



ÜsiKo Phase 2 - Auswirkungen eines Brandes auf den Ausbau unter Tage Fachöffentliche Ergebnispräsentation am 23./24.10.2024 in Braunschweig

Projekt Errichtung Endlager Konrad

Phase 2 der ÜsiKo: Auswirkungen eines Brandes auf den Ausbau unter Tage

**Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.**

1 Ziel und Aufgabenstellung

2 Spezifikation der Ausbausituation bzw. Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme

3 Brandmodellierung

4 Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Brandszenarien

5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die Firste für die Ausbausysteme 1 und 2

6 Bewertung der Auswirkungen des Wärmeeintrags für die Ausbausysteme 1 und 2

7 Ermittlung der Auswirkungen eines unterstellten Löserabsturzes im Ausbausystem 3

8 Zusammenfassende Betrachtung

1 Ziel und Aufgabenstellung

2 Spezifikation der Ausbausituation bzw. Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme

3 Brandmodellierung

4 Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Brandszenarien

5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die Firste für die Ausbausysteme 1 und 2

6 Bewertung der Auswirkungen des Wärmeeintrags für die Ausbausysteme 1 und 2

7 Ermittlung der Auswirkungen eines unterstellten Löserabsturzes im Ausbausystem 3

8 Zusammenfassende Betrachtung

- In Phase 1 der ÜsiKo wurde festgestellt, dass ergänzende Untersuchungen zu Auswirkungen eines Brands unter Tage auf den Ausbau möglich sind (Formulierung Delta 23)
- Prüfauftrag in ÜsiKo Phase 2 ist Betrachtung der Folgen eines brandinduzierten Steinfalls auf Einlagerungsgebäude während des Einlagerungsbetriebs.
- Im Ausgangspunkt gilt: Im bestimmungsgemäßen Betrieb wird ein Löserereignis durch den Streckenausbau verhindert. Eine Freisetzung von Radioaktivität ist hierbei ausgeschlossen.
- In ÜsiKo Phase 2 wird hypothetisch unterstellt, dass als Folge eines technischen Defekts eines mit einem Einlagerungsgebäude beladenen Transportwagens (TW) ein Brand entsteht.

Als Folge des Brands wird die Struktur bzw. die Festigkeit der Firste beeinträchtigt und ein Teil der Firste (bzw. des Ausbaus) stürzt auf das Abfallgebäude ab (Löserereignis).

Ziel und Aufgabenstellung

Randbedingungen



- Einige Randbedingungen waren durch die Systemanalyse Konrad (z. B. die Brandlast) oder durch die Einlagerungsbedingungen für das Endlager Konrad (z. B. die äußeren Abmessungen und Geometrien der Abfallbehälter) vorgegeben.
- Allgemein verfügbare Daten wurden ergänzt (z. B. Kenndaten für Stähle und Beton, thermodynamische Daten etc.).
- Daten, die spezifisch für das Endlager Konrad sind, wurden von der BGE zur Verfügung gestellt (z. B. die Informationen zu den Ausbausystemen).

Ziel und Aufgabenstellung

Vorgehensweise



- Die Erstellung und die Berechnungen des Brandszenarios erfolgen mit der Software „Fire Dynamic Simulation“ (FDS).
- Auf Grundlage des thermischen Energieeintrags in die Oberfläche des Ausbaus wird der Wärmetransport im Festkörper berechnet. Die Berechnungen werden mit dem Finite Elemente (FE)-Programm ANSYS durchgeführt.
- Zur Bewertung der Integrität der verschiedenen Ausbausysteme werden die thermisch induzierten Spannungen mit den Spannungen aus den ständig wirkenden Lasten überlagert. Zudem erfolgt eine Bewertung möglicher Abplatzungen.
- Für das Ausbausystem 3 werden mögliche Auswirkungen durch die induzierten Lasten in die Firste von der BGE bewertet und die Folgen ausgewiesen. Auf dieser Grundlage werden die mechanischen Auswirkungen für typische Gebinde berechnet und die Folgen bewertet.

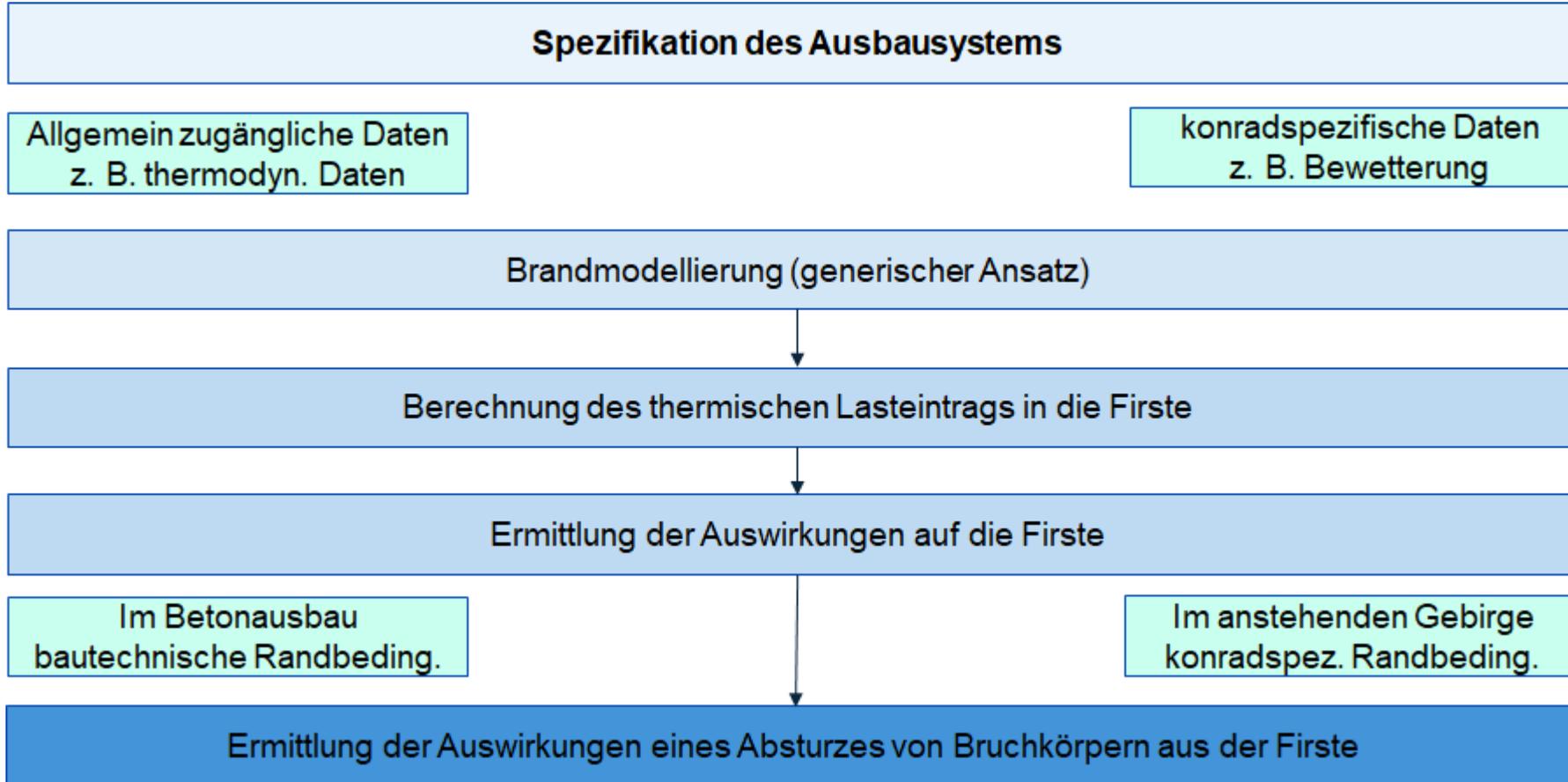
Ziel und Aufgabenstellung

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Es werden umfangreiche Modellierungen und Parameterstudien durchgeführt, um die Auswirkungen eines Brands auf den Streckenausbau zu bewerten. Dabei werden u. a. folgende Einflüsse untersucht:
 - Unterschiedliche Ausbausysteme der Strecken
 - Einflüsse auf das Brandverhalten und die Temperaturentwicklung (u. a. Position der Lache, Bewetterung)
 - Struktur der Firste und eines möglichen Löserereignisses (im Ausbausystem 3 durch die BGE)
 - verschiedene konservative Geometrien eines ausbrechenden Lösers
 - Modellierung von Schadensszenarien für unterschiedliche Behälertypen
- **Schadensbilder, die durch die Anforderungen der Endlagerungsbedingungen bzw. der zugrundeliegenden Störfallanalyse nicht abgedeckt werden, sind – selbst unter Berücksichtigung der erheblichen Konservativitäten in den durchgeführten Analysen - nicht zu befürchten.**
- **Daher sind die Randbedingungen aus den ursprünglichen Sicherheitsbetrachtungen weiterhin eingehalten.**

Ziel und Aufgabenstellung

Schema der Vorgehensweise



1 Ziel und Aufgabenstellung

2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme

3 Brandmodellierung

4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien

5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2

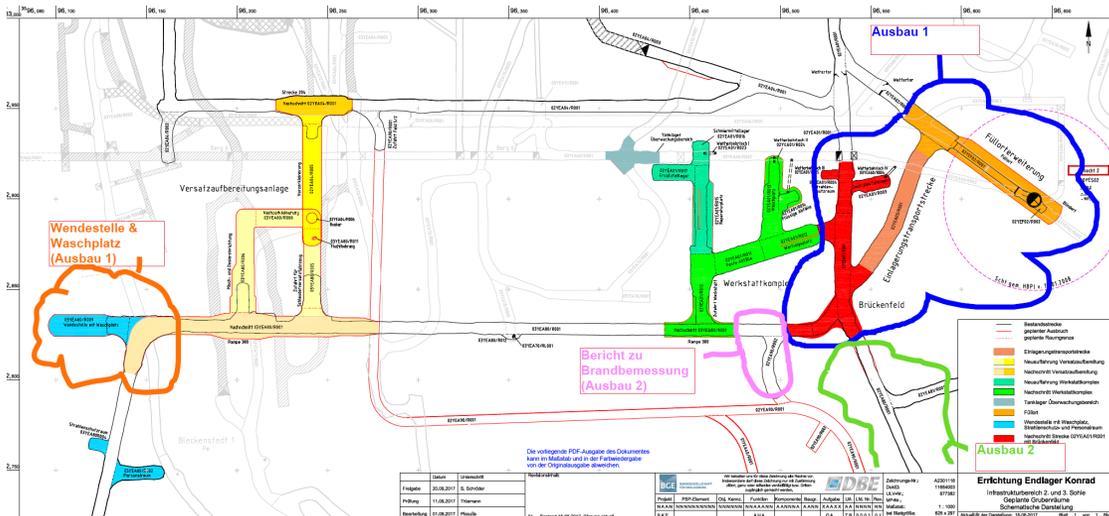
6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2

7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3

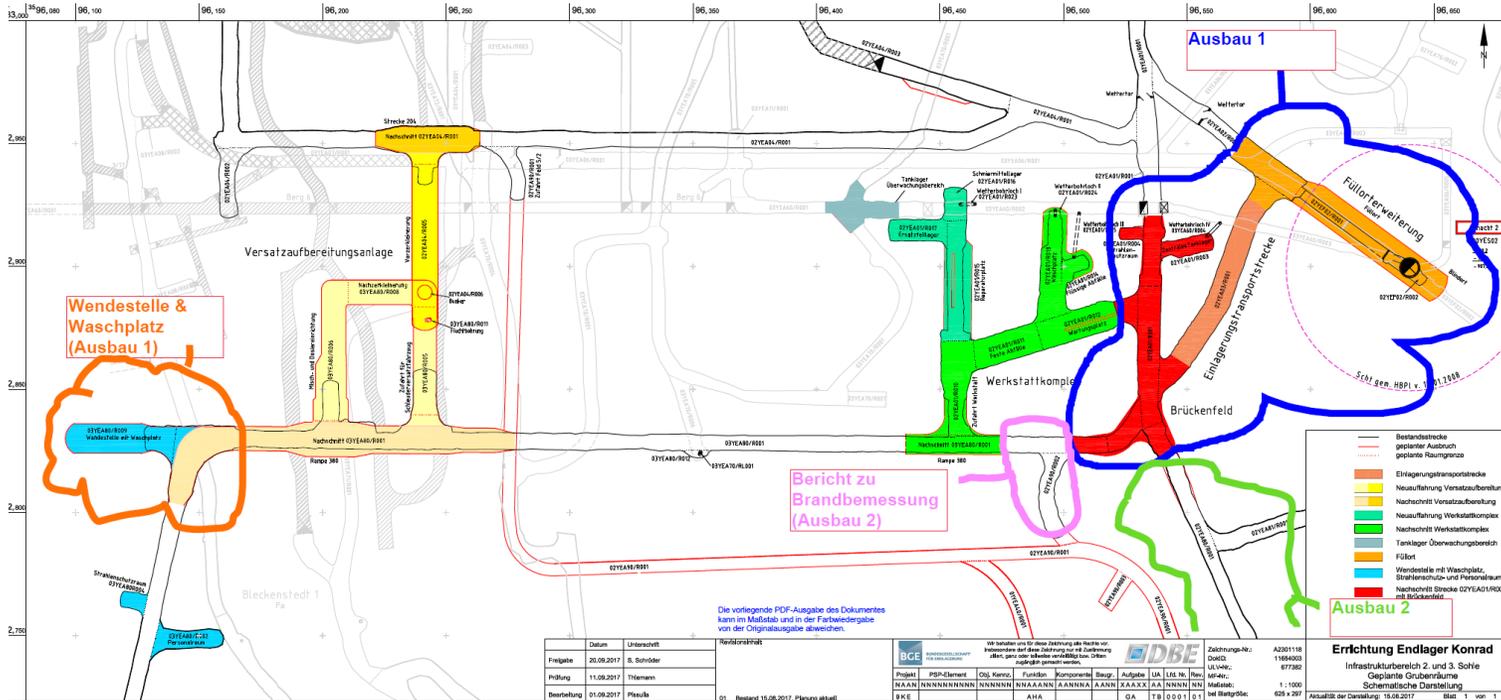
8 Zusammenfassende Betrachtung

Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme

- Es wurden ausschließlich untertägige Strecken betrachtet, die für den Transport von Abfallgebinden mit radioaktiven Abfällen vorgesehen sind.
- Es handelt sich um ein Betriebsereignis. Es werden zunächst Randbedingungen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb zugrunde gelegt. Dies betrifft z. B. die vorgesehene Bewetterung an dem zu betrachtenden Ort.
- Die Analyse ist generisch, d. h. dem Szenario liegt kein spezieller Ort mit einer speziellen Isometrie zugrunde. Es werden standardisierte Annahmen verwendet.



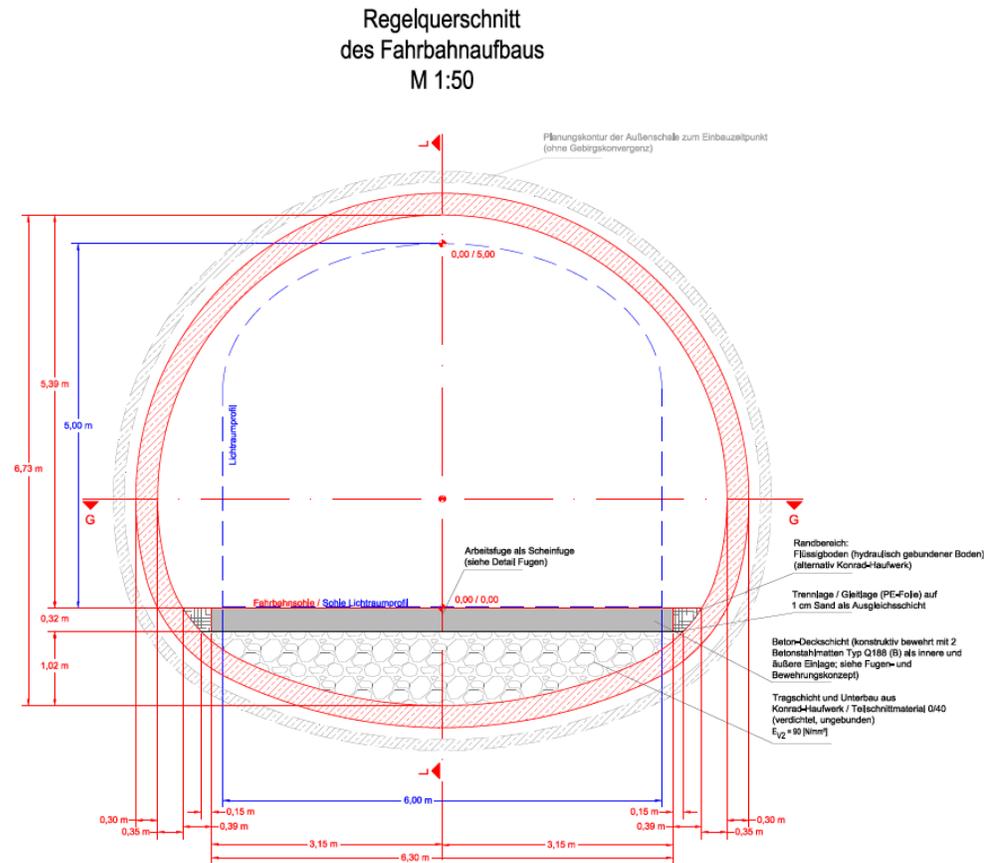
Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme



- Darstellung von Strecken und Bereichen, die mittels der Ausbausysteme 1 (blau bzw. orange gekennzeichnet) bzw. 2 (grün bzw. rosa gekennzeichnet) ausgebaut wurden.
- Im Rahmen der Untersuchungen sind die blau, grün und rosa umrandeten Bereiche betrachtet worden.
- Im orange umrandeten Bereich werden keine Gebinde transportiert. Daher wurde dieser nicht betrachtet.

Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme

Ausbausystem 1



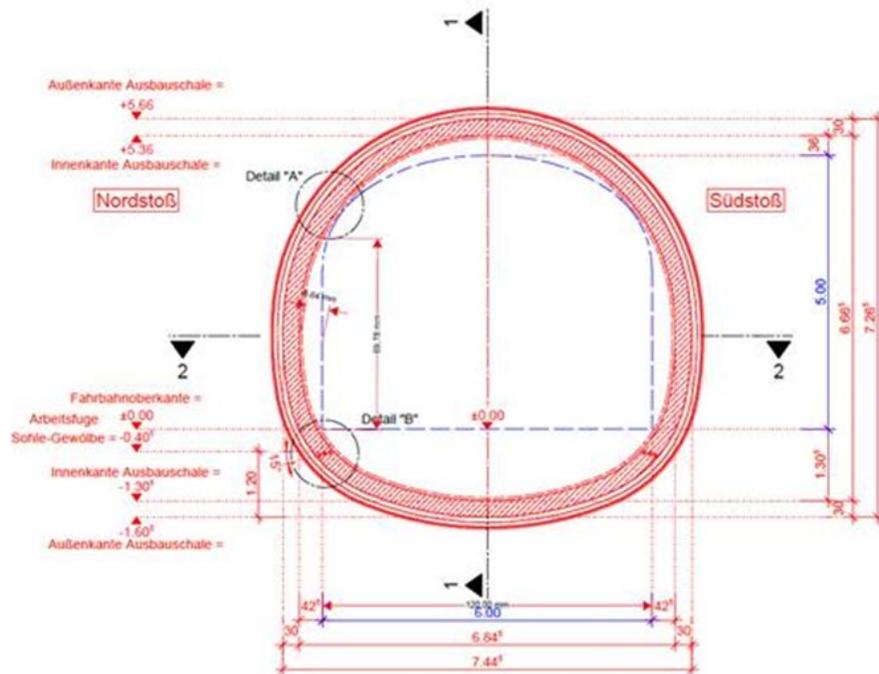
Ausbausystem 1

- Füllort, Füllortenerweiterung, Einlagerungs- und Transportstrecke (ETS), Brückenfeld
- zweischaliges Ausbaukonzept mit einer nachgiebigen, geschlitzten Außen- und einer bewehrten Innenschale
- Außenschale ca. 20 cm dicke Spritzbetonschale mit einer konstruktiven Mattenbewehrung und Ausbauankern.
- Innenschale 30 cm dicke Spritzbetonschale und Stabstahlbewehrung

Querschnitt zweischaliger Ausbau - Ausbausystem 1

Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme

Ausbausystem 2



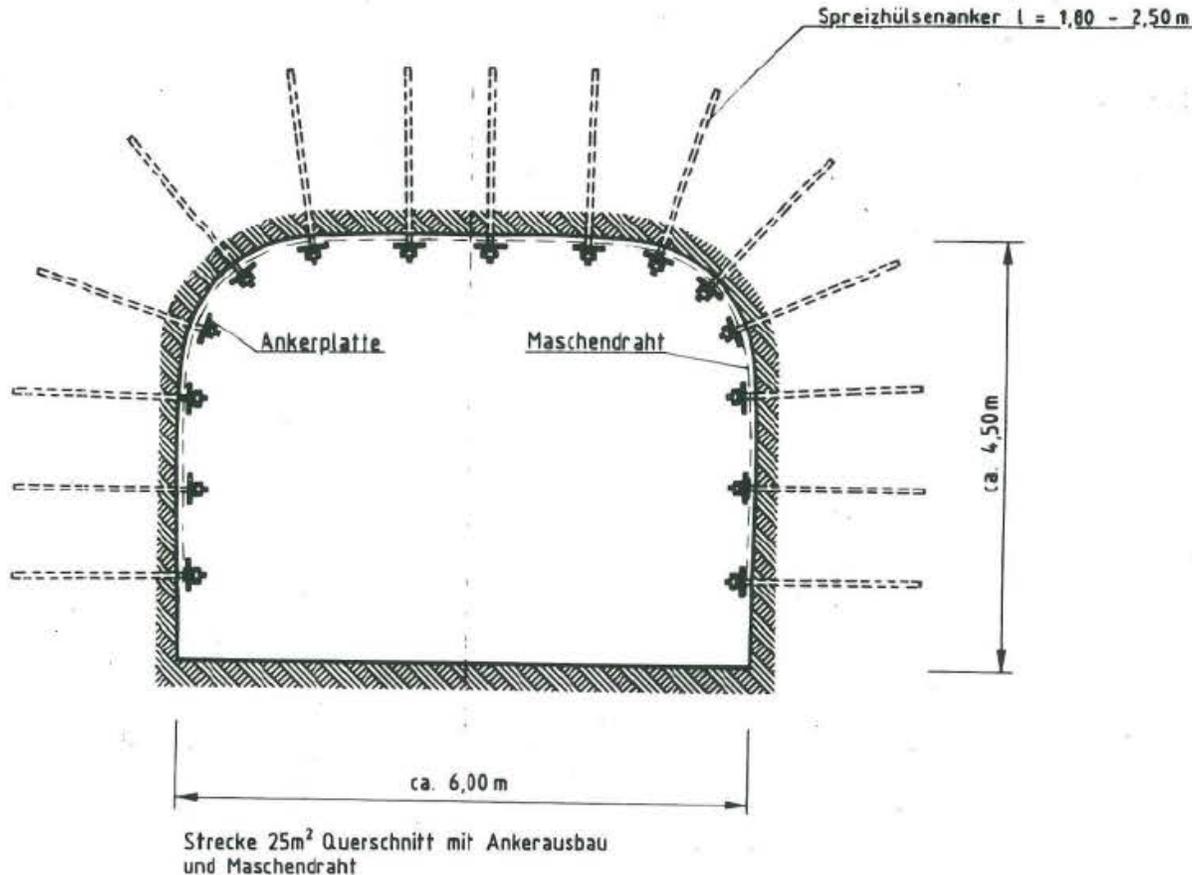
Ausbausystem 2 (zwei Varianten)

- normaler Spritzbeton oder
- Stahlfaserspritzbeton
- Bereiche 03YEA80/R001 und 02YEA90/R002
- Berechnung mit 30 cm dicken Stahlfaserspritzbetonschale mit einer Bewehrungsmatte, Überdeckung der Baustahlmatte i. d. R. 35 mm

Querschnitt einschaliger Ausbau - Ausbausystem 2

Ermittlung repräsentativer Ausbausysteme

Ausbausystem 3



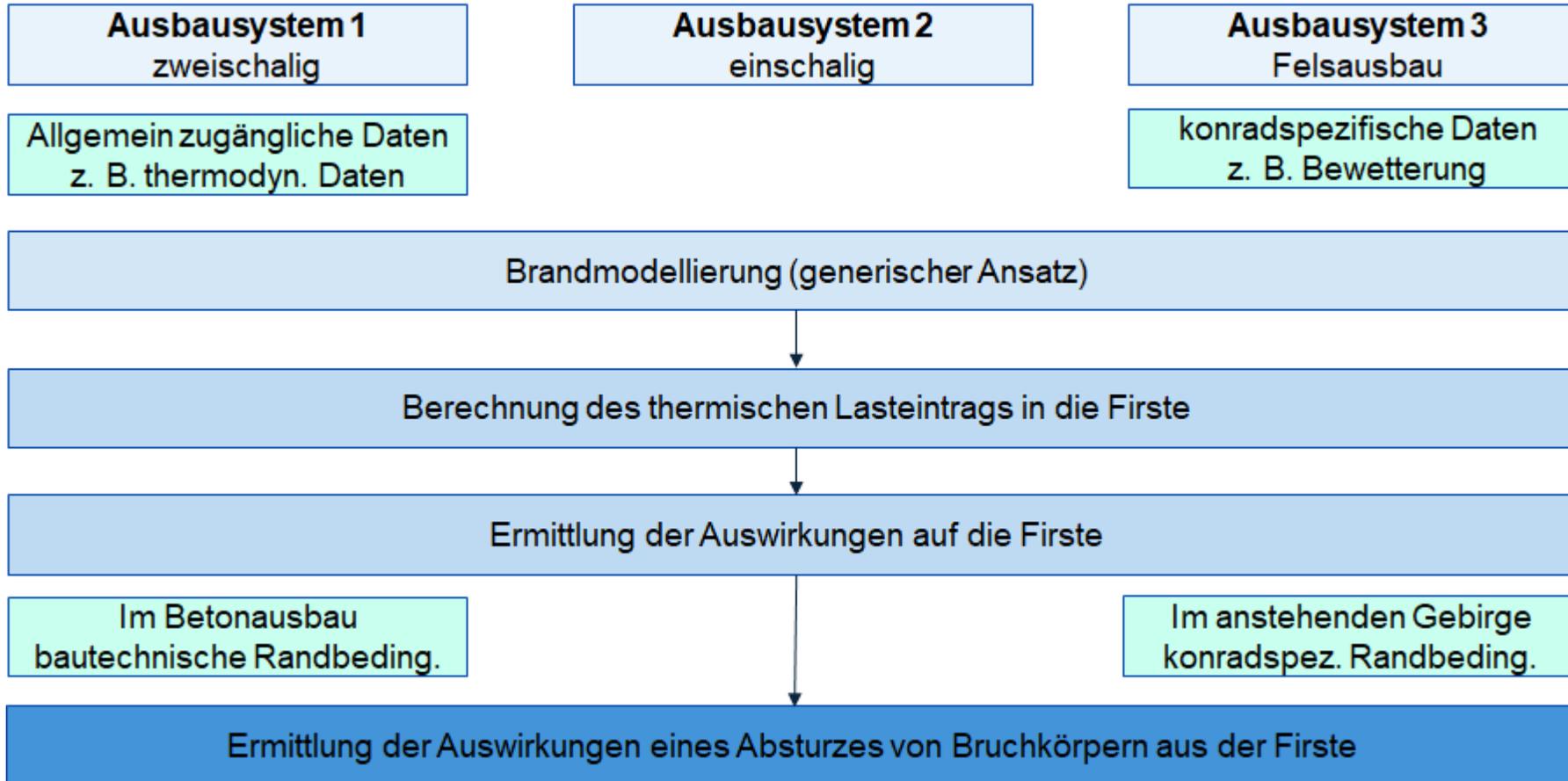
Ausbausystem 3 (kein Spritzbetonausbau)

- Einlagerungskammern (ELK) und zugehörige Zufahrten
- Felsausbau mit Ankern (Sprezhülsen- und Klebeanker) und Maschendraht
- Betrachtung zweier verschiedener Gesteinstypen
 - Tongestein
 - Eisenoolith

Querschnitt ELK bzw. Kammerzufahrt - Ausbausystem 3

Ziel und Aufgabenstellung

Schema der Vorgehensweise



1 Ziel und Aufgabenstellung

2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme

3 Brandmodellierung

4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien

5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2

6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2

7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3

8 Zusammenfassende Betrachtung

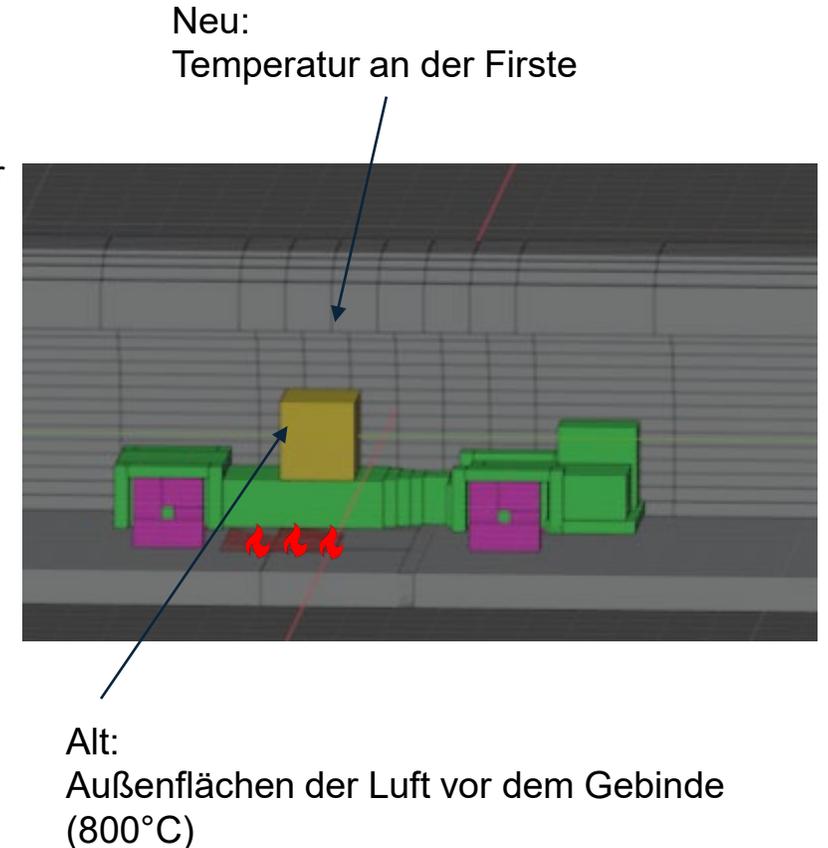
Brandmodellierung – Herangehensweise

Status Quo: Mathematische Herleitungen

- Ursprüngliche Abschätzung der thermischen Last, die in Folge eines Brands eines Transportwagens untertage auf die Gebinde wirken kann, durch die GRS im Planfeststellungsverfahren.
- Ausweisung einer Modellkurve (PTB-Kurve) mit konservativen Abschätzungen bezüglich der vorliegenden Lufttemperaturen an den Oberflächen der Gebinde über den zu betrachtenden Zeitraum des Brands.
- Gleichbleibende Temperatur vor allen Außenflächen der Gebinde von 800°C während eines einstündigen Brands.

Vorgehensweise in der ÜsiKo: Durchführung einer Brandsimulation

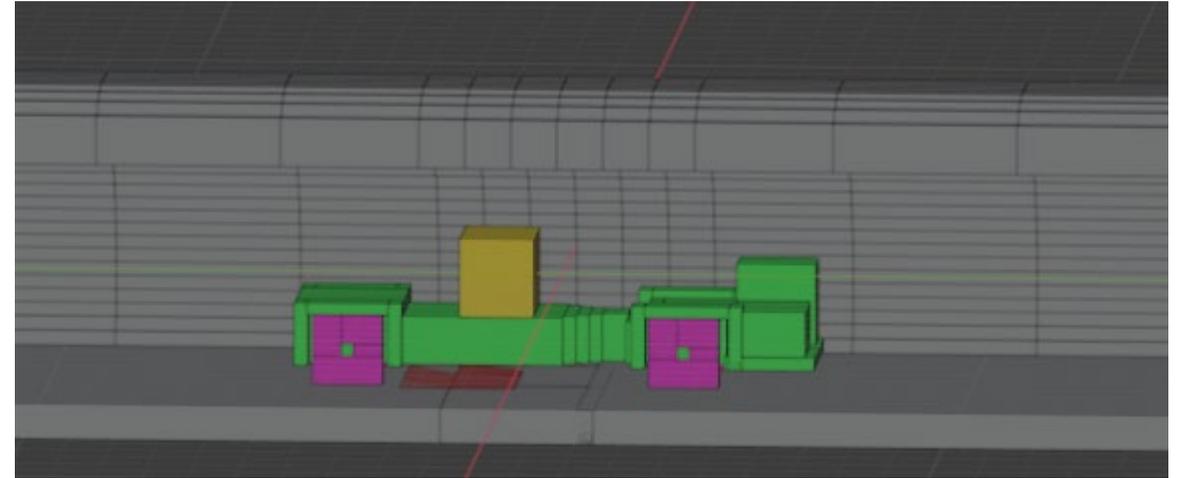
- Nutzung aktuell zugänglicher Simulationsmethoden
- Ermittlung des Wärmeeintrags in das Grubengebäude (nicht primär der Temperatur am Gebinde).
- Auf Grundlage der Ansätze und Herleitungen der PTB-Kurve Berechnung mit neuesten Erkenntnissen zum aktuell vorgesehenen TW.
- Durchführung von Voruntersuchungen und Simulationen.



Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Übernommene Parameter

Übernommene Parameter	Übernommene Werte
Flüssige Brandlast	Diesekraftstoff: 300 l
	Hydrauliköl: 230l
	Weitere Öle: 183 l
	Summe: 713 l Brandlast
Abbrandrate flüssige Brandlast	150 kg/(m ² h)
Heizwert flüssige Brandlast	38,25 MJ/kg
Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate	1,59 MW/m ²
Brandfläche Diesel	10 m ²
Streckenuntergrund	Gerade Fahrbahn, nicht gewölbt oder abschüssig
Abbrandrate Reifen	40 kg/(m ² h)
Heizwert Reifen	33,6 MJ/kg
Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate	0,373 MW/m ²



Die flüssige Abbrandrate, die Abbrandrate der Reifen und die Wärmefreisetzungsraten wurden mit einer Literaturrecherche validiert.

Aus Projektgründen und um abdeckend vorzugehen, wurden die Brandlasten des dieselbetriebenen TW verwendet. Parallel erfolgte ein Änderungsverfahren zum batterieelektrischen TW.

Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Angepasste Parameter



Einige Parameter sind anfangs mittels Parameterstudien bewertet und teilweise angepasst worden.

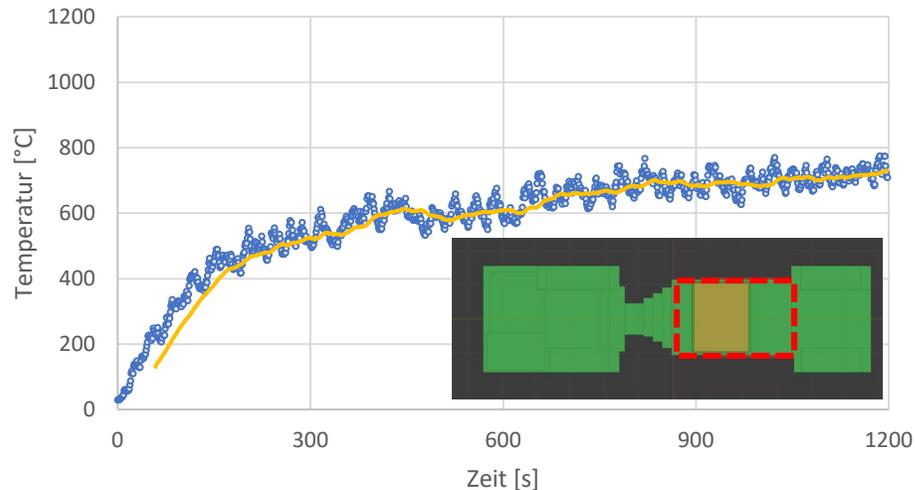
Dabei handelt es sich um:

- Position der ölhaltigen Lache
- Geometrie des TW und Brandfläche der Reifen
- Berücksichtigung der Masse der Gebinde und des TW als Wärmesenke
- Streckenlänge und -untergrund
- Bewetterungsstrom
- Gebirgseigenschaften für den Ausbauquerschnitt 3

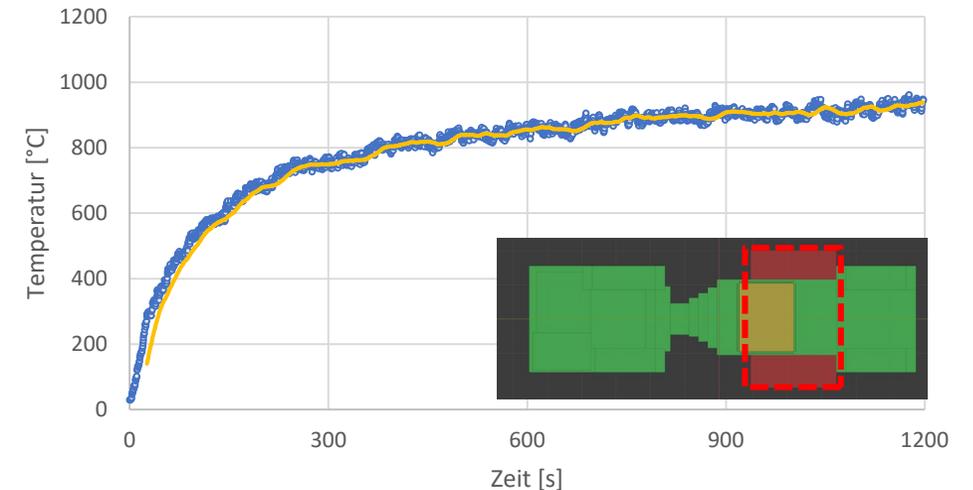
Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Lachengröße und Lachenpositionierung

Verlauf der Maximaltemperatur an der Firste mit der Lache direkt unter dem TW



Verlauf der Maximaltemperatur an der Firste mit der Lache mittig unter dem TW mit Sichtkontakt zur Firste



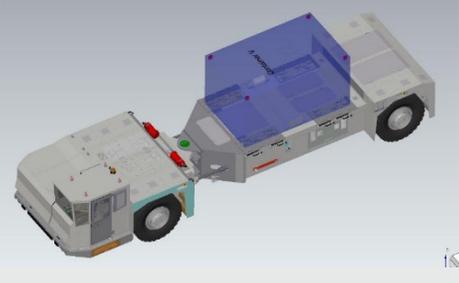
Durch Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass an der Firste höhere Temperaturen entstehen, wenn die Flammen ohne Hindernis und Verschattung an die Firste ragen und strahlen können. Die Maximaltemperaturen unterscheiden sich in der Untersuchung um ca. 200°C.

Daher ist die Annahme der neuen Positionierung der Lache für die Betrachtung des Wärmeeintrags in die Firste als konservativ zu bewerten.



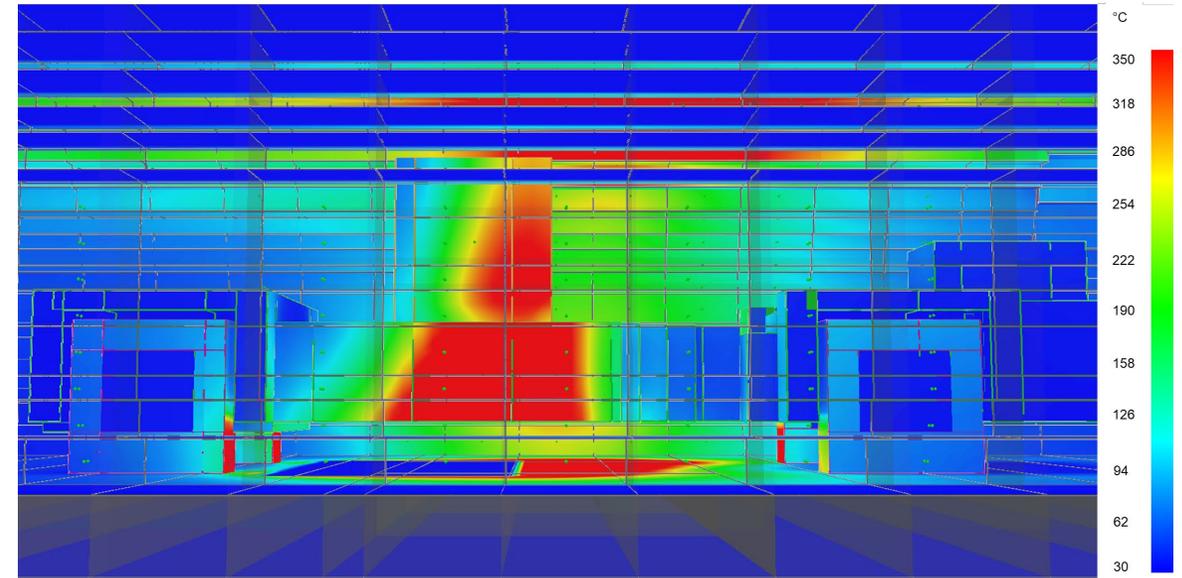
Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Geometrie des TW und Brandfläche der Reifen

Angepasste Parameter	angepasste Werte
Feste Brandlast	Reifen: Vorne 409,5 kg hinten 409,5 kg (Gummimasse)
Brandfläche Reifen	Ca. 3,42 m ² pro Reifen
Radstand	11,2 m
Neues Fahrzeugmodell	

Unabhängig vom Antrieb (Diesel/Batterie) erfolgten Modifikationen in der Planung des TW, die übernommen wurden. Folgende Unterschiede ergeben sich:

- Die Reifen sind kleiner, weswegen sich die Brandlast und die Brandfläche der Reifen verringern.
- Der Reifenbrand wird durch die Radkästen abgeschirmt.
- Der Radstand hat sich erhöht.



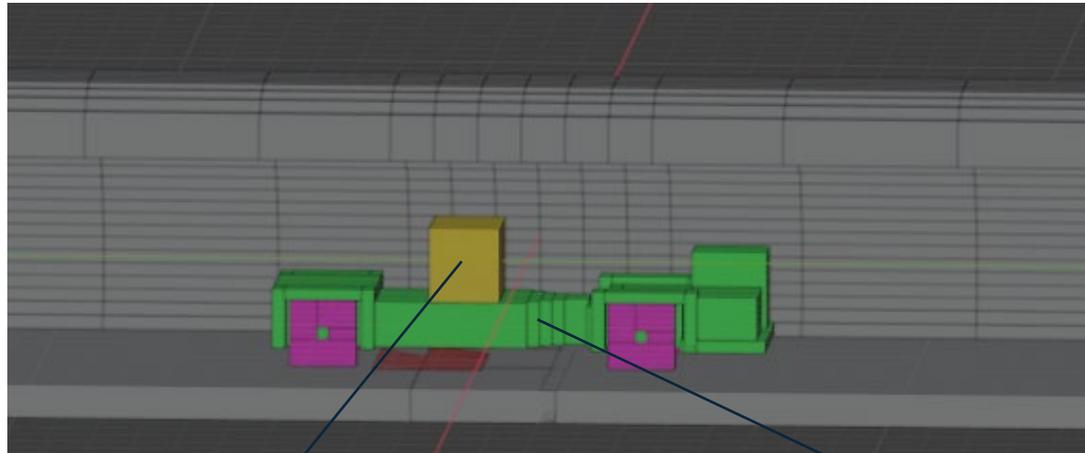
Durch die Abschirmung der Reifen und den größeren Radstand zeigt sich in Vorsimulationen, dass kleine Flächen der Reifen die Entzündungstemperatur erreichen und die angenommene Brandlast und Brandoberfläche als konservativ anzusehen sind.



Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Berücksichtigung der Massen als Wärmesenken

- In der Simulation werden die Materialeigenschaften berücksichtigt und die Wärme aus dem Brand aufgenommen und weitergeleitet.
- Die Wärmemengen, die aufgenommen werden, sind gegenüber der Wärmemenge, die der Brand verursacht, gering.



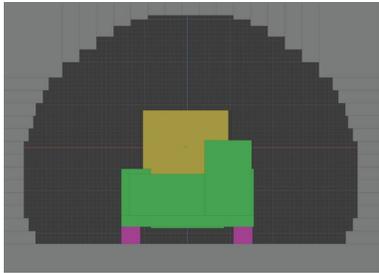
Annahme Konrad-Container
(Typ VI) aus Gusseisen

Annahme TW aus Stahl

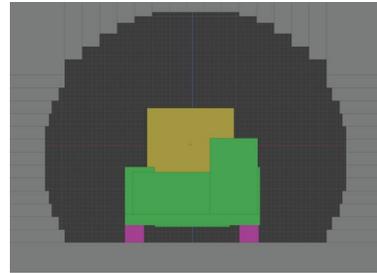
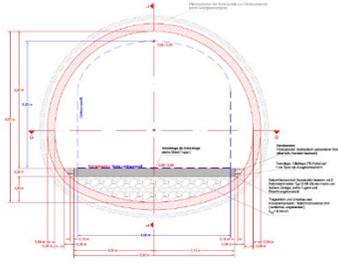


Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

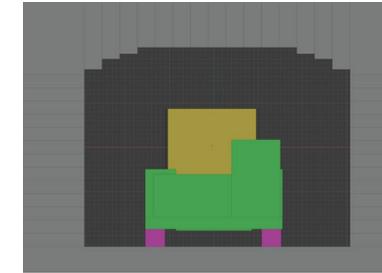
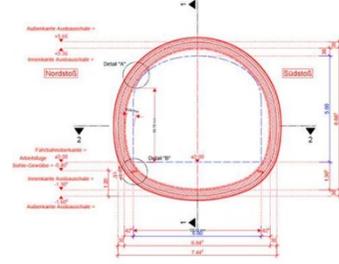
Streckenmodellierung



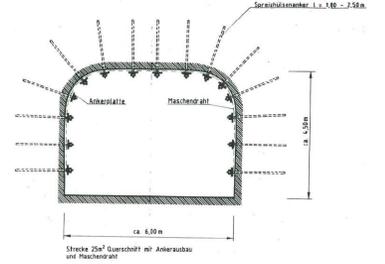
Ausbauquerschnitt 1



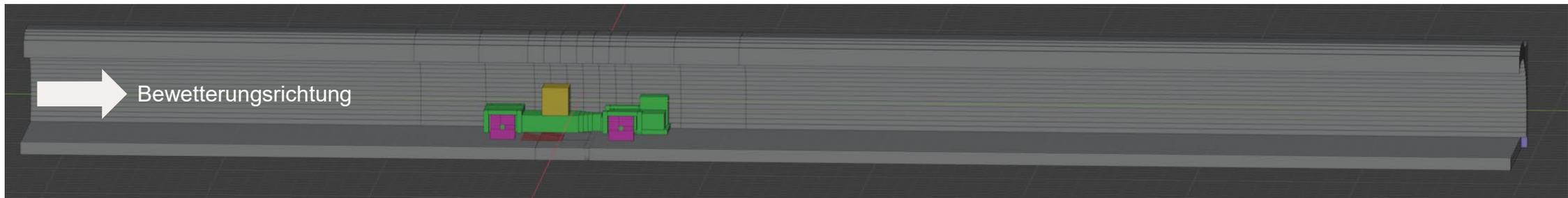
Ausbauquerschnitt 2



Ausbauquerschnitt 3



Die Länge der Strecke wird so gewählt, dass die Numerik nach aktuellem Stand der Technik keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben wird. Daher entspricht die Länge mit 96 m ungefähr der 10-fachen Länge des Fahrzeugs.



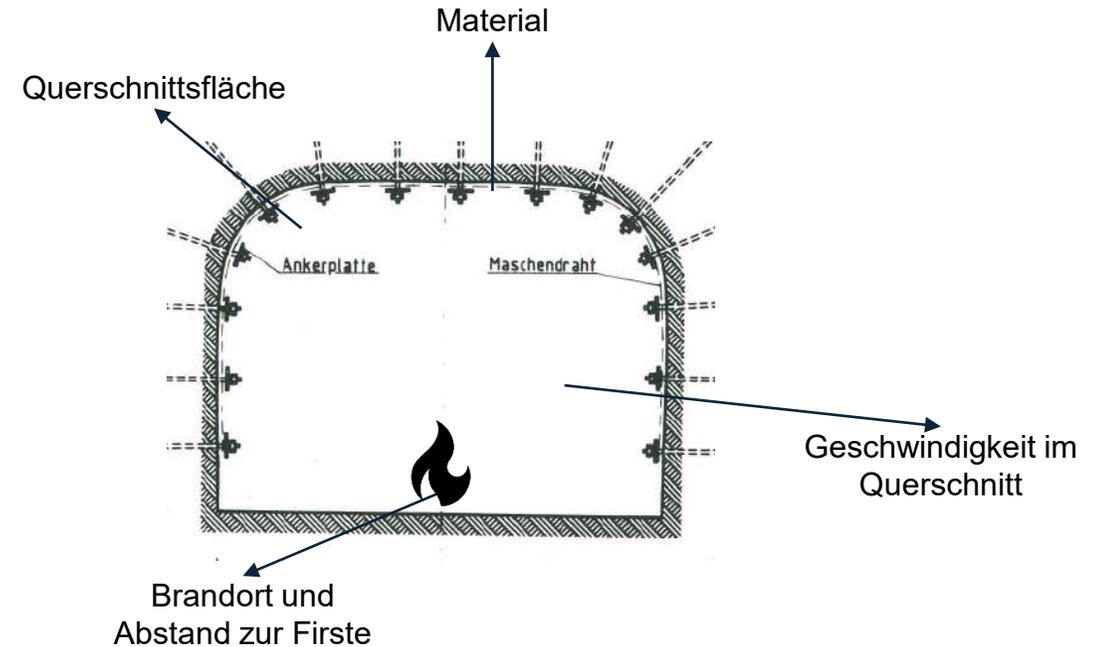
Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Bewetterungsstrom & Materialeigenschaften im Querschnitt

In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass geringere Bewetterungsströme zu einer höheren Temperaturbelastung auf die Firste führen. Daher wurde in der Simulation der für den jeweiligen Querschnitt geringstmögliche Bewetterungsstrom berücksichtigt.

	Querschnittsfläche [m ²]	Bewetterungsstrom [m ³ /s]	Querschnittsgeschwindigkeit [m/s]
Ausbausystem 1	32	13,7	0,43
Ausbausystem 2	32	62,7	1,96
Ausbausystem 3	27	17,25	0,64

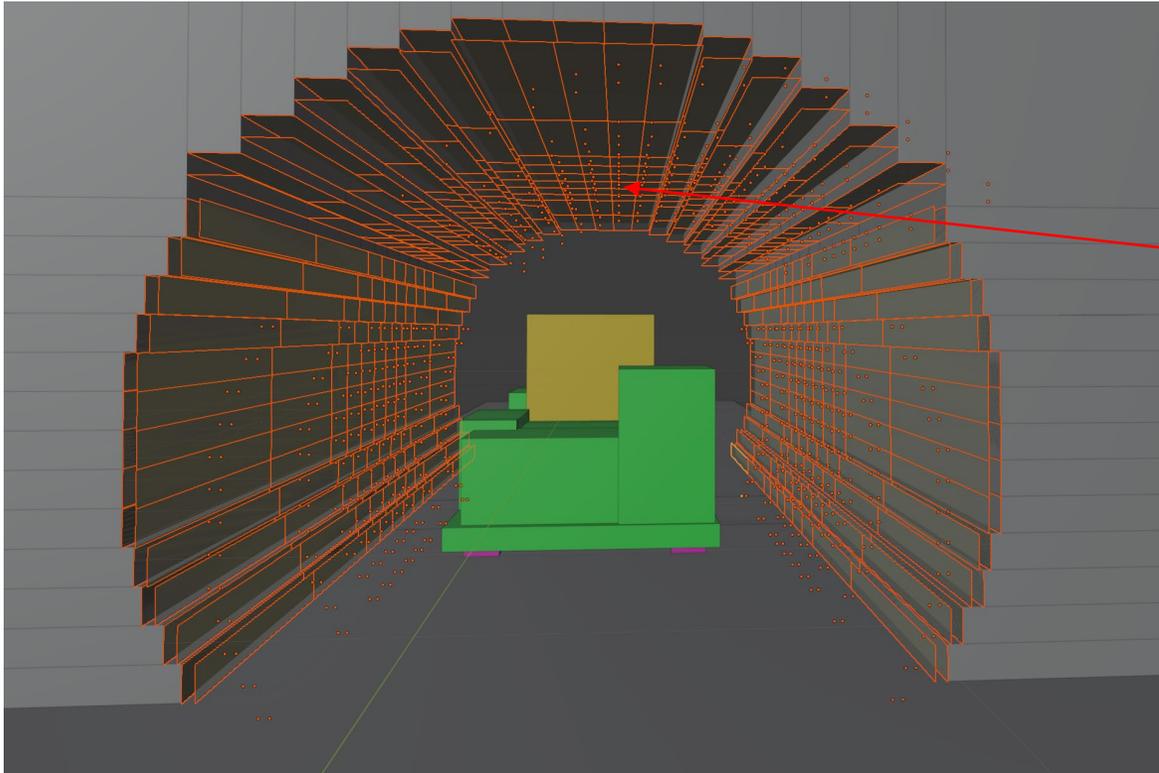
Die Gebirgseigenschaften für den Ausbauquerschnitt 3 sind nicht eindeutig zu klären. Daher wurde eine Parameterstudie mit einer Variation der Wärmespeicherkapazität (828 J/kgK vs. **2120 J/kgK**), der Wärmeleitfähigkeit (2,18 W/mK vs. **1,97 W/mK**) und der Dichte (2378 kg/m³ vs. **2691 kg/m³**) unternommen.



- Eine geringere Geschwindigkeit im Querschnitt ist eine konservative Abschätzung hinsichtlich der Wärmeeinwirkung auf die Firste.
- Die Materialeigenschaften im Querschnitt 3 zeigen keine großen Variationen (+/- 5°C auf maximale Temperatur auf die Firste).

Brandmodellierung – Brandspezifische Parameter

Auswertungsmethodik



Der Simulation liegt analog zur beschriebenen PTB-Kurve eine Zeitdauer von 3900 s (65 Min) zugrunde. In dieser Zeit werden für die in der Abbildung markierten Flächen

- die **Lufttemperatur**
- die **Oberflächentemperatur**
- der **konvektive** und der **radiative Wärmestrom** aufgezeichnet.

Es handelt sich um 300 Datenpunkte. In der Auswertung wird der Datenpunkt mit der höchsten Temperatur dargestellt, unabhängig davon, wo sich dieser befindet.

- Zur Bewertung des Brandszenarios werden die Wärmefreisetzungsrate und der Massenabbrand ebenfalls für jeden Zeitschritt berechnet und ausgewiesen.
- Zusätzlich werden für alle Oberflächen die Feststofftemperaturen, die radiativen und die konvektiven Wärmeströme als Konturplot aufgezeichnet.

1 Ziel und Aufgabenstellung

**2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme**

3 Brandmodellierung

**4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien**

**5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2**

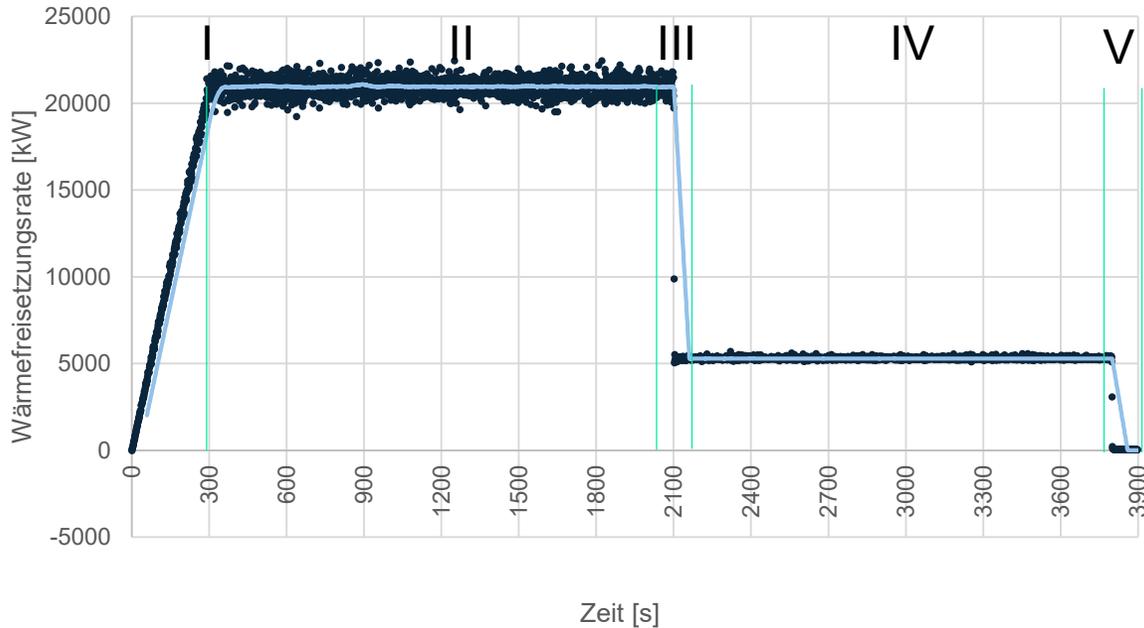
**6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2**

**7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3**

8 Zusammenfassende Betrachtung

Ergebnisse der Brandsimulation

Brandverlaufskurve



Phase	Brandsituation	
I	t = 0 s – t = 300 s:	Lineare Brandausbreitung
II	t = 300 s – t = 2100 s:	Vollbrandphase des Lachen- und Reifenbrands
III	t = 2100 s – t = 2200 s:	Erlöschen des Lachenbrands und Andauern des Vollbrands der Reifen
IV	t = 2200 s – t = 3800 s:	Vollbrand der Reifen
V	t = 3800 s – t = 3900 s:	Erlöschen des Reifenbrands

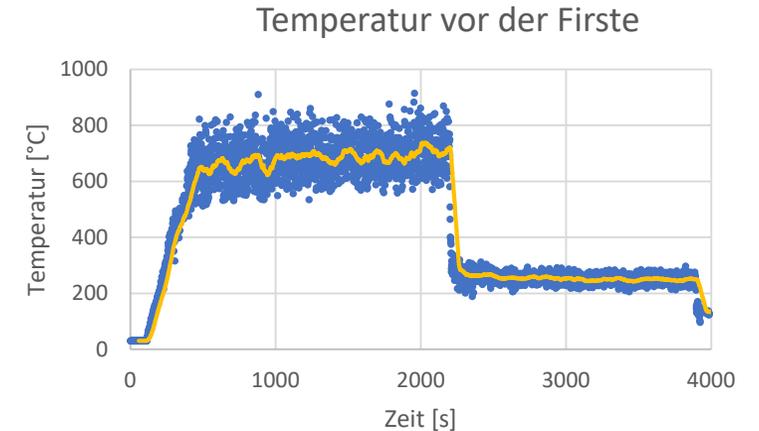
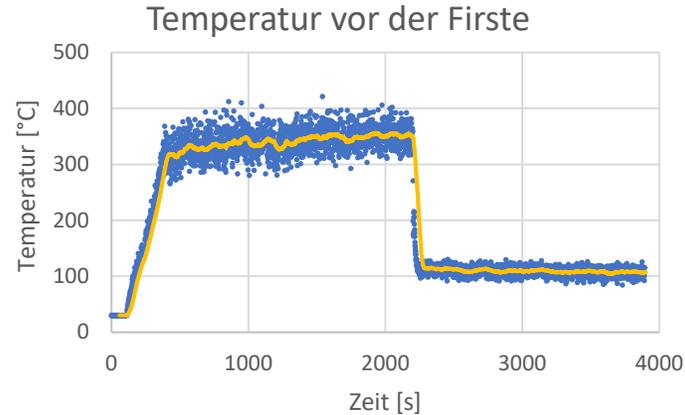
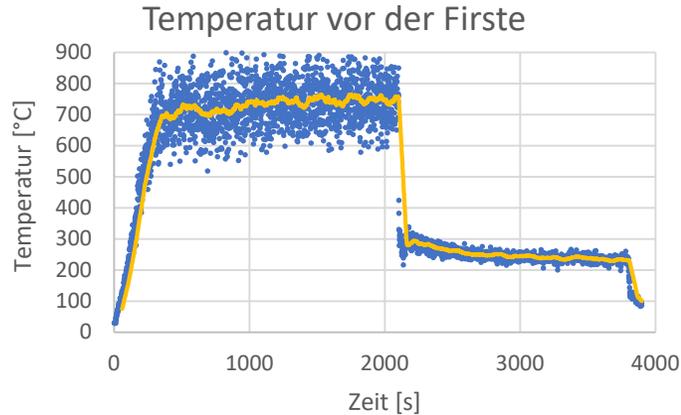
Wärmefreisetzungsrates des Brands der Reifen und des Dieselkraftstoffs - Ausbausysteme 1, 2 und 3. Die dunkelblauen Punkte sind die Wärmefreisetzungsrates pro Sekunde. Die hellblaue Kurve entspricht der Vorgabe aus den Randbedingungen.

➤ Es zeigt sich, dass der Brandverlauf korrekt in der Simulation abgebildet wird.



Ergebnisse der Brandsimulation

Temperatur vor der Firste

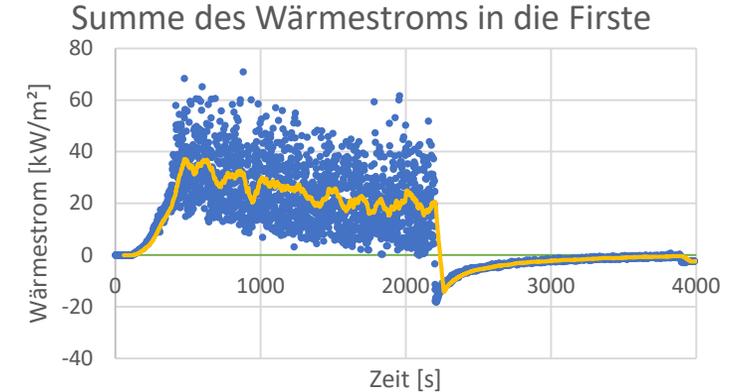
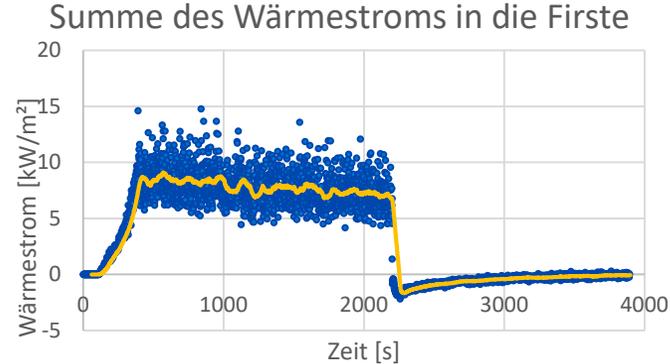
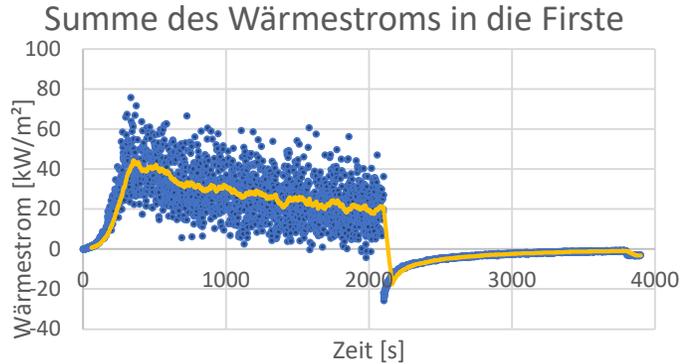


Lufttemperatur vor der Firste an der Stelle mit dem höchsten Temperaturverlauf – Ausbausystem 1-3. Blaue Punkte: Simulationsergebnisse pro Sekunde; Gelbe Kurve: ein auf 60s gemittelter Durchschnitt der blauen Werte

- Der Verlauf der Lufttemperatur an der wärmsten First-Oberfläche ist bei allen Ausbauquerschnitten ähnlich dem Verlauf der Abbrandrate. Dies zeigt, dass die Verbrennung des Dieselkraftstoffs einen deutlich größeren Einfluss auf die Temperatur vor der Firste hat als der Brand der Reifen.
- Die Temperaturen steigen im Ausbauquerschnitt 1 bis auf 900°C (Im Schnitt ca. 725 °C) in der Vollbrandphase der Diesellache. Ab 2200 s sinkt die Temperatur langsam von ca. 250°C auf 200°C. Die anderen Ausbauquerschnitte haben geringere Temperaturen an der Firste.
- Die Temperaturen fluktuieren wegen der sich stark bewegenden Flammen.

Ergebnisse der Brandsimulation

Summe des Wärmestroms in die Firste

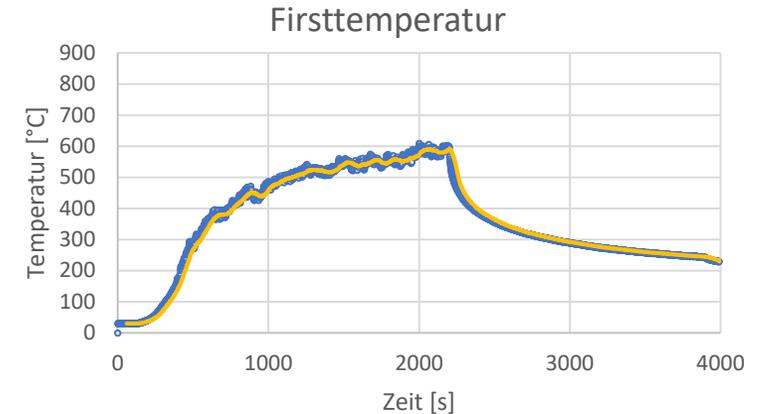
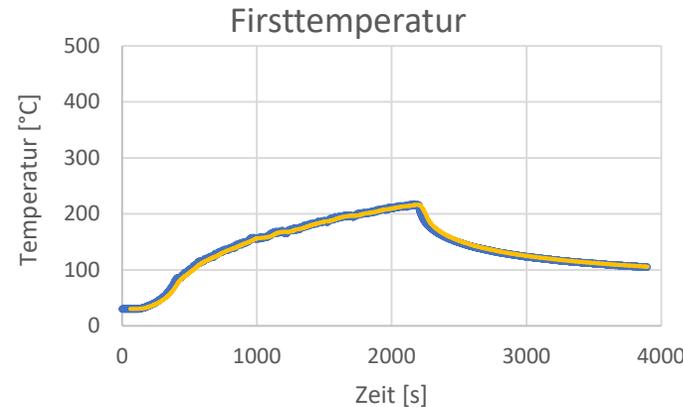
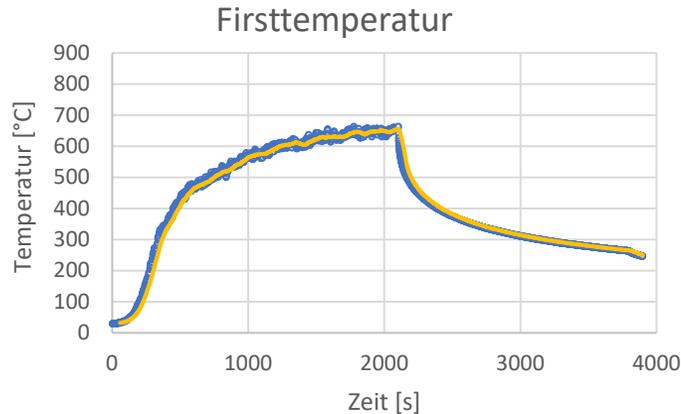


Verlauf der Summe der Beiträge zum Gesamtwärmestrom an der Firste mit der durchschnittlich wärmsten Fläche - Ausbausystem 1-3. Blaue Punkte: Simulationsergebnisse pro Sekunde; Gelbe Kurve: ein auf 60s gemittelter Durchschnitt der blauen Werte

- Der Maximalwert des Wärmeeintrags von ca. 60 kW/m² (Gemittelt 40 kW/m²) wird zu Beginn der Vollbrandphase der Diesellache erreicht, da zu diesem Zeitpunkt die maximale Wärmefreisetzungsrates bei gleichzeitig geringer Firsttemperatur vorherrscht.
- Gleichen sich die Flammentemperatur und die Oberflächentemperatur an wird der Wärmestrom stetig geringer.
- In der Brandphase III wird der Wärmestrom negativ, da der Reifenbrand die Firste nicht mehr erwärmt, sondern die Firste sogar Wärme an die Umgebung abgibt.
- Die höchsten Wärmeströme in die Firste werden im Ausbauquerschnitt 1 erreicht.

Ergebnisse der Brandsimulation

Firsttemperatur

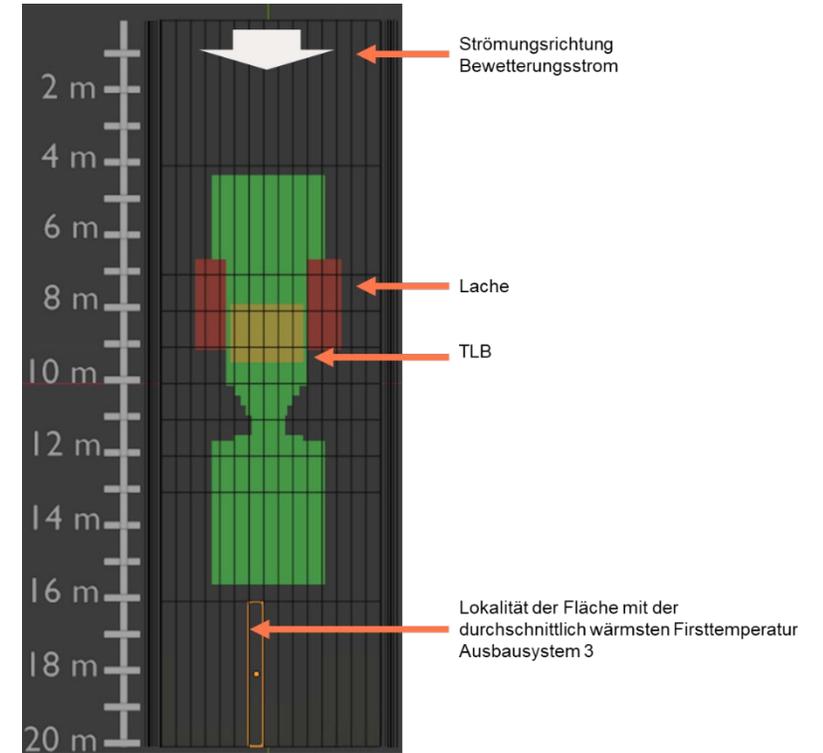
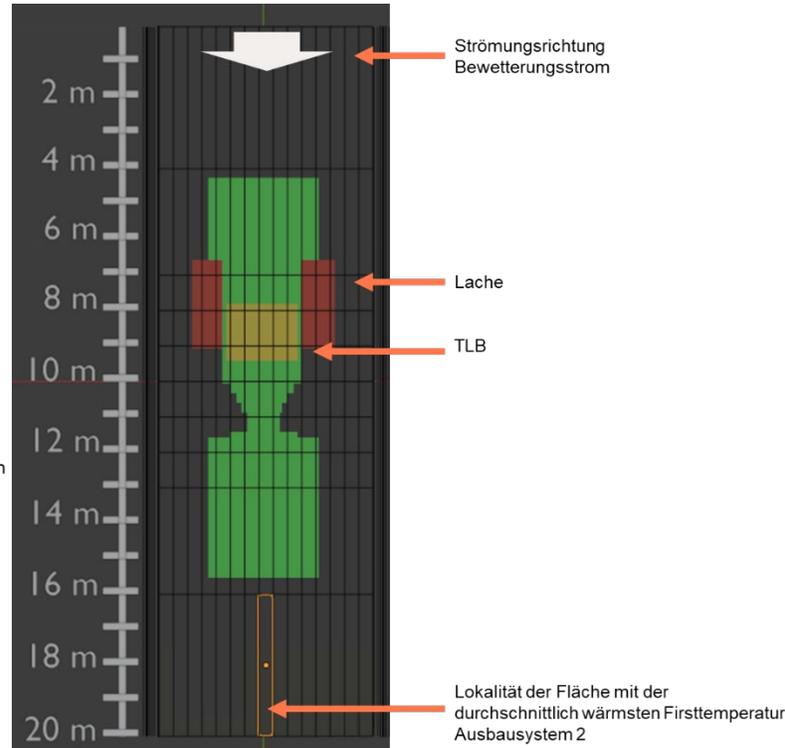
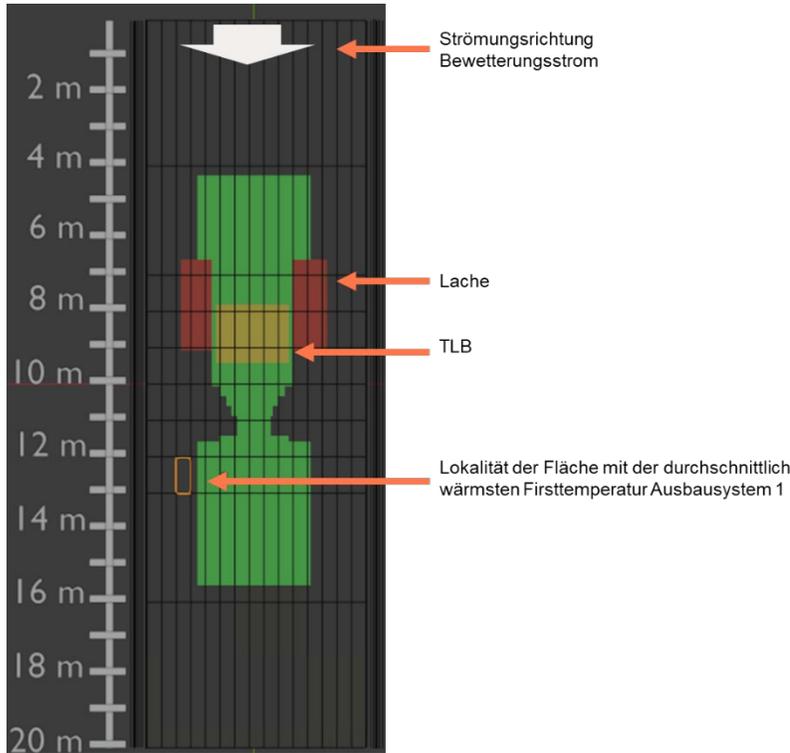


Verlauf der Firsttemperatur auf der durchschnittlich wärmsten Fläche – Ausbausystem 1-3. Blaue Punkte: Simulationsergebnisse pro Sekunde; Gelbe Kurve: ein auf 60s gemittelter Durchschnitt der blauen Werte

- Die Temperaturverläufe der durchschnittlich wärmsten Fläche entsprechen der Lufttemperatur vor der Firste ohne die Fluktuationen.
- Während die Lufttemperatur vor der Firste auf ca. 900°C steigt, erreicht die Oberflächentemperatur der Firste (Ausbauquerschnitt 1) maximal ca. 670°C am Ende der Brandphase II.

Ergebnisse der Brandsimulation

Lokalität wärmste Firsttemperatur

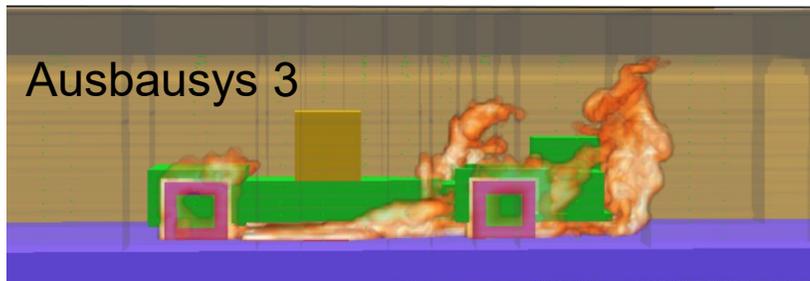
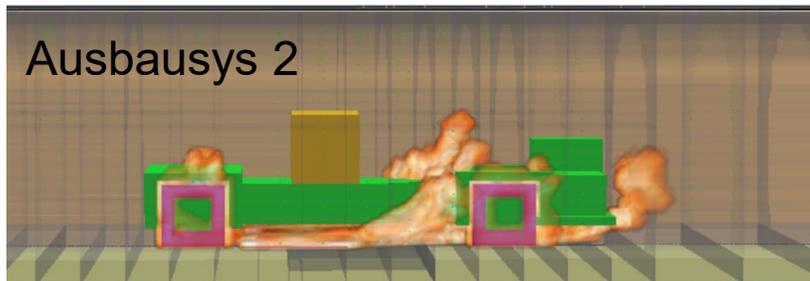
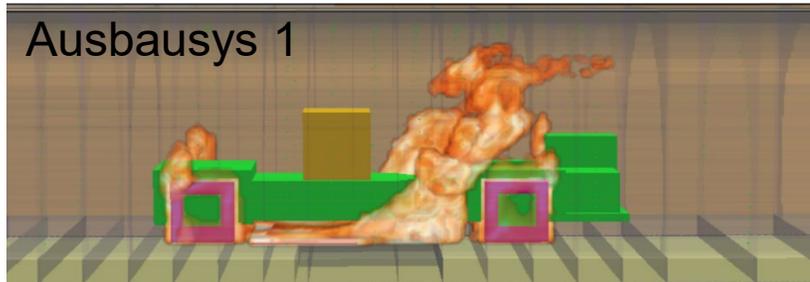


Lokalität der Fläche mit der durchschnittlich wärmsten Firsttemperatur – Ausbausystem 1-3

- Es zeigt sich, dass die höchsten Temperaturen wegen der Flammenablenkung nicht direkt über dem Gebäude erreicht werden.

Ergebnisse der Brandsimulation

Zusammenfassung



t = 1800 s

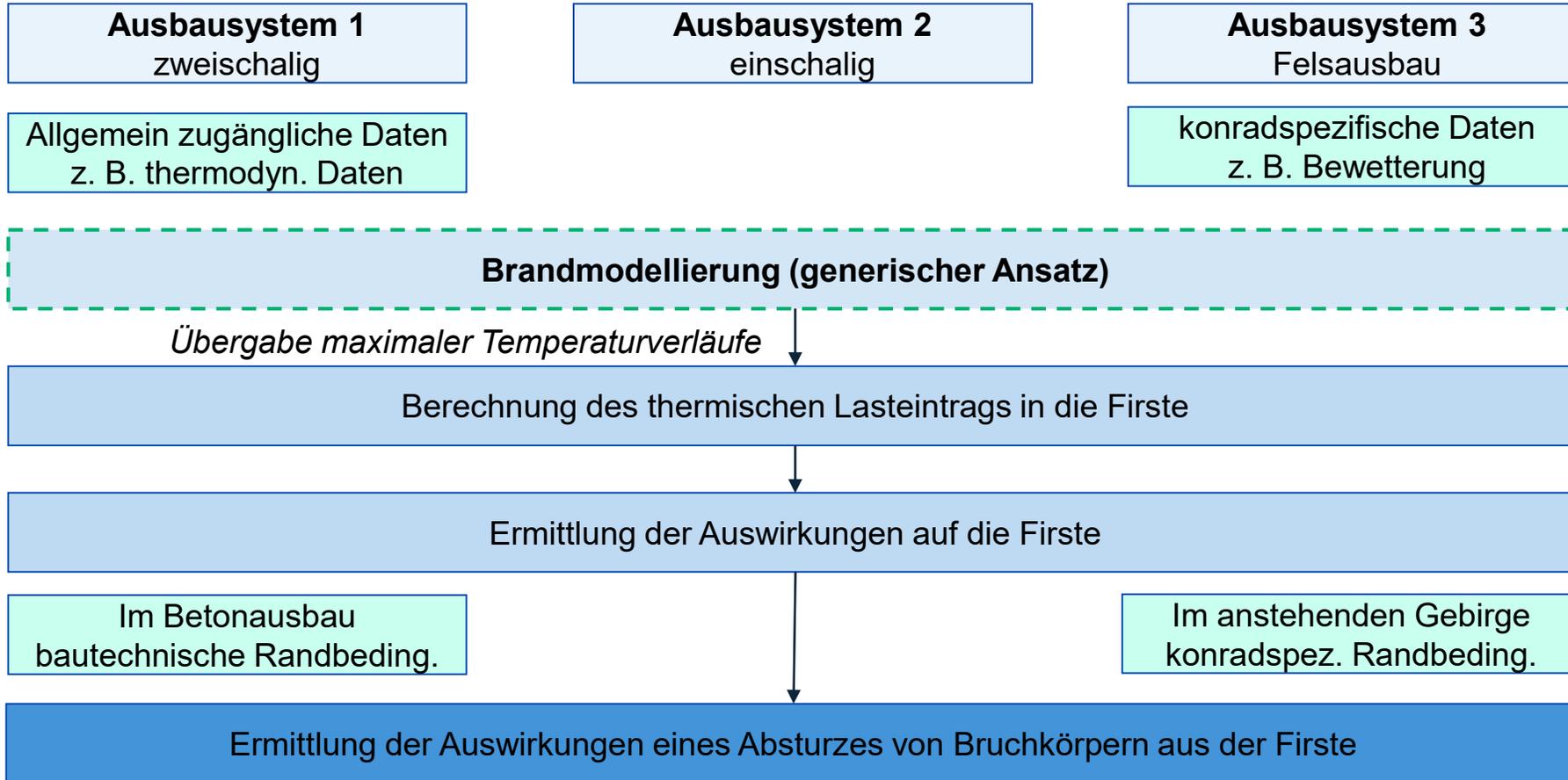
	Querschnittsfläche [m ²]	Bewetterungsstrom [m ³ /s]	Querschnittsgeschwindigkeit [m/s]	Firsttemperaturen Max. [°C]	Lufttemperaturen vor der Firste Max. [°C]
Ausbausys 1	32	13,7	0,43	ca. 660	ca. 900
Ausbausys. 2	32	62,7	1,96	ca. 215	ca. 400
Ausbausys. 3	27	17,25	0,64	ca. 600	ca. 850

Zusammenfassung zu den Einflussfaktoren Querschnittsfläche und Bewetterungsstrom

- Geringere Bewetterungsströme erzeugen eine geringere Ablenkung der Flamme.
- Dies hat zur Folge, dass sich die Wärme stärker auf eine geringere Fläche konzentriert.
- Bei einem hohen Bewetterungsstrom verteilt sich die Wärme auf einen breiteren Bereich und es ergeben sich infolgedessen geringere Maximaltemperaturen.
- Neben diesem Effekt der Wärmeaufteilung bewirken geringere Geschwindigkeiten, dass die erhitzte Luft langsamer aus dem Streckenabschnitt transportiert und somit eine geringere Kühlwirkung erzielt wird.

Ergebnisse der Brandsimulation

Übergabe an Lasteintragsberechnung in die Firste



1 Ziel und Aufgabenstellung

**2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme**

3 Brandmodellierung

**4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien**

**5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2**

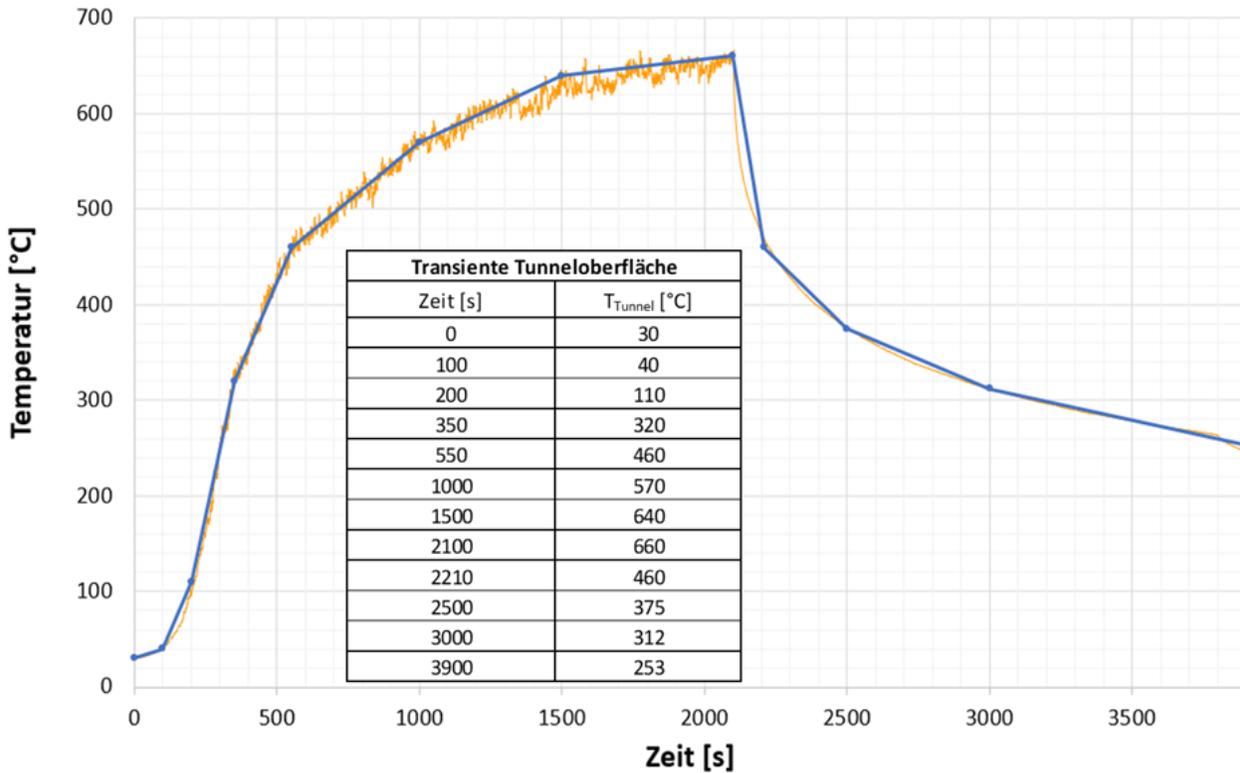
**6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2**

**7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3**

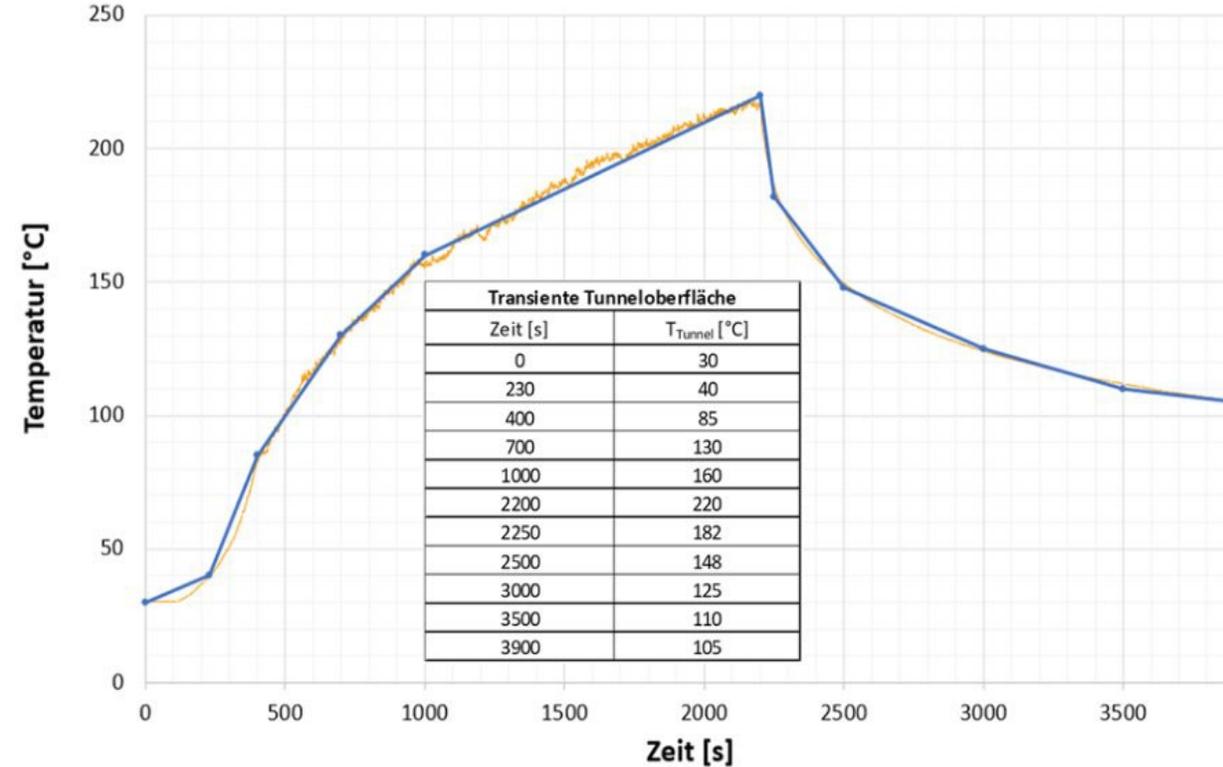
8 Zusammenfassende Betrachtung

Ableitung der Temperaturtransienten

Ausbausystem 1

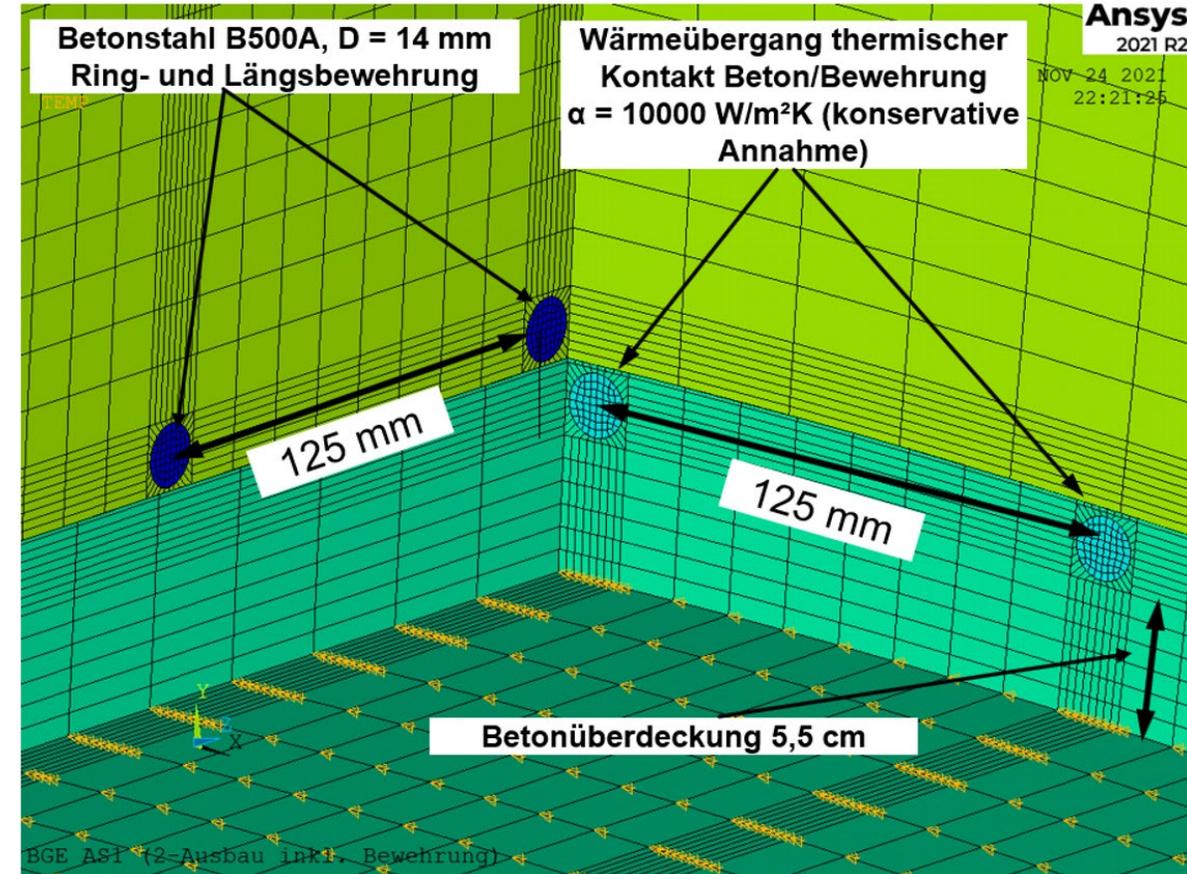
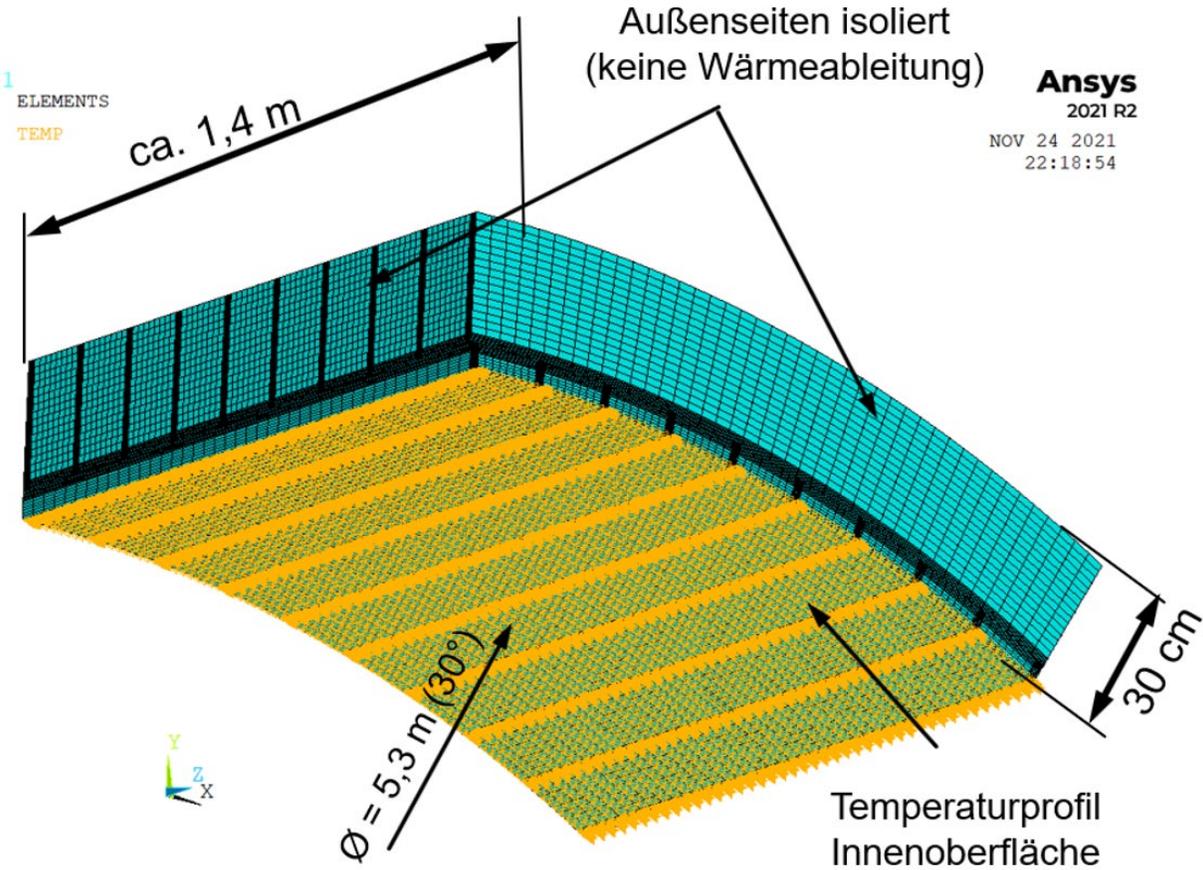


Ausbausystem 2



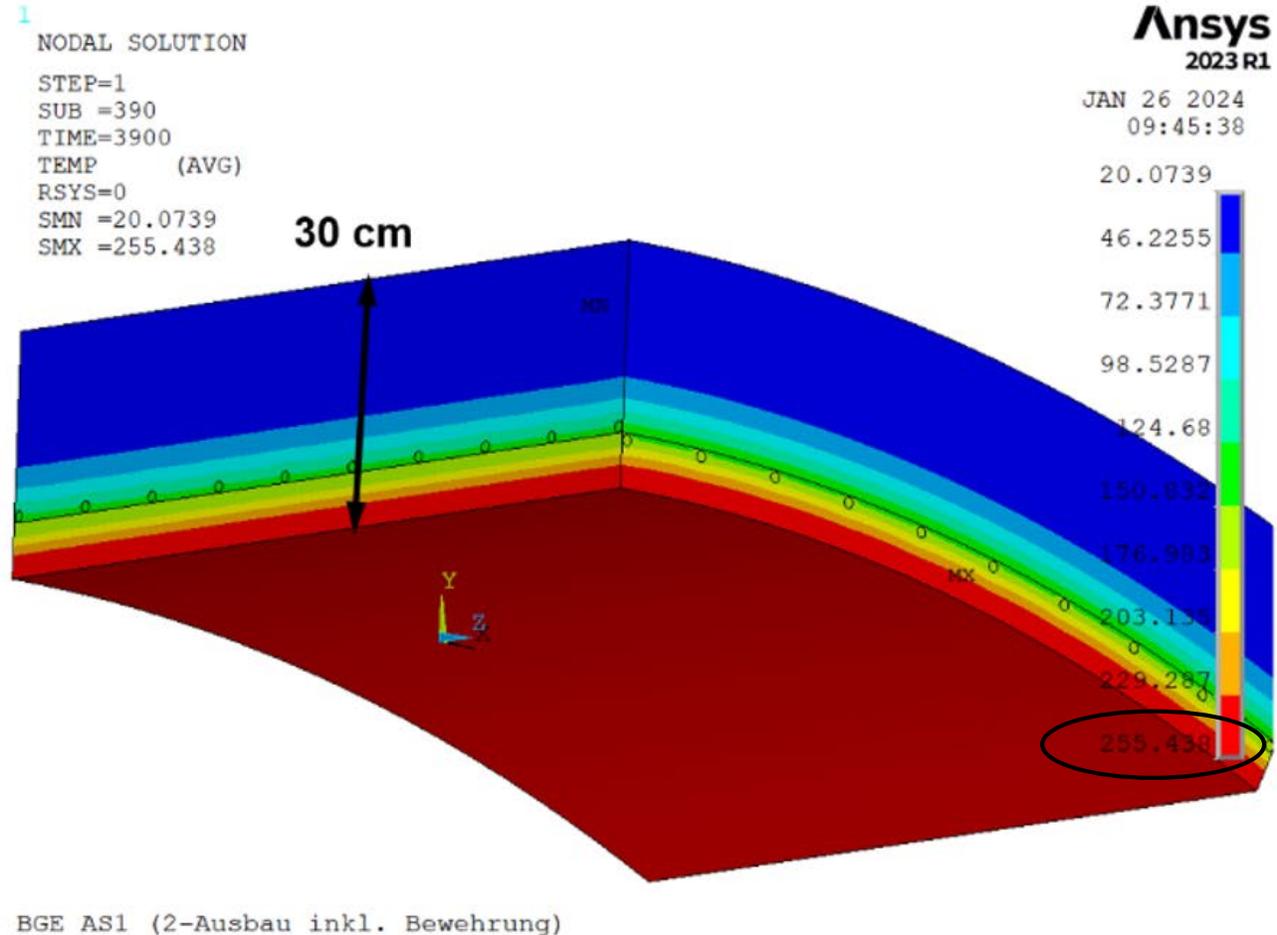
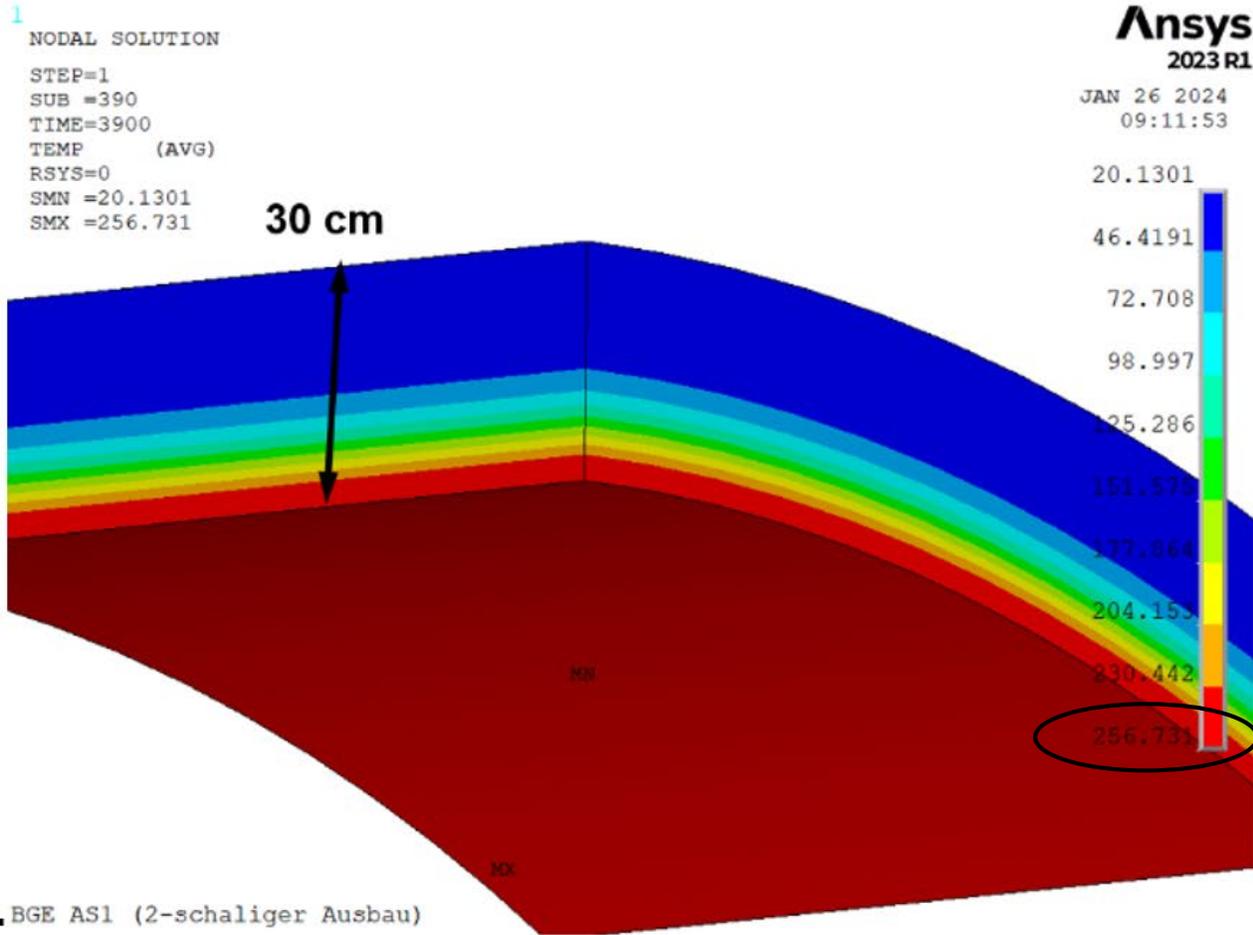
- Temperatur während des einstündigen Brands an der Oberfläche der Firste
- Gelbe Linie: Temperaturverlauf an der Firstoberfläche aus der Brandsimulation
- Blaue Linie: Abgeleitete Temperaturtransiente

FE-Modell zur Ermittlung des Temperatureintrags



- FE-Modell der Beton-Innenschale mit Bewehrung für die Ausbausysteme 1 und 2
- Erstellung eines weiteren FE-Modells ohne Bewehrung zur Untersuchung des Einflusses

Temperatureintrag AS 1 – Einfluss Bewehrung



- Sehr ähnliche Temperaturverteilung am Ende der Berechnung
- Bewehrung kann für die Temperaturfeldberechnungen vernachlässigt werden

Temperaturverläufe AS 1

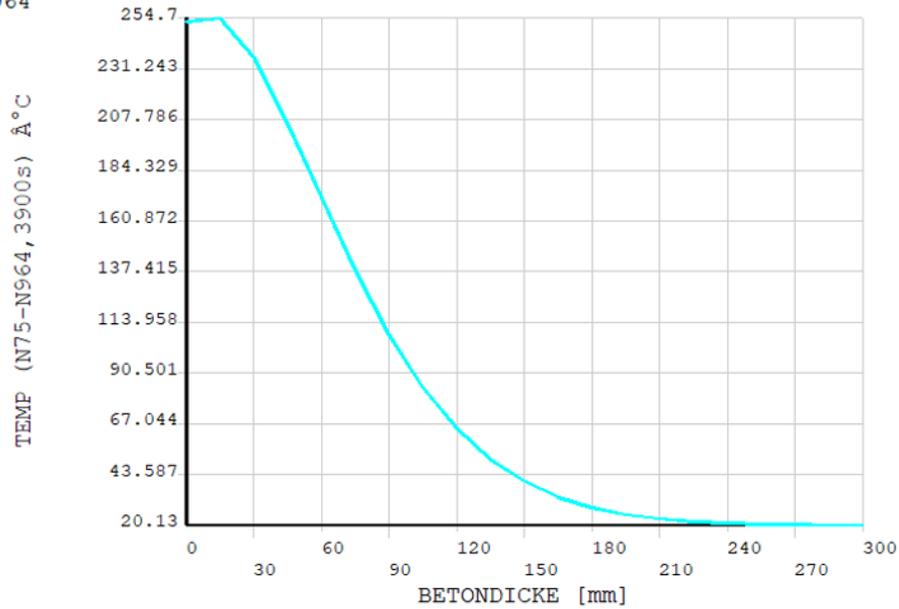


Verlauf über die Dicke ($t = 3900s$)

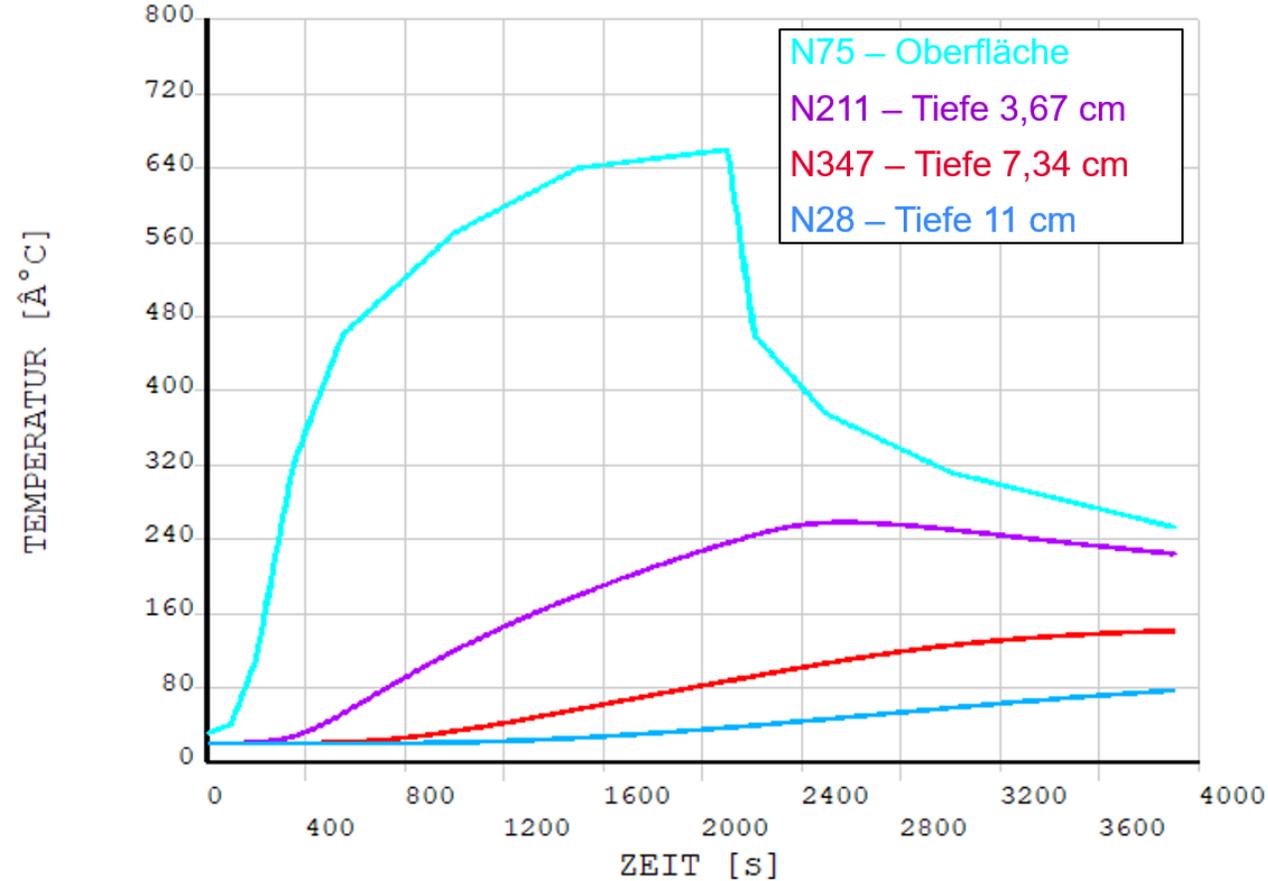
Ansys
2023 R1

SEP 7 2023
13:17:13

POST1
STEP=1
SUB =390
TIME=3900
PATH PLOT
NOD1=75
NOD2=964
TEMP



Zeitlicher Verlauf in verschiedenen Tiefen



Temperaturprofil und Temperaturverläufe AS2

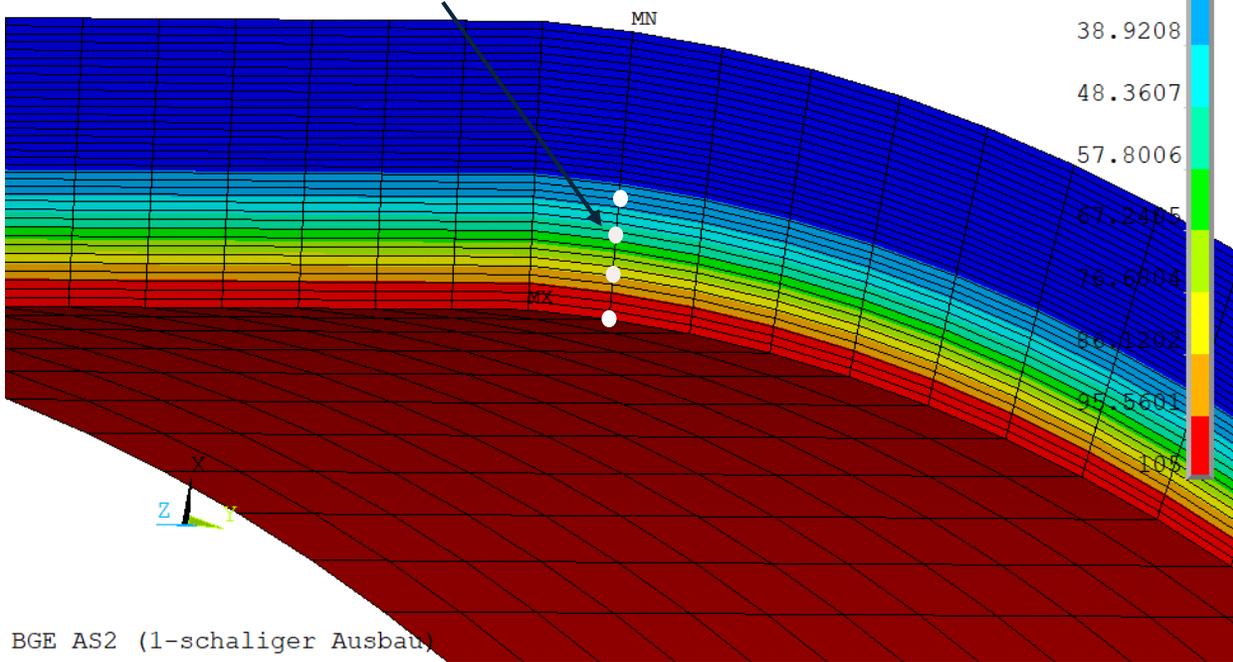
1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =390
TIME=3900
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =20.0411
SMX =105

Ansys
2023 R1

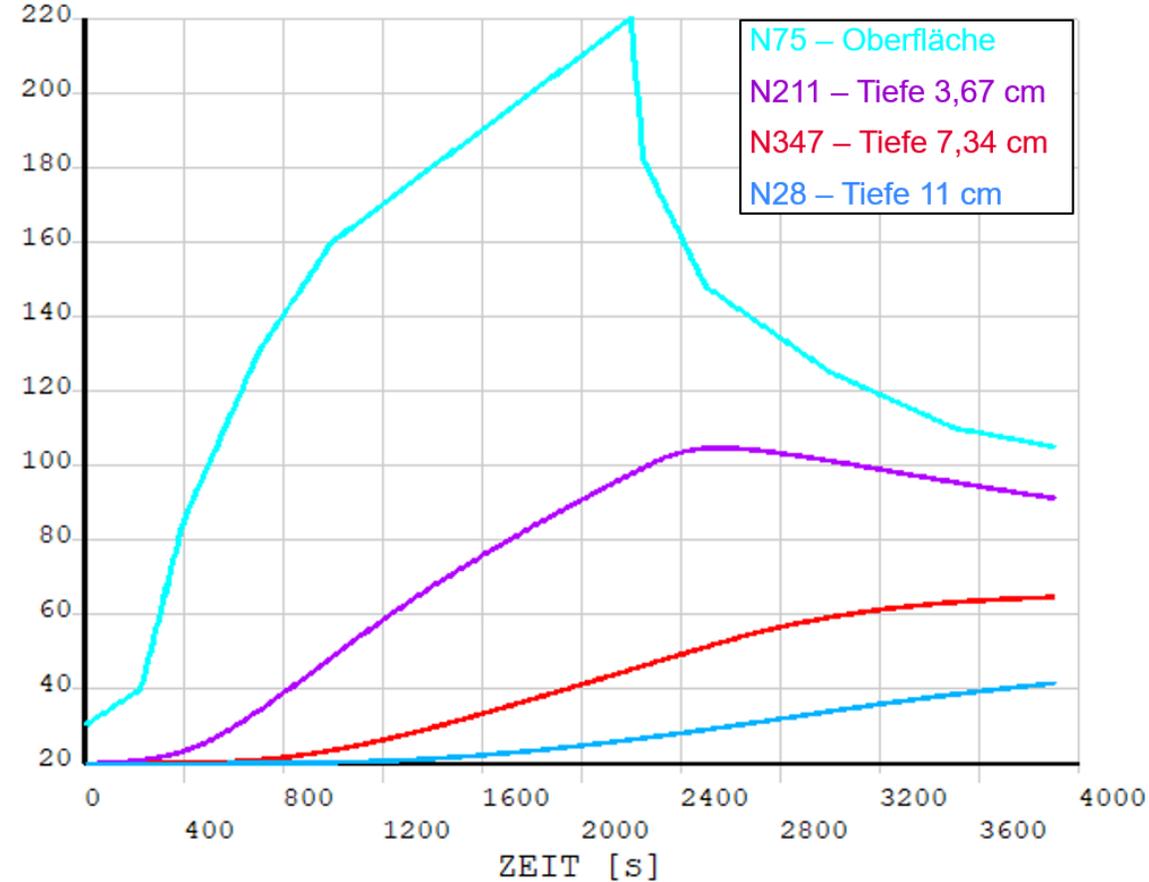
SEP 8 2023
07:58:55

20.0411
29.481
38.9208
48.3607
57.8006
67.2475
76.6804
86.1202
95.5601
105

Temperaturmesspunkte



BGE AS2 (1-schaliger Ausbau)

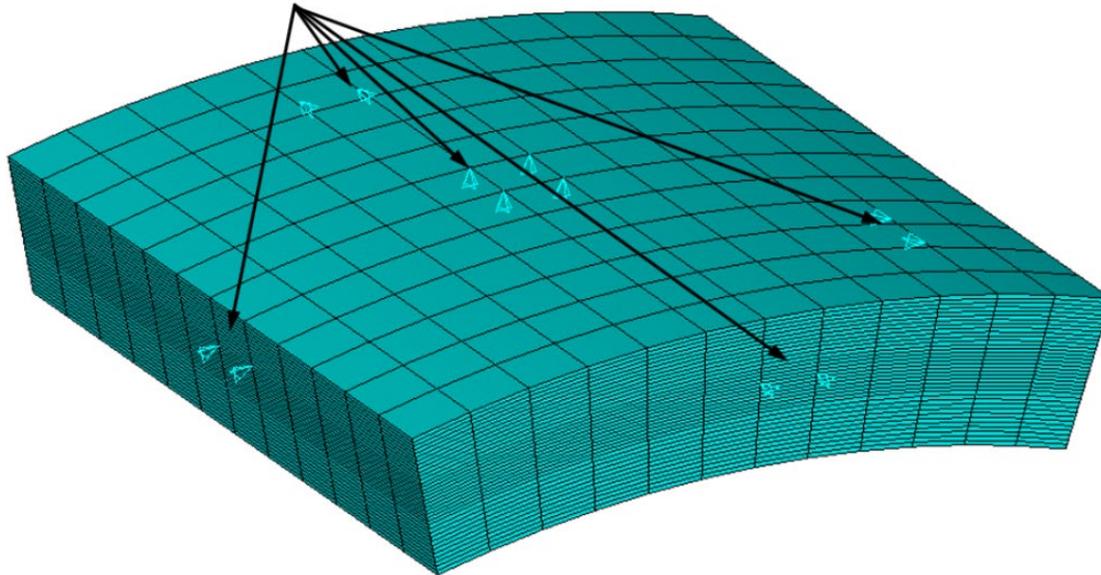


Anpassung FE-Modell für Spannungsberechnung

1
ELEMENTS
u

Außenoberfläche und Seitenflächen sind jeweils in Normalenrichtung fixiert (nicht alle fixierten Knoten dargestellt)

ANSYS
2021 R1
AUG 4 2021
15:22:49



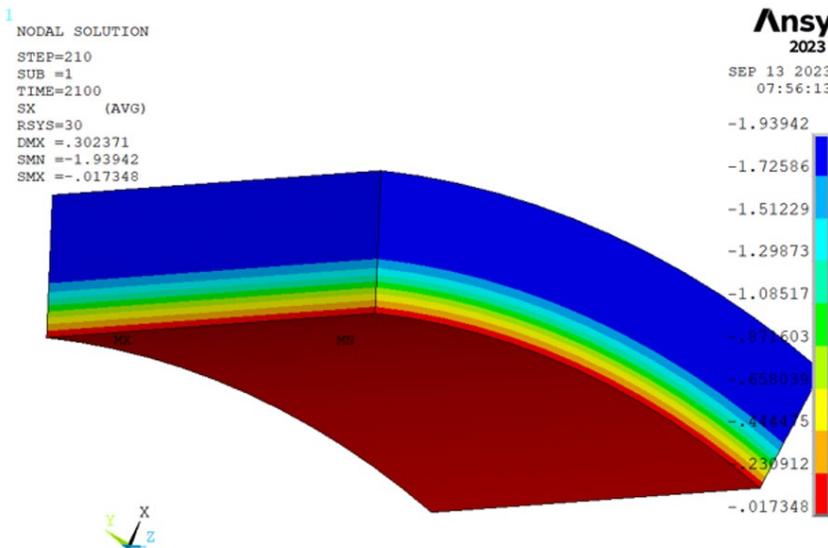
- Linear-elastischer Berechnungsansatz
- Die Bewertung der Zulässigkeit erfolgt anschließend analytisch

Material	Temp. in °C	Bewehrungsstahl	Beton	TLB
		B500	C35/45	Guss
Dichte ρ [kg/m ³]	20	7850	2400	7500
	100			
	200			
	300			
	400			
	500			
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	20	57	1,95	48,8
	100	57	1,77	
	200	54	1,55	
	300	50	1,36	
	400	45	1,19	
	500	42	1,04	
Spezifische Wärmekapazität c [J/kgK]	20	430	900	500
	100	500	900	
	200	540	1000	
	300	580	1050	
	400	620	1100	
	500	690	1100	
E-Modul E [MPa]	20	211000	35000	n. a.
	100	207000	29750	
	200	200000	24500	
	300	192000	21000	
	400	184000	17500	
	500	175000	14000	
Wärmeausdehnungskoeffizient α [10 ⁻⁶ /K]	20	12	10,0	n. a.
	100	12,2	10,0	
	200	12,9	10,0	
	300	13,4	10,0	
	400	14	10,1	
	500	14,3	10,1	
600	14,6	10,2		

Thermomechanische Spannungen AS 1

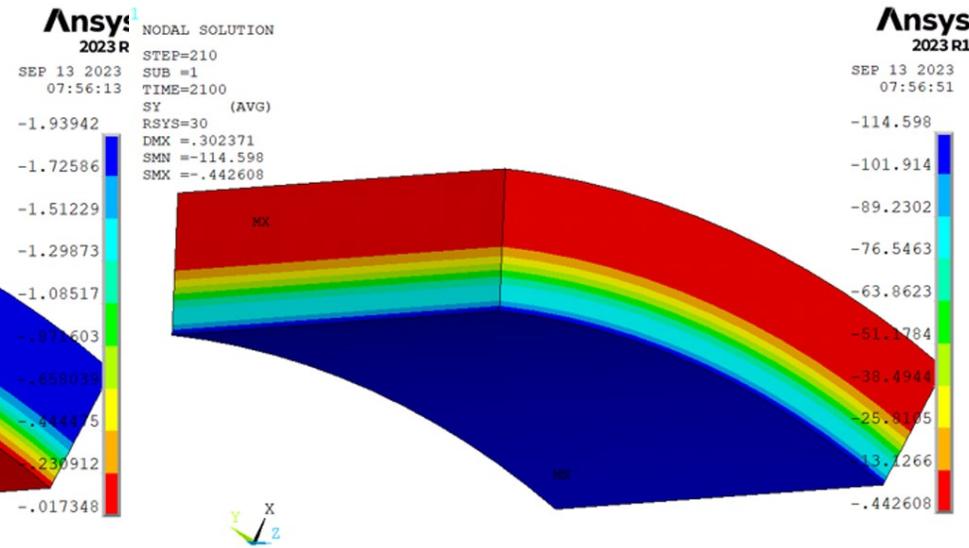


Radialspannungen



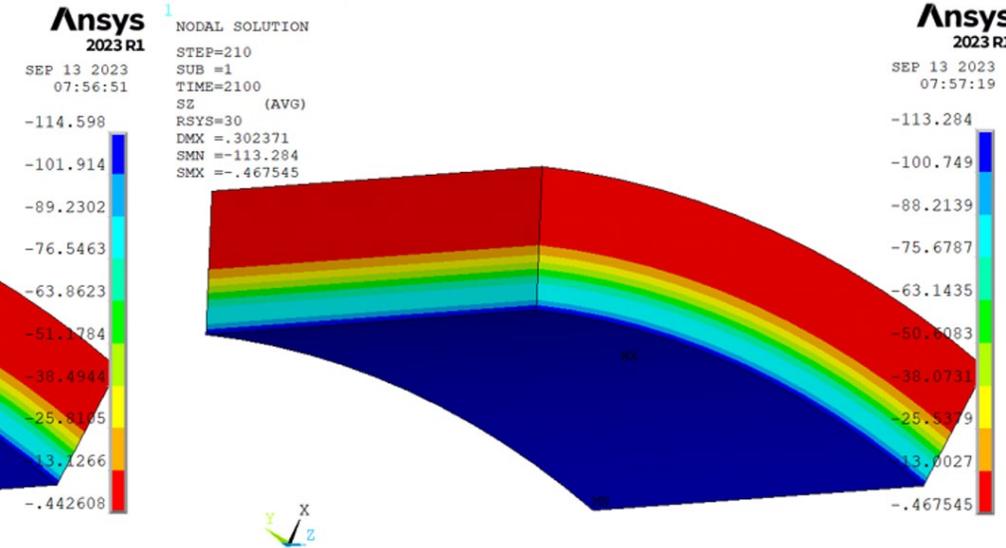
BGE AS1 (2-schaliger Ausbau)

Umfangsspannungen



BGE AS1 (2-schaliger Ausbau)

Axialspannungen



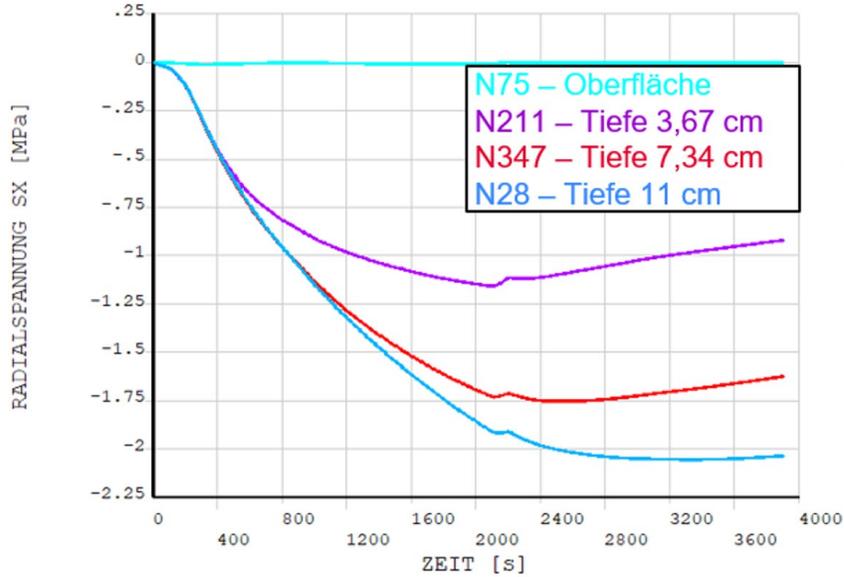
BGE AS1 (2-schaliger Ausbau)

Temperaturprofile zum Zeitpunkt $t = 2100$ s

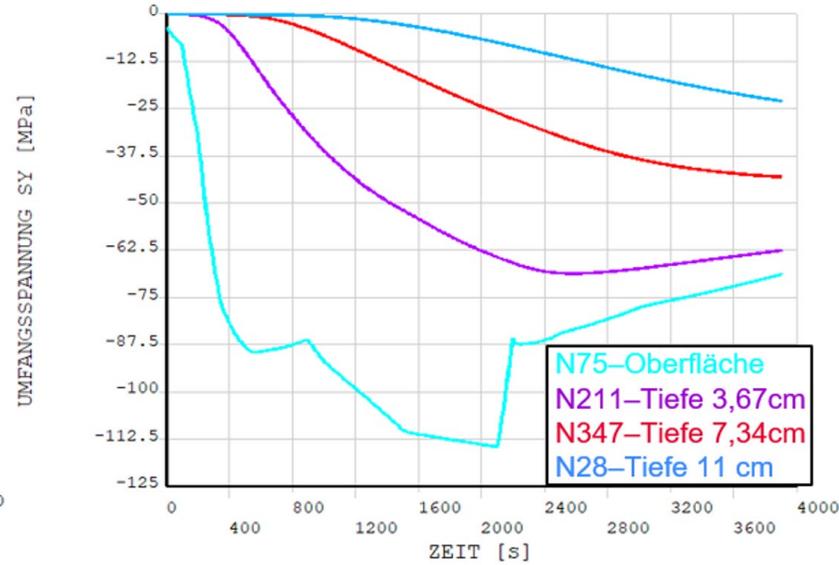
Spannungsverläufe AS 1



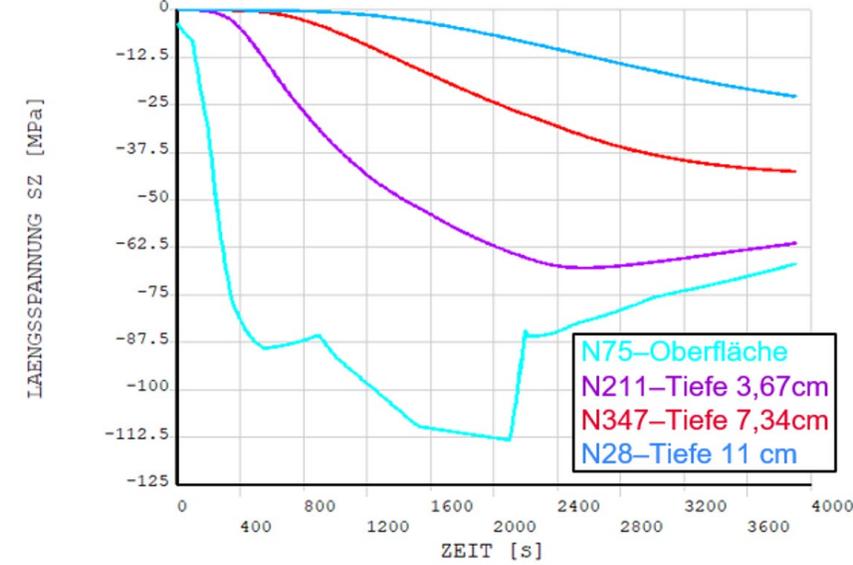
Radialspannungen



Umfangsspannungen



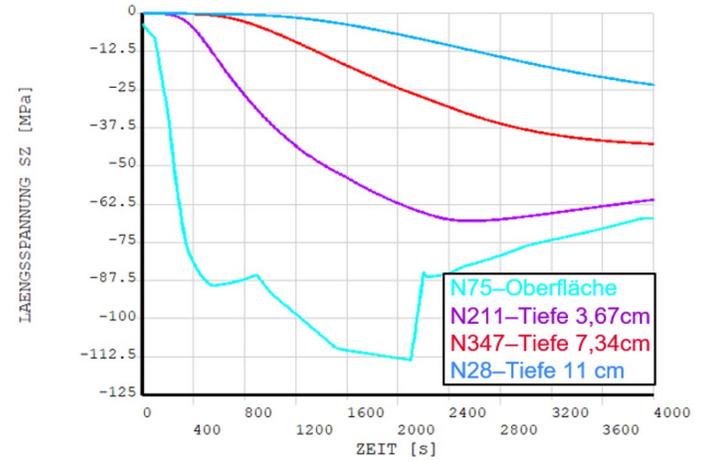
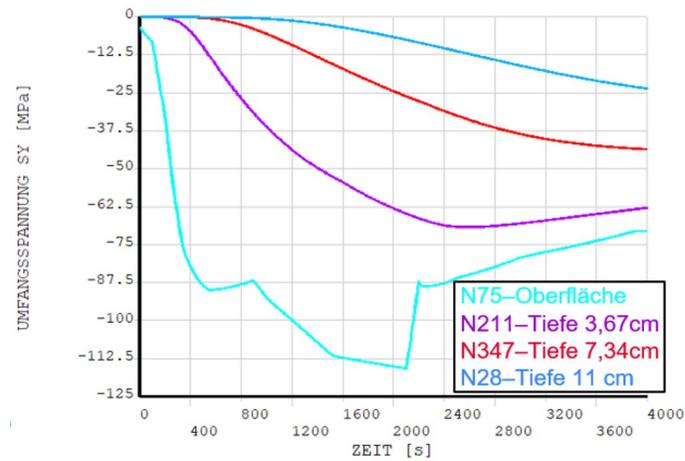
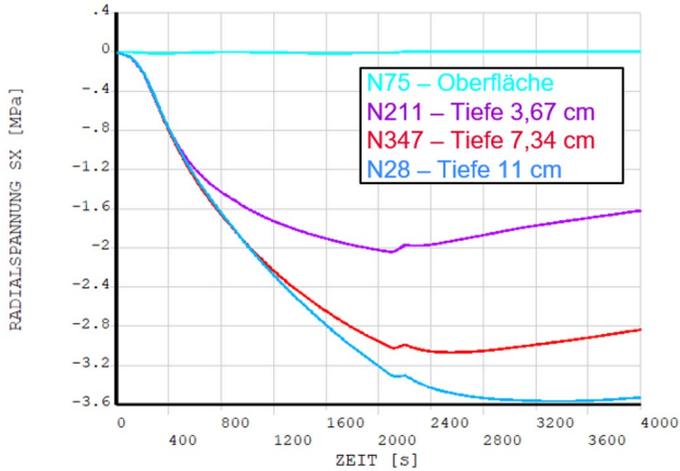
Axialspannungen



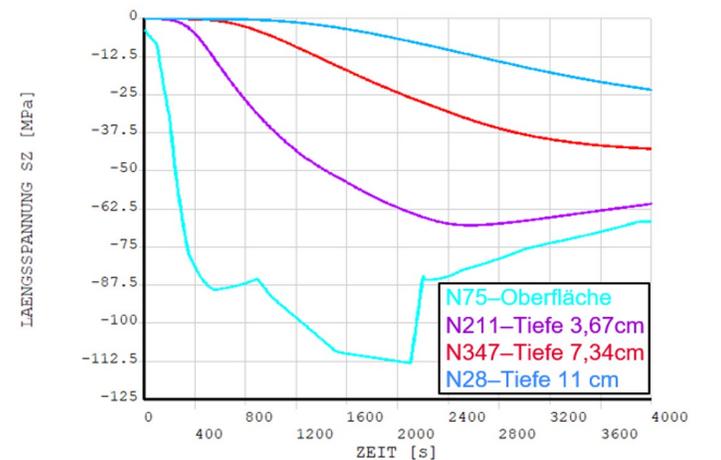
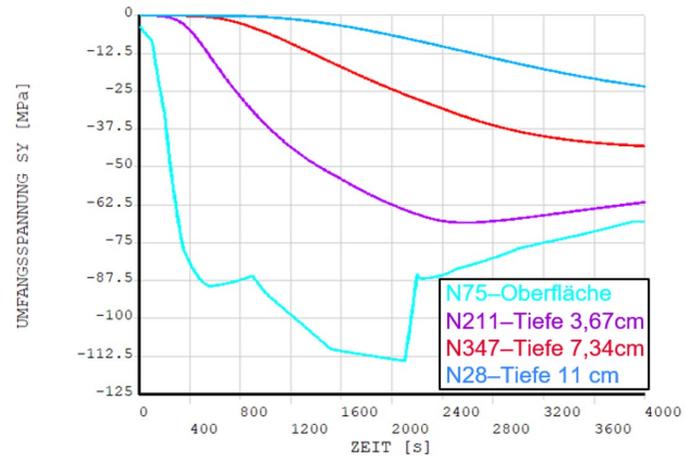
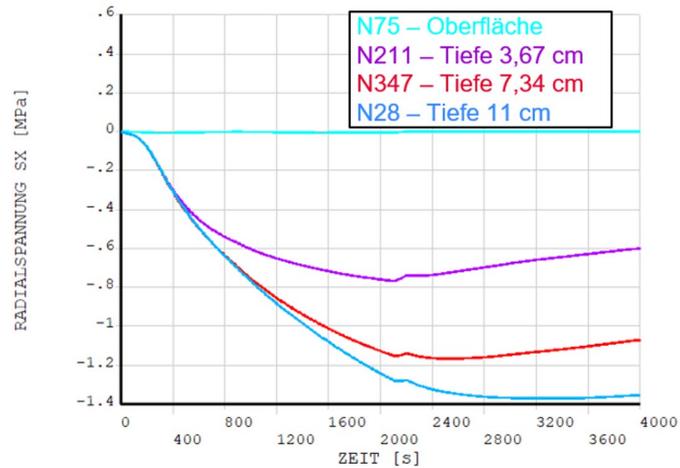
Einfluss Krümmungsradius Deckengewölbe



Innendurchmesser 3 m



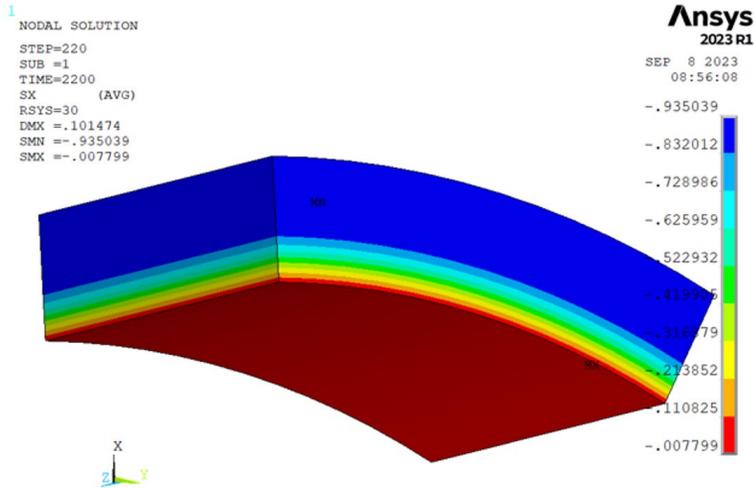
Innendurchmesser 8 m



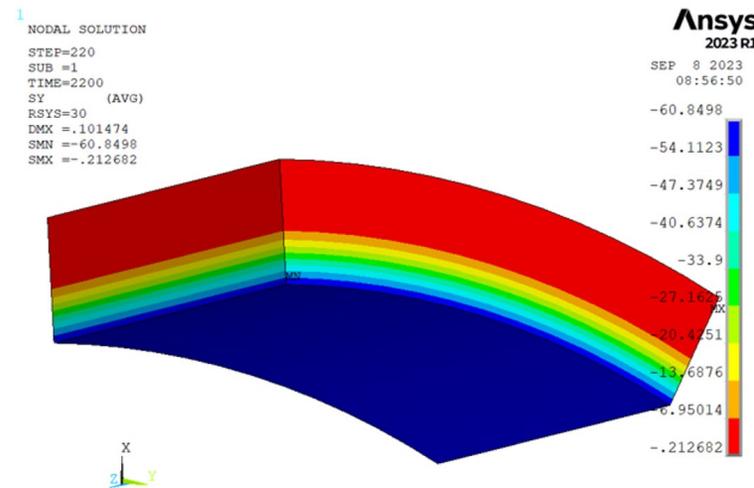
Thermomechanische Spannungen AS 2



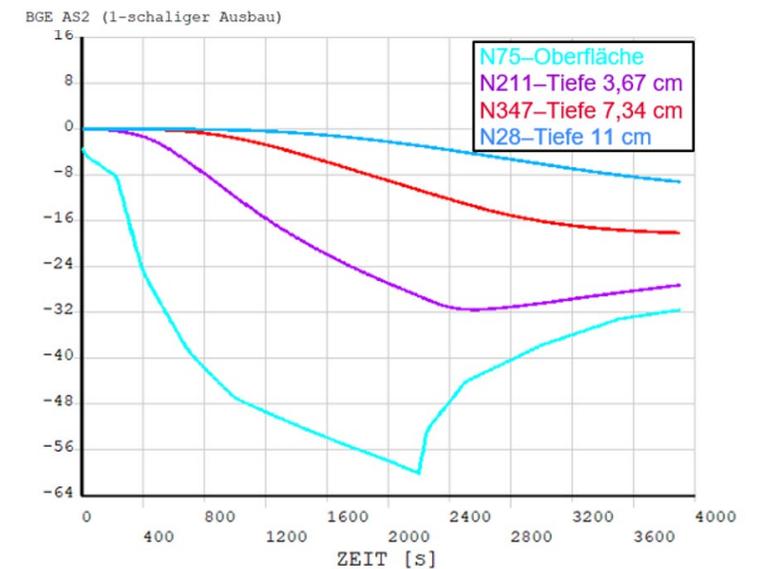
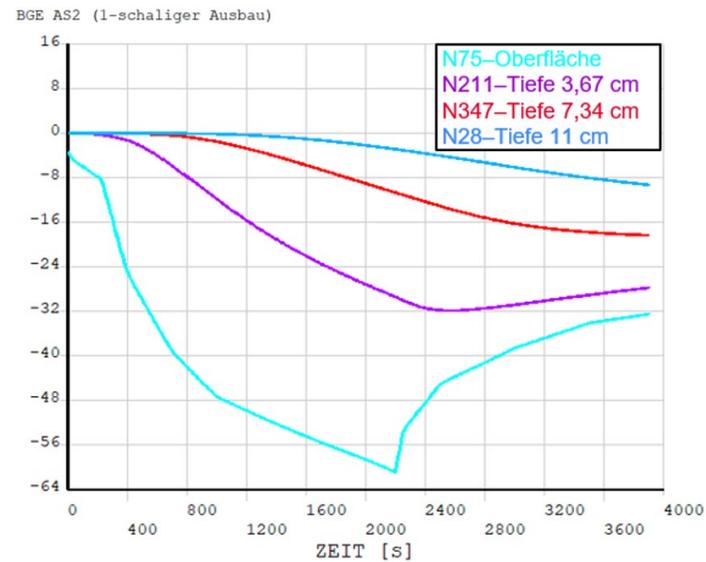
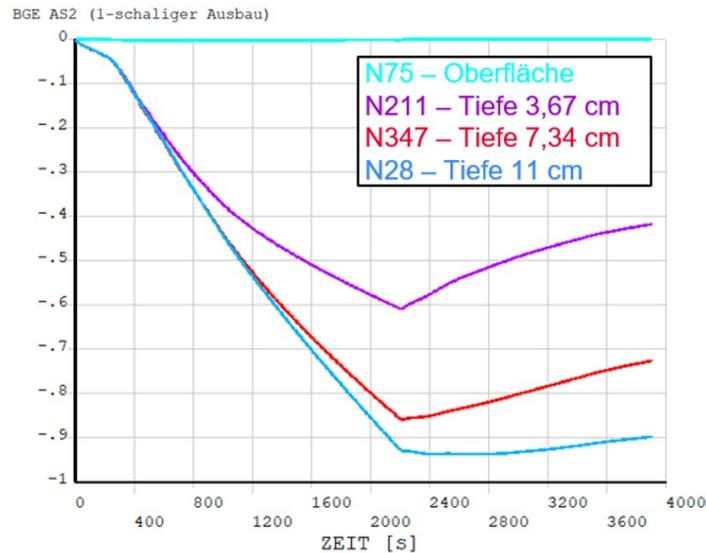
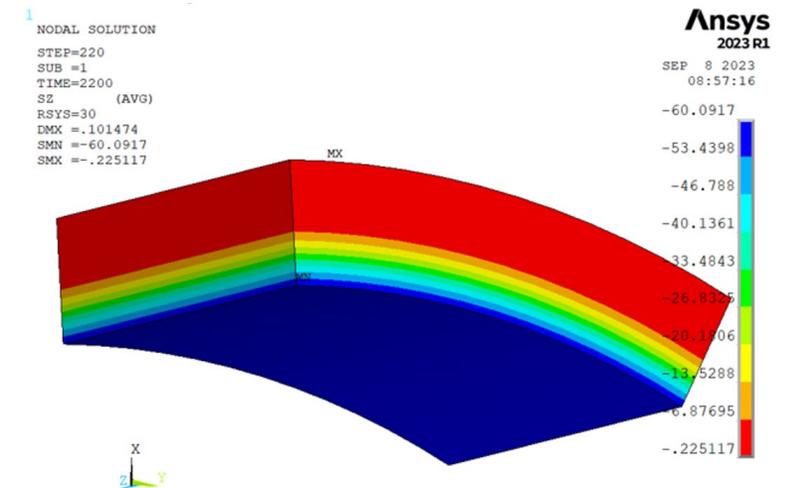
Radialspannungen



Umfangsspannungen

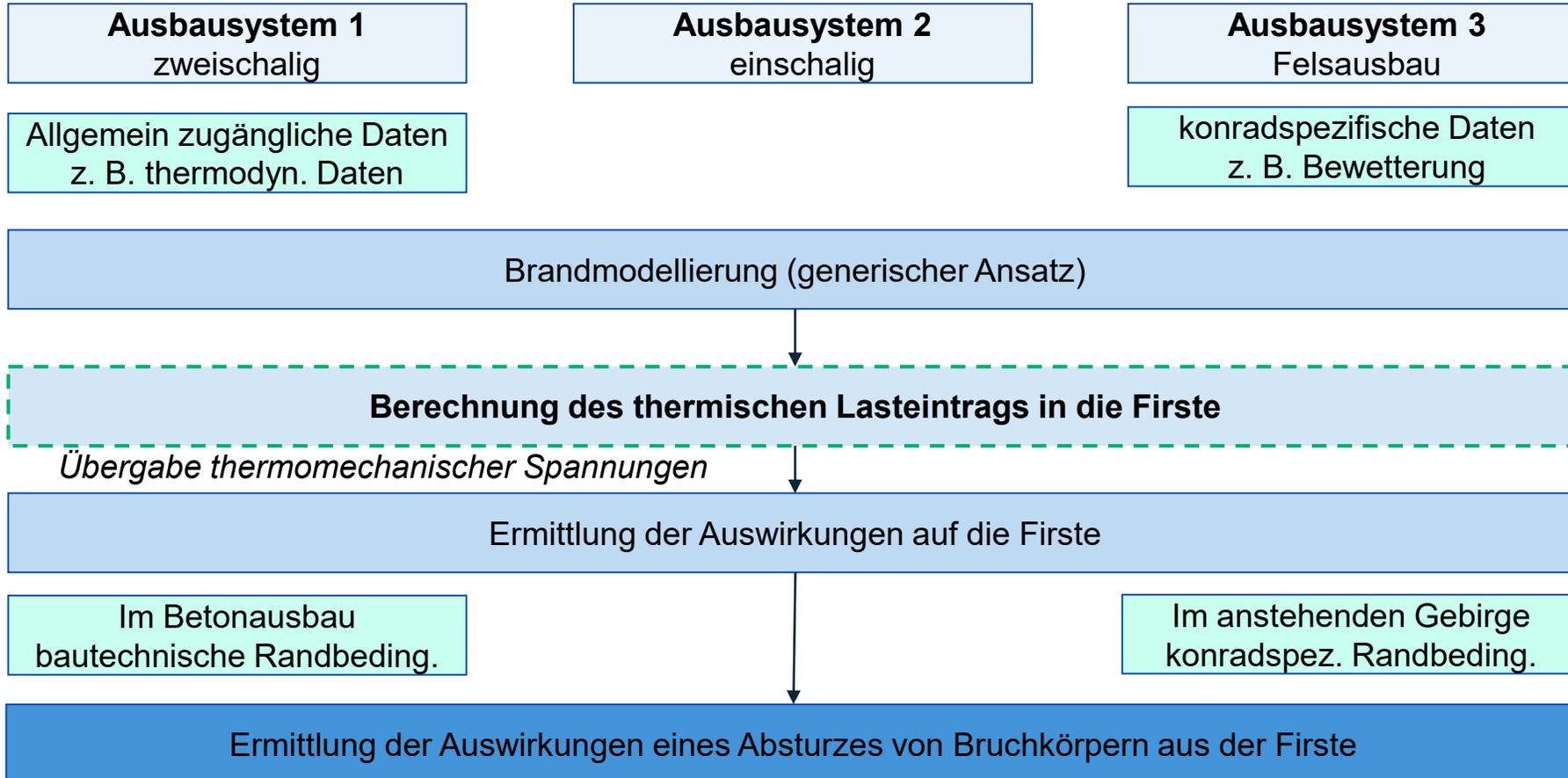


Axialspannungen



Ergebnisse der Brandsimulation

Übergabe an Lasteintragsberechnung in die Firste



1 Ziel und Aufgabenstellung

2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme

3 Brandmodellierung

4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien

5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2

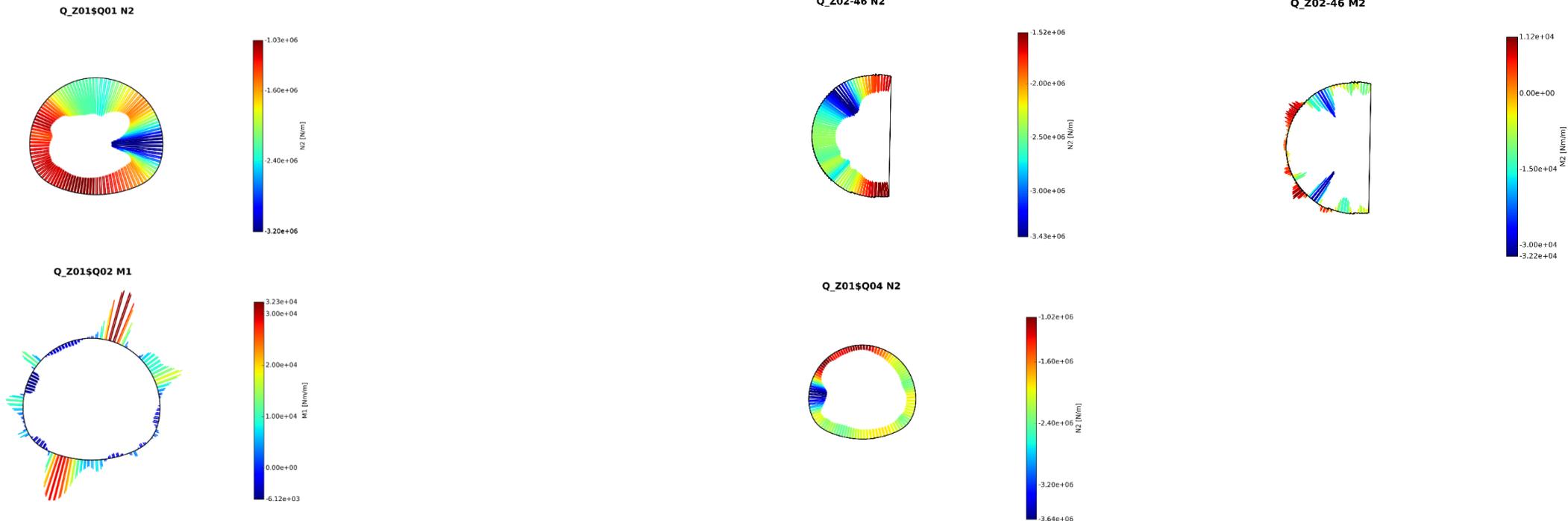
6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2

7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3

8 Zusammenfassende Betrachtung

Schnittgrößen aus Gebirgslasten

Ausbausystem 1

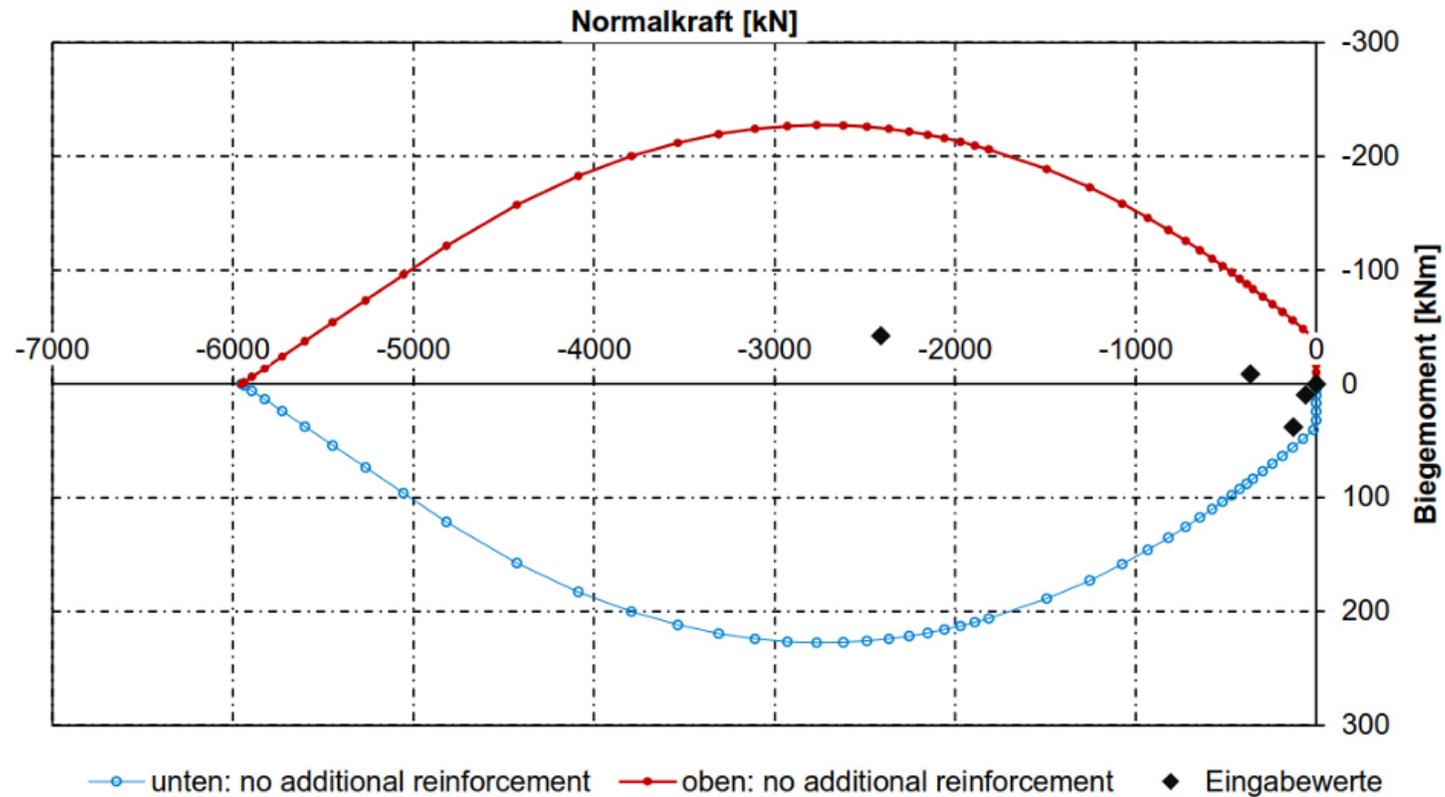


Maximale Normalspannung und maximales Moment, grafische Darstellung, Ausbausystem 1 (ETS)

Maximale Normalspannung mit zugehörigem Moment, sowie absolut maximale Normalspannung, grafische Darstellung, Ausbausystem 1 (Wendestelle)

Schnittgrößen aus Gebirgslasten

Ausbausystem 2



- Maximale Normalspannung und zugehöriges Moment, grafische Darstellung, Ausbausystem 2

Eingabewerte - N	-364,6	-58,9	-2411,7	-128,1	0,0	N
Eingabewerte - M	-8,8	9,5	-42,4	38,0	0,0	M

Überlagerung aus statischen und thermischen Lasten



	Druckspannung aus statischen Lasten, Tiefe 11 cm	Druckspannung aus thermischen Lasten, Tiefe 11 cm	Überlagerung, Tiefe 11 cm
Ausbauquerschnitt 1	11,4 N/mm ² (=3430kN/m / (0,3m*1,0m))	23 N/mm ²	34 N/mm ²
Ausbauquerschnitt 2	8,0 N/mm ² (=2412kN/m / (0,3m*1,0m))	9 N/mm ²	17 N/mm ²

- Zusammenstellung der Druckspannungen aus statischen und thermischen Lasten sowie der Überlagerung für die Ausbauquerschnitte 1 und 2

Beton Temp. θ	Quarzh. Zuschläge			Kalksteinhaltige Zuschläge		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	–	–	0,00	–	–

- Abminderungsfaktoren zur Ermittlung der Betondruckfestigkeiten bei erhöhten Temperaturen gemäß DIN EN 1992-1-2: 2010-12 + NA, „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“

Festigkeits- und Formänderungskennwert für Beton C35/45
(entnommen aus DIN EN 1992-1-1:2011-01; Tabelle 3.1)

Betondruckfestigkeitsklasse C35/45		
Charakteristische Druckfestigkeit f_{ck}	35	N/mm ²
Charakteristische Druckfestigkeit (Würfel) f_{ck}	45	N/mm ²
Charakteristische Zugfestigkeit $f_{ctk, 0,05}$	2,5	N/mm ²
Für Verformungen E-Modul E_{cm}	34000	N/mm ²

Bewertung Betonabplatzungen in den Ausbausystemen 1 und 2

- Ausbausystem 1: Auswirkungen bis in eine Tiefe von 11 cm möglich (konservative Betrachtung)
- Ausbausystem 2: Auswirkungen bis in eine Tiefe von 7,3 cm möglich (konservative Betrachtung)

- Kleinflächige Betonabplatzungen sowie handtellergroße Ablösungen sind wahrscheinlich.
- Es sind keine unzulässigen Schädigungen des Abfallgebundes oder unzulässige radiologische Auswirkungen zu erwarten.

1 Ziel und Aufgabenstellung

**2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme**

3 Brandmodellierung

**4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien**

**5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2**

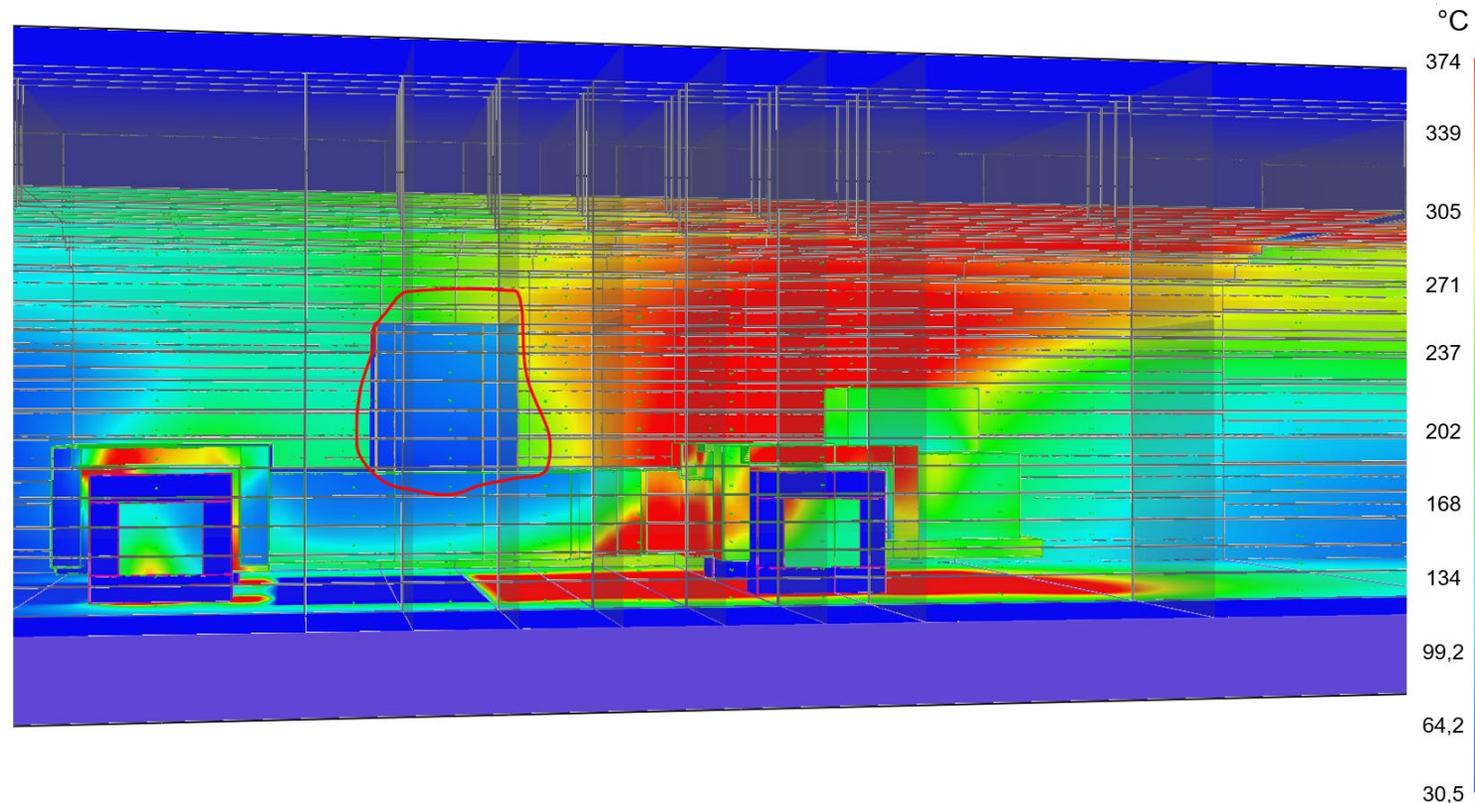
**6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2**

**7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3**

8 Zusammenfassende Betrachtung

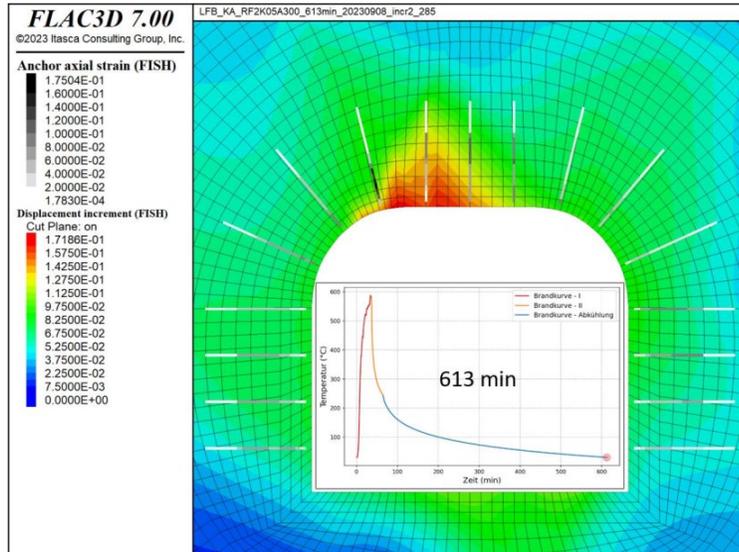
Bewertungsansatz potentieller Löserereignisse im Ausbausystem 3

- Löserereignisse können aufgrund der Temperaturbelastung der Firste nicht ausgeschlossen werden.
- Daher erfolgen weitergehende Betrachtungen im Hinblick auf eine mögliche Schädigung von Abfallgebinden.

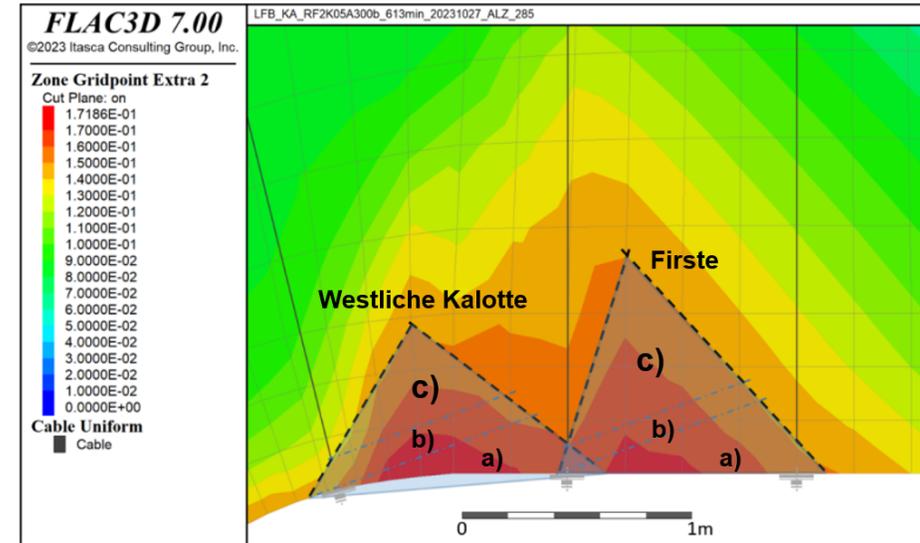


Potenzielle Bruchkörper

- Potenzielle Bruchkörper wurden im Rahmen einer BGE-eigenen Untersuchung abgeschätzt.
- Durchführung thermo-mechanisch gekoppelter Berechnungen unter Berücksichtigung von Grubenraumgeometrie, Ausbausystem, Geologie und Streckenzustand
- Ausbausysteme mit Klebeankern werden als maßgebend angesehen.
- Rest-Tragfähigkeit der Anker wird berücksichtigt.



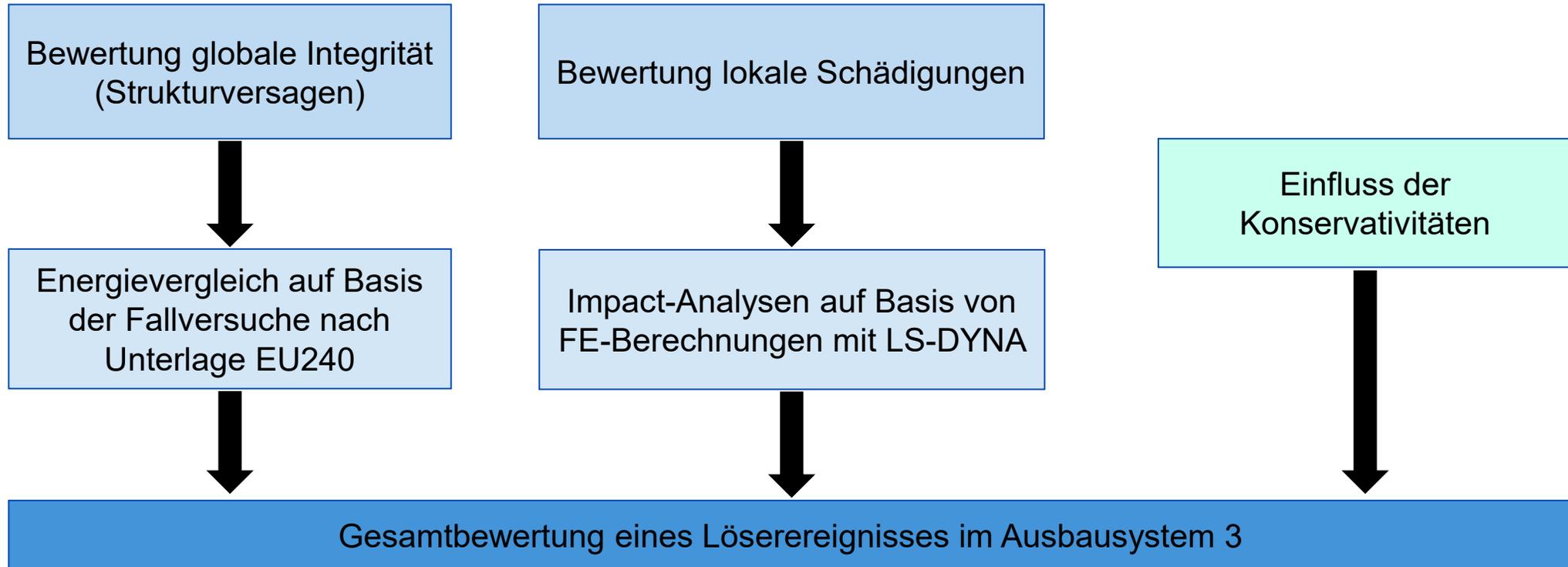
Verschiebungszuwachs infolge Brand und axialer Dehnung des Ankers



	Westliche Kalotte („links“)	Firste („rechts“)
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

Potenzielle Bereiche und Geometrien von Lösern

Bewertung der Auswirkungen auf Abfallgebinde im Ausbausystem 3



Bewertung globale Integrität (Energievergleich bzgl. der Bauartprüfung)

Anforderungen aus der Unterlage EU240

- Durchführung von Fallversuchen im Rahmen der Bauartprüfung der Behälter
- Anschließende Beurteilung der Integrität
- Minimale Fallhöhe von 0,8 m für Abfallbehälter der Klasse I
- Prüfmuster werden so fallen gelassen, dass der größtmögliche Schaden in Bezug auf die Integrität erwartet wird
- Ansatz der minimalen Massen der Abfallgebinde

Potenzieller Bruchkörper

- Fallhöhe beträgt 2 m
- Bruchkörpermasse hängt von der Ausdehnung des Abfallgebundes in Tunnellängsrichtung ab

Bewertung

- Die strukturelle Integrität ist gegeben, wenn die Energie des Bruchkörpers **geringer** ist als der Energieeintrag aus den Fallversuchen. Konservativ wird die **minimale** Masse der Abfallgebinde angesetzt.

Bewertung globale Integrität (Energievergleich)

Bezeichnung	Minimale <u>Gebinde-</u> <u>masse</u> [t]	Energie Fall- versuch h=0.8m [kJ]	Maximale Ab- messung des Bruchkörpers [mm]	Spez. Masse Bruchkörper [t/ <u>lfd.m</u>]	Masse Bruchkörper [t]	Energie Bruchkörper [kJ]
Betonbehälter	4.55	35.7	1060	0.69	0.73	14.4
Gussbehälter	6.25	49.1	1060	0.69	0.73	14.4
Stahlcontainer	20.0	157.0	3200	0.69	2.21	43.3

- Die Energie des Bruchkörpers ist für die betrachteten Behälterarten jeweils **geringer** als der Energieeintrag aus den Fallversuchen.
- Die strukturelle Integrität bleibt auch nach einem Löserereignis erhalten.

Bewertung lokaler Schädigungen



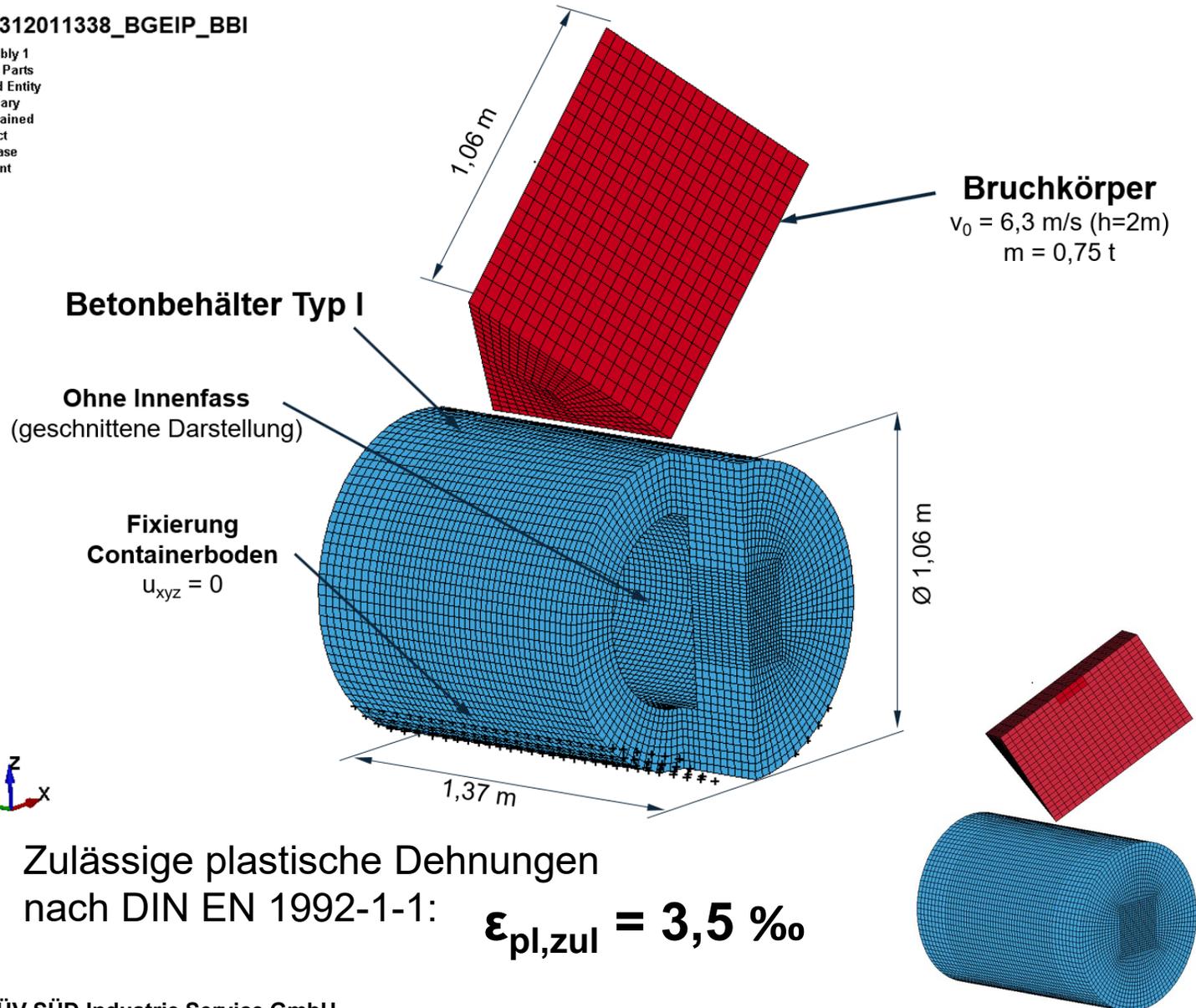
- Durch die Bruchkörpergeometrie können lokale Schädigungen infolge eines Aufpralls mit einer Kante oder Ecke nicht ausgeschlossen werden.
- Bewertung anhand von numerischen Impact-Analysen mit der FE-Software LS-DYNA
- Betrachtung des Betonbehälters Typ I (typischer Betonbehältertyp)
- Betrachtung des Stahlblechcontainers Typ V (größte Wechselwirkungsfläche mit dem Bruchkörper und geringe Wanddicke)
- Gussbehälter werden aufgrund der großen Wanddicke (> Faktor 25 im Vergleich zu den Stahlblechcontainern) und der damit verbundenen geringeren elastischen und plastischen Verformungen bei einem Löserereignis sowie der mehrstufigen Dichtsysteme nicht betrachtet.

Betonbehälter Typ I: FE-Modell und Randbedingungen



202312011338_BGEIP_BBI

- > Assembly 1
- > FEM Parts
- > Keyword Entity
- > Boundary
- > Constrained
- > Contact
- > Database
- > Element
- > Initial
- > Set



Außendurchmesser	1.060 mm
Innendurchmesser	650 mm (Außendurchmesser 200-Li- ter-Fass: 623 mm)
Länge	1.370 mm
Werkstoff	Normalbeton
Dichte	2,4 – 2,5 kg/dm ³
Festigkeitsklasse	C30/37
Bemessungstemperatur	100 °C
Festigkeit bei Bemessungs- temperatur	30 MPa (Abminderungsfaktor 1,0)
E-Modul	33000 MPa
Querkontraktionszahl	0,2
Bewehrungsgrad	0,5 %

Materialkennwerte Bruchkörper

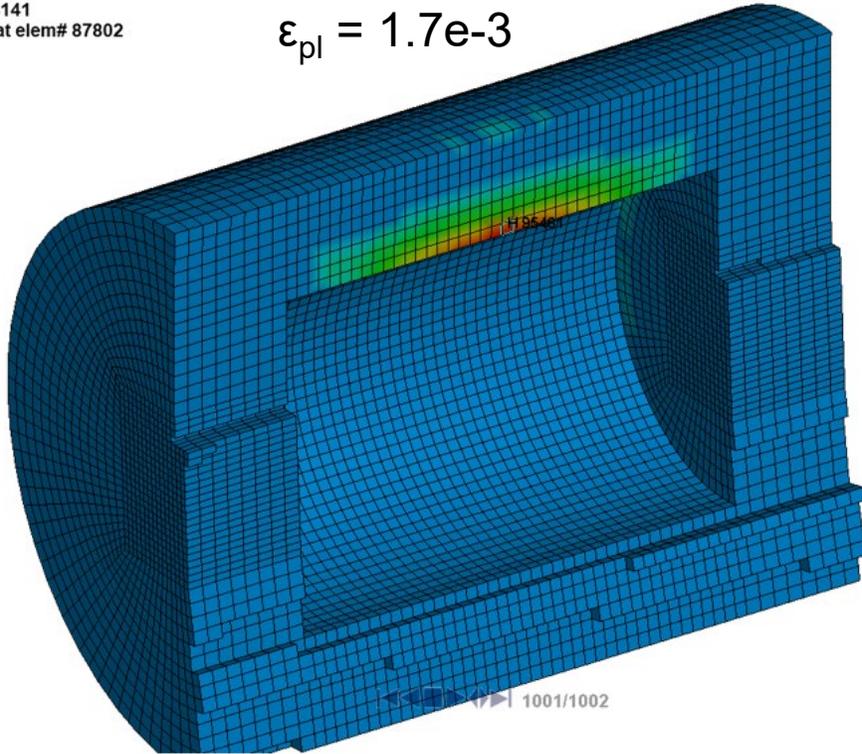
Parameter	Einheit	Zwischenmittel (Homogenbereich H3 /2/)	Unteres Erzlager (Homogenbereich H1 /2/)
Dichte	[kg/m ³]	2500	2500
E-Modul	[MPa]	3000	8000
Querdehnzahl	[-]	0,25	0,20
Kohäsion	[MPa]	0,5	0,7
Reibungswinkel	[°]	34	37
Zugfestigkeit	[MPa]	0	0
Dilatanzwinkel	[°]	0	0

Betonbehälter Typ I: Plastische Dehnungen

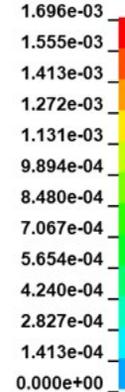
Aufprall mit Kante

$$\epsilon_{pl} = 1.7e-3$$

202312011338_BGEIP_BBI
Time = 0.099999
Contours of Effective Plastic Strain
min=0, at elem# 64141
max=0.00169609, at elem# 87802



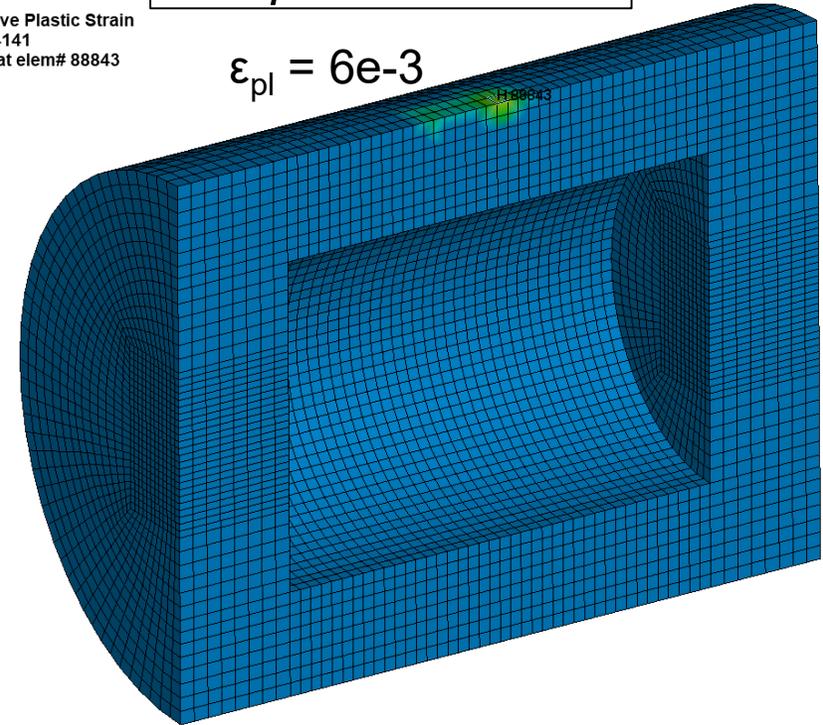
Effective Plastic Strain



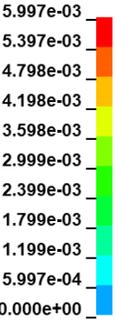
Aufprall mit Ecke

$$\epsilon_{pl} = 6e-3$$

202312011340_BGEIP_BBI
Time = 0.099999
Contours of Effective Plastic Strain
min=0, at elem# 64141
max=0.00599716, at elem# 88843



Effective Plastic Strain



- Die zulässigen plastischen Dehnungen werden beim Aufprall mit der Ecke in einem lokal sehr begrenzten Bereich geringfügig überschritten.
- **Durch die risshemmende Wirkung der Bewehrung sind Beschädigungen auf Abplatzungen an der Oberfläche begrenzt.**
- **Ein integrales Versagen ist nicht zu befürchten (siehe auch Folie 67 zu den Konservativitäten).**

Stahlblechcontainer Typ V: FE-Modell



202401121501_BGEIP_SCV_90g

Time = 0

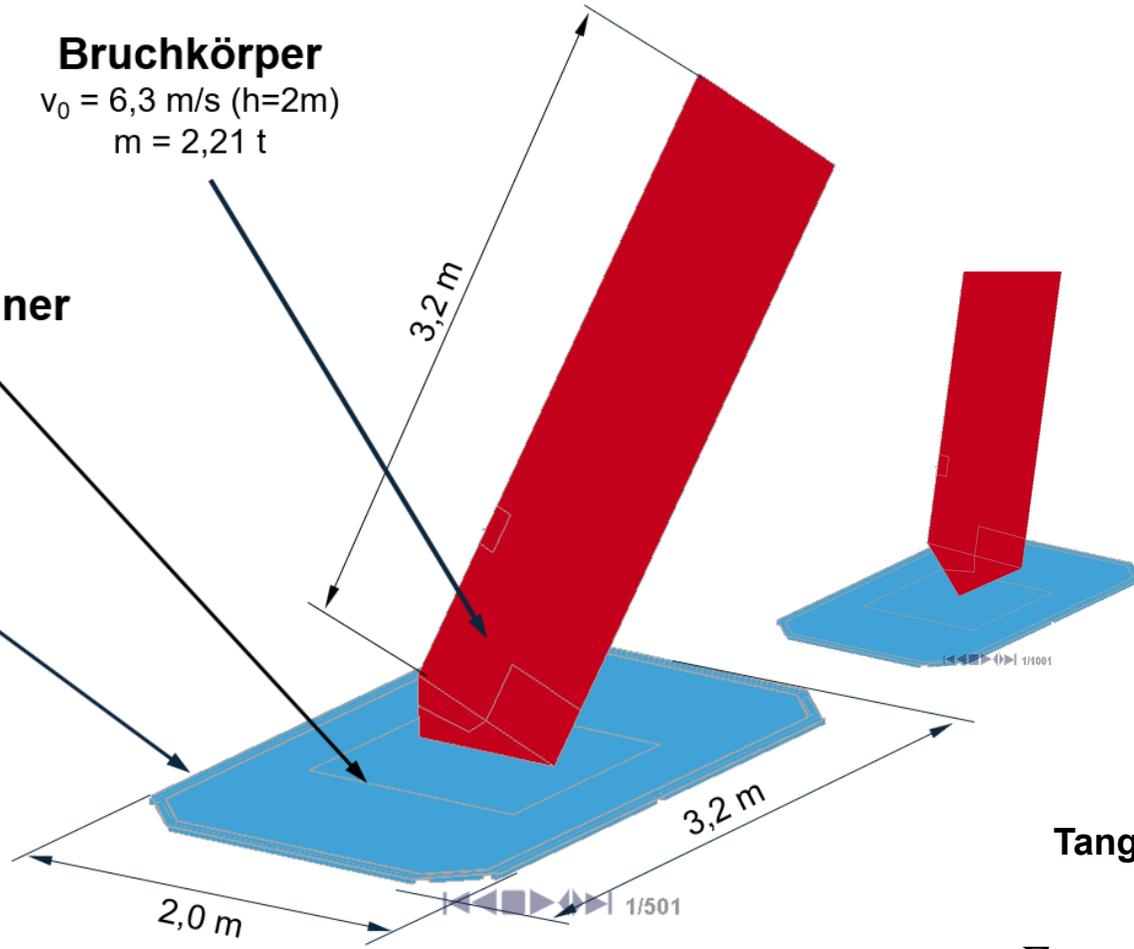


Post

Bruchkörper
 $v_0 = 6,3 \text{ m/s (h=2m)}$
 $m = 2,21 \text{ t}$

**Deckel
 Stahlcontainer
 Typ V**

**Umlaufende
 Fixierung Deckel**
 $u_{xyz} = 0$



Komponente		Stahlcontainer V Deckel
Werkstoff		S355J2 (1.0577)
Lieferzustand		-
Erzeugnisform		Blech
Norm/Datenblatt/Materialzeugnis		DINEN10025-2
Nenndicke	[mm]	16 < t ≤ 40
Dichte	[kg/m ³]	7850
E-Modul	[MPa]	207000
Querdehnungszahl	[-]	0.3
Temperatur	[°C]	100
Streckgrenze R _{p0,2RT}	[MPa]	345
Streckgrenze R _{p0,2T}	[MPa]	249
Zugfestigkeit R _m	[MPa]	470
Bruchdehnung A	[%]	22
Tangentenmodul E _{tang}	[MPa]	568

Tangentenmodul:

$$E_{tan} = \frac{R_m - R_{p0.2}}{A}$$

Dehnrage (Cowper-Symonds):

$$k = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}}$$

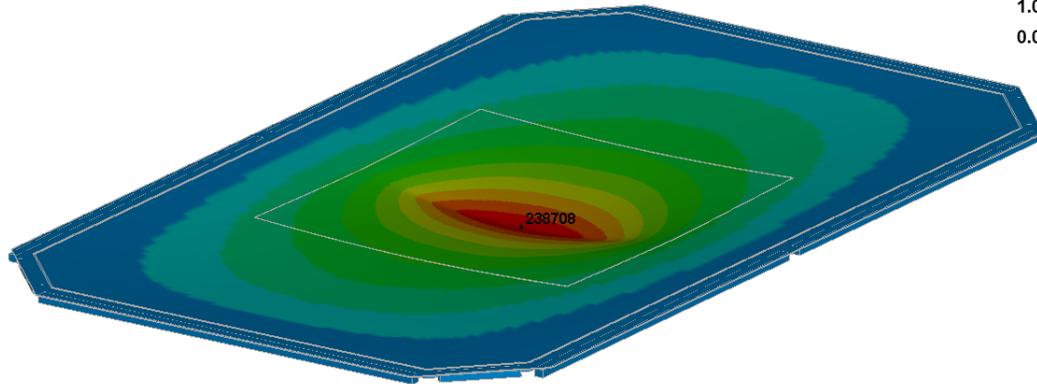
Stahlblechcontainer Typ V: Aufprall mit Kante

Verformungen [mm]

Plastische Dehnungen [mm]

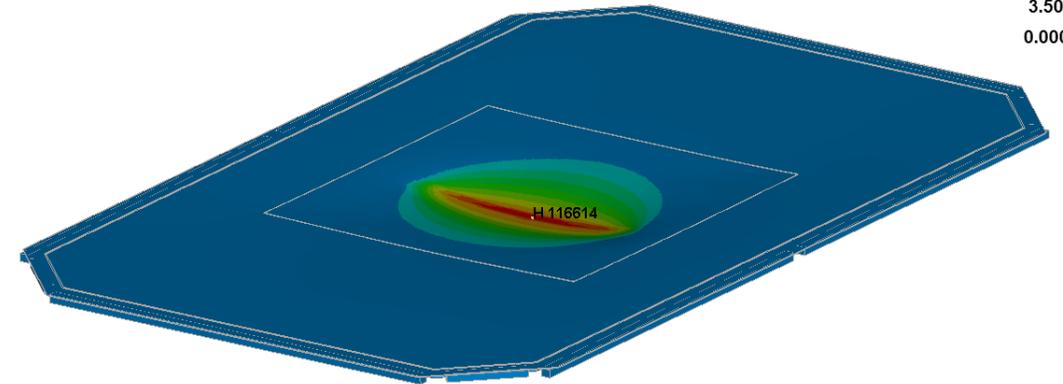
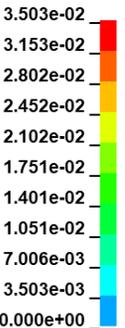
202401121506_BGEIP_SCV_90g
Time = 0.0349
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 85316
max=104.073, at node# 238708

Resultant Displacement



202401121506_BGEIP_SCV_90g
Time = 0.05
Contours of Effective Plastic Strain
min=0, at elem# 2074
max=0.0350296, at elem# 116614

Effective Plastic Strain



- Die maximale Verformung liegt bei 104 mm.
- Die plastische Dehnung liegt bei 3,5% und damit deutlich unter der Bruchdehnung von 22%.

Stahlblechcontainer Typ V: Aufprall mit Ecke

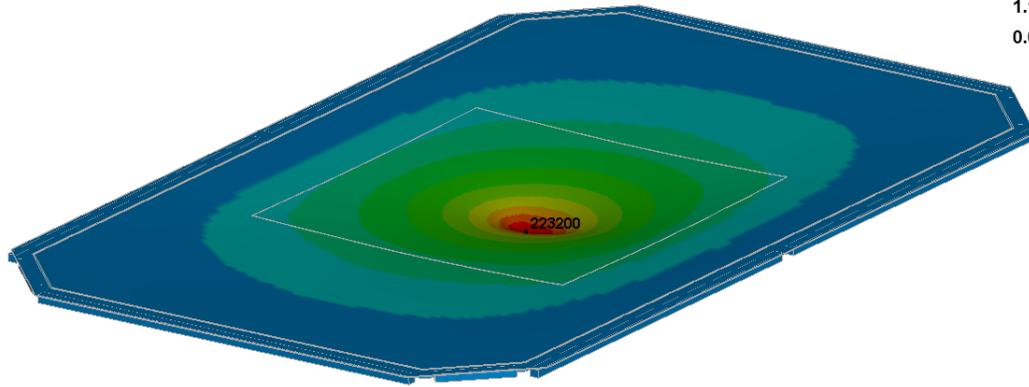
Verformungen [mm]

Plastische Dehnungen [mm]

202401121508_BGEIP_SCV_90g
Time = 0.05
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 85316
max=113.57, at node# 223200

Resultant Displacement

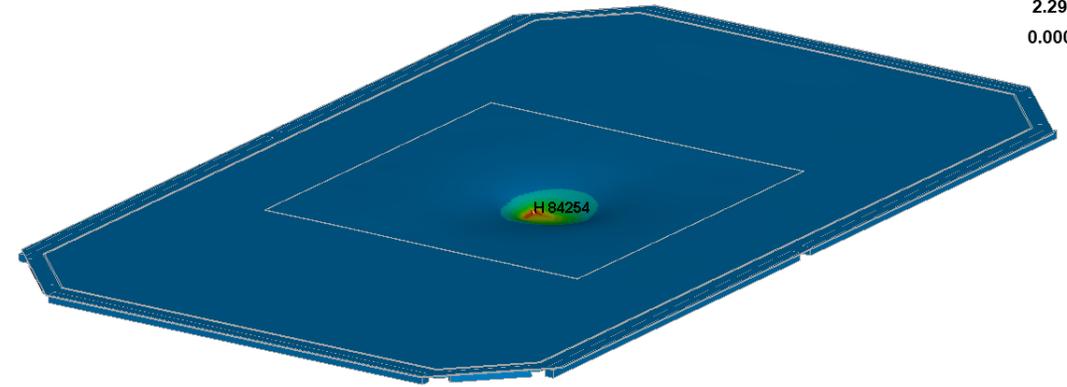
1.136e+02
1.022e+02
9.086e+01
7.950e+01
6.814e+01
5.679e+01
4.543e+01
3.407e+01
2.271e+01
1.136e+01
0.000e+00



202401121508_BGEIP_SCV_90g
Time = 0.1
Contours of Effective Plastic Strain
min=0, at elem# 2074
max=0.229619, at elem# 84254

Effective Plastic Strain

2.296e-01
2.067e-01
1.837e-01
1.607e-01
1.378e-01
1.148e-01
9.185e-02
6.889e-02
4.592e-02
2.296e-02
0.000e+00



Die maximale Verformung liegt bei 114 mm.

- Die plastische Dehnung liegt bei 23% und damit geringfügig über der Bruchdehnung von 22%.
- **Aufgrund der lokalen Begrenzung des Schädigungsbereichs ist ein Verlust der Integrität des Stahlblechcontainers und ein Austritt des Inventars nicht zu befürchten (siehe auch Folie 67 zu den Konservativitäten).**

1 Ziel und Aufgabenstellung

**2 Spezifikation der Ausbausituation
bzw. Ermittlung repräsentativer
Ausbausysteme**

3 Brandmodellierung

**4 Vergleichende Betrachtung der
unterschiedlichen Brandszenarien**

**5 Ermittlung des Wärmeeintrags in die
Firste für die Ausbausysteme 1
und 2**

**6 Bewertung der Auswirkungen des
Wärmeeintrags für die
Ausbausysteme 1 und 2**

**7 Ermittlung der Auswirkungen eines
unterstellten Löserabsturzes im
Ausbausystem 3**

8 Zusammenfassende Betrachtung

Zusammenfassende Betrachtung Konservativitäten Brand



Für das Brandszenario wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Die Brandlast wurde konservativ angesetzt. Es wurden die Brandlasten (Treibstoff einschließlich der Betriebsmittel sowie aller Reifen) der dieselbetriebenen TW zugrunde gelegt. Die Batterie eines batteriebetriebenen TW ist schwer entzündlich und wurde daher nicht in die Betrachtungen mit einbezogen.
- Die Fläche der Lache wurde so positioniert, dass alle Reifen vom Brand erfasst werden und gleichzeitig die Lache über die Abmessungen des TW hinausreicht, so dass eine beidseitige radiative Beeinträchtigung der Firste gegeben ist.
- Es wurden versiegelte Flächen des Fahrbahnbelages betrachtet, die kein Versickern von Flüssigkeiten zulassen.

Zusammenfassende Betrachtung Konservativitäten zum Löserereignis



Mit den auf dieser Grundlage ermittelten Ergebnissen wurden die Berechnungen wiederum mit konservativen Betrachtungen durchgeführt.

- Der heißeste Firstbereich befindet sich in der Realität nicht über dem Abfallgebinde. Daher sind die Temperaturspannungen in der Firste oberhalb des Abfallgebundes in der Realität geringer als hier angenommen wurde.
- Das Lösen von Bruchkörpern erfolgt in der Realität nicht in kompakter Form, sondern in Form von Abblättern und Ablösen. Dadurch sind die einzelnen Bruchstücke in der Realität kleiner als hier angenommen wurde. Bruchstücke, die sich schon auf der Oberfläche des Deckels befinden, nehmen ggf. Energie der weiteren herabstürzenden Bruchstücke auf und reduzieren deren Energieeintrag in den Deckel.
- Der Maschendraht des Ausbaus wird konservativ als nicht mehr tragfähig angesetzt. Es wird ein vollständiges Versagen des gesamten betroffenen Maschendrahts unterstellt.
- Für das Gestein der Bruchkörper wurden konservativ die Parameter des unteren Erzlagere verwendet, die eine höhere Steifigkeit aufweisen.

Zusammenfassende Betrachtung Konservativitäten zum Gebinde



Folgende weitere Konservativitäten wurden bei der Betrachtung der einzelnen Gebinde berücksichtigt.

- Strukturen, die möglicherweise einen Teil der Energie des herabstürzenden Bruchkörpers aufnehmen, z. B. die Rahmenkonstruktion der Tauschpaletten, wurden nicht berücksichtigt.
- Der Energievergleich für die betrachteten Bruchkörper erfolgt in Bezug zu den vorausgehenden Betrachtungen, die für eine Fallhöhe von 0,8 m erfolgten.
- Beim Betonbehälter wird bei der Bewertung auf ein stützendes Innenfass oder einen Verguss des freien Volumens zwischen einem eingestellten Fass und der Innenseite des Betonbehälters verzichtet. Ein vollständiger Verguss eines Betonbehälters wirkt i. d. R. stabilisierend.
- Bei den Stahlblechcontainern werden ebenfalls kein Innenverguss, kein zweiter innerer Deckel und keine weiteren stabilisierenden Inneneinbauten (Betoninliner, Abschirmungen etc.) berücksichtigt.
- Ferner wird für die Dicke des Blechs lediglich 3 mm angenommen. Die bauartgeprüften Stahlblechcontainer weisen in der Realität massivere Blechstärken des Deckels auf.

Zusammenfassende Betrachtung

Ergebnisse und Fazit



- Für die mit Beton ausgebauten Strecken sind durch die Brandeinwirkung lediglich handtellergroße Abplatzungen zu erwarten. Unzulässige radiologische Auswirkungen durch das Abfallgebinde sind ausgeschlossen.
- Für das Ausbausystem 3 (Felsausbau mit Ankern und Maschendraht) wurden die konkreten gebirgsspezifischen Gegebenheiten im Bereich der Einlagerungskammern berücksichtigt.
- Ein konservatives brandinduziertes Löserereignis wurde von der BGE ausgewiesen.
- Es wurden unterschiedliche Auftreffgeometrien für unterschiedliche Behälter berechnet.
- In Abhängigkeit der Behälterauslegung und Beladung kann es lokal begrenzt zu einer Überschreitung der zugrunde gelegten Festigkeitskriterien kommen.
- **Schadensbilder, die durch die Anforderungen der Endlagerungsbedingungen bzw. der zugrundeliegenden Störfallanalyse nicht abgedeckt werden, sind – selbst unter Berücksichtigung der erheblichen Konservativitäten in den durchgeführten Analysen - nicht zu befürchten.**
- **Daher sind die Randbedingungen aus den ursprünglichen Sicherheitsbetrachtungen weiterhin eingehalten.**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit