

Geomechanische Einflüsse auf die Größe eines HAW-Endlagers im Tongestein

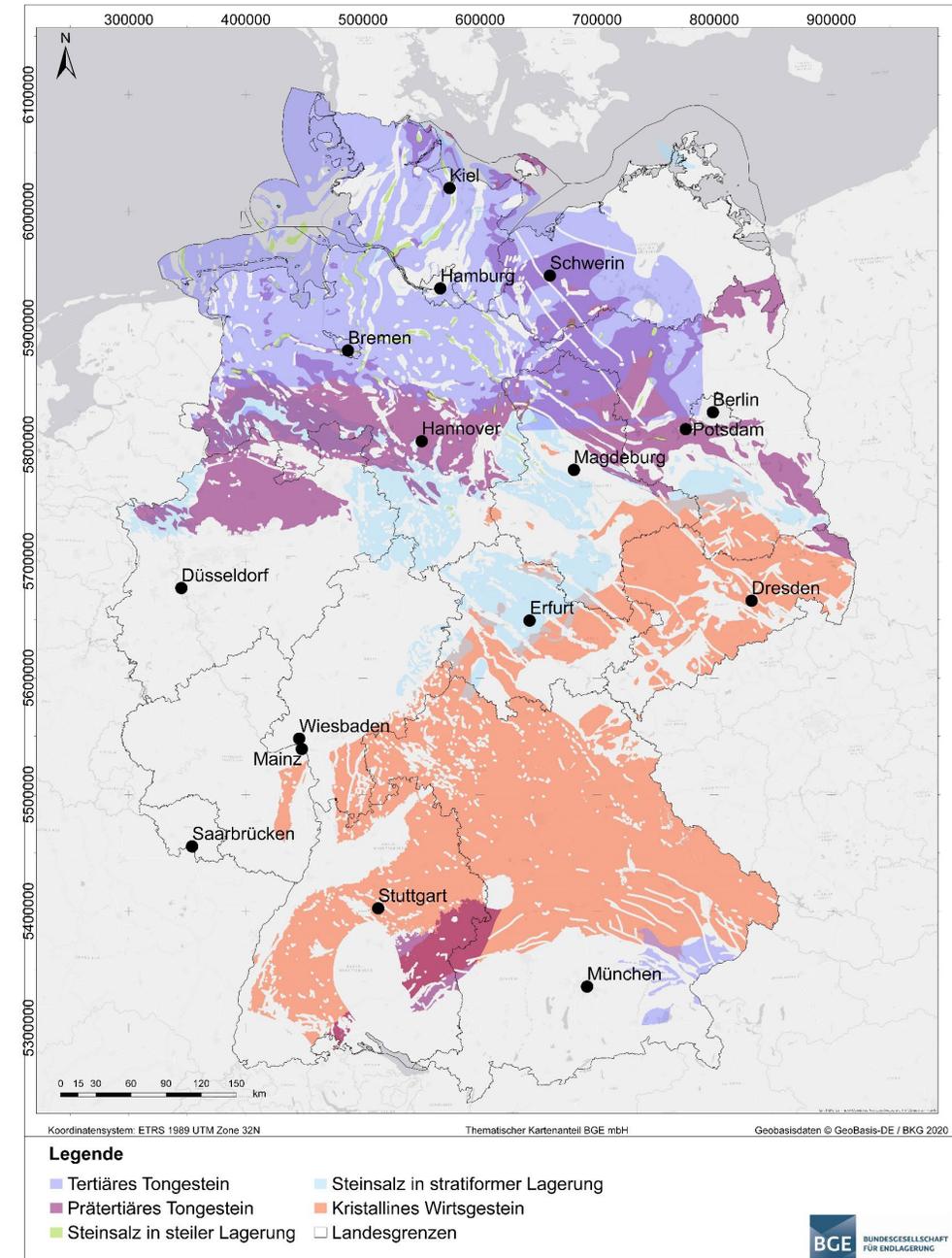
Forschungsprojekt AGEnT II

Projektübersicht

Forschungsprojekte AGEnT I & II

- Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tonstein
- Gemeinsames Forschungsprojekt von BGE Technology und DMT
- AGEnT I, der erste Teil des Projekts, lief von 2018 bis 2020
- AGEnT II baut auf den Erkenntnissen der ersten Projektphase auf

Teilgebiete gemäß § 13 Standortauswahlgesetz



Umfang der Arbeiten

Projektübersicht AGEnT I

Erarbeitung geeigneter Ausbaukonzepte für HAW Endlager im Tongestein unter Berücksichtigung von

- Gewährleistung der Betriebssicherheit während der Einlagerung
- Nachweis der Langzeitsicherheit
- Gewährleistung der Rückholbarkeit

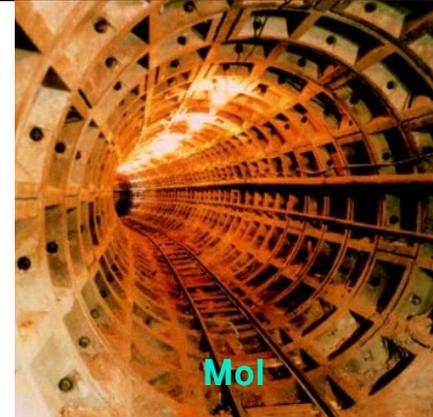
1. Ausbaukonzepte im Bergbau, Tunnelbau und Endlagerprojekten
2. Standortmodelle und Endlagerkonzepte im Tongestein
3. Anforderungen an ein Ausbausystem
4. Ausbaumaterialien für ein Endlager im Tongestein
5. Alterationsprozesse im Beton
6. Eigenschaften und Bewertung von mächtigen Tongesteinsformationen
7. Zusammenwirkung Gebirgsdruck, Gebirgsaufbau und Ausbau
8. Grundlegende technische Lösungen für den Ausbau von Grubenbauen für ein Endlager im Tongestein

Umfang der Arbeiten

Projektübersicht AGEnT I

Literaturrecherche zum internationalen Stand von Wissenschaft & Technik unterschiedlicher Ausbaukonzepte im Tunnel-, Berg- und Endlagerbau

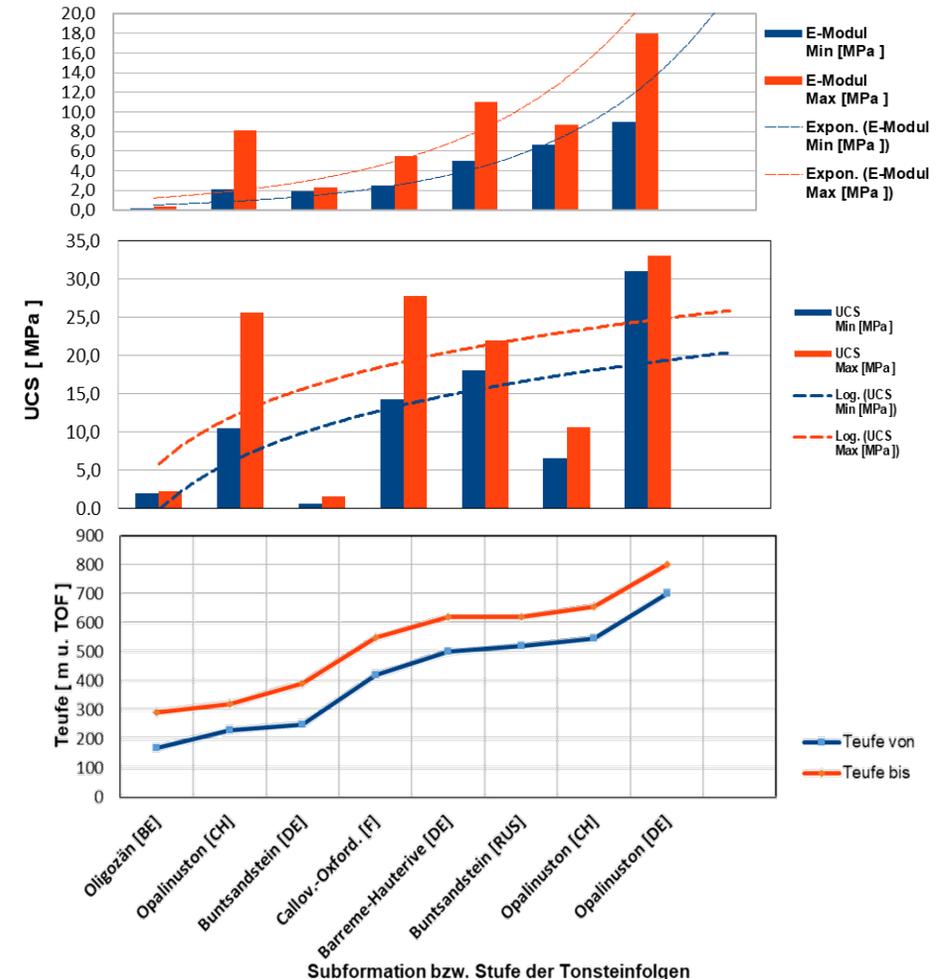
- Spritzbeton/Faserspritzbeton
- Spritzbeton und Anker
- Gusseisentübbinge
- Betontübbinge
- Mehrschaliger Ausbau mit nachgiebiger Außenschale
- Gleitbogenausbau mit Baustoffhinterfüllung



Eigenschaften von Tongesteinsformationen

Projektübersicht AGEnT I

- Untertage-Labor Mol (Belgien) – Oligozän [BE]
- Untertage-Labor Mont Terri (Schweiz) – Opalinuston [CH]
- Erkundungsbohrung Remlingen 15 für Schacht Asse 5 – Buntsandstein [DE]
- Untertage-Labor Bure (Frankreich) – Callov.-Oxford [F]
- Unterkreide Tongesteine vorwiegend im Bereich des Endlagerbergwerkes Konrad (Niedersachsen / Norddeutschland) – Barreme-Hauterive [DE]
- Service Schacht für ein Kalibergwerk (Russland) – Buntsandstein [RUS]
- Tiefbohrung Benken (Schweiz) – Opalinuston [CH]
- Tongesteine (Opalinuston) aus dem unteren Mitteljura (Dogger) in Süddeutschland – Opalinuston [DE]

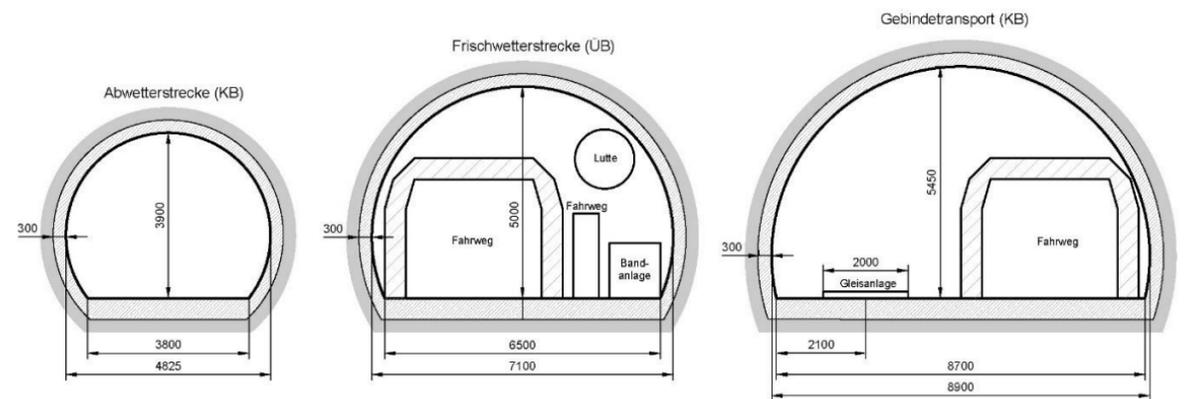
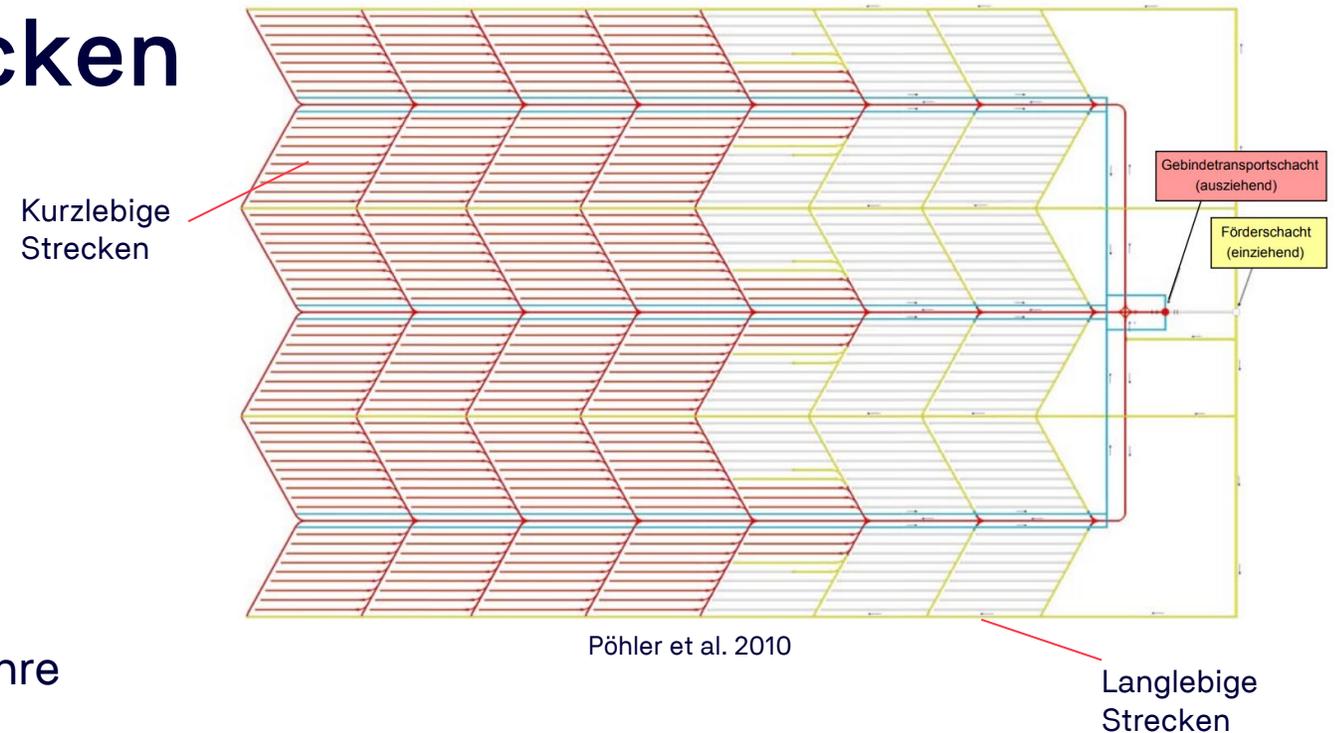


Anforderungen an Strecken

Betrachtete Szenarien

Im Wesentlichen zwei Streckentypen mit unterschiedlichen Anforderungen:

- Kurzlebige Strecken
 - Einlagerungsstrecken
 - Kleinerer Querschnitt
 - Nutzungsdauer von Monaten bis wenige Jahre
- Langlebige Strecken
 - Gebindettransport, Bewetterung
 - Größerer Querschnitt
 - Nutzungsdauer von Jahren bis Jahrzehnte



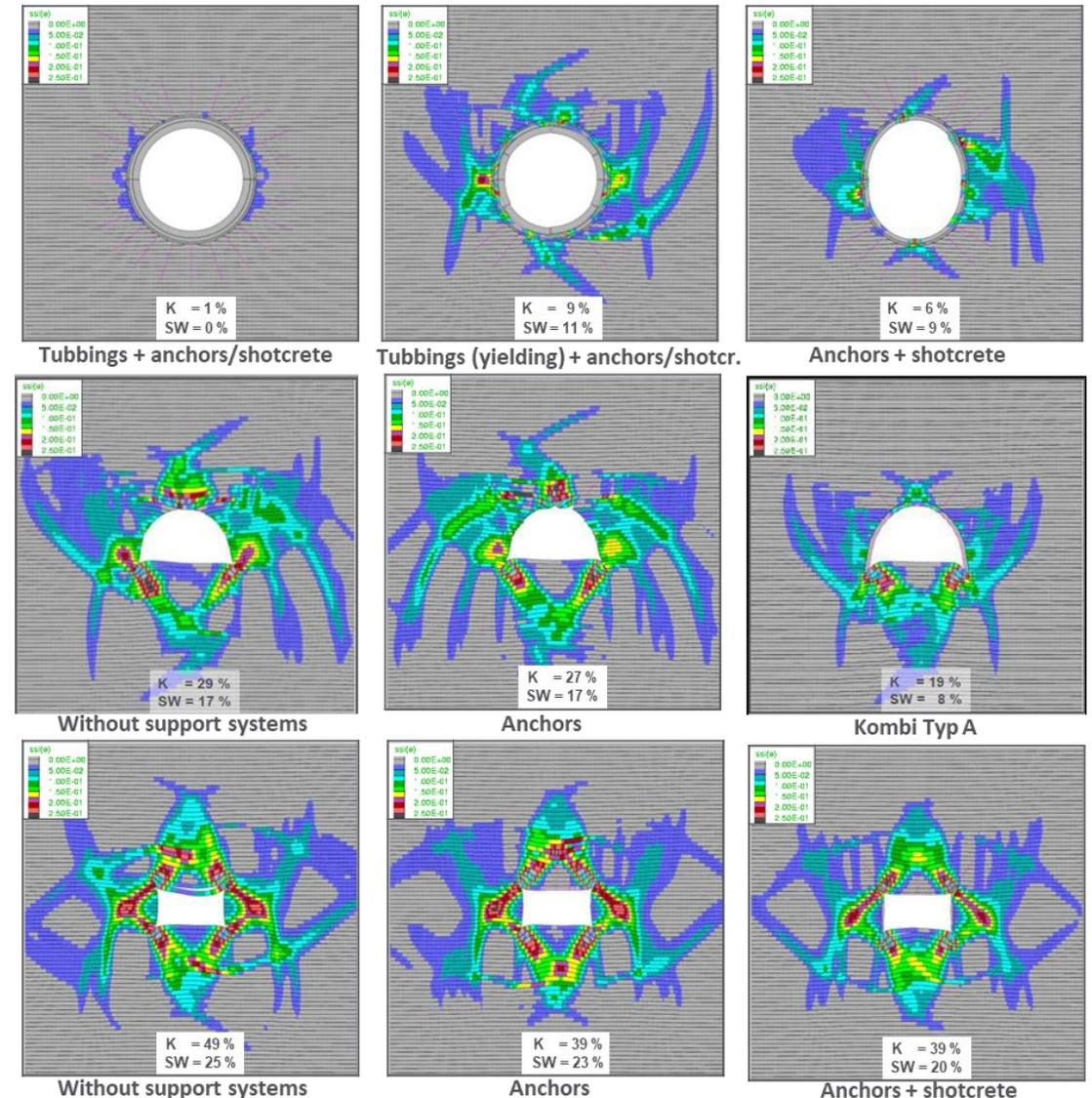
Herold et al. 2018

Variationsrechnungen

Betrachtete Szenarien

- Streckenprofile
 - Rechteckprofil
 - Bogenprofil
 - Kreisprofil bzw. Ovales Profil
- Ausbausystem
 - Typ
 - Eigenschaften
- Randbedingungen
 - Teufe
 - Gebirgsfestigkeit
 - Schichtung/Bankung

Ziel der Variationen: Identifizierung einer Vorzugsvariante

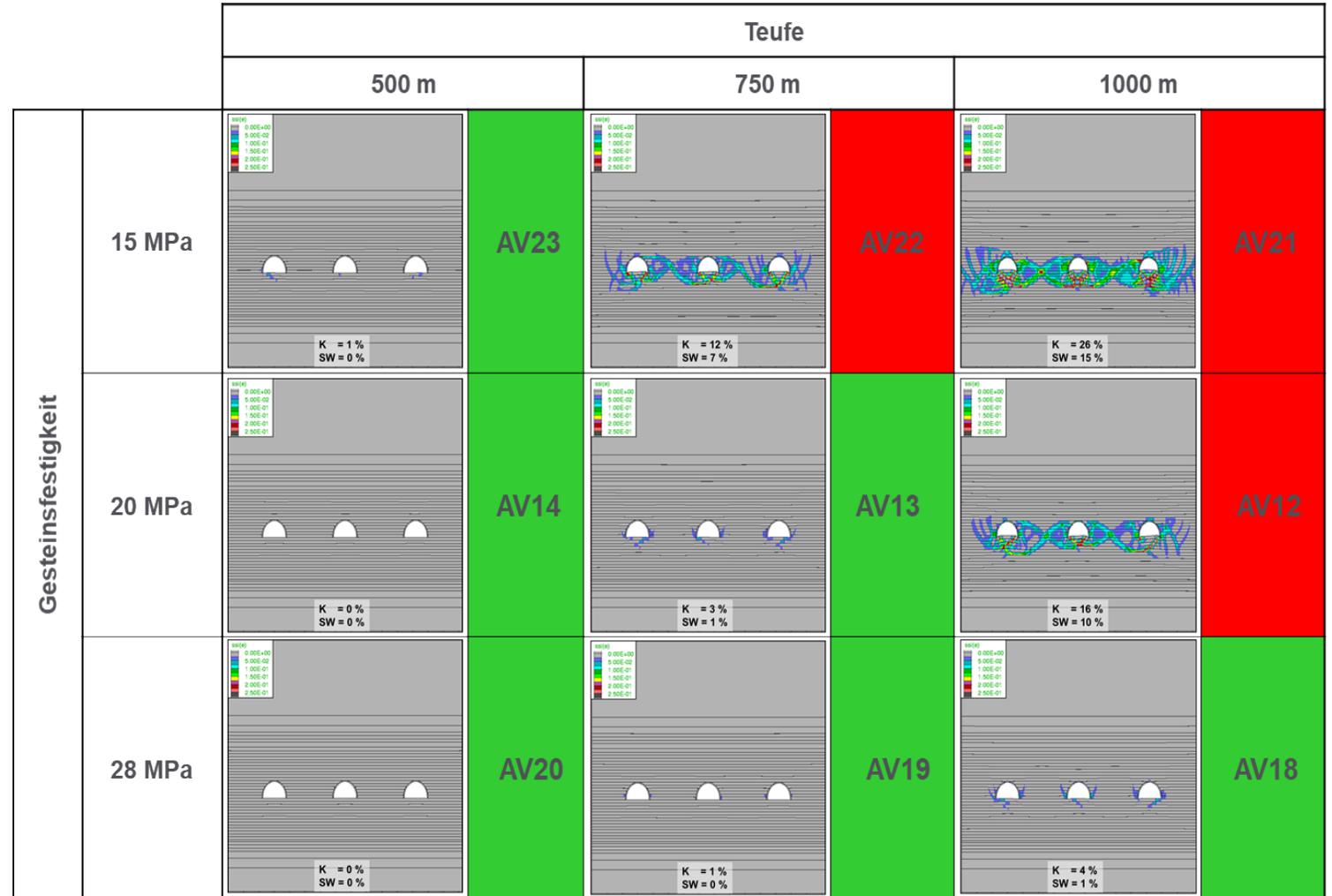


Geomechanische Einflüsse

Kurzlebige Strecken

- Variation der Teufe und der Gesteinsfestigkeit bei gleichem Streckenprofil und gleichem Ausbau
- Bogenstrecke 7,5 m x 5,1 m
- 90 cm Bankung des Gebirges
- 30 cm Betonausbau mit 20 MPa Druckfestigkeit
- Pfeilerbreite = 2 x Streckenbreite (minimale thermische Anforderung)

→ **Vollständige Plastifizierung der Pfeiler für drei Kombinationen**



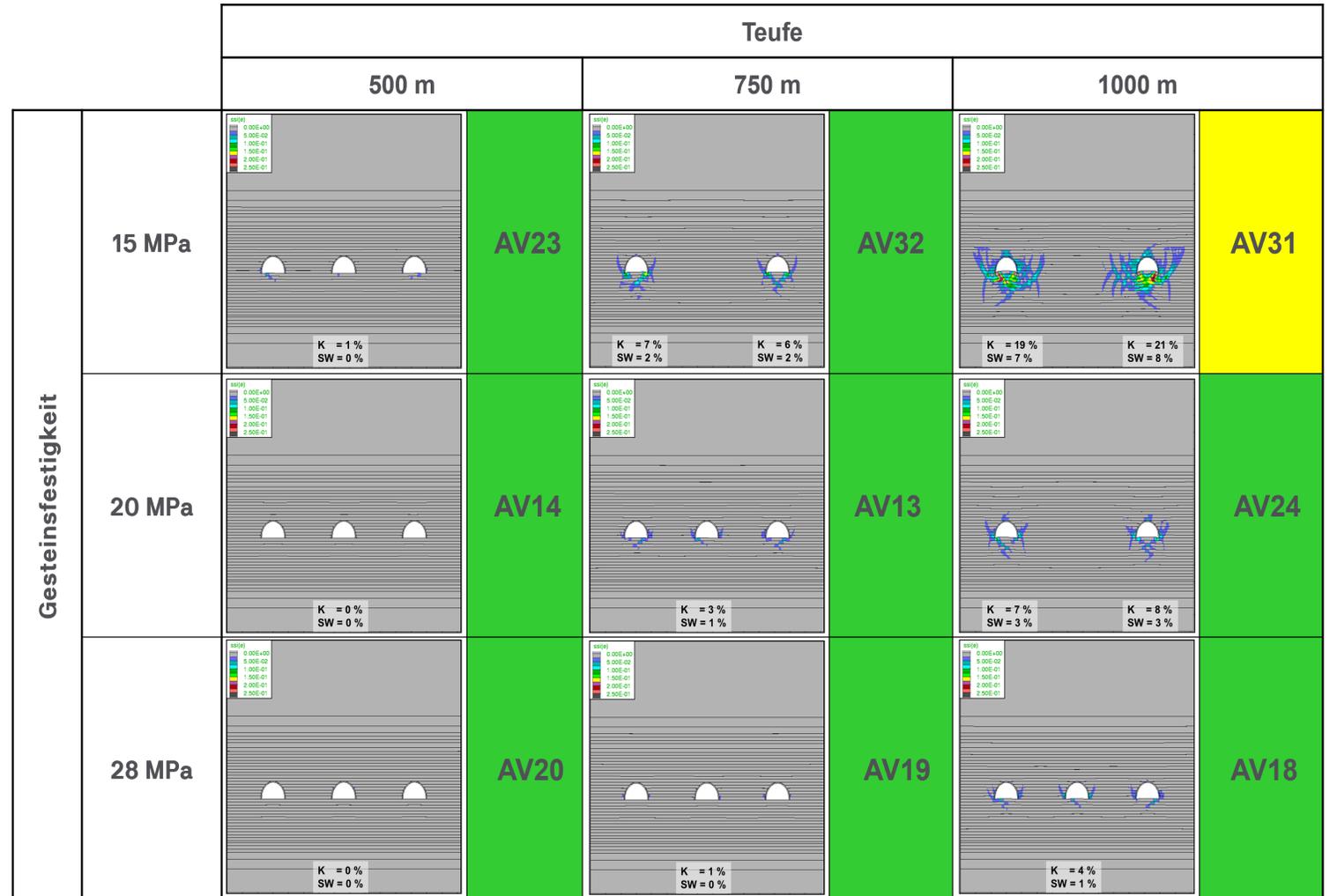
Geomechanische Einflüsse

Kurzlebige Strecken

- Anpassung der nicht standsicheren Kombinationen
- Testrechnung mit erhöhter Pfeilerbreite (5 x Streckenbreite)

→ Standsicherheit der Pfeiler wird durch Erhöhung der Pfeilerbreite erreicht

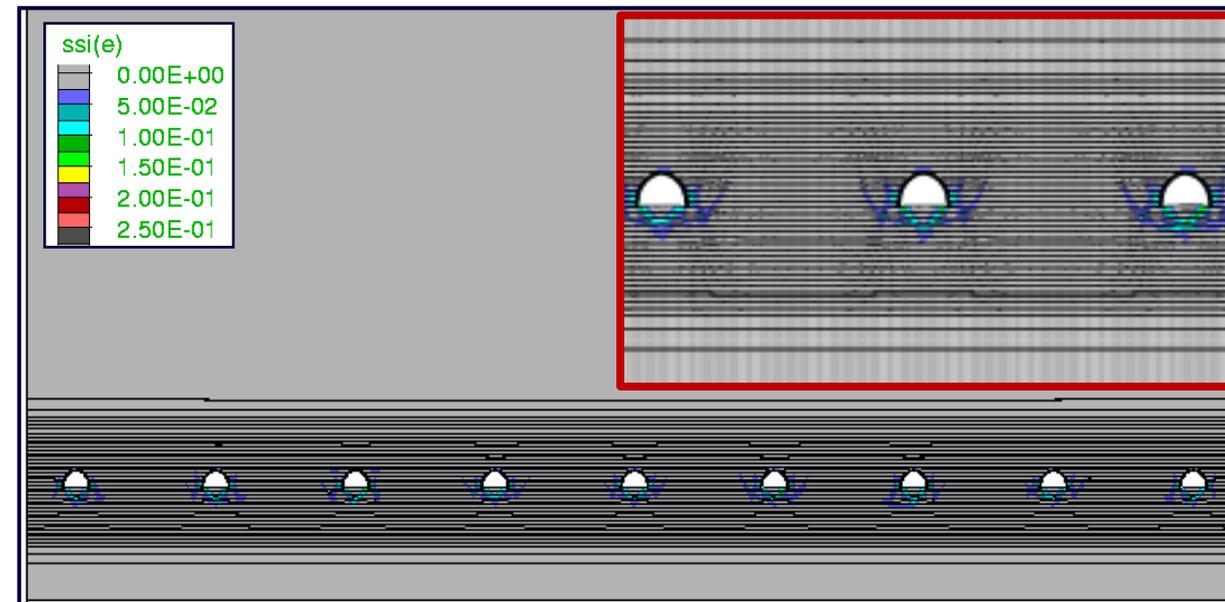
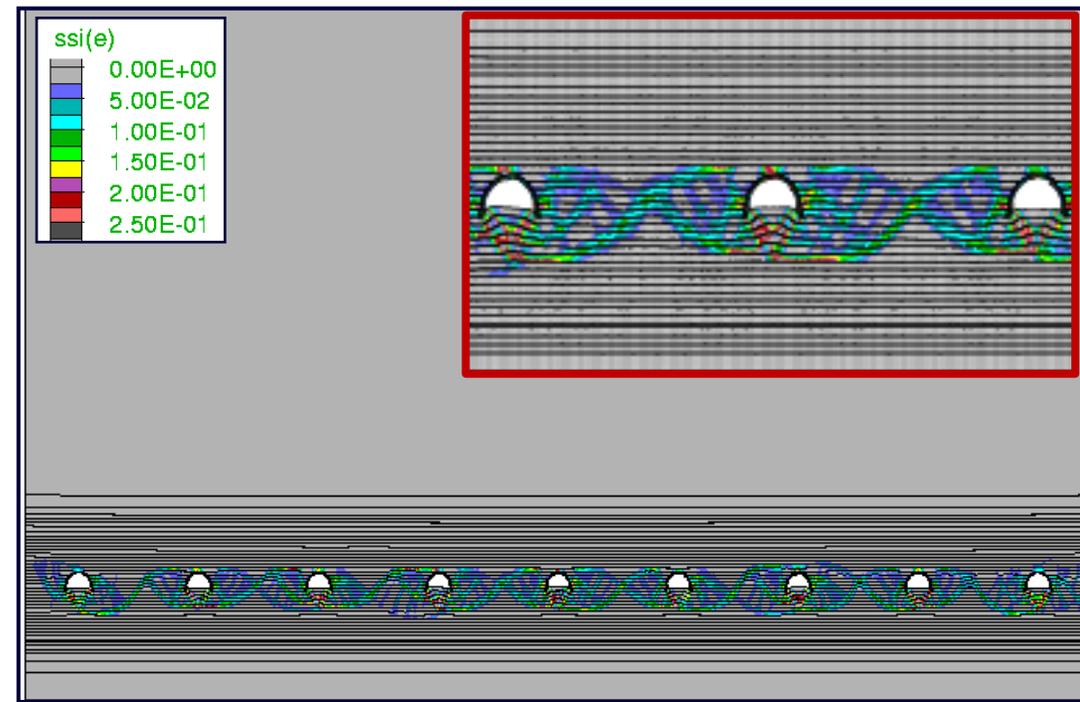
→ Starke Beanspruchung des Ausbaus für 1000 m Teufe und 15 MPa Gesteinsfestigkeit



Geomechanische Einflüsse

Kurzlebige Strecken

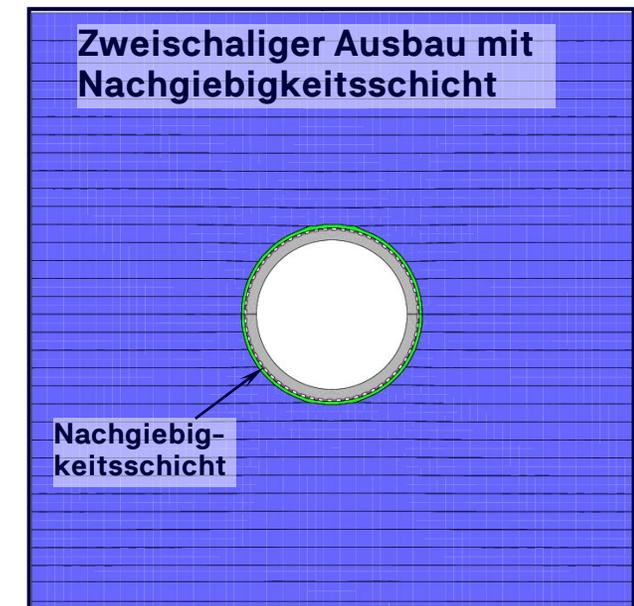
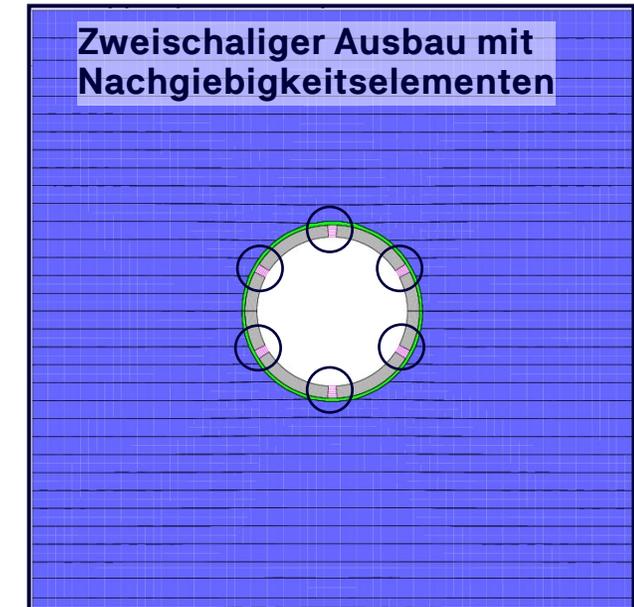
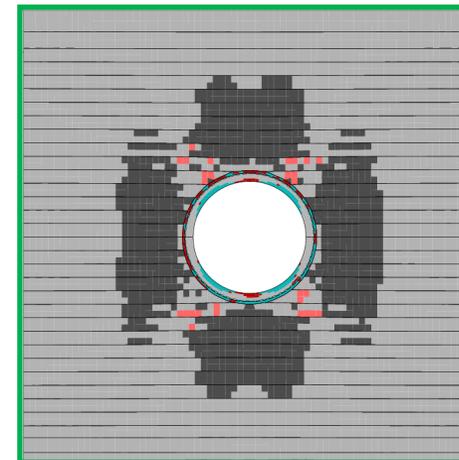
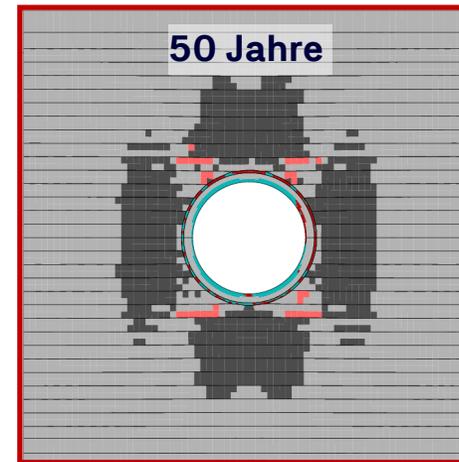
- Modell mit 20 MPa Festigkeit, 90 cm Bankung in 1000 m Teufe
- Optimierung der Pfeilerbreite von 5 auf 3 x Streckendurchmesser für drei geöffnete Kammern
- Untersuchung der Anzahl gleichzeitig geöffneter Einlagerungsstrecken
- 9 gleichzeitig geöffnete Strecken im Endlagerkonzept vorgesehen
- Pfeilerbreite = 3 x Streckenbreite nicht standsicher
- Pfeilerbreite = 4 x Streckenbreite standsicher



Geomechanische Einflüsse

Langlebige Strecken

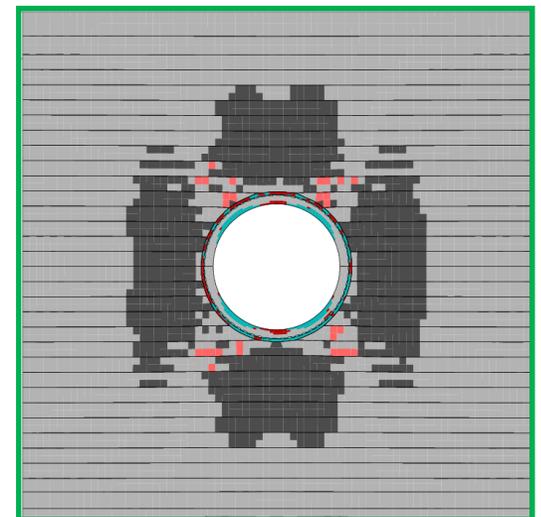
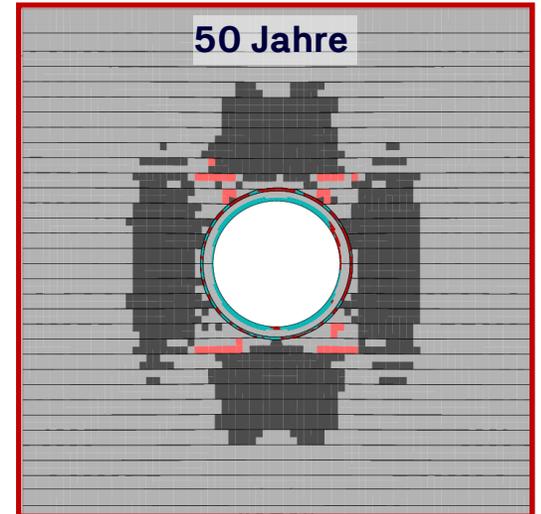
- Rundes Streckenprofil
- Modell mit 20 MPa Festigkeit, 90 cm Bankung in 1000 m Teufe
- Berücksichtigung von Quelldruck (2 MPa) und Kriechdeformation
- Drei Ausbauvarianten
 - Starre Betonschale
 - Zweischaliger Ausbau
 - Starrer Ausbau mit nachgiebiger Hinterfüllung/Stauchelementen



Berechnungsergebnisse

Langlebige Strecken

- Bei einer starren Betonschale wird der Ausbau unter Berücksichtigung von Quelldruck und Kriechen zu stark beansprucht
- Durch eine nachgiebige Hinterfüllung wird der Ausbau unter gleichen Bedingungen nicht zu stark beansprucht
- Die Berechnungsergebnisse mit Stauchelementen waren nicht zufriedenstellend und müssen weiter entwickelt werden
- Je nach Kriecheigenschaften des Gesteins sind mitunter hohe Betonfestigkeiten erforderlich
- Für langlebige Strecken wurde ein Ausbau mit nachgiebig hinterfüllter Betonschale als Vorzugsvariante identifiziert



Weiterführung der Entwicklung

Forschungsprojekt AGenT II

Weiterentwicklung des Ausbaukonzepts für langlebige Strecken:

- Festlegung von Randbedingungen
 - Spannungszustände
 - Gebirgsparametersätze
 - Stoffmodelle für die numerische Modellierung
- Planung und Modellierung einer Tübbingschale
- Bemessung nach EC2
- Entwicklung und Dimensionierung von Streckenkreuzen mit Tübbingausbau
- Gesamtbetrachtung
 - Hydromechanisch gekoppelte Berechnungen über die Betriebsdauer
 - Dreidimensionale Standsicherheitsbetrachtung des Gesamtsystems

Randbedingungen

Forschungsprojekt AGEnT II

- Runde Strecke mit 8 m lichtem Durchmesser
- Festlegung auf geomechanische Eigenschaften von Opalinuston
- Seitendruckbeiwert von 0,84
- Söhlig liegende Schichtung
- Kalibrations-/Testrechnungen mit unterschiedlichen Stoffgesetzen:
 - Unterschiedliche Ansätze zur Gebirgsentfestigung
 - Einfluss der Anisotropie des E-Moduls

Parameters für Tongestein		Einheit	AGEnT - II (TEC-DMT Einigte Werte in Rot)		
			<i>gering</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>
	Umgerechnete Festigkeit	MPa	11,43	18,42	26,15
			(AGENT-1 und interne Überlegung)	(ISRM 2023 : Cantieni et al. (2023), Table 1 (nach Anthi et al. 2022))	(NAGRA Bericht NAB 14-81 (Tab 3.1-1, Tab 3.2-2))
Anisotroph	Gesteinsdichte (natürlicher Wassergehalt/getrocknet)	kg/m ³	2450	2450	2450
	E-Modul senkrecht zur Anisotropieebene Eop	MPa	4000	4500	9000
	E-Modul in der Anisotropieebene Epp	MPa	8000	13600	18000
	Querdehnzahl normal vop	-	0,25	0,25	0,25
	Querdehnzahl normal vpp	-	0,3	0,3	0,3
	Seitendruckbeiwert (gering/mittel/hoch), 700-800 m	-		0,84/1,09	
Matrix	Kohäsion	MPa	4	5	7,1
	Restkohäsion	MPa	1	1	2,6
	Reibungswinkel	°	20	33	33
	Restreibungswinkel	°	16	27,5	27,5
	Zugfestigkeit	MPa	0,5	1	2
	Restzugfestigkeit	MPa	0	0	0
Schichtung	Dilatanzwinkel	°	10	10	10
	Restdilatanzwinkel	°	4	4	4
	Kohäsion	MPa	2	3	3,9
	Restkohäsion	MPa	0,5	1	1,3
	Reibungswinkel	°	18	29	29
	Restreibungswinkel	°	15	21,5	21,5
	Zugfestigkeit	MPa	0,25	0,5	1
Restzugfestigkeit	MPa	0	0	0	
Dilatanzwinkel	°	5	5	5	
Restdilatanzwinkel	°	2	2	2	
	Bruchdehnung	-	0,01	0,01	0,01

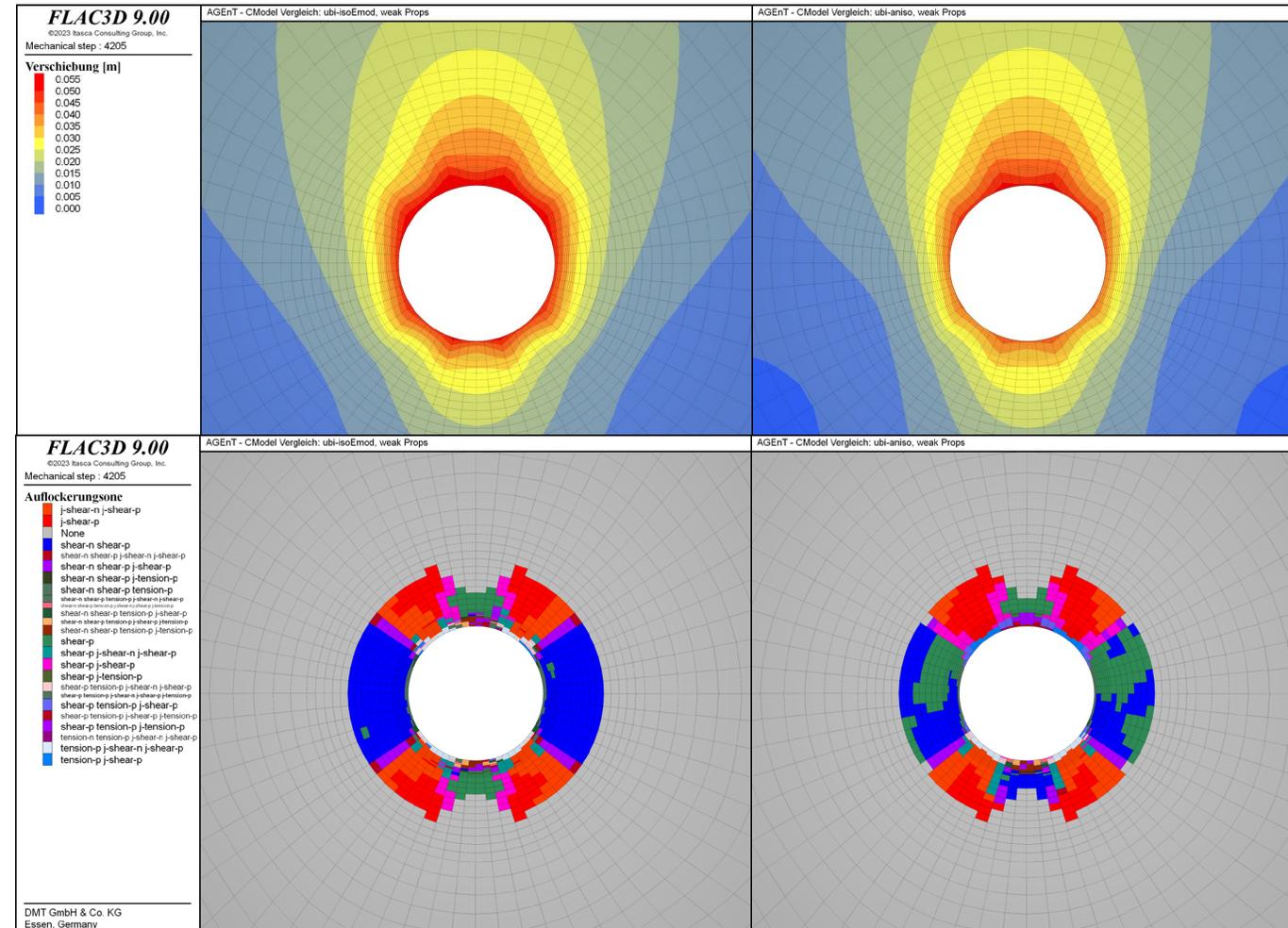
Kalibration

Forschungsprojekt AGEnT II

- Nur geringer Einfluss der Anisotropie des E-Moduls
- Weitere Verwendung eines Stoffgesetzes mit isotropem E-Modul, anisotroper Festigkeit
- FLAC3D Stoffgesetz *Strain Hardening/Softening Ubiquitous Joints*
 - Entfestigung bei Plastifizierung bereits implementiert
 - Berücksichtigung der Schichtung
 - Bereits erprobt aus Modellierungen im Endlagerbereich (Nagra, Schacht Konrad)

UBI – E-Modul isotrop

UBI – E-Modul anisotrop

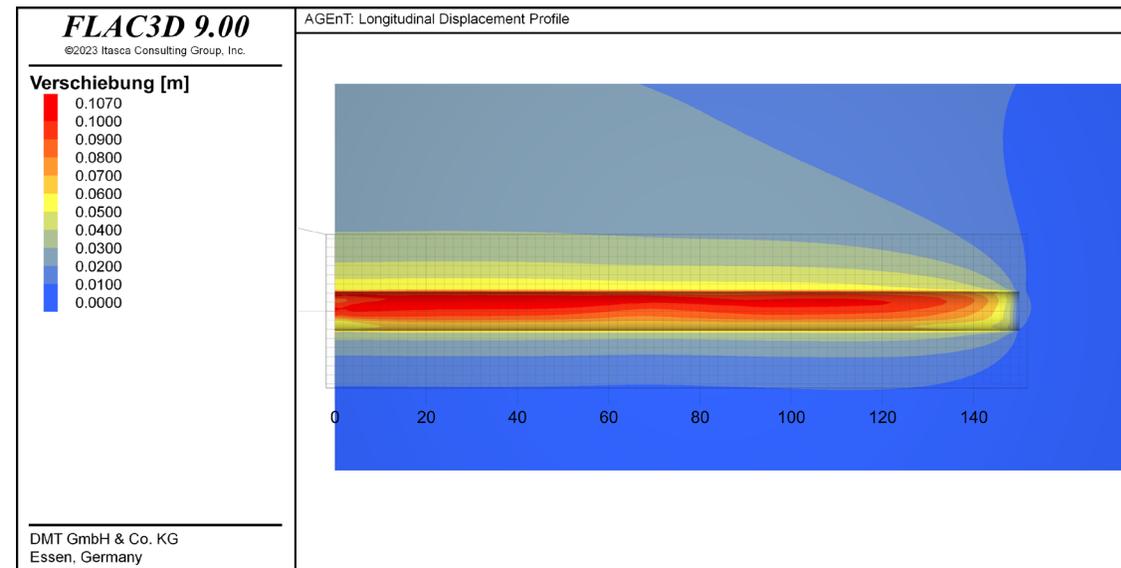
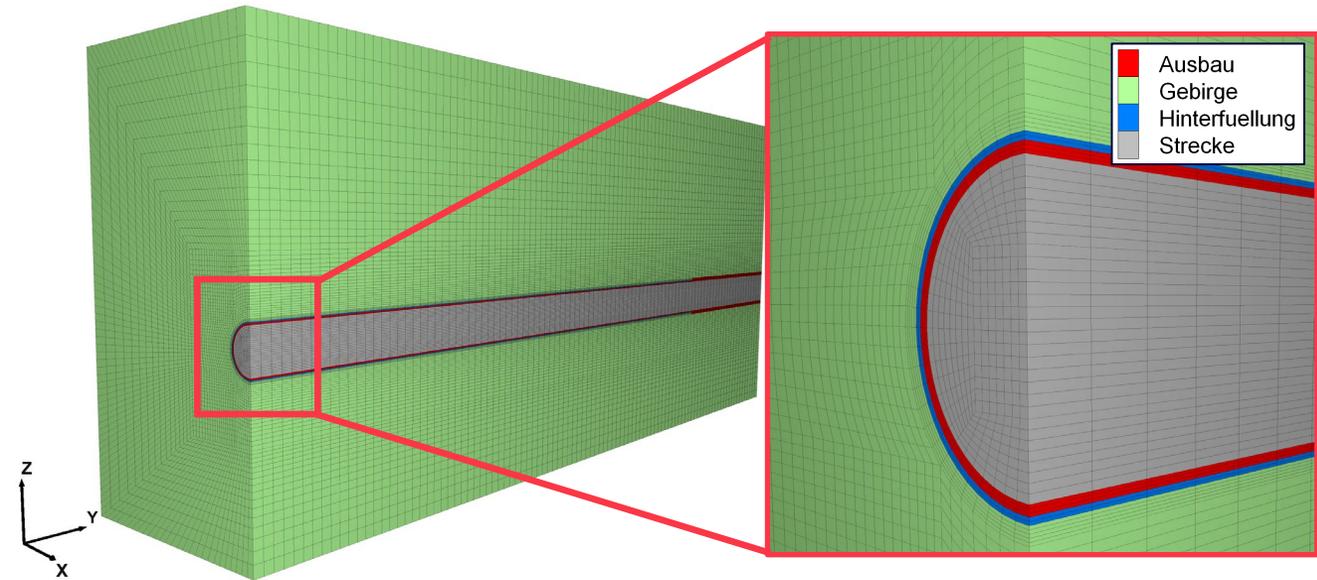


3D Modellierungen

Forschungsprojekt AGEnT II

Vorplanung des Ausbaus

- 3D Streckenmodell ohne Ausbau
 - Abschlagsweise Auffahrung
 - Auswertung der Gebirgsdeformation entlang der Strecke (Longitudinal Displacement Profile)
- Bestimmung des Abstands zur Ortsbrust, ab dem die Konvergenzen abgeklungen sind

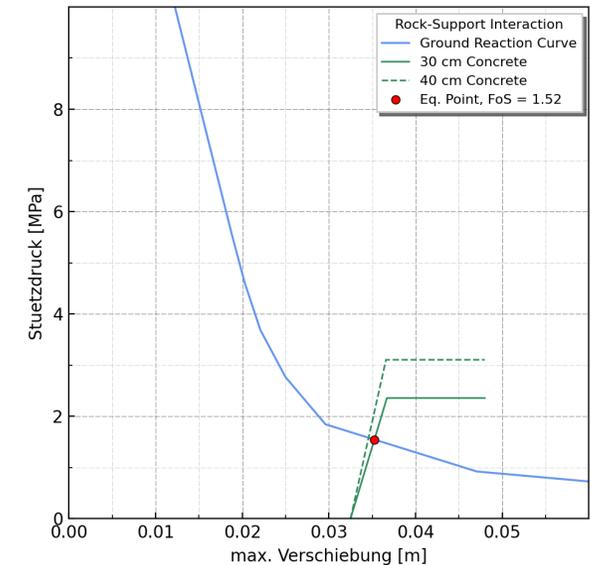
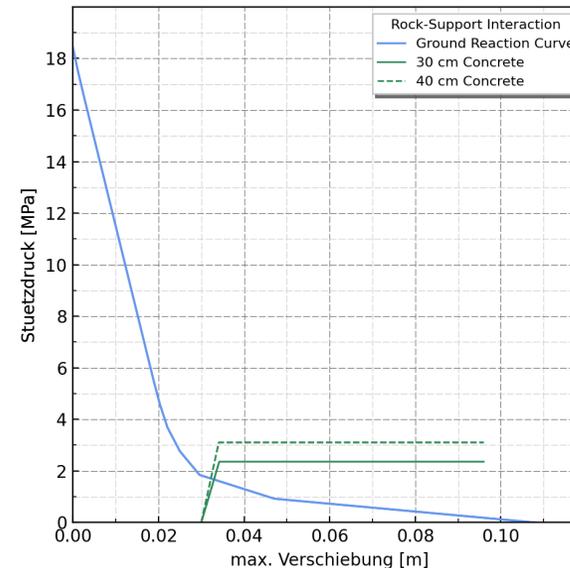
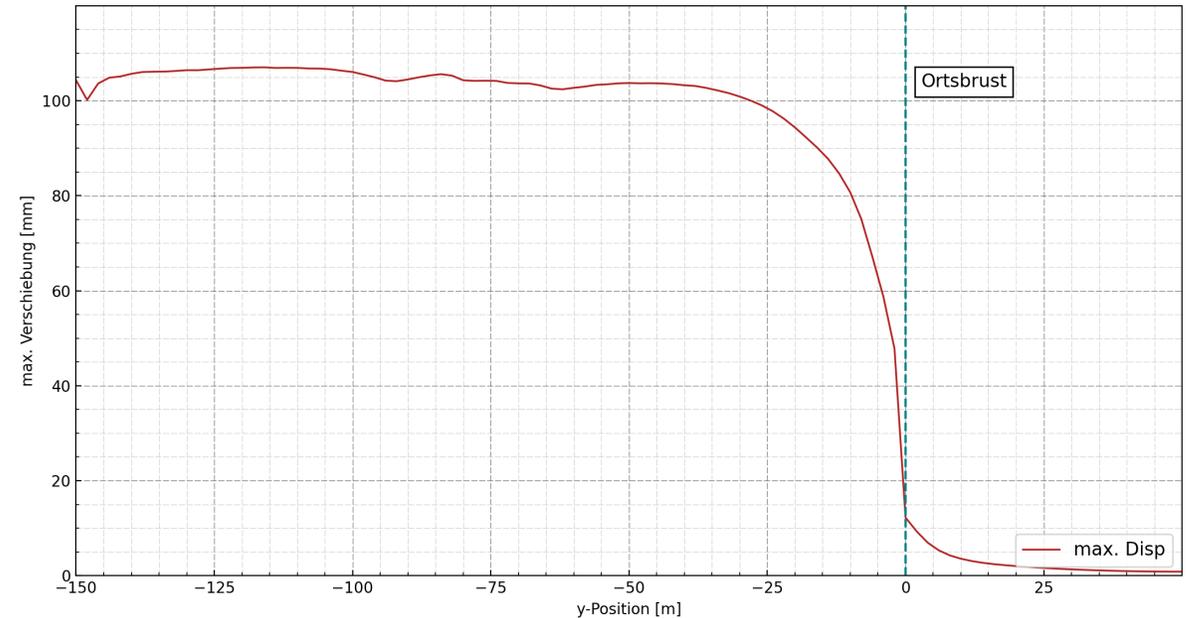


3D Modellierungen

Forschungsprojekt AGenT II

Vorplanung des Ausbaus

- 3D Streckenmodell ohne Ausbau
 - Abschlagsweise Auffahrung
 - Auswertung der Gebirgsdeformation entlang der Strecke (Longitudinal Displacement Profile)
- Bestimmung des Abstands zur Ortsbrust, ab dem die Konvergenzen abgeklungen sind
- Berechnung einer Lastreduktionskurve
 - Berechnung des Ausbauwiderstands
- Bestimmung der Vorentspannung des Gebirges
- Vorabschätzung des Sicherheitsfaktors

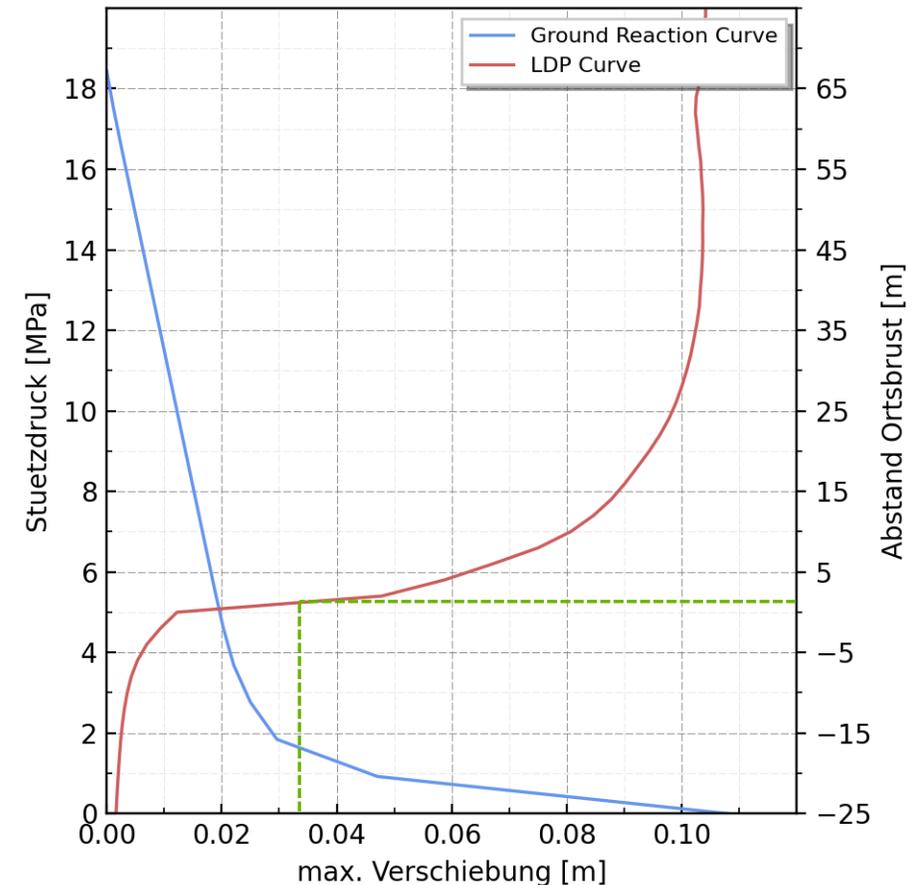


3D Modellierungen

Forschungsprojekt AGenT II

Vorplanung des Ausbaus

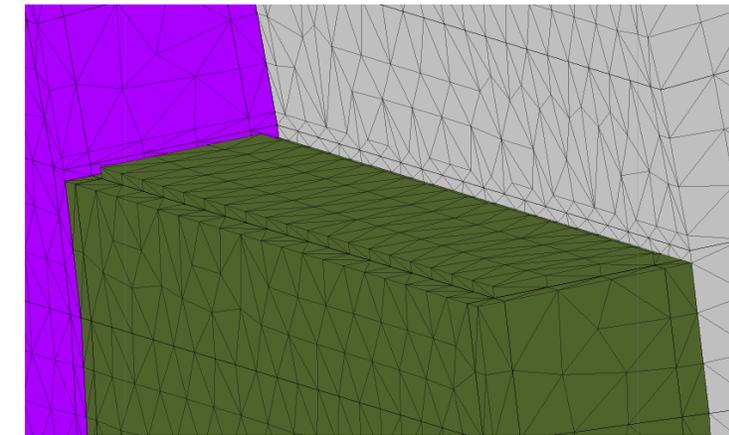
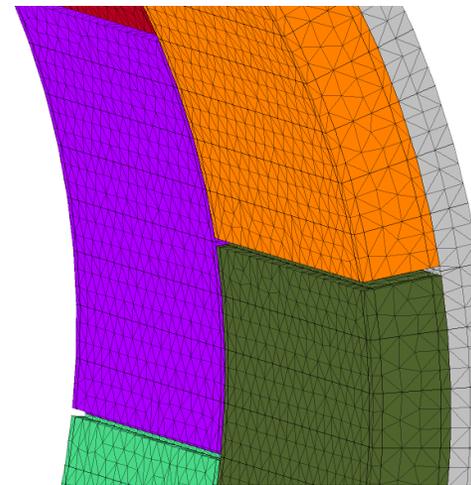
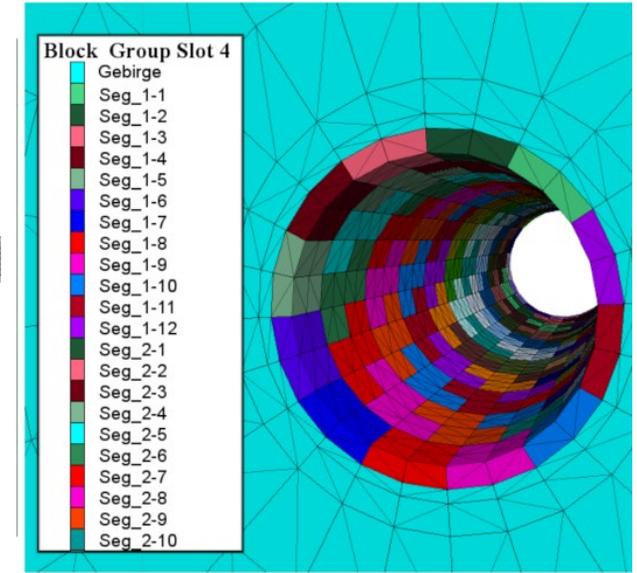
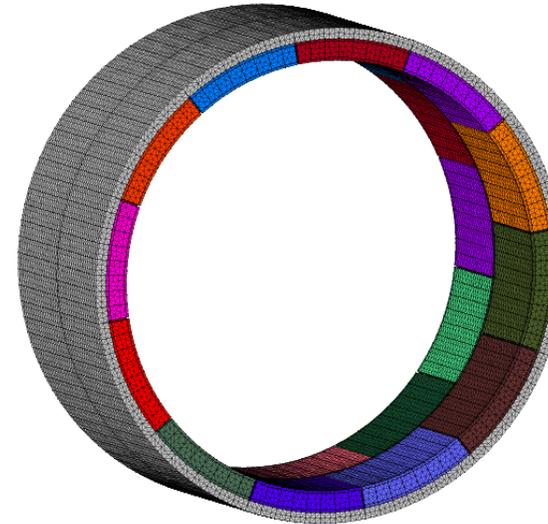
- Um einen Sicherheitsfaktor $> 1,5$ zu erreichen, müsste eine 30 cm Betonschale bei einer Konturverschiebung von 32,5 mm eingebaut werden
- Diese Verschiebung wird ca. 1,5 m hinter der Ortsbrust erreicht



Weiteres Vorgehen

Forschungsprojekt AGEnT II

- Simulation des Streckenvortriebs mit Einbau einer 30 cm Tübbingschale (Berechnungen laufen aktuell)
- Simulation des Langzeitverhaltens unter Berücksichtigung von Quelldruck und Kriechen
- Kopplung von FLAC3D und 3DEC
 - Bessere Abbildung der Interaktion einzelner Tübbingelemente
 - Modellierung der Verschiebung und Rotation der Elemente gegeneinander möglich
- Entwurfsplanung und Auslegung der Schale gemäß EC2



Weiteres Vorgehen

Forschungsprojekt AGEnT II

- Festlegung von Ring- und Fugentypen der Tübbinge in Abstimmung mit Herstellern
- Rückrechnung von Laborversuchen, um das Verhalten der Tübbinge korrekt abzubilden

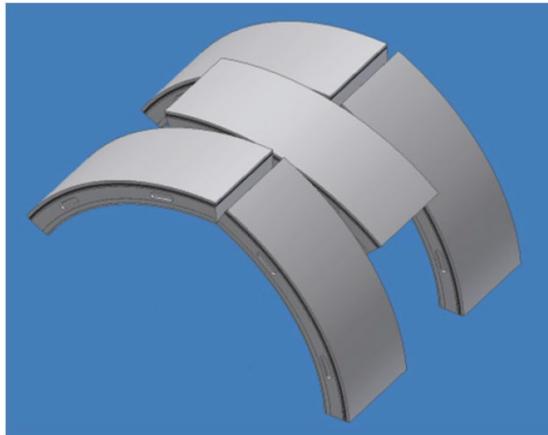


Bild 5: Unterschiedliche Verformung einzelner Tübbings (stark überhöht)

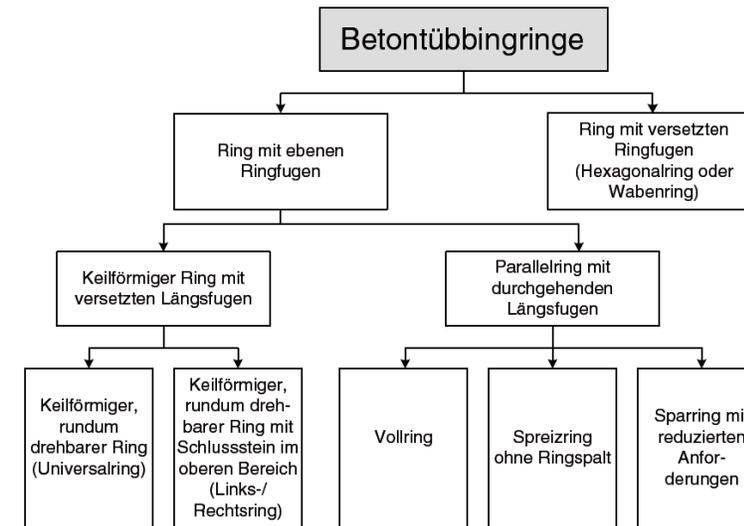
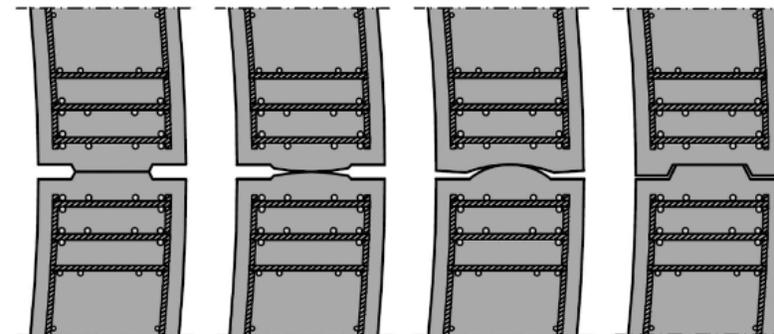


Bild 1: Einteilung der Betontübbinge in Ringtypen

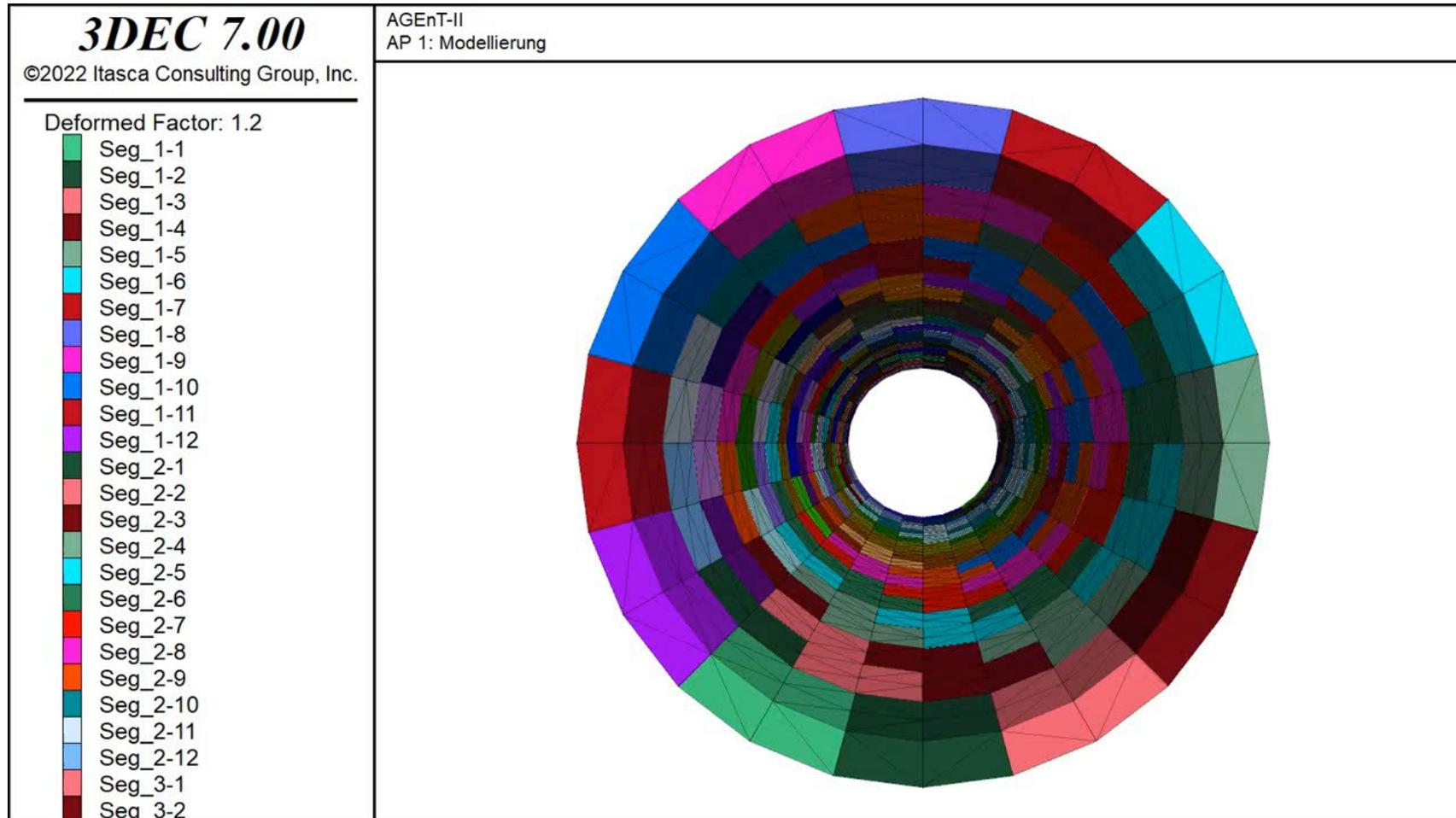
Quelle: DAUB: Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen



Quelle: Wolfger H. et al.: Longitudinal joints of tubbings with newly designed high-strength reinforcement. In: Structural Concrete. 2021;22:1708–1719.

Weiteres Vorgehen

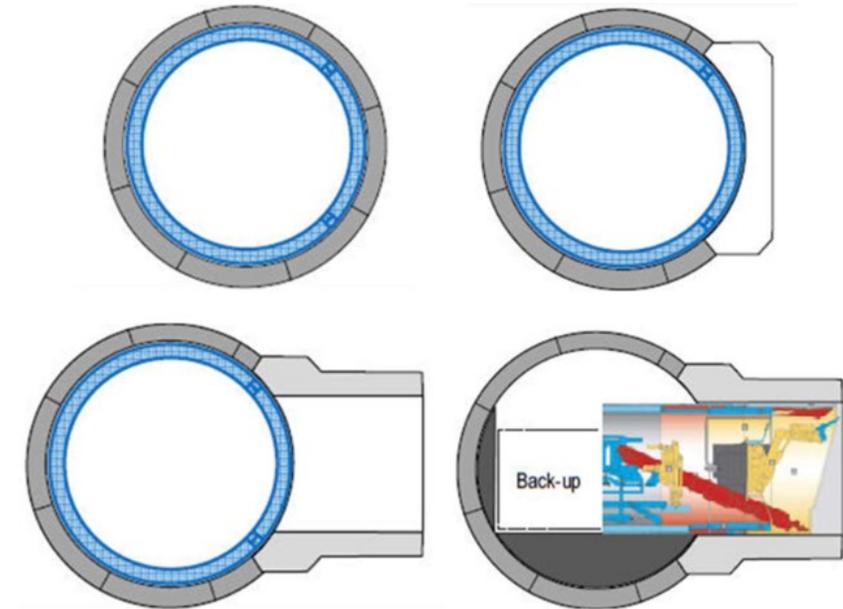
Forschungsprojekt AGEnT II



Weiteres Vorgehen

Forschungsprojekt AGEnT II

- Planung von Streckenkreuzen mit Tübbingausbau
- Gesamtsystembetrachtung: Simulation eines generischen Einlagerungsfeldes
 - Optimierung der Pfeilerbreiten
 - Untersuchung der Anzahl gleichzeitig geöffneter Strecken
 - Variation der Teufe und Spannungsanisotropie
 - Ausrichtung der Grubenräume zu den horizontalen Hauptspannungen



ONDRAF/NIRAS

Vielen Dank & Glückauf!

Kontakt bei Fragen:

Benedikt.Woehrl@dmt-group.com

Axel.Studeny@dmt-group.com

Sven.Bock@dmt-group.com

