

Deckblatt



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 1
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9KE					GC	LD	0001	00	Stand: 23.08.2024

Titel der Unterlage:
ÜsiKo Phase 2 - Steinfall infolge Brand - Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Ersteller/Unterschrift: [Redacted], TEK-GI.3	Prüfer/Unterschrift: [Redacted], TEK-GI.3
---	--

Stempelfeld:
Dokumentationskennzeichnung aus ULV
DokID: 12054730
ULV-Nr. 893061

UVST:	bergrechtlich verantwortliche Person:	atomrechtlich verantwortliche Person:	Bereichsleitung:	Freigabe zur Anwendung:
Datum und Unterschrift	Datum und Unterschrift	Datum und Unterschrift	Datum und Unterschrift	Datum und Unterschrift

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der BGE.

Revisionsblatt



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 2a Stand: 23.08.2024
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9KE					GC	LD	0001	00	

Titel der Unterlage:

ÜsiKo Phase 2 - Steinfall infolge Brand - Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Rev	Revisionsstand Datum	Verantwortl. Stelle	revidierte Blätter	Kat.*	Erläuterung der Revision
00	23.08.2024	TEK-GI.3			Ersterstellung

*
 Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

ÜSiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	8
2	Beschreibung der Vorgehensweise	8
3	Grundlagen	9
3.1	Geologische Verhältnisse	9
3.2	Geotechnische Verhältnisse	10
3.3	Geometrie des Brandortes - Einlagerungskammer	13
3.4	Ausbaumittel	13
3.5	Temperaturkurve des Brandes	15
4	Berechnungsmodell	16
4.1	Geometrisches Modell, statisches Modell und Diskretisierung	16
4.2	Verwendete Stoffmodelle und Parameter	18
4.2.1	Gebirge	18
4.2.2	Anker	25
4.3	Berechnungskonzept und –abfolge	28
4.4	Ausgangszustand vor dem Brandereignis	29
4.4.1	Ausgangszustand ohne Sanierung	29
4.4.2	Ausgangszustand mit Sanierung	30
4.5	Modellierung der Temperatursausbreitung im Anker	31
4.5.1	Spreizhülsenanker	32
4.5.2	Klebeanker	32
4.6	Brandsimulation	33
4.6.1	Thermo-plastisches Verhalten von Stahl und Kleber	33
4.6.2	Rechenfälle	39
5	Ergebnisse und Bewertung	40
5.1	Spreizhülsenanker / vollständiger Ausfall der Anker (RF_3)	41
5.2	Klebeanker / Rest-Tragfähigkeit (RF_02)	41
5.3	Klebeanker / kompletter Ausfall der Anker (RF_4)	43
5.4	Spreizhülsenanker / Sanierung mit KA / Rest-Tragfähigkeit (RF_5)	44
5.5	Klebeanker / Sanierung mit KA / Rest-Tragfähigkeit	44
5.6	Bruchkörper infolge geogener Tektonik (Keilbildungen)	44
	Empfehlungen	45
6	Literatur	45
7	Anhänge: Darstellung der Berechnungsergebnisse	47
Gesamte Blattzahl der Unterlage (inkl. Anhänge)		70

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 4

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: Ausgangszustand vor Brandereignis (ohne Sanierung), Ausbau mit Spreizhülsenankern, Modell AZ_SPH	47
Anhang 2: Ausgangszustand vor Brandereignis (ohne Sanierung), Ausbau mit Klebeankern, Modell AZ_KA	50
Anhang 3: Ausgangszustand vor Brandereignis (mit Sanierung), beraubter Ausbau mit Spreizhülsenankern, neuer Ausbau mit Klebeankern, Modell AZ_SPH_SA	53
Anhang 4: Ausgangszustand vor Brandereignis (mit Sanierung), geraubter und neuer Ausbau mit Klebeankern, Modell AZ_KA_SA	56
Anhang 5: Modellierung der Temperatursausbreitung im Anker, Spreizhülsenanker	59
Anhang 6: Modellierung der Temperatursausbreitung im Anker, Klebeanker	60
Anhang 7: Brandsimulation, RF_3 (SPH, kompletter Ausfall)	61
Anhang 8: Brandsimulation, RF_2 (KA, Resttragfähigkeit)	63
Anhang 9: Brandsimulation, RF_4 (KA, kompletter Ausfall)	65
Anhang 10: Brandsimulation, RF_5 (vorher SPH, Sanierung mit KA)	67
Anhang 11: Brandsimulation, RF_6 (vorher KA, Sanierung mit KA)	69

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 5

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Stratigraphische, petrographische und geotechnische Beschreibung der anstehenden Schichten, Ausschnitt aus /9/ (die violetten Punkte markieren Probenahmestellen).....	10
Abbildung 3-2: Konvergenzverläufe zweier gebirgsmechanisch repräsentativ-abdeckender Konvergenzstationen im Zwischenmittel (logarithmisch extrapoliert).....	11
Abbildung 3-3: Querschnitt Einlagerungskammer nach EU 279 /1/ und Konvergenzzulagen.....	13
Abbildung 3-4: Temperatur-Zeit-Verlauf aus Brandsimulation des TÜV SÜD (oben), Extrapolation des Auskühlverhaltens auf einen Ausgangswert von ca. 30 °C (unten).....	15
Abbildung 4-1: Berechnungsmodell mit Darstellung der statischen Randbedingungen.....	16
Abbildung 4-2: Berechnungsmodell Gebirge mit Darstellung der Diskretisierung.....	17
Abbildung 4-3: Berechnungsmodell der Sprezhülsenanker (SPH) mit Darstellung der Diskretisierung	17
Abbildung 4-4: Berechnungsmodell Klebeanker (KA) mit Darstellung der Diskretisierung	18
Abbildung 4-5: Elasto-plastizität mit Scher- und Zugfestigkeit (Fließflächen f_s und f_t) /2/.....	19
Abbildung 4-6: Fließflächen für Scherversagen f_{sm} und Zugversagen f_{tm} der Matrix /2/.....	20
Abbildung 4-7: Fließflächen für Scherversagen f_{sj} und Zugversagen f_{ij} der Schichtung /2/.....	21
Abbildung 4-8: Abnahme der Scher- und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Entfestigungsparametern	22
Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Materialverhaltens der Cable Strukturelemente /2/25	
Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Systems aus Anker und Füllstoff /2/	26
Abbildung 4-11: Schematische Darstellung des Materialverhaltens von Füllstoff /2/	26
Abbildung 4-12: Angesetzte thermische Eigenschaften vom Baustahl in Abhängigkeit der Temperatur (nach DIN EN 1993-1-2)	28
Abbildung 4-13: Modellgeometrie des kleinräumigen Anker-Modells für Sprezhülsenanker.....	32
Abbildung 4-14: Modellgeometrie des kleinräumigen Anker-Modells für Klebeanker	32
Abbildung 4-15: Abminderungsfaktoren für die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Kohlenstoffstahl unter erhöhten Temperaturen. Bild 3.2 der DIN EN 1993-1-2 (Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Tragwerksbemessung für den Brandfall)	33
Abbildung 4-16: Temperatur- und Belastungsregime des isothermen stationären Versuchs /6/.....	35
Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungs-Kurven bei der isothermen stationären Versuchen /6/	35
Abbildung 4-18: Temperatur- und Belastungsregime des anisothermen instationären Versuchs /6/	36
Abbildung 4-19: Zusammenhang zwischen der angewandten Zugspannung und der kritischen Temperatur bei den anisothermen instationären Versuchen	36
Abbildung 4-20: Ofen mit getesteten Klebeankern (oben); Proben für Push-Out-Versuch, die in Segmente á 150 mm gesägt wurden (mitte); wärmebeeinflusste Probe (unten), /7/	38
Abbildung 4-21: Temperatur entlang des Ankers nach 28 Stunden Erhitzung; Verlust der Lastübertragung des anschließenden Push-Out-Tests /7/.....	39

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 6

Abbildung 5-1: Zuwachs von Verschiebung infolge Brand und axiale Dehnung der Ankers.....	42
Abbildung 5-2: Verschiebungsfeld am Ende des Brandsimulation RF_2 (613 min), potenzielle Bereiche mit Steinfall sind durch gestrichelte Linien markiert.....	43
Abbildung 7-1: Auflockerungszone um eine ELK und axiale Dehnung der SPH-Ankers vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_SPH.....	47
Abbildung 7-2: Plastische Dehnung um ELK im Rechenfall AZ_SPH	48
Abbildung 7-3: Verschiebungsfeld, Verschiebungsvektoren der Kontur und Axialkraft des SPH-Ankers (in N) im Rechenfall AZ_SPH.....	49
Abbildung 7-4: Auflockerungszone um eine ELK und axiale Dehnung der Klebeanker vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_KA.....	50
Abbildung 7-5: Plastische Dehnung um ELK im Rechenfall AZ_KA.....	51
Abbildung 7-6: Verschiebungsfeld, Verschiebungsvektoren der Kontur und Axialkraft des Klebeankers (in N) im Rechenfall AZ_KA.....	52
Abbildung 7-7: Auflockerungszone um eine ELK und axiale Dehnung des Klebeankers vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_SPH_SA.....	53
Abbildung 7-8: Plastische Dehnung um ELK im Rechenfall AZ_SPH_SA	54
Abbildung 7-9: Verschiebungsfeld, Verschiebungsvektoren der Kontur und Axialkraft des Klebeankers (in N) im Rechenfall AZ_SPH_SA	55
Abbildung 7-10: Auflockerungszone und axiale Dehnung der Klebeanker vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_KA_SA.....	56
Abbildung 7-11: Plastische Dehnung im Rechenfall AZ_KA_SA.....	57
Abbildung 7-12: Verschiebungsfeld und Axialkraft des Klebeankers (in N) im Rechenfall AZ_KA_SA	58
Abbildung 7-13: Temperaturverteilung im SPH-Ankerstahl und Gebirge nach 36 min, 120 min und 613 min. Die Kurven zeigen die Temperatur-Zeit-Verläufe der ersten 10 Auswertepunkte.	59
Abbildung 7-14: Temperaturverteilung im Klebeankerstahl und Gebirge nach 36 min, 120 min und 613 min. Die Kurven zeigen die Temperatur-Zeit-Verläufe der ersten 10 Auswertepunkte.	60
Abbildung 7-15: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_3	61
Abbildung 7-16: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_3	61
Abbildung 7-17: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_3	62
Abbildung 7-18: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_3	62
Abbildung 7-19: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_2	63
Abbildung 7-20: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_2	63
Abbildung 7-21: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_2	64
Abbildung 7-22: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_2	64
Abbildung 7-23: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_4	65
Abbildung 7-24: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_4	65
Abbildung 7-25: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_4	66
Abbildung 7-26: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_4	66
Abbildung 7-27: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_5	67

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 7

Abbildung 7-28: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_567
 Abbildung 7-29: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_568
 Abbildung 7-30: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_568
 Abbildung 7-31: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_669
 Abbildung 7-32: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_669
 Abbildung 7-33: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_670
 Abbildung 7-34: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_670

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Festigkeitsmechanische Parameter der anstehenden Schichten auf Basis von Laborversuchen an Gesteinsproben und Dilatometerversuchen, nach /9/..... 10
 Tabelle 3-2: Festigkeitsmechanische Parameter der anstehenden Schichten auf Basis von Rückrechnungen zum Verformungsverhalten an Bestandsstrecken /3/..... 12
 Tabelle 3-3: Technische Spezifikationen der angewendeten Anker 14
 Tabelle 4-1: Parameter für das angewendete Stoffgesetz23
 Tabelle 4-2: Thermische Parameter von Gebirge, Ankerstahl und Kleber bei Raumtemperatur27
 Tabelle 4-3: Berechnungssequenzen (ohne Sanierung)29
 Tabelle 4-4: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse der Ausgangszustände31
 Tabelle 4-5: Zusammenstellung der Berechnungsfälle40
 Tabelle 5-1: Flächen und Massen potenzieller Bruchkörper43

Abkürzungsverzeichnis

- AZ: Ausgangszustand
- BK: Bruchkörper
- ELK: Einlagerungskammer
- GFK: Glasfaserverstärkter Kunststoff
- KA: Klebeanker
- RF: Rechenfall
- SA: Sanierung
- SPH: Spreizhülsenanker
- ZWM: Zwischenmittel

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 8

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Durch den TÜV Süd wird im Rahmen der ÜsiKo Phase 2 das Szenario eines Steinfalls auf Gebinde infolge eines Brandereignisses untersucht. Hierfür sind für die Transportwege und Einlagerungsbereiche, die nur mit Ankerausbau und Maschendrahtverzug (ohne Betonschale) ausgebaut sind, im Rahmen von gebirgsmechanischen Modellierungen potenzielle Bruchkörper abzuschätzen, die sich infolge der thermischen Einwirkung durch einen Fahrzeugbrand auf das Gebirge ergeben könnten.

Im Ergebnis von Brandsimulationen des TÜV Süd liegen Temperatur-Zeit-Verläufe für Konturflächen an einem generischen Ort im Einlagerungsbereich vor. Der Ort ist nur durch Bewitterung und Querschnitt sowie durch den Brand eines Transportwagens charakterisiert, nicht jedoch durch genaue Ortslage oder anstehende Geologie. Das durch den TÜV Süd generierte Temperaturfeld wird als Grundlage dafür verwendet, zu überprüfen, ob ein Herabfallen von Gebirgskörpern infolge thermisch induzierter Spannungsänderungen im Gebirge und Reduzierung der Tragfähigkeit bzw. Ausfall der Anker auftritt. Als Einwirkungen wird die Wärmefeldentwicklung im Gebirge, im Anker und im Verklebematerial betrachtet.

Die Dimensionen potenzieller Bruchkörper werden für weiterführende Analysen verwendet, in denen die Integrität von Gebinden bei Steinfall betrachtet wird (nicht Gegenstand dieser Unterlage).

2 Beschreibung der Vorgehensweise

Es werden thermo-mechanisch gekoppelte Berechnungen unter Verwendung des o.g. Temperatur-Zeit-Verlaufs als thermische Randbedingung durchgeführt. Die Analysen finden an repräsentativen (nicht ortsspezifischen) und z.T. konservativ abdeckenden 2D-Modellen mit ebenem Verzerrungszustand statt. Hinsichtlich der bergmännischen, geologischen und geotechnischen Randbedingungen der Berechnungen werden konservativ abdeckende Fälle betrachtet bzw. Annahmen getroffen:

Grubenraumgeometrie: Den rechnerischen Analysen wird das Grubenraumprofil der Einlagerungskammern (ELK) zugrunde gelegt. Dieses ist hinsichtlich der Abmessungen und Form (ebene Firstabschnitte) gebirgsmechanisch abdeckend ggü. anderen möglichen Brandorten im zu betrachtenden Bereich (Kammerzufahrten und Entladekammern weisen geringere Querschnitte aus).

Ausbausystem: In den betreffenden Grubenräumen sind folgende Typen der Systemankerung mit Maschendrahtverzug ausgeführt und sind somit als Ausbausysteme zu betrachten:

- o Spreizhülsenanker (SPH, „Standardausbau“ L = 1,8 m)
- o Klebeanker (KA, vollverklebter Stabstahl, L = 2,4 m)
- o Mischsysteme aus Spreizhülsenankern und nachträglich gesetzten vollverklebten GFK-Ankern oder Stahl-Klebeankern (vereinzelte abschnittsweise ausgeführt)

Letztgenannte werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da diese in ihrer Tragwirkung mit den Stahl-Klebeankern vergleichbar bzw. identisch sind.

Geologie: Die zu betrachtenden Streckenabschnitte befinden sich in den Gesteinen des Mittleren Korallenoolithes. Den rechnerischen Analysen werden die gebirgsmechanischen Eigenschaften des Zwischenmittels (ZWM) mit geringfesten Tonmergel- bis Kalkmergelsteinen zugrunde gelegt. Diese stratigraphische Einheit ist jene mit den geringsten Festigkeiten innerhalb des möglichen Einlagerungshorizontes Mittlerer Korallenoolith (siehe Abschnitt 3.2).

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 9

Streckenzustand: In den Modellierungen wird sowohl ein sanierter Ausgangszustand als auch ein unsanierter Streckenzustand vor Brandereignis angenommen.

Für die Streckenabschnitte des Zwischenmittels mit hohen kumulierten Konvergenzbeträgen ist vor Beschickung der Kammer eine Sanierung geplant. Diese umfasst eine Nachprofilierung/Nachschnitt der Kontur (teilweise Entfernung der Auflockerungszone) und den anschließenden Ersatz der Systemankerung. Die Sanierung wird bei den stark konvergierenden ELK zeitnah vor Beschickung erfolgen. Es wird von einer Standzeit zwischen Nachschnitt und Versatz von ca. 3 Jahren (max. 8 Jahren) ausgegangen. Im Szenario "Brandereignis in der sanierten ELK" werden der Nachschnitt, daraus resultierende Konvergenzen und die Lastumlagerung auf die neu gesetzten Anker miterfasst.

Der unsanierte Ausgangszustand ist durch eine hohe Beanspruchung des Gebirges und des (initialen) Ankerbaus gekennzeichnet und somit stark konservativ („worst case“ bzw. wenig realistische Annahme für die betrachteten Berechnungsfälle).

Tektonik (Keilbildungen): Die Berechnungen erfolgen an kontinuumsmechanischen 2D-Modellen, welche die Anisotropie des Festigkeitsverhaltens infolge der Schichtung berücksichtigen. Potenzielle Bruchkörper, welche sich durch den Verschnitt geogener Klüfte und Störungen mit einer von der Schnittebene abweichenden Einfallrichtung ergeben könnten, werden modellbedingt nicht erfasst. Daher wird in einem separaten Schritt geprüft, ob auf Basis vorliegender Streckenkartierungen¹

- potenzielle Bruchkörper vorliegen bzw. identifiziert werden können, und falls ja
- ob der vorhandene Ausbau für die Beanspruchungssituation hinreichend ist. Andernfalls erfolgen Ertüchtigungsmaßnahmen.

3 Grundlagen

3.1 Geologische Verhältnisse

Die zurzeit aufgefahrene Einlagerungskammern im Feld 5/1 liegen im mittleren Korallenoolith, der auf der 2. Sohle ca. 30 m bis 45 m mächtig ist. Als stratigraphische Einheiten treten hier vom Liegenden zum Hangenden das untere Erzlager, das Zwischenmittel und das obere Erzlager auf. Zukünftig zu erstellende Einlagerungskammern werden ebenfalls im mittleren Korallenoolith erstellt. Abbildung 3-1 stellt die stratigraphische Einordnung der anstehenden Schichten Einlagerungshorizontes Mittlerer Korallenoolith inklusive deren Verwitterungsprofil, petrographischer und geotechnischer Beschreibung dar.

Das Untere Erzlager wird aus rotbraunem Eisenoolith gebildet. Der Eisenoolith ist überwiegend dickbankig bis kompakt. In Störungszonen ist er mittel- bis großblockig. Zum Hangenden hin ist der Eisenoolith durch die Einschaltung von Tonlagen überwiegend dünnbankig. Der Durchtrennungsgrad ist gering. Das Gestein wird als sehr standfest bewertet. Über dem Eisenoolith lagern graue bis dunkelgraue Kalkmergel- und Tonmergelsteine des Zwischenmittels. Die Gesteine sind i.d.R. kompakt. Die Gesteinsfestigkeit wird als mild bis hart klassifiziert. Der Übergang vom Zwischenmittel zum Oberen Erzlager wird durch Kalkstein gebildet. Der hell- bis dunkelgrau gebänderte Kalkstein weist häufig oolithische Bestandteile auf. Er ist hart bis sehr hart und mittelbankig bis kompakt.

¹ Für Neuauffahrungen erfolgt standardmäßig eine Klufkkartierung. Auf dieser Basis wird betrieblich ein ggf. erforderlicher, vom Standard abweichender Ausbau festgelegt.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 10

Für den Brandort wird keine standortspezifische geologische Situation zugrunde gelegt. Es wird nur ein Material- bzw. Homogenbereich abgebildet, welcher den geringst-standfesten Gebirgsbereich repräsentiert. Im vorliegenden Fall handelt es sich hierbei um das tonige Zwischenmittel.

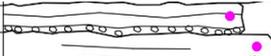
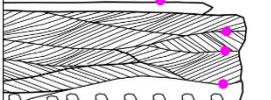
Mittlerer	Ob. Erz-lag.		Oolithischer Erzkalk, braun bis hellgrau;	Mittelbankig, standfest; teils Löserflächen, großblockig.
	Zwischenmittel		Kalkstein, meist oolithisch; hell- bis dkl. grau gebändert; teils eisenschüssig.	Mittel- bis dickbankig, dann kompakt, hart bis sehr hart, hohe Standfestigkeit; bei auftretenden Tonsteinlagen Löserbildung.
	Unteres Erzlager		Kalkmergel- bis Tonmergelstein, grau bis dkl. grau; diffuse Einschaltungen von Kalksedimenten (Härtlinge); im NE-Feld tritt toniges Fe-Erz, sog. "Mittellager", auf.	Undeutliche bis keine Schichtung, kompakt; Gesteinsübergänge sehr fließend; mild bis hart, hohe Standfestigkeit; in Störungszonen mittel- bis großblockig; bei Feuchteinwirkung nachbrüchig.
			Eisenoolith, rotbraun mit fließenden Übergängen zu Erzkalkpartien; Schrägschichtung; Schüttungskörper oft durch Tonsteinblätter getrennt.	Dickbankig bis kompakt; zum Hangenden hin dünnbankig durch Einschaltung von Tonsedimenten (Löserflächen); in Störungszonen mittel- bis großblockig, Keilbildungen; meist geringer Durchtrennungsgrad dann sehr hohe Standfestigkeit.

Abbildung 3-1: Stratigraphische, petrographische und geotechnische Beschreibung der anstehenden Schichten, Ausschnitt aus /9/ (die violetten Punkte markieren Probenahmestellen)

3.2 Geotechnische Verhältnisse

Im Folgenden werden wesentliche geotechnische Untersuchungsergebnisse aus Labor- und in situ-Untersuchungen für den Einlagerungshorizont zusammenfassend dargestellt. Schwerpunkt stellt hierbei das Verhalten des Zwischenmittels dar.

Festigkeitsmechanische Untersuchungen an Gesteinsproben (Laborversuche): Für den Einlagerungshorizont im Allgemeinen und das Zwischenmittel im Speziellen wurden petrophysikalische und festigkeitsmechanische Untersuchungen an Gesteinsproben sowie in situ-Versuche mit Dilatometersonden durchgeführt. Die Ergebnisse verschiedener Institutionen einschließlich abgeleiteter Modellparameter nach MOHR-COULOMB werden in /9/ nach geologischem Normalprofil zusammengefasst, siehe Tabelle 3-1. In der Tabelle werden Mittelwerte für den Stichprobenumfang n zuzüglich Minimal- und Maximalwert (in Klammern) angegeben.

Tabelle 3-1: Festigkeitsmechanische Parameter der anstehenden Schichten auf Basis von Laborversuchen an Gesteinsproben und Dilatometerversuchen, nach /9/

	Gesteinsfestigkeit		Festigkeitsparameter				E-Modul		Verformungsmodul (Nachbruchbereich)								
	B-F, GSF, WBI Labormessungen		BGR Labormessungen				WBI in situ-Messungen		BGR Labormessungen								
	n	Druckfestigkeit [MPa]	n	Zugfestigkeit [MPa]	Bruch		Nachbruch		n	E[MPa]	n	E[MPa]	n	VM[MPa]			
				c [MPa]	φ [°]	c [MPa]	φ' [°]										
Zwischenmittel	1	39	WBI		9,0	52,3	6,2	40,1	1	12800			12	19200 (13510-23610)			
	50	74 (22-125)	B-F	50	6,5 (3,5-9,9)	B-F			4	12200 (7100-14900)			9	13900 (9260-19720)			
	2	43 (35-51)	WBI														
Unteres Erzlager	35 (9-94)	B-F	60	3,0 (0,9-6,5)	B-F	4	8,5 (4,6-10,2)	34,0 (28,4-38,9)	3,0 (1,9-5,3)	33,8 (33,2-34,5)	4	7000 (6800-10300)	20	17400 (8800-20800)	60	10000 (6400-17210)	
	27 (17-38)	WBI															
Unteres Erzlager	40	24 (15-40)	B-F	40	2,2 (0,5-4,0)	B-F	4	8,6 (5,6-10,5)	37,4 (35,1-39,4)	2,6 (2,1-3,1)	37,5 (35,2-40,5)	2	10700 (9850-11500)	41	21500 (9800-32700)	89	11700 (3260-23400)
	4	30 (25-36)	WBI														
	56	37 (18-78)	GSF														

- c Kohäsion (Modellparameter)
- φ Winkel der inneren Reibung (Modellparameter)
- VM Verformungsmodul
- BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover); Darstellung der Ergebnisse aus /10/
- WBI Prof. Dr. Ing. W. Wittke, Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH; Darstellung der Ergebnisse aus /11/

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 11

Untersuchungen zur Ausdehnung der Auflockerungszone: Durch Ultraschalluntersuchungen, Permeabilitätsmessungen und Extensometer-/ Mehrfachkonvergenzstationen wurde die Ausdehnung der durch die Auffahrung/Standzeit entstandenen Auflockerungszone um Einlagerungskammern im Versuchsfeld 5/1 untersucht /12/. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Ultraschallmessungen lässt sich eine Tiefe der Auflockerungszone von ca. 3 bis 4 m für die untersuchten Streckenabschnitte im Eisenoolith des Unteren Erzlagers abschätzen. Die Messungen erfolgten hierbei wenige Monate (max. ca. 3 Jahre) nach Auffahrung. Streckenabschnitte im Zwischenmittel wurden nicht beprobt.

Konvergenzverhalten von Bestandsstrecken: Das Konvergenzverhalten der Einlagerungskammern zeigt eine Abhängigkeit von petrographischen, tektonischen und bergmännischen Randbedingungen. Maximal gemessene Konvergenzbeträge liegen im Bereich von Streckenabschnitten im Zwischenmittel bei tektonischer Gebirgsbeanspruchung vor. In Abbildung 3-2 werden die Verläufe zweier repräsentativer, tendenziell abdeckender Konvergenzquerschnitte für o.g. Randbedingungen dargestellt und logarithmisch extrapoliert. Die extrapolierte vertikale Konvergenz derartiger Abschnitte beträgt zum „derzeitigen Zeitpunkt“ (Berichtsstand 2024 einschließlich nicht erfasster Vorverformung) ca. 1 m (horizontale Konvergenz ca. 0,5 m).

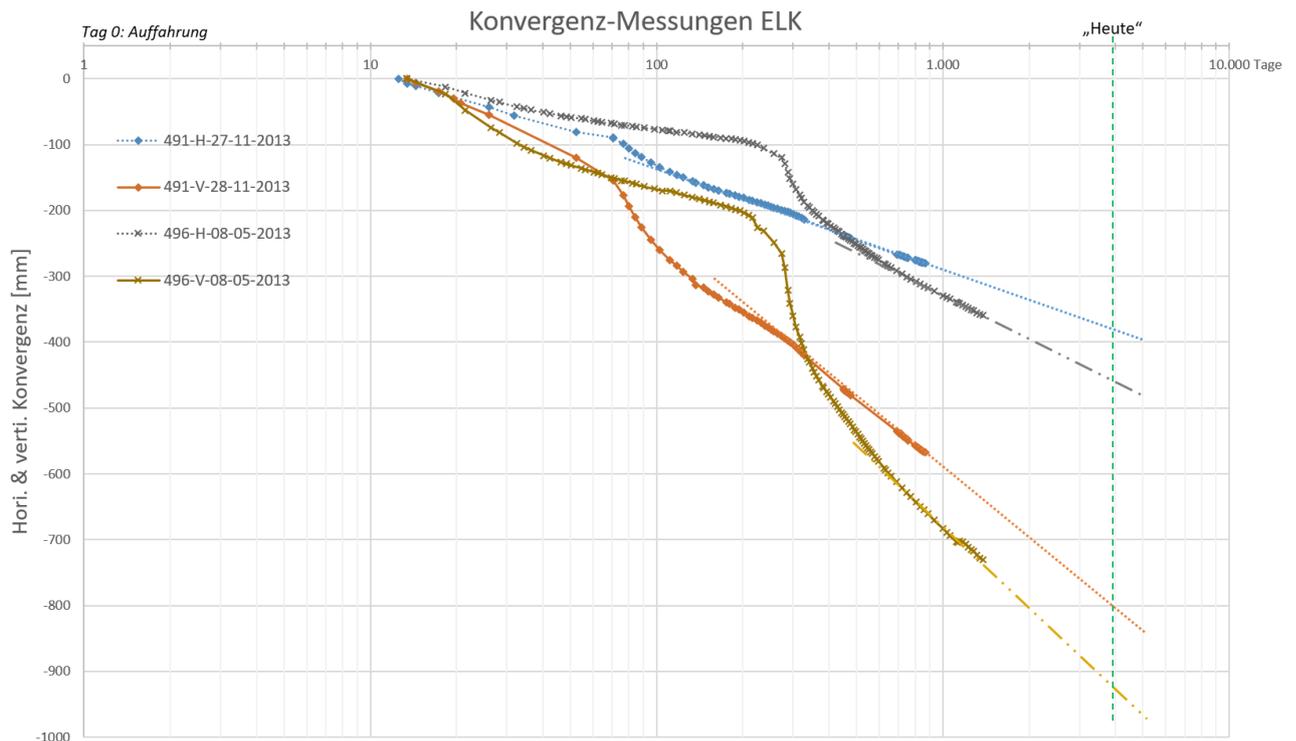


Abbildung 3-2: Konvergenzverläufe zweier gebirgsmechanisch repräsentativ-abdeckender Konvergenzstationen im Zwischenmittel (logarithmisch extrapoliert)

Empfehlungen zu Berechnungskennwerten für eine rechnerische Beschreibung des Gebirgsverhaltens: Auf Basis der Auswertung von Konvergenzmessungen im Grubengebäude werden in /3/ Parametersätze für die stratigraphischen Schichten des Einlagerungshorizontes abgeleitet. Die Parameterwahl wurde anhand von in situ Beobachtungen unter Nutzung des Stoffmodells „ubiquitous joints“ des Codes FLAC3D /2/ verifiziert. Hierbei werden reduzierte Festigkeitswerte nach Überschreitung der Bruchfestigkeit berücksichtigt, um das Verhalten der konturnahen Auflockerungszone zu berücksichtigen. Das Stoffmodell wird in Abschnitt 4.2.1 näher beschrieben. Tabelle 3-2 stellt die

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 12

Parametersätze von Zwischenmittel und Unterem Erzlager dar. Das Obere Erzlager wird in seinem Festigkeitsverhalten dem Unteren Erzlager gleichgesetzt.

Tabelle 3-2: Festigkeitsmechanische Parameter der anstehenden Schichten auf Basis von Rückrechnungen zum Verformungsverhalten an Bestandsstrecken /3/

	Bezeichnung	Zwischenmittel (Kalkmergel- Tonmergel- stein)	Unteres Erzlager (Eisenoolith)
	Homogenbereiche	H3	H1
	Bezeichnung	D-F	A-C
	Dichte	2500	2500
	E-Modul	3000	8000
	Querdehnzahl	0,25	0,2
	eps-Restfestigkeit	0,01	0,01
Matrix	Kohäsion	2,5	3,5
	Restkohäsion	0,5	0,7
	Reibungswinkel	34	37
	Restreibungswinkel	34	37
	Zugfestigkeit	0	0,1
	Restzugfestigkeit	0	0
	Dilatanzwinkel	0	0
	Restdilatanzwinkel	0	0
Schichtung	Kohäsion	0,05	0,1
	Restkohäsion	0,05	0,1
	Reibungswinkel	25	25
	Restreibungswinkel	25	25
	Zugfestigkeit	0	0,025
	Restzugfestigkeit	0	0
	Dilatanzwinkel	25	25
	Restdilatanzwinkel	25	25

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 13

3.3 Geometrie des Brandortes - Einlagerungskammer

Die Einlagerungskammern werden mit einer Streckenbreite von ca. 7,20 m und eine Höhe von ca. 6,50 m aufgeföhren. Die Dimensionen können sich standortspezifisch in Folge von Konvergenzen bis zum Verfüllbeginn auf die Regelmaße von 7,00 m Breite bzw. 6,00 m Höhe verringern. Das Profil der Kammern ist in den Übergangsbereichen ausgerundet und weist einen Querschnitt von ca. 40 m² bzw. 45 m² ohne/mit Konvergenzzulage auf (siehe Abbildung 3-3).

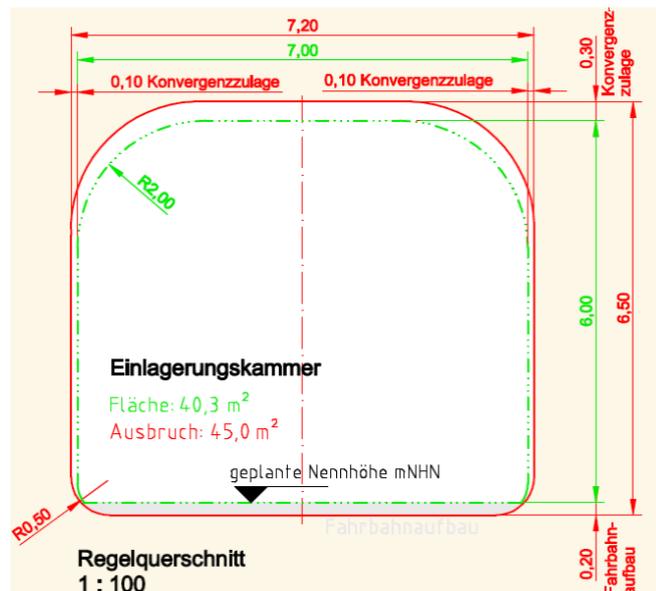


Abbildung 3-3: Querschnitt Einlagerungskammer nach EU 279 /1/ und Konvergenzzulagen

3.4 Ausbaumittel

Nach EU 279 /1/ wird in den ELK ein Ausbau aus Anker und Maschendrahtverzug zur Steinfallssicherung über den gesamten Bereich der Ausbruchskontur im Oberbau (ab ca. 1 m über Sohle) angewandt. Es kommen überwiegend Sprezhülsenanker (SPH-Anker) mit Klemmkopf zum Einsatz. Der Durchmesser der Ankerstange beträgt ca. 18 mm, die Bruchlast 160 kN und die Ankerlänge 1,8 m. Die Ankerdichte beträgt mindestens ein Anker pro m². Die Ankerbohrlöcher werden mit einem Durchmesser von 36 mm radial zum Streckenmantel gebohrt. Die Anker werden mit Maschendraht als Verzug untereinander verbunden. Die Maschenweite beträgt 60 x 60 mm bei einer Drahtstärke von 3,2 mm.

Ein Sprezhülsenanker ist ein typischer Zweipunkt-Anker, der aus einem Stahlstab und einem konischen Spreizelement am Ende des Ankers besteht. Die Verankerung erfolgt durch Reibung und Verzahnung zwischen der Spreizelement und der Bohrlochwand. Die Tragfähigkeit dieses Ankertyps hängt sowohl von der Haltbarkeit der Spreizelementes als auch von der Festigkeit des Stahlstabes ab. Der Sprezhülsenanker dient dazu, Trennflächen zu überdrücken (→ Erhöhung der Normalspannungskomponente und somit Scherfestigkeit) bzw. das Öffnen der Trennfläche zu verhindern. Er ist daher primär auf Zug ausgelegt. Bei einer Zugbelastung am Ankerkopf wird der Stahlstab gleichmäßig gedehnt, so dass eine konstante Axialspannung und -dehnung über die Länge der Stab entsteht. Die Scherspannung an der Staboberfläche ist aufgrund des hohlen Ringspalts in der Bohrung bei ideal axialer Zugbeanspruchung gleich Null. Bei großen Scherbewegungen an der Trennfläche kann der SPH-Anker versagen. In situ wurden bereits Ankerausfälle beobachtet. Aus Gründen der Ar-

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 14

beitssicherheit werden defekte Anker beraubt / ausgetauscht. Für den maßgebenden Fall der sanierten, nachgeankerten Strecke sind die Schubverformungen gering (bereits nach Auffahrung weitestgehend abgeklungen).

Bei schwierigen geologischen Verhältnissen werden zusätzlich, nach geologischer und bergmännischer Bewertung, vollverklebte Stahlstabanker (Klebeanker) eingebracht. Der Durchmesser der Ankerstange beträgt ca. 25 mm, die Bruchlast 320 kN und die Ankerlänge 2,4 m. Der Durchmesser des Bohrlochs beträgt ca. 32 mm. Beim Klebeanker wird durch Verwendung eines kohäsiven Füllstoffes/Klebers die Ankerstange im Bohrloch befestigt. Dieser dringt einerseits in die Unebenheiten der Bohrlochwand ein und andererseits auch in die Profilierung der Ankerstange ein. Der wichtigste Verankerungsmechanismus ist die Kraftübertragung durch Formschluss. Dabei erfolgt die Kraftübertragung vom Anker über den inneren Verbund auf den ausgehärteten Kleber und vom ausgehärteten Kleber über den äußeren Verbund auf die Bohrlochwand und das umgebende Gebirge. Die punktuell auftretenden Kräfte werden durch den über die gesamte Ankerlänge vorhandenen kohäsiven Verbund direkt und abschnittsweise in das umgebende Gebirge eingeleitet. Dies bedeutet, dass selbst beim Bruch eines Ankerabschnittes die übrigen Teile weiterhin funktionsfähig bleiben.

In den Einlagerungskammern werden Spreizhülsenanker vom Typ Gebirgsanker M20 der Firma Stahlwerk Annahütte-Max Aicher GmbH & Co. KG und vollverklebte Klebeanker vom Typ GS-Anker 3Me Ø25 mm der Firma Minova BWZ GmbH mit folgenden technischen Systemspezifikationen verwendet:

Tabelle 3-3: Technische Spezifikationen der angewendeten Anker

Bezeichnung	Einheit	Spreizhülsenanker	Klebeanker
Dichte	[kg/m ³]	7900	7900
Durchmesser	[m]	18e-3	25e-3
Länge	[m]	1,8	2,4
E-Modul	[Pa]	205e+9	205e+9
Strecklast	[N]	90e+3	220e+3
Bruchlast	[N]	160e+3	320e+3
Bruchdehnung	[-]	>20%	>20%
Stahltyp	[-]	St-70 2	BWZ 700

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 15

3.5 Temperaturkurve des Brandes

Die Höhe der wirkenden thermischen Last wurde in Brandsimulationen des Abbrandes eines Einlagerungsfahrzeuges durch den TÜV Süd /13/ ermittelt. In diesen 3D-Berechnungen wurden die jeweils ortsvariablen maximalen Temperaturen an der Kontur des Gebirges (unterschieden nach Firste und Strosse) bis zu einem Zeitpunkt von 100 min nach Beginn des Brandereignisses aufgezeichnet. Die Simulationen erfassen somit das Maximum der Temperaturen nach ca. 36 min mit Werten um 600°C sowie das Ende des Reifenabbrandes bei etwa 90 min. Im Folgenden kühlt sich der Brandherd durch den Wetterstrom ab.

Für die hier durchgeführten Berechnungen wurde der durch den TÜV Süd berechnete Temperatur-Zeit-Verlauf derart extrapoliert, dass die Ausgangstemperatur von 30°C wieder erreicht wird, siehe Abbildung 3-4. Dies entspricht einem Zeitraum von > rd. 600 min. Da das Temperaturprofil der Firste ein höheres Temperaturmaximum aufweist, wird es auf die gesamte Kontur der Einlagerungskammer angesetzt (konservativer Ansatz).

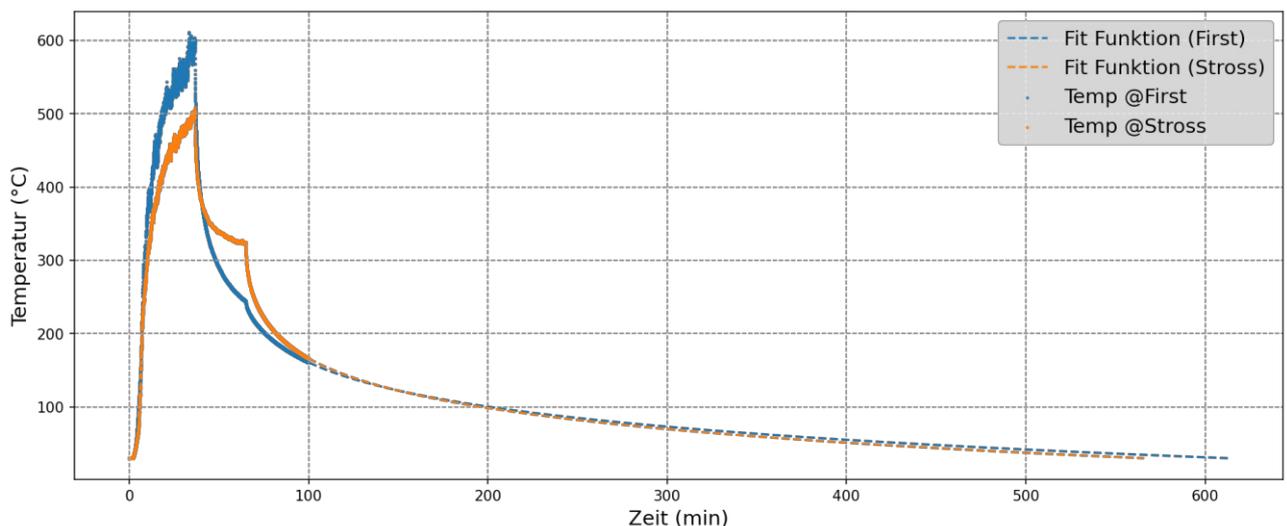
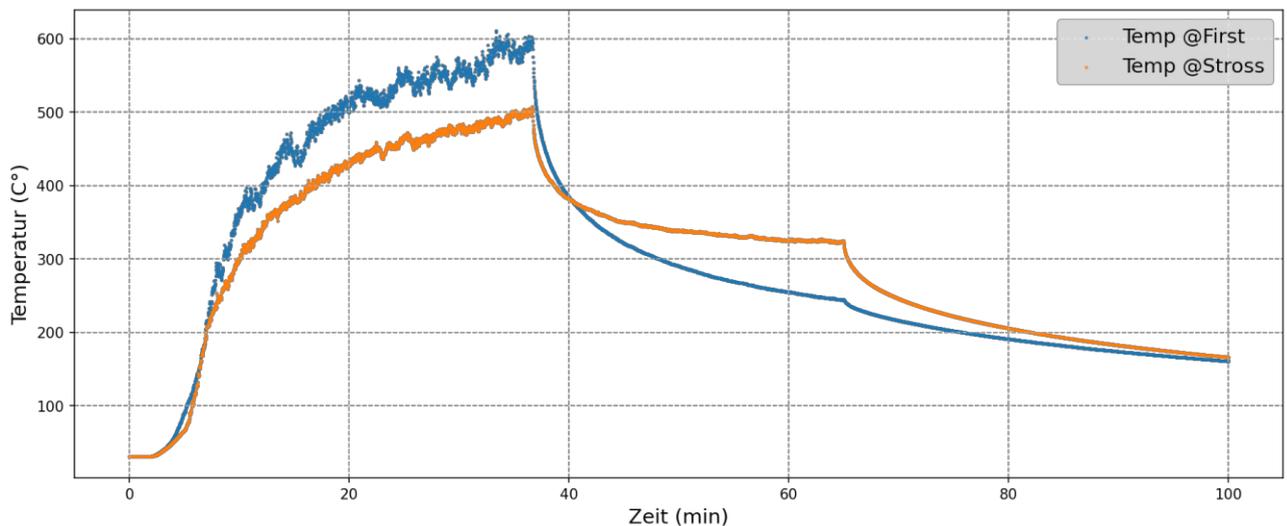


Abbildung 3-4: Temperatur-Zeit-Verlauf aus Brandsimulation des TÜV SÜD (oben), Extrapolation des Auskühlverhaltens auf einen Ausgangswert von ca. 30 °C (unten)

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 16

4 Berechnungsmodell

4.1 Geometrisches Modell, statisches Modell und Diskretisierung

Für die numerische Berechnung wird ein vereinfachtes 2D- Modell („Scheibenmodell“ mit ebenem Verformungszustand) verwendet. Das gewählte Modellgebiet liegt im Teufenbereich zwischen 666,7 m und 748,2 m unter Geländeoberkante, es ergibt sich eine vertikale Erstreckung des Modells von ca. 82 m. Das Modell bildet zwei Einlagerungskammern und ein homogenes umgebendes Gebirge ab (siehe Abbildung 4-1). Die Grubenraumgeometrie entspricht Abbildung 3-3 (Dimensionen einschl. Konvergenzzulage). Die Radien im Sohlbereich werden in der Modellierung vernachlässigt. Die Abbildung zweier ELK ermöglicht die Erfassung von Überzugswirkungen, wie sie auch bei In-situ-Messungen zu beobachten sind. Die Kammern verlaufen im Streichen des Einlagerungshorizontes, der ein Schichteinfallen von ca. 20° nach Westen (=linker Modellrand) aufweist. Die Sohlen der beiden modellierten Kammern liegen in der Teufe von -708,2 m und -713,2 m. Die Pfeilerbreite im Modell beträgt ca. 28 m (Verhältnis Festenstärke zu Kammerbreite 4:1) und die seitlichen Modellränder sind jeweils 30 m von den Stößen entfernt. Modellober- und Unterkante befinden sich jeweils mindestens 35 m von Sohle oder Firste entfernt. In diesem Abstand kann davon ausgegangen werden, dass Interaktionen zwischen den Modellrändern und der Kammer, die sich auf dem Spannungszustand auswirken, gering sind /14/.

Die angesetzten statischen Randbedingungen der numerischen Modellierung werden in Abbildung 4-1 dargestellt. An den seitlichen Modellrändern sind die Verschiebungen horizontal in Normalenrichtung behindert und in vertikaler Richtung unbehindert. Am unteren Modellrand sind die Verschiebungen in vertikaler Richtung behindert und in horizontaler Richtung unbehindert. Am oberen Modellrand wird eine Flächenlast entsprechend dem Überlagerungsdruck angesetzt. Der Überlagerungsdruck ergibt sich aus der Teufenlage und der überlagernden Gebirgsdichte von 2.500 kg/m³.

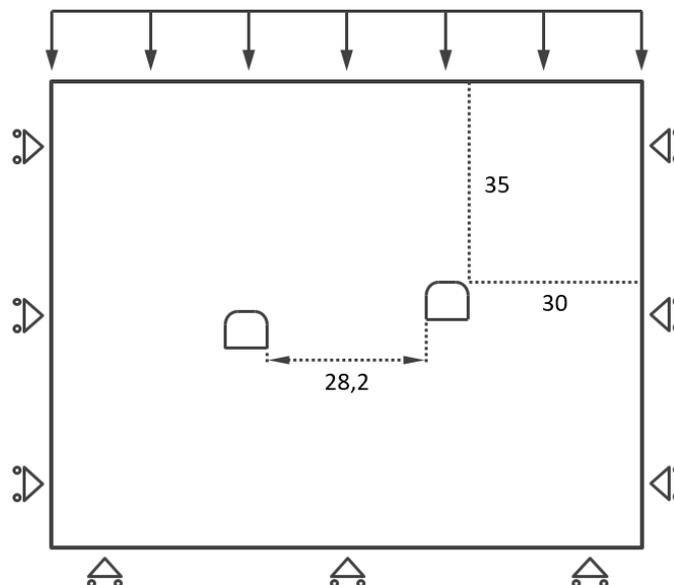


Abbildung 4-1: Berechnungsmodell mit Darstellung der statischen Randbedingungen

Die numerischen Berechnungen werden mit dem Programmsystem FLAC3D Version 7.0 /2/ durchgeführt. Das Programmsystem beruht auf der Methode der Finiten Differenzen. Die Vernetzung erfolgt in FLAC3D mit dem Vernetzungstool Building Blocks. Das Modell besitzt 13.288 Zonen und

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 17

26.958 Knoten, siehe Abbildung 4-2 zur Darstellung des diskretisierten Gebirgsbereiches. Im Bereich der Kontur wurden Gitterpunktabstände von ca. 0,2 bis 0,3 m gewählt.

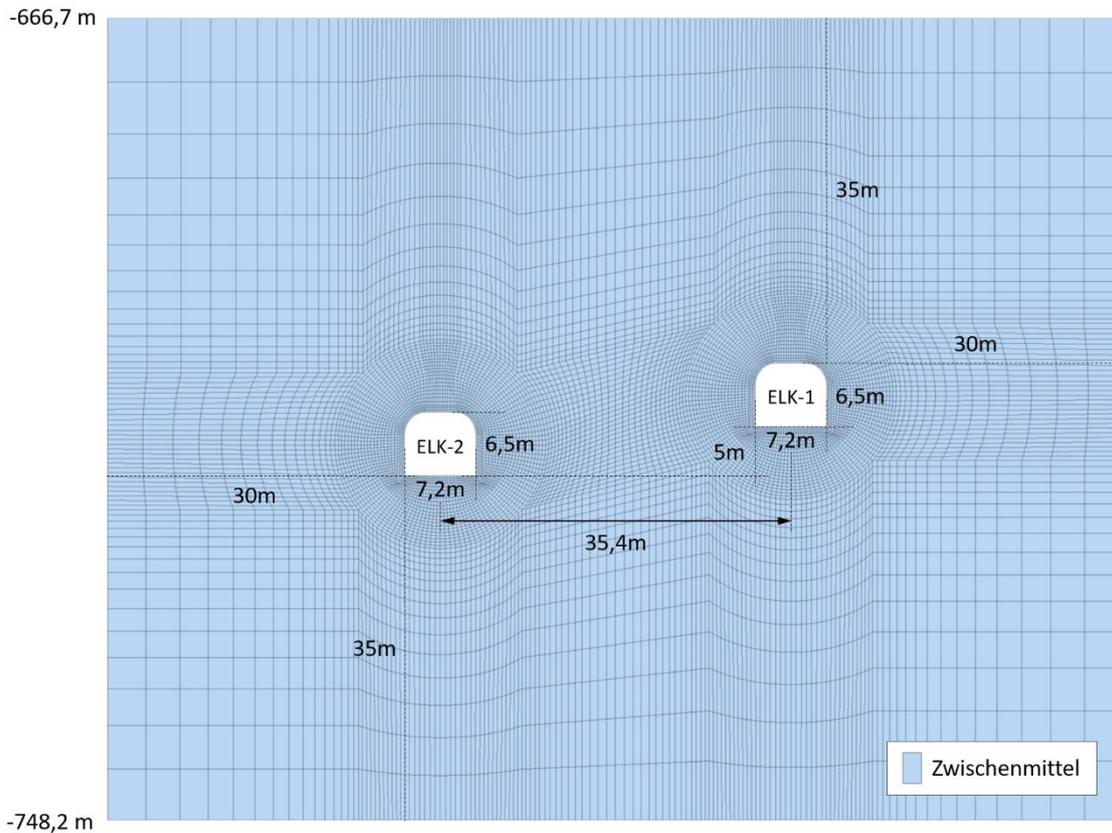


Abbildung 4-2: Berechnungsmodell Gebirge mit Darstellung der Diskretisierung

Die Systemankerung wird im Berechnungsmodell durch 1D-Strukturelemente, welche der Ankerdichte entsprechend in Stößen und Firste angeordnet sind, abgebildet.

Die Spreizhülsenanker werden in den numerischen Berechnungen durch ein sogenanntes Cable-Strukturelement /3/ mit zwei Knoten abgebildet. Auf die Abbildung der Ankerplatte und des Ankerkopfes wurde verzichtet. Wie in Abbildung 4-3 dargestellt, sind die beiden Knoten starr mit der Streckenkontur und dem Gebirgstiefsten verbunden.

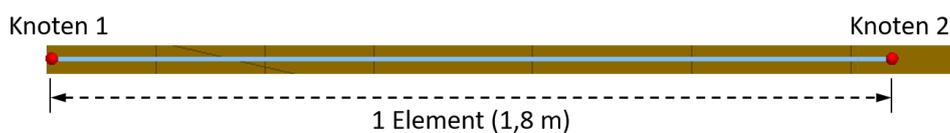


Abbildung 4-3: Berechnungsmodell der Spreizhülsenanker (SPH) mit Darstellung der Diskretisierung

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 18

Die Klebeanker werden durch 20 Cable-Strukturelemente mit 21 Knoten abgebildet. Wie in Abbildung 4-4 gezeigt, ist nur Knoten 1 starr mit der Kontur verbunden, alle anderen berücksichtigen die Verbundwirkung durch Kleber.

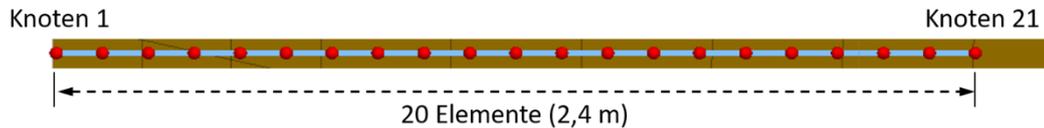


Abbildung 4-4: Berechnungsmodell Klebeanker (KA) mit Darstellung der Diskretisierung

Der mit dem Anker verbundene Maschendraht wird vernachlässigt und nicht modelliert.

4.2 Verwendete Stoffmodelle und Parameter

4.2.1 Gebirge

Mechanisches Verhalten

Zur Modellierung des Gebirgsverhaltens wird ein elasto-plastisches Stoffmodell mit Festigkeitsanisotropie und Entfestigung im Nachbruchbereich (strain-softening) gewählt. Die grundlegenden Eigenschaften des Stoffmodells (Name in FLAC3D /2/: ubiquitous joint) sind:

- Die Spannungs-Dehnungsbeziehung für den elastischen Anteil ergibt sich unter Annahme von isotropen, linear-elastischen Eigenschaften nach Hook.
- Die elastischen Spannungen sind sowohl durch die Scherfestigkeit als auch durch die Zugfestigkeit begrenzt. Bei Erreichen der Fließflächen treten plastische Dehnungen auf.
- Die plastischen Dehnungszunahmen ergeben sich hierbei unter Berücksichtigung der Scherfestigkeit nach Mohr-Coulomb sowie einer Begrenzung der Zugspannungen (tension cut-off).
- Zur Berücksichtigung der Anisotropie der Festigkeit wird hierbei zwischen Matrix- und Schichtungsfestigkeit unterschieden.
- Zur Berechnung der plastischen Scherdehnungen wird eine nicht-assozierte Fließregel angewendet. Zur Berechnung der plastischen Zugdehnungen wird eine assoziierte Fließregel angewendet.
- Zur Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens des Gebirges wird zusätzlich zur Spitzenscher- und Zugfestigkeit, sowohl auf der Matrix als auch auf der Schichtung, eine von den plastischen Dehnungen abhängige Entfestigung bis zu einer Restscher- und Restzugfestigkeit berücksichtigt.

Als Grundlage der Plastizitätstheorie wird davon ausgegangen, dass sich der Tensor der Dehnungszunahme nach Gleichung (Gl. 4-1) in elastische und plastische Anteile zerlegen lässt:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p \quad (\text{Gl. 4-1})$$

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung (siehe Abbildung 4-5) für den elastischen Anteil der Dehnungszunahme lässt sich unter Annahme von isotropen, linear-elastischen Eigenschaften nach Hooke ableiten.

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\varepsilon_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\Delta\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

wobei δ_{ij} das Kronecker-Delta Symbol ist und den Wert 1 hat, wenn die Indizes i, j gleich sind, sonst den Wert 0. Der Schubmodul G und der Kompressionsmodul K lassen sich nach den Gleichungen (Gl. 4-3) und (Gl. 4-4) in die Elastizitätskonstanten E-Modul E und Querdehnzahl ν umrechnen:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (\text{Gl. 4-3})$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (\text{Gl. 4-4})$$

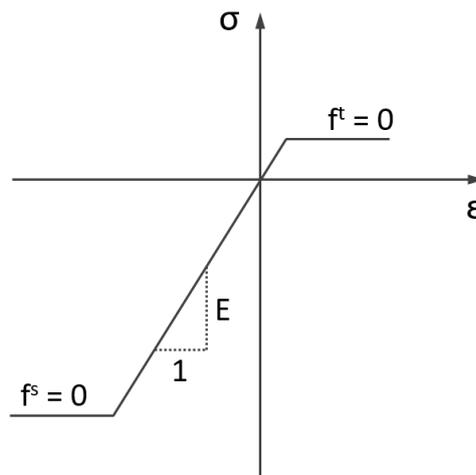


Abbildung 4-5: Elasto-plastizität mit Scher- und Zugfestigkeit (Fließflächen f_s und f_t) /2/

Wie in Abbildung 4-5 dargestellt sind die elastischen Spannungen durch die Scherfestigkeit (Fließfläche f_s) und die Zugfestigkeit (Fließfläche f_t) beschränkt. Wenn die Fließflächen erreicht werden, treten plastische Dehnungen auf.

Die plastischen Dehnungszunahmen nach Gleichung (Gl. 4-1) ergeben sich hierbei unter Berücksichtigung der Scherfestigkeit nach Mohr-Coulomb sowie einer Begrenzung der Zugspannungen (tension cut-off). Zur Berücksichtigung der Anisotropie der Festigkeit, wird hierbei zwischen Matrix- und Schichtungsfestigkeit (Indizes m bzw. j) unterschieden.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 20

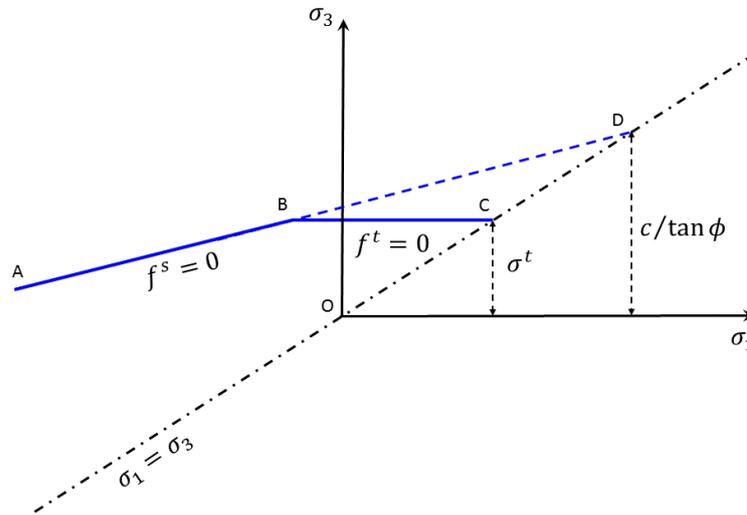


Abbildung 4-6: Fließflächen für Scherversagen f_{sm} und Zugversagen f_{tm} der Matrix /2/

Entsprechend Abbildung 4-6 ergibt sich die Gleichung der Fließfläche für Scherversagen der Matrix zu

$$f_m^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\varphi - 2c_m \sqrt{N_\varphi} \quad \text{mit} \quad N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi_m}{1 - \sin\varphi_m} \quad (\text{Gl. 4-5})$$

Wobei σ_3 die größte und σ_1 die kleinste Hauptspannung ist (Druckspannungen sind entsprechend den Vorzeichenkonventionen der Technischen Mechanik negativ). Die Kohäsion c_m und der Reibungswinkel φ_m sind hierbei die Scherfestigkeitsparameter der Matrix. Zur Berechnung der plastischen Dehnungen wird eine nichtassoziierte Fließregel angewendet. Zugversagen auf der Matrix wird berücksichtigt durch

$$f_m^t = \sigma_3 - \sigma_m^t \quad (\text{Gl. 4-6})$$

wobei σ_m^t die Zugfestigkeit der Matrix ist. Zur Berechnung der plastischen Dehnungen wird hierbei eine assoziierte Fließregel angewendet.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 21

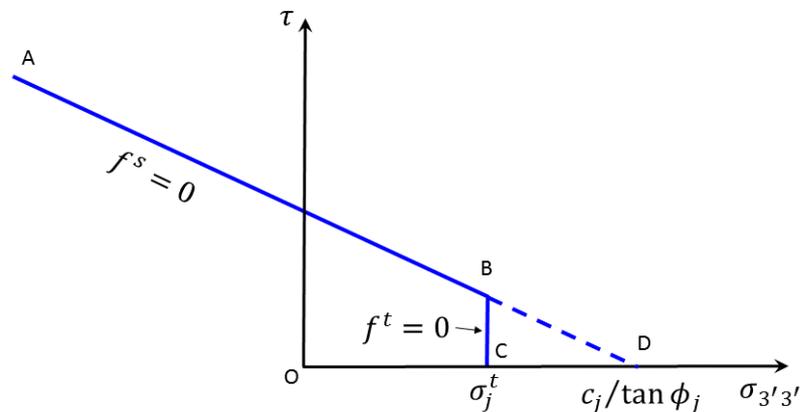


Abbildung 4-7: Fließflächen für Scherversagen f_{sj} und Zugversagen f_{tj} der Schichtung /2/

Wie in Abbildung 4-7 dargestellt ergibt sich die Gleichung der Fließfläche für Scherversagen der Schichtung zu

$$f_j^s = \tau + \sigma_N \tan \phi_j - c_j \quad (\text{Gl. 4-7})$$

wobei τ die Schubspannung und σ_N die Normalspannung auf einer Fläche parallel zur Schichtungsrichtung sind. Die Kohäsion c_j und der Reibungswinkel ϕ_j sind hierbei die Scherfestigkeitsparameter der Schichtung. Zur Berechnung der plastischen Dehnungen wird eine nicht-assozierte Fließregel angewendet.

Zugversagen auf der Schichtung wird berücksichtigt durch

$$f_j^t = \sigma_N - \sigma_j^t \quad (\text{Gl. 4-8})$$

Wobei σ_{ij} die Zugfestigkeit der Schichtung ist. Zur Berechnung der plastischen Dehnungen wird hierbei eine assoziierte Fließregel angewendet.

Zur Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens des Gebirges wird im vorliegenden Stoffgesetz zusätzlich zur Spitzenscherfestigkeit, sowohl auf der Matrix als auch auf der Schichtung, eine von den plastischen Dehnungen abhängige Entfestigung bis zu einer Restscherfestigkeit berücksichtigt. Wie in Abbildung 4-8 dargestellt, erfolgt die Entfestigung von Scherfestigkeit und Zugfestigkeit in linearer Abhängigkeit von definierten Entfestigungsparametern. Zur Unterscheidung zwischen Matrix und Schichtung werden hierbei gesonderte Entfestigungsparameter verwendet. Die Abnahme der Scherfestigkeitsparameter Kohäsion c_j Reibungswinkel ϕ und Dilatanzwinkel ψ der Matrix wird in Abhängigkeit des Entfestigungsparameters $\Delta\kappa^s$ vollzogen,

$$\Delta\kappa^s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta\varepsilon_1^{Ps} - \Delta\varepsilon_m^{Ps})^2 + (\Delta\varepsilon_m^{Ps})^2 + (\Delta\varepsilon_3^{Ps} - \Delta\varepsilon_m^{Ps})^2} \quad (\text{Gl. 4-9})$$

Wobei $\Delta\varepsilon_m^{Ps}$ das volumetrische plastische Scherdehnungsinkrement ist, mit

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 22

$$\Delta \varepsilon_m^{Ps} = \frac{1}{3} (\Delta \varepsilon_1^{Ps} - \Delta \varepsilon_3^{Ps}) \quad (\text{Gl. 4-10})$$

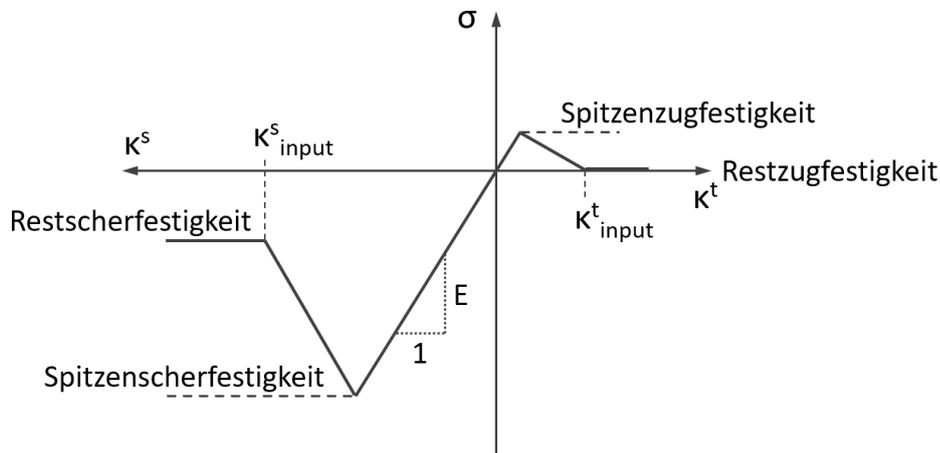


Abbildung 4-8: Abnahme der Scher- und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Entfestigungsparametern

Der Index s in den Gleichungen (Gl. 4-9)(Gl. 4-10) steht für die Betrachtung der Scherfestigkeit. Die Abnahme der Zugfestigkeit der Matrix wird in Abhängigkeit von dem Entfestigungsparameter $\Delta \varepsilon_m^{Pt}$ vollzogen.

$$\Delta \kappa_m^t = \Delta \varepsilon_3^{Pt} \quad (\text{Gl. 4-11})$$

Die Abnahme von Kohäsion c_j , Reibungswinkel ϕ_j und Dilatanzwinkel ψ_j der Schichtung wird in Abhängigkeit des Entfestigungsparameters $\Delta \kappa_j^s$ vollzogen,

$$\Delta \kappa_j^s = \frac{1}{3} \sqrt{2(\Delta \varepsilon_{3'3'}^{Ps})^2 + (\Delta \varepsilon_{1'3'}^{Ps})^2 + (\Delta \varepsilon_{2'3'}^{Ps})^2} \quad (\text{Gl. 4-12})$$

Die mit einem Strich versehenen Zahlen im Fußindex weisen darauf hin, dass es sich hierbei um ein in Bezug zum globalen Koordinatensystem transformiertes Koordinatensystem x' , y' und z' handelt. Hierbei zeigt x' in Fallrichtung der Schichtung, y' in Streichrichtung und z' in Normalenrichtung der Schichtflächen. Für die Abnahme der Zugfestigkeit der Schichtung wird $\Delta \kappa_j^t$ verwendet.

$$\Delta \kappa_j^t = \Delta \varepsilon_{3'3'}^{Pt} \quad (\text{Gl. 4-13})$$

Weitere Angaben zur Implementierung des Entfestigungsverhaltens sind in /2/ enthalten.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 23

Für die Simulationen kommen die in Tabelle 4-1 aufgeführten Parameter zum Ansatz. Der Parametersatz H3 wurde anhand von Konvergenzmessungen von Bestandsstrecken des Zwischenmittels abgeleitet /3/.

Tabelle 4-1: Parameter für das angewendete Stoffgesetz

	<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Zwischenmittel (Homogenbereich H3 /3/)</i>
	Dichte	[kg/m ³]	2500
	E-Modul	[MPa]	3000
	Querdehnzahl	[-]	0,25
	Plastische Dehnung bis Restfestigkeit	[-]	0,01
<i>Matrix</i>	Kohäsion / Restkohäsion	[MPa]	2,5 / 0,5
	Reibungswinkel / Restreibungswinkel	[°]	34 / 34
	Zugfestigkeit / Restzugfestigkeit	[MPa]	0 / 0
	Dilatanzwinkel / Restdilatanzwinkel	[°]	0 / 0
<i>Schichtung</i>	Kohäsion / Restkohäsion	[MPa]	0,05 / 0,05
	Reibungswinkel / Restreibungswinkel	[°]	25 / 25
	Zugfestigkeit / Restzugfestigkeit	[MPa]	0 / 0
	Dilatanzwinkel / Restdilatanzwinkel	[°]	25 / 25

Thermisches Verhalten

Für die thermische und thermomechanische Analyse wird ein isotropes Materialmodell mit konduktivem Wärmetransport verwendet. Dieses ermöglicht die Simulation der instationären Wärmeleitung in Materialien und die Entwicklung von thermisch induzierten Verschiebungen und Spannungen.

Die an der Konduktion beteiligten Variablen in FLAC3D sind die Temperatur und die drei Komponenten des Wärmestroms. Diese Variablen sind durch die Energiebilanzgleichung und die aus dem Fourier'schen Gesetz der Wärmeleitung abgeleiteten Transportgesetze miteinander verbunden. Setzt man das Fourier'sche Gesetz in die Energiebilanzgleichung ein, so erhält man die Differentialgleichung für die Wärmeleitung, die für bestimmte Geometrien und Eigenschaften unter bestimmten Rand- und Anfangsbedingungen gelöst werden kann. Thermische Volumendehnungen werden in die mechanischen konstitutiven Gesetze eingeführt, um thermische Spannungskopplungen zu berücksichtigen.

Der differentielle Ansatz der Energiebilanz hat die Form

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (\text{Gl. 4-14})$$

wobei q_i der Vektor des Wärmestroms in [W/m²], q_v die volumetrische Wärmequellenintensität in [W/m³] und ζ die pro Volumeneinheit gespeicherte Wärme in [J/m³] sind. Im Allgemeinen können

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 24

Temperaturänderungen durch Änderungen sowohl der Energiespeicherung als auch der volumetrischen Dehnung verursacht werden. Das thermische Stoffgesetz, das diese Parameter miteinander verknüpft, lautet

$$\frac{\partial T}{\partial t} = M_{th} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \beta_{th} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (\text{Gl. 4-15})$$

wobei T die Temperatur und M_{th} und β_{th} Materialeigenschaften sind.

In FLAC3D /2/ wird mit $M_{th} = 1/(\rho C_v)$ und $\beta_{th} = 0$ ein Sonderfall dieses Gesetzes betrachtet (ρ ist die Dichte in $[\text{kg}/\text{m}^3]$ und C_v ist die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen in $[\text{J}/\text{kgK}]$). Hierbei wird unterstellt, dass Dehnungsänderungen eine vernachlässigbare Rolle bei der Veränderung der Temperatur haben - eine gültige Annahme für quasi-statische mechanische Probleme mit Festkörpern und Flüssigkeiten.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Gl. 4-16})$$

Durch Einsetzen von Gleichung (Gl. 4-16) in Gleichung (Gl. 4-14) erhält man die Energiebilanzgleichung.

$$-q_{i,i} + q_v = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Gl. 4-17})$$

Das Transportgesetz, das die Beziehung zwischen dem Wärmestromvektor q und dem Temperaturgradienten ∇T definiert, ist das Fourier'sche Gesetz. Für einen stationären, homogenen und isotropen Festkörper hat dieses Stoffgesetz folgende Form

$$q = -\lambda \nabla T \quad (\text{Gl. 4-18})$$

Wobei λ die Wärmeleitfähigkeit in $[\text{W}/\text{m}^*\text{K}]$ ist. Für das Gebirge wird eine isotrope Wärmeleitfähigkeit angesetzt.

Die in den Simulationen verwendeten Parameter werden in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

4.2.2 Anker

Mechanisches Verhalten

Die Spreizhülsen- und Klebeanker werden in den numerischen Berechnungen durch ein oder mehrere sogenannten Cable- Strukturelemente abgebildet /2/. Die Cable-Strukturelemente sind eindimensionale finite Elemente mit zwei Knoten und einem axial ausgerichteten translatorischen Freiheitsgrad pro Knoten. Die axiale Steifigkeit K wird durch die Querschnittsfläche A des Strukturelements, den Elastizitätsmodul E und die Länge L bestimmt:

$$K = \frac{AE}{L} \quad (\text{Gl. 4-19})$$

Jedes Element verhält sich wie ein ideal elasto-plastisches Material mit axialer Zug- und Druckfestigkeit, jedoch ohne Biegesteifigkeit. Das Materialverhalten ist in Abbildung 4-9 schematisch dargestellt. Zu beachten ist, dass in der Realität die Ankerkraft nach der Streckgrenze mit zunehmender Axialdehnung bis zur maximalen Zugfestigkeit (Bruchdehnung) weiter ansteigt. Dieses Verfestigende Verhalten kann mit dem Cable-Stoffmodell nicht modelliert werden. Daher wird in den numerischen Berechnungen die Streckgrenze als maximale Zugfestigkeit verwendet. Die verwendeten mechanischen Parameter entsprechen denen in Tabelle 3-3. Für die SPH-Anker wird konservativ abdeckend ein Wert von 78,48 kN (8 Tonnen) für die maximale Zugfestigkeit angesetzt.

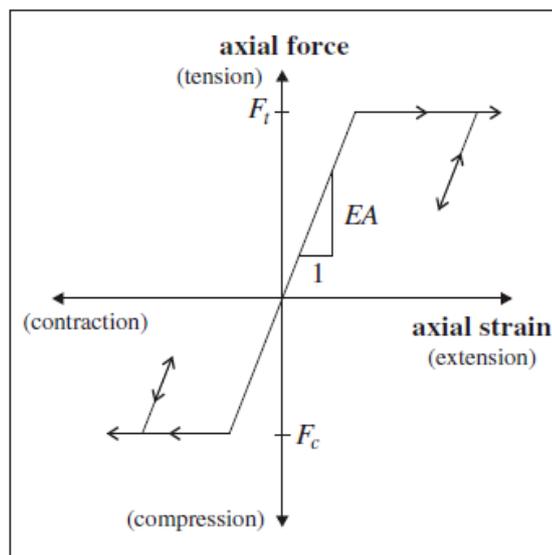


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Materialverhaltens der Cable Strukturelemente /2/

Die Interaktion der Cable Strukturelemente mit den Zonen des Modells wird über das Scherverhalten des kohäsiven Füllstoffs (Kleber) im Ringraum zwischen Stahlzugglied und Gebirge bestimmt (Abbildung 4-10). Dieses wird durch die Schersteifigkeit kg , die Kohäsion cg , den Reibungswinkel ϕg des Füllstoffs sowie den Umfang des Ankerbohrlochs pg und den Gebirgsdruck σm definiert (Abbil-

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 26

dung 4-11). Nach Überschreitung der lokal zulässigen Scherspannung tritt plastisches Fließen/Gleiten ein. Darüber hinaus können Cable Strukturelemente auch punktuell beansprucht oder vorgespannt werden.

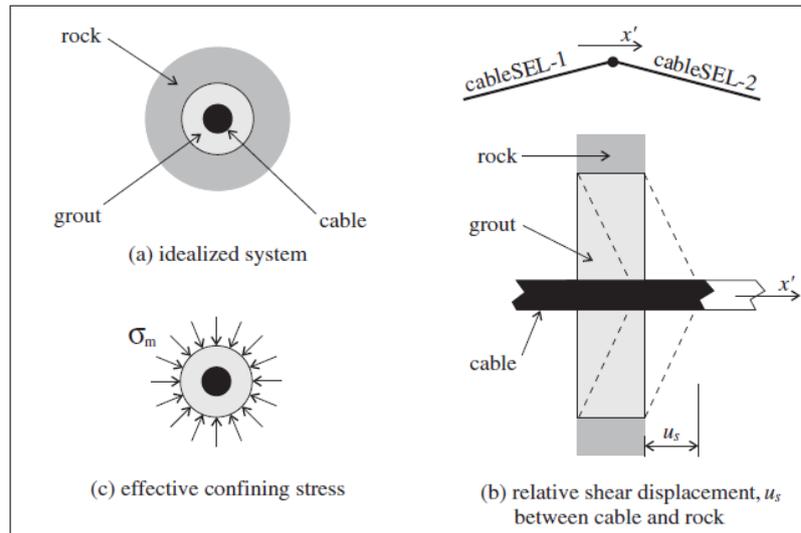


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Systems aus Anker und Füllstoff /2/

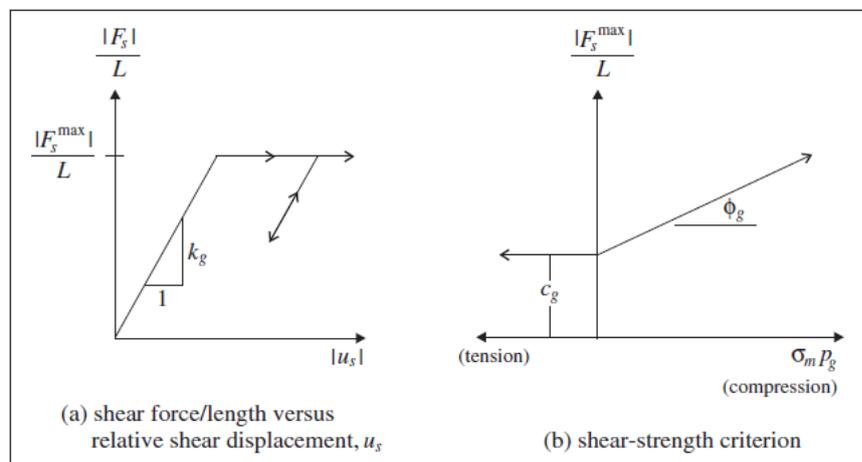


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung des Materialverhaltens von Füllstoff /2/

Thermisches Verhalten

Für die thermische Simulation wird die Wärmeleitung im Strukturelement nicht berücksichtigt; nur die lineare Wärmeausdehnung ist im Programm implementiert. Die Temperatur an den Knoten des Strukturelements wird durch Interpolation der Temperaturen an den Gitterpunkten in der Host-Zone bestimmt. Für Cable-Strukturelemente wird die Temperatur aus den Werten an den beiden Knoten gemittelt.

In der Realität erfolgt die Wärmeausbreitung im Stahl jedoch wesentlich schneller als im Gebirge. Aus diesem Grund wurden zwei kleinräumige Ankermodelle jeweils für Sprezhülsenanker (SPH)

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 27

und Klebeanker (KA) erstellt, um die Wärmeausbreitung im Ankerstahl zu simulieren. Die verwendeten thermischen Parameter sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Für die rechnerischen Analysen werden typische Werte aus der Literatur für Wärmekapazität /15/ und Wärmeleitfähigkeit /16/ angesetzt. Um Ungewissheiten zu behandeln, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Diese zeigt, dass die thermischen Parameter des Klebers keinen großen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Ankerstahl haben.

Tabelle 4-2: Thermische Parameter von Gebirge, Ankerstahl und Kleber bei Raumtemperatur

Bezeichnung	Einheit	Gebirge	Ankerstahl	Kleber
Dichte	[kg/m ³]	2500	7900	1100
Wärmeausdehnungskoeffizient	[1e-6/K]	10	12,2	N/A
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg*K]	1005 /5/	446,7	1050 /15/
Wärmeleitfähigkeit	[W/m*K]	1,51 /5/	53	0,2 /16/

Die thermischen Eigenschaften des Baustahls wurden temperaturabhängig modelliert. Hierbei werden der Wärmeausdehnungskoeffizient α , die spezifische Wärmekapazität C und die Wärmeleitfähigkeit λ nach DIN EN 1993-1-2 in den thermischen Berechnungen angesetzt. Der Anwendungsbereich erstreckt sich von 20 °C bis 600 °C. Abbildung 4-12 zeigt die Temperaturabhängigkeit der thermischen Parameter. Allerdings wird der Zusammenhang zwischen Bruchdehnung und Temperatur in dieser Norm jedoch nicht definiert. Weitere Informationen über die Bruchdehnung sind in Kapitel 4.6.1 zu finden.

$$\alpha = (1,2 \times 10^{-5}T + 0,4 \times 10^{-8}T^2 - 2,416 \times 10^{-4}) / (T - 20) \quad (\text{Gl. 4-20})$$

$$C = 425 + 7,73 \times 10^{-1}T - 1,69 \times 10^{-3}T^2 + 2,22 \times 10^{-6}T^3 \quad (\text{Gl. 4-21})$$

$$\lambda = 54 - 3,33 \times 10^{-2}T \quad (\text{Gl. 4-22})$$

Die zusätzliche Axialkraft, die durch die thermische Ausdehnung im Strukturelement erzeugt wird, berechnet sich nach folgender Formel (Druckkräfte sind positiv)

$$\Delta F = EA\alpha\Delta T \quad (\text{Gl. 4-23})$$

- wobei
- E: das Elastizitätsmodul des Elements,
 - A: die Querschnittsfläche,
 - α : der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient und
 - ΔT : die Temperaturzunahme für das Element.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 28

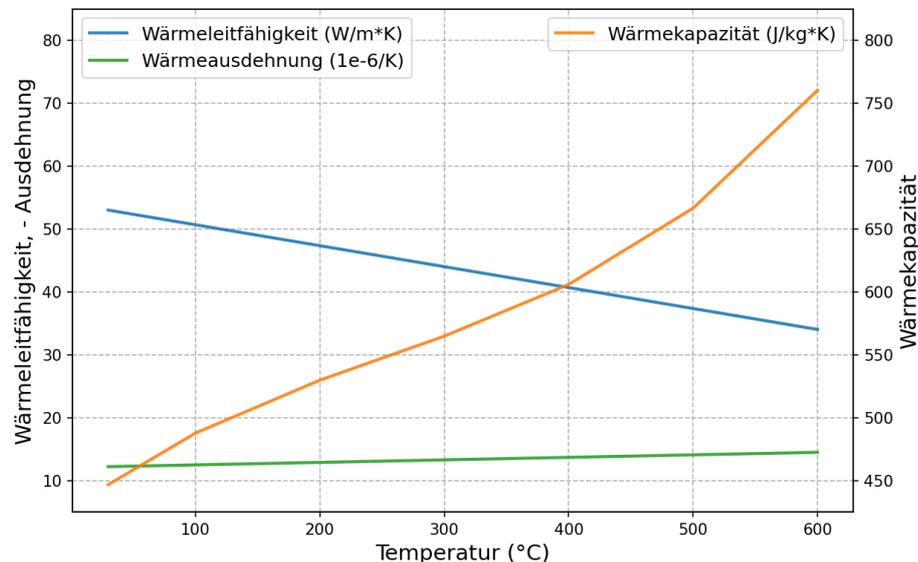


Abbildung 4-12: Angesetzte thermische Eigenschaften vom Baustahl in Abhängigkeit der Temperatur (nach DIN EN 1993-1-2)

4.3 Berechnungskonzept und –abfolge

Für die rechnerische Analyse der gebirgsmechanischen Beanspruchung von Gebirge und Ausbau infolge eines Brandfalls sowie die Ermittlung von potenziellen Bruchkörpern werden folgende aufeinander aufbauende Analysen verwendet:

- (1) Im ersten Schritt werden im Rahmen von statisch - mechanischen Berechnungen der jeweilige gebirgsmechanische Ausgangszustand vor dem Brandereignis ermittelt. Hierfür werden unter Nutzung des in Kapitel 4.1 beschriebenen Modells die Auffahrung, Lastumlagerung und Standzeit der Strecken simuliert. Aufgrund der zwei betrachteten Ankertypen und der Betrachtung einer Sanierung mit Nachschnitt und Ersatz der Systemankerung ergeben sich vier Fälle in denen ein repräsentativer (abdeckender) Ausgangszustand vor Brandereignis als Ausgangspunkt der folgenden thermo-mechanischen Analysen ermittelt wird (siehe Kapitel 4.4).
- (2) Da – wie oben beschrieben – die Wärmeleitung innerhalb der Strukturelemente (Anker) nicht abgebildet werden kann, finden in vorlaufenden, rein thermischen Modellierungen Berechnungen zur Temperaturentstehung im Stahlzugglied, im Kleber und im Nahbereich der Bohr-löcher statt. In diesen Analysen werden kleinräumige rotationssymmetrische Modelle der beiden Ankertypen verwendet (siehe Kapitel 4.5). Die Berechnungen dienen der Bewertung der Tragfähigkeit von Ankerstahl und Kleber auf Basis der berechneten Maximaltemperaturen.
- (3) Unter Nutzung der unter (1) berechneten Ausgangszustände und des Temperatur-Zeit-Verlaufs (Abbildung 3-4) erfolgen thermo-mechanisch gekoppelte Berechnungen zur Simulation des Brandereignisses. Hierfür werden die Temperaturen als innere thermische Randbedingung auf den Gitterpunkten angesetzt (siehe Kapitel 4.6).

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NAAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 29

4.4 Ausgangszustand vor dem Brandereignis

4.4.1 Ausgangszustand ohne Sanierung

Nach Setzen der Anfangs- und Randbedingungen (s.o.) erfolgt die Initialisierung des Modellbereiches mit einem anisotropen Grundspannungszustand mit den Komponenten $\sigma_H = \sigma_h = 0,67 * \sigma_v$. Nach Gleichgewichtssiteration wird die Auffahrung der Strecken (nacheinander) modelliert. Zeitgleich mit jeder Auffahrung wird der Einbau aller Anker (initial schlaff) simuliert, so dass die Anker die volle Verschiebung erfahren und die volle Last aufnehmen. Dies ist eine konservative Annahme, da in der Realität die Anker aus technischen Gründen nicht gleichzeitig mit der Auffahrung eingebaut werden können. Es wurden zwei Rechenfälle, jeweils für Spreizhülsenanker (AZ_SPH) und Klebeanker (AZ_KA), durchgeführt. Die erste aufgefahrene ELK wurde dann für Brandsimulation verwendet. Tabelle 4-3 stellt die Berechnungssequenz dar.

Tabelle 4-3: Berechnungssequenzen (ohne Sanierung)

1.	Grundspannungszustand	Berechnung des statischen Gleichgewichtes
2a.	Auffahrung ELK	Instantane Auffahrung (Deaktivieren der Zonen der Strecken)
2b.	Ausbau	Simulation des Einbaus der Systemankerung (cable-Elemente),
3.	Konvergenz	Berechnung des statischen Gleichgewichtes, Als Ausgangszustand speichern

In Anhang 1 werden Ergebnisse für den Fall AZ_SPH dargestellt. Für diesen wird eine weitreichende Auflockerungszone anhand der gesamten plastischen Verformung (ϵ_{tot}) ermittelt. Ab 1% plastischer Verformung befindet sich das Gebirge auf Restfestigkeitsniveau. Der Grenzwert von 5% ist ein Indikator für eine starke Auflockerung. Der Bereich mit $\epsilon_{tot} > 1\%$ reicht im Westen bis ca. 11,8 m und im Osten bis ca. 8,5 m (Abbildung 7-1), während sich der Bereich mit $\epsilon_{tot} > 5\%$ im Westen bis ca. 5,7 m und im Osten bis ca. 3,8 m erstreckt (Abbildung 7-2). Da der SPH-Anker gleichmäßig gedehnt wird, entsteht über die Länge des Ankerstabs eine konstante Axialspannung und -dehnung. Die meisten SPH-Anker weisen eine axiale Dehnung von 5% bis 12,5% auf. Die maximale axiale Dehnung des Ankers liegt bei ca. 14,6%. Die berechneten Beträge liegen somit unterhalb der Bruchdehnung der Ankerstäbe der SPH von 20% /4/. Die maximale Verschiebung tritt an der Sohle auf und beträgt 94,8 cm. An der Firste beträgt die maximale Verschiebung 81 cm. Die vertikale Konvergenz beläuft sich auf 154,6 cm und die horizontale Konvergenz auf 86,9 cm. Das Verhältnis zwischen vertikaler und horizontaler Konvergenz beträgt 1,8. Als Auslesepunkte des Rechenmodells wurden Knoten in einem Abstand von 23 cm zur Kontur gewählt – vergleichbar zur Verankerungstiefe der Konvergenzbolzen in situ.

Die am generischen Rechenmodell ermittelten Konvergenzwerte liegen in der gleichen Größenordnung wie die in den Einlagerungskammern im tektonisch beanspruchten Zwischenmittel ermittelten Messdaten und decken diese betragsmäßig konservativ ab (siehe Abbildung 3-2). Die Plausibilität des Modells ist somit gegeben.

In Anhang 2 werden Ergebnisse für den Fall AZ_KA dargestellt. Aufgrund der höheren Tragfähigkeit der 2,4 m langen Klebeanker ist die Auflockerungszone deutlich kleiner als bei AZ_SPH. Der Bereich

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 30

mit $\epsilon_{tot} > 1\%$ reicht im Westen bis ca. 9,2 m und im Osten bis ca. 6,9 m (Abbildung 7-4), während sich der Bereich mit $\epsilon_{tot} > 5\%$ im Westen bis ca. 4,7 m und im Osten bis ca. 3,6 m erstreckt (Abbildung 7-5). Da der Klebeanker ungleichmäßig gedehnt wird, ist die Axialspannung und -dehnung abschnittsweise unterschiedlich. Mit einer Ausnahme weisen alle Anker eine maximale axiale Dehnung von weniger als 12 % auf. Die maximale axiale Dehnung dieses Ankers liegt bei ca. 16,6%, die Bruchdehnung beträgt 20% /4/. Die maximale Verschiebung tritt an der Sohle auf und beträgt 82,5 cm; an der Firste maximal 49 cm. Die vertikale Konvergenz beläuft sich auf 116,2 cm und die horizontale Konvergenz auf 64,5 cm.

4.4.2 Ausgangszustand mit Sanierung

Für stark konvergierende Streckenabschnitte – dies ist im Zwischenmittel lokal der Fall – werden betrieblich Sanierungsmaßnahmen vorgesehen, um das Sollprofil wiederherzustellen. Im Zuge der Nachrissarbeiten wird der vorhandene Ausbau partiell oder vollständig ersetzt. Es ist der Einsatz von 2,4 m langen Klebeankern (Spezifikation siehe Kapitel 3.4) geplant. Für die Simulation wird der Berechnungsablauf folgendermaßen vereinfacht: Basierend auf den vorherigen Ausgangszuständen (AZ_SPH und AZ_KA)² wird das Gebirge allseitig um ca. 23 cm nachgeschnitten. In diesem Schritt werden die alten Anker deaktiviert und gleichzeitig die neuen KA aktiviert. Durch die anschließende Gleichgewichtsiteration werden die frei gewordenen Ankerkräfte der deaktivierten Anker im Modellbereich verteilt, wobei sowohl das Gebirge als auch die neuen Anker einen Teil der Last aufnehmen.

In Anhang 3 werden Ergebnisse für den Fall AZ_SPH_SA dargestellt. Die Auflockerungszone ist geringfügig größer als bei AZ_SPH (Abbildung 7-7). Der Bereich mit $\epsilon_{tot} > 1\%$ reicht im Westen bis ca. 11,2 m und im Osten bis ca. 8,8 m, während sich der Bereich mit $\epsilon_{tot} > 5\%$ im Westen bis ca. 5,5 m und im Osten bis ca. 4,0 m erstreckt (Abbildung 7-8). Da der Klebeanker ungleichmäßig gedehnt wird, ist die Axialspannung und -dehnung abschnittsweise unterschiedlich. Die maximale axiale Dehnung des Ankers liegt bei ca. 3,4% und somit deutlich unterhalb der Bruchdehnung (20%). Die maximale Verschiebung tritt nicht mehr an der Sohle, sondern an der Firste auf und beträgt 81,9 cm. An der Sohle beträgt die maximale Verschiebung 49 cm. Die vertikale Konvergenz beläuft sich auf 129,7 cm und die horizontale Konvergenz auf 89,7 cm.

In Anhang 4 werden Ergebnisse für den Fall AZ_KA_SA dargestellt. Dieser ist qualitativ mit AZ_SPH_SA vergleichbar. Zu erwähnen ist, dass die plastische Verformung im Firstbereich geringer als bei den vorangegangenen Modellen ausfällt.

Tabelle 4-4 fasst ausgewählte Ergebnisse der unterschiedlichen Ausgangszustände zusammen. Zu beachten ist, dass die Auslesepunkte der Konvergenzquerschnitte ca. 23 cm tief im Gebirge liegen, daher ist der Konvergenzwert etwas kleiner als die Summe der Verschiebungen.

² In den elasto-plastischen Modellierungen sind die Ausgangszustände im rechnerischen Gleichgewicht, während in situ noch langfristig Spannungs-Umverteilungen mit degressivem Konvergenzverhalten auftreten. Dem wird durch die Wahl eines konservativ abdeckenden Ausgangszustandes Rechnung getragen.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 31

Tabelle 4-4: Zusammenstellung ausgewählter Ergebnisse der Ausgangszustände

			AZ_SPH	AZ_SPH _SA	AZ_KA	AZ_KA _SA
ALZ (eps > 1%)	nach Westen	[m]	11,8	11,2	9,2	10,1
	nach Osten	[m]	8,5	8,8	6,9	8,3
ALZ (eps > 5%)	nach Westen	[m]	5,7	5,5	4,7	5,2
	nach Osten	[m]	3,8	4,0	3,6	3,8
max. Verschie- bung	Firste	[cm]	81,0	81,2	49,0	58,1
	Sohle	[cm]	94,8	72,2	82,5	73,4
Konvergenz	Vertikal	[cm]	154,6	129,7	116,2	108,2
	Horizontal	[cm]	86,9	89,7	64,5	74,8
max. axiale Ankerdeh- nung	SPH	[%]	14,6	-	-	-
	KA	[%]	-	3,4	16,6	3,9

4.5 Modellierung der Temperatursausbreitung im Anker

Da die Wärmeleitung in den Strukturelementen von FLAC3D nicht berücksichtigt wird, werden zwei kleinräumige Anker-Modelle für SPH und KA verwendet, um die Temperaturverteilung im Ankerstahl, angrenzenden Gebirge und ggfs. Kleber zu simulieren. Beide Modelle sind rotationssymmetrisch. Die Rotationsachse entspricht der Bohrachse. Es wird jeweils ein umgebender Gebirgsbereich von 20 cm in radialer Richtung modelliert. Der Wärmeeintrag infolge Brand wird durch die Beaufschlagung der Knoten am linken Modellrand mit dem Temperatur-Zeit-Verlauf der Firste entsprechend Abbildung 3-4 umgesetzt. Die thermischen Parameter entsprechen den Angaben in Kapitel 4.2.

Auf die Abbildung der Ankerplatte und des Ankerkopfes wurde verzichtet.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 32

4.5.1 Sprezhülsenanker

Das Berechnungsmodell weist zwei Materialbereiche auf: Gebirge und Ankerstahl, siehe Abbildung 4-13. Der hohle Ringspalt (Luft) wird als Isolator modelliert, d.h. eine Wärmeübertragung zwischen Ankerstahl und Gebirge ist nur im Endbereich des Ankers (Spreizelement) möglich. Dieser Ansatz ist im Hinblick auf die Ermittlung der Maximaltemperaturen im Stahlzugglied konservativ.

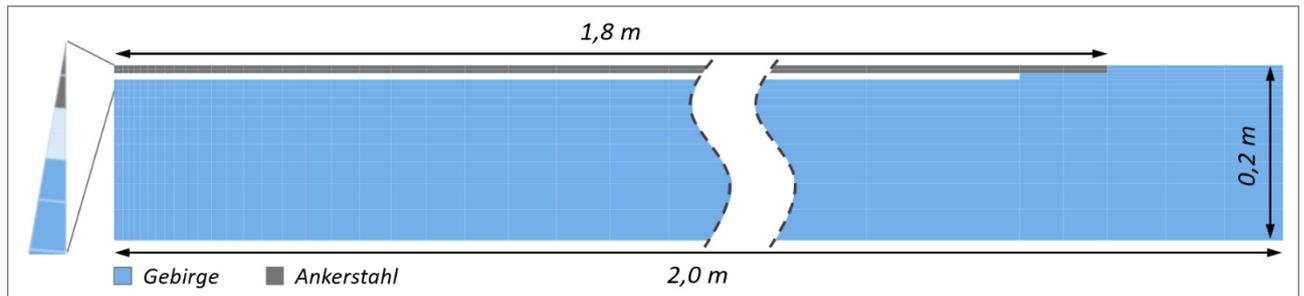


Abbildung 4-13: Modellgeometrie des kleinräumigen Anker-Modells für Sprezhülsenanker

Während der thermischen Simulation wurden die Temperaturen an 20 Auswertepunkten im Stahl entlang der Ankerstrecke erfasst. Die Auswertepunkte waren äquidistant auf die Länge des Ankers (1,8 m) verteilt. Die Temperatur-Zeit-Verläufe der 10 konturnähest gelegenen Punkte sind in Abbildung 7-13 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen ein zügiges Ausbreiten der Temperatur im Ankerstahl. Am ersten Auswertepunkt (9 cm von der Kontur entfernt) werden Temperaturen von ca. 390°C erreicht. Für den zweiten Auswertepunkt (18 cm) betragen diese noch ca. 250°C.

4.5.2 Klebeanker

Das Berechnungsmodell weist drei Materialbereiche auf: Gebirge, Ankerstahl und Kleber, siehe Abbildung 4-14. Konduktive Wärmeübertragung zwischen Ankerstahl und Gebirge ist durch den Kleber möglich.

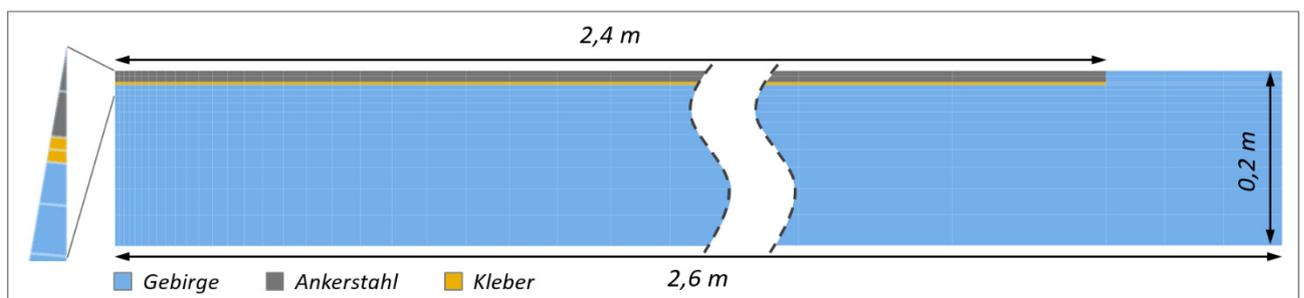


Abbildung 4-14: Modellgeometrie des kleinräumigen Anker-Modells für Klebeanker

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 33

Während der thermischen Simulation wurden die Temperaturen an 20 Punkten im Stahl entlang der Ankerstrecke erfasst. Die Auswertepunkte waren äquidistant auf die Länge des Ankers (2,4 m) verteilt. Die Temperatur-Zeit-Verläufe der 10 konturnähest gelegenen Punkte sind in Abbildung 7-14 dargestellt. Aufgrund des Abfuhr der Wärme über den Kleber ins Gebirge liegen für den KA deutlich geringere Maximaltemperaturen im Verlauf der Simulation vor: Am ersten Auswertepunkt (12 cm von der Kontur entfernt) werden Temperaturen von ca. 180°C erreicht. Für den zweiten Auswertepunkt (24 cm) betragen diese nur noch < rd. 70°C.

4.6 Brandsimulation

4.6.1 Thermo-plastisches Verhalten von Stahl und Kleber

Für die Bewertung der Tragfähigkeit (Steifigkeit und Festigkeit) von Ankern im Brandfall ist die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften des Ankerstahls bei hohen Temperaturen erforderlich. Für die hier betrachteten Ankerstähle (Tabelle 3-3) liegen keine spezifischen Daten vor. Daher wird in den Simulationen das Tragverhalten der Anker durch ein ideal elastisch – ideal plastisches Materialverhalten approximiert. Der Temperatureinfluss auf E-Modul und Zugfestigkeit der Stahlzugglieder wird gemäß DIN EN 1993-1-2, Bild 3.2 berücksichtigt (Abbildung 4-15). Zur Anpassung der Festigkeitseigenschaften an das aktuelle Temperaturfeld werden die Ergebnisse der Berechnung aus Kapitel 4.5 verwendet.

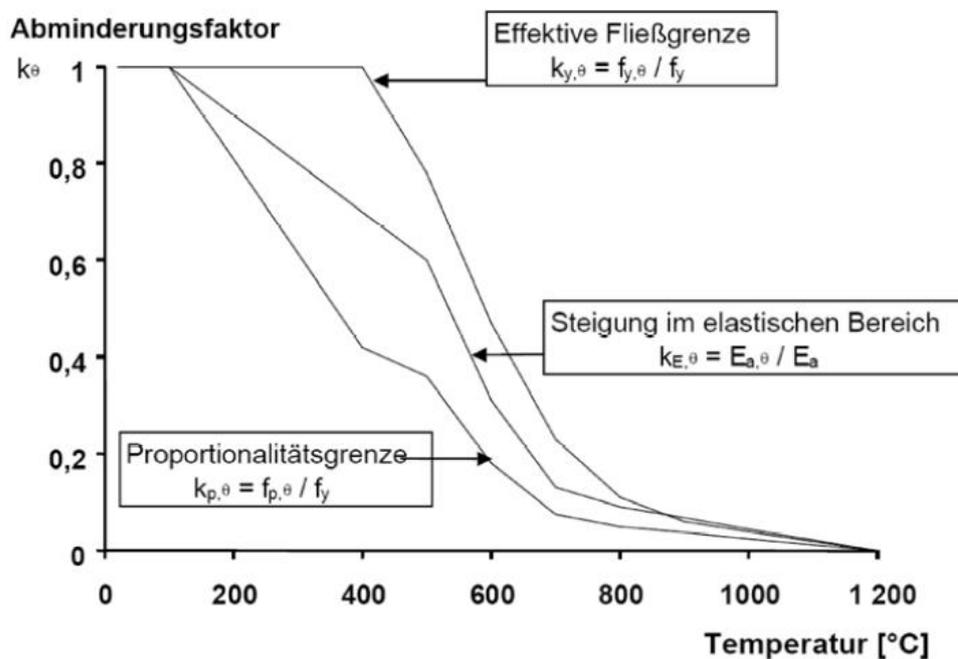


Abbildung 4-15: Abminderungsfaktoren für die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Kohlenstoffstahl unter erhöhten Temperaturen. Bild 3.2 der DIN EN 1993-1-2 (Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Tragwerksbemessung für den Brandfall)

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 34

Ferner werden im Folgenden Untersuchungen im Technikumsmaßstab an vergleichbaren Materialien kurz dargestellt und hinsichtlich des Tragverhaltens eingeordnet. In umfangreichen Untersuchungen (*Lapuebla-Ferri et al. (2021) /6/*) wurde der Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften von Stahl und der Temperatur untersucht. Bei den Proben handelte es sich um warmgewalzte Stahlstäbe mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Nennstreckgrenze von 500 MPa und der Duktilitätsklasse C. Diese Klasse entspricht den höchsten Duktilitätsanforderungen nach EN 1992-1-1.

Der isotherme stationäre Versuch ist die klassische Methode zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften eines Stahlstabes bei konstanter Temperatur. Die verwendeten Temperatur- und Belastungsregime sind in Abbildung 4-16 dargestellt. Die Probe wurde von Raumtemperatur θ_0 mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 °C/min auf eine Zieltemperatur θ aufgeheizt. Der Temperaturbereich erstreckte sich von Raumtemperatur bis 800 °C in Schritten von 100 °C. Sobald die Zieltemperatur erreicht war, wurde sie für 30 Minuten (t_s) gehalten. Danach wurde die Probe einer Zugbelastung bis zum Bruch ausgesetzt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abbildung 4-17 zeigen eine abnehmende Tendenz hinsichtlich Bruchspannung und insbesondere der Bruchdehnung mit steigender Zieltemperatur (hinsichtlich der Anomalie bei 700 °C und 800 °C wird angenommen, dass dieses Verhalten mit der metallographischen Umwandlung zusammenhängt).

Im Gegensatz zu isothermen, stationären Versuchen können anisotherme, instationäre Versuche (Abbildung 4-18) die komplexen und kombinierten Auswirkungen von Belastung und zunehmender Temperatur, die während eines Brandes in dem Ankerstahl auftreten, realistischer erfassen. Die Probe wurde in den Ofen gelegt und in die Prüfmaschine eingespannt, um sie während des gesamten Versuchs auf Zug zu belasten. Unter der Annahme, dass der Brand ausbricht, wenn der Anker schon Last aufweist, wurde die Zugkraft konstant gehalten. Das Belastungsniveau entsprach einem Prozentsatz der Streckgrenze f_y des Materials bei Raumtemperatur θ_0 . Anschließend wurde die Temperatur mit einer konstanten Rate von 10 K/min bis zum Versagen der Probe erhöht. Die maximale Temperatur wird dann als "kritische Temperatur (θ_{crit})" bezeichnet.

Die resultierenden Kurven sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die kritische Temperatur mit zunehmender Vorspannung abnimmt. Für Vorspannungen von 12,5 % bis 87,5 % von f_y kann die kritische Temperatur einer Probe mit Hilfe einer logarithmischen Funktion berechnet werden. In der Norm EN 1993-1-2 ermöglicht ein logarithmischer Ausdruck die Berechnung der kritischen Temperatur θ_{crit} in Kohlenstoffstählen oder warmgewalzten Bewehrungsstäben als Funktion des Ausnutzungsgrads μ_0 , der auch in Abbildung 4-19 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass die beiden Kurven nahezu gleich sind. Es ist jedoch zu beachten, dass sich diese Proben noch elastisch verhalten, während sich einige Anker in den Einlagerungskammern bereits im plastischen Bereich befinden.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 35

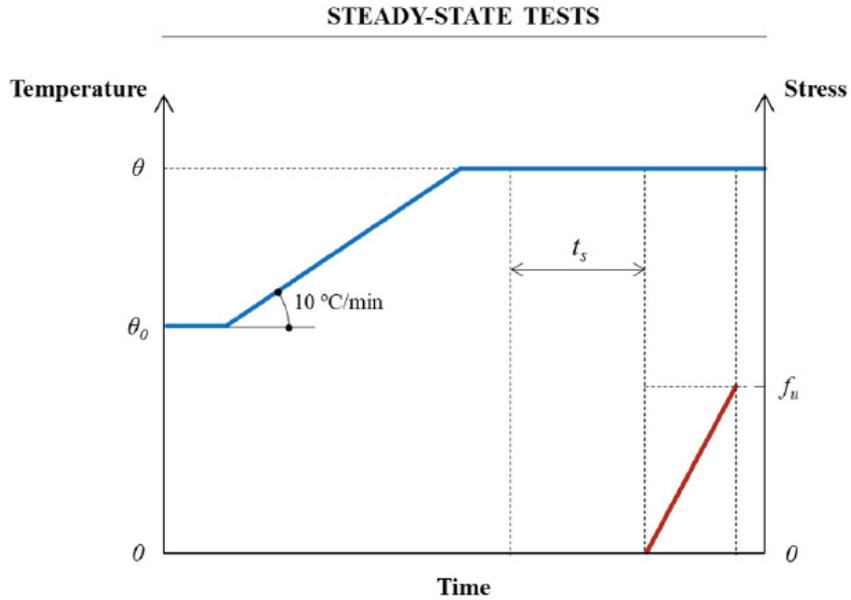


Abbildung 4-16: Temperatur- und Belastungsregime des isothermen stationären Versuchs /6/

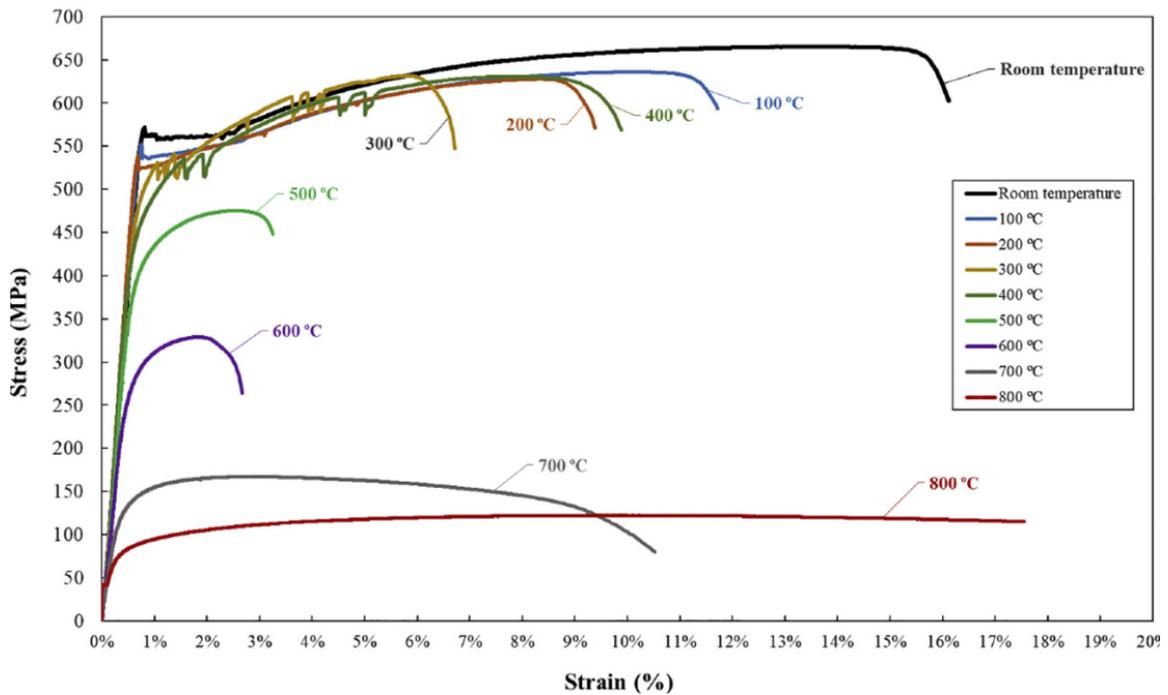


Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungs-Kurven bei der isothermen stationären Versuchen /6/

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 36

TRANSIENT-STATE TESTS

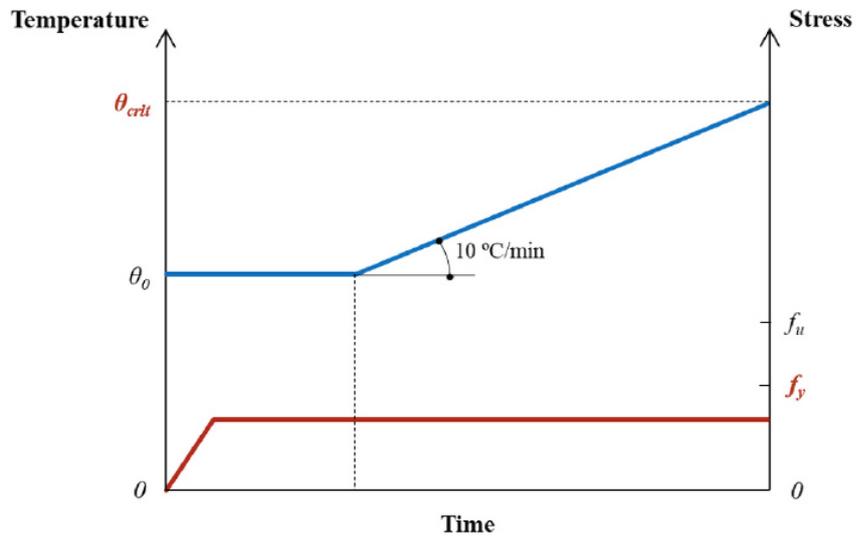


Abbildung 4-18: Temperatur- und Belastungsregime des anisothermen instationären Versuchs /6/

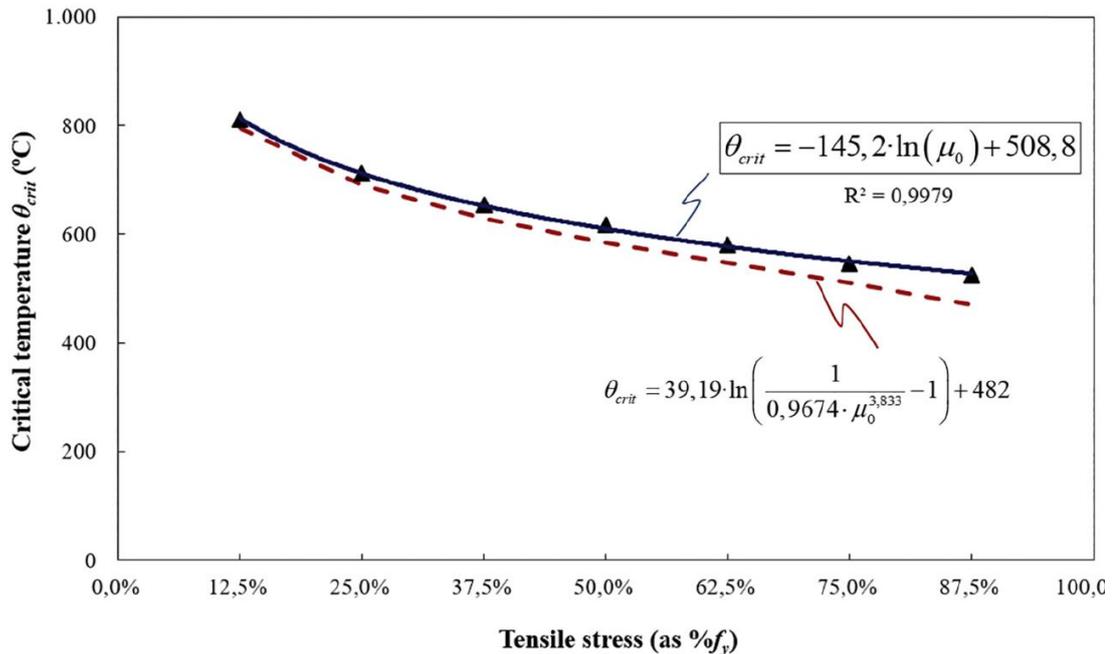


Abbildung 4-19. Zusammenhang zwischen der angewandten Zugspannung und der kritischen Temperatur bei den anisothermen instationären Versuchen

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 37

Die Ergebnisse der Technikumsversuche /6/ können folgendermaßen zusammengefasst und interpretiert werden:

- Neben einer Abnahme der Bruchfestigkeit zeigt der Stahl auch eine deutliche Abnahme des Betrags der Bruchdehnung für den erwarteten Temperaturbereich (TÜV Süd).
- Die Bruchdehnung nimmt tendenziell mit zunehmendem Lastniveau vor Brand (Vorspannung) als auch nach dem Brandereignis deutlich ab.
- In situ liegen voraussichtlich Beanspruchungen jenseits der Streckgrenze im Bereich des plastischen Fließens vor.
- Die thermische Dehnung des Ankerstahls ist zwar während der Aufheizungsphase größer als jene des Gebirges, was zu einer temporären Ankerentlastung führen dürfte ($\alpha_{\text{Stahl}} > \alpha_{\text{Gebirge}} \rightarrow$ Ankerentlastung). Da aber während der Abkühlung der Anker gegen die induzierten Verschiebungszuwächse „arbeitet“, resultiert das in einer weiteren Dehnungszunahme im Ankerstahl.
- Die Dehnungen lokalisieren sich vermutlich hinter der Ankerplatte; da dort ggf. weitere lokale Schwächungen vorliegen (bspw. Gewinde) ist ein Bruch dort nicht auszuschließen

Aus o.g. Gründen wird auf den Ansatz einer Resttragfähigkeit der SPH bei der vorliegenden Brandkurve verzichtet. Aufgrund des günstigeren thermischen Verhaltens (radiale Wärmeabfuhr) und des inkrementellen Tragverhaltens wird die Bewertung der Tragfähigkeit vom Konturabstand bzw. der während des Brandes wirkenden maximalen Temperatur abhängig gemacht.

Bei Klebeankern (KA) spielt zusätzlich der Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs und der Temperatur eine wesentliche Rolle, da die Kraftübertragung des Klebeankers über den Klebstoff erfolgt. *McTyer (2020) /7/* entwickelte eine Reihe von Experimenten, um zu untersuchen, wie sich Klebstoffe bei hohen Temperaturen verhalten. Diese Tests wurden mit den folgenden Materialien durchgeführt (ähnliche Eigenschaften wie die in der ELK verwendeten Materialien):

1. Stahlstäbe mit einer Länge von 1,8 m und einem Kerndurchmesser von 21,8 mm. Es handelt sich um warmgewalzte Stangen mit kaltgewalzten Gewinden.
2. Harzkapseln mit einer Länge von 1200 mm und einem Durchmesser von 24 mm aus Polyesterharz.
3. Stahlzylinder mit einer Länge von 1800 mm, einem Außendurchmesser von 101,7 mm und einem Innendurchmesser von 93,7 mm, gefüllt mit Zementmörtel mit einem Druck von ca. 80 MPa.

Nach der Installation wurden die Klebeanker mehr als zwei Wochen bei Raumtemperatur gelagert, um eine vollständige Aushärtung des Harzes zu ermöglichen. Die Ankerköpfe wurden dann in einen Ofen mit einer Betriebstemperatur von ca. 950 °C gelegt. Die Aufheizzeit betrug ca. 28 Stunden, um sicherzustellen, dass sich ein Gleichgewicht der Wärmeleitung entlang des Ankers ergibt. Nach der Exposition im Ofen wurden die Klebeanker in 150 mm lange Prüfkörper für den Push-Out-Test geschnitten. Wie in Abbildung 4-20 zu sehen ist, hat sich der Klebstoff in der Nähe der Wärmequelle von weiß nach schwarz verfärbt und ist vermutlich verbrannt.

Die Abbildung 4-21 zeigt die Temperaturverteilung (Median und Maximum) des Stahlstabs nach 28 Stunden Erhitzung und die Ergebnisse des anschließenden Push-Out-Tests. Es ist ersichtlich, dass die Lastübertragung bei einer Temperatur von ca. 100 °C um 40% und bei 600 °C um 85% abnimmt.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 38



Abbildung 4-20: Ofen mit getesteten Klebeankern (oben); Proben für Push-Out-Versuch, die in Segmente á 150 mm gesägt wurden (mitte); wärmebeeinflusste Probe (unten), /7/

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 39

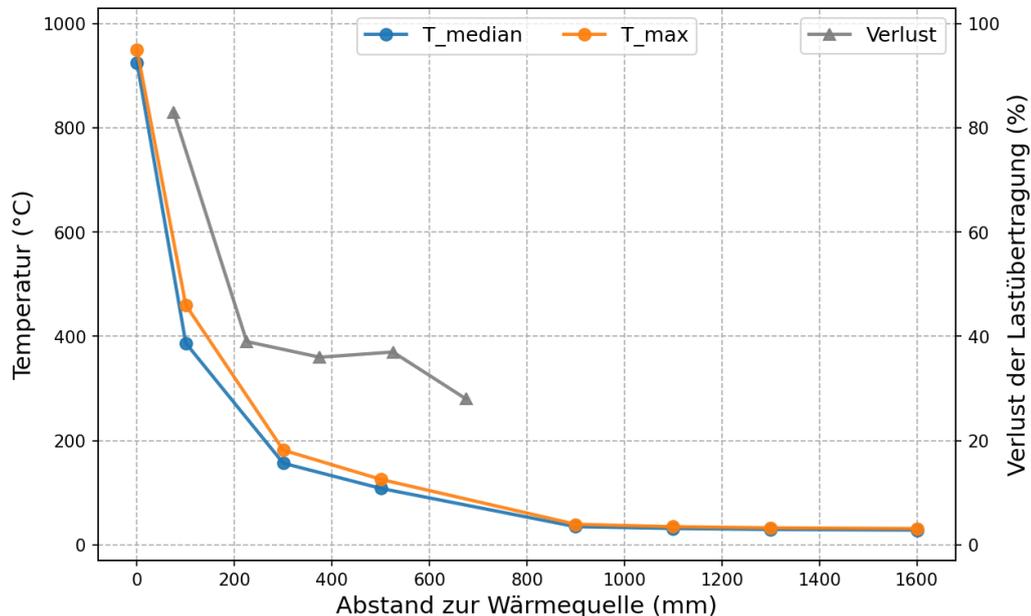


Abbildung 4-21: Temperatur entlang des Ankers nach 28 Stunden Erhitzung; Verlust der Lastübertragung des anschließenden Push-Out-Tests /7/

Neben der Berücksichtigung der Abminderung von E-Modul und Festigkeitsgrenze gemäß DIN EN 1993-1-2, Bild 3.2 wurde unter Berücksichtigung von *Lapuebla-Ferri et al. (2021) /6/* und *McTyer (2020) /7/* für die Brandsimulationen konservativ angenommen, dass

- ein Ankerabschnitt die Tragwirkung vollständig verliert, wenn sich dieser plastisch verformt hat und die Temperatur 300 °C erreicht bzw. übersteigt.
- der Klebstoff seine mechanischen Eigenschaften auf 50 Prozent reduziert, wenn er 100 °C erreicht bzw. übersteigt.

4.6.2 Rechenfälle

Basierend auf den standortspezifischen Gegebenheiten werden im Folgenden fünf Rechenfälle (RF_x) beschrieben, welche die lokale Systemankerung, deren Tragverhalten bzw. Ausfallszenarien und einen sanierten oder unsanierten Ausgangszustand vor Brand berücksichtigen. Hinsichtlich der thermischen Einwirkungen auf die Tragfähigkeit des Ankerbaus werden folgende Fälle unterschieden:

- Im konservativ abdeckenden Fall („worst case“) wird rechnerisch der vollständige Ausfall der Anker im gesamten Querschnitt betrachtet.
- Im realistischeren Fall werden Konservativitäten abgebaut, indem von der Rest-Tragfähigkeit der Anker Kredit genommen wird. Die Tragwirkung der Anker (Reduktion E-Modul und Zugfestigkeit gem. DIN EN 1993-1-2, Bild 3.2) wird berechnungsbegleitend in Abhängigkeit des Temperaturprofils angepasst.

Es ergeben sich folgende Berechnungsfälle (2 Ankertypen / 2 Ausfall-Szenarien), siehe Tabelle 4-5.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 40

Tabelle 4-5: Zusammenstellung der Berechnungsfälle

Tragfähigkeit	Ankertyp	Sprenzhülsenanker SPH	Klebeanker KA
Resttragfähigkeit E(T), fy(T)		RF_1 * RF_5 **	RF_2 RF_6 **
Kompletter Ankerausfall („worst case“)		RF_3	RF_4

* nicht betrachtet

** berücksichtigt sanierten Streckenzustand

Rechenfall 1 wird nicht weiter betrachtet (tritt in dieser Konfiguration in der Grube nicht auf – Einlagerungskammern im Zwischenmittel werden bei Erfordernis saniert oder im Falle von Neuauffahrungen mit einer Systemankerung aus KA ausgebaut).

Als maßgebend für die Ermittlung potenzieller Bruchkörper wird der RF_2 eingeschätzt, da für die geomechanisch ungünstigen Streckenabschnitte bereits eine Systemankerung mit Klebeankern umgesetzt wurde bzw. im Zuge von Sanierungsarbeiten ausgeführt wird. Für den RF_2 fanden ergänzend Sensitivitätsstudien zum Tragverhalten des Klebers statt (hier nicht dokumentiert).

Bei RF_3 und RF_4 werden Extremfälle modelliert und alle Anker (SPH-Anker oder Klebeanker) komplett deaktiviert. Dies ist zumindest für eine Systemankerung aus KA unwahrscheinlich. Diese Berechnungen dienen dem Systemverständnis.

Darüber hinaus werden noch zwei Rechenfälle (RF_5 und RF_6) basierend auf sanierten Ausgangszustände (AZ_SPH_SA / AZ_KA_SA) und mit Berücksichtigung einer Rest-Tragfähigkeit der Klebeanker durchgeführt (Vorgehen analog 2). Diese Berechnungsfälle entsprechen dem erwarteten Verhalten.

5 Ergebnisse und Bewertung

Zur Bewertung der Berechnungsergebnisse werden die thermisch induzierten Veränderungen im Spannungs- sowie insbesondere Verschiebungs- und Verformungsfeld bewertet. Ausgehend von der berechtigten Annahme, dass vor dem Brandereignis ein hinreichend standsicherer Zustand vorlag, werden folgende Indikatoren („Kriterien“) herangezogen, um die Standsicherheit während und nach dem Brand einzuschätzen:

- (1) Numerische Stabilität, Erreichen eines numerischen Gleichgewichtszustandes während der Iteration (Indikator für $S > 1,0$)
- (2) Begrenzung der Verschiebungen (analog Planung der Grubenräume Konrad und des Füllortes 2. Sohle K2: $\max u < 1,0 \text{ m} / 8$)
- (3) Begrenzung der Dehnungen im Anker-Zugglied
- (4) Lokale Ausbildung bzw. Verstärkung der Dehnungen im Gebirge (Bruchkörper)
- (5) Ergänzend ggf. ϕ -/ c -Reduktionen (Abstand vom Grenzzustand der Tragfähigkeit)

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 41

Die Darstellungen der Auswertegrößen in den Anhängen 7 bis 11 wird auf die effektiven plastischen Dehnungen (Gl. 5-1) begrenzt. Es werden 2 Skalierungen für die Darstellung benutzt, um 1. die ALZ zu zeigen und 2. die Scherbänder besser identifizieren zu können. Um den Verlauf der Dehnungszuwächse nachvollziehen zu können wurden vier Zeitpunkte während des Simulationsablaufs genutzt. Diese entsprechen 0 min (vor Brandereignis), 36 min (Maximum der Temperaturkurve, maßgeblich bedingt durch Abbrand Treibstoff), 90 min (Ende Abbrand Reifen) und 613 min (Wiedererreichen der Ausgangstemperatur an der Kontur).

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\varepsilon_{shear,Matrix}^2 + \varepsilon_{shear,Joints}^2 + \varepsilon_{tension,Matrix}^2 + \varepsilon_{tension,Joints}^2} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

5.1 Spreizhülsenanker / vollständiger Ausfall der Anker (RF_3)

Beim Rechenmodell RF_3 steigt die Temperatur am Ankerkopf etwa 9 Minuten nach Brandausbruch auf 300 Grad an (Abbildung 7-13). Entsprechend Kapitel 4.6.1 werden ab diesem Temperaturniveau alle Anker deaktiviert bzw. fallen rechnerisch aus. Abbildung 7-15 bis Abbildung 7-18 zeigen die plastische Dehnung des Gebirges für Ausgangszustand (0 min), 36 min, 90 min und 613 min nach Ausbruch des Brandes. Im Rechenmodell werden deutliche thermisch induzierte Firstsenkungen und Verschiebungszuwächse (rechnerisch > ca. 0,5 m) ermittelt. Diese werden – im Hinblick auf bereits vorverformtes Gebirge - als geomechanisch nicht standsicher bewertet.

Auf Basis der plastischen Dehnungen wird nach dem Brand (613 min) ein potenzieller Bruchkörper mit $b = 5,5 \text{ m}$ (~ Streckenbreite) und der Tiefe von ca. 3,6 m abgeschätzt ($10 \text{ m}^3 / \text{ld. m}$), siehe Abbildung 7-18.

5.2 Klebeanker / Rest-Tragfähigkeit (RF_02)

Für das Rechenmodell (RF_2) mit Abbildung der Klebeanker bleibt aufgrund des konduktiven Wärmetransportes vom Ankerstahl ins Gebirge die Eindringtiefe der Wärmefront auf den konturnahen Gebirgsbereich begrenzt (Abbildung 7-14). So betragen die Maximaltemperaturen im Abstand von 12 und 24 cm ca. 180°C bzw. <70°C. In Anlehnung an die Ergebnisse der Technikumsversuche Lapuebla-Ferri et al. (2021) und McTyer (2020) wird daher unterstellt, dass a) die Tragwirkung der Ankerplatte und –mutter sowie der konturnahen 12 cm des Stahlzugliedes entfallen und b) der Ankerkleber auf einer Länge von 24 cm in seiner Scherfestigkeit beeinträchtigt ist. Die Lasten werden im Modell umverteilt.

Die thermomechanischen Analysen zeigen, dass trotz dem im Rechenmodell umgesetzten konturnahen Versagen der Klebeanker die Tragwirkung in den hinteren Ankerabschnitten gegeben ist. Die Klebeanker zeigen keine wesentliche Zunahme der Dehnungen (vor/nach Brand).

Die plastischen Dehnungen im Gebirge nehmen geringfügig zu - jedoch ohne erkennbare Ausbildung von Bruchkörpern bzw. Vernetzung von Scherbändern. Die (globale) Standsicherheit der Strecke und Tragfähigkeit des Verbundsystems aus Systemankerung und Gebirge ist gegeben.

Abbildung 7-19 bis Abbildung 7-22 zeigen die plastische Dehnung im Zeitraum von 0 bis 613 min der Brandsimulation.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 42

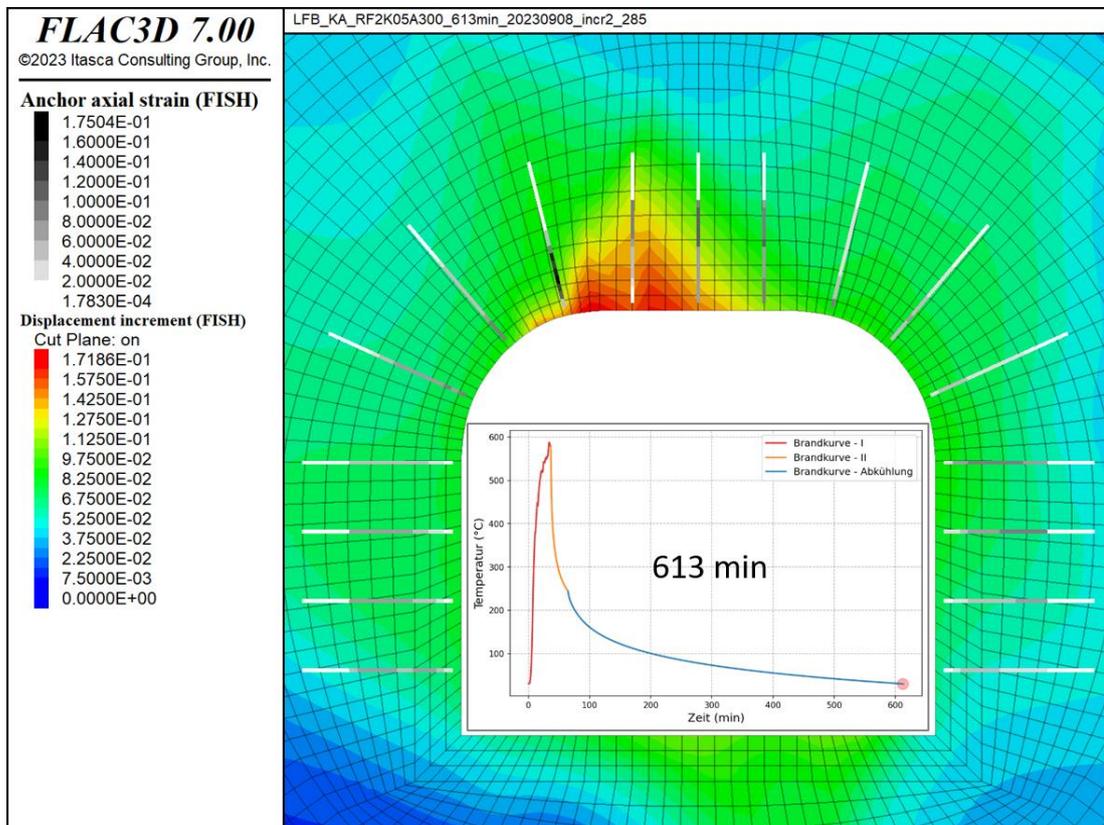


Abbildung 5-1: Zuwachs von Verschiebung infolge Brand und axiale Dehnung der Ankers

Die thermisch induzierten Verschiebungszuwächse sind räumlich und betragsmäßig begrenzt (17 cm im Bereich der westlichen Firste, siehe Abbildung 5-1). Steinfall von Material „zwischen den Anker“ im westl. Firstbereich kann derzeit nicht sicher ausgeschlossen werden. Auf Basis der Verschiebungszuwächse werden zwei potenzielle Bereiche mit Steinfall mit max. Flächen im Profil von ca. 0,5 und 0,4 m² / lfd. m abgeschätzt (dreiecksförmig entsprechend Lasteinleitung der Anker mit max. Tiefe von ca. 1,0 m bzw. 0,8 m). Die zeitliche Abfolge der Simulation lässt erkennen, dass der Steinfall hierbei wahrscheinlich nicht instantan eintritt, sondern zeitlich versetzt erfolgt („Aufblättern“ und Ablösen von Schichten).

Das anstehende Gebirge weist eine +/-bankige Wechsellagerung aus tonig bis mergeligen und kalkhaltigeren Schichten bei ca. 20° Einfallen nach West auf. Die Schichtung streicht hierbei in Streckenrichtung der Einlagerungskammern. Die Schichtung stellt eine geogene Schwächerichtung dar. Auf Basis der thermomechanischen Analysen und Überlegungen zum strukturellen Versagen der Klebanker werden folgende 3 Phasen mit relevanten Verschiebungszuwächsen unterschieden:

- Verlust der Tragfähigkeit des Klebankers konturnah (Ankermutter, -platte, -zugglied) nach ca. 9 min infolge $T > 300^{\circ}\text{C}$
- Reduktion der Tragfähigkeit des Ankerstahls (< 12 cm) und der Klebestrecke (bis < ca. 24 cm) im Zeitraum 9 bis 36 min
- Nachbruch (ca. ab Ende des Brandes)

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 43

Abbildung 5-2 und Tabelle 5-1 stellen Form und Abmessungen und Masse der potenziell möglichen Bereiche mit Steinfall dar.

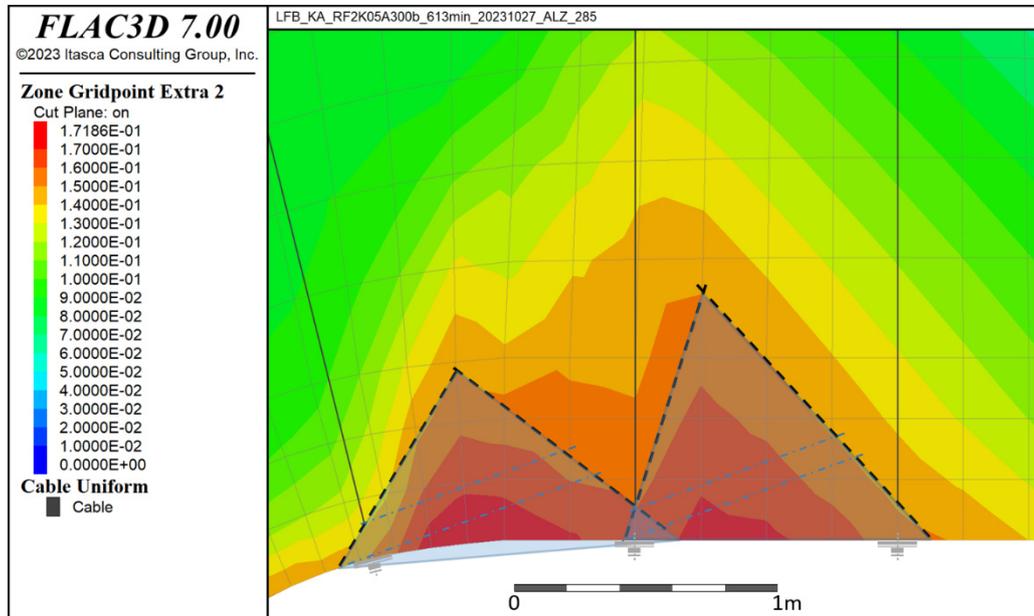


Abbildung 5-2: Verschiebungsfeld am Ende des Brandsimulation RF_2 (613 min), potenzielle Bereiche mit Steinfall sind durch gestrichelte Linien markiert

Tabelle 5-1: Flächen und Massen potenzieller Bruchkörper

	<i>Westliche Kalotte („links“)</i>	<i>Firste („rechts“)</i>
Konturfern, c)	BK3: 0,17m ² , 0,42t/lfd. m	BK3: 0,28m ² , 0,69t/lfd. m
b)	BK2: 0,12m ² , 0,29t/lfd. m	BK2: 0,09m ² , 0,21t/lfd. m
Kontur, a)	BK1: 0,18m ² , 0,45t/lfd. m	BK1: 0,19m ² , 0,48t/lfd. m

5.3 Klebeanker / kompletter Ausfall der Anker (RF_4)

Rechenfall RF_4 basiert auf RF_2 und betrachtet ein „what-if-Szenario“ bei welchem die restlichen Abschnitte der Klebeanker (ca. 2,3 m) nach Erreichen der höchsten Temperatur (ca. 36 min) schrittweise ausfallen. Hier muss betont werden, dass ein solcher Extremfall eher unwahrscheinlich ist.

Abbildung 7-23 bis Abbildung 7-26 zeigen die gesamte plastische Dehnung um die ELK von dem Ausgangszustand (0 min), 36 min, 90 min und 613 min nach Brandausbruch. Im Ergebnis der thermomechanischen Analyse ergibt sich ein Verformungszustand, der mit jenem vom RF_03 vergleichbar ist: in der Firste bildet sich ein Bruchkörper mit einem Querschnitt von ca. 10 m².

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 44

5.4 Spreizhülsenanker / Sanierung mit KA / Rest-Tragfähigkeit (RF_5)

Dieser Rechenfall basiert auf dem Zustand AZ_SPH_SA, d.h. vor Sanierung war die Strecke mit 1,8 m langen SPH ausgebaut und wurde anschließend nachgerissen und komplett mit 2,4 m langen KA saniert.

Abbildung 7-27 bis Abbildung 7-30 in Anhang 10 zeigen die plastische Dehnung vom Ausgangszustand (0 min), 36 min, 90 min und 613 min nach Ausbruch des Brandes. Am Ende der thermomechanischen Analyse lässt sich in der Firste ein stark aufgelockerter Gesteinskörper mit einem Querschnitt von ca. 7 m² abschätzen. Dessen thermisch induzierte vertikale Verschiebungszuwächse sind jedoch begrenzt. Diese betragen 22,1 cm und liegen in der Größenordnung des RF_2 (17,2 cm) und sind somit qualitativ und quantitativ vergleichbar. Der geringfügig ungünstigere gebirgsmechanische Zustand des RF_5 gegenüber dem RF_2 resultiert aus der geringeren Tragfähigkeit der nach Auffahrung verbauten SPH, was in einer stärkeren Auflockerung gegenüber einer Systemankerung aus KA mündet sowie der kurzfristigen Entspannung und Aktivierung von Gebirgsverschiebungen durch das temporäre Entfernen der Anker.

Die zu beobachtende Zunahme der Ankerdehnungen von ca. 3,5% auf 8% lässt auf ein standsicheres Tragsystem schließen. Analog zu RF_2 ist jedoch lokal Steinfall im Bereich zwischen den Ankern nicht auszuschließen.

5.5 Klebeanker / Sanierung mit KA / Rest-Tragfähigkeit

Dieser Rechenfall basiert auf dem Zustand AZ_KA_SA, d.h. dass die Strecke bereits vor Sanierung mit 2,4 m langen Klebeankern ausgebaut war und nach Nachschnitt durch ebensolche wieder komplett ausgebaut wird.

Abbildung 7-31 bis Abbildung 7-34 in Anhang 11 zeigen die plastische Dehnung im Zeitverlauf des Brandes. Die Dehnungen im Gebirge nehmen geringfügig zu - jedoch ohne erkennbare Ausbildung von Bruchkörpern bzw. Vernetzung von Scherbändern.

Die Auswirkungen des Brandes auf die Zunahme der Ankerdehnungen sind gering. Die Klebeanker zeigen nur eine geringe Dehnungszunahme von 3,9% auf 8,7% (vor/nach Brand). Die thermomechanischen Analysen zeigen, dass trotz dem im Rechenmodell umgesetzten konturnahen Versagen der Klebeanker die Tragwirkung in den hinteren Abschnitten gegeben ist.

Die Berechnungsergebnisse sind mit denen des RF_5 vergleichbar. Die (globale) Standsicherheit der Strecke und die Tragfähigkeit des Verbundsystems aus Systemanker und Gebirge sind gegeben. Lokal ist Steinfall im Bereich zwischen den Ankern nicht auszuschließen.

5.6 Bruchkörper infolge geogener Tektonik (Keilbildungen)

Von den Berechnungen werden modellbedingt potenzielle Bruchkörper, welche sich durch den Verschnitt geogener Klüfte und Störungen ergeben können, nicht erfasst. Die Analyse der Streckenkartierungen bereits aufgefahrener Einlagerungskammern zeigte keine potenziellen Bruchkörper.

Für Neuauffahrungen erfolgt standardmäßig eine Kluffkartierung. Sofern potenzielle Bruchkörper (Keile) identifiziert werden, wird betriebsseitig der Ausbau anforderungsgerecht angepasst, bspw. durch hinreichend lange vollverklebte Stahlanker.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 45

Empfehlungen

Für die weiteren Analysen zum Szenario des Steinfalls auf ein Gebinde durch den TÜV Süd werden die abgeschätzten Massen potenzieller Bruchkörper des maßgebenden Falls RF_02 empfohlen. Die Simulationen mit Berücksichtigung einer Sanierung (RF_06) zeigen ähnliche Ergebnisse, jedoch bei deutlich geringeren Ankerdehnungen. Die Ergebnisse des Falls RF_02 decken somit den realistischen Fall konservativ ab.

6 Literatur

- /1/ DBE: Planung Grubengebäude. EU 279. Stand 20.02.1997
- /2/ ITASCA: FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 7.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis (USA), 2021
- /3/ DBE: Konrad, Ableitung von Berechnungsparametern zur Beschreibung des Gebirgsverhaltens im Bereich der 2. Sohle, Schacht Konrad 2. 9KE/33110/-/YE/-/-/GC/BZ/0001/00, DokID 11518833
- /4/ Ausbauregeln Schachtanlage Konrad. 9KE/-/-/AHB/-/-/G/MA/0001/00, DokID 11470733
- /5/ PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt): Berechnungen zur thermischen Einwirkung von schwachwärmeeentwickelnden radioaktiven Abfällen auf das Wirtsgestein in der Schachtanlage Konrad. PTB-SE-10, Braunschweig, Februar 1986, 9K/33234/-/EE/RB/0001/00
- /6/ Lapuebla-Ferri et al. (2021): Load and temperature influence on the post-fire mechanical properties of steel reinforcements. In: Journal of Constructional steel research 185 (2021)
- /7/ Mc Tyer, K. (2020): The effect of elevated temperature on resin-anchored rock bolts. In: Proceedings of the 2020 Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 18-20 February 2019
- /8/ DBE: Schacht Konrad 2 – Grundlagen zur Planung und statischen Berechnungen zu Baumaßnahmen auf der 2. Sohle. Stand 25.05.2012, 9KE/33110/-/YE/-/-/GA/FT/0001/00, DokID 11588234
- /9/ DBE: Schachtanlage Konrad, Geomechanisches Normalprofil. Stand 08.01.2009, 9K/-/-/YE/-/-/GC/MA/0001/00, DokID 11423109
- /10/ BGR: Ergebnisse von festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Versuchsfeld 5/1 der Grube Konrad. Stand 01.01.1990, 9K/-/-/99Y/-/-/GC/BY/0010/00, DokID 11419602
- /11/ WBI: Projekt Konrad, 2. Sohle, Bericht über die geotechnischen Untersuchungen, 9K/5311/-/AF/-/-/GC/LA/0001/00, November 1994
- /12/ BGR: Geologische und geotechnische Untersuchungen im Versuchsfeld 5/1 der Schachtanlage Konrad. Stand 01.02.1991, 9K/-/-/-/-/GC/BZ/0011/00, DokID 11132399

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand

Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 46

- /13/ TÜV SÜD: Auswirkungen eines Brandes auf den Ausbau: Daten aus Brandsimulation – BigMesh-Fine. Interne Mitteilung vom 10.03.2023 (Email TÜV SÜD/Renaud an BGE/Polster), 9KE/-/-/-/GC/LD/0002/00, DokID 12067794
- /14/ DGGT: Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Februar 2014, ISBN 978-3-433-03080-6
- /15/ Shimamura, A., Hotta, Y., Hyuga, H. et al.: Improving the thermal conductivity of epoxy composites using a combustion-synthesized aggregated β -Si₃N₄ filler with randomly oriented grains. Sci Rep 10, 14926 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71745-w>
- /16/ M.-H. Zhou, G.-Z. Yin and S. Gonzalez Prolongo: Review of thermal conductivity in epoxy thermosets and composites: Mechanisms, parameters, and filler influences, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.08.003>

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 47

7 Anhänge: Darstellung der Berechnungsergebnisse

Anhang 1: Ausgangszustand vor Brandereignis (ohne Sanierung), Ausbau mit Spreizhül- senankern, Modell AZ_SPH

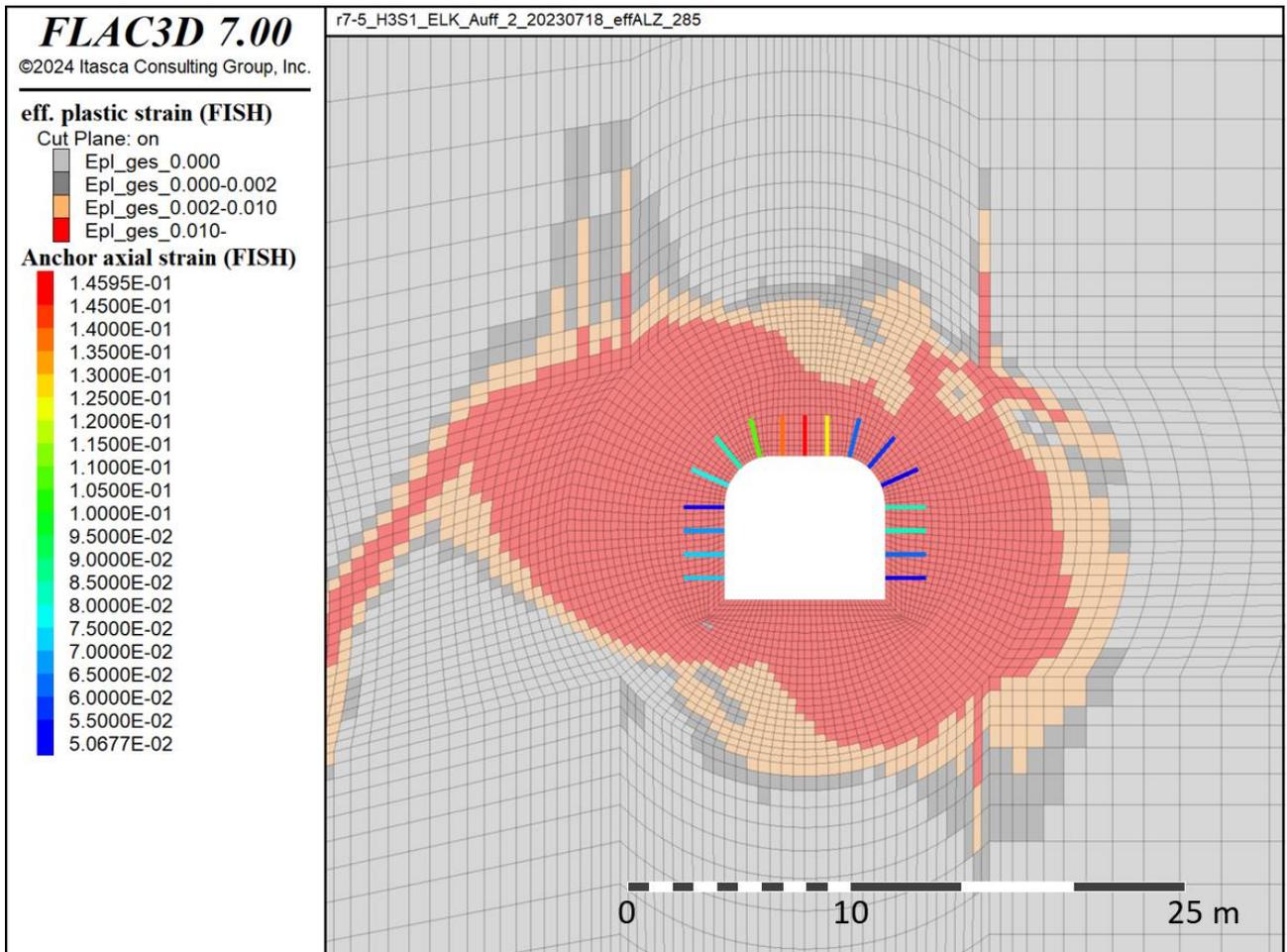


Abbildung 7-1: Auflockerungszone um eine ELK und axiale Dehnung der SPH-Ankers vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_SPH

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 48

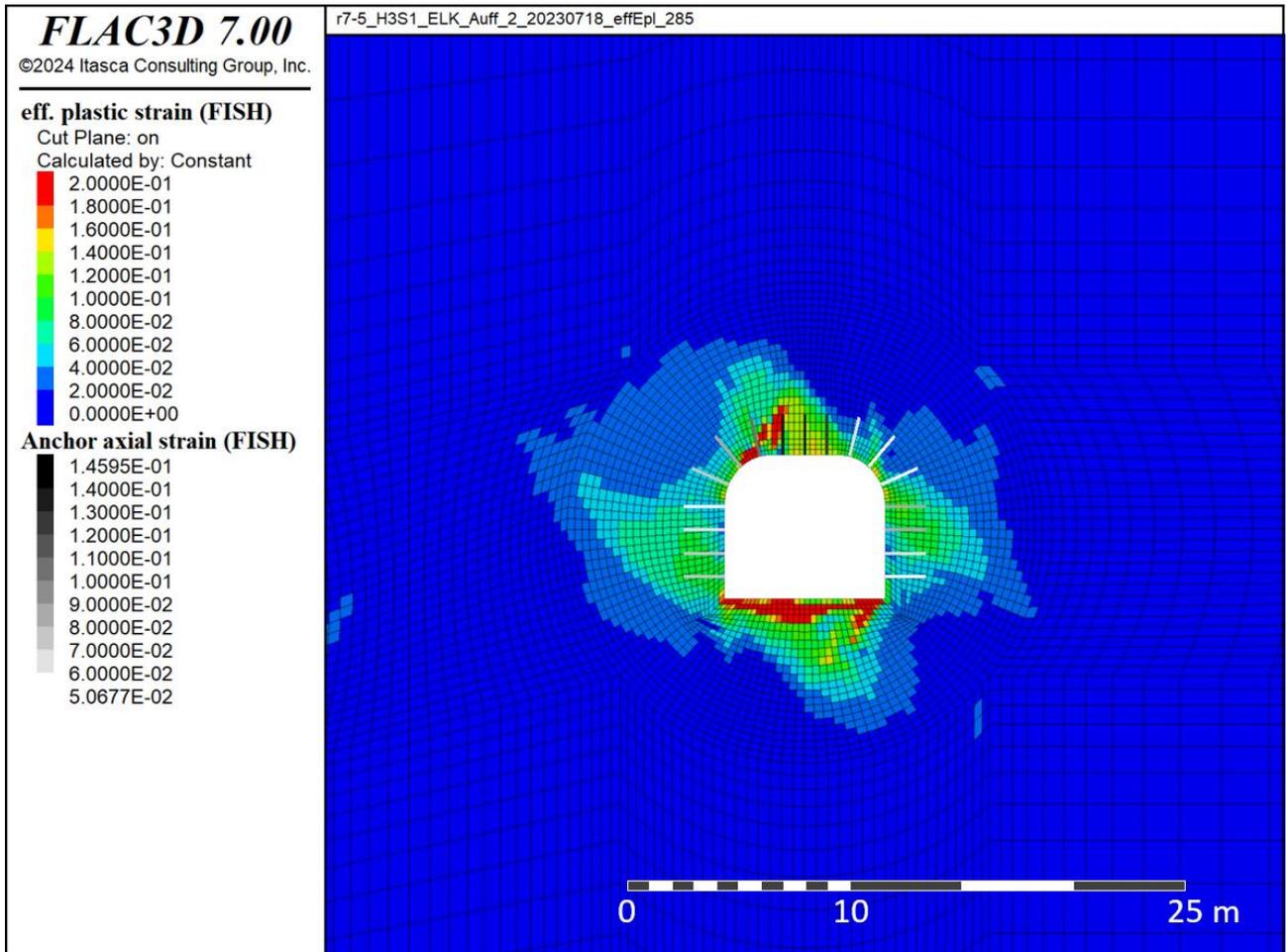


Abbildung 7-2: Plastische Dehnung um ELK im Rechenfall AZ_SPH

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 49

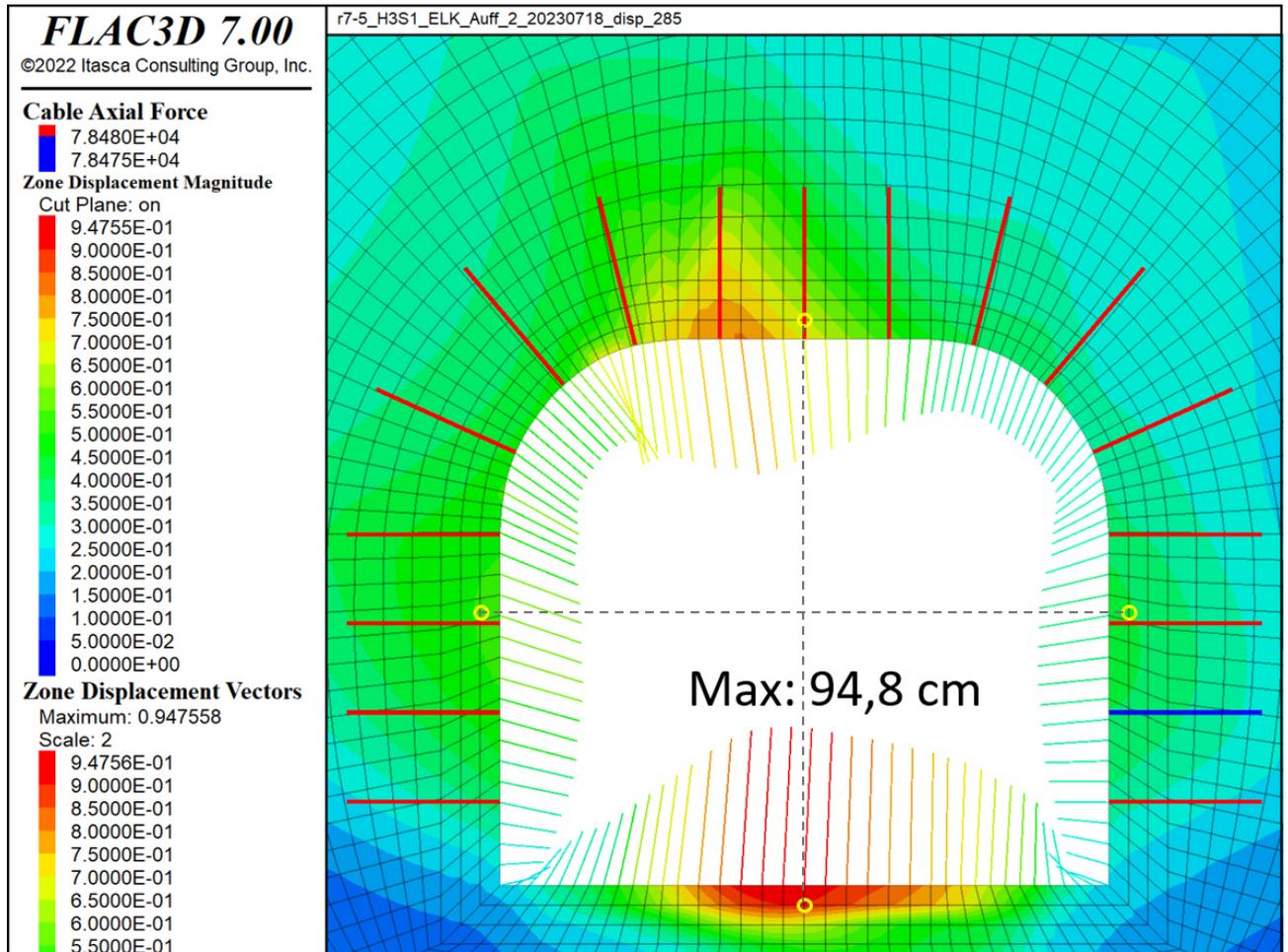


Abbildung 7-3: Verschiebungsfeld, Verschiebungsvektoren der Kontur und Axialkraft des SPH-Ankers (in N) im Rechenfall AZ_SPH

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 50

Anhang 2: Ausgangszustand vor Brandereignis (ohne Sanierung), Ausbau mit Klebeankern, Modell AZ_KA

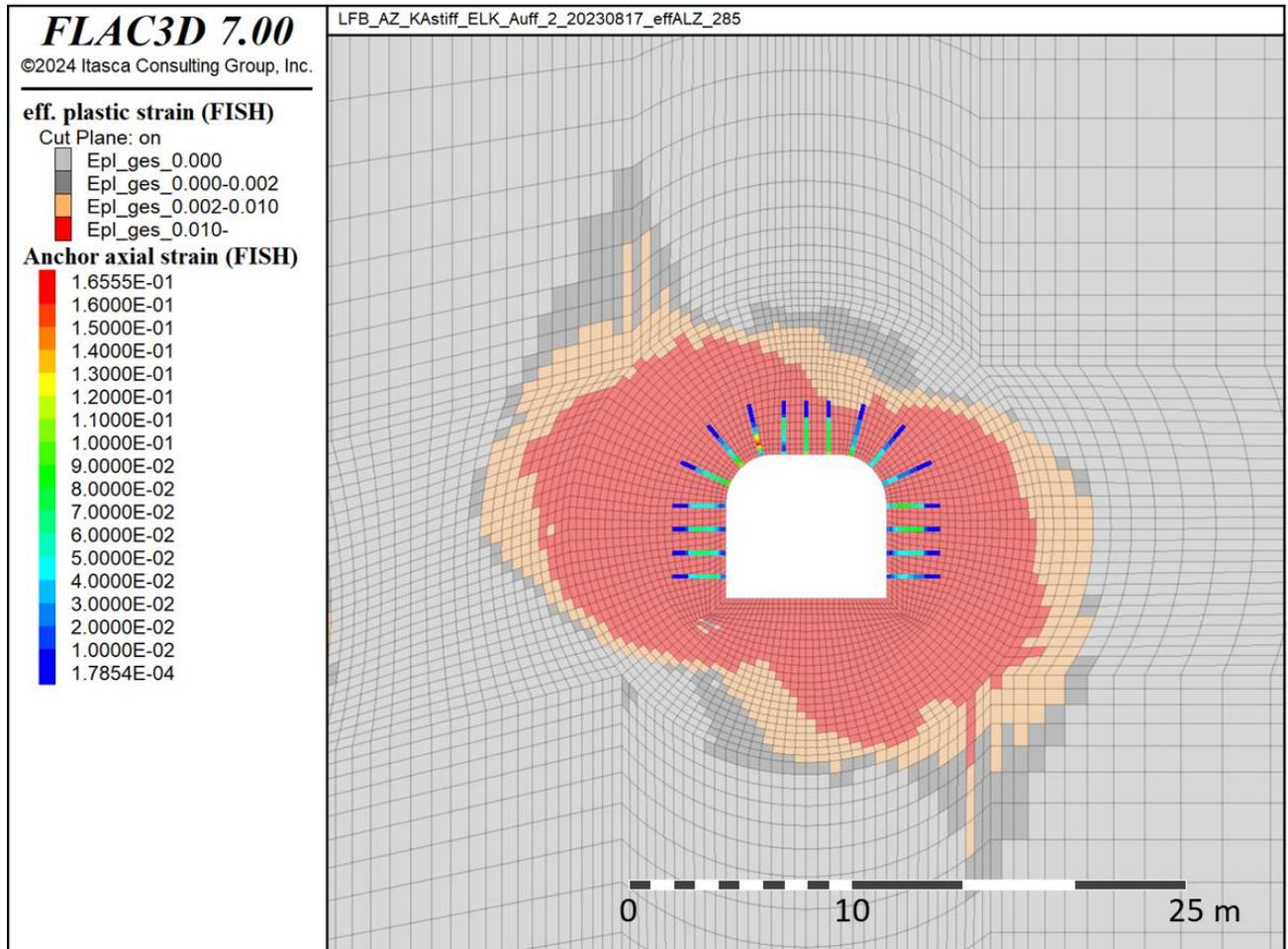


Abbildung 7-4: Auflockerungszone um eine ELK und axiale Dehnung der Klebeanker vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_KA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 51

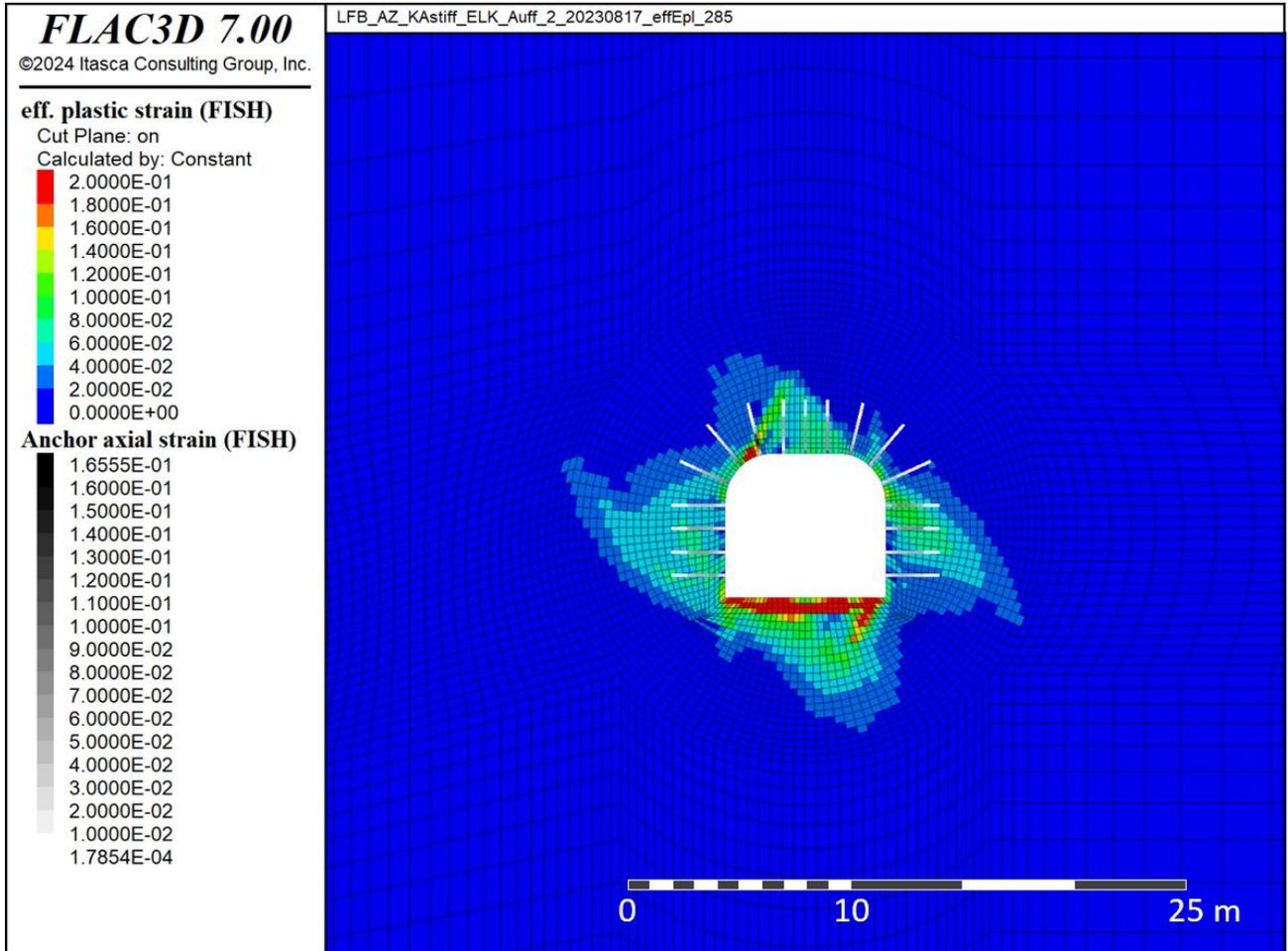


Abbildung 7-5: Plastische Dehnung um ELK im Rechenfall AZ_KA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 52

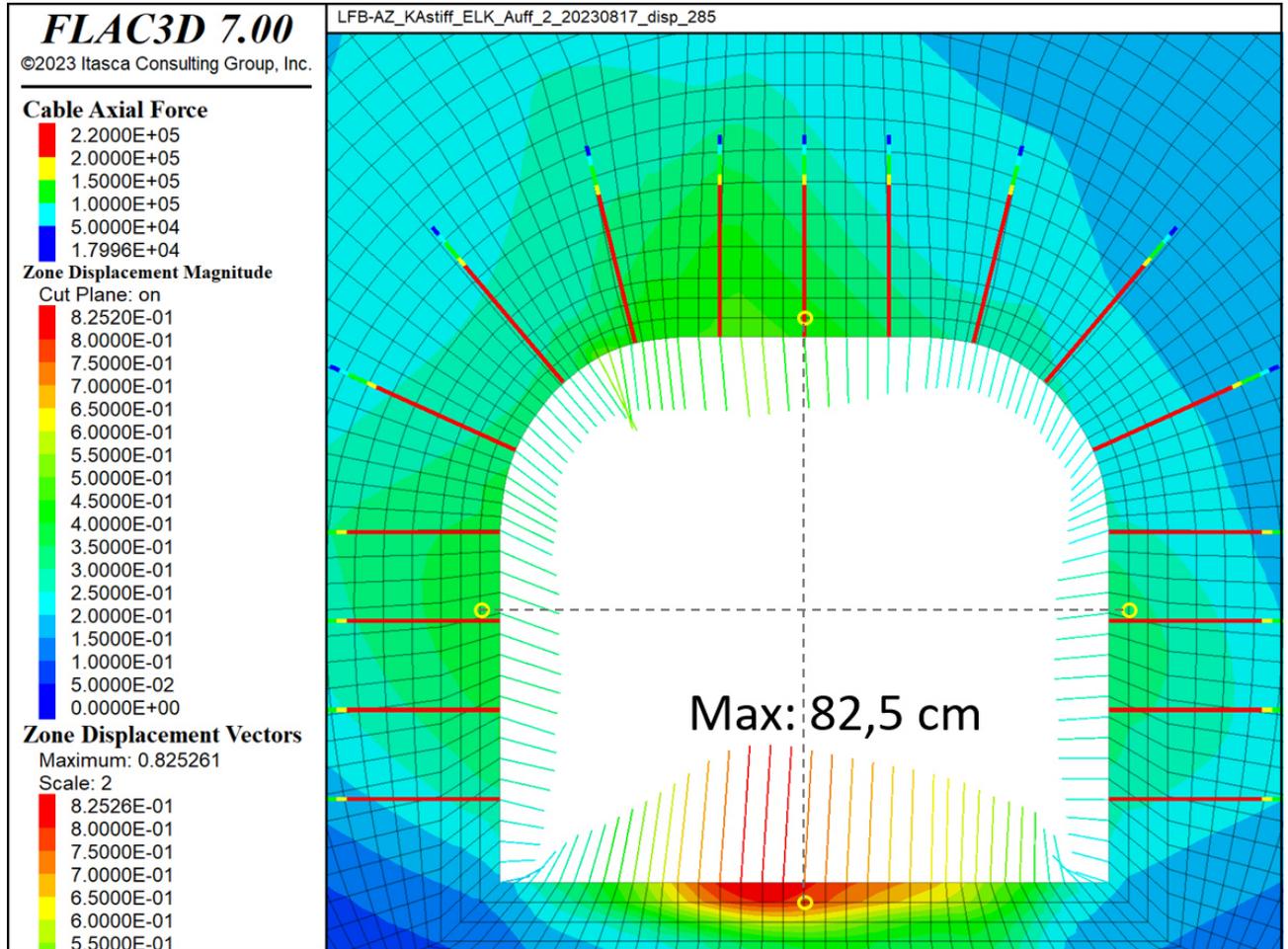


Abbildung 7-6: Verschiebungsfeld, Verschiebungsvektoren der Kontur und Axialkraft des Klebeankers (in N) im Rechenfall AZ_KA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 53

Anhang 3: Ausgangszustand vor Brandereignis (mit Sanierung), beraubter Ausbau mit Sprezhülsenankern, neuer Ausbau mit Klebeankern, Modell AZ_SPH_SA

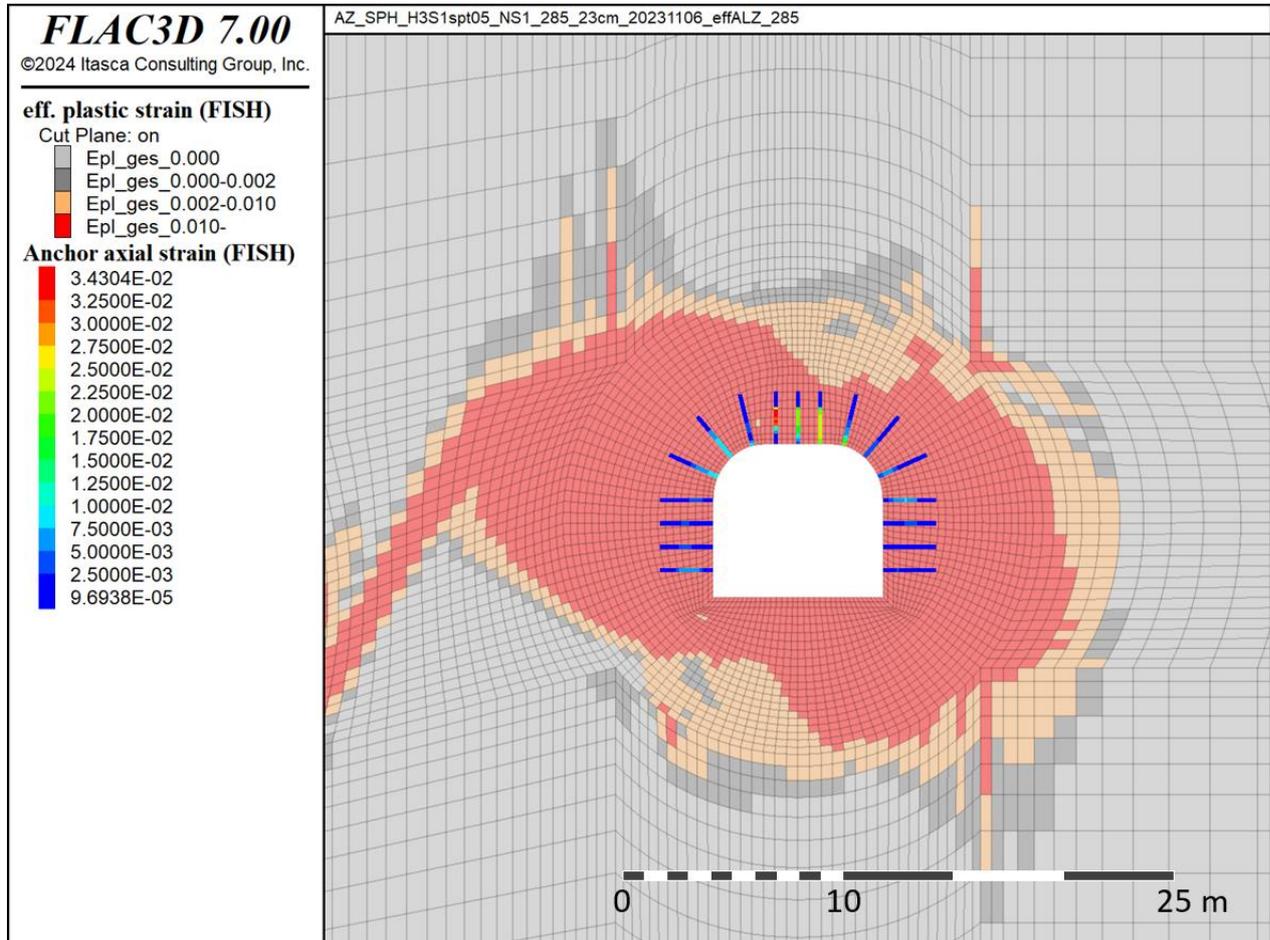


Abbildung 7-7: Auflockerungszone um eine ELK und axiale Dehnung des Klebeankers vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_SPH_SA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 54

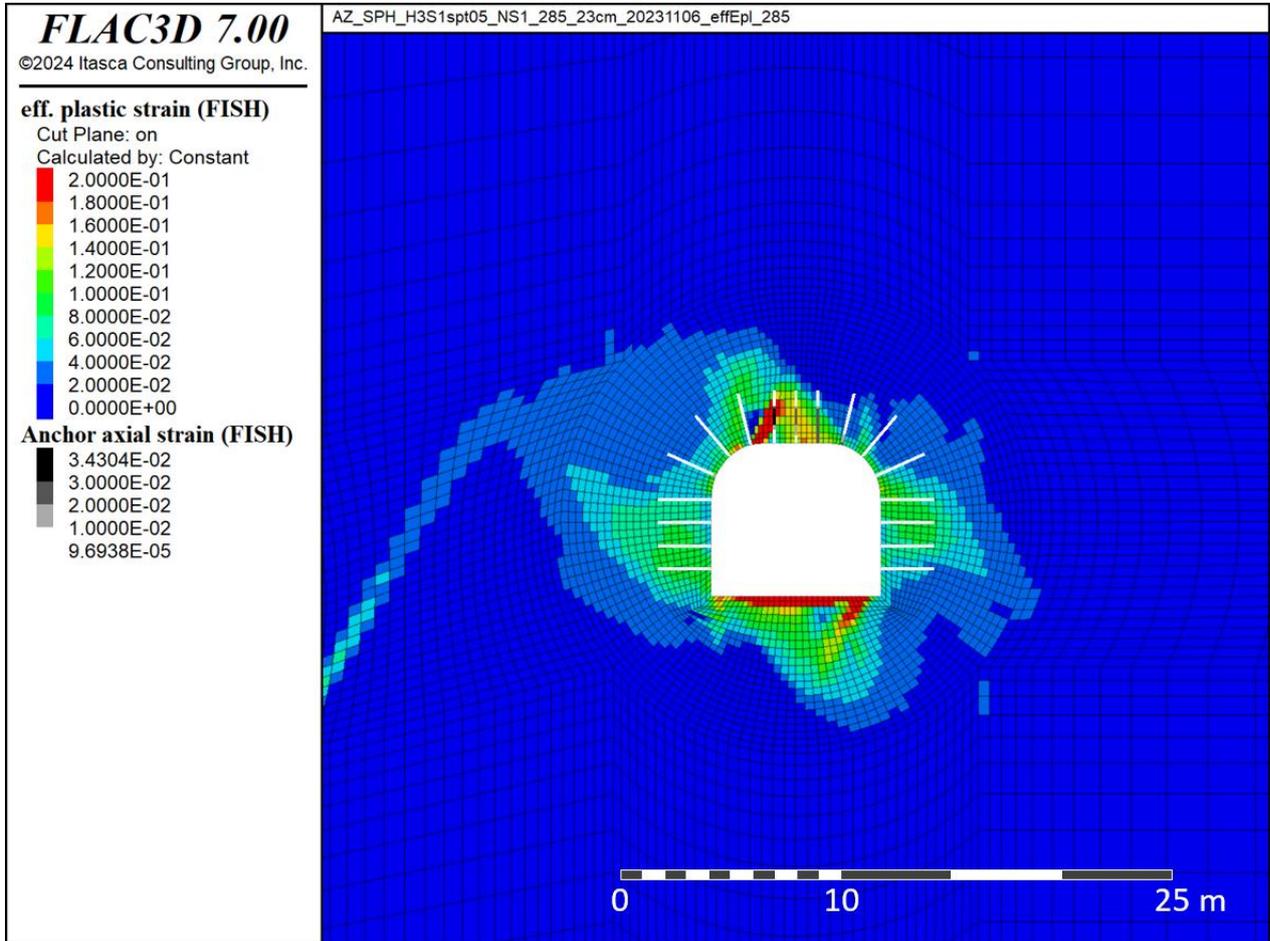


Abbildung 7-8: Plastische Dehnung um ELK im Rechenfall AZ_SPH_SA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 55

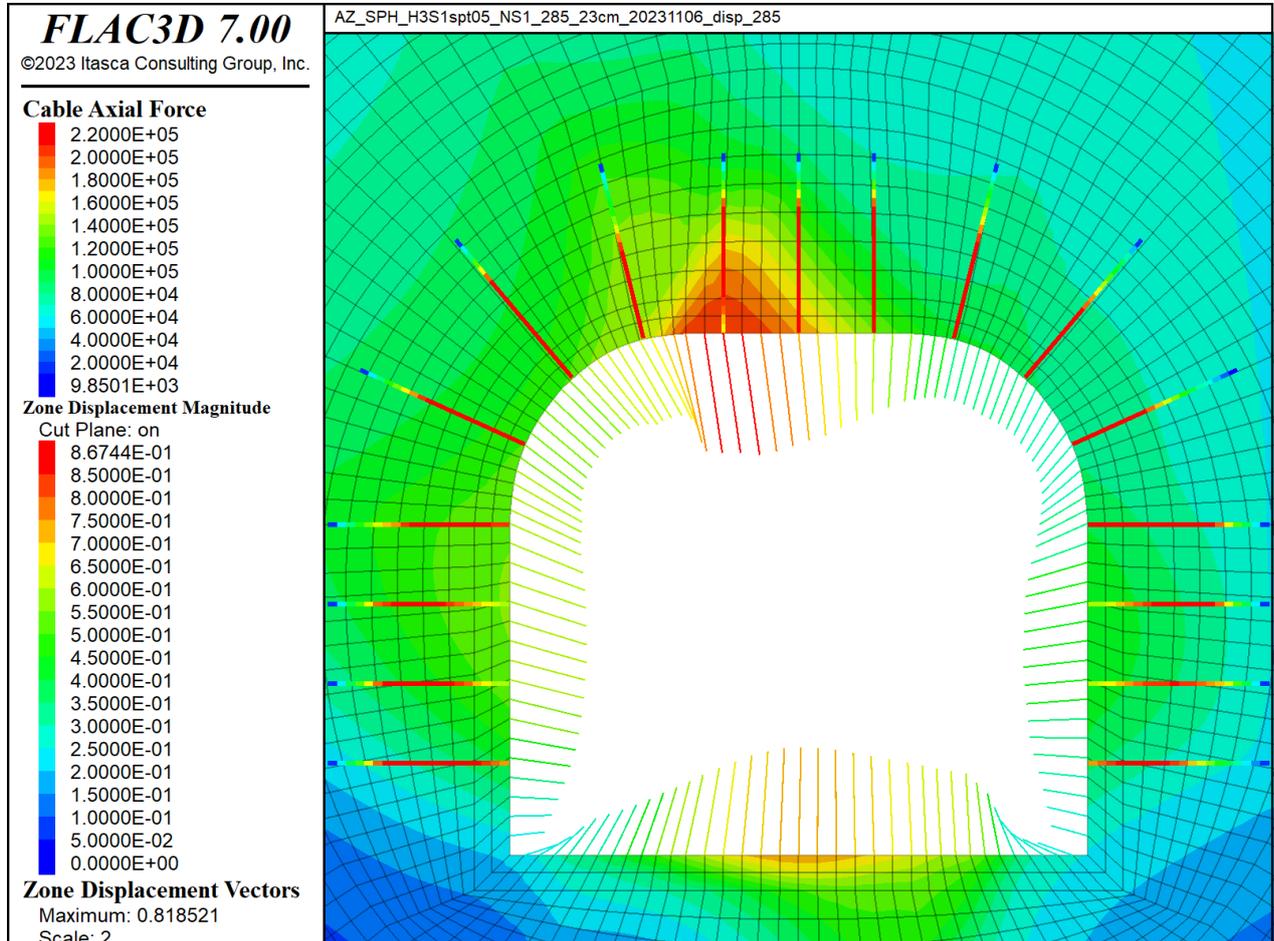


Abbildung 7-9: Verschiebungsfeld, Verschiebungsvektoren der Kontur und Axialkraft des Klebeankers (in N) im Rechenfall AZ_SPH_SA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 56

Anhang 4: Ausgangszustand vor Brandereignis (mit Sanierung), geraubter und neuer Ausbau mit Klebeankern, Modell AZ_KA_SA

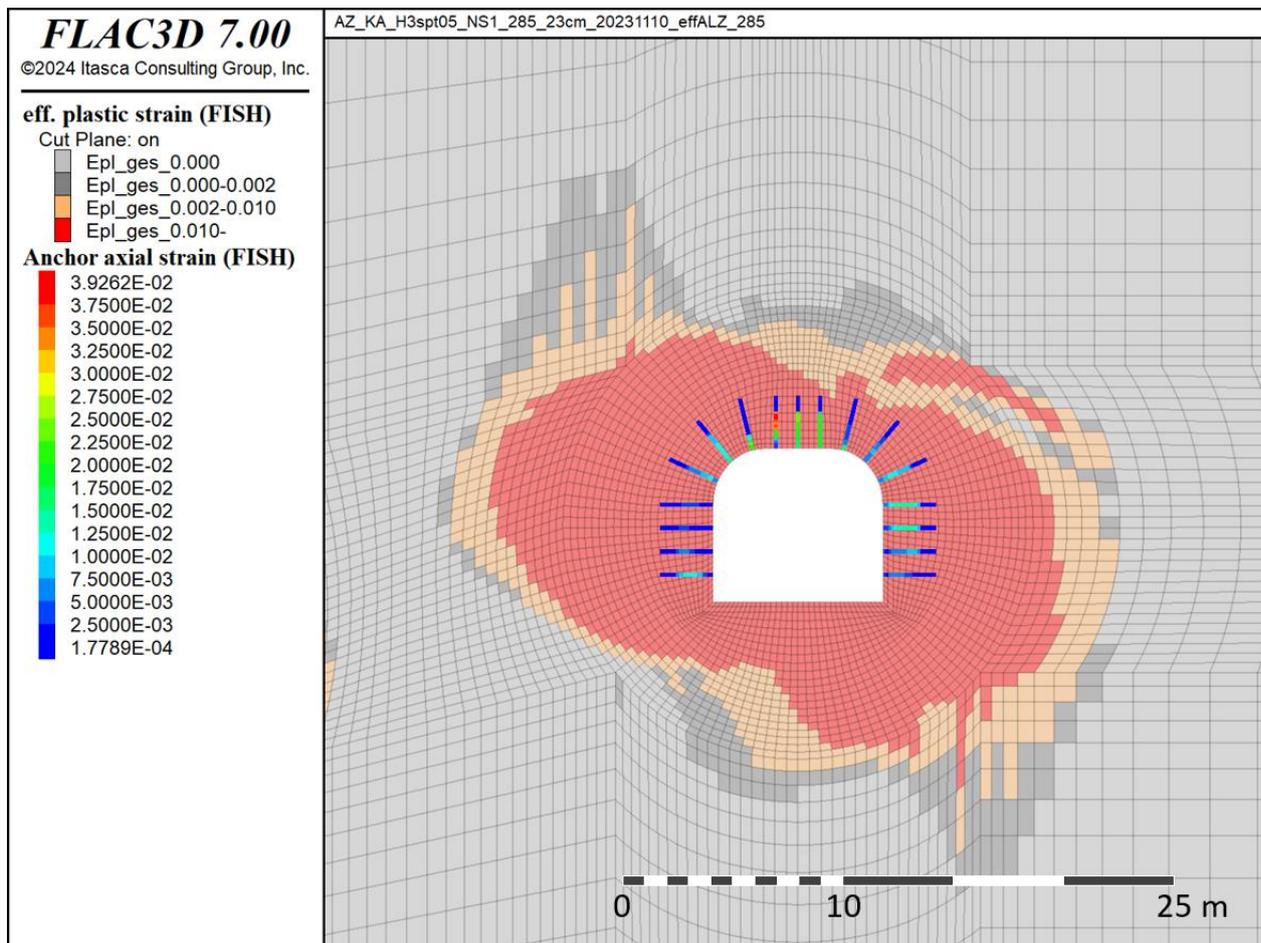


Abbildung 7-10: Auflockerungszone und axiale Dehnung der Klebeanker vor dem Brandereignis im Rechenfall AZ_KA_SA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 57

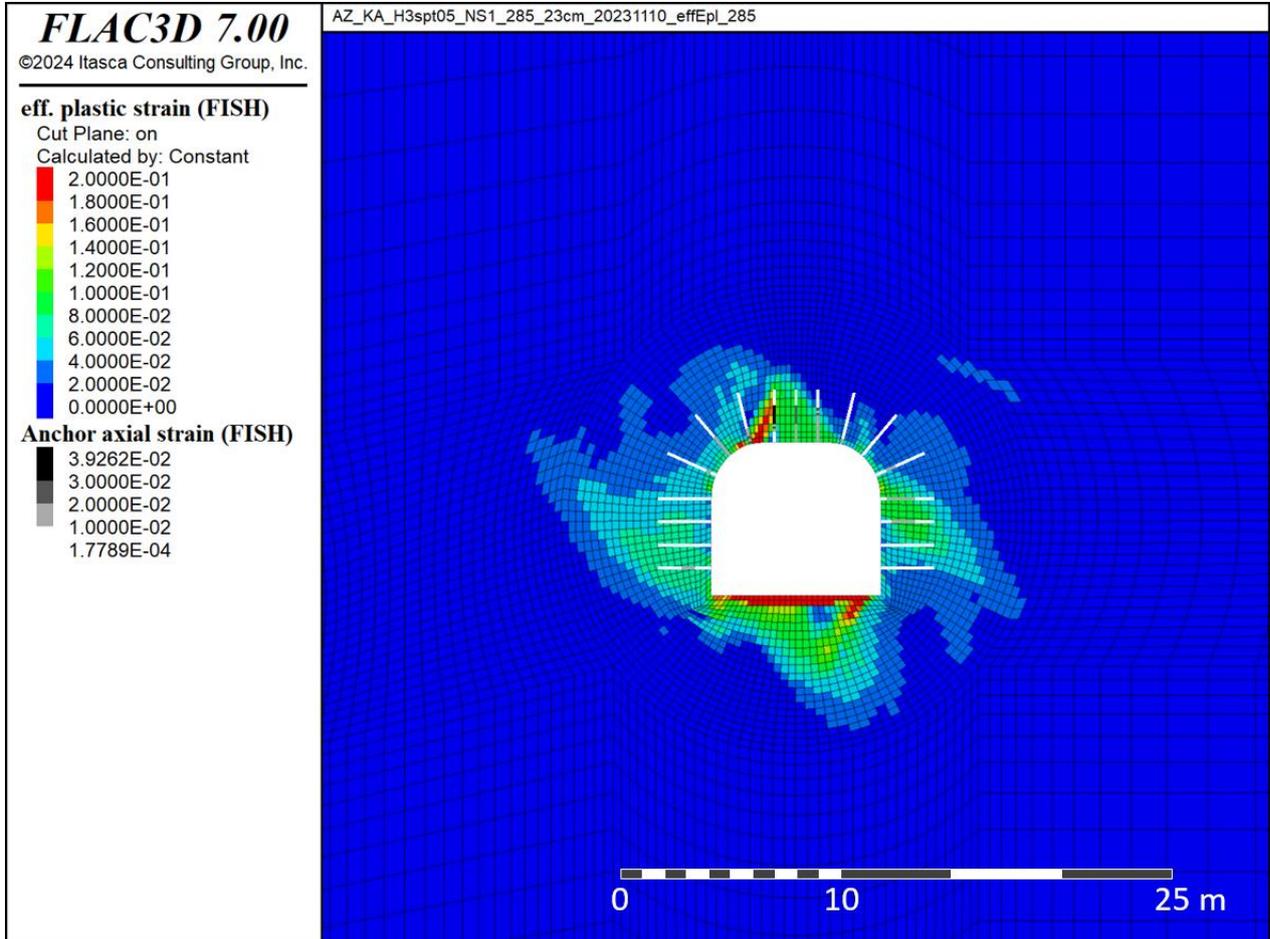


Abbildung 7-11: Plastische Dehnung im Rechenfall AZ_KA_SA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 58

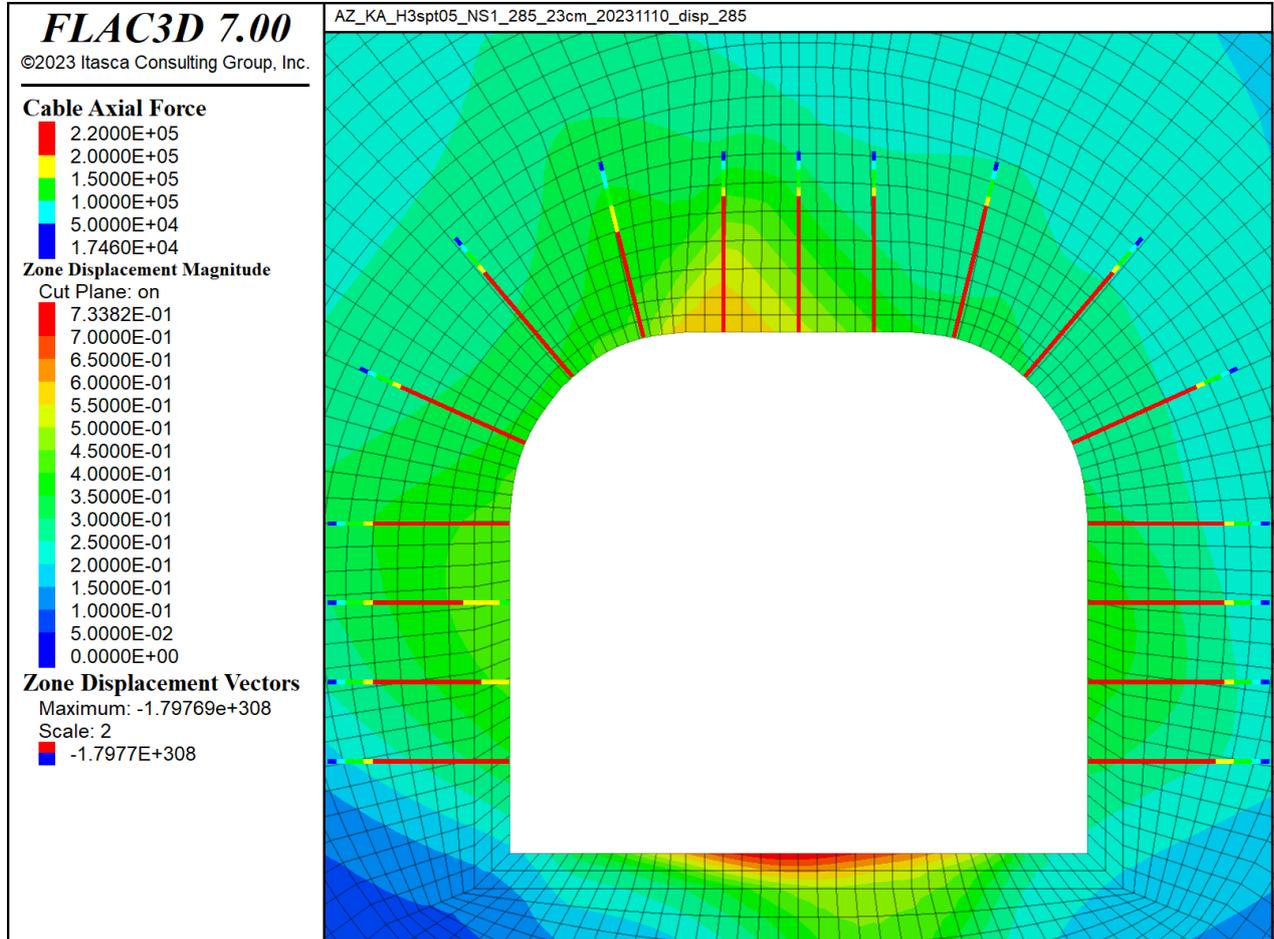


Abbildung 7-12: Verschiebungsfeld und Axialkraft des Klebeankers (in N) im Rechenfall AZ_KA_SA

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 59

Anhang 5: Modellierung der Temperaturexbreitung im Anker, Spreizhülsenanker

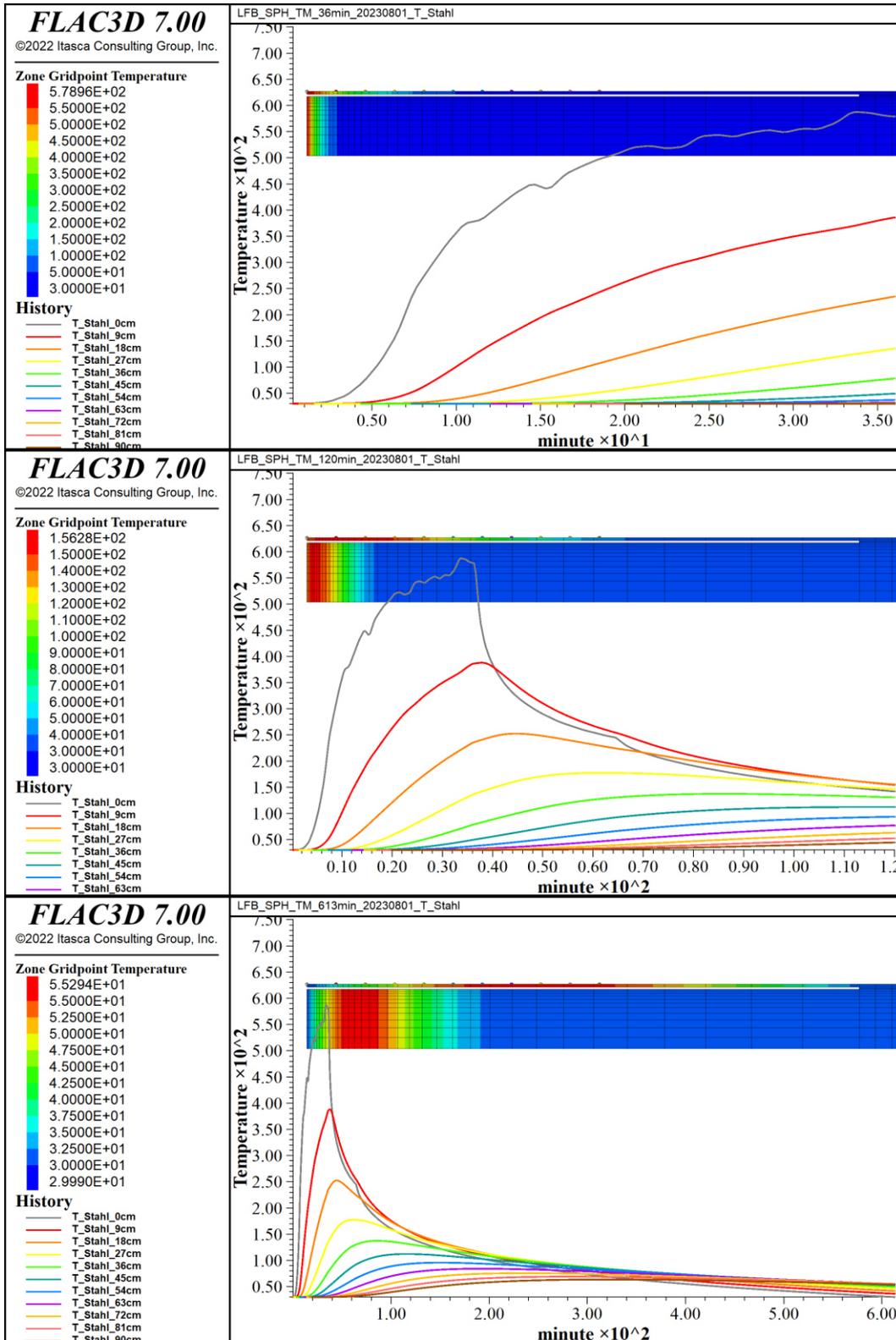


Abbildung 7-13: Temperaturverteilung im SPH-Ankerstahl und Gebirge nach 36 min, 120 min und 613 min. Die Kurven zeigen die Temperatur-Zeit-Verläufe der ersten 10 Auswertepunkte.

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 60

Anhang 6: Modellierung der Temperatureusbreitung im Anker, Klebeanker

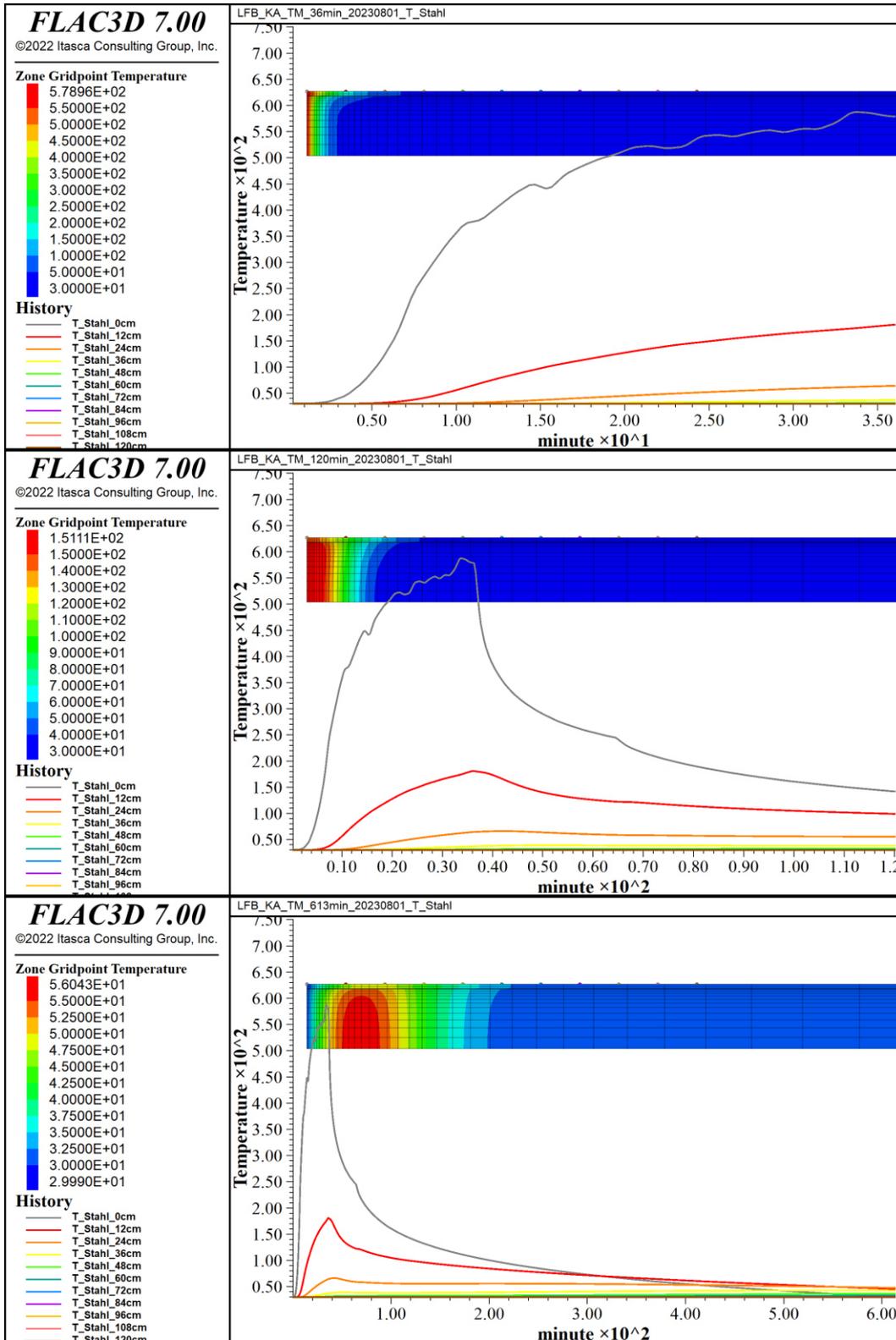


Abbildung 7-14: Temperaturverteilung im Klebeankerstahl und Gebirge nach 36 min, 120 min und 613 min. Die Kurven zeigen die Temperatur-Zeit-Verläufe der ersten 10 Auswertepunkte.

ÜSiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 61

Anhang 7: Brandsimulation, RF_3 (SPH, kompletter Ausfall)

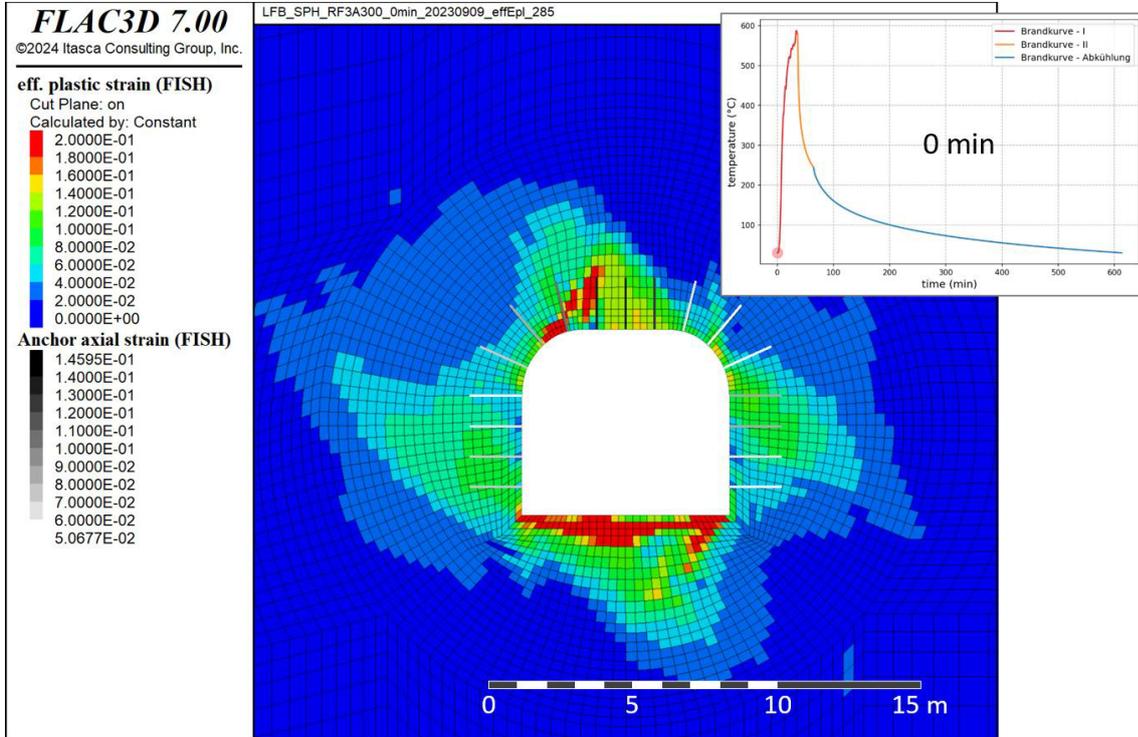


Abbildung 7-15: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_3

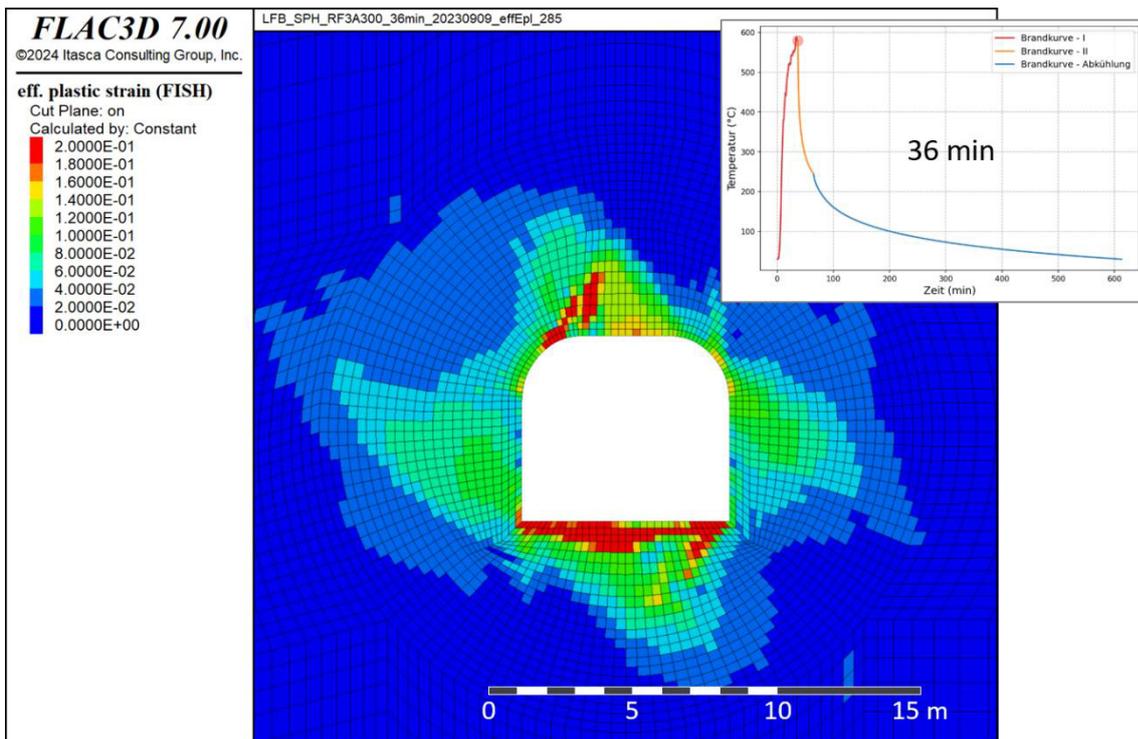


Abbildung 7-16: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_3

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 62

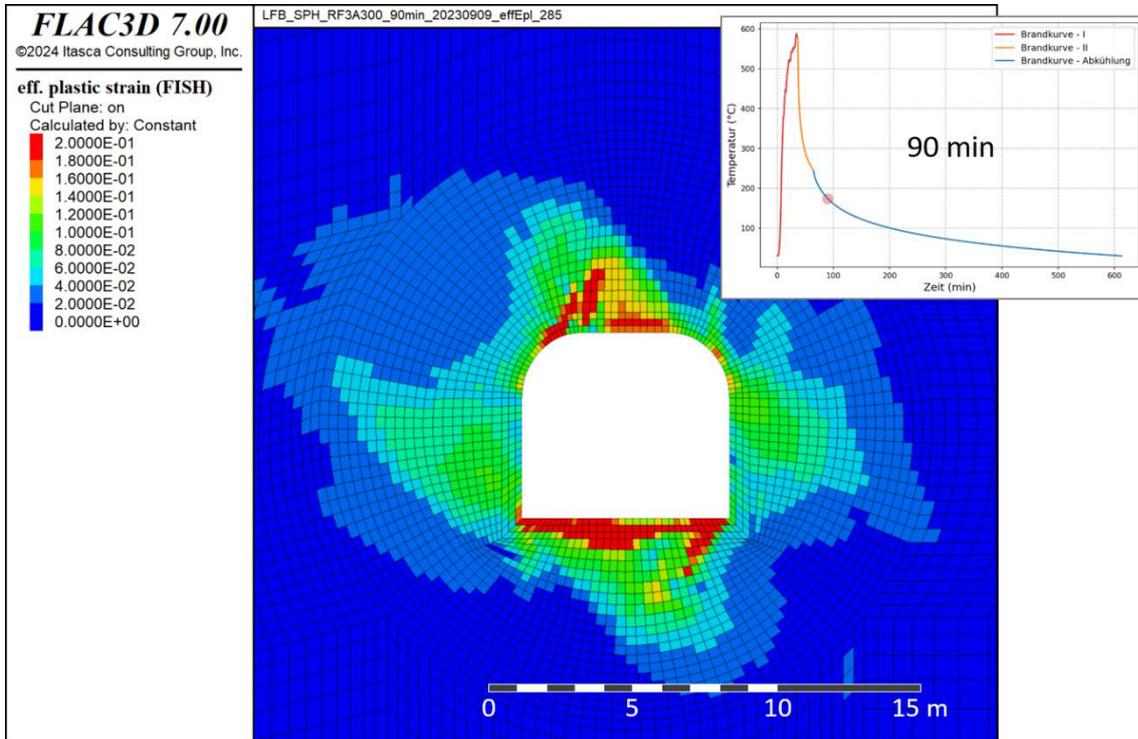


Abbildung 7-17: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_3

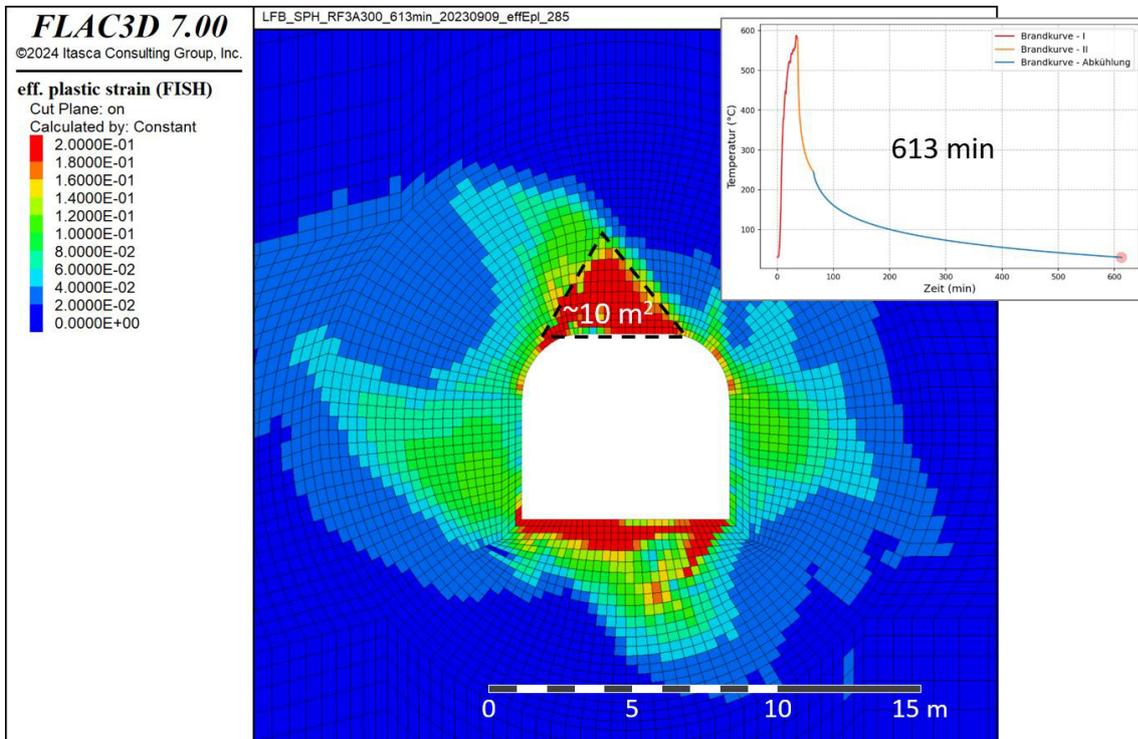


Abbildung 7-18: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_3

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 63

Anhang 8: Brandsimulation, RF_2 (KA, Resttragfähigkeit)

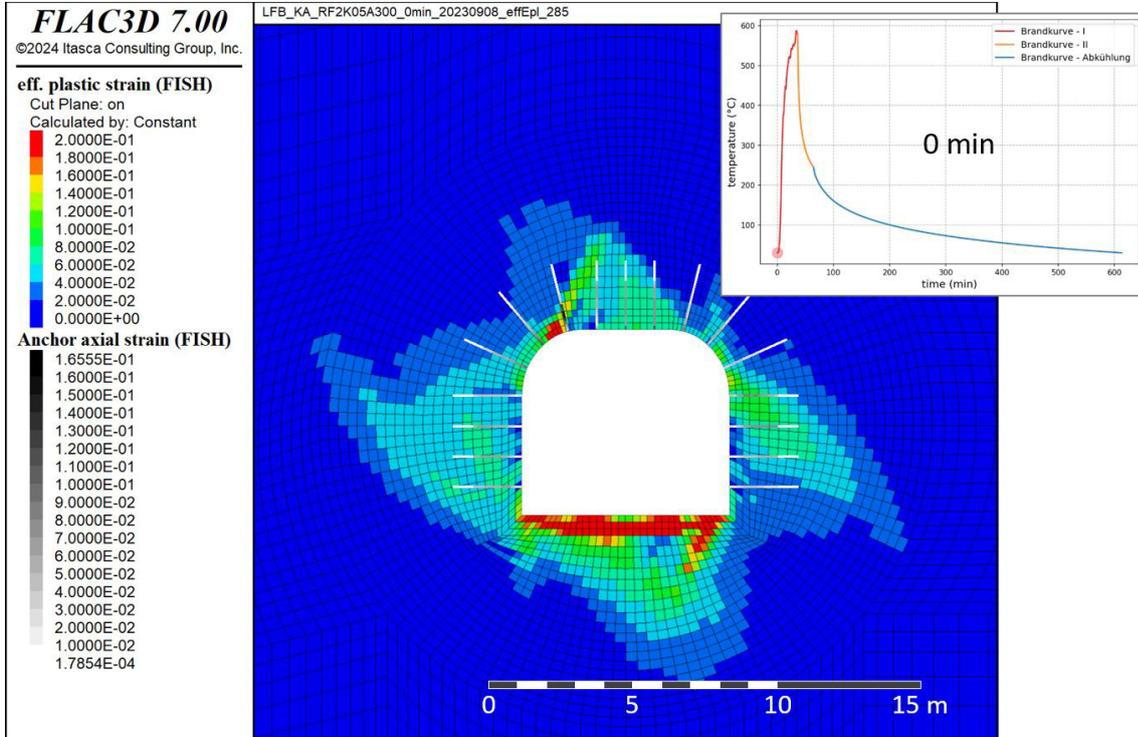


Abbildung 7-19: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_2

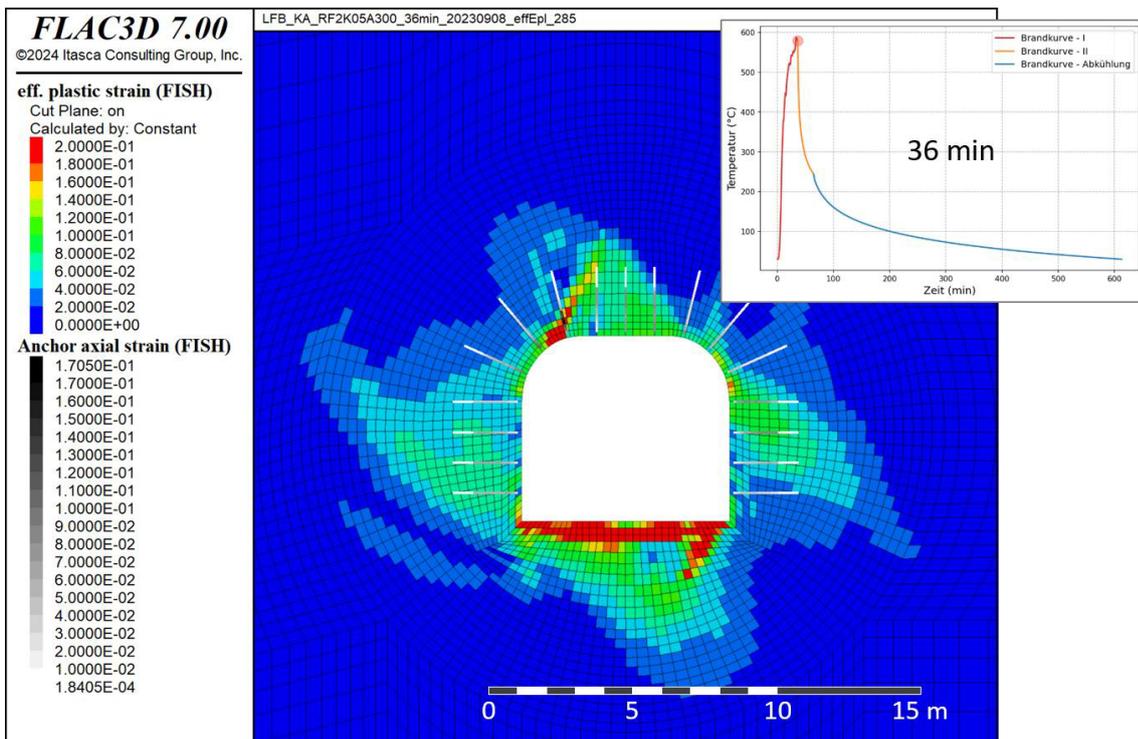


Abbildung 7-20: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_2

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 64

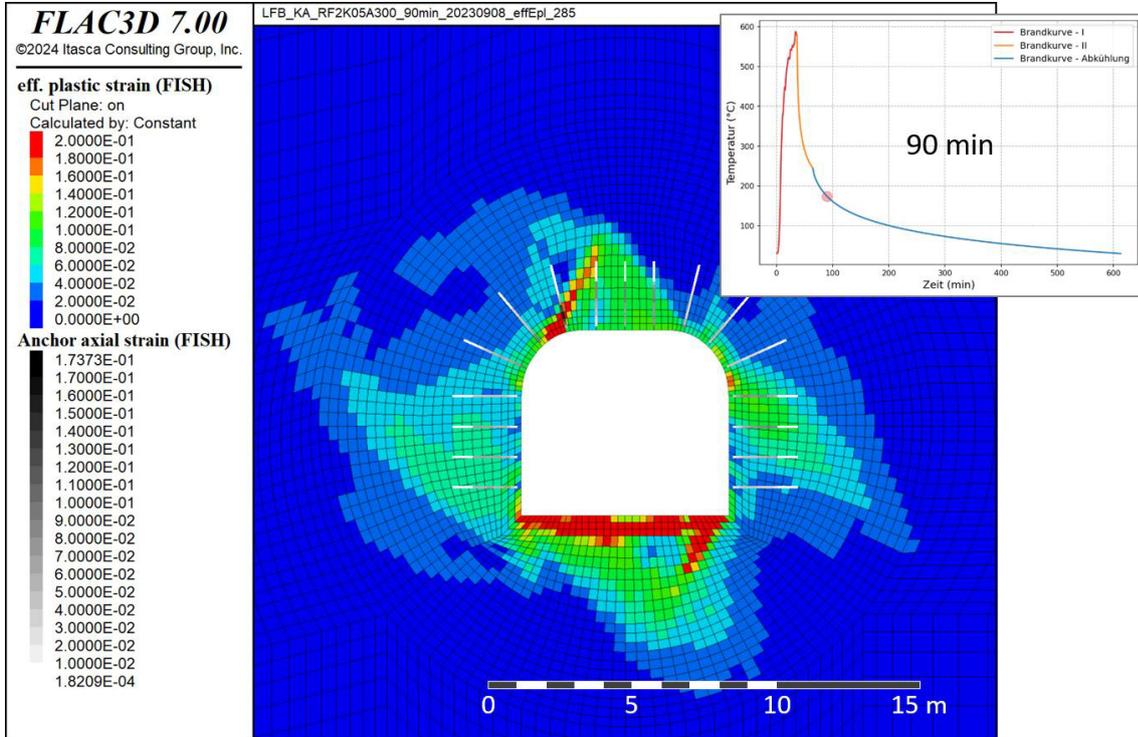


Abbildung 7-21: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_2

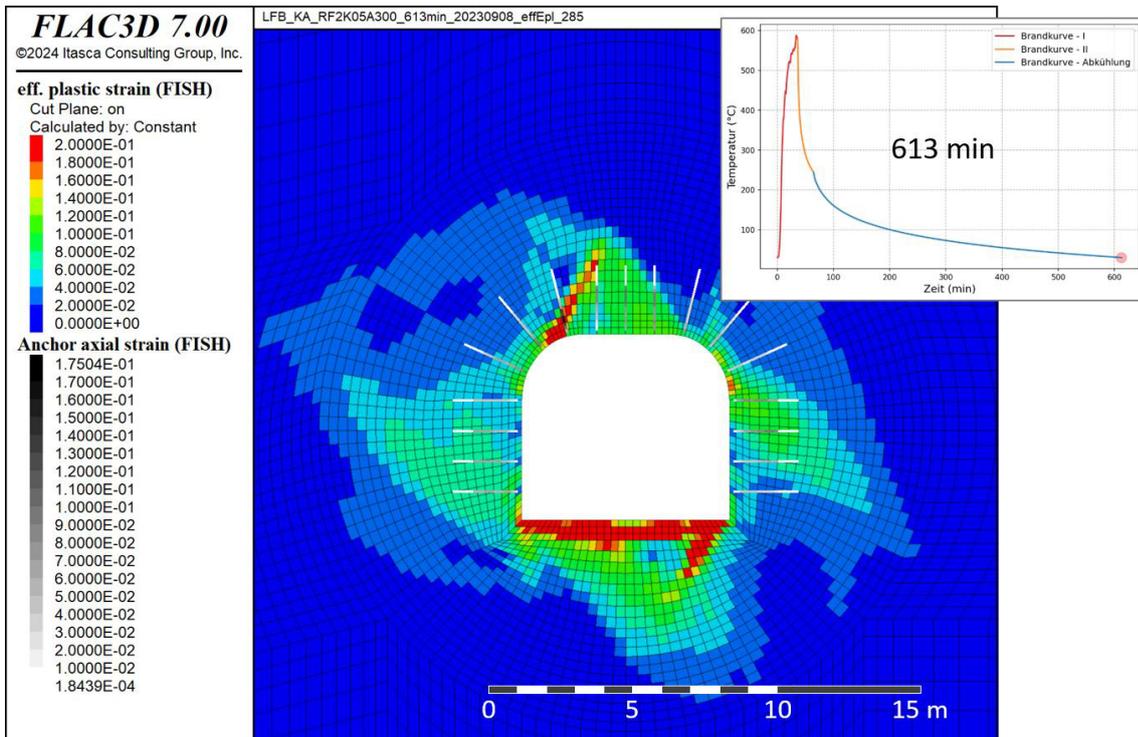


Abbildung 7-22: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_2

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 65

Anhang 9: Brandsimulation, RF_4 (KA, kompletter Ausfall)

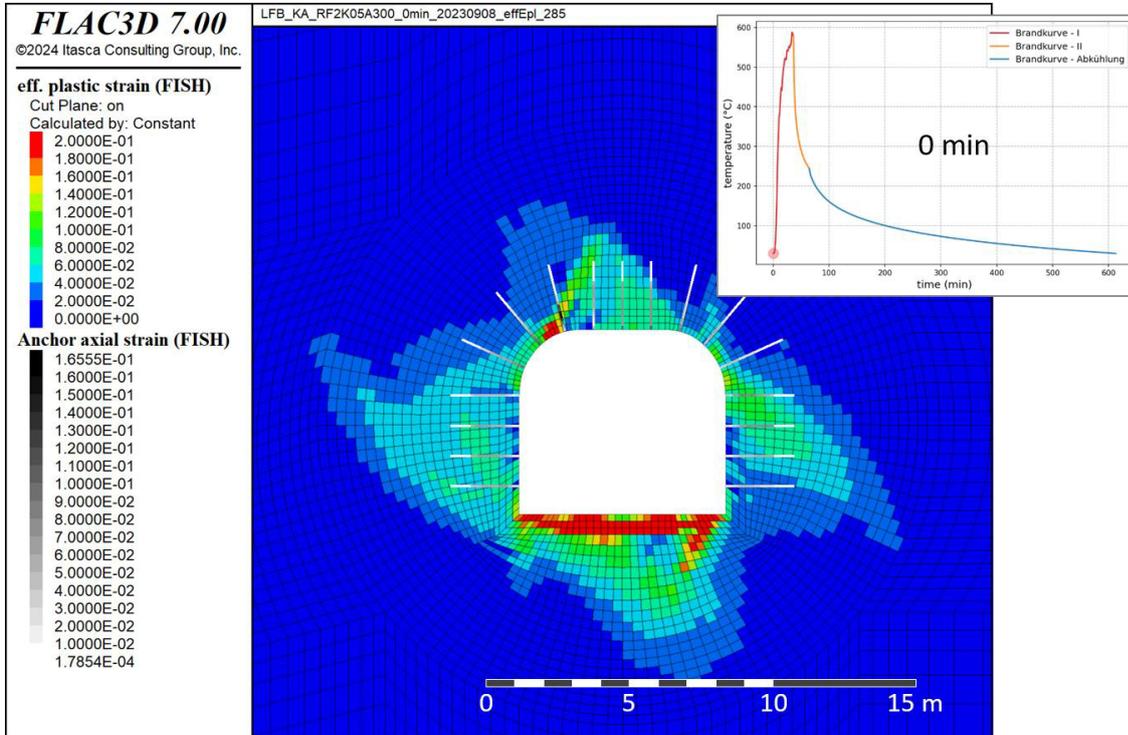


Abbildung 7-23: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_4

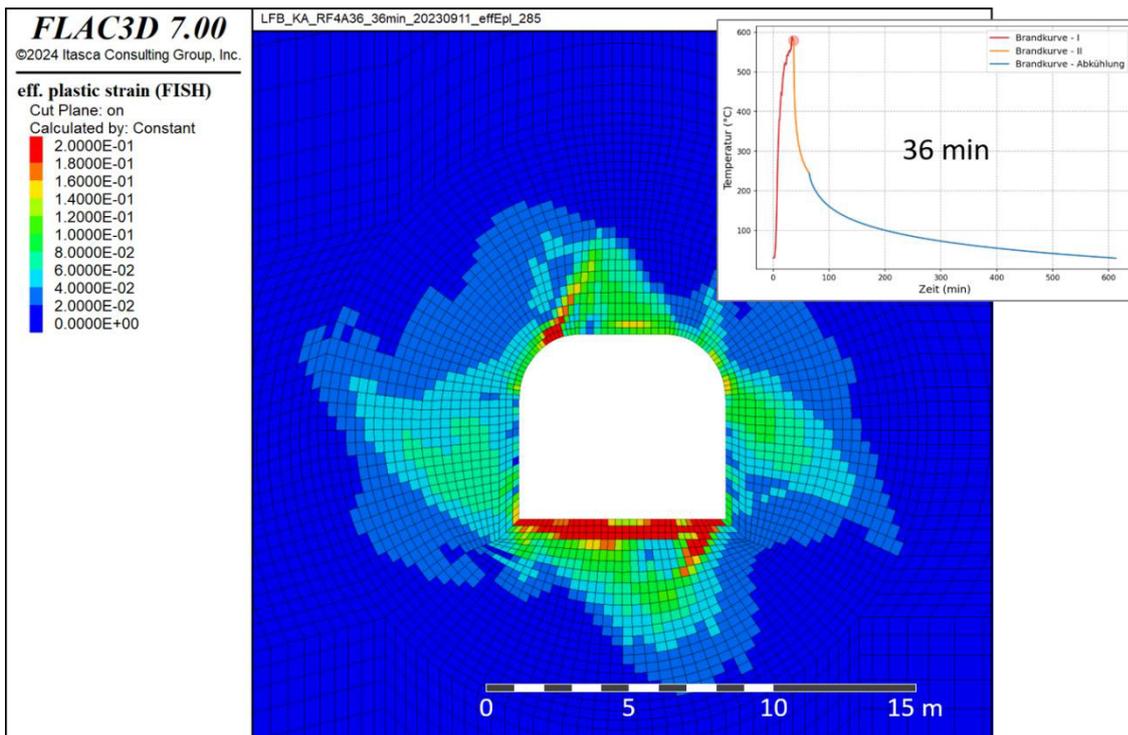


Abbildung 7-24: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_4

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 66

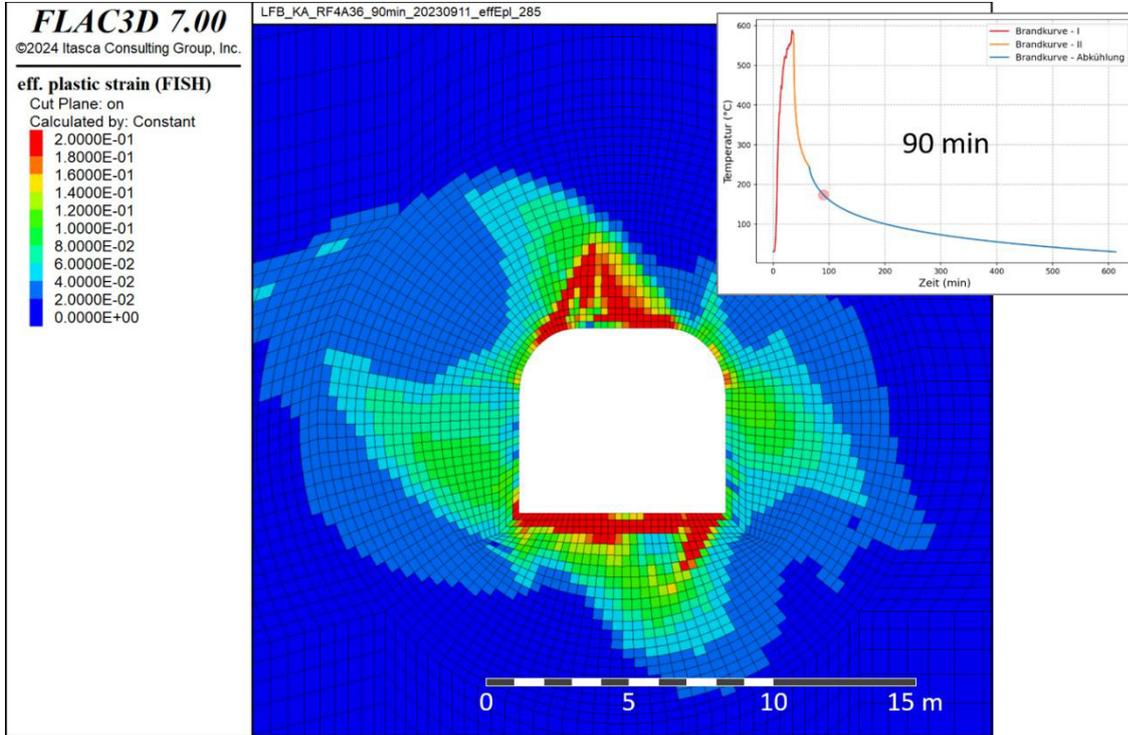


Abbildung 7-25: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_4

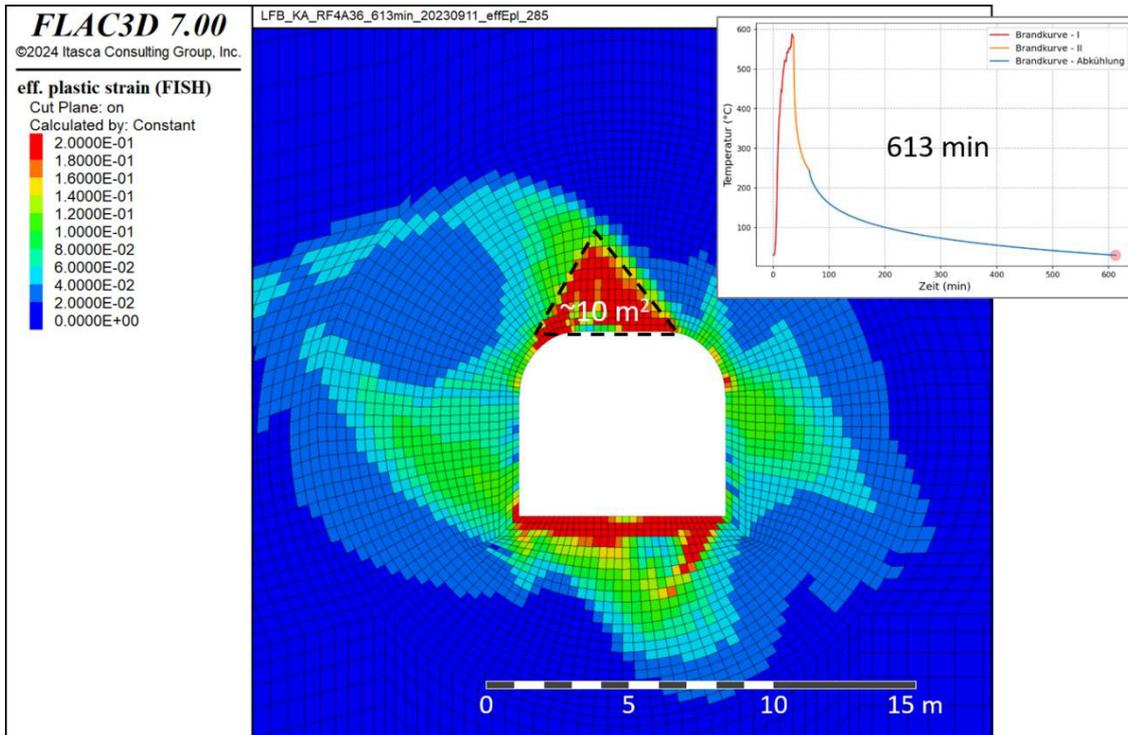


Abbildung 7-26: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_4

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 67

Anhang 10: Brandsimulation, RF_5 (vorher SPH, Sanierung mit KA)

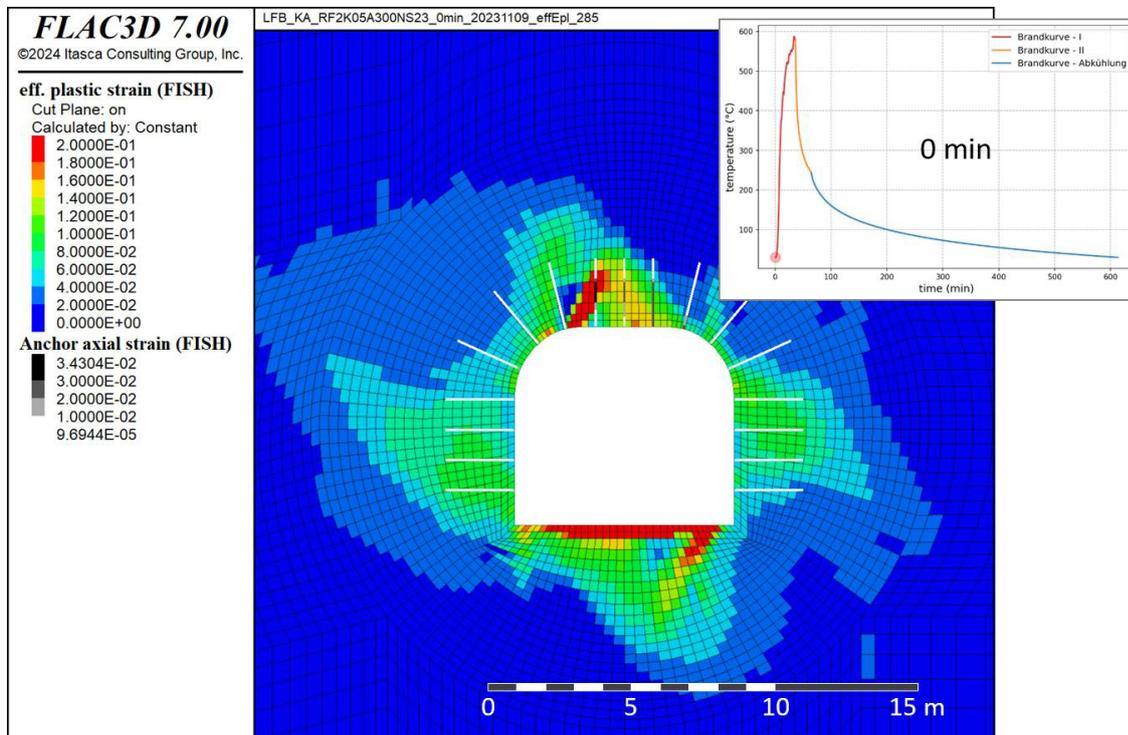


Abbildung 7-27: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_5

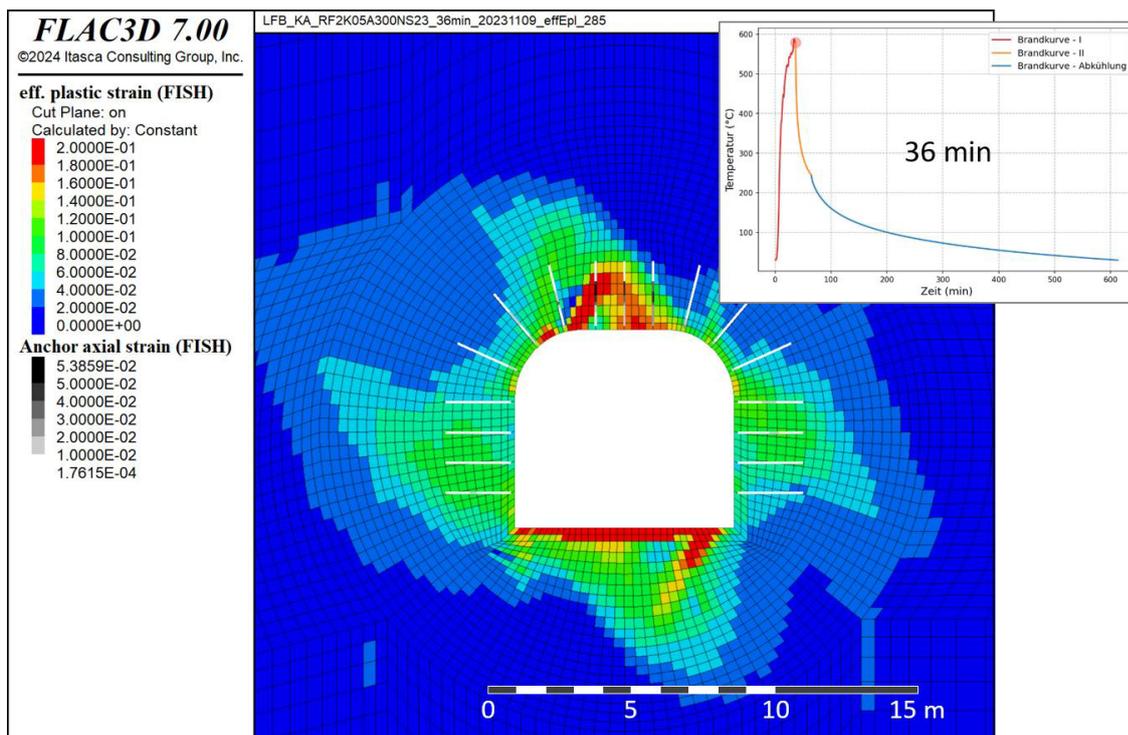


Abbildung 7-28: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_5

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 68

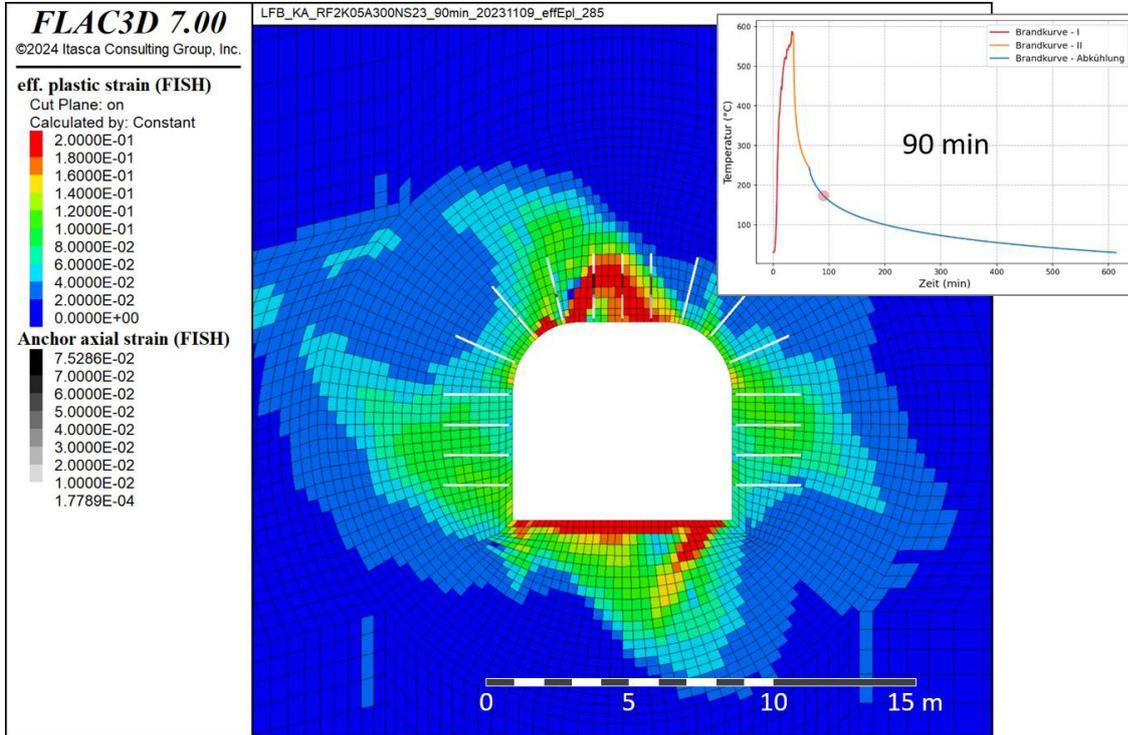


Abbildung 7-29: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_5

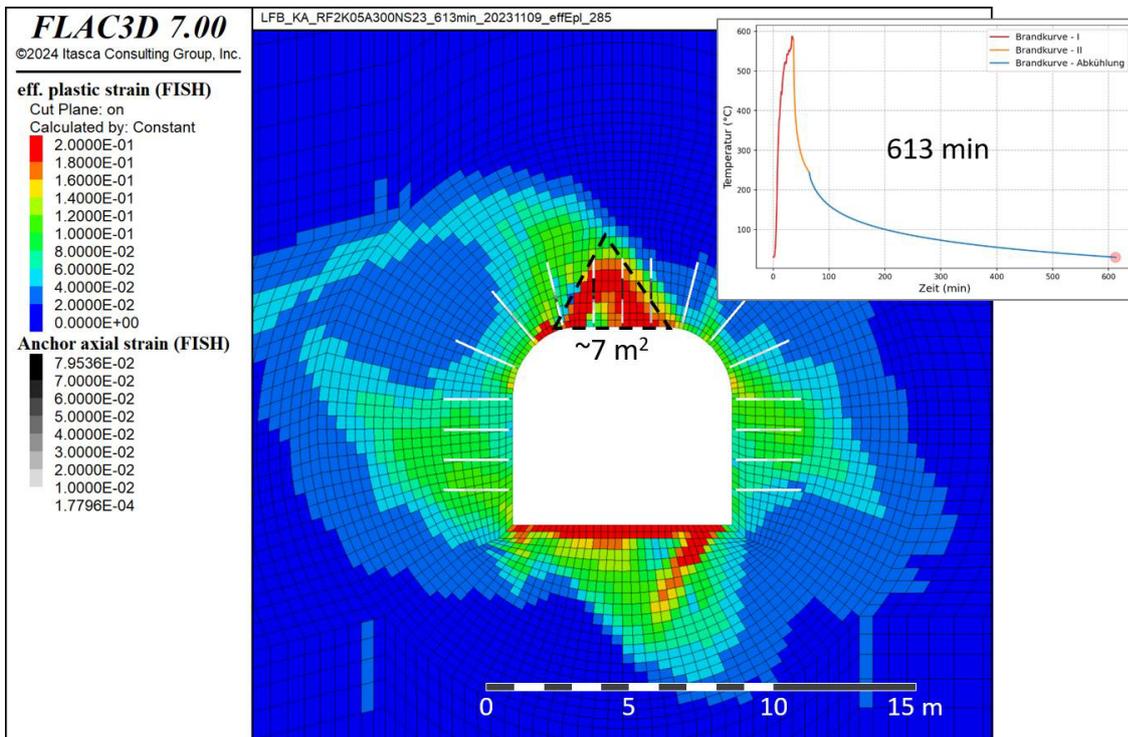


Abbildung 7-30: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_5

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 69

Anhang 11: Brandsimulation, RF_6 (vorher KA, Sanierung mit KA)

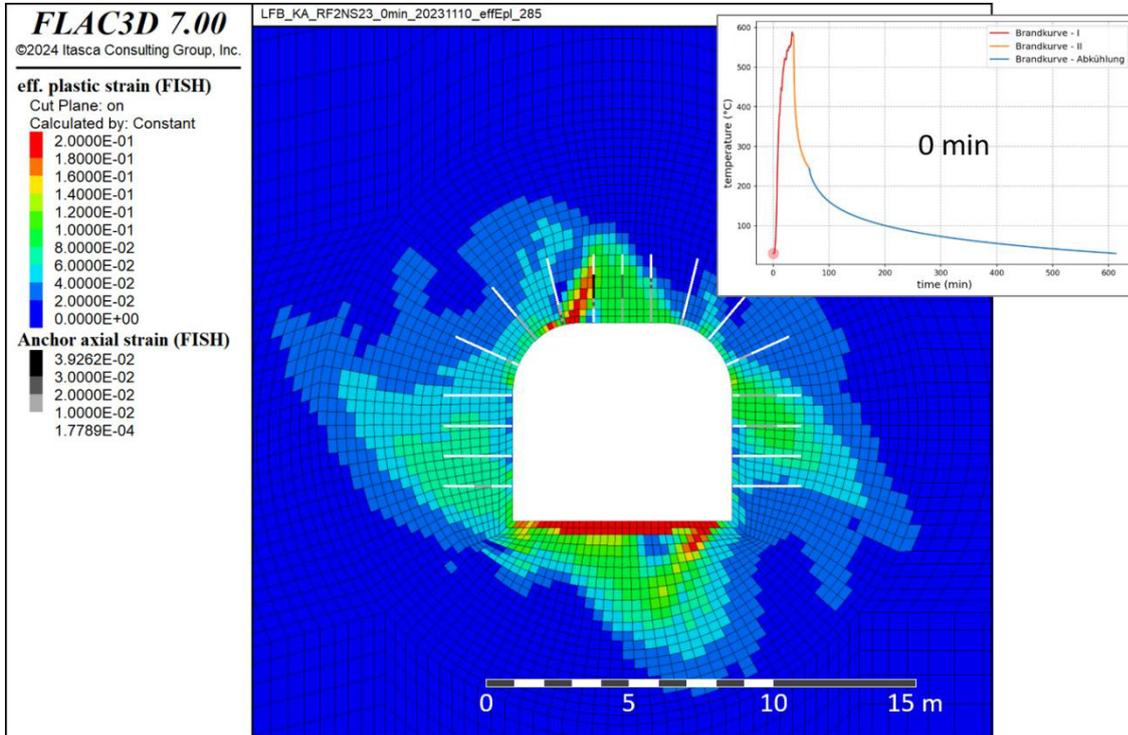


Abbildung 7-31: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 0 min der Brandsimulation, RF_6

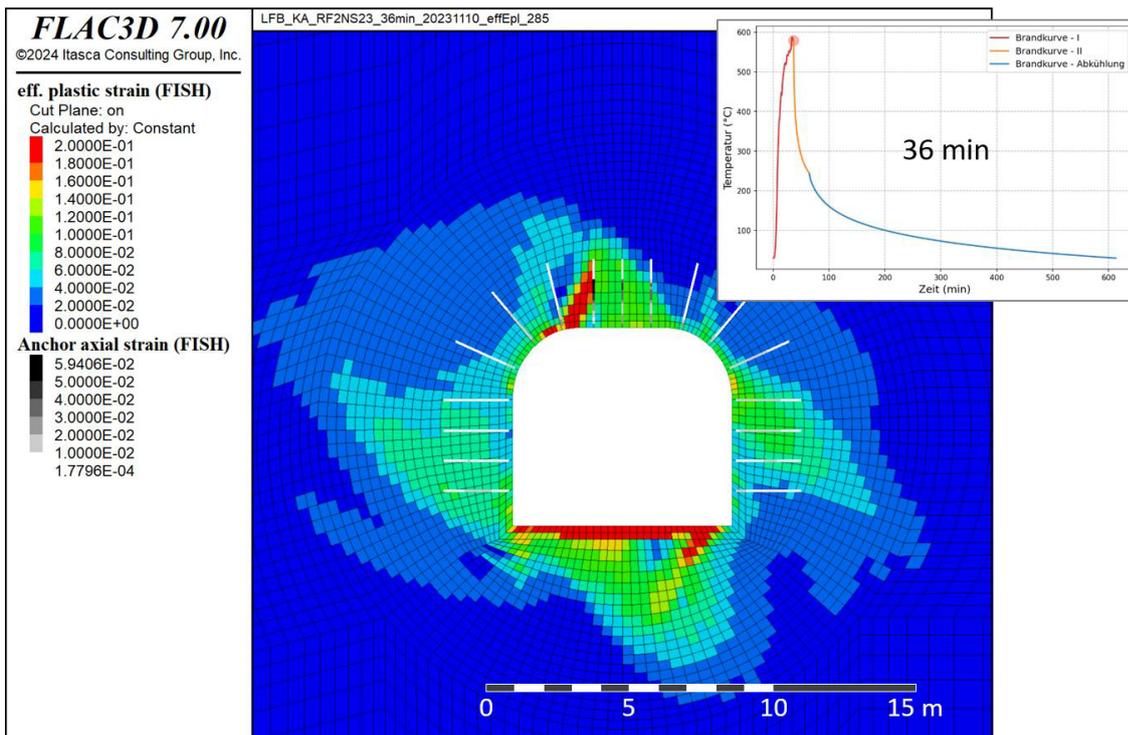


Abbildung 7-32: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 36 min der Brandsimulation, RF_6

ÜsiKo Phase 2 – Steinfall infolge Brand Abschätzung der Größe potenzieller Bruchkörper

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9KE					GC	LD	0001	00

Blatt: 70

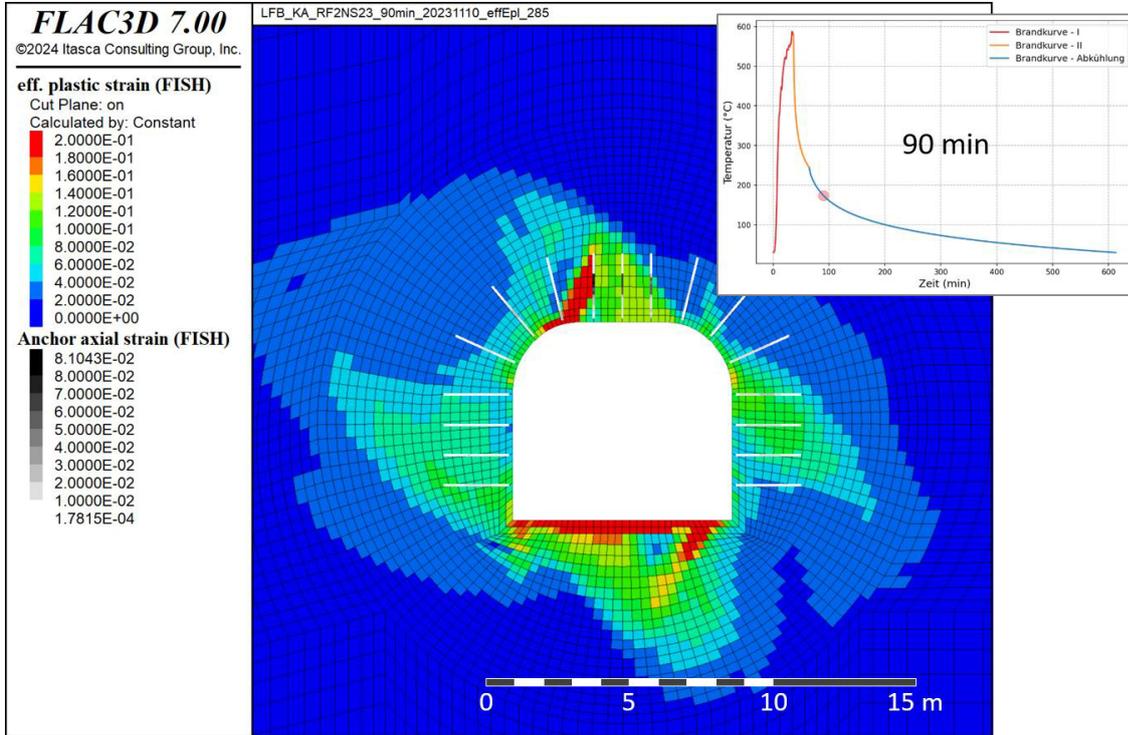


Abbildung 7-33: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 90 min der Brandsimulation, RF_6

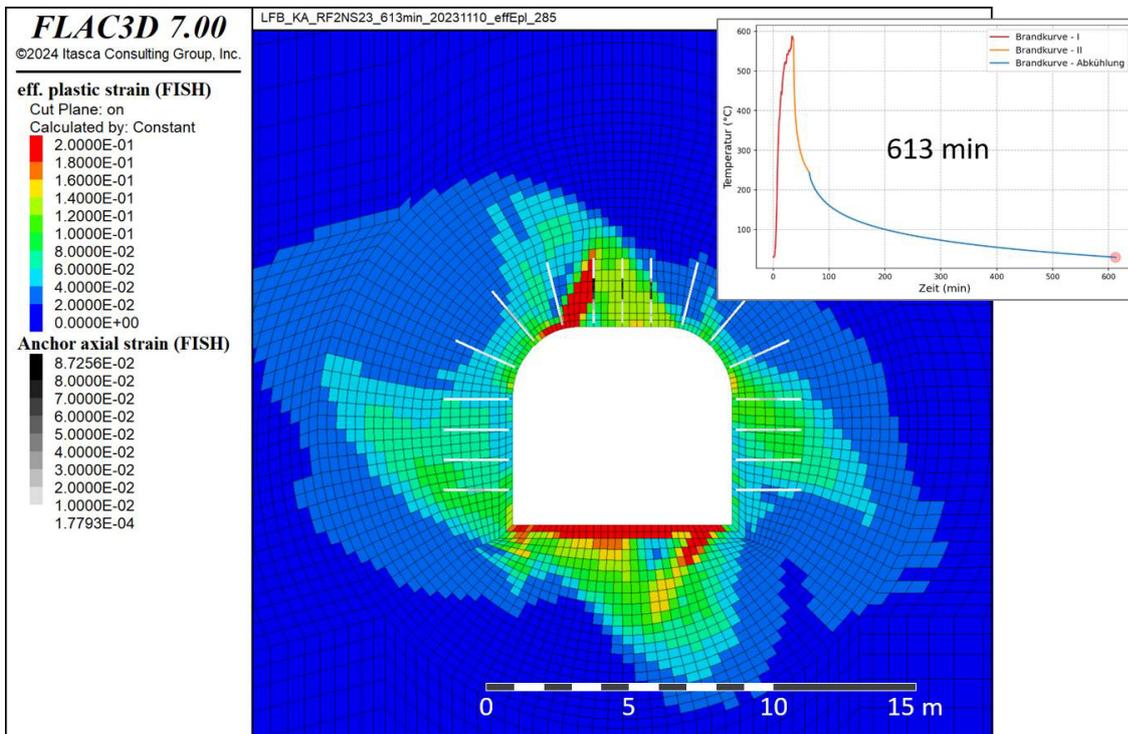


Abbildung 7-34: Plastische Dehnung zum Zeitpunkt 613 min der Brandsimulation, RF_6