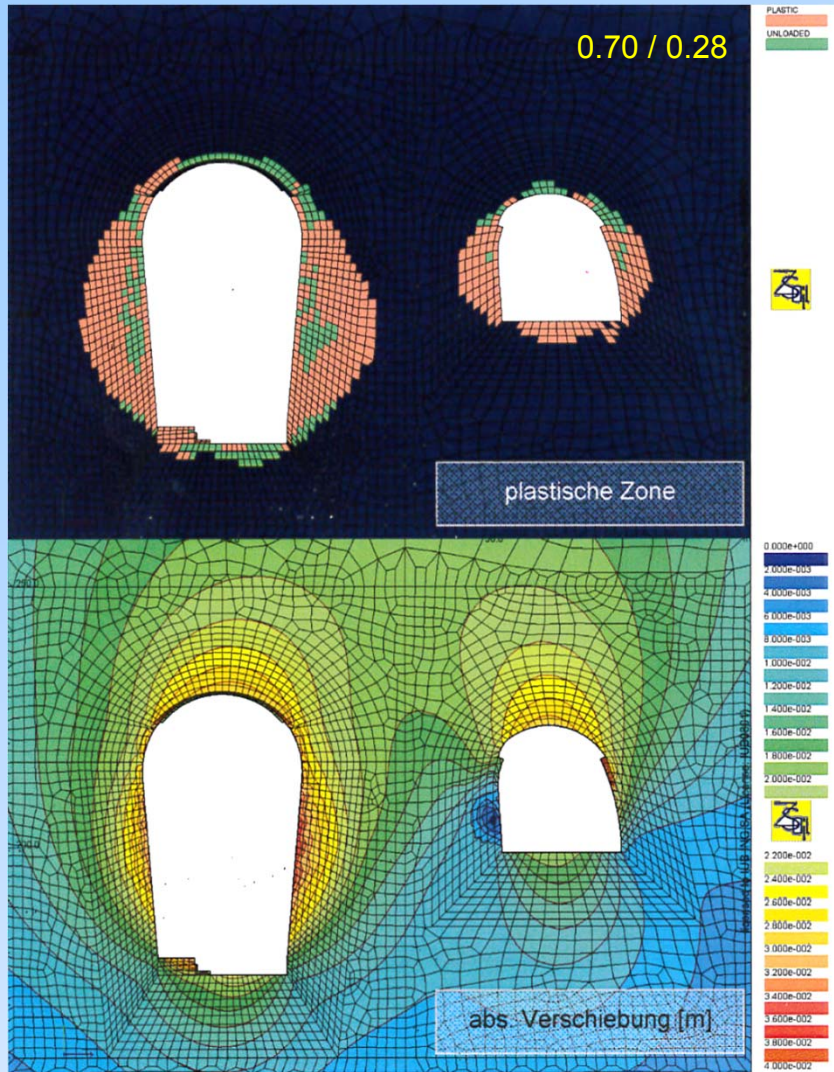


Primärspannungen und Karst



Sensitivität gegenüber Primärspannung

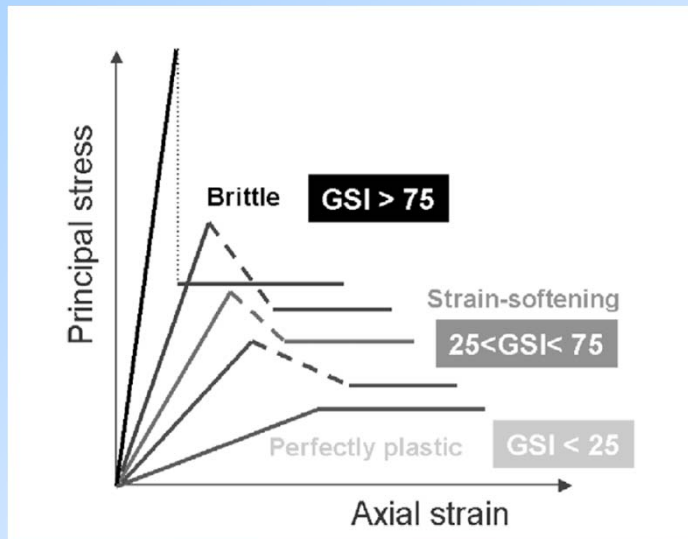
(definitiv: 0.4 / 0.7)



Variation der Kennwerte

Philosophieunterschiede:

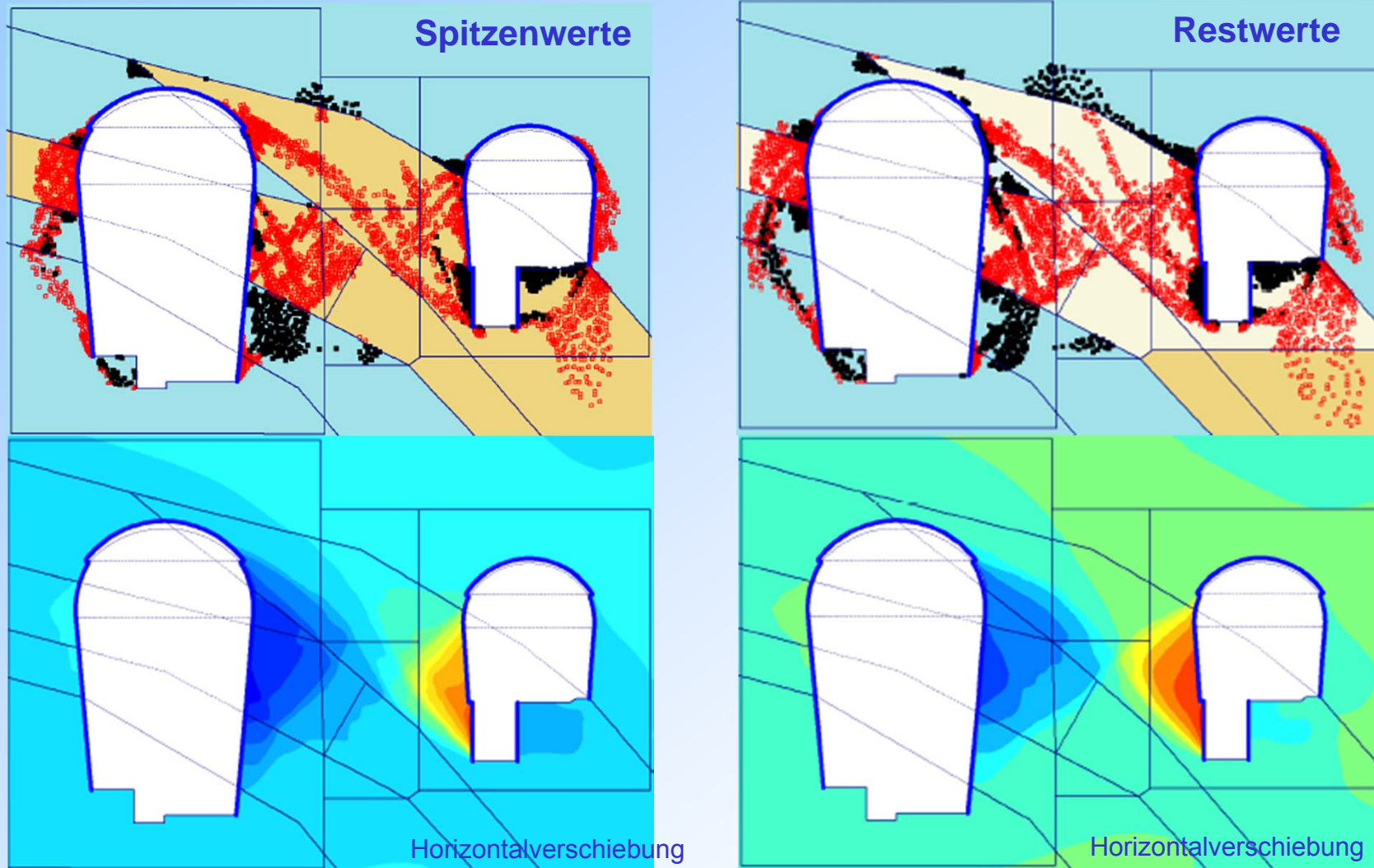
- Eingabelung mit Max./Min.-Werten
- Annahme guter Werte mit nachfolgender Entfestigung

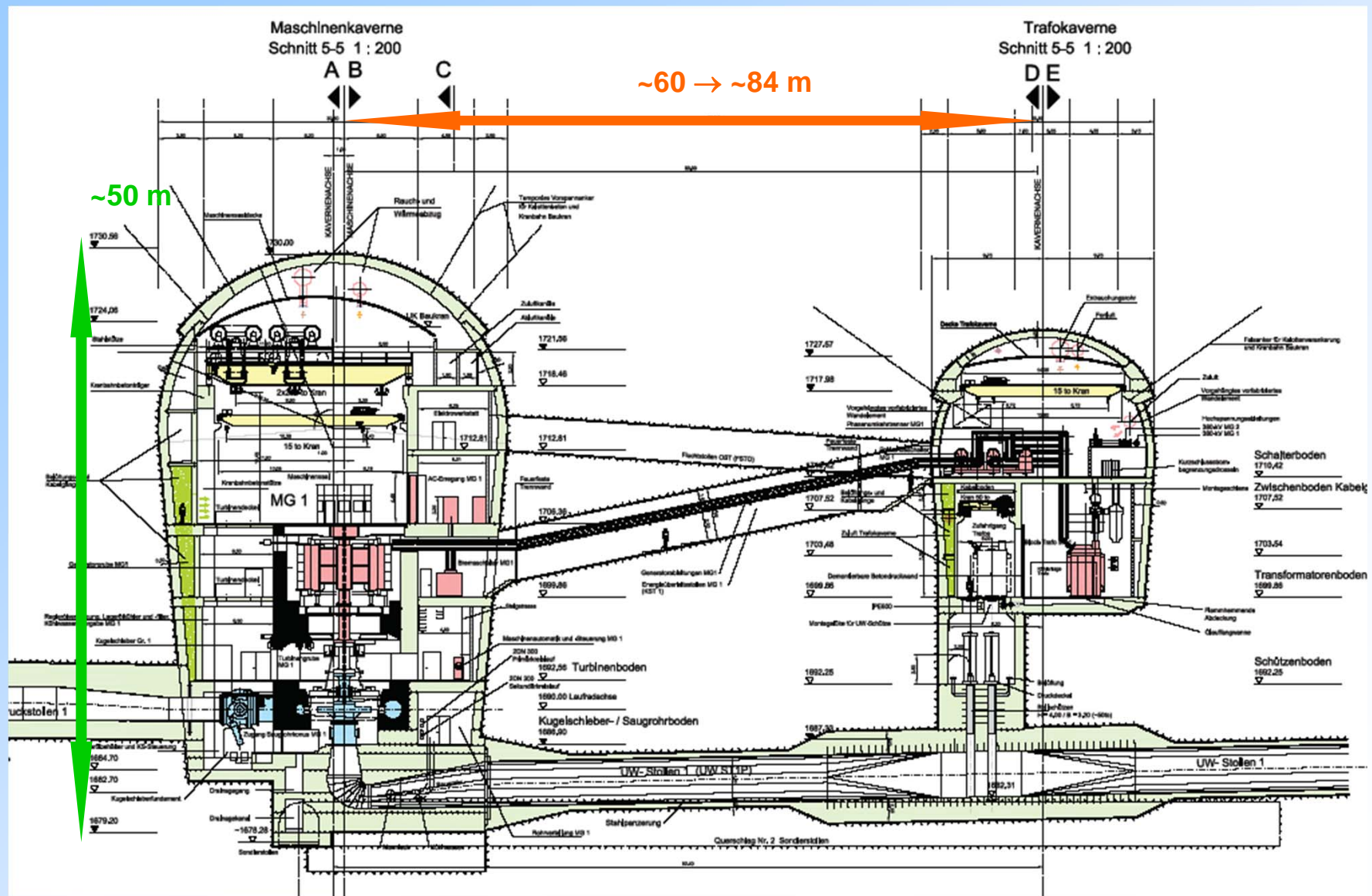


Entfestigungshypothese über GSI

massig-blockiger Kalk				
Kennwert	Einheit	Erwartungswert [B9]	Spitzenwert	Restwert
einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit σ_{ci}	MPa	70 ± 10	80	
geological strength index GSI	-	75 ± 10	70	45
Reibungswinkel φ	°	43 ± 3	47	40
Kohäsion c	kPa	4000 ± 2000	3000	1500
Zugfestigkeit σ_t	kPa	*)	800	130
plattig-schiefriger Kalk				
Kennwert	Einheit	Erwartungswert [B9]	Spitzenwert	Restwert
isotrop (Mittel)	einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit σ_{ci}	MPa	37 ± 3	50
	geological strength index GSI	-	50 ± 10	45
	Reibungswinkel φ	°	37 ± 3	36
	Kohäsion c	kPa	1500 ± 500	1300
	Zugfestigkeit σ_t	kPa	*)	80
I Schieferung	einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit σ_{ci}	MPa	keine Angaben	60
	geological strength index GSI	-		55
	Reibungswinkel φ	°		40
	Kohäsion c	kPa		1700
	Zugfestigkeit σ_t	kPa		200
II Schieferung	einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit σ_{ci}	MPa	keine Angaben	nicht berücksichtigt
	geological strength index GSI	-		40
	Reibungswinkel φ	°		35
	Kohäsion c	kPa		950
	Zugfestigkeit σ_t	kPa		30

Einfluss Entfestigung (inkl. Steifigkeit)

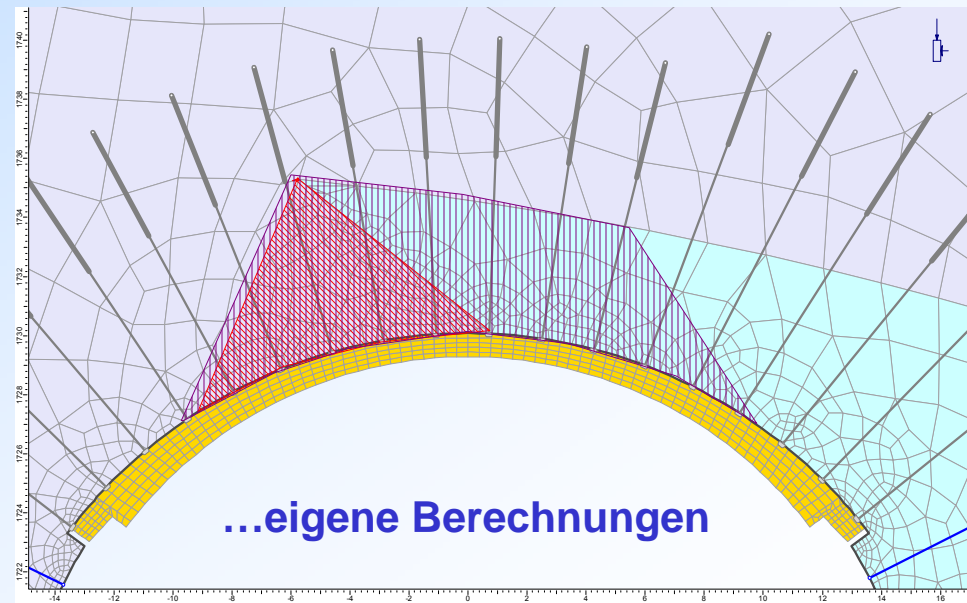
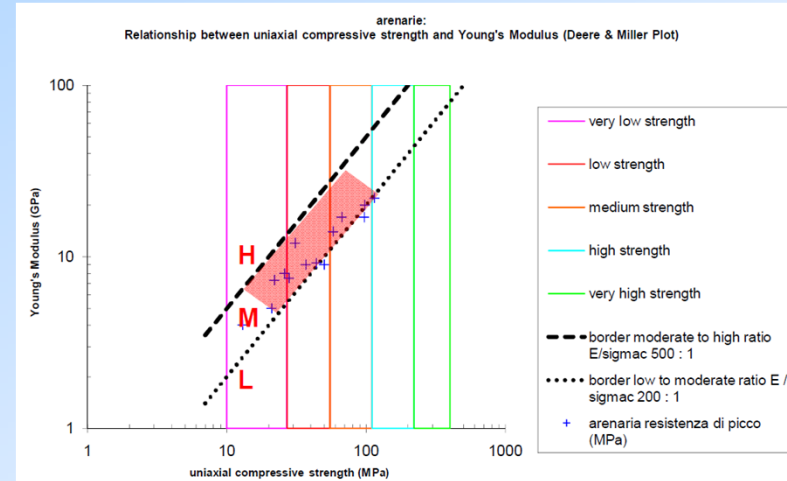
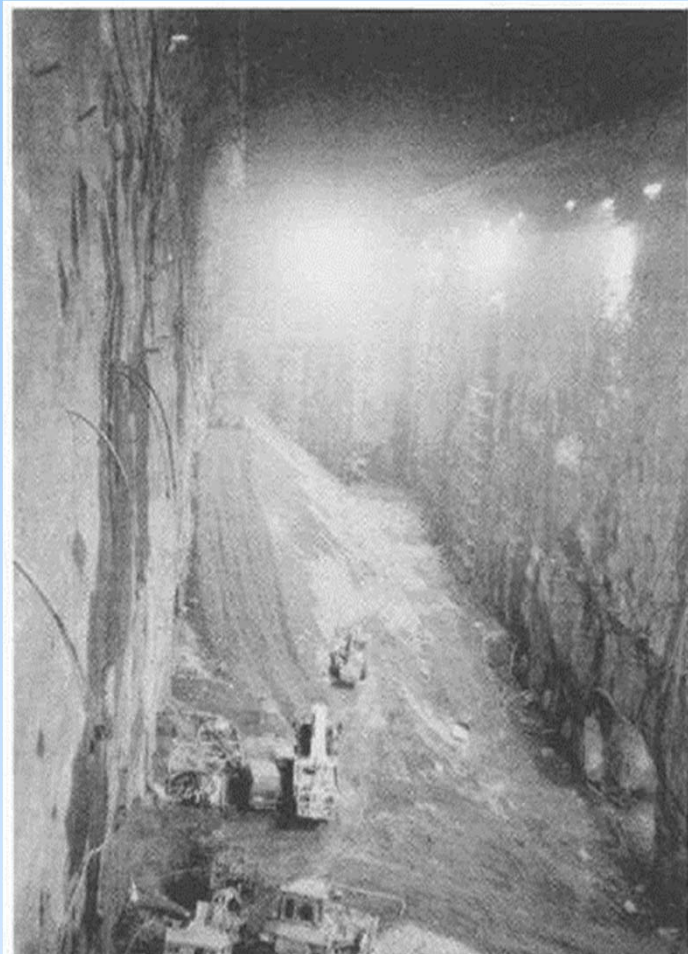




Dialog mit Geotechnikexperte Bauherr

Diskussion
Gefährdungsbilder...

...Felskennwerte...

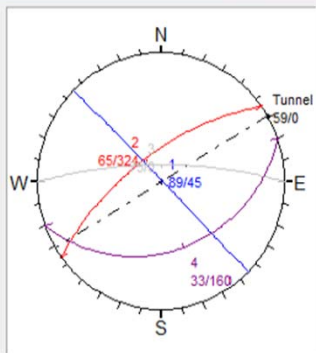
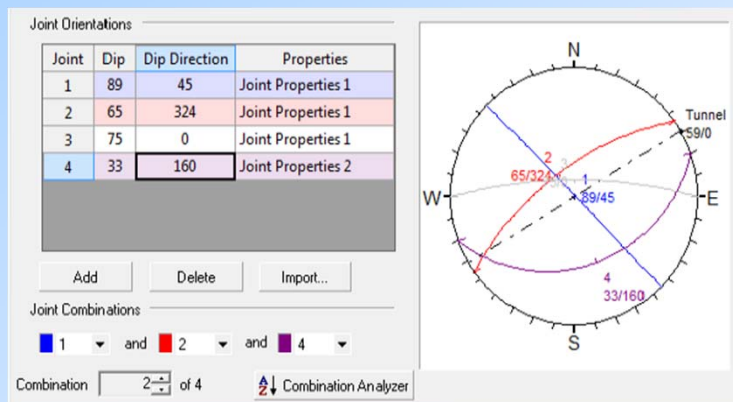


Kluftkörperanalyse & Ankerdimensionierung

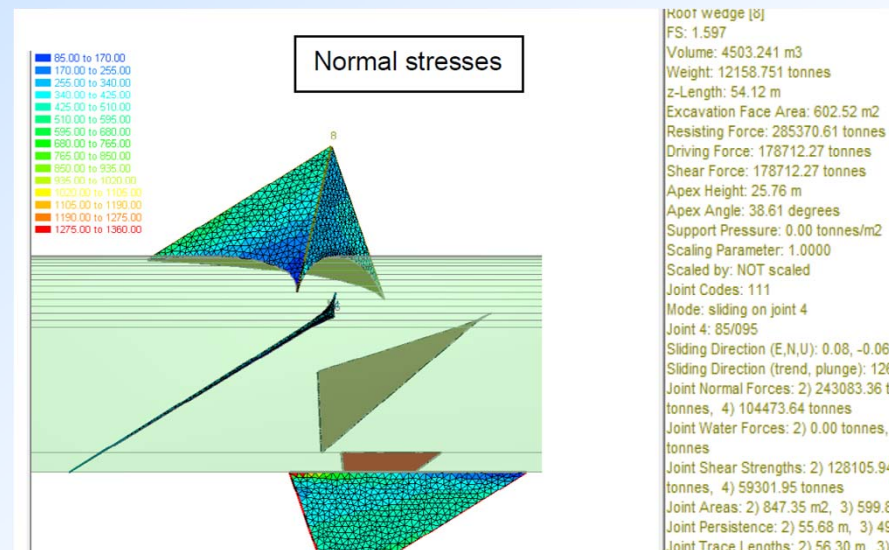
Prinzip:

- Kombination aller Kluftorientierungen aus Bohrloch-Scans zu 3D-Kluftkörpern
- mobilisierter Reibungswiderstand nur infolge Eigengewicht Kluftkörper
- Kennwerte $\tan \varphi / c$ abgemindert, Ankerwiderstand*) abgemindert
- Kluftlänge bzw. Durchtrennungsgrad, berücksichtigt durch Skalierung der Kluftkörper oder durch Kohäsion
- Verzicht auf Kohäsion bei Engständigkeit (Möglichkeit von Staffelbrüchen)

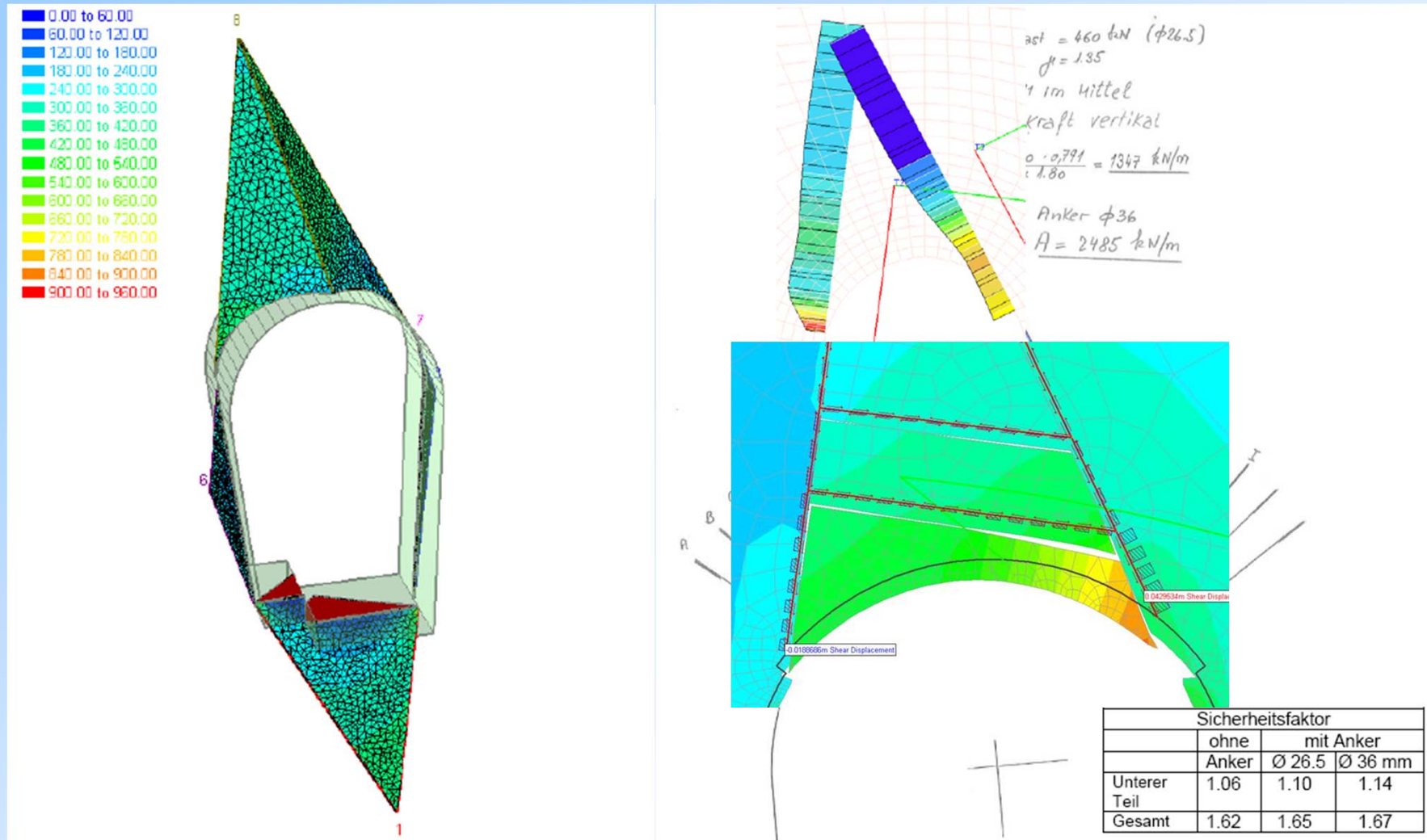
*) Min. {Fliehkraft, innerem u. äusserem Auszugswiderstand}, Verankerungslänge hinter der Kluft !

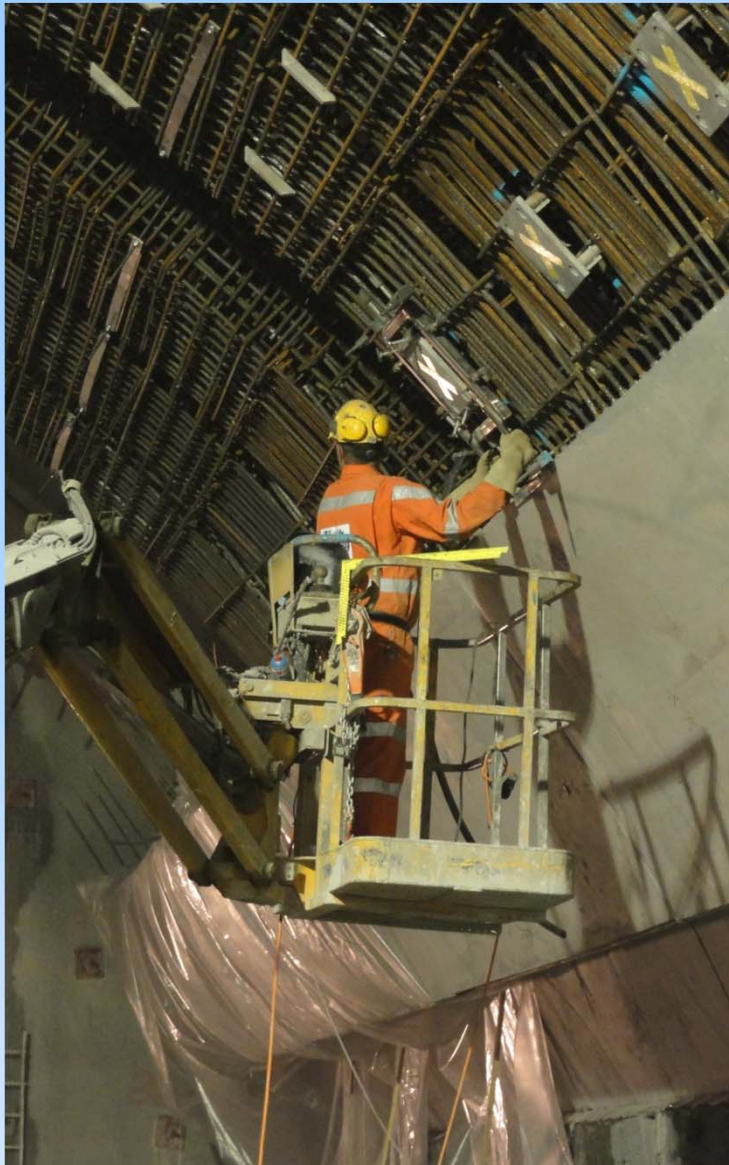


Bsp. Darstellung UNWEDGE

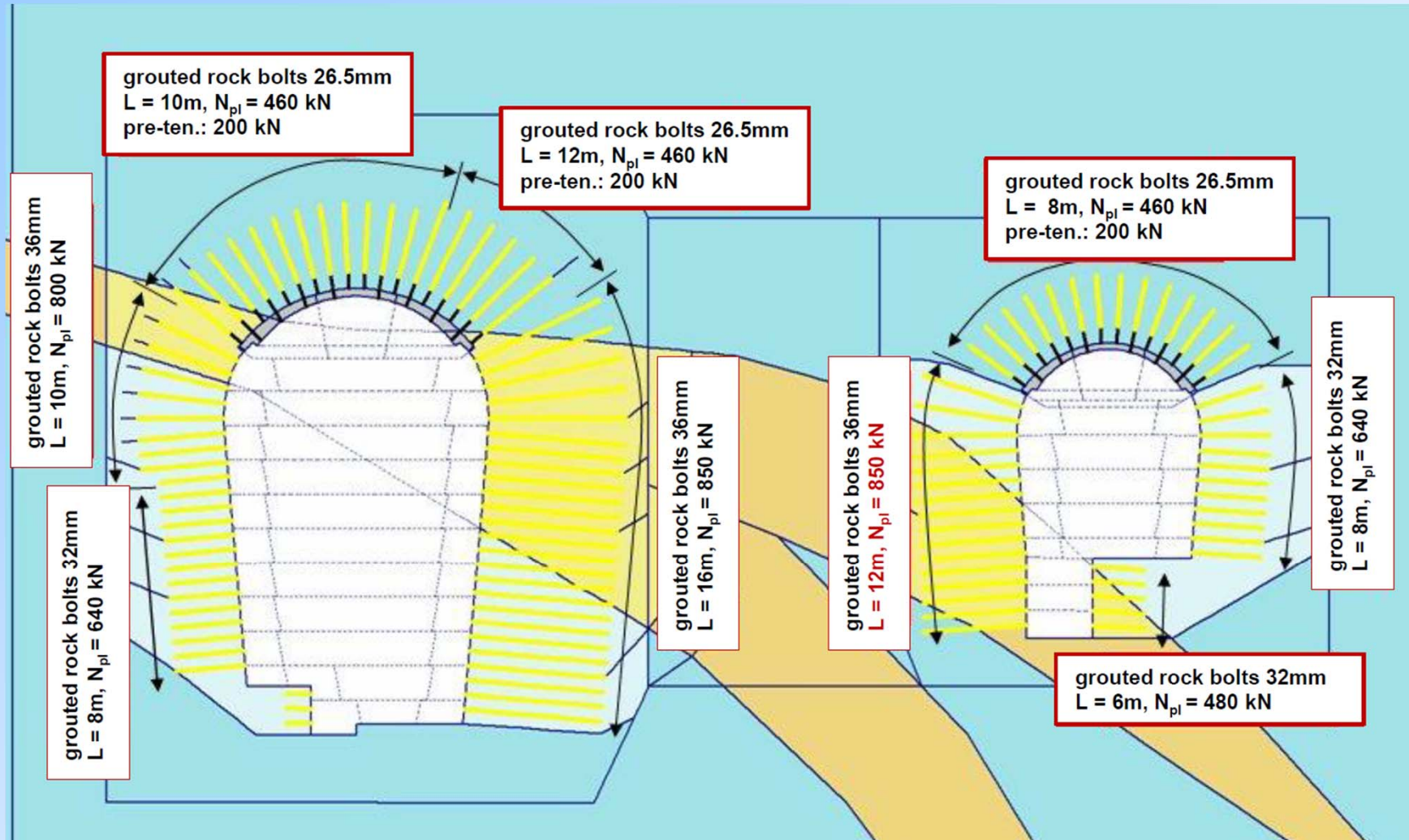


Behandlung sehr hoher Keile («Kapelle»)





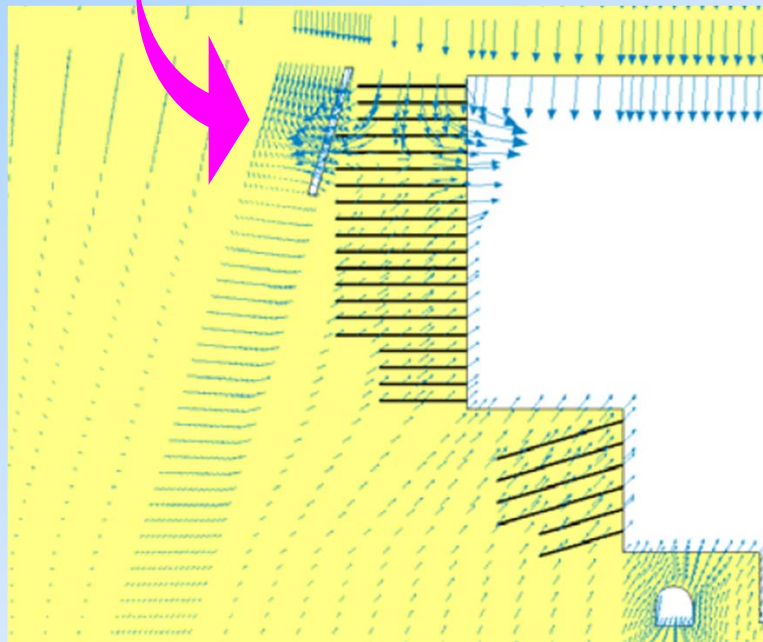
Systemankerung (1. Optimierung)



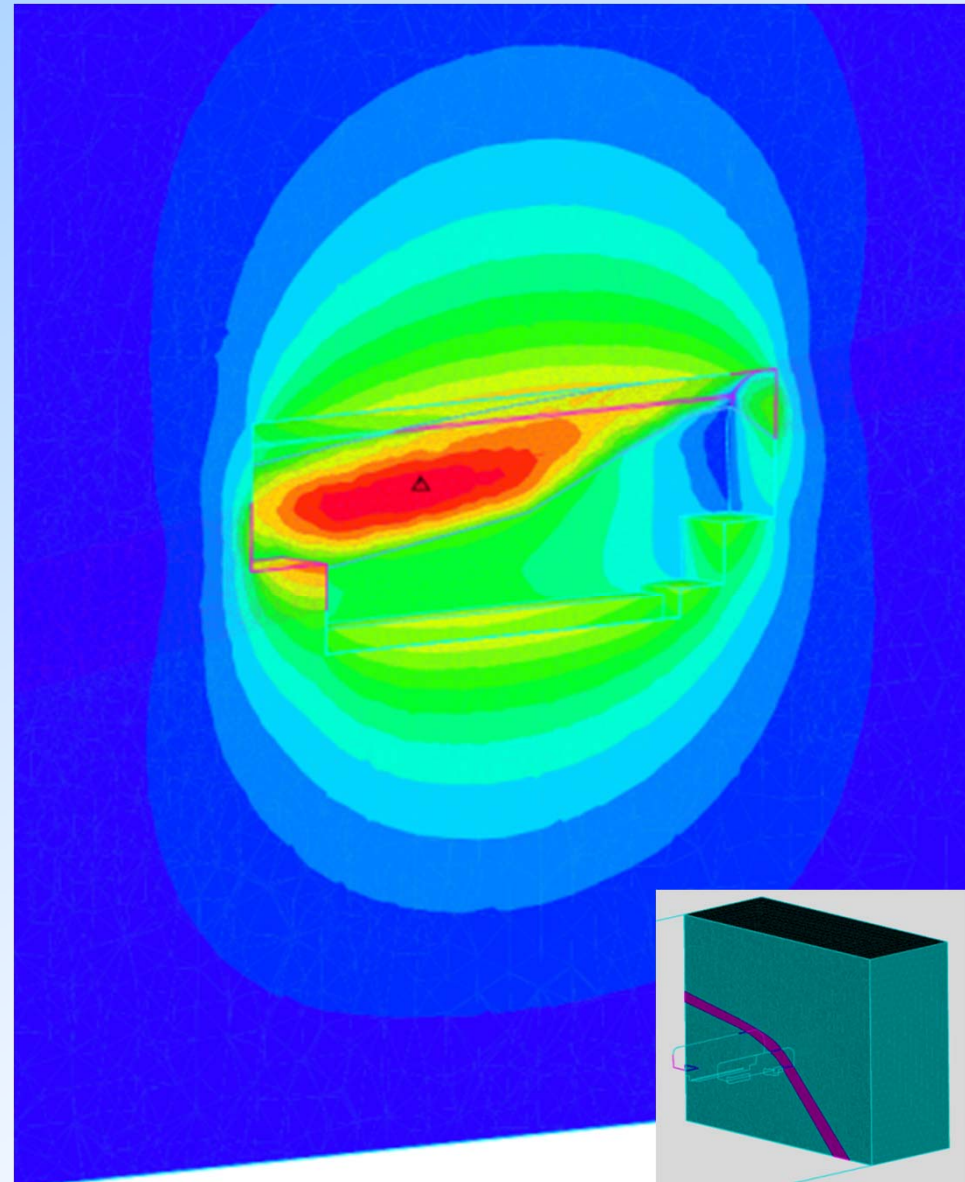
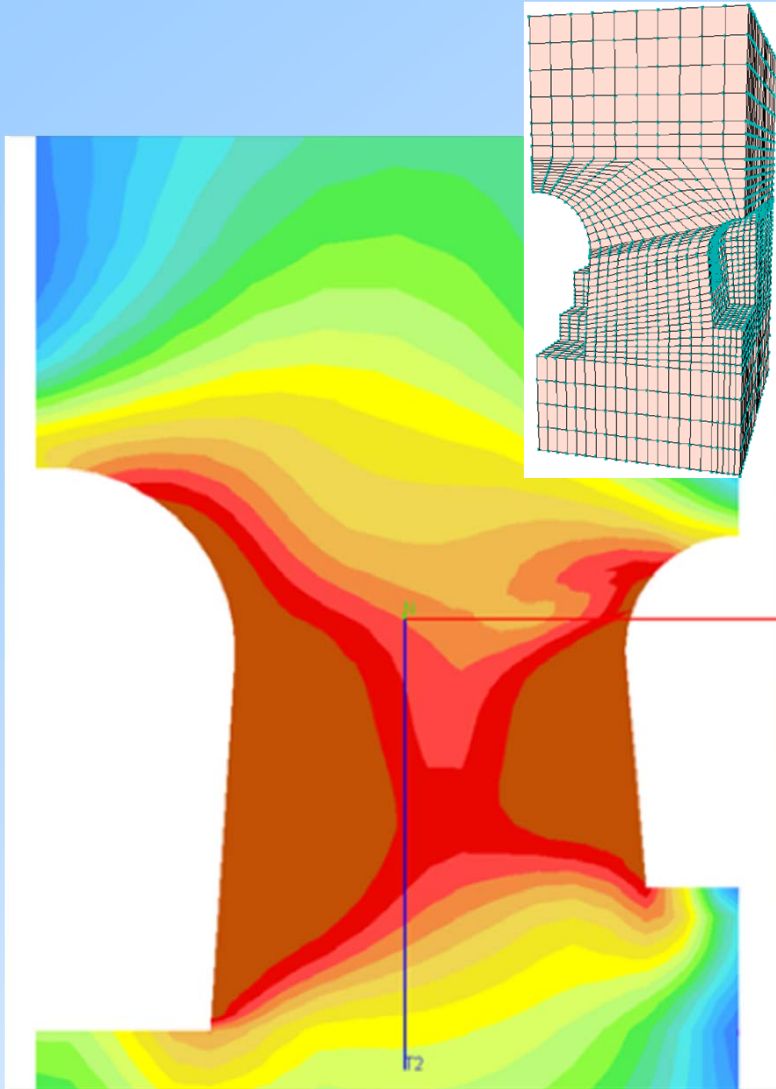


2D-Modelle mit «Pseudo-3D-Stützung»

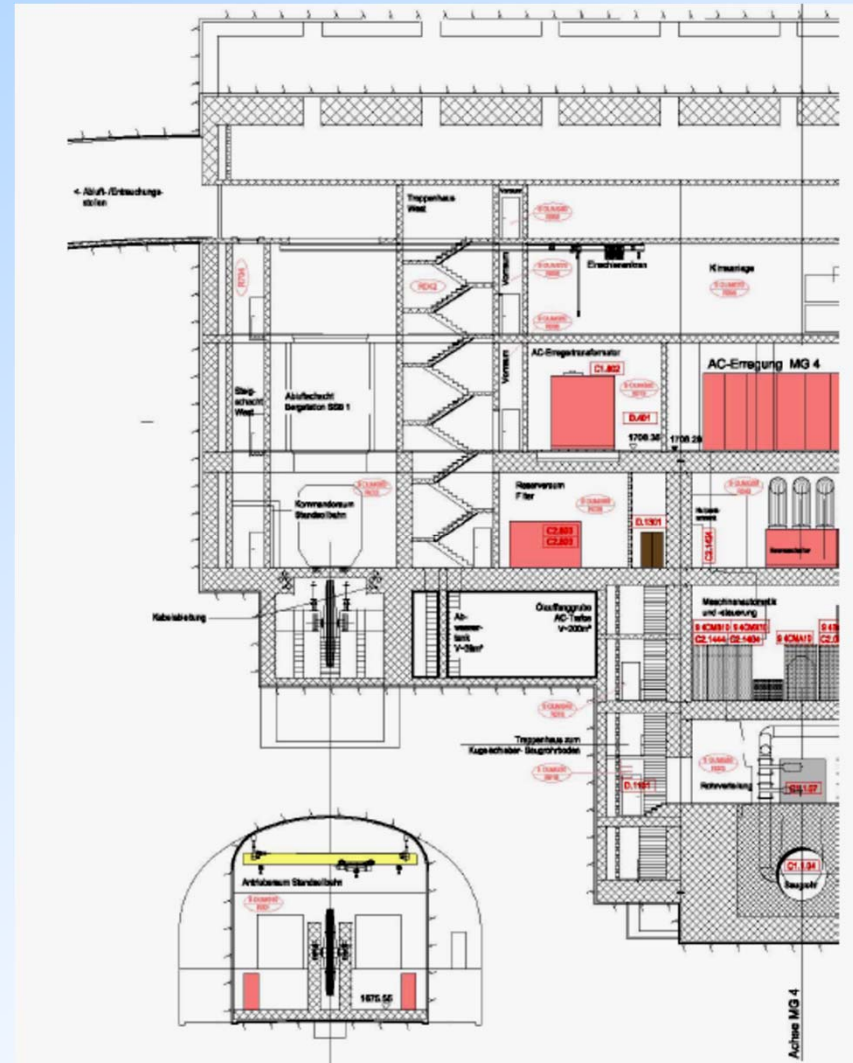
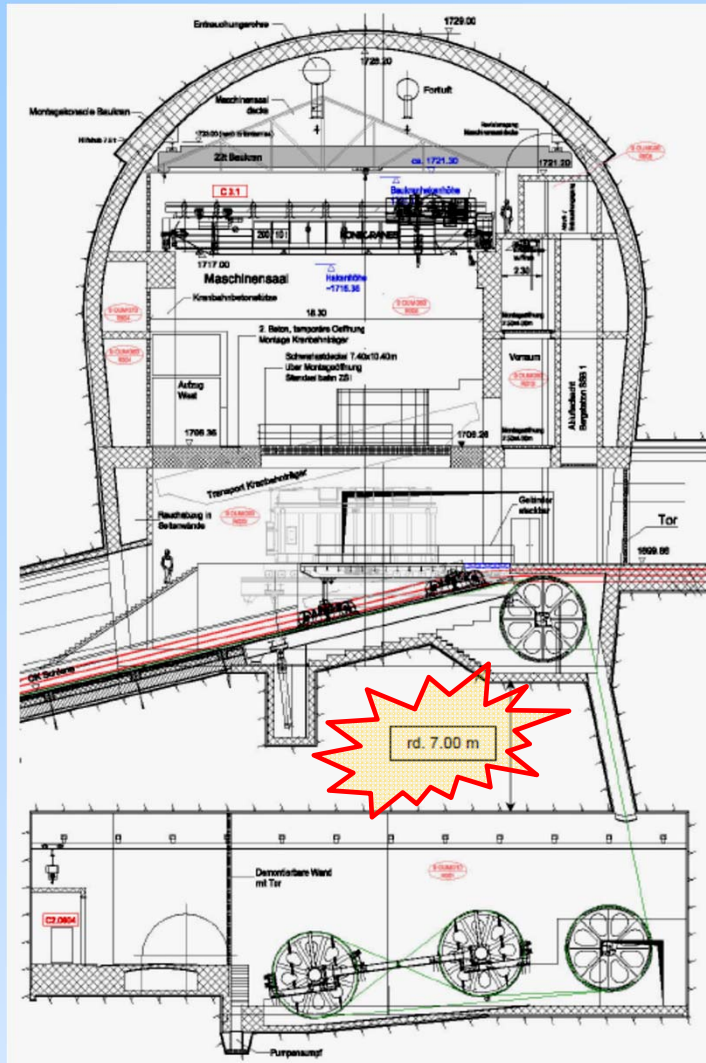
Bsp. Studie Karsteinfluss



Frühe 3D-Modelle

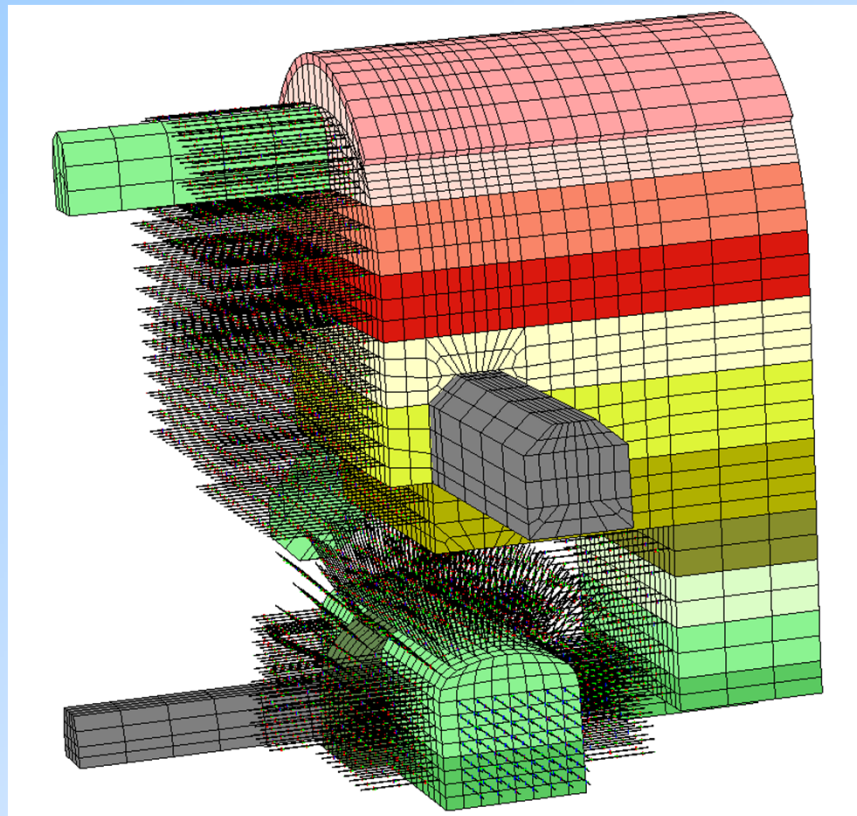


Verschiebung Antriebskaverne Schrägseilbahn

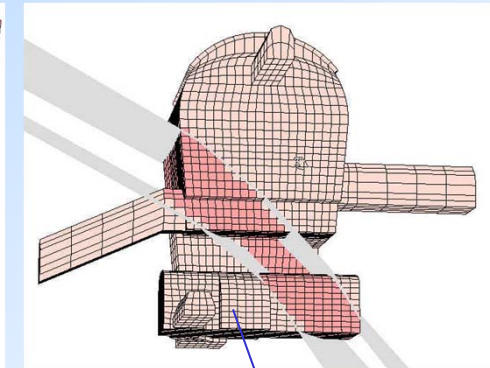
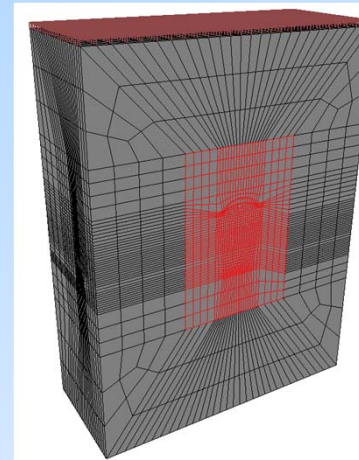


Lokales 3D-Modell der Stirnwand [Z_Soil]

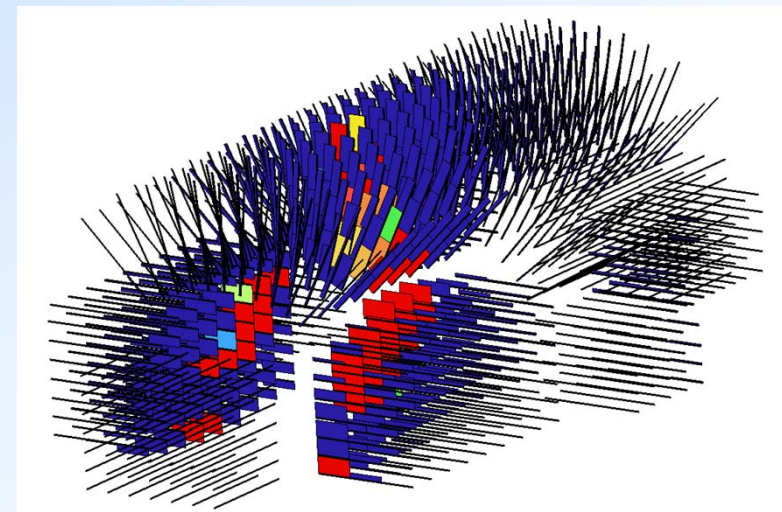
Modell H×B×T = 265×200×83 m
53'000 Kontinuumselemente
1'100 Ankerelemente



Hohlraumdarstellung der Elementierung



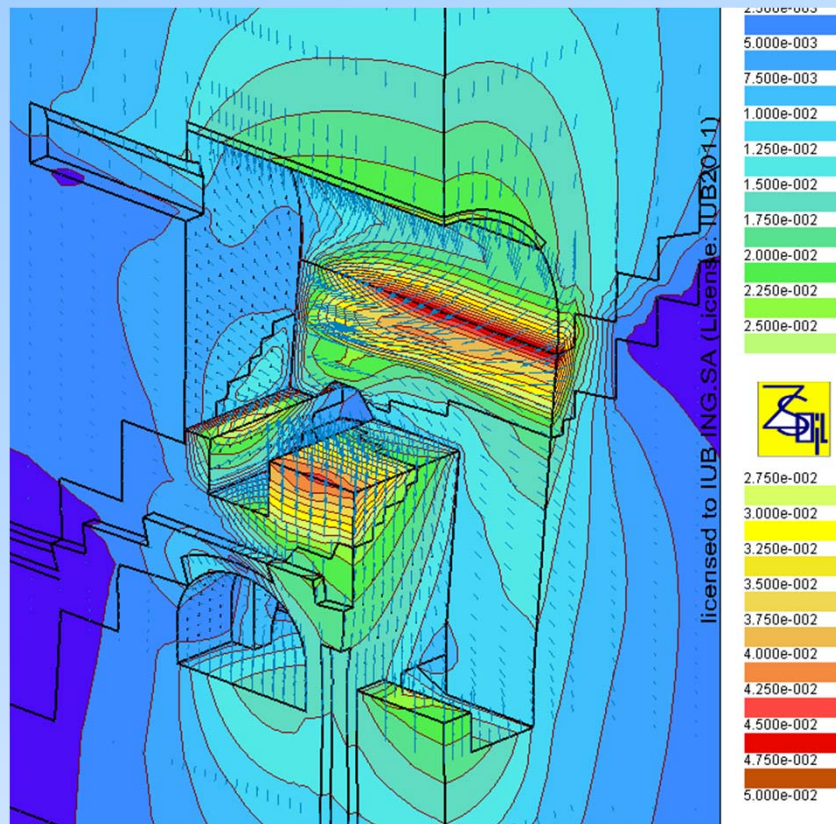
Antriebskaverne



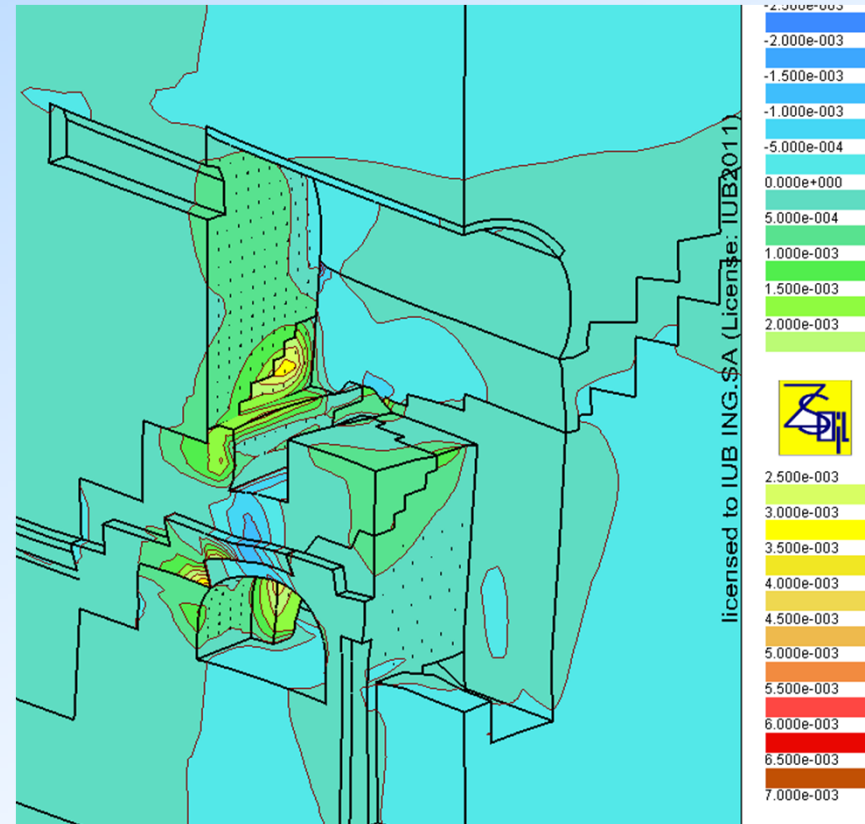
Ergebnis Ankerkräfte

Lokales 3D-Modell der Stirnwand [Z_SOIL]

Untersuchung für unterschiedliche Primärspannung,
Bsp. $K_{0,längs} = 0.4$



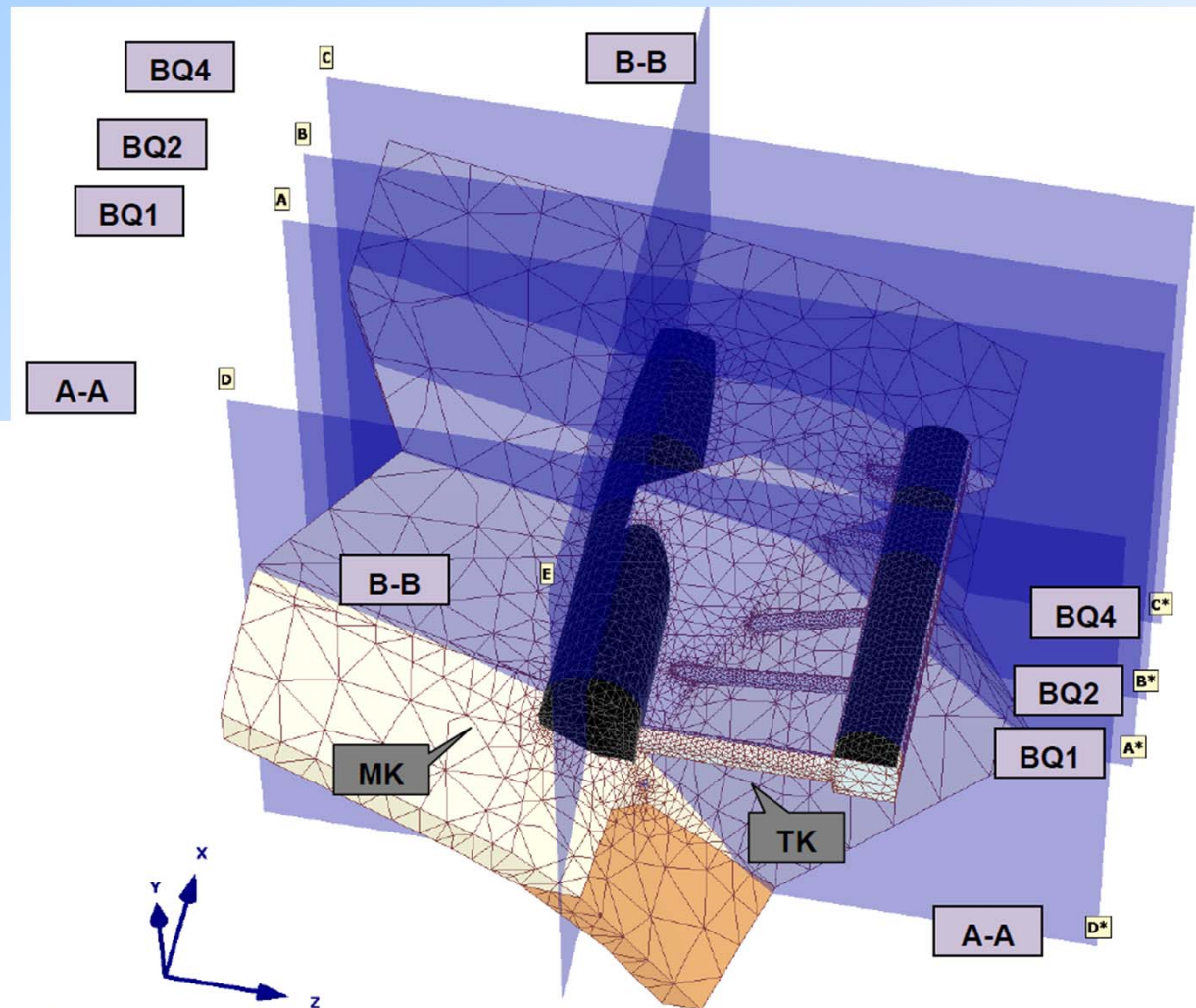
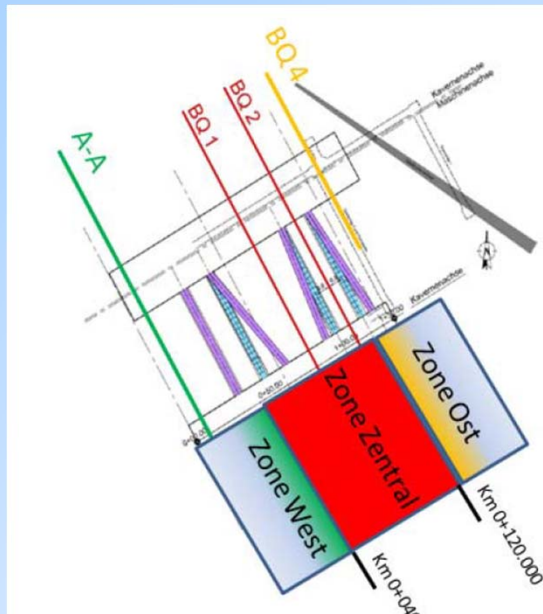
abs. Verschiebung u (0..+5 cm)



Längsdehnung ϵ_{xx} (-3..+7 ‰)

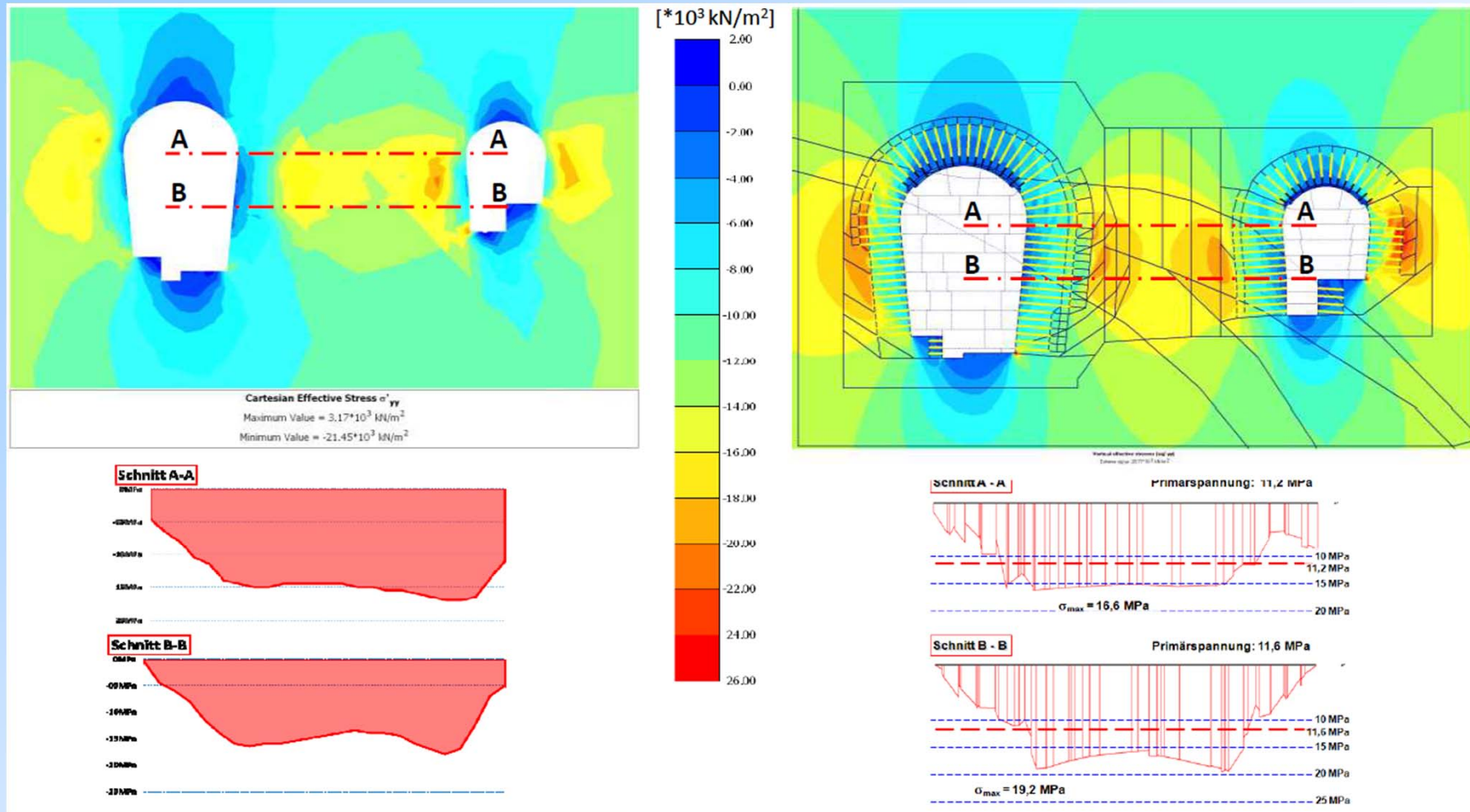
3D-Gesamtmodell [PLAXIS GID]

Verifizierung der 2D-Berechnungen:
insbes. nahe der Stirnwände (BQ4),
aber auch Einfluss der Verbindungsstollen



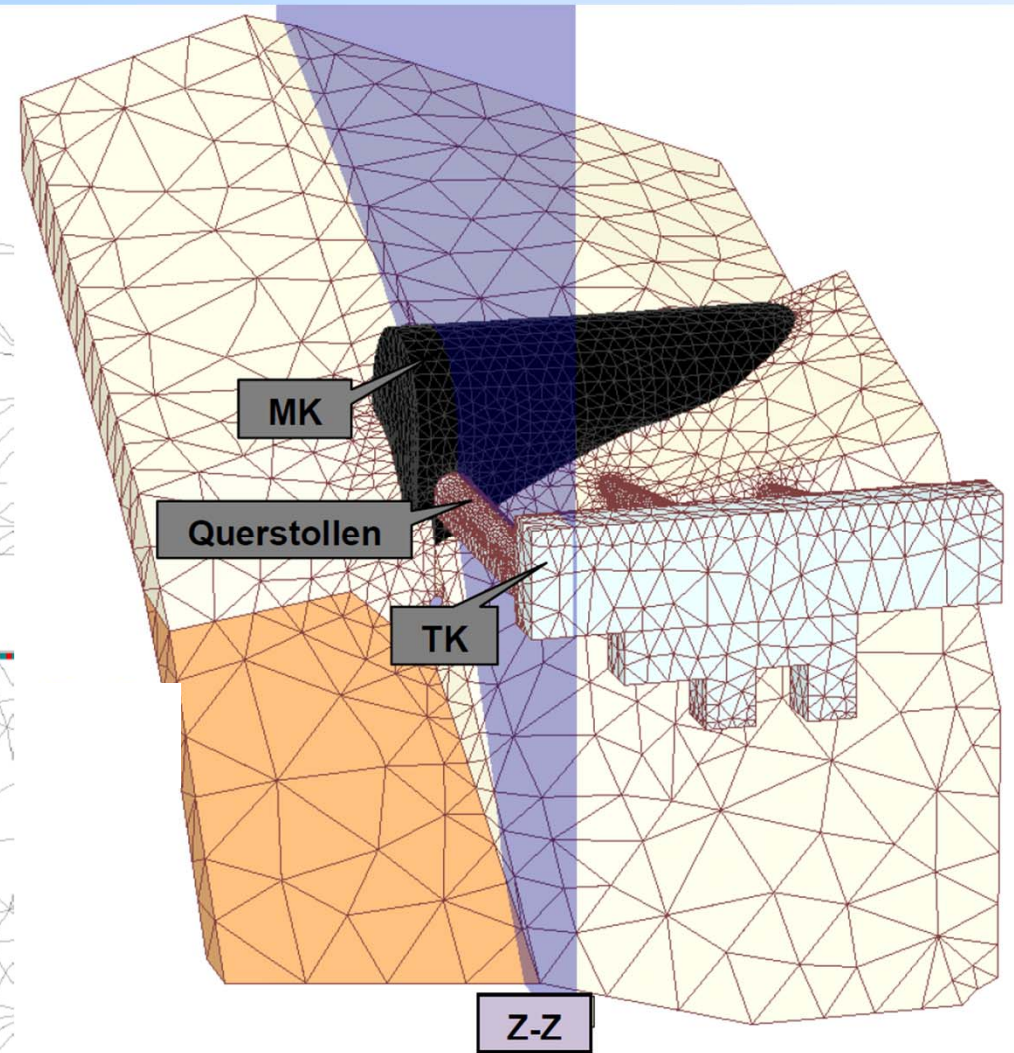
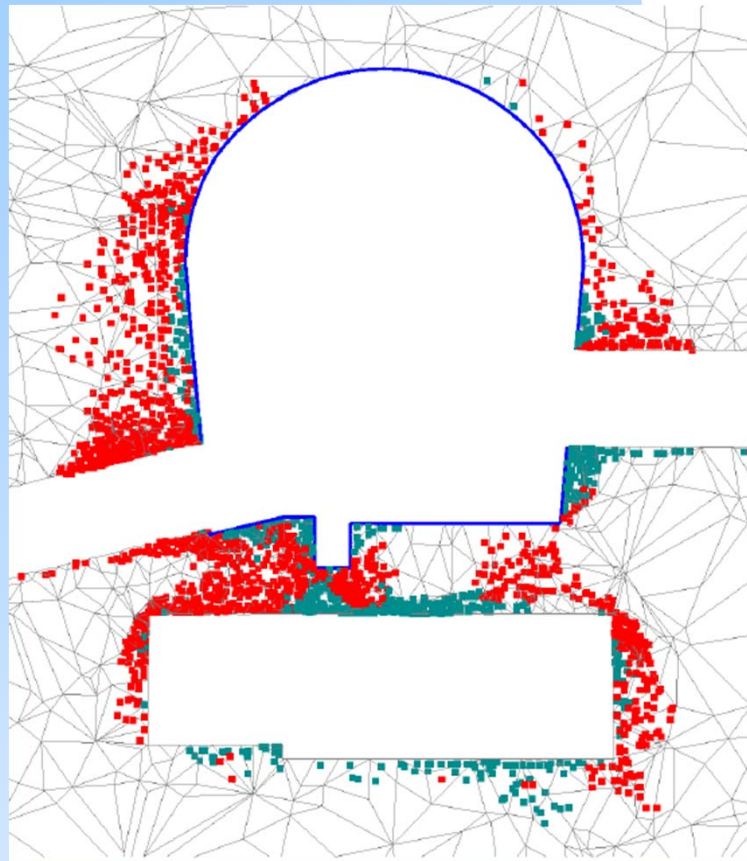
Vergleich 3D mit 2D

(Bsp. BQ2, d.h. nahe Kavernenmitte)

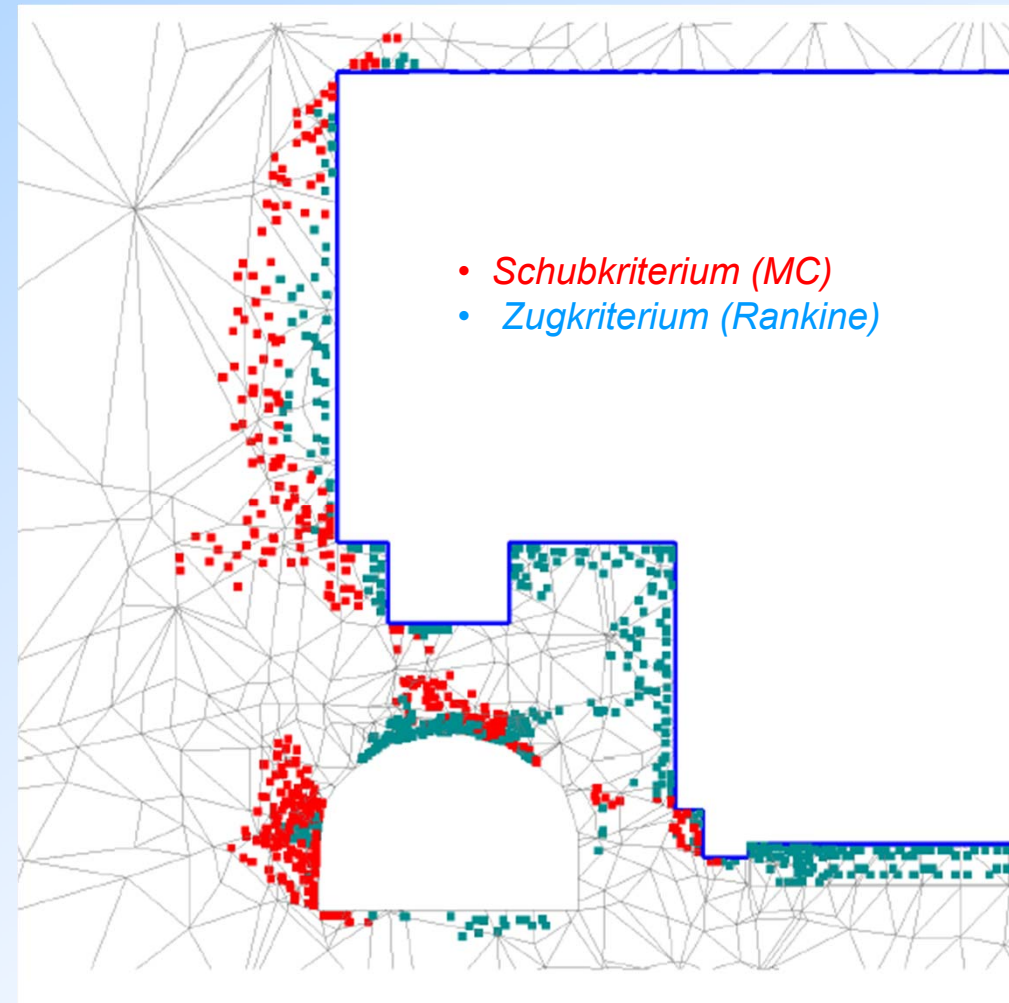
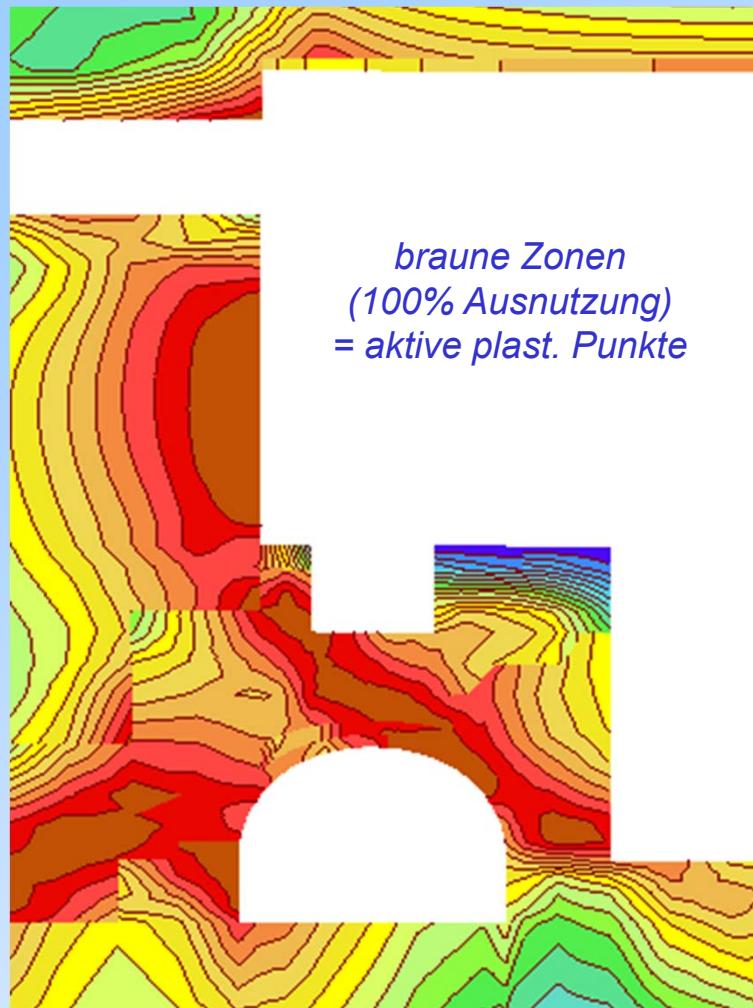


Ergebnisse für Antriebskaverne

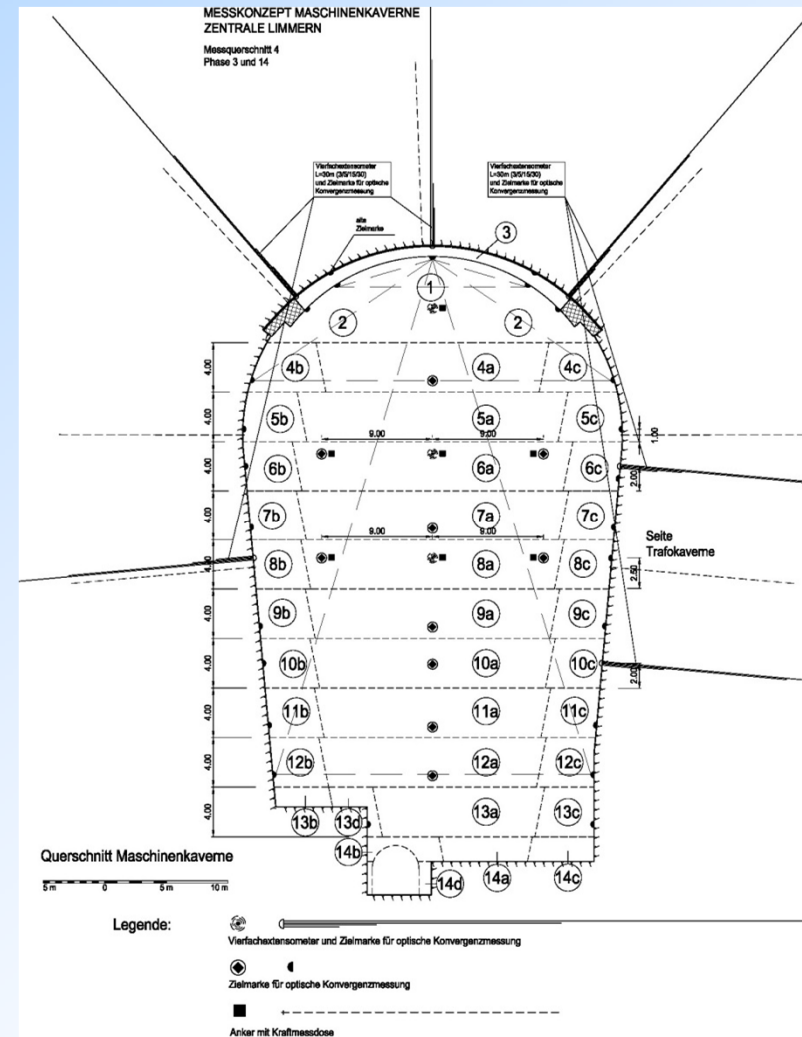
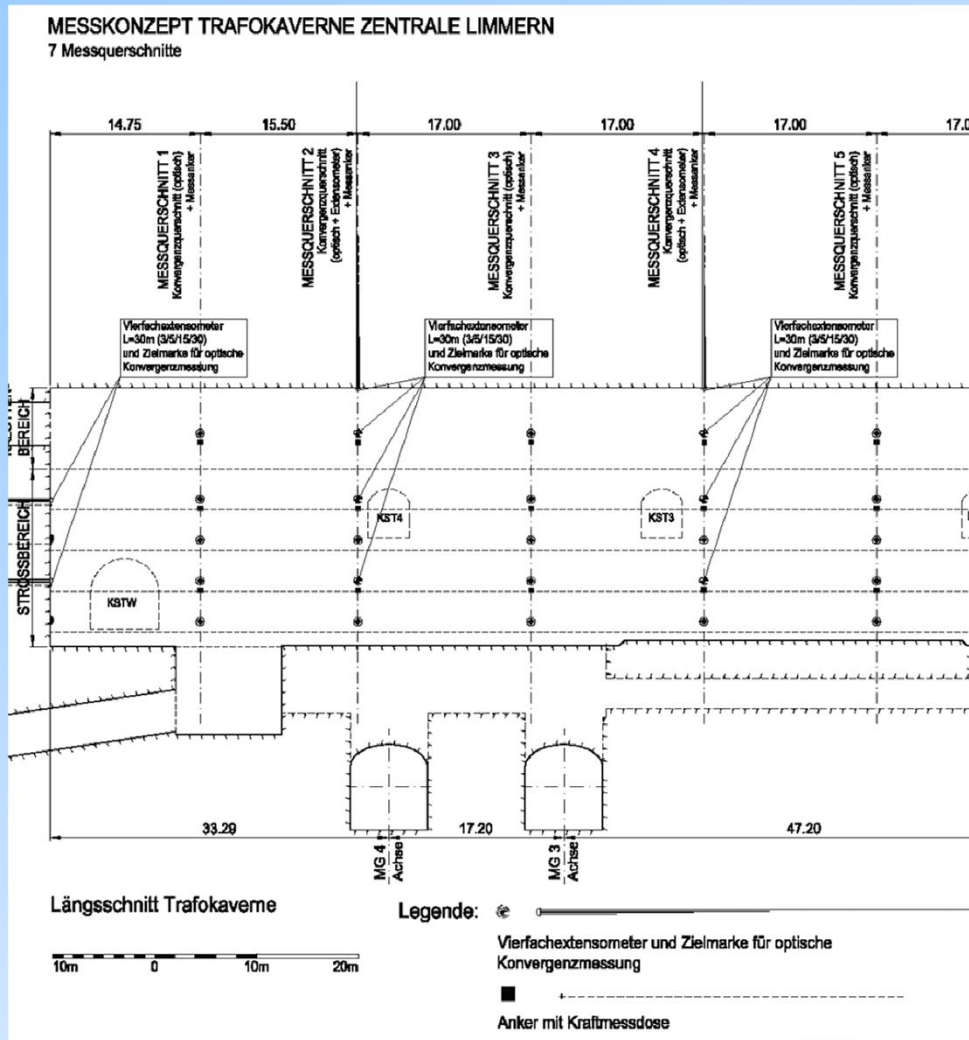
für Restfestigkeit, $K_0 = 0.7$



Vergleich mit lokalem 3D-Modell



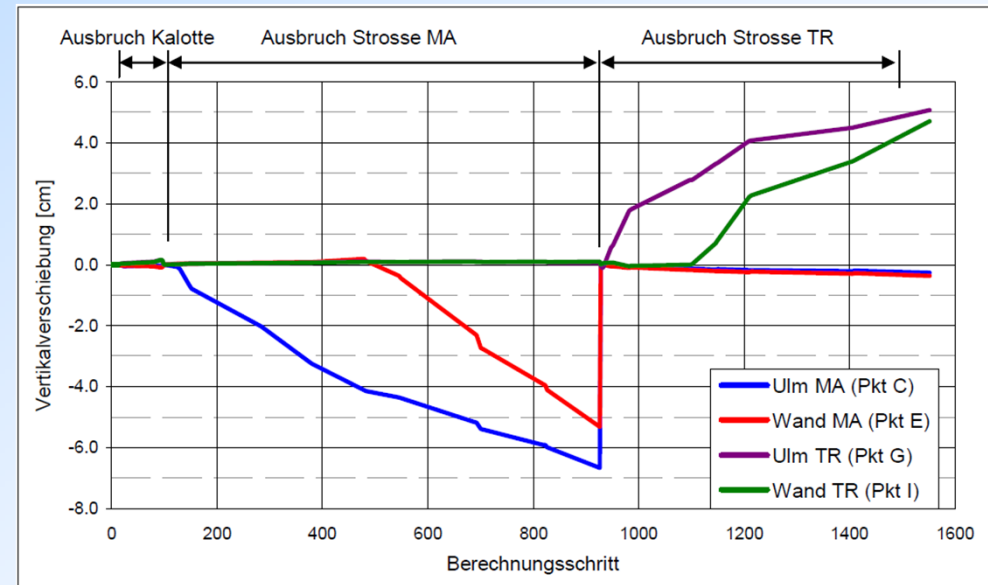
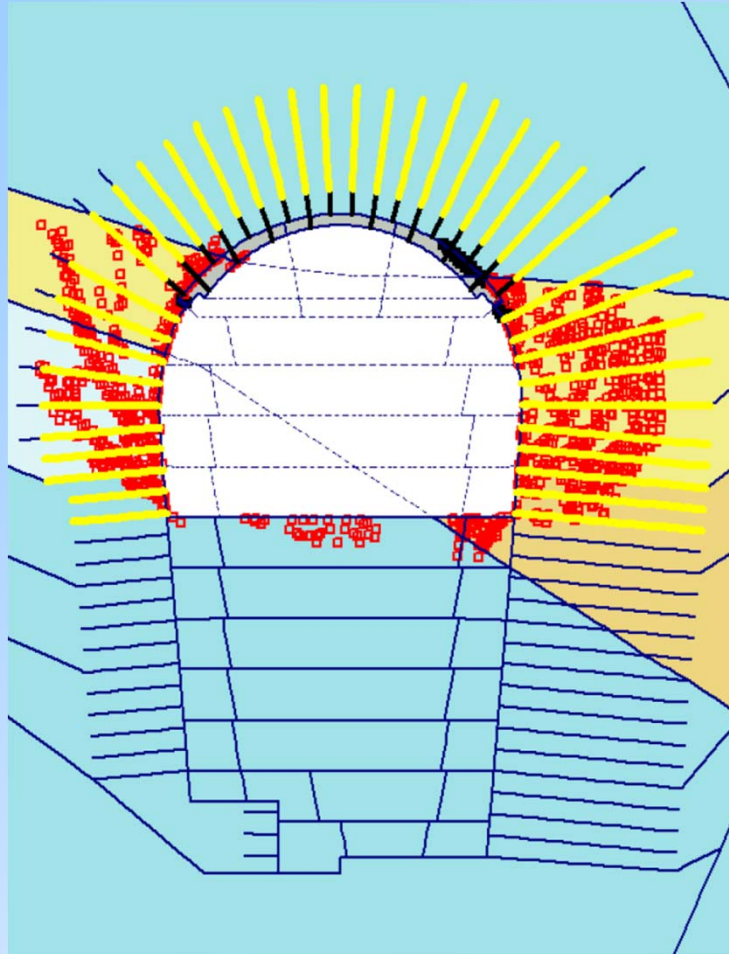
Messkonzept: optisch, 4-fach Extensometer, Messanker

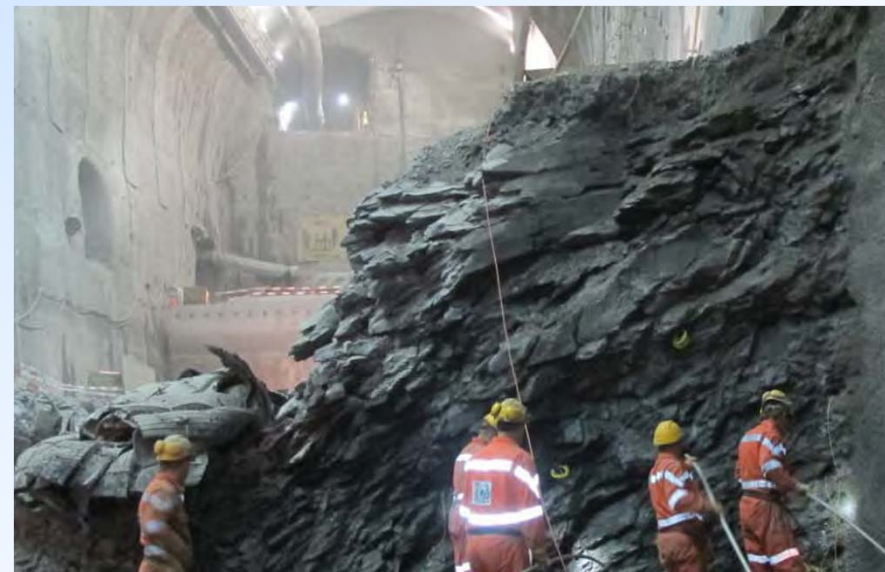
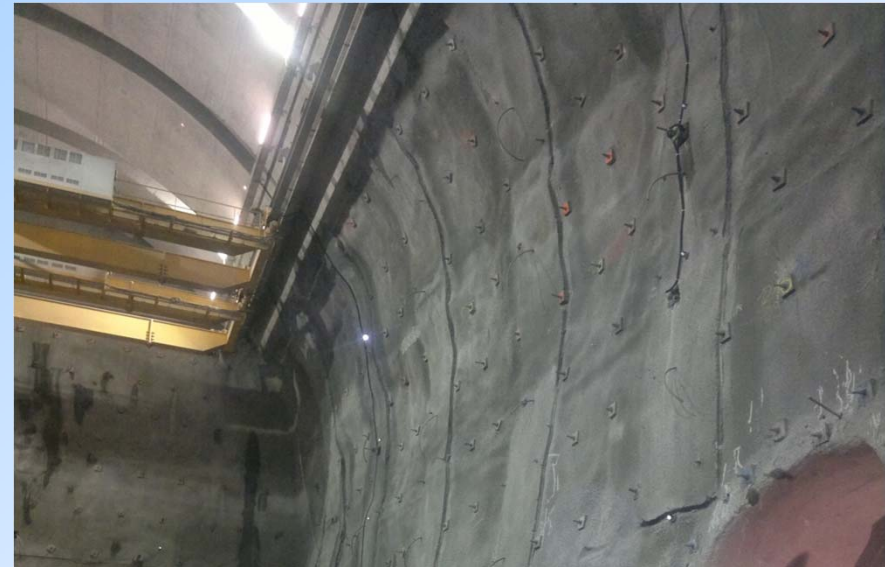
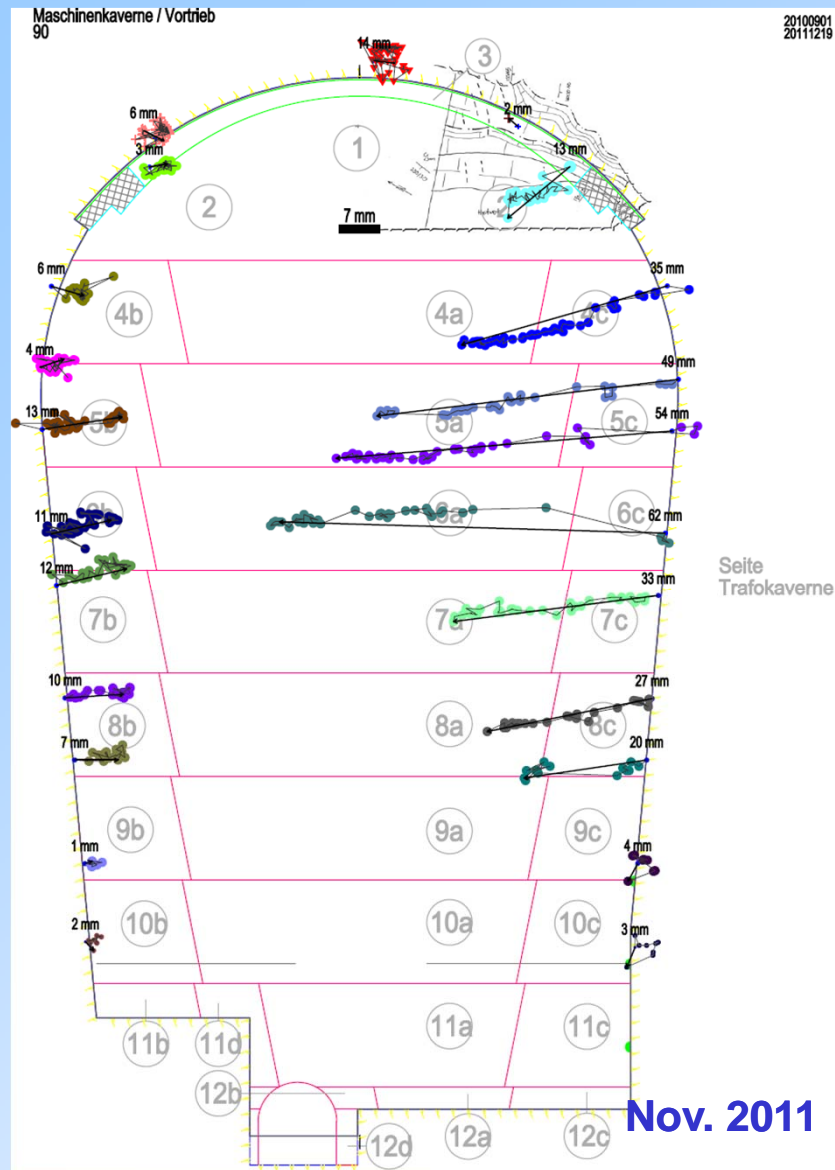


Deformationsprognose: (Maschinenkaverne)

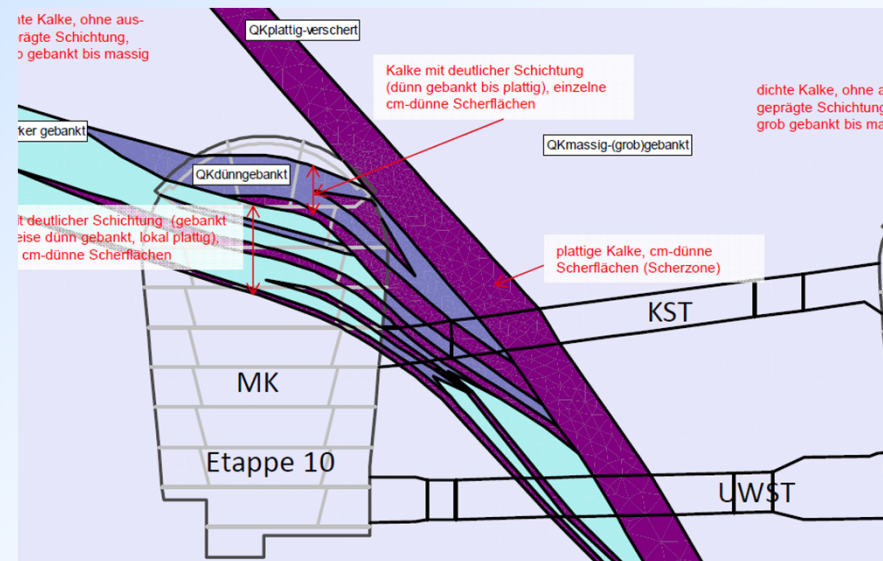
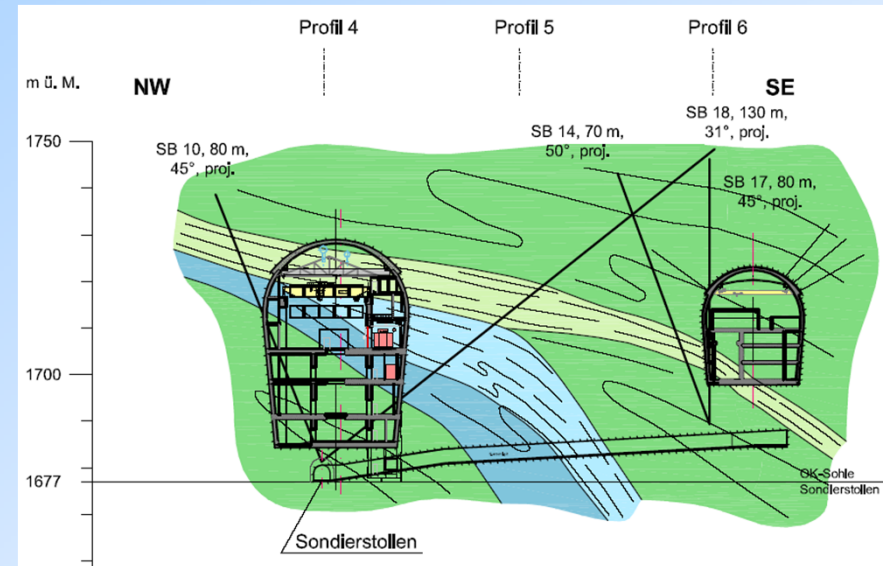
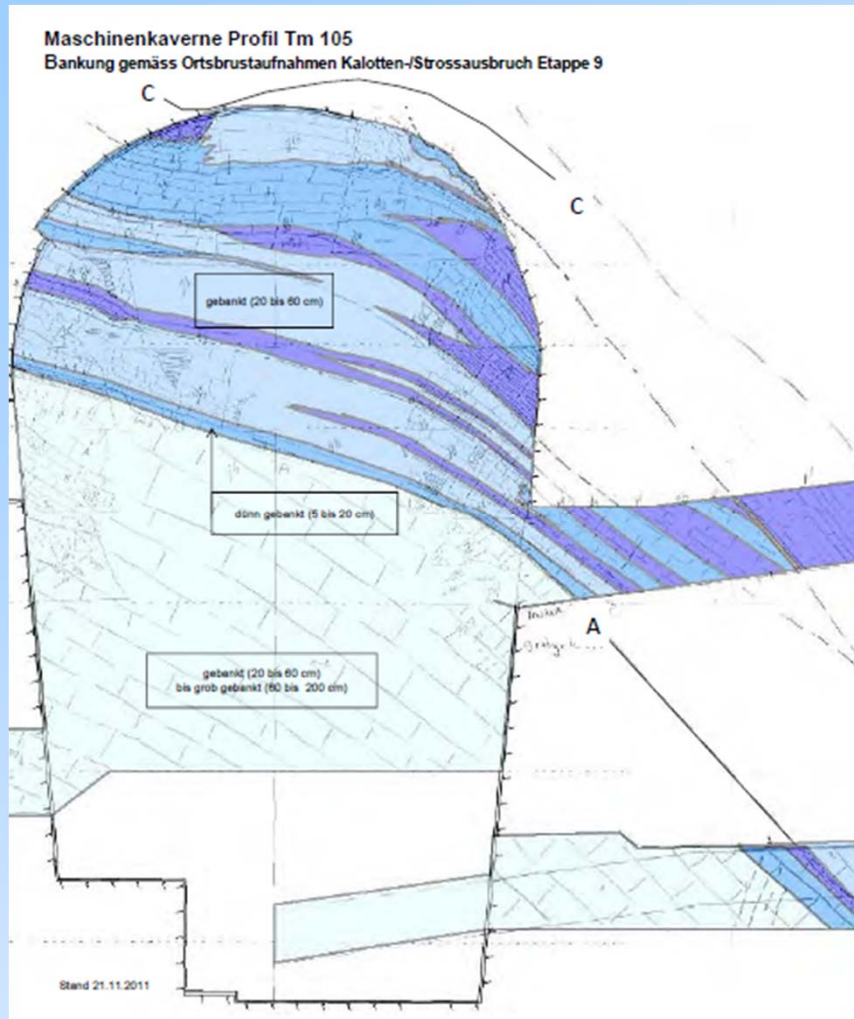
Alarmwerte: Stirnwand 4.0 cm
Ulme 6.0 cm

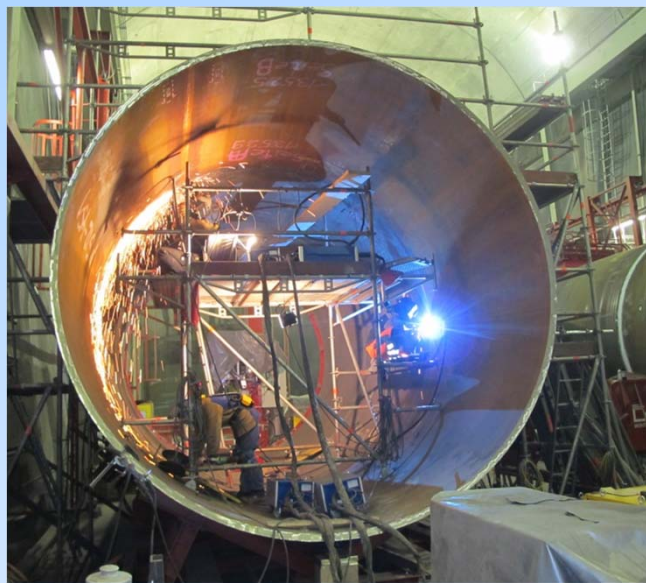
Warnwerte: 2/3 der Alarmwerte





Vergleich Baugrundmodell







Mit Dank und den besten Wünschen für die Fertigstellung und Inbetriebnahme an:



Glückauf !

