

3. Freiburger – Feuerfest – Symposium 2018

Schadensfälle von feuerfesten Zustellungen und Wege zu deren Vermeidung

1 KONSTRUKTION

2 SCHÄDEN

3 ANALYSEN

4 SCHADENSMECHANISMUS

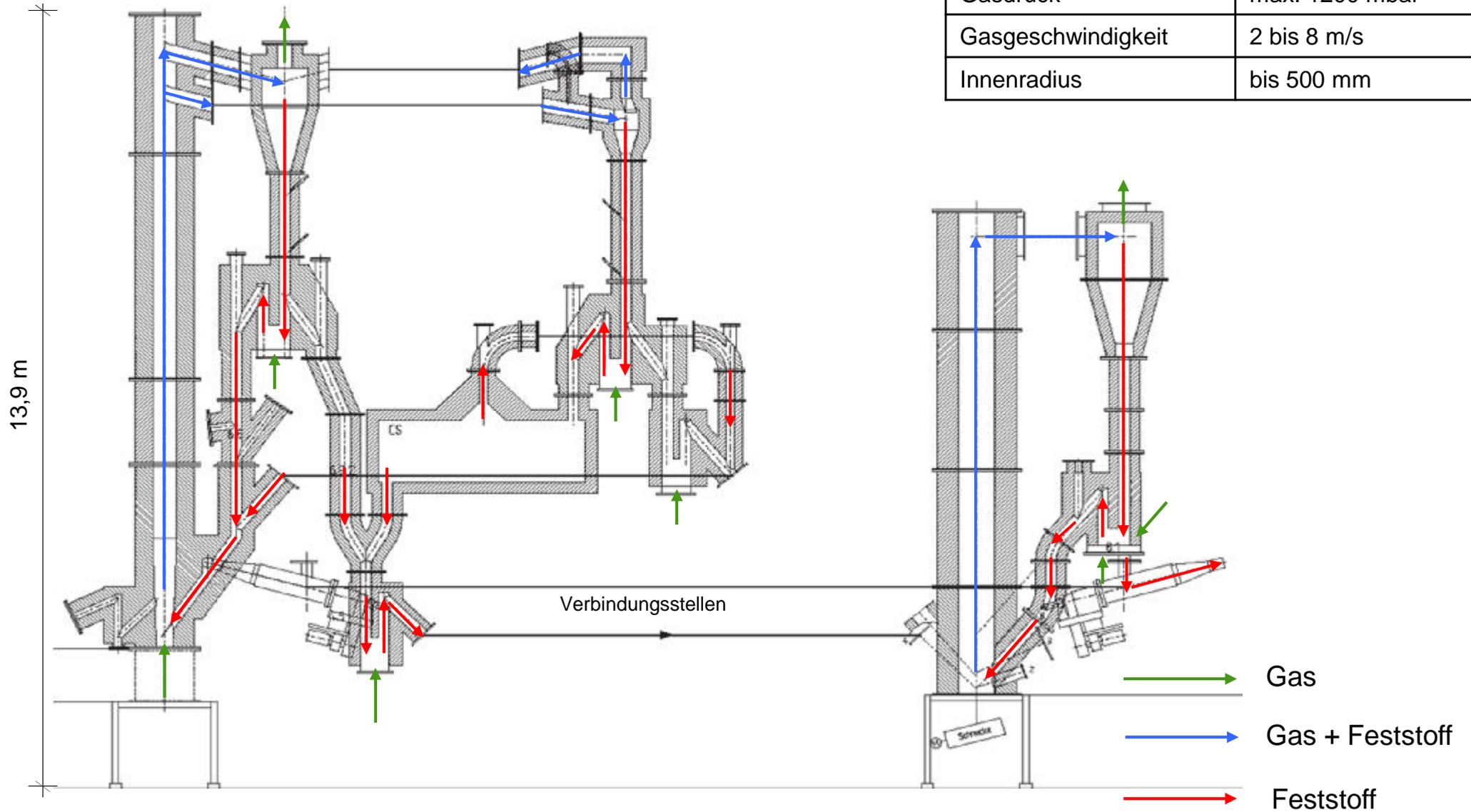
V. Lavrentyev

Prof. P. Noakowski

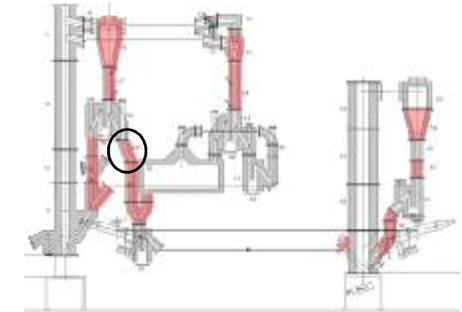
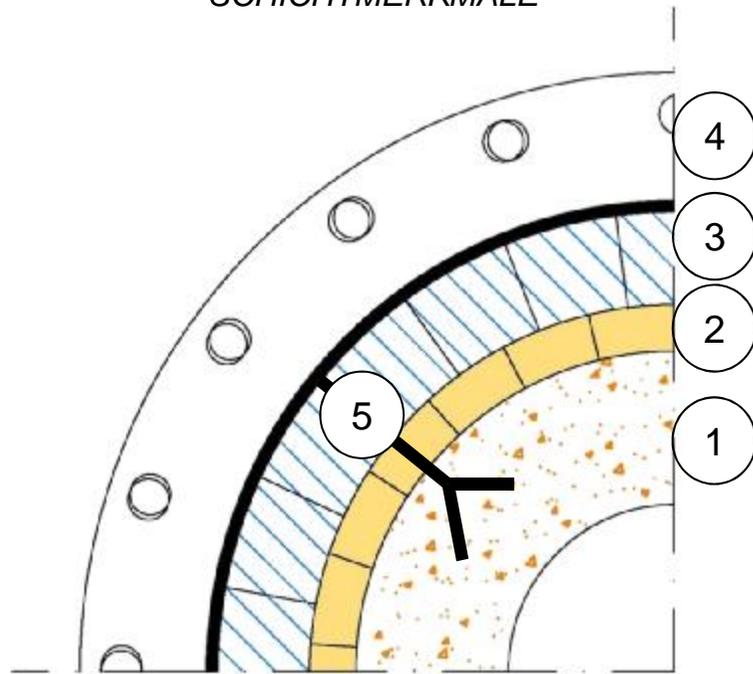
KONSTRUKTION

Gesamtanlage

AUFBAU & BETRIEB



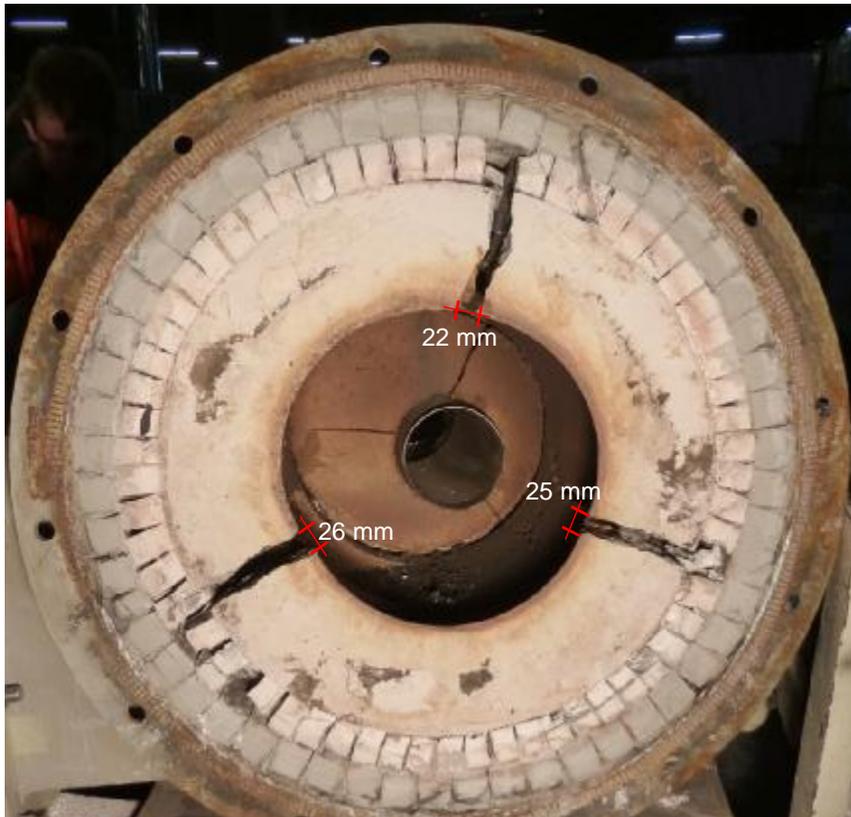
KONSTRUKTION
Kreisring & Microporöse Dämmung
 SCHICHTMERKMALE



SCHICHT	PRODUKT	ZUG-FESTIGKEIT ft [MN/m ²]	E-MODUL E [MN/m ²]	AUSDEHNUNG a _T [1/°C]	SCHWINDMASS e _s [%]	WÄRMELEITUNG l [W/mK]	BESONDERHEITEN EIGENSCHAFTEN
(1) Feuerbeton	Calde Flow MM 68 CO	3,7	40.000	6,5 x 10 ⁻⁶	20	1,61 - 1,68	Extreme Festigkeit u. E-Modul
(2) Kalziumsilikatplatte	Microcal 1100			6,8 x 10 ⁻⁶		0,09 - 0,13	
(3) Microporöse Dämmung	Silcapor Ultra 950			5,5 x 10 ⁻⁶		0,02 - 0,04	Extreme Wasserempfindlichkeit
(4) Stahlmantel	St. 37 (S 235)	235	210.000	1,1 x 10 ⁻⁵		47,5	
(5) Anker	Stahl 1.4828	270	200.000	1,7 x 10 ⁻⁵		15	Alle Werte entsprechen 20°C

SCHÄDEN

Kreisring & Microporöse Dämmung



SCHICHT

FINDUNG

ERKENNTNIS

(1) Feuerbeton

3 Radialrisse

Undichtigkeit gegenüber Dampf und Staub

(2) Kalziumsilikatplatte

Schwarzstaub in Fugen

Undichte Fugen im Betriebszustand

(3) Microporöse Dämmung

Auflösung am Stahlmantel

Eindrang und Kondensierung von Dampf

(4) Stahlmantel

Keine Auffälligkeiten

(5) Anker

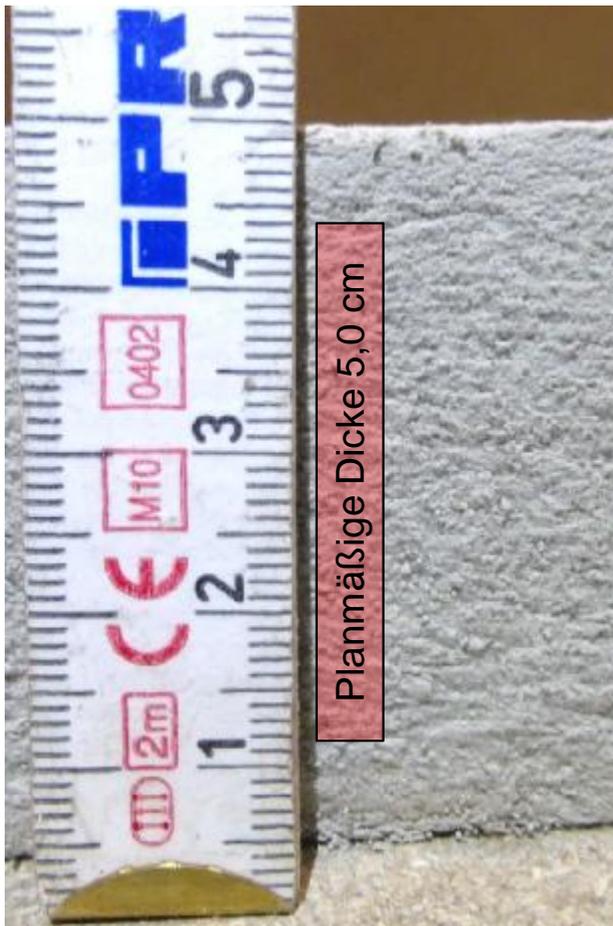
6 Stück, plastische Verformungen

Schwache Lagesicherung

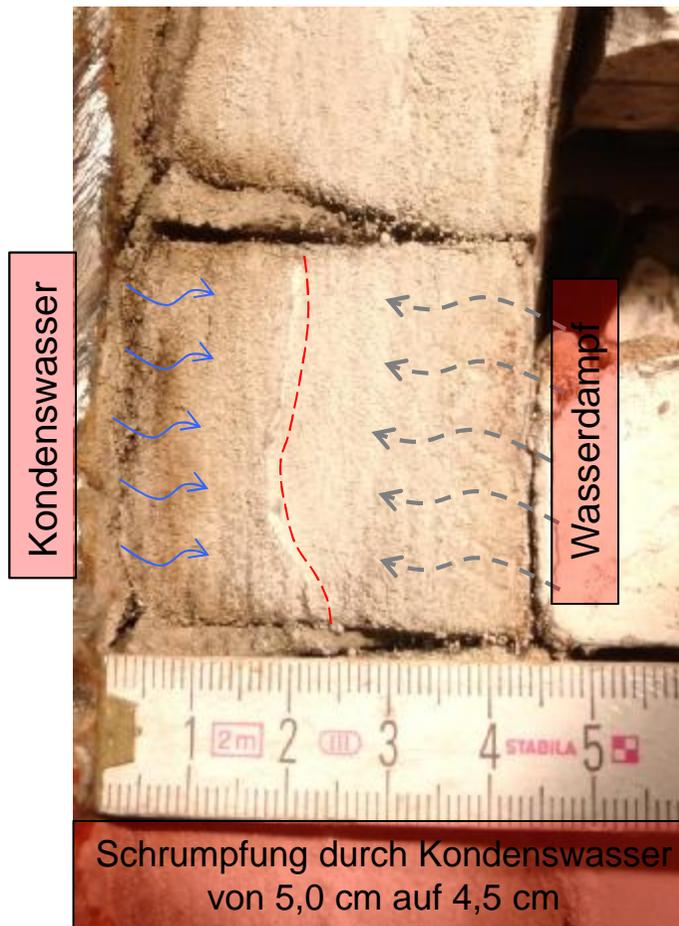
SCHÄDEN

Kreisring & Microporöse Dämmung

MICROPORÖSE DÄMMUNG



Neuwertige Dämmung



Angegriffene Dämmung

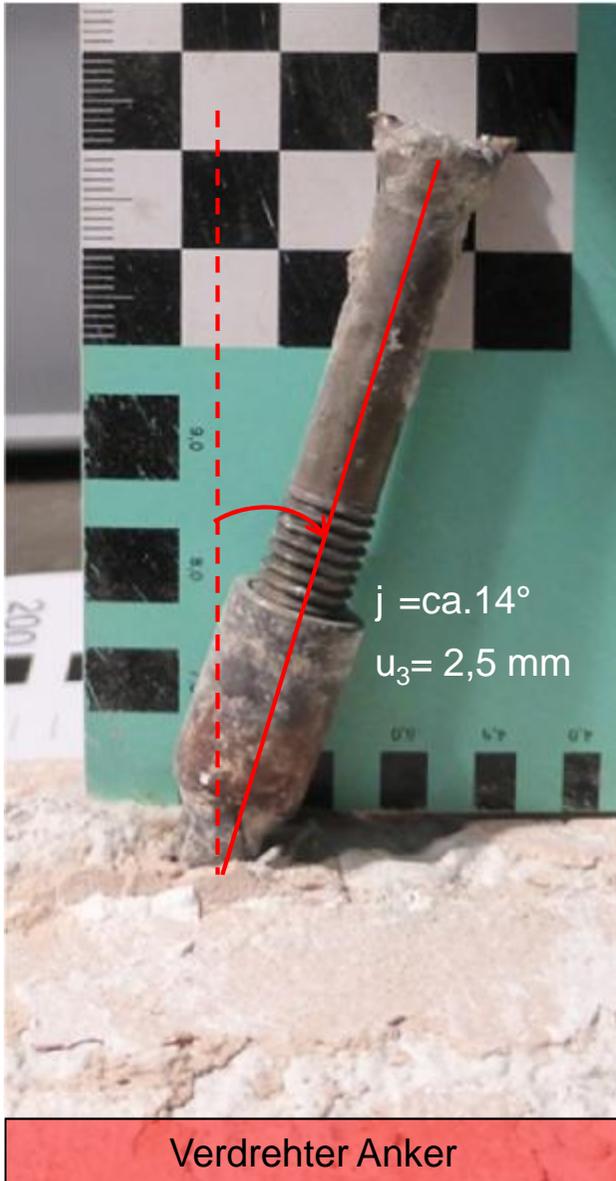


Zerstörte Dämmung

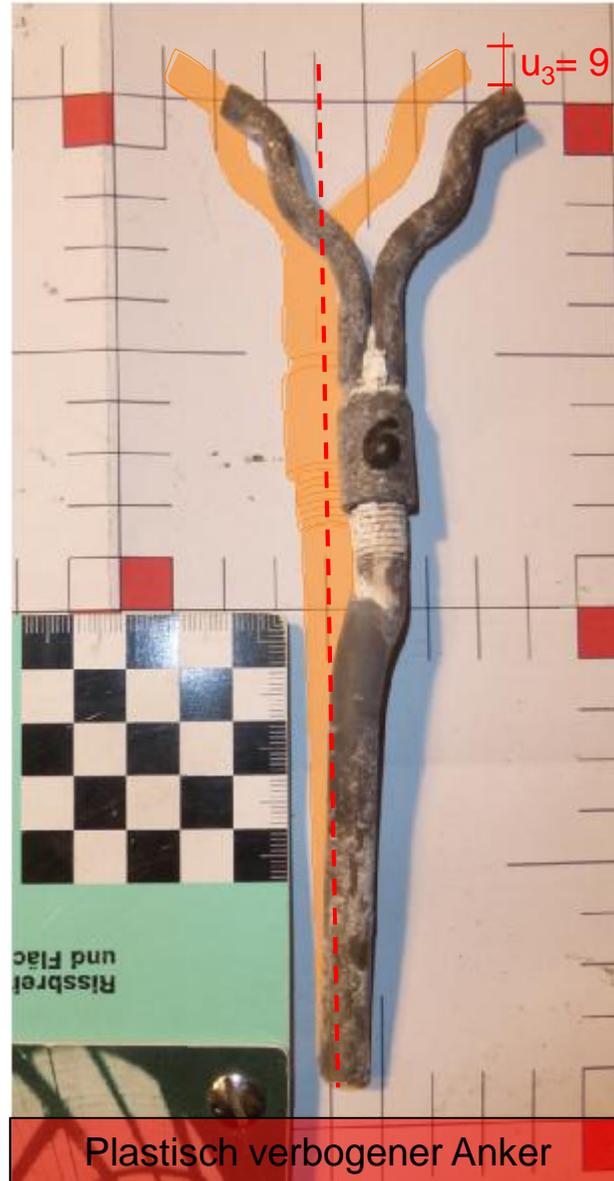
SCHÄDEN

Kreisring & Microporöse Dämmung

ANKERVERFORMUNGEN



Verdrehter Anker



Plastisch verbogener Anker

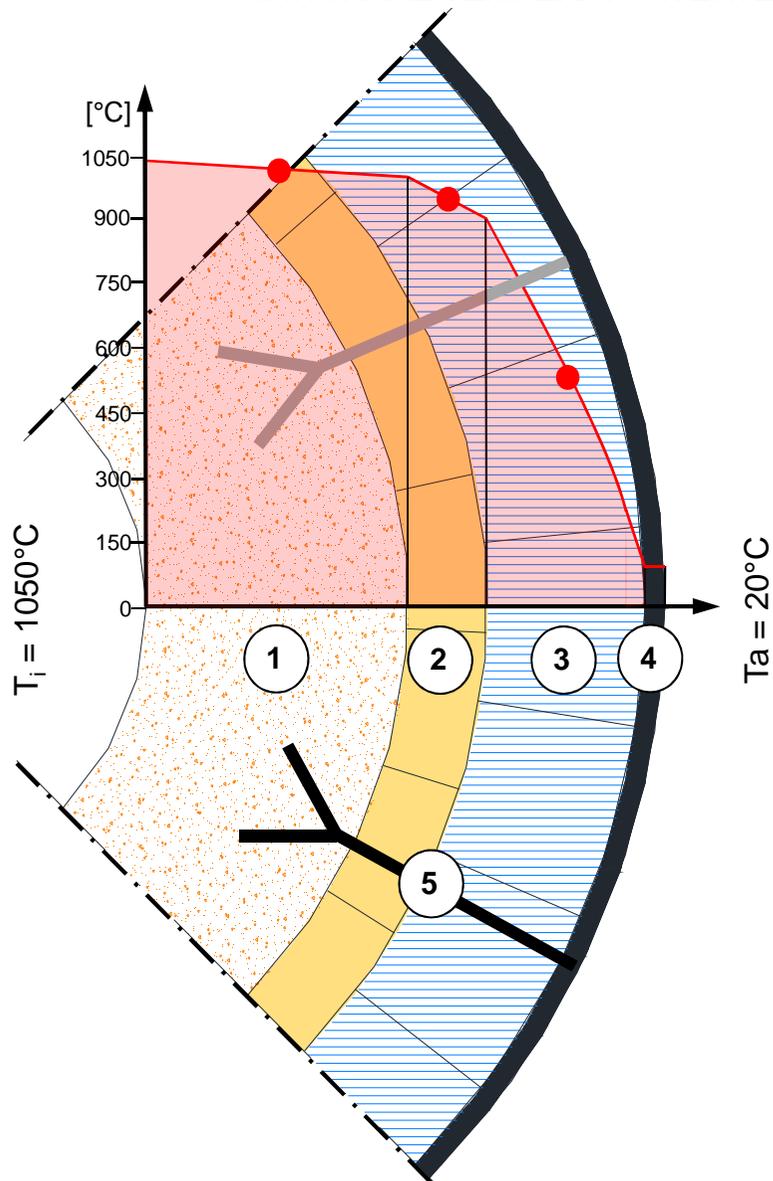


Gerader Anker

ANALYSEN

Temperaturanalyse

STATIONÄRE TEMPERATURVERTEILUNG



ELEMENT	Wanddicke [mm]	Temperatur Differenz [°K]	Mittlere Temperatur [°C]
(1) Feuerbeton	100	40	1020
(2) Kalziumsilikat Platten	65	110	950
(3) Microporöse Dämmung	125	800	517
(4) Stahlmantel	6	1	66
(5) Anker			ca. 600

Die der Spannungsanalyse zugrunde gelegten Schichttemperaturen:

Gas T = 1050°C

Feuerbeton T = 1020°C

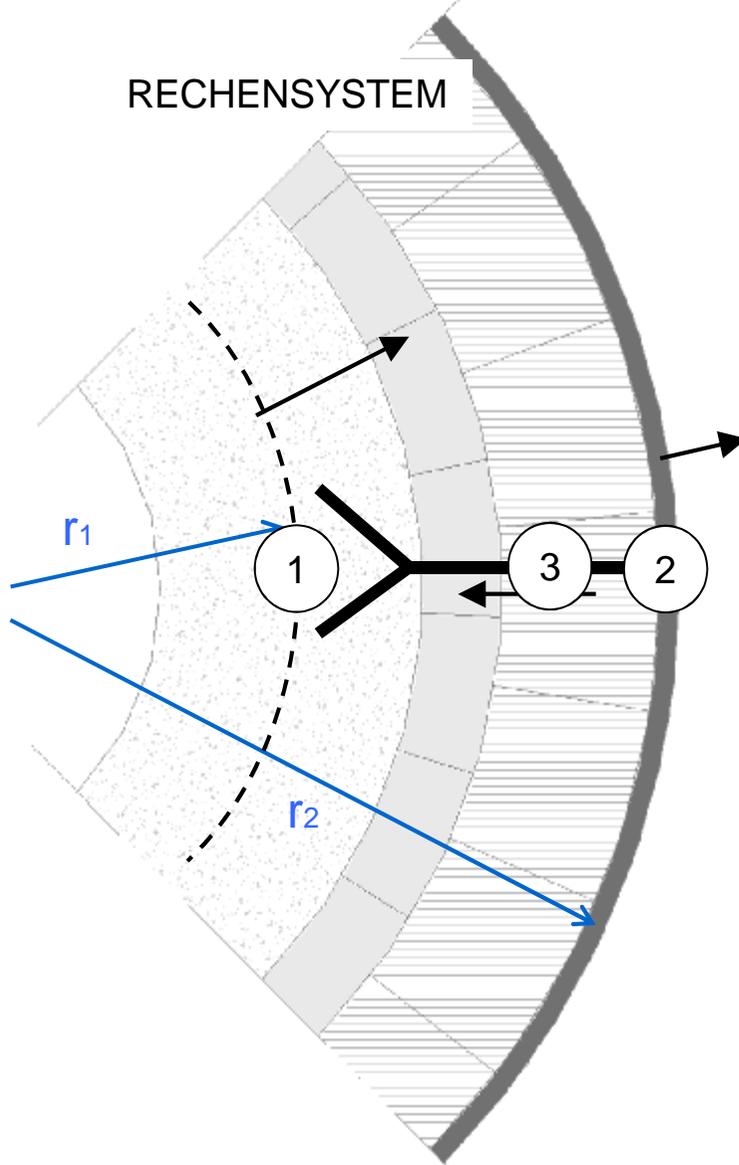
DT=40°K

Stahlmantel T = 66°C

ANALYSEN

Spannungsanalyse

RECHENSYSTEM UND RECHENWERTE



RECHENGRUNDLAGEN

- Innenring aus (1) Feuerbeton
- Außenring aus (2) Stahlmantel
- Kopplung mit (3) Stahlankern
- Nichtlineares Spannungsverhalten der Anker s/e
- Keine mechanische Relevanz der weichen Dämmschichten
- Beanspruchung durch die zugehörigen Schichttemperaturen

MASSGEBLICHE SCHICHTEIGENSCHAFTEN

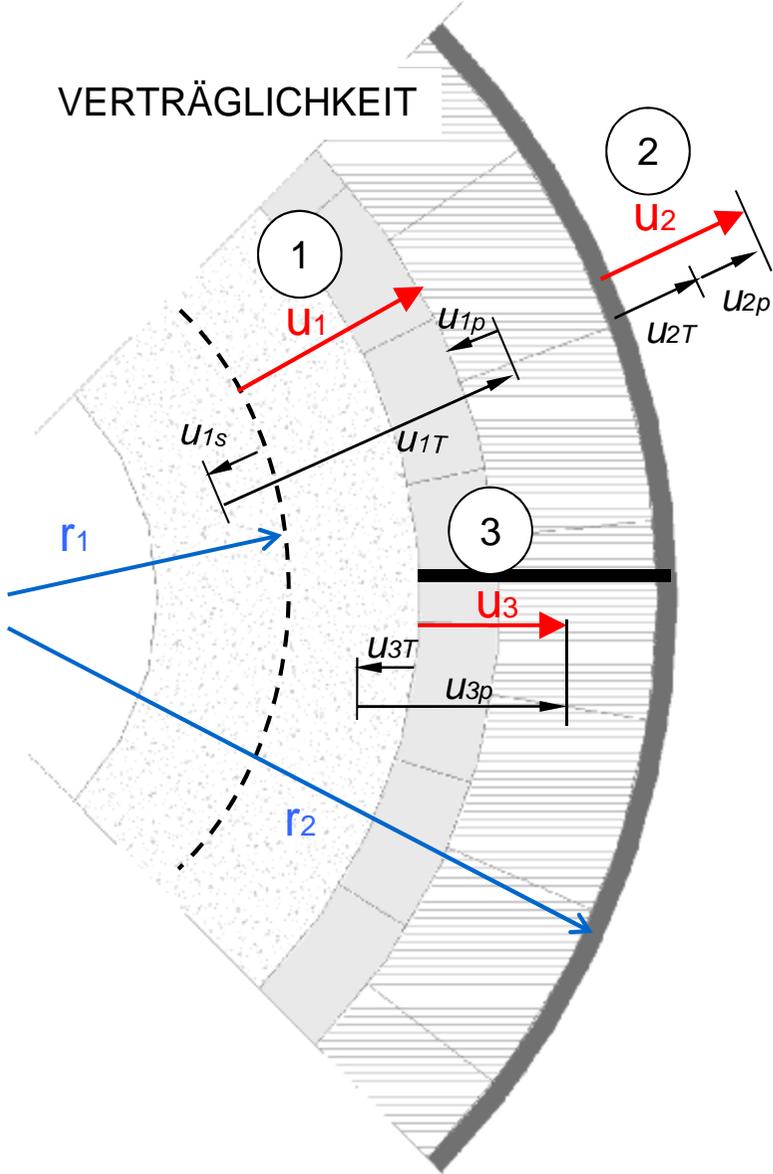
ELEMENT	Abmessungen [mm]	Temperatur [°C]	Ausdehnung [1/°K]	Schwindmass [1/°K]
(1) Feuerbeton	$r_1 = 131,5$	$T_1 = 1020$	$a_{T1} = 6,5e^{-6}$	$e_{S1} = 2,0e^{-6}$
Kalziumsilikat Platten		950		
Microporöse Dämmung		517		
(2) Stahlmantel	$r_2 = 251$	$T_2 = 66$	$a_{T2} = 1,1e^{-5}$	
(3) Anker	$L_3 = 75$	$T_3 = 600$	$a_{T3} = 1,7e^{-5}$	

ANALYSEN

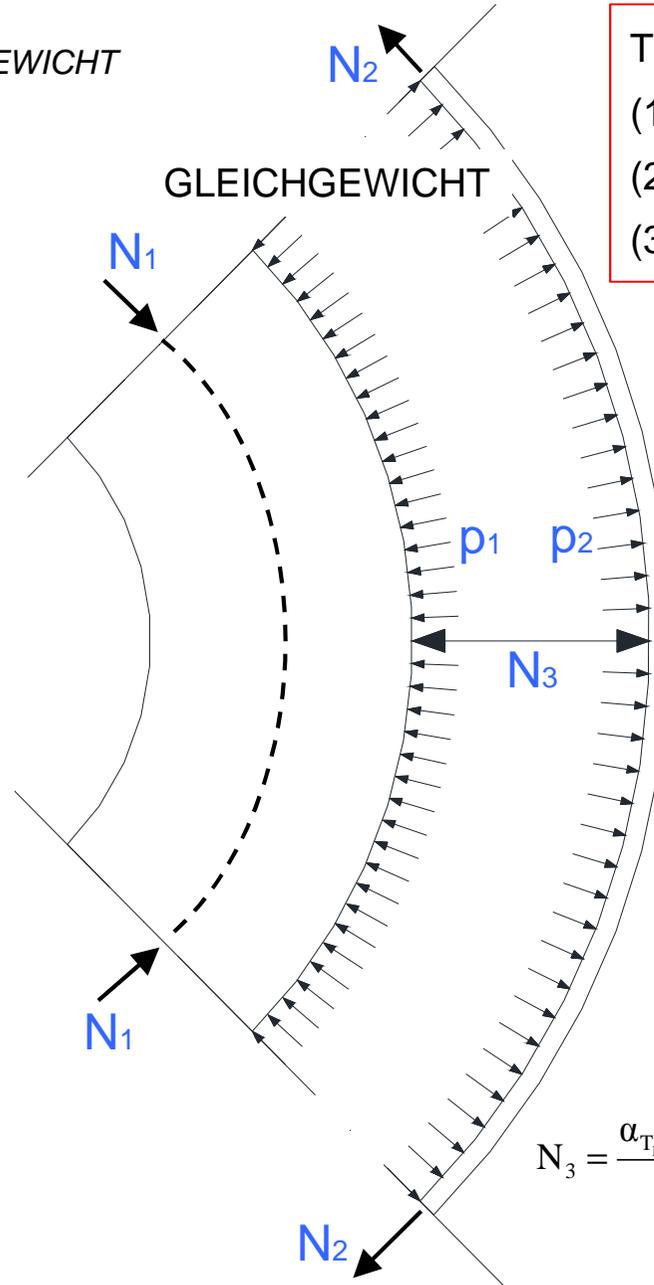
Spannungsanalyse

VERTRÄGLICHKEIT UND GLEICHGEWICHT

VERTRÄGLICHKEIT



GLEICHGEWICHT



TRAGELEMENTE SCHICHTAUFBAU

- (1) Feuerbeton
- (2) Stahlmantel
- (3) Stahlanker

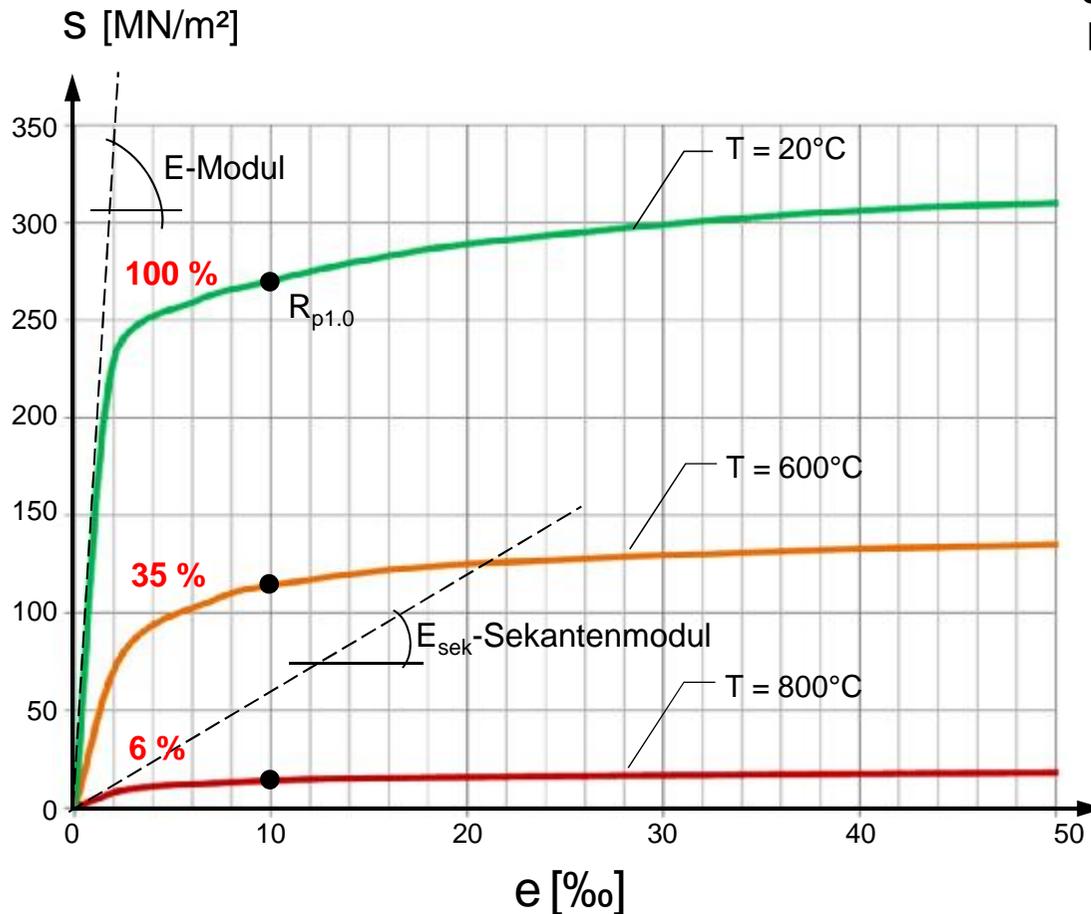
$$N_3 = \frac{\alpha_{T_1} \Delta T_1 r_1 - \alpha_{T_2} \Delta T_2 r_2 + \alpha_{T_3} \Delta T_3 l_3 - \epsilon_s r_1}{\frac{n_a \kappa_1}{2\pi \times E_1 \times \kappa_1 \times h} + \frac{n_a \kappa_2}{2\pi \times E_2 \times \kappa_2 \times h} + \frac{l_3}{E_3 \times A_3}}$$

ANALYSEN

Spannungsanalyse

MATERIALVERHALTEN UND DEHNUNGSERMITTLUNG

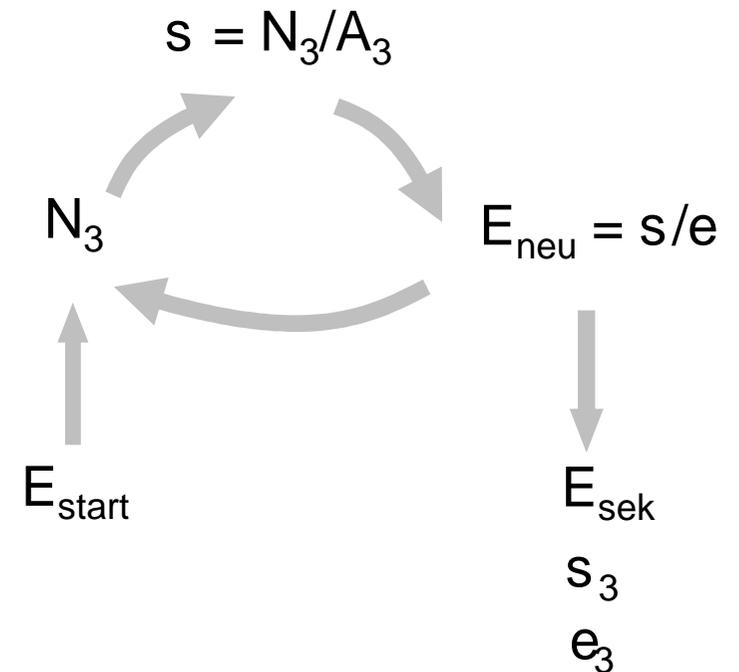
Thermisch abhängige Materialgesetze
Anker 1.4828



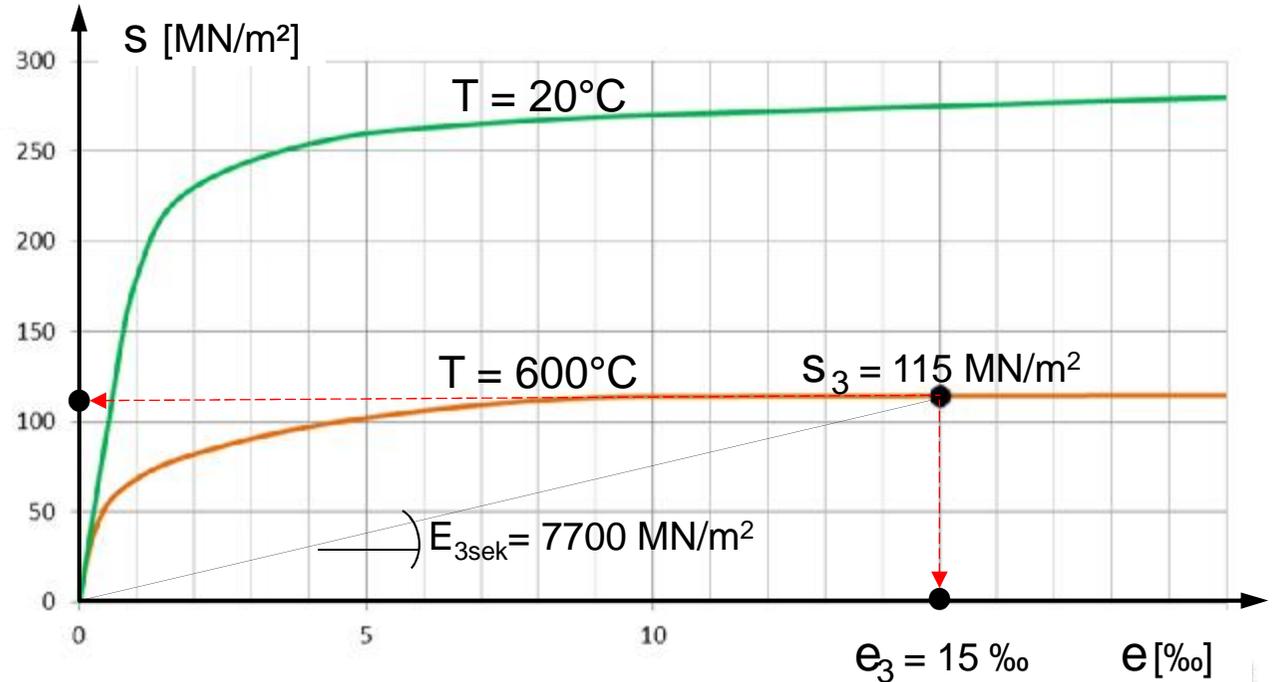
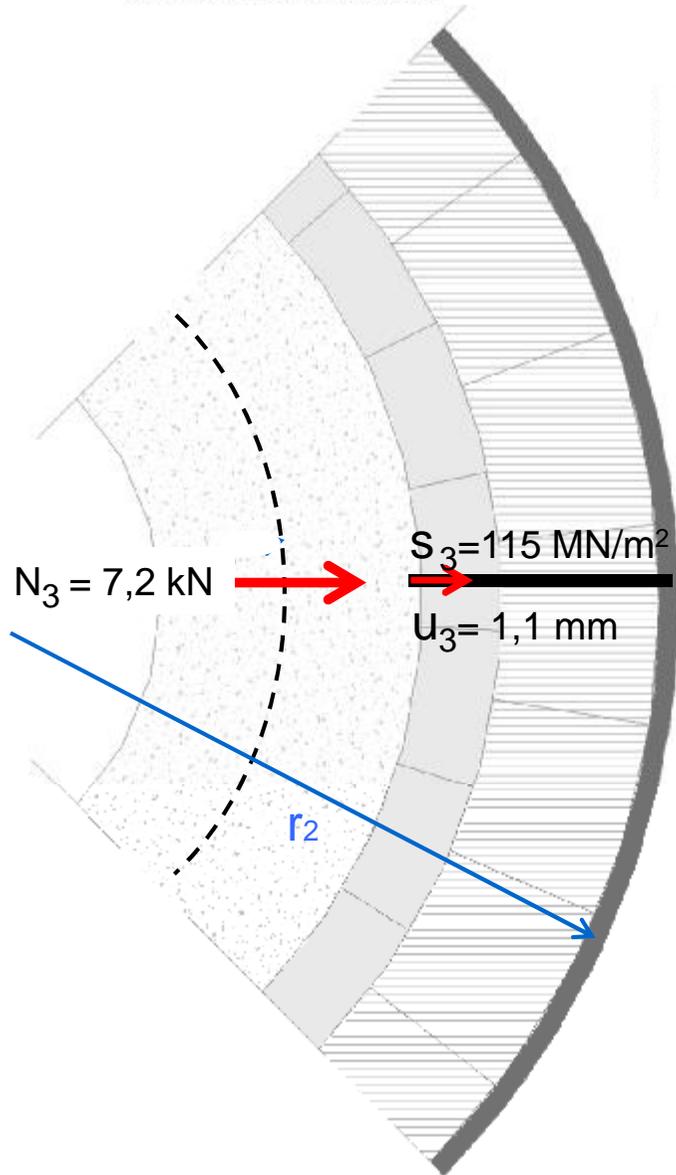
Iterative Ermittlung der Dehnungen

Ansetzung des Start-E-Moduls E_{start}

Suche nach dem maßgeblichen Sekantenmodul E_{sek}
Ermittlung der Ankerstauchung e_3 und -spannung s_3



ANALYSEN
Spannungsanalyse
ANKERVERHALTEN



ANKERVERHALTEN IM BETRIEB, Iterative Ermittlung

Plastische Ankerstauchung

$$e_{3\text{pl}} = s_3 / E_{3\text{sek}} = 115 / 7700 = 15,0 \text{ ‰}$$

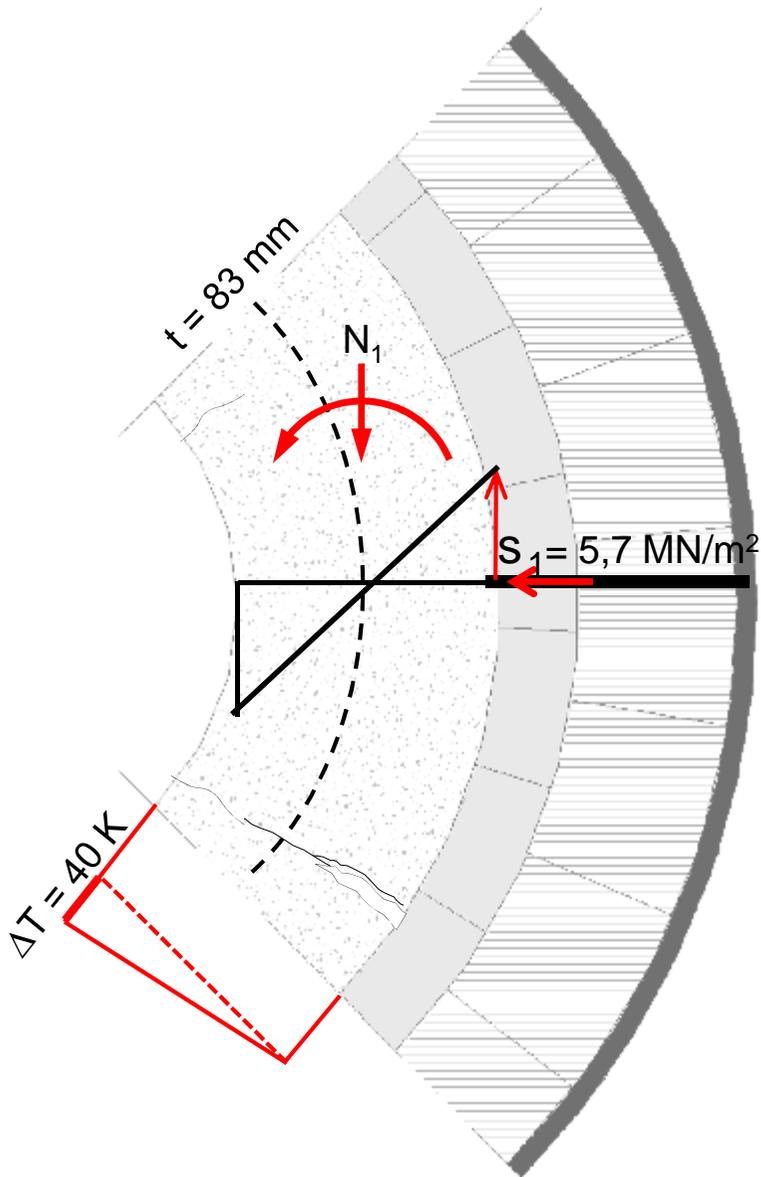
Gesamtstauchung der Anker

$$u_{3\text{pl}} = e_{3\text{pl}} l_3 = 15,0 \text{ ‰} \times 75 \text{ mm} = 1,10 \text{ mm}$$

Ankerkraft aus dem Betondrang

$$N_3 = s_3 A_3 = 115 \times 63 / 1000000 = 7,2 \text{ kN}$$

ANALYSEN
Spannungsanalyse
BETONVERHALTEN



Materialwerte gem. DIN 1045

Maßgebliche Rechenwerte:

Temperaturdifferenz $\Delta T = 40 \text{ K}$

Beton E-Modul $E_1 = 40.000 \text{ MN/m}^2$

Betonzugfestigkeit $f_{ct1} = 3,7 \text{ MN/m}^2$

Betondicke $t_1 = 83 \text{ mm}$

Ankeranzahl $n_3 = 4 \text{ Stk.}$

Ankerdruckkraft $N_3 = 7,2 \text{ kN}$

Druckspannung aus Ankerpressung p:

$$p_1 = N_3 / (2p r_1 / n_3)$$

$$N_1 = p_1 r = N_3 / (2p r_1 / n_3) r_1 = N_3 / (2p / n_3)$$

$$s_{1D} = N_1 / (t_1 l) = N_3 / (2p t_1 l / n_3) = 0,0072 / (2p \cdot 0,083 \cdot 0,30 / 4) = - 0,20 \text{ MN/m}^2$$

Zugspannung aus Temperaturdifferenz ΔT :

$$k_T = a_T \Delta T / t_1$$

$$k_s = 2 e_1 / t_1 = 2 s_{1Z} / E_1 / t_1$$

$$k_T = k_s$$

$$s_{1Z} = a_T \Delta T E_1 / 2 = 6,5 \times 10^{-6} \cdot 40 \cdot 40.000 / 2 = 5,90 \text{ MN/m}^2$$

Gesamtspannung

$$s_1 = s_{1D} + s_{1Z} = - 0,20 + 5,90 = 5,70 \text{ MN/m}^2$$

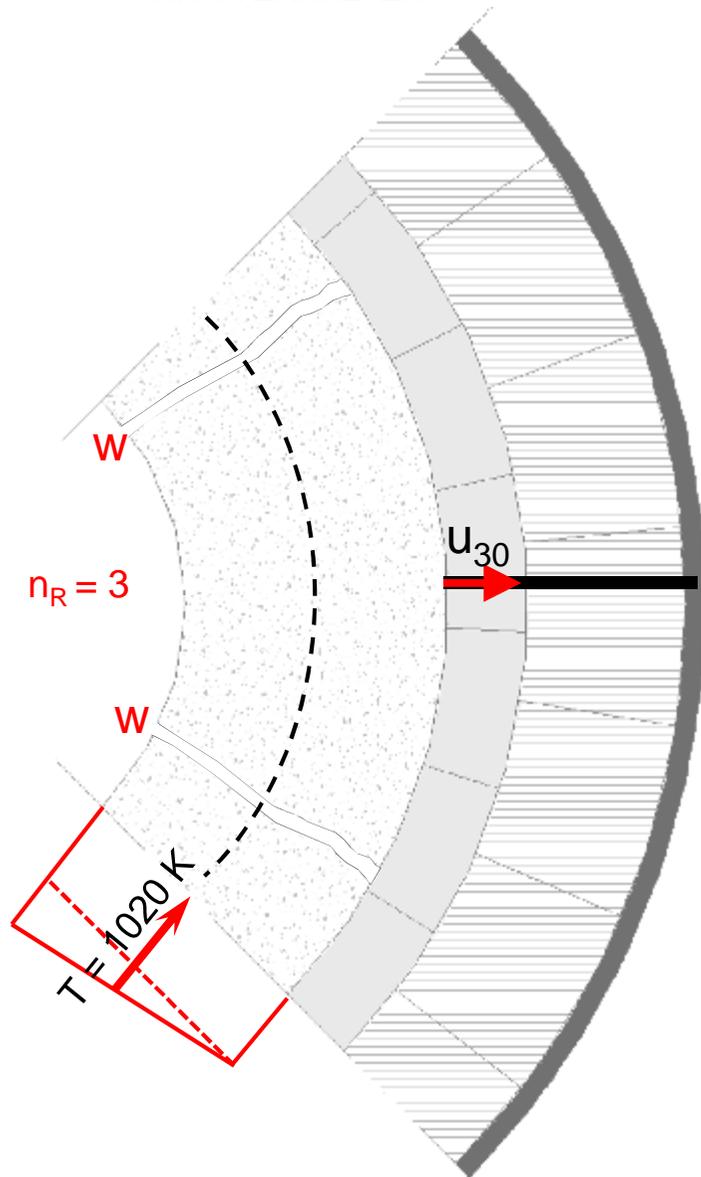
Rissbildung durch Überschreitung der Betonzugfestigkeit f_{ct}

$$s_1 = 5,70 \text{ MN/m}^2 > f_{ct} = 3,7 \text{ MN/m}^2$$

ANALYSEN

Spannungsanalyse

RISSVERHALTEN



Maßgebliche Rechenwerte:

Betontemperatur $T_1 = 1020 \text{ K}$

Manteltemperatur $T_2 = 46 \text{ K}$

Ankertemperatur $T_3 = 600 \text{ K}$

Rissanzahl $n_R = 3 \text{ Stk.}$

Rissbreite nach der Erstabkühlung:

Ankerlage $u_{30} (u_{3pl})$

$$u_{2T} = -e_{2T} r_2 = a_{2T} T_2 r_2 = -1,1 \times 10^{-5} \cdot 46 \cdot 0,251 = -0,13 \text{ mm}$$

$$u_{3T} = e_{3T} l_3 = a_{3T} T_3 l_3 = 1,7 \times 10^{-5} \cdot 600 \cdot 0,074 = 0,75 \text{ mm}$$

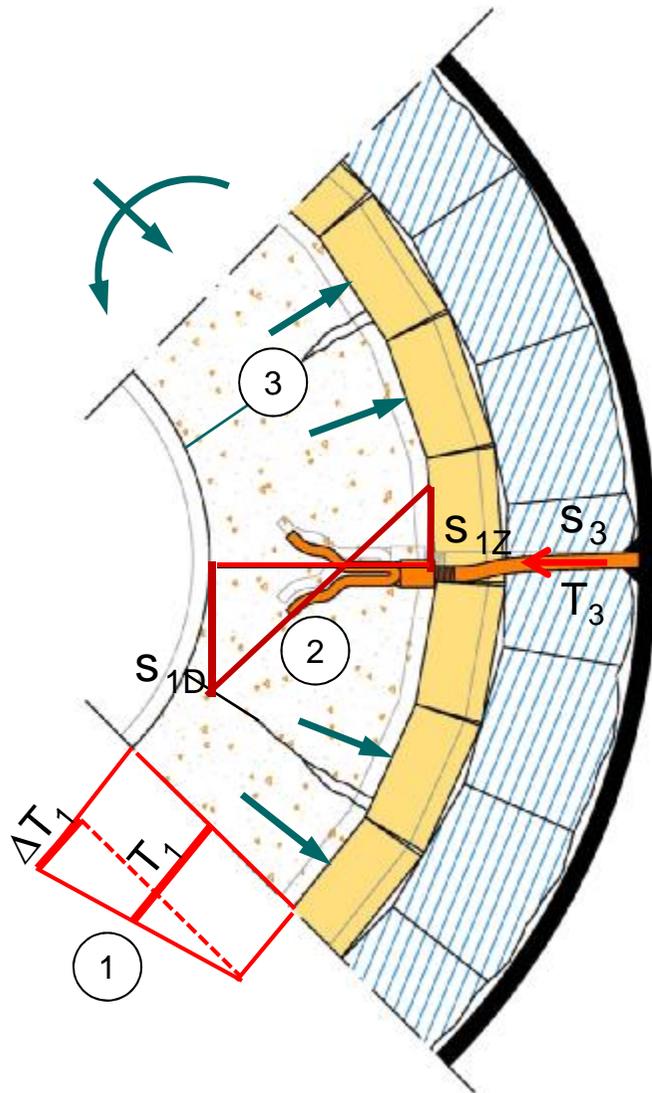
$$u_{30} = u_{3pl} - u_{2T} + u_{3T} = 1,10 - 0,13 + 0,75 = 1,72 \text{ mm}$$

Rissbreite w_{30}

$$e_R r_1 = u_{30} \Rightarrow w_{30} / (2p r_1 / n_R) r_1 = u_{30}$$

$$w_{30} = u_{30} / r_1 \cdot 2p r_1 / n_R = 2p u_{30} / n_R = 2p \cdot 1,72 / 3 = 3,60 \text{ mm}$$

SCHADENSMECHANISMUS
Repräsentativer Bereich
ERSTE ERHITZUNG



1. ERSTE ERHITZUNG

(1) BEANSPRUCHUNG DURCH TEMPERATUR

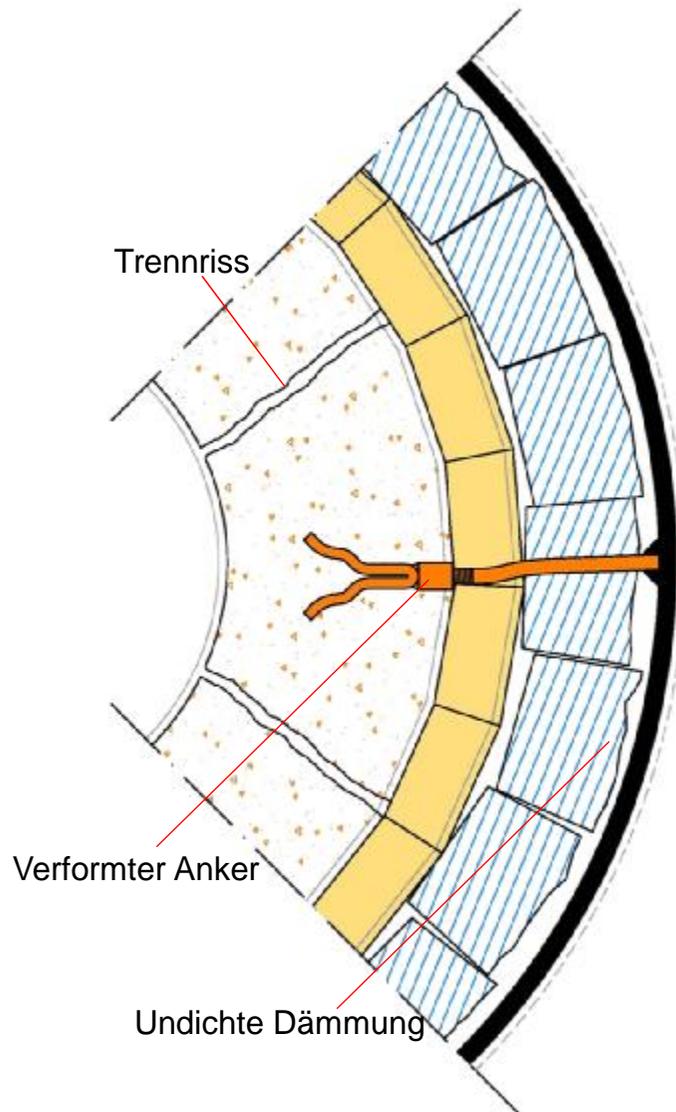
Gleichmäßige Ausdehnung des Betons durch Erwärmung T_1
 Ungleichmäßige Ausdehnung des Betons durch Erwärmung ΔT_1
 Ausdehnung der Anker infolge Erwärmung T_3

(2) AKTIVIERUNG DER ZWANSPANNUNGEN

Tangentialer Betondruck s_{1D} durch Behinderung der Ausdehnung
 Tangentialer Betonzug s_{1Z} durch Verhinderung der Verkrümmung
 Radialer Ankerdruck s_3 durch Behinderung der Ausdehnung

(3) AUSWIRKUNG DER ZWANSPANNUNGEN

Rissbildung im Beton durch Überschreitung der Zugfestigkeit
 Plastifizierung der Anker durch Überschreitung der thermisch reduzierten Streckgrenze
 Quetschung der Dämmung durch ausgeprägten Radialdruck

SCHADENSMECHANISMUS**Repräsentativer Bereich****ERSTE ABKÜHLUNG****2. ERSTE ABKÜHLUNG****(1) VORGÄNGE WÄHREND ABKÜHLUNG**

Durchreißen der Risse bis zur Innenseite der Betonschicht

Festhaltung der Betonschicht durch die plastisch gestauchten Anker

Lockerung der zuvor komprimierten Wärmedämmung

(2) VERÄNDERUNGEN INFOLGE ABKÜHLUNG

Teilung der Betonschicht in einzelne an den Ankern angebundene Teile

Keine Rückstellung der Betonteile durch die plastisch gestauchten Anker

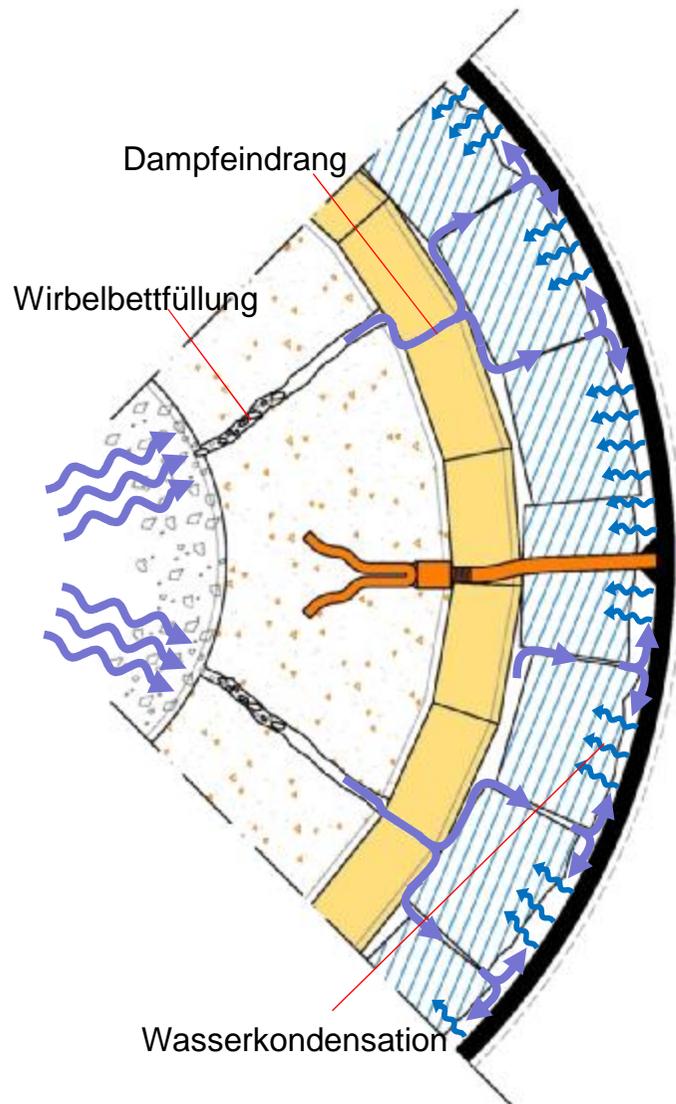
Microverlagerung der Wärmedämmung

(3) SZENARIO NACH ABKÜHLUNG

Große durchgehende Trennrisse zwischen den freien Betonteilen

Verbogene und verdrehte Anker

Undichte Wärmedämmung

SCHADENSMECHANISMUS**Repräsentativer Bereich****ERNEUTE ERHITZUNG****3. ERNEUTE ERHITZUNG****(1) VORGÄNGE WÄHREND ERHITZUNG**

Verfüllung der offenen Risse mit Wirbelbett

Eindrang des Wasserdampfes in die offene Risse

Weiterleitung des Dampfes bis zum Stahl durch undichte Dämmung

(2) VERÄNDERUNGEN INFOLGE ERHITZUNG

Wiederholter Drang der ausgesteiften Betonteile gegen die Anker

Kondensierung des Dampfes am kaltem Stahlmantel

Angriff des Wassers auf die microporöse Dämmung

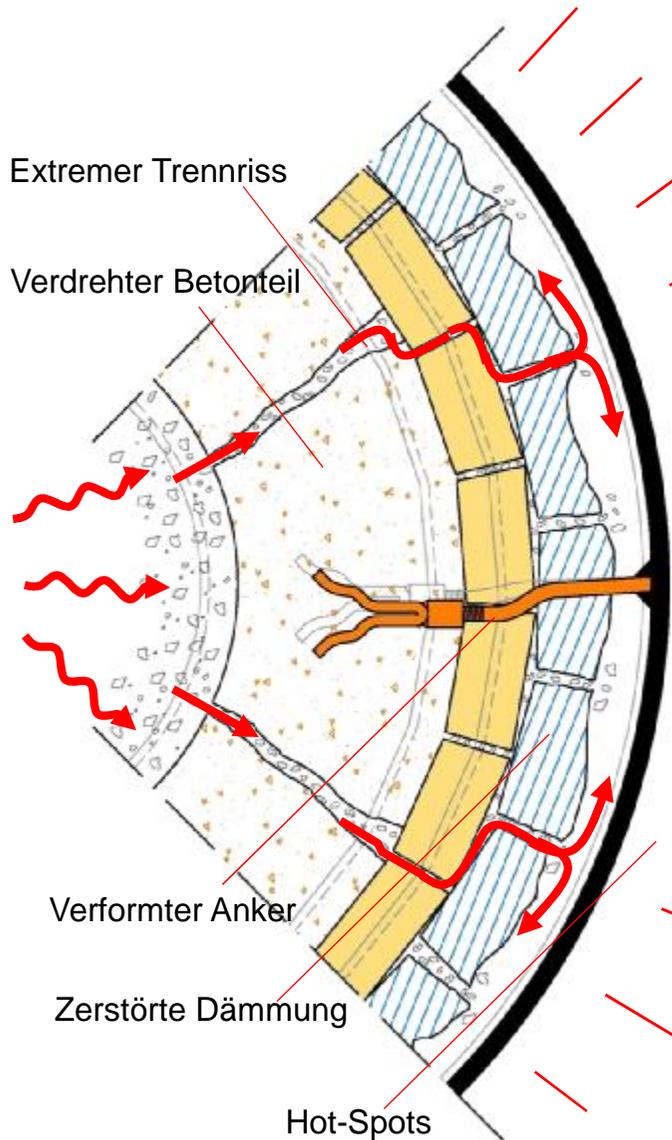
(3) SZENARIO NACH ERHITZUNG

Zunahme der plastischen Ankerstauchung

Transport des Kondenswassers in die Regelbereiche der Anlagensegmente

Massive Lockerung der Dämmung durch Schrumpfung der microporösen Schicht

SCHADENSMECHANISMUS
Repräsentativer Bereich
WEITERE BETRIEBSZYKLEN



4. WEITERE BETRIEBSZYKLEN

(1) VORGÄNGE

- Aufweitung der Risse durch zunehmende plastische Ankerstauchung
- Massiver Eindrang der Rauchgase in die permanent offenen Risse
- Weiterleitung des Dampfes bis zum Stahl durch die lockere Dämmung

(2) VERÄNDERUNGEN

- Eindrang des Wirbelbetts in die Wärmedämmung
- Massive Kondensierung des Dampfes am Stahlmantel
- Weitgehende Zerstörung der microporösen Platten durch vagabundierende Rauchgase

(3) ZERSTÖRUNG

- Stark verbogene und schräg stehende Anker
- Verdrehte und verkantete Betonteile angebunden an Anker
- Hot-Spots am Stahlmantel aufgrund des Verlusts der Wärmedämmung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

