



dynardo

dynamic software & engineering

Thermisch-mechanische Analyse der ersten RCC-Staumauer Deutschlands

Dr.-Ing. Roger Schlegel

Dynardo GmbH

Luthergasse 1d

99423 Weimar

www.dynardo.de

roger.schlegel@dynardo.de

Founded: 2001

**More than 40 employees,
offices at Weimar and Vienna**

**Leading technology companies
Daimler, Bosch, Eon, Nokia,
Siemens, BMW, are supported by us**



Software Development



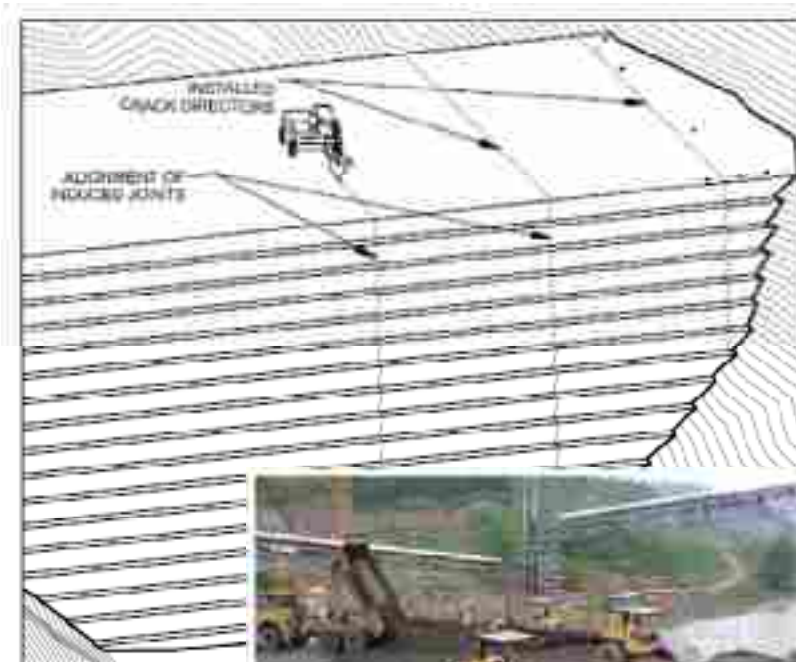
**Dynardo is your engineering specialist
for CAE-based sensitivity analysis,
optimization, robustness evaluation
and robust design optimization.**

CAE-Consulting

Our expertise:

- Mechanical engineering
- Civil engineering & Geomechanics
- Automotive industry
- Consumer goods industry
- Power generation

RCC – Roller-Compacted Concrete (Walzbeton)

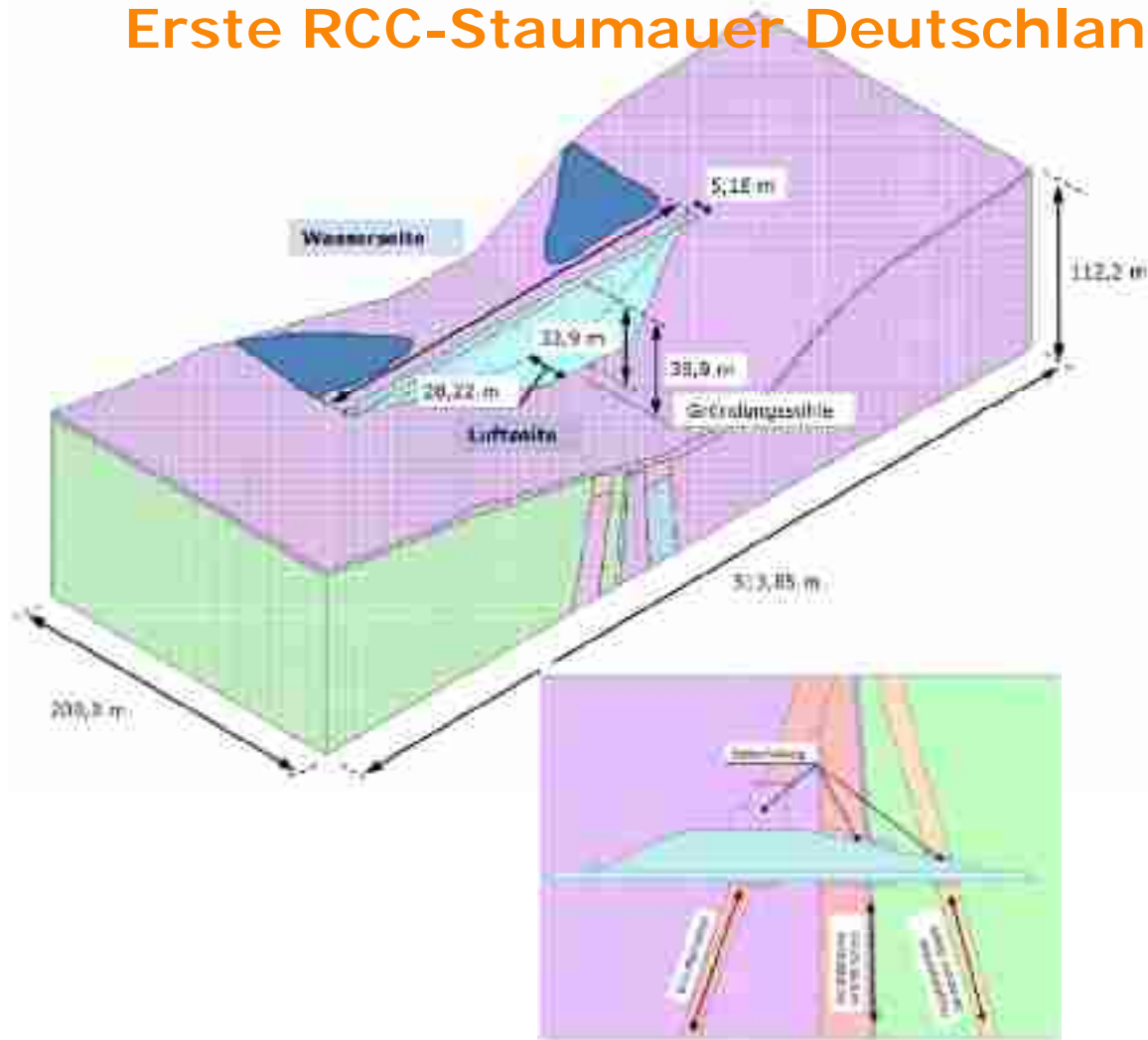


Wolwedans Dam, 1995 erster RCC Dam der Welt
(H=70m; L=270m)

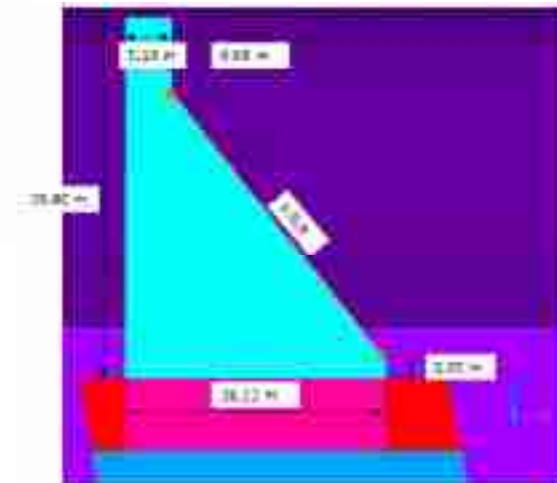


Cine Dam, (2010 Türkei, H=136m; L=300m)

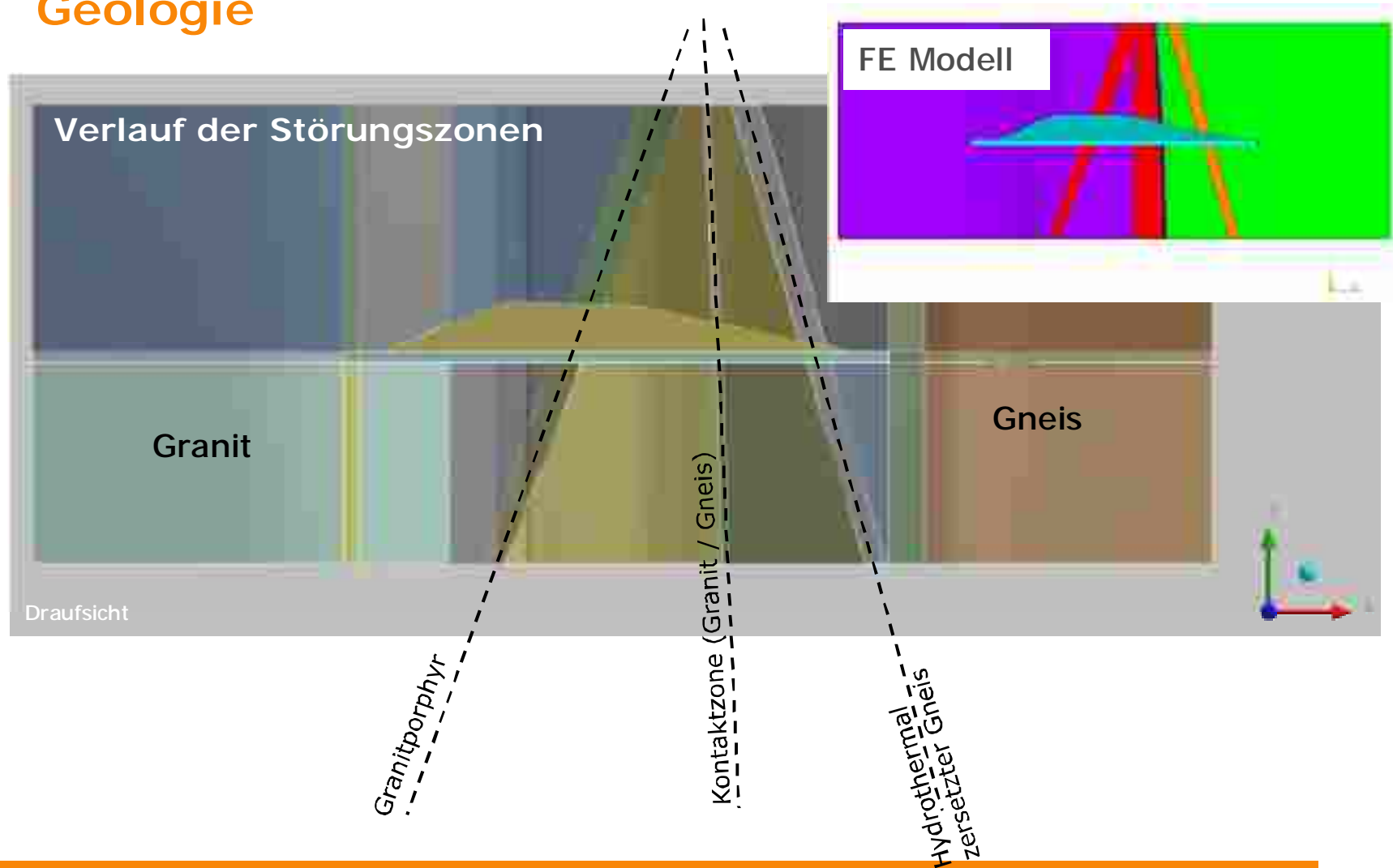
Erste RCC-Staumauer Deutschlands



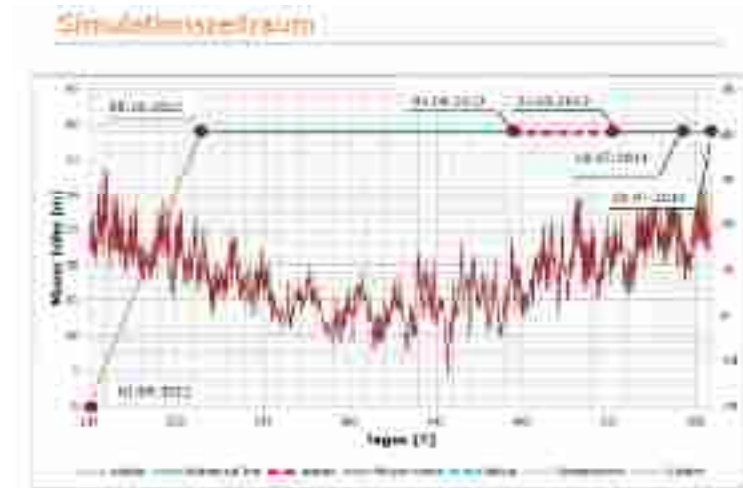
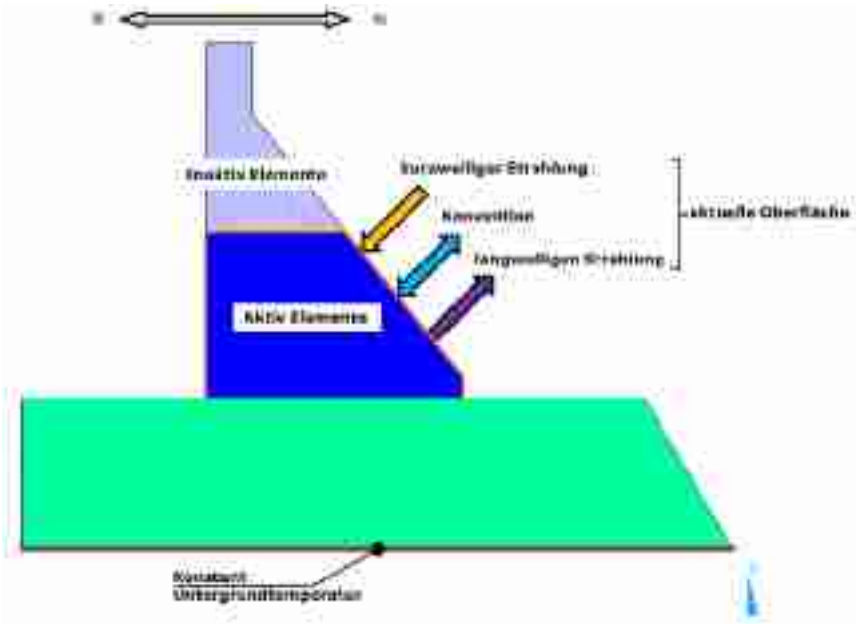
Geplante Bauzeit der Mauer 3 Monate



Geologie



Thermisch-mechanische Hydratationsanalyse

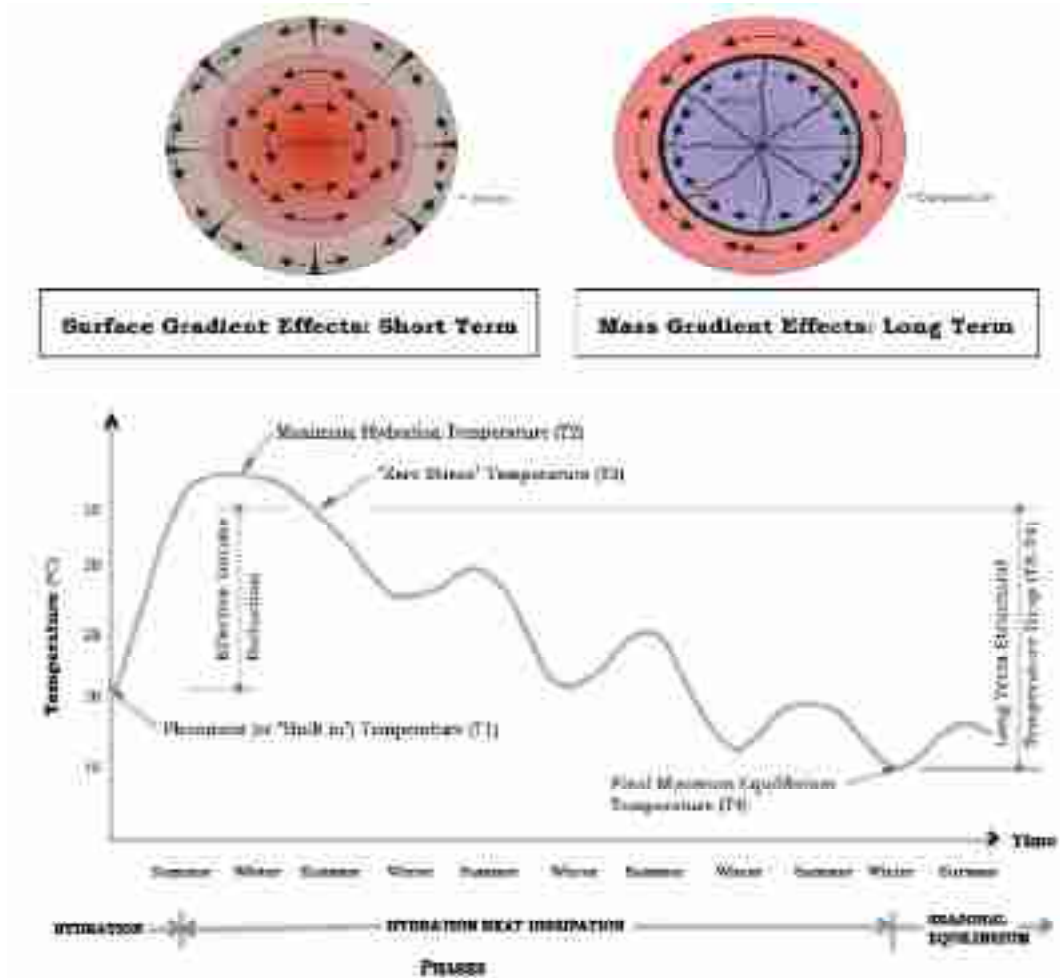


Wichtige Komponenten der Simulation

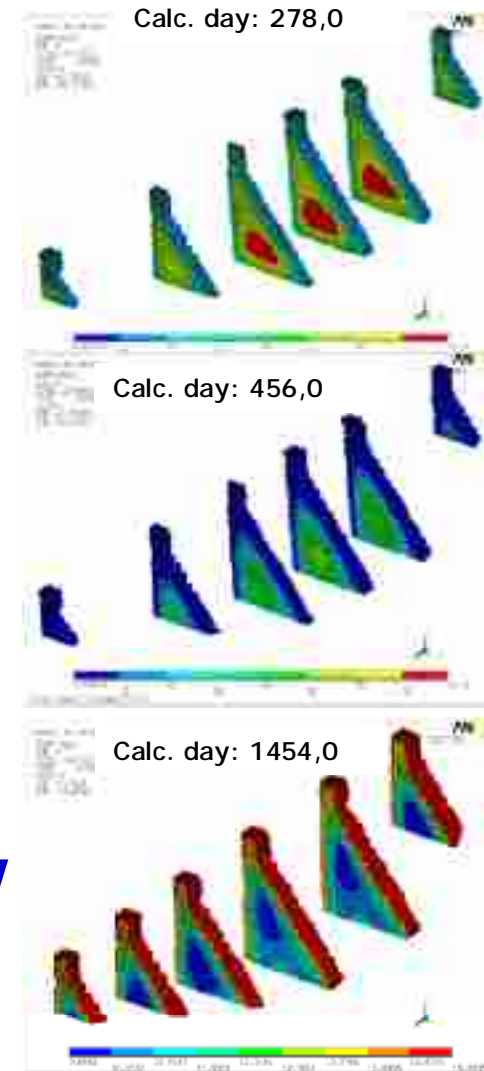
- Simulation Baufortschritt RCC
- Wechselwirkung mit Umwelteinflüssen
- Entstehung der Hydrationswärme
- Räumliche Temperaturverteilung
- Erhärtung des RCC
- Entstehung von Zwangsbeanspruchung
- Ergebnisbewertung (Rissicherheit)



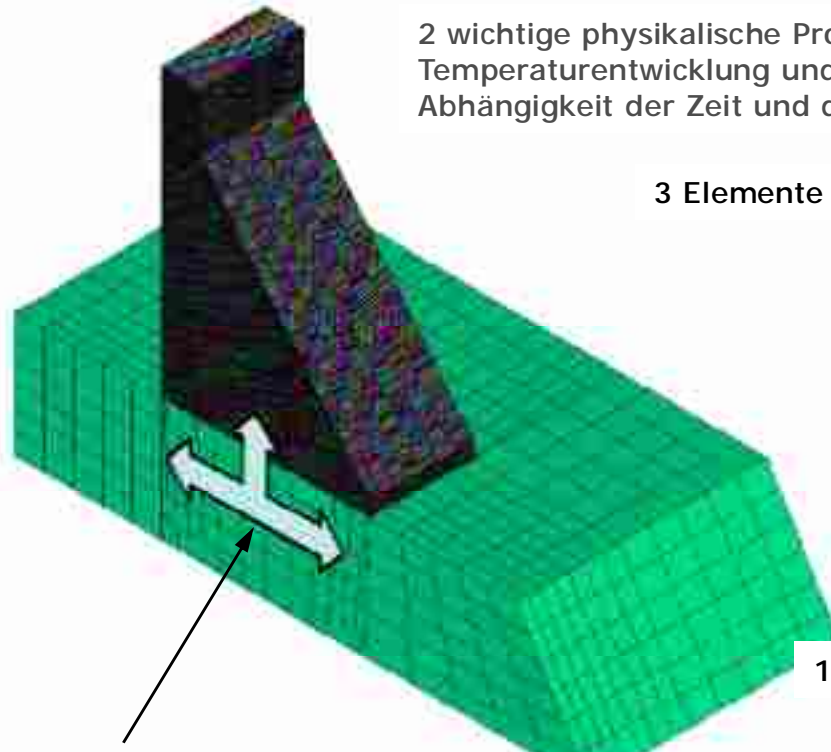
Kurz- und Langzeiteffekte:



“Temperature drop”



FE-Model



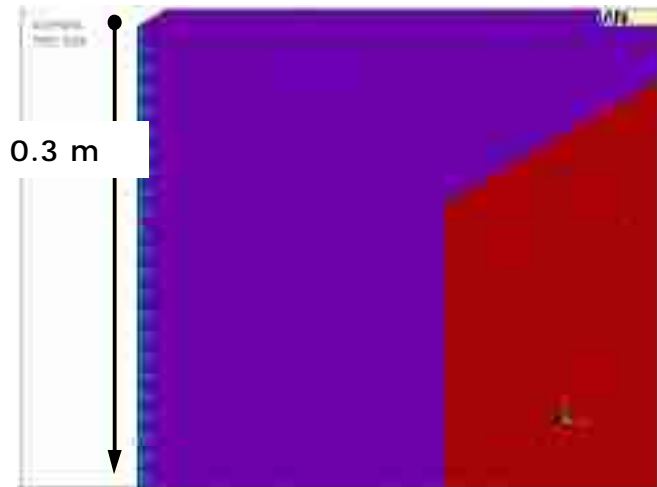
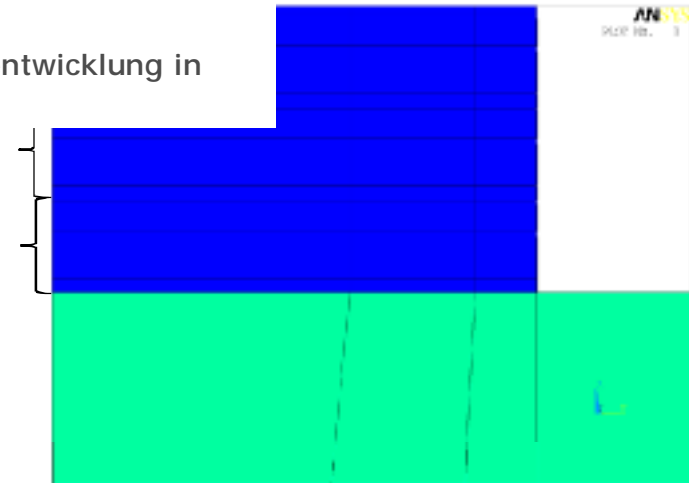
2 wichtige physikalische Prozesse:
Temperaturentwicklung und Festigkeitsentwicklung in
Abhängigkeit der Zeit und des Ortes

3 Elemente pro Schicht

130 Schichten a 0.3 m

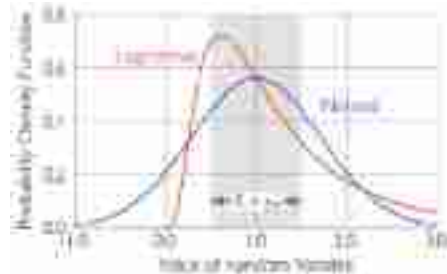
Symmetrierandbedingungen: Thermische Analyse – Adiabatisch
Mechanische Analyse – $u_x=0$

Die Struktur besteht insgesamt aus 57924 Elementen und 48835 Knoten.

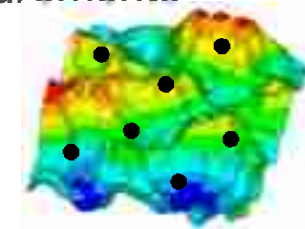


Sensitivity analysis

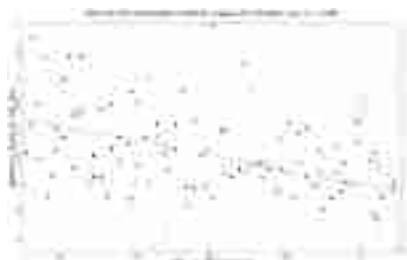
1) Define the input parameter space using scatter range, distribution and correlation



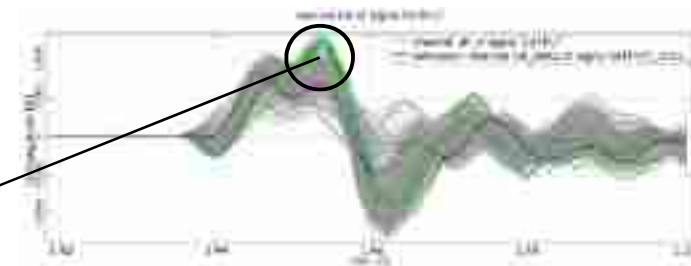
2) Scan the design space with Latin Hypercube sampling and measures the sensitivity with statistic measurements



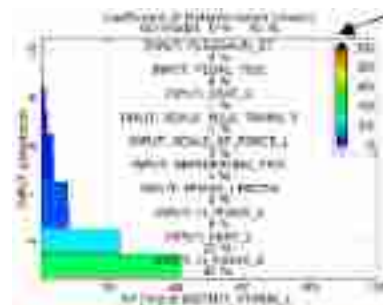
5) Visualize dependencies between input and response



3) Check the variation

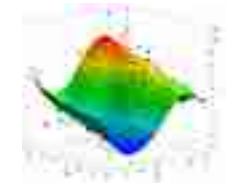


4) Identify sensible parameters

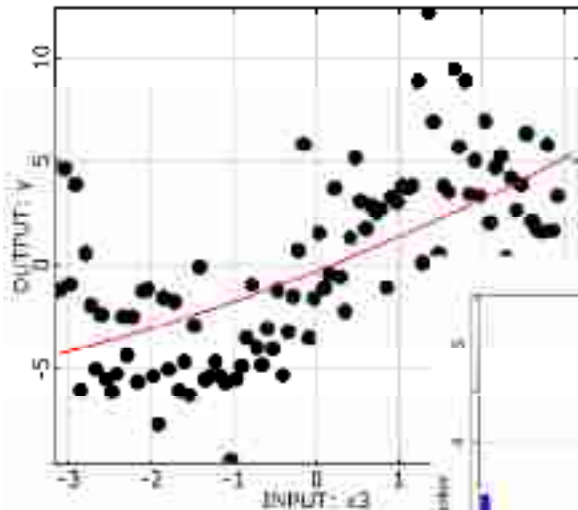




Correlation Analysis CoD/CoI

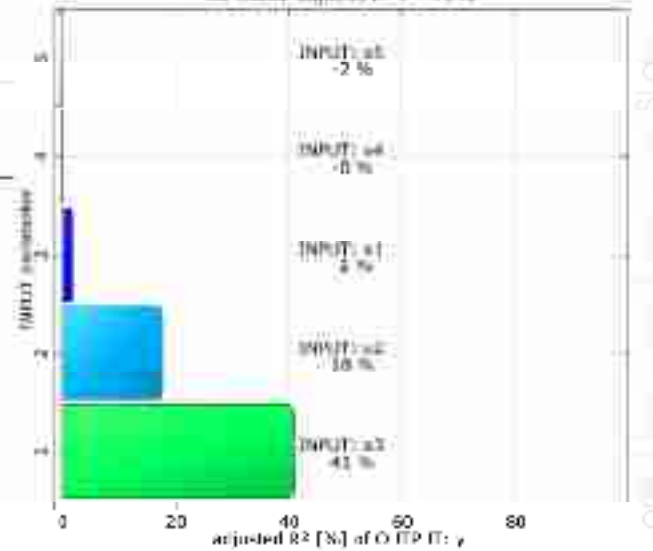


INPUT: x3 vs. OUTPUT: y, (quadratic) $r = 0.650$

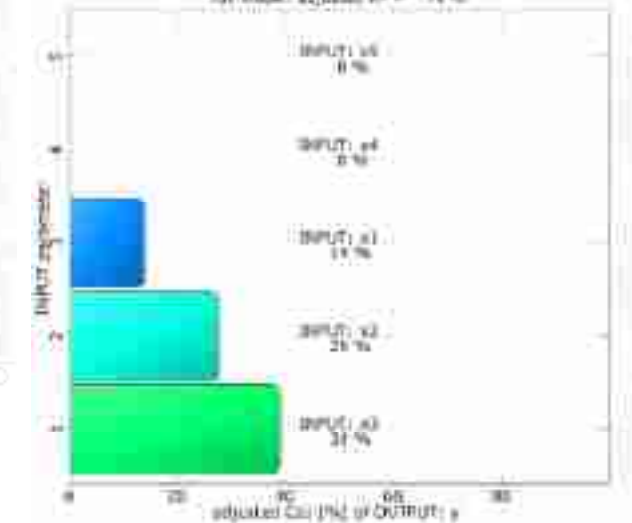


- CoD shows pairwise correlation only
- CoI contains couple terms too

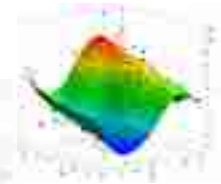
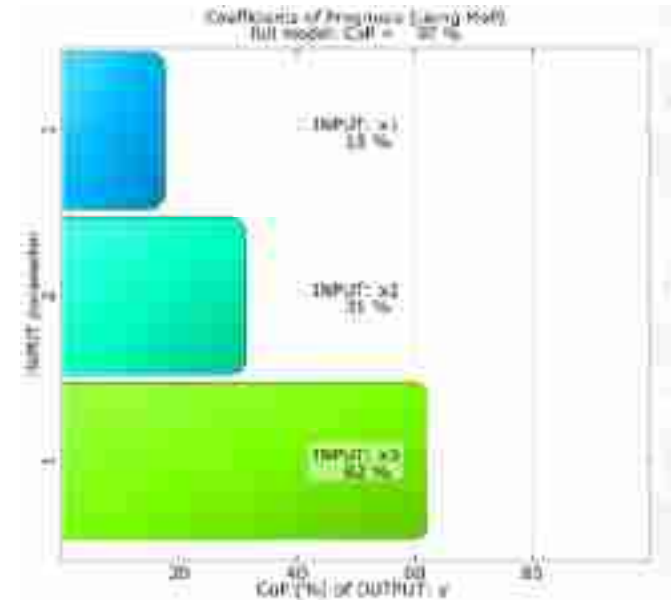
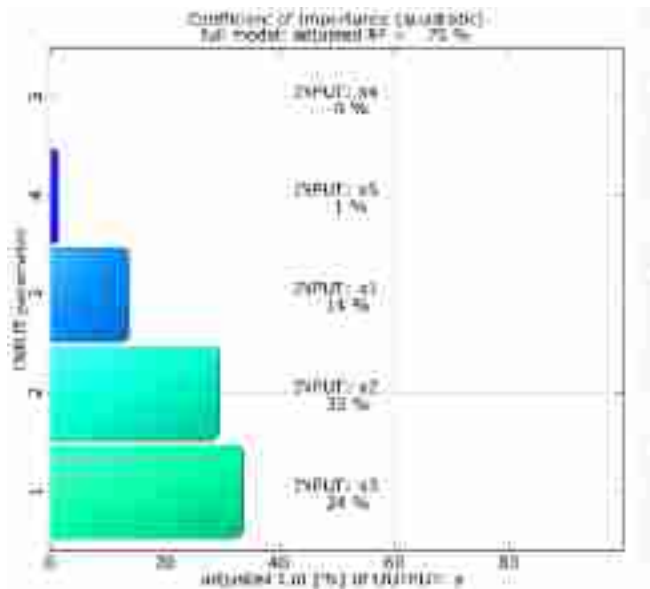
Coefficient of Determination (Adjusted)
Full model: adjusted R² = 79 %



Coefficient of Determination (Adjusted)
Full model: adjusted R² = 79 %



Correlation Analysis CoP/MOP



CoD (quad. Polynomial, 5 inputs) CoP (MOP: MLS with 3 inputs)

- Prediction quality is almost perfect with MOP on 100 LHS samples
- Optimal subspace contains only X_1 , X_2 and X_3
- Highly nonlinear function of X_3 and coupling term X_1X_2 are represented by approximation and sensitivity measures



Inputparameter

unabhängige Parameter:

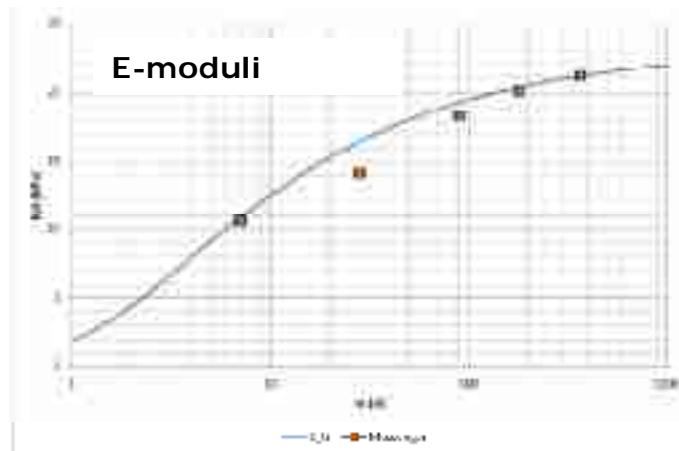
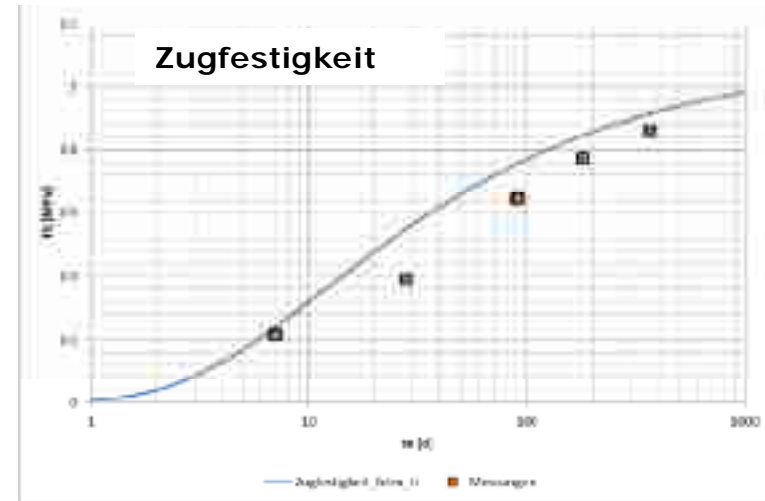
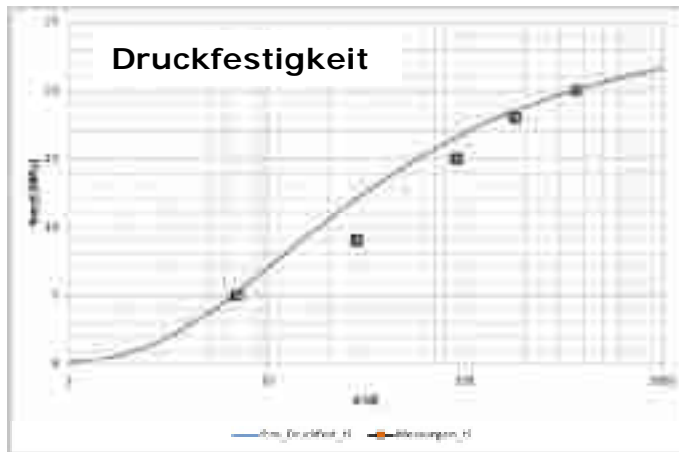
Inputparameter	Name	Typ	MIN	MAX
Startzeit	par_OS_BauAnfang	diskret	1.4. / 1.5. / 1.6. / 1.7. / 1.8.	
Ausgangstemperatur Frischbeton	par_OS_IniBetonTemp	kontinuierlich	10°C	20°C
Wärmemenge Beton	par_OS_BetonWarmeMenge	kontinuierlich	17000 J/kg	28000 J/kg
Wärmeleitfähigkeit Beton - Start	par_OS_IniBetonLeitfähig	kontinuierlich	1.4 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	2.4 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Spez. Wärmekapazität Beton - Start	par_OS_IniBetonKapazität	kontinuierlich	750 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1250 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Dichte Beton	par_OS_BetonDichte	kontinuierlich	2100 kg·m ⁻³	2500 kg·m ⁻³
Thermische Ausdehnungskoeff. Beton - Start	par_OS_IniBetonAusdehnung	kontinuierlich	0.000014 K ⁻¹	0.000020 K ⁻¹
Betongüte (1-ax. Druckfestigkeit)	par_OS_Druckfest365	kontinuierlich	15 MPa	25 MPa
Fugenabstände (bzw. Blocklänge)	par_OS_BlockLange	kontinuierlich	15 m	30 m
Wärmeübergangskoeffizient	par_OS_AlfaKonv	kontinuierlich	20 W·m ⁻² ·K ⁻¹	45 W·m ⁻² ·K ⁻¹

abhängige Parameter:

Inputparameter	Name	Typ	MIN	MAX
Wärmeleitfähigkeit Beton - End	par_OS_AP_EndBetonLeitfähig	abhängig	par_OS_IniBetonLeitfähig*(2.1/1.9)	
Spez. Wärmekapazität Beton - End	par_OS_AP_EndBetonKapazität	abhängig	par_OS_IniBetonKapazität*(850/1000)	
Thermische Ausdehnungskoeff. Beton - End	par_OS_AP_EndBetonAusdehnung	abhängig	par_OS_IniBetonAusdehnung*(1/1.5)	

Konstant: Bauzeit 90 Tage (1 Schicht /15 h)

Materialkennwerte



RCC-Planung:

Druckfestigkeit nach 365 Tagen: 20 MPa

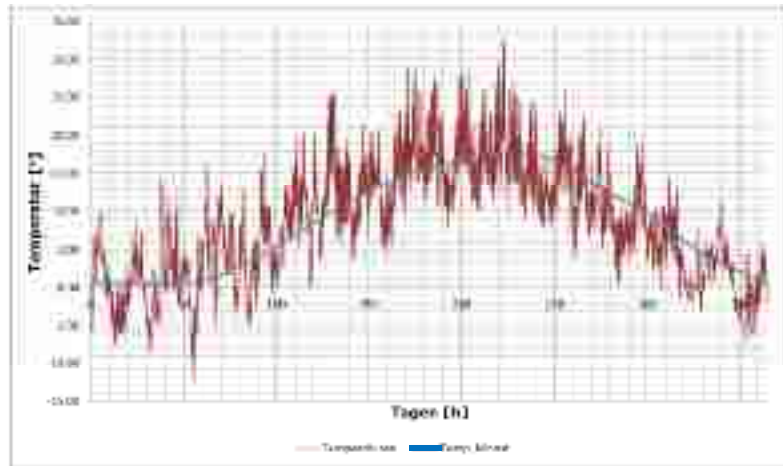
Zugfestigkeit 4,6% Druckfestigkeit

E-modul nach 365 Tagen: 21,2 GPa

Simulationszeitraum

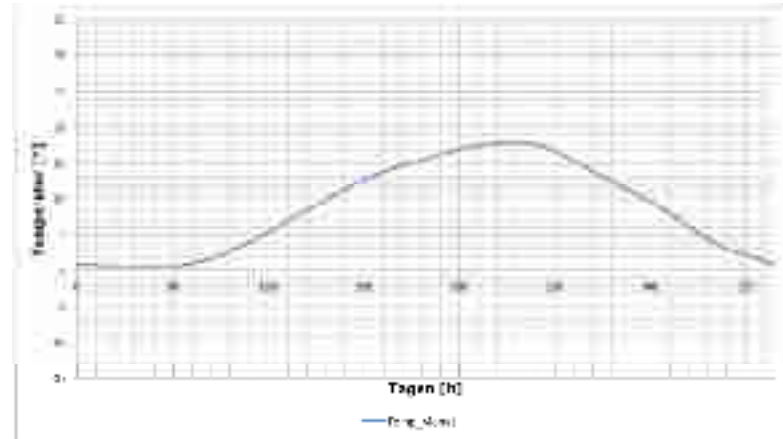
Simulation des Jahresgangs der Umgebungstemperatur

Test Reference Year



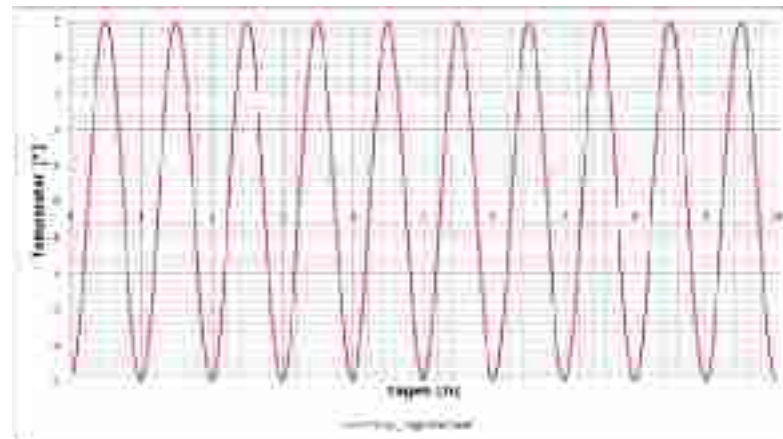
=

Monatsmittel



+

Tages- /Nachtverlauf



Ergebnisgrößen (Responseparameter)

Aus den Berechnungen wurden folgende Response Signale ausgewertet:

1. Temperaturverlauf über die Zeit – Messpunkte 2,5,8,10,12,13
2. Assessment α_1 Verlauf über den Zeit – Messpunkte 1-16

Aus diesen Signalen wurden folgende Responseparameter definiert:

$F_Temp_MP\%i\%_MAX$ – Maximal Temperatur am Messpunkt $\%i\%$

$F_Assess_S1_MP\%i\%_MAX$ – Maximal α_1 assessment am Messpunkt $\%i\%$

$F_Assess_S1_MP\%i\%_5Tage$ – Assessment am Messpunkt $\%i\%$ nach 5 Tage

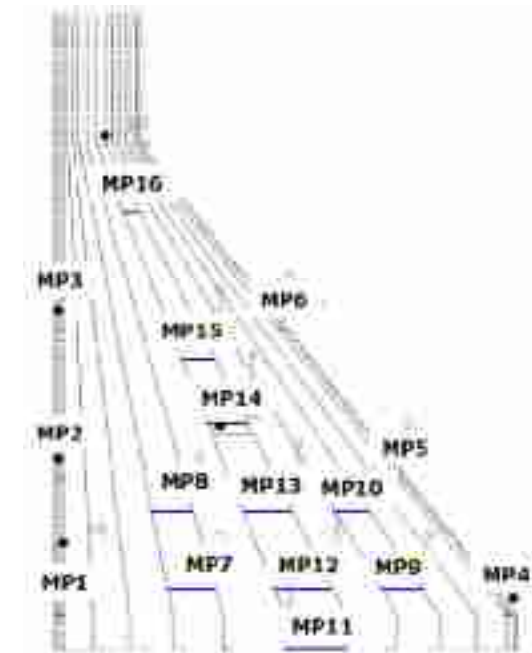
$F_Assess_S1_MP\%i\%_90Tage$ – Assessment am Messpunkt $\%i\%$ nach 90 Tage (Ende der Bauphase)

($F_Temp_MP\%i\%_5st$ – Temperatur nach 5 Stunden Beton Legung am Messpunkt $\%i\%$)

($F_Temp_MP\%i\%_15st$ – Temperatur nach 15 Stunden Beton Legung am Messpunkt $\%i\%$)

($F_Temp_MP\%i\%_90Tage$ – Temperatur nach 90 Tagen Beton Legung am Messpunkt $\%i\%$)

($F_Temp_MP\%i\%_DROP$ – Temperaturdifferenz zwischen maximaler Temperatur über ganzen Zeit und minimaler Temperatur nach 5 Jahren am Messpunkt $\%i\%$)



Ergebnisinterpretation

EP 1110-2-12
30 Sep 95

amerikan. Code EP 1110-2-12

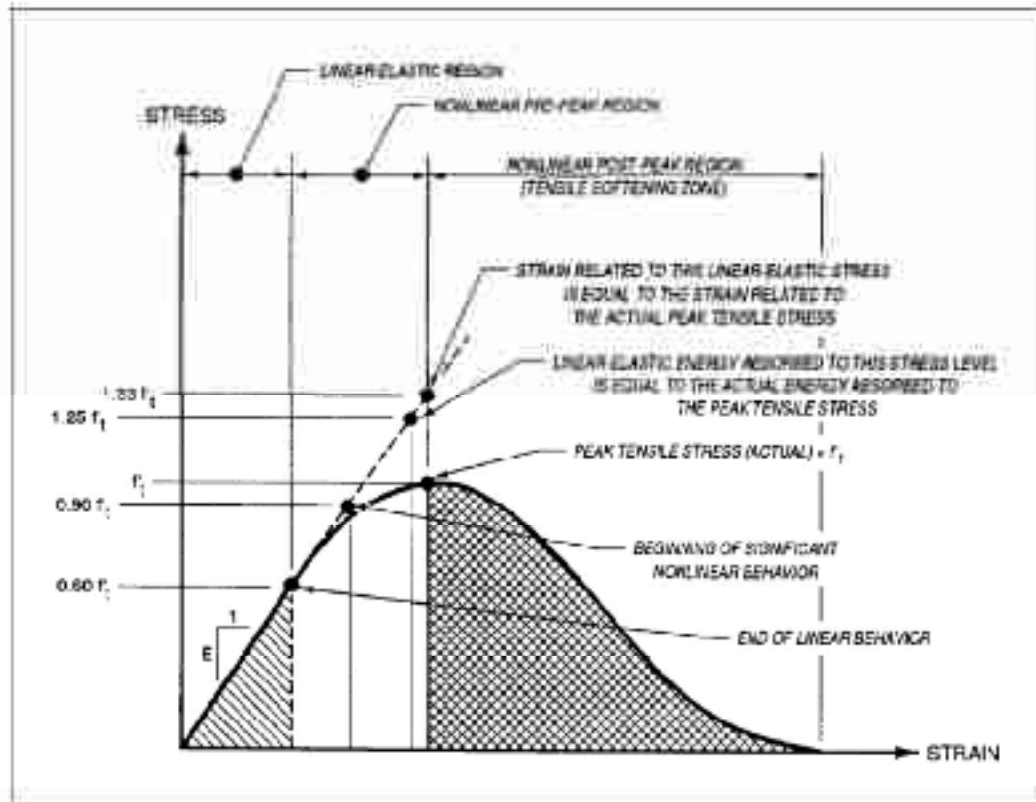


Figure 3-2. Tensile stress/strain diagram for R/C

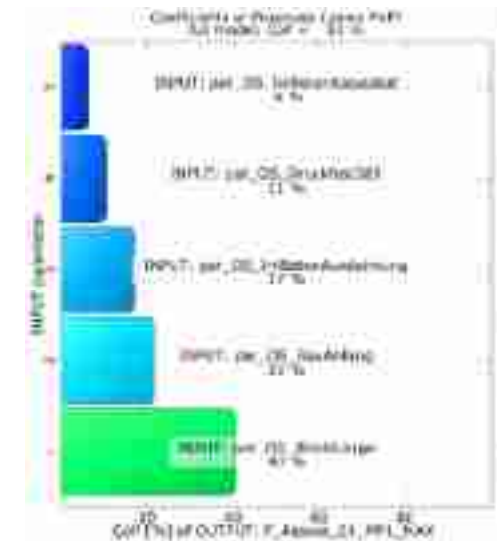
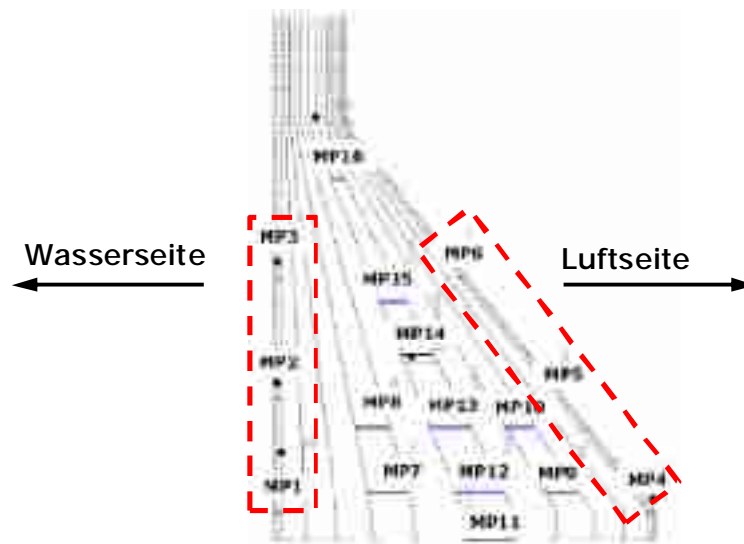
In den vorliegenden FE-Berechnungen wurde das zeit- und temperaturabhängige, elastische Materialverhalten des Betons berücksichtigt. Rissbildungen bzw. irreversible (plastische) Dehnungen wurden nicht berücksichtigt.

Um die real bei Erreichen der Zugfestigkeit auftretende Energie bzw. Dehnung auszunutzen, kann entsprechend EP 1110-2-12 die Zugfestigkeit des elastisch berechneten Betons entsprechend auf den 1,33-fachen bzw. 1,5-fachen Wert erhöht werden.

Für das Kriterium der notwendigen Energie bzw. Dehnung für wasserführende Rissbreiten, ist auch eine weitere Erhöhung denkbar.

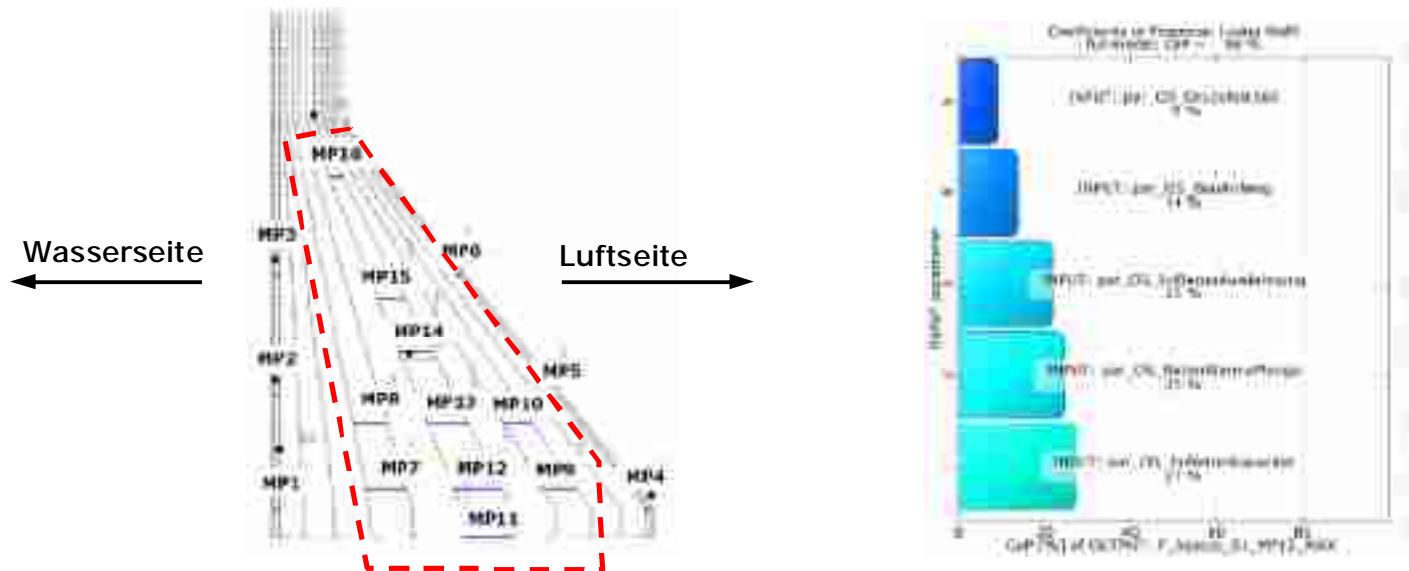
Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Inputparameter	Name	COP % für äußere Punkte - Assessment $\sigma 1$				
		Luftseite · N			Wasserseite · J	
		MP1	MP2	MP3	MP5	MP6
Startzeit	par_OS_BauAnfang	22	28	56	15	27
Ausgangstemperatur Frischbeton	par_OS_IniBetonTemp				8	
Wärmemenge Beton	par_OS_BetonWarmeMenge				8	
Wärmeleitfähigkeit Beton - Start	par_OS_IniBetonLeitfahig		3	5	5	8
Spez. Wärmekapazität Beton Start	par_OS_IniBetonKapazität	6	4		7	4
Dichte Beton	par_OS_BetonDichte					
Thermische Ausdehnungskoeff. Beton · Start	par_OS_IniBetonAusdehnung	17	14	14	20	18
Betongüte (1 ax. Druckfestigkeit)	par_OS_Druckfest365	11	9	9	9	13
Fugenabstände (bzw. Blocklänge)	par_OS_BlockLange	40	33	3	24	9
Wärmeübergangskoeffizient	par_OS_AlfaKonv			1		



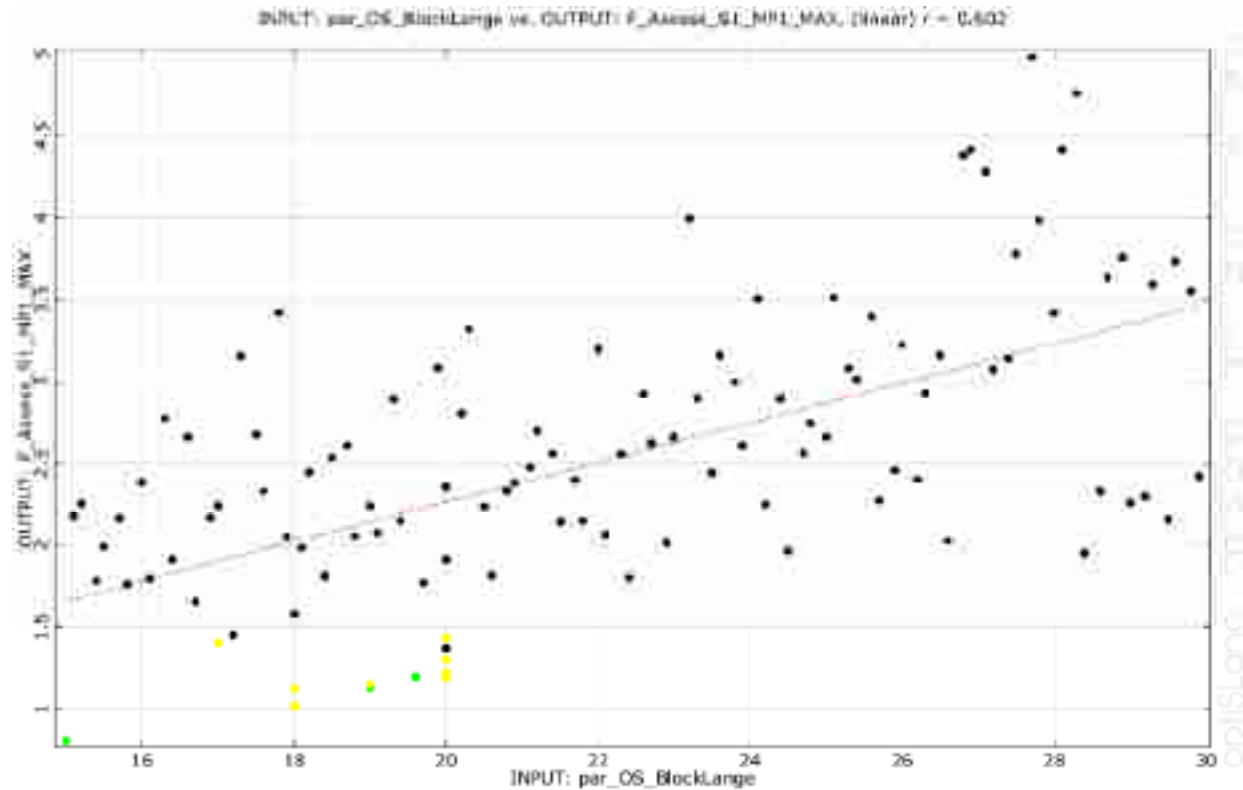
Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Inputparameter	Name	COP % für innere Punkte - Assessment σ_1								
		MP7	MP8	MP9	MP10	MP12	MP13	MP14	MP15	MP16
Startzeit	par_OS_BauAnfang	19	7	11		14	6	5	3	
Ausgangstemperatur Frischbeton	par_OS_IniBetonTemp				2					2
Wärmemenge Beton	par_OS_BetonWarmeMenge	21	29	25	27	25	26	25	25	27
Wärmeleitfähigkeit Beton Start	par_OS_IniBetonLeitfahig									
Spez. Wärmekapazität Beton - Start	par_OS_IniBetonKapazität	24	32	27	29	27	35	34	32	19
Dichte Beton	par_OS_BetonDichte									
Thermische Ausdehnungskoeff. Beton - Start	par_OS_IniBetonAusdehnung	25	27	27	36	22	28	29	30	29
Betongüte (1 ax. Druckfestigkeit)	par_OS_Druckfest365	8	4	10	9	9	7	7	9	10
Fugenabstände (bzw. Blocklänge)	par_OS_BlockLange	1	1							
Wärmeübergangskoeffizient	par_OS_AlfaKonv									



Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

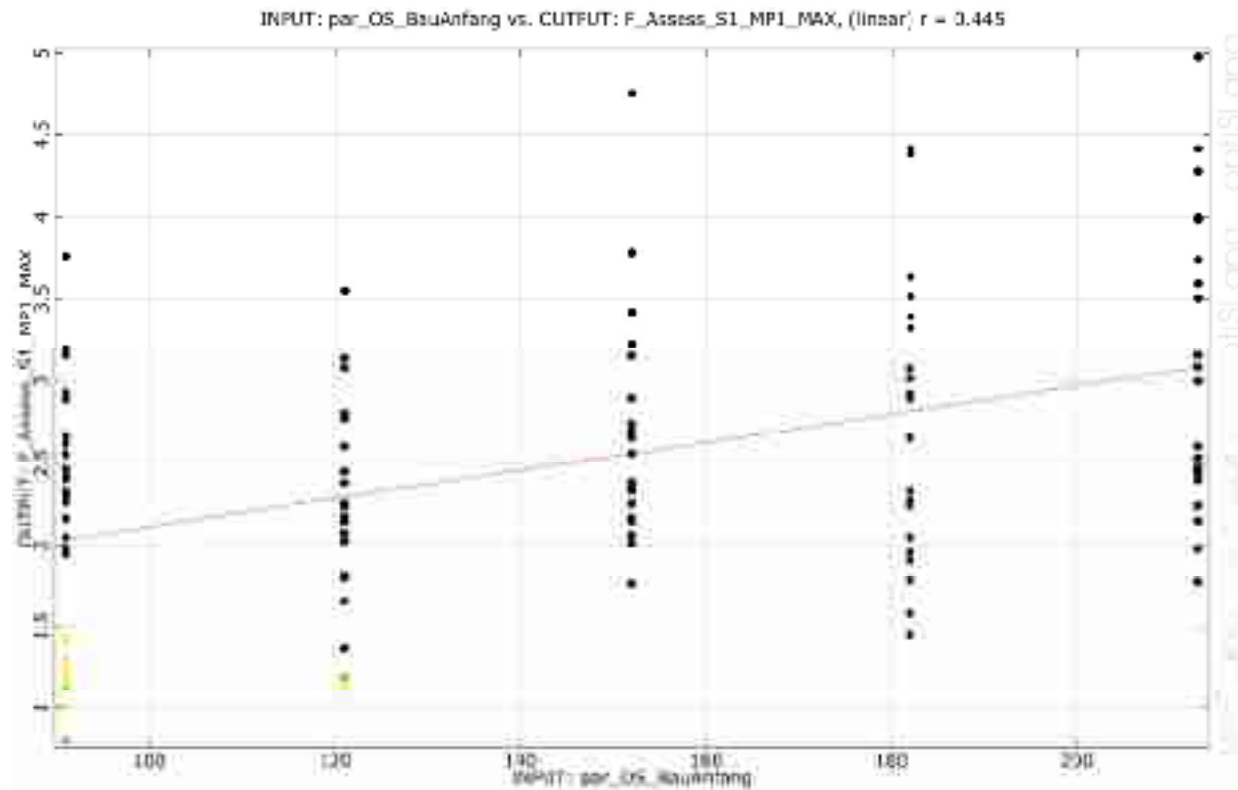
Trends für Assessment: außen Punkte MP1, Fugenabstand (Blocklänge)



- je geringer der Fugenabstand, desto geringer die Rissgefahr
- günstiges Intervall 15-20 m

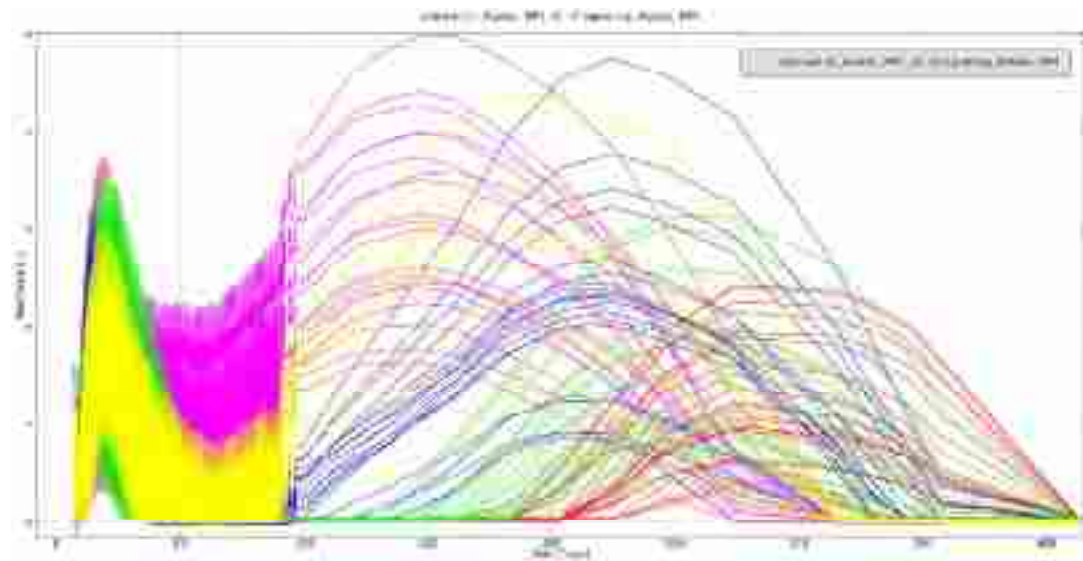
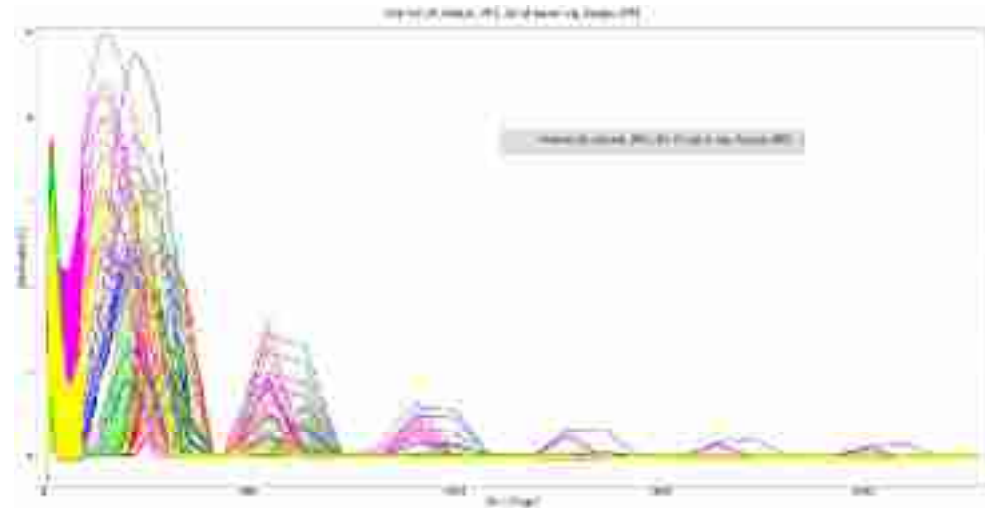
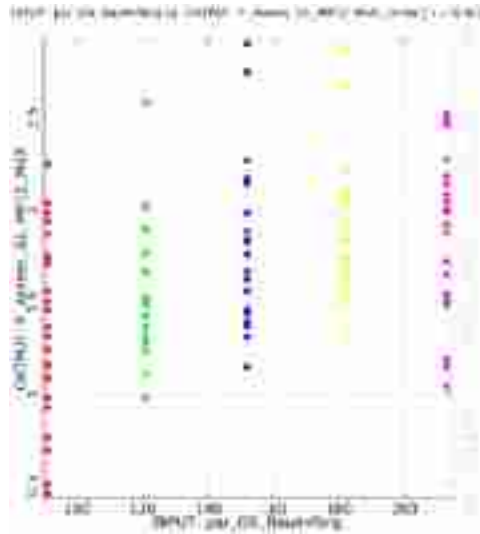
Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Trends für Assessment: außen Punkte MP1, Bauanfang



→ Bauanfang am besten 1.4 (nicht nach dem 1.5.!))

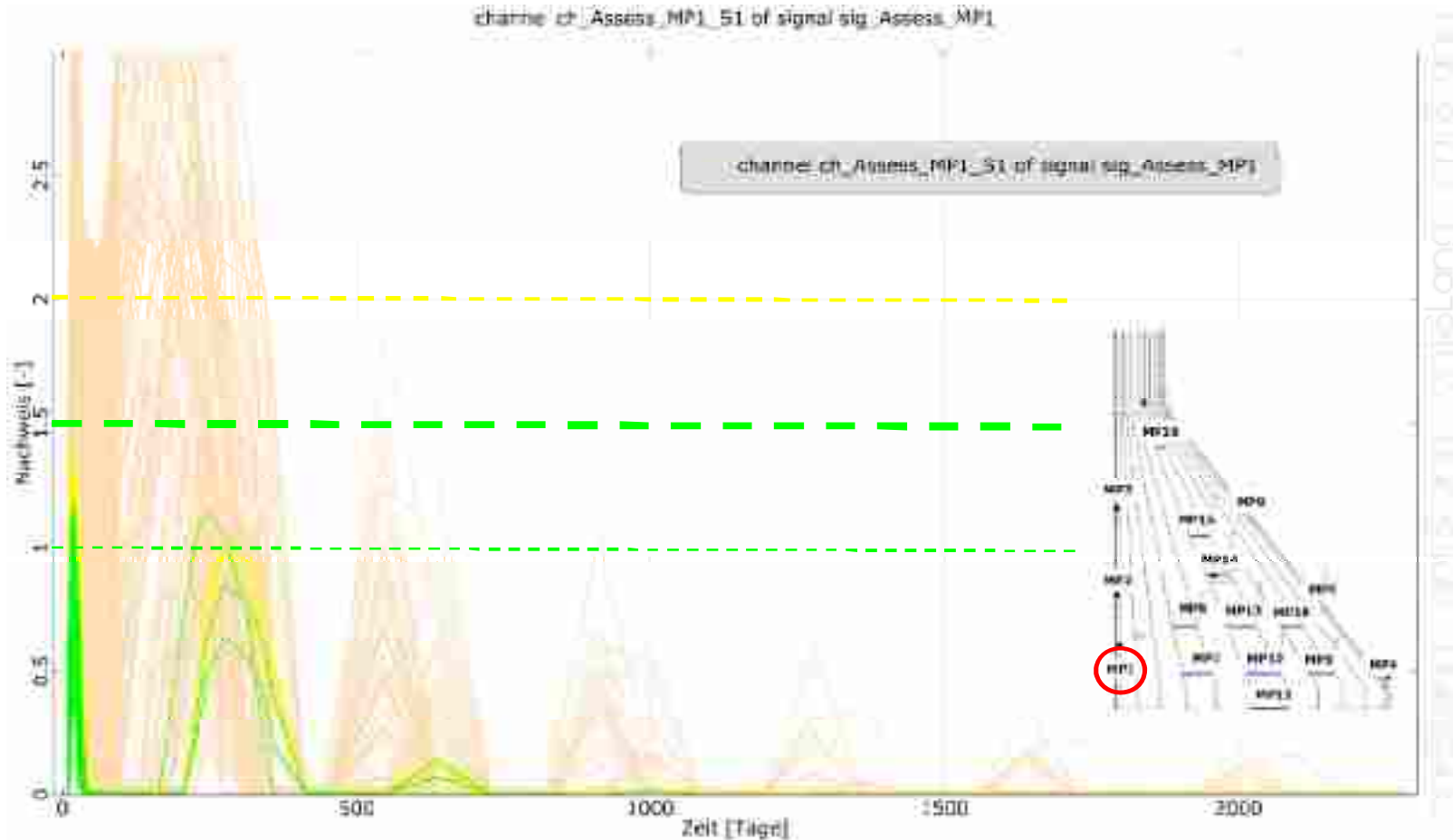
Bauanfang



Baubeginn	
Datum	Tag
01.04.2012	91
01.05.2012	121
01.06.2012	152
01.07.2012	182
01.08.2012	213

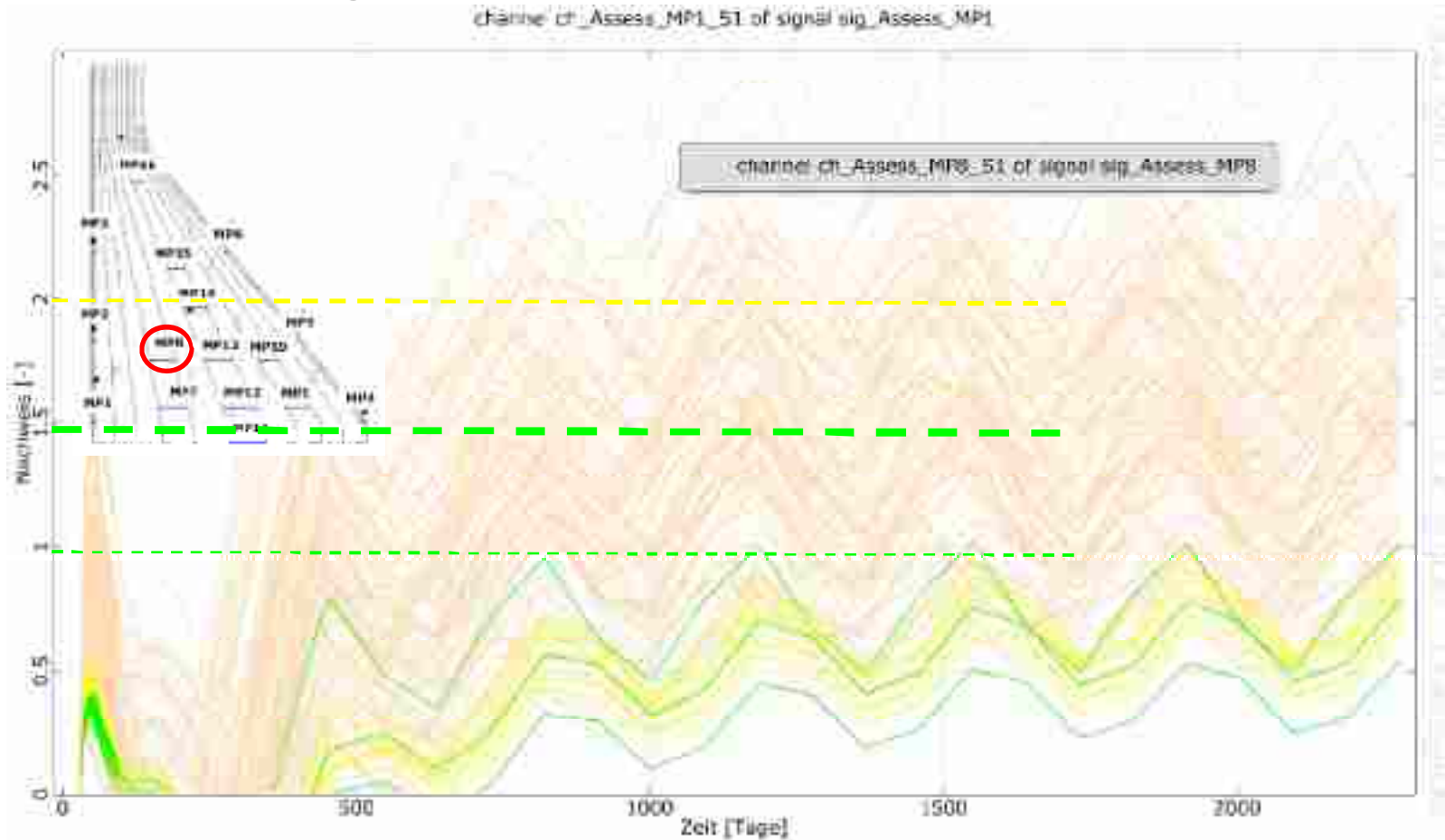
Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Assessment – Signal MP1



Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Assessment – Signal MP8



Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

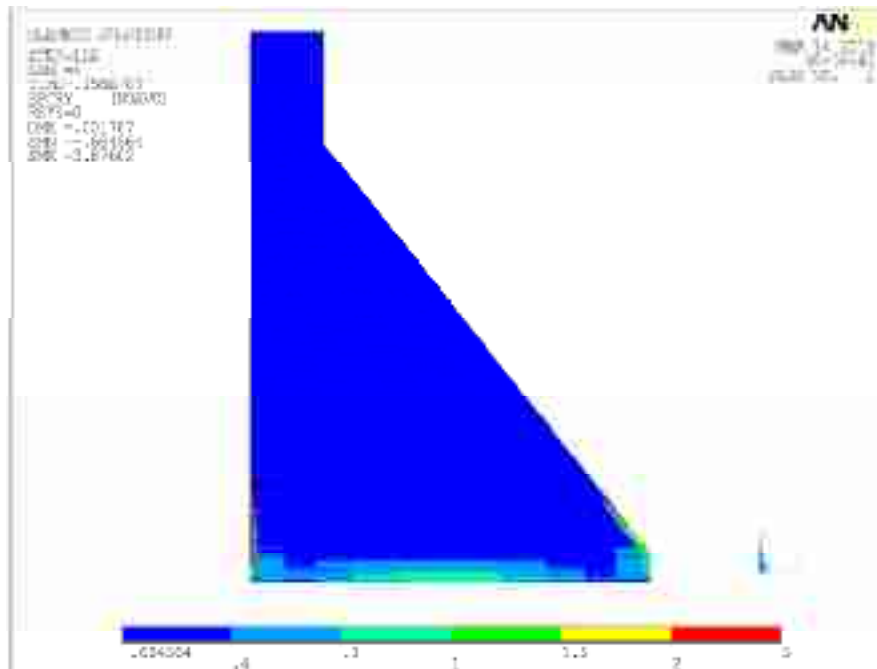
3 beste Designs

Inputparameter	Name	Design		
		5	101	109
Startzeit	par_OS_BauAnfang	121	91.0	91.0
Ausgangstemperatur Frischbeton	par_OS_IniBetonTemp	10.7	10.0	11.0
Wärmemenge Beton	par_OS_BetonWarmeMenge	17165	17000.0	18500
Wärmeleitfähigkeit Beton - Start	par_OS_IniBetonLeitfähig	2.23	1.6	1.6
Wärmeleitfähigkeit Beton - End		2.46	1.77	1.77
Spez. Wärmekapazität Beton - Start	par_OS_IniBetonKapazität	1028	1250.0	1100.0
Spez. Wärmekapazität Beton - End		874.00	1062.5	935.0
Dichte Beton	par_OS_BetonDichte	2102	2350.0	2350.0
Thermische Ausdehnungskoeff. Beton - Start	par_OS_IniBetonAusdehnung	0.0000140	0.0000140	0.0000140
Thermische Ausdehnungskoeff. Beton - End		0.0000093	0.0000093	0.0000093
Betongüte (1-ax. Druckfestigkeit)	par_OS_Druckfest365	18.9	25.0	24.5
Fugenabstände (bzw. Blocklänge)	par_OS_BlockLange	19.6	15.0	19
Wärmeübergangskoeffizient	par_OS_AlfaKonv	32.6	30.0	30.0

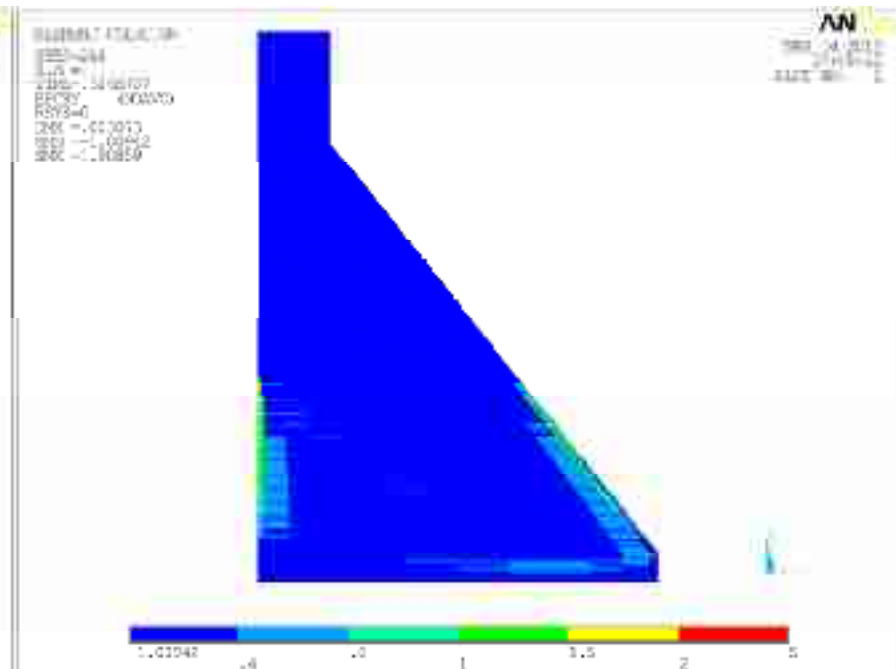
Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)



Tag: 109
Bauphase

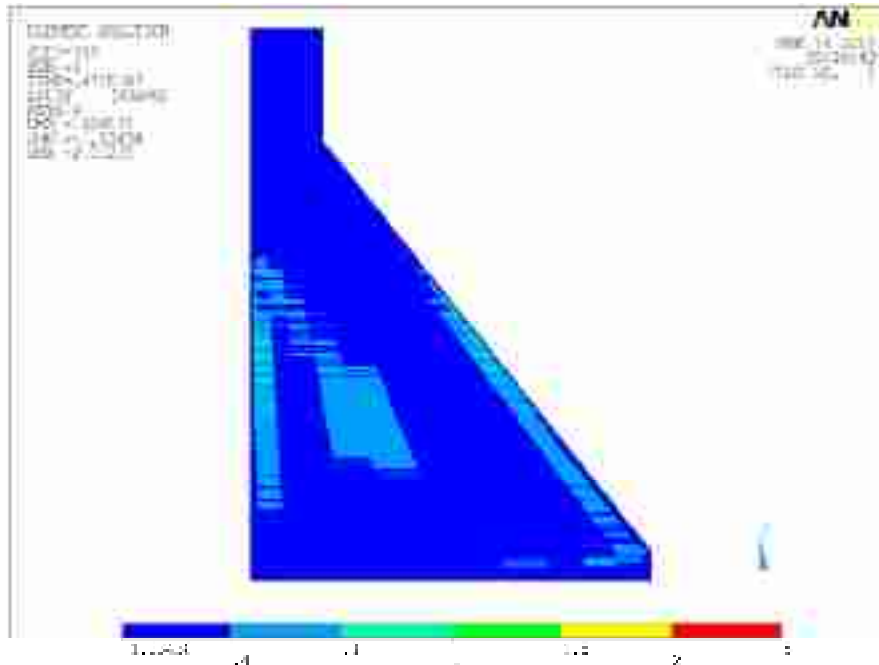


Tag: 127
Bauphase

Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

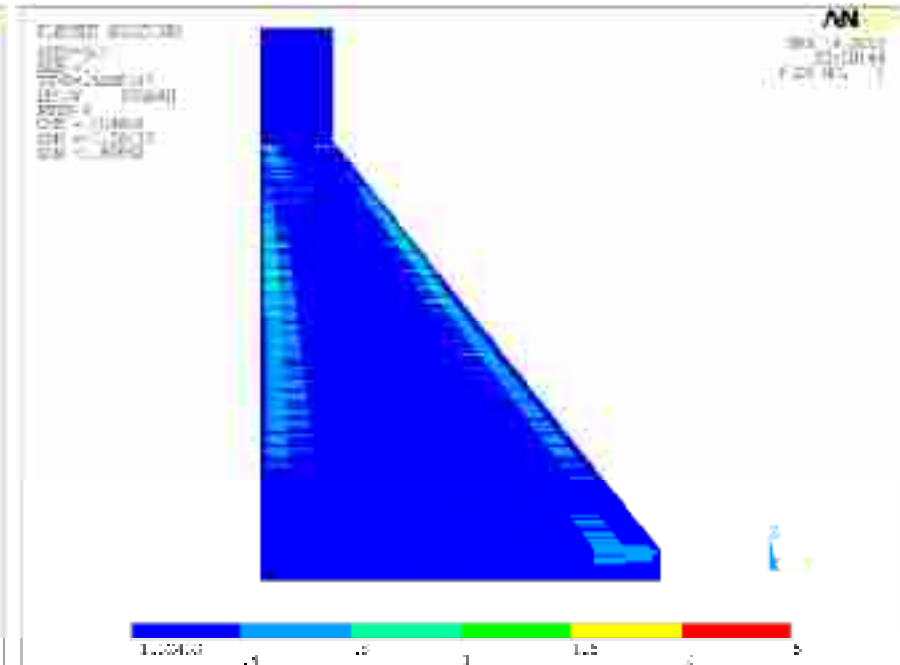
Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)



Tag: 146

Bauphase



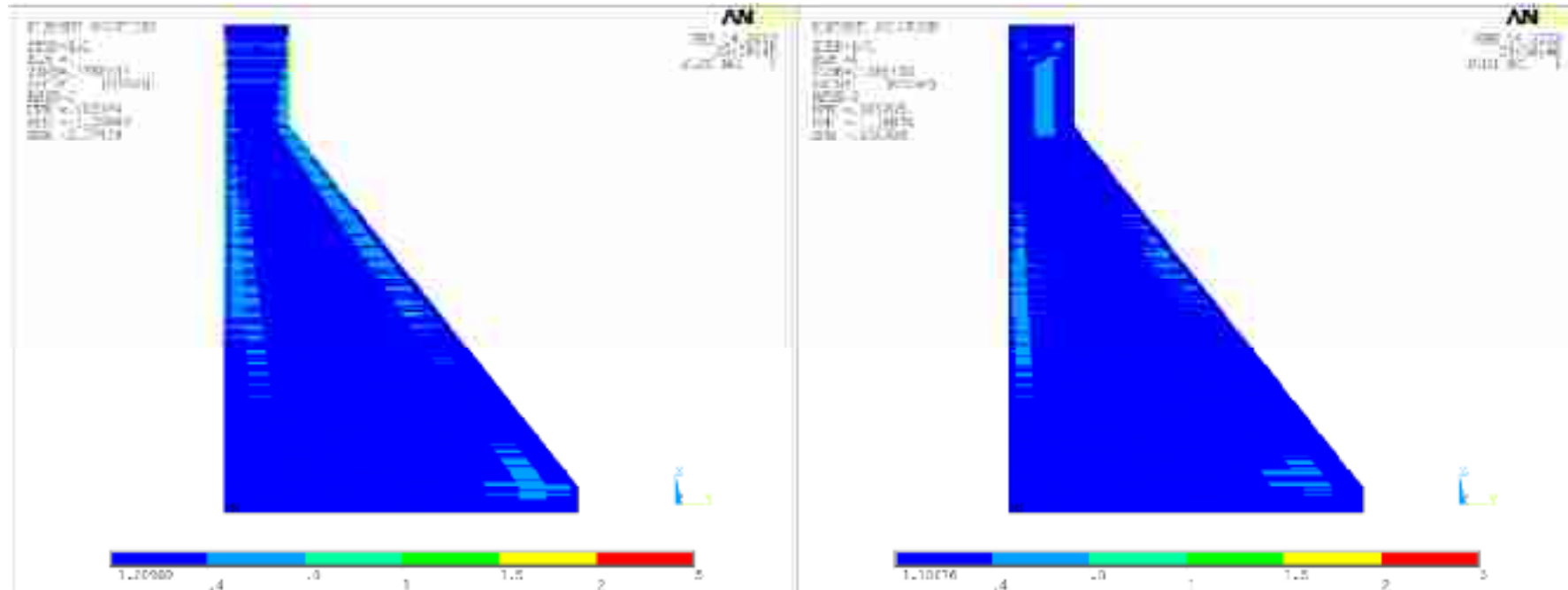
Tag: 164

Bauphase

Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)



Tag: 181

Ende Bauphase

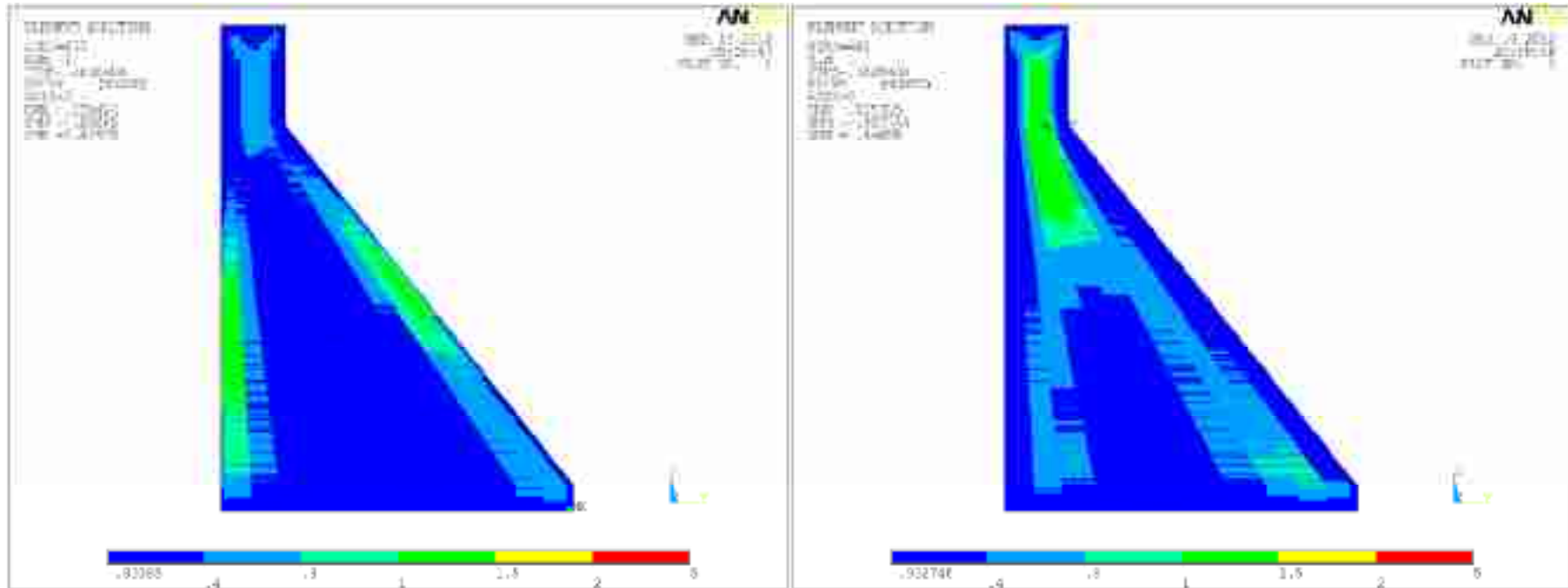
Tag: 274

1. Jahr nach Bauphase

Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)



Tag: 420

1. Jahr nach Bauphase

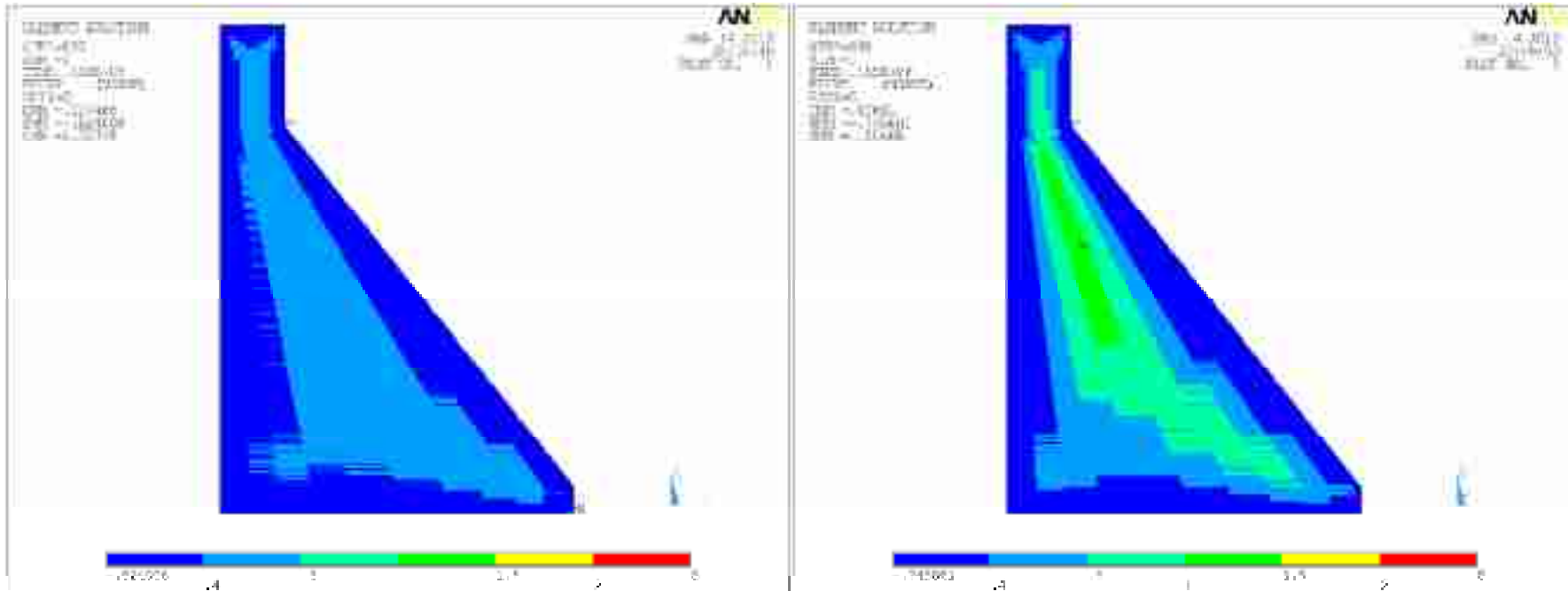
Tag: 533

1. Jahr nach Bauphase

Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)



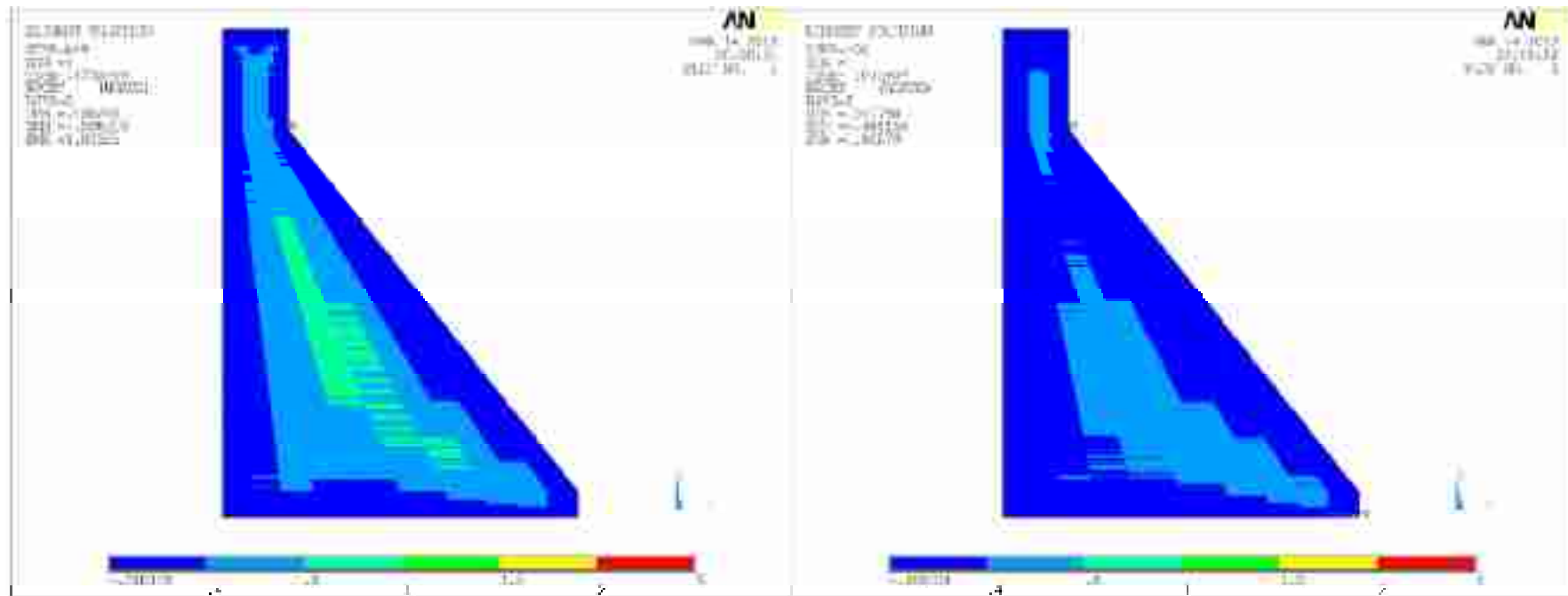
Tag: 1920
Folgende 5 Jahren

Tag: 2000
Folgende 5 Jahren

Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)



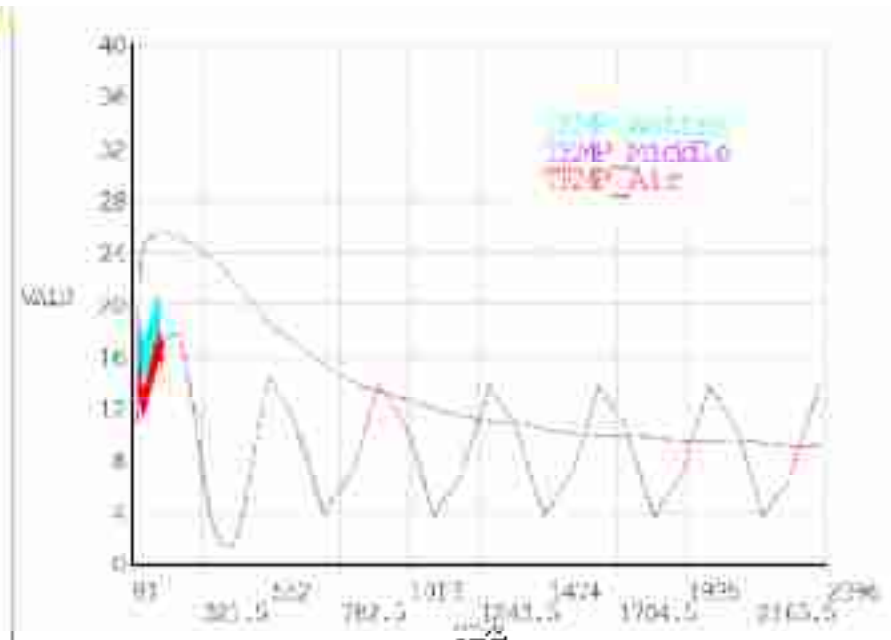
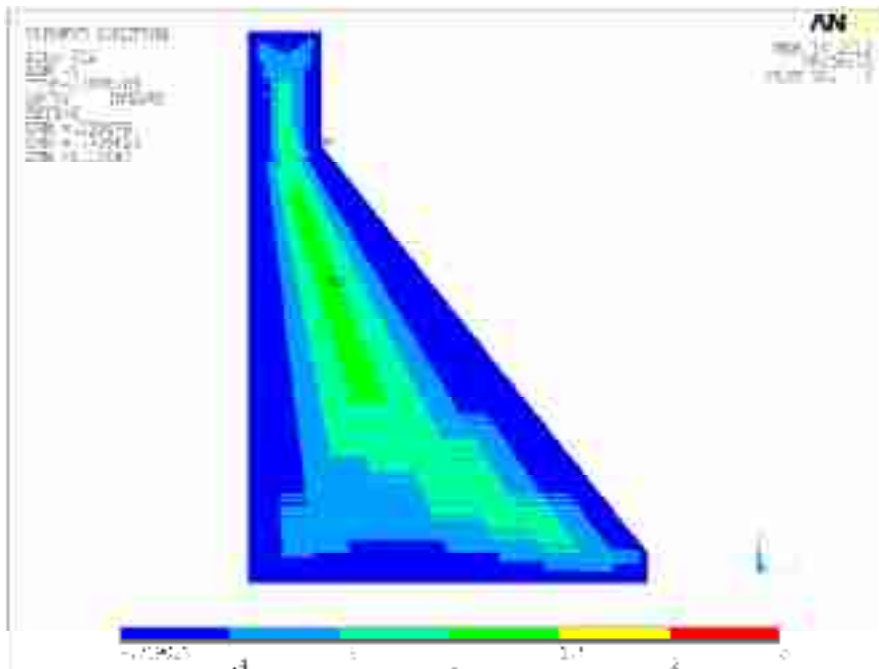
Tag: 2093

Tag: 2186

Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Design 109 Ergebnisse - Assessment

Bauanfang: 1.4. (91 Tage)

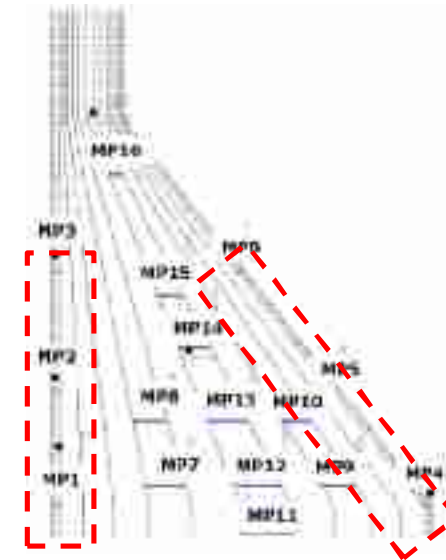


Tag: 2371

Zusammenfassung Sensitivitätsanalyse

- **Wichtigste Einflussgrößen für die Außenbereiche:**
Fugenabstand (↘)
Baubeginn (↘)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (↘)
- **Wichtigste Einflussgrößen für den Innenbereich:**
Spezifische Wärmekapazität (↗)
Wärmemenge des Betons (↘)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (↘)
Baubeginn (↘)
- **Folgende Werte werden aus Sicht der Hydratationsanalyse empfohlen:**
Fugenabstand: 15 ... 20m
Baubeginn: 1.4.
Frischbetontemperatur < 15°C (besser 10°C)

spez. Wärmekapazität des Betons > 1100 J.K⁻¹.kg⁻¹
thermischer Ausdehnungskoeffizient: 14e⁻⁶ ... 15e⁻⁶
Wärmemenge des Betons < 20kJ



Thank you

For more information please
visit our homepage:
www.dynardo.de

