

Verhalten von Hüllrohrmaterialien bei Large Break LOCA (QUENCH-LOCA Test Serie)

M. Steinbrück, J. Stuckert, M. Große, M. Walter

Workshop "Status VGB Schwerpunktförderung", E.ON Hannover, 27.10.2011

Institute for Applied Materials, Programme NUKLEAR



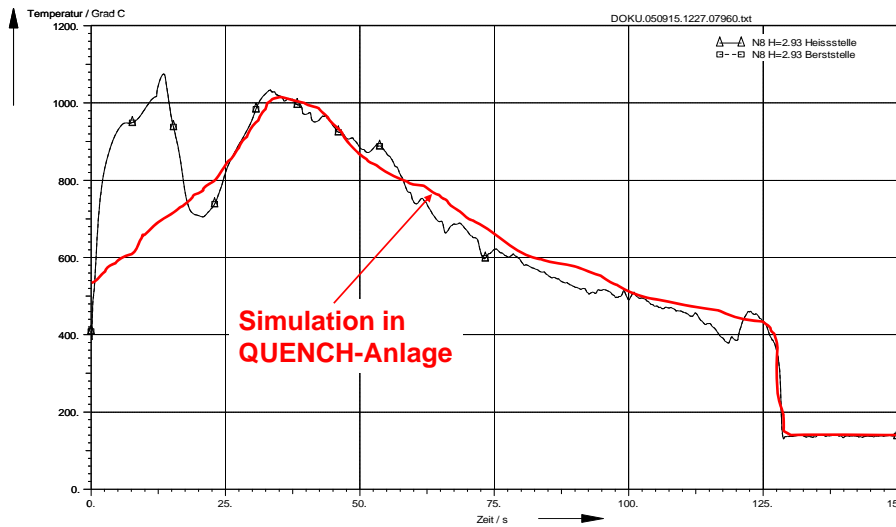
KIT – University of the State of Baden-Wuerttemberg and
National Research Center of the Helmholtz Association

www.kit.edu

Motivation und Ziele

- Aktuell wird weltweit das LOCA-Versprödungskriterium diskutiert (1200°C, 17% ECR)
- Einzelstab-Experimente bei ANL, Halden, Studsvik
- Höhere Abbrände
- Neue Hüllrohrmaterialien
- Einfluss von Wasserstoff
- ➔ Bündelexperimente am KIT
 - Mit Zry-4, Duplex, M5, Zirlo Hüllrohren
 - Sekundäre Hydrierung
 - Deutsches Szenario
 - Nachweis der Kernkühlbarkeit

“Deutsches” Large Break LOCA Scenario (Siemens DWR)



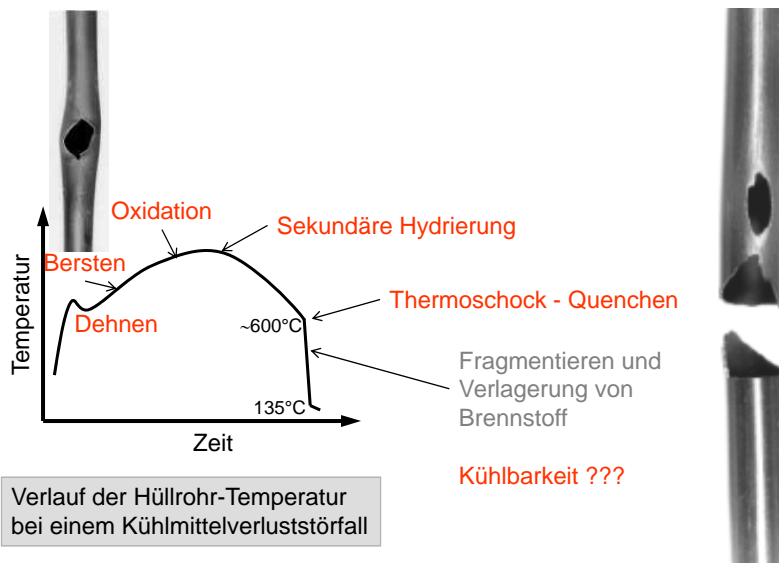
3 27.10.2011

VGB Workshop Schwerpunktförderung

Martin Steinbrück

KIT - IAM

LOCA Phänomenologie



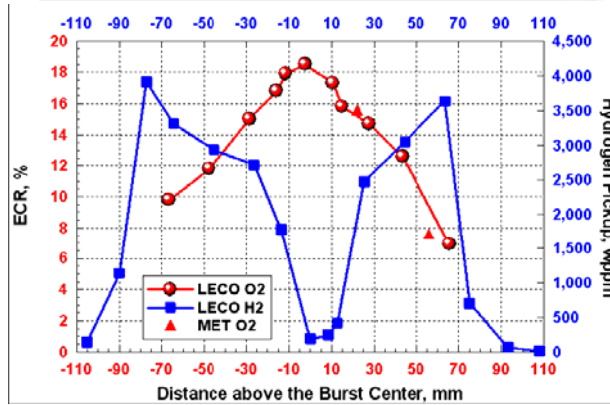
4 27.10.2011

VGB Workshop Schwerpunktförderung

Martin Steinbrück

KIT - IAM

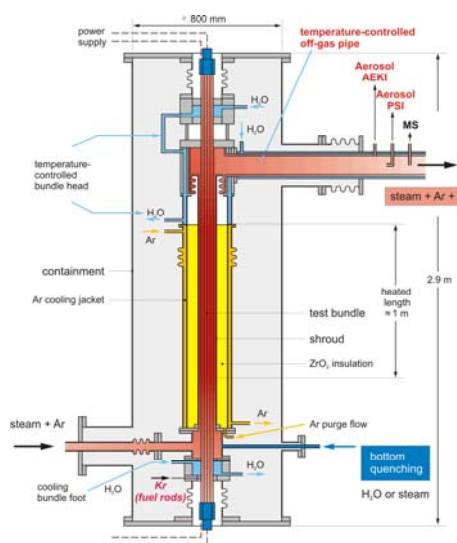
Sekundäre Hydrierung



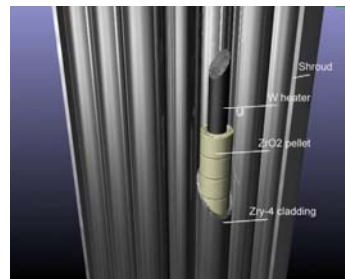
Einfluss auf mechanische Eigenschaften?

Quelle:
M. Billone et al.
NUREG/CR-6967/ANL-07/04

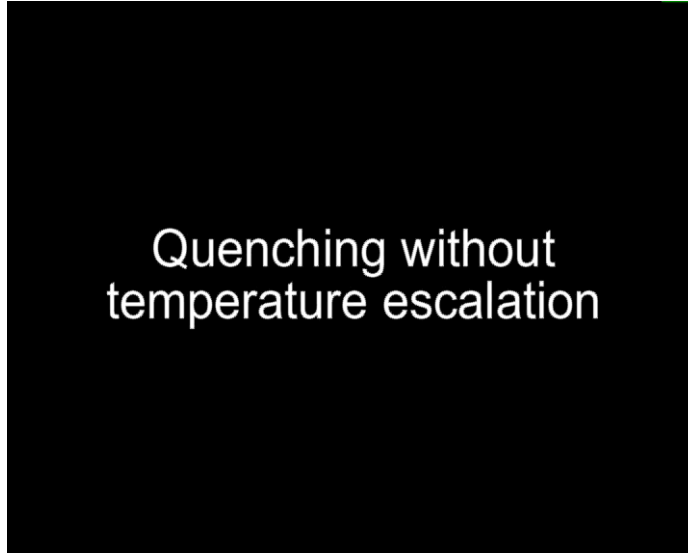
QUENCH Anlage



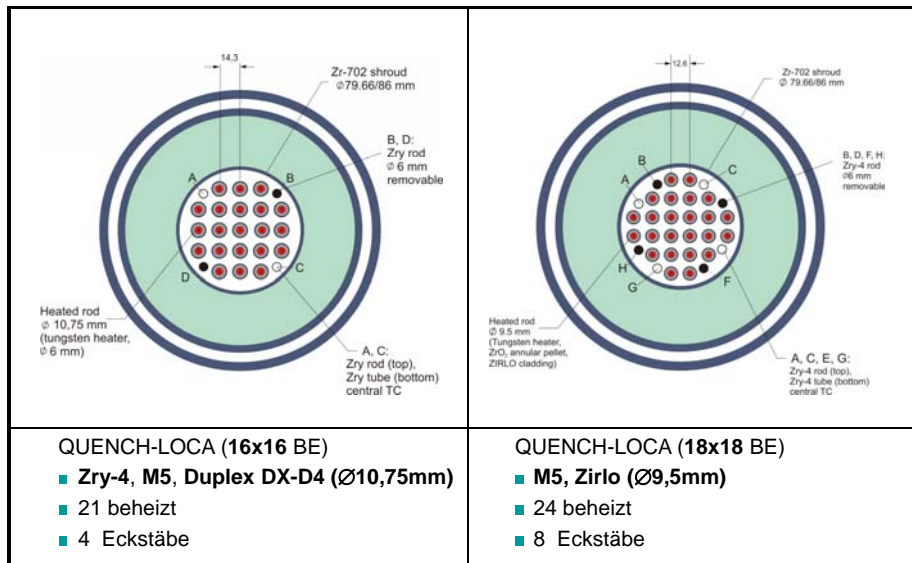
- Bündel 21-31 Stäbe; ~2,5 m Länge
- Elektrisch beheizt: ~1,8 m; max. 70 kW
- Brennstoffsimulation: ZrO₂-Tabletten
- Dampfdurchsatz bis 50 g/s
- Abschrecken von unten mit Wasser
- Abgasanalyse (H₂, Massenspektrometer)



Schematische Darstellung der Abschreckphase

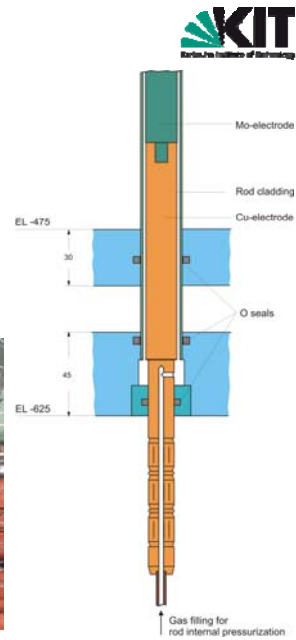
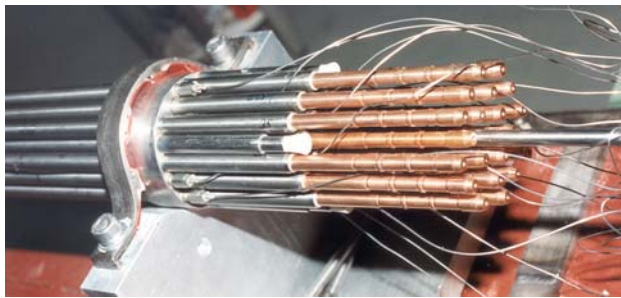


QUENCH Bündel-Design



Stab-Design für LOCA Tests

- Alle BSS innen beheizt (incl. Zentralstab)
- Separate Druckaufgabe und Druckmessung für alle BSS (max. 100 bar, Kr)
- Druckbeaufschlagung über Kupferelektrode
- Void-Volumen im Teststab + Ausgleichsbehälter = Void-Volumen im DWR Stab



QUENCH-LOCA Testmatrix

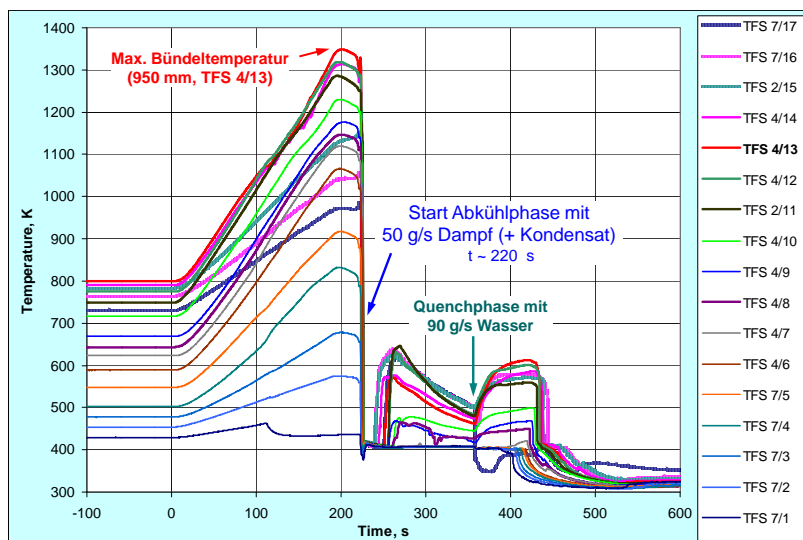
Test	Jahr	Hüllrohr	Abstandshalter	Bemerkungen
QUENCH-L0	2010	Zry-4 Ø 10.75 / 9.3	Inconel/ Zry-4	Inbetriebnahme
QUENCH-16	2011	Zry-4 Ø 10.75 / 9.3	Inconel/ Zry-4	BDBA, Lufteinbruch, EU LACOMECO
QUENCH-L1	2011	Zry-4 Ø 10.75 / 9.3	Inconel/ Zry-4	Referenz
QUENCH-Debris-1	2012	Zry-4 Ø 10.75 / 9.3	Zry-4	BDBA, EU SARNET
QUENCH-L2	2012	Duplex D4 Ø 10.75 / 9.3	Zry-4	
QUENCH-Debris-2	2013	Zry-4 Ø 10.75 / 9.3	Zry-4	BDBA, EU SARNET
QUENCH-L3	2013	M5 Ø 10.75 / 9.3	M5	
QUENCH-L4	2014	M5 Ø 9.5 / 8.22	M5	
QUENCH-L5	2014	ZIRLO Ø 9.5 / 8.357	?	
QUENCH-L6-8	ab 2015	M5, D4, ZIRLO	?	Hochabbrand-Simulation

Inbetriebnahme-Test QUENCH-LO

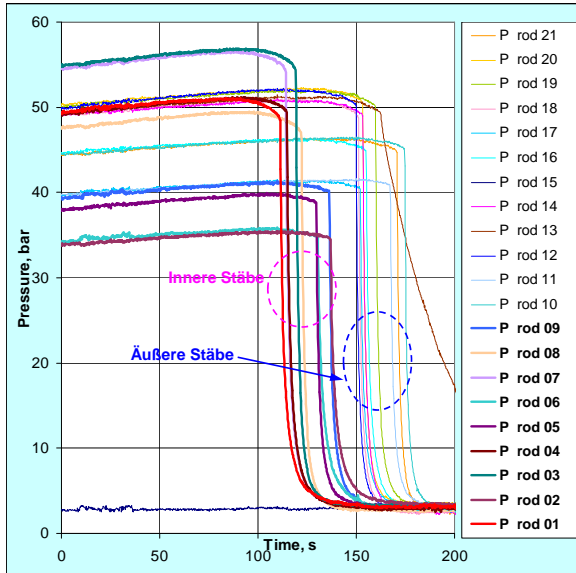


- 22. Juli 2010
- Test aller Komponenten, insbesondere der neuen/modifizierten Anlagenteile
- Szenario entsprechend Konvoi Large Break LOCA
- Innendrucke: 35-55 bar
- Vorausrechnungen bei GRS (D), PSI (CH) und IBRAE (RU)
- Technische Probleme:
 - Mitreißen von Kondenswasser bei Dampfeinspeisung für Kühlphase (→ gelöst)
 - Zu geringe el. Leistungseinspeisung in Bündel während transienter Phase aufgrund Stromlimitierung der GS-Anlage (→ neue GS-Anlage notwendig und/oder Modifikation el. Heizer)
- Alle anderen Komponenten haben problemlos funktioniert
- Abschlussbericht liegt vor

Testverlauf und Temperaturen

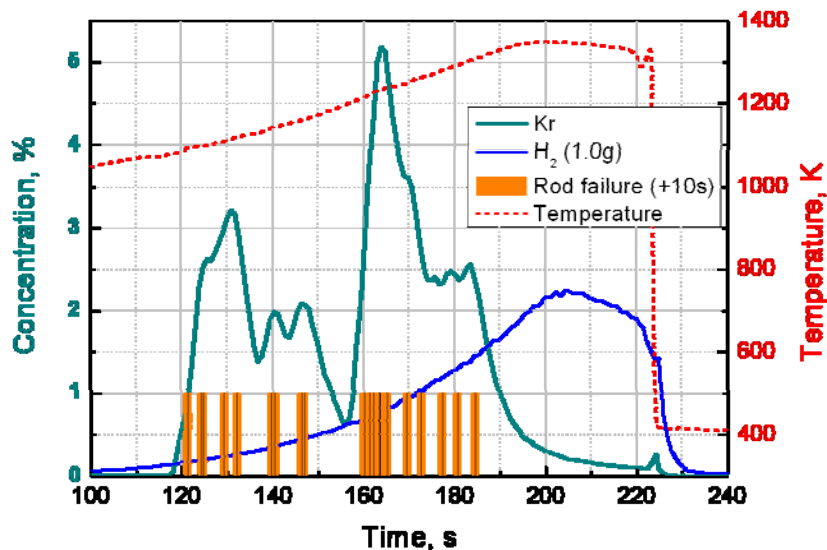


Drücke und Stabversagen

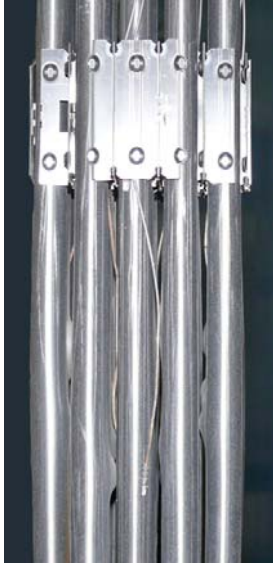


rod	start p, bar	burst p, bar	burst time, s	T@950 mm, °C
1	49,3	48,5	111,2	796
7	54,6	54,1	114,2	793
4	49,2	49,5	114,6	800
3	55	54,4	119,2	816
8	47,7	46,8	122,0	813
5	38	38,9	129,6	835
6	34,2	34,7	130,4	833
9	39,2	40,1	136,2	860
2	33,8	34,5	136,8	861 max T
12	49,9	50,2	150,0	815
18	49	48,7	151,2	830
17	39,6	40,4	152,0	854
20	50,3	50,4	153,2	776 min T
14	49	49,0	153,4	821
16	44,6	44,9	155,0	818
19	50	50,0	159,6	850
13	49,4	49,0	162,5	805
11	39,8	40,8	167,2	868
21	44,4	44,8	170,6	795
10	44,5	45,2	174,4	791

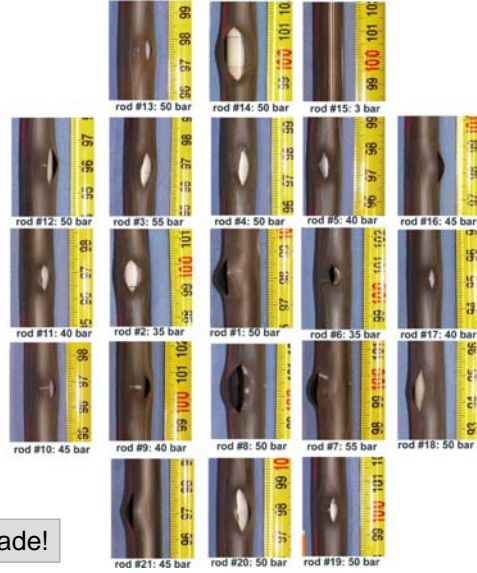
Gasanalyse



Ballooning und Berststellen



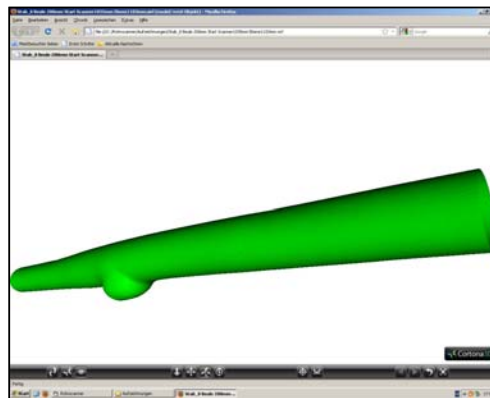
Keine Blockade!



Hüllrohrvermessung mittels Laserscanner

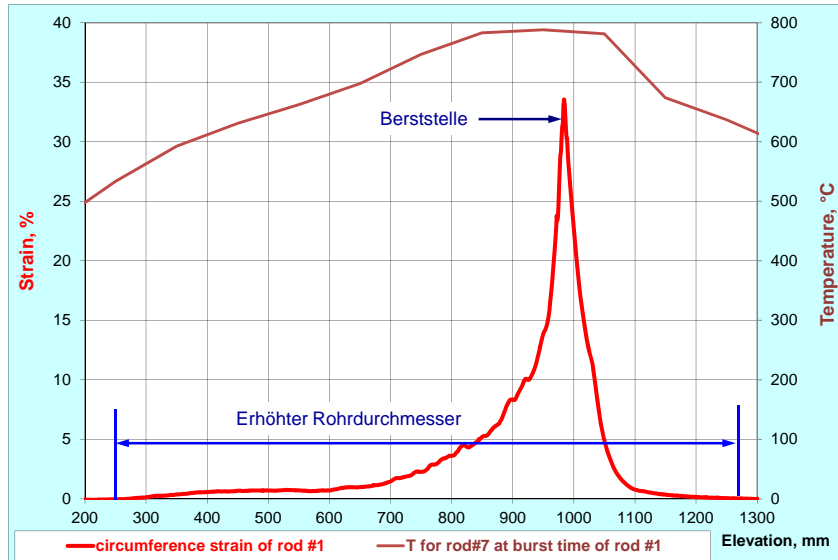


Laserscanner

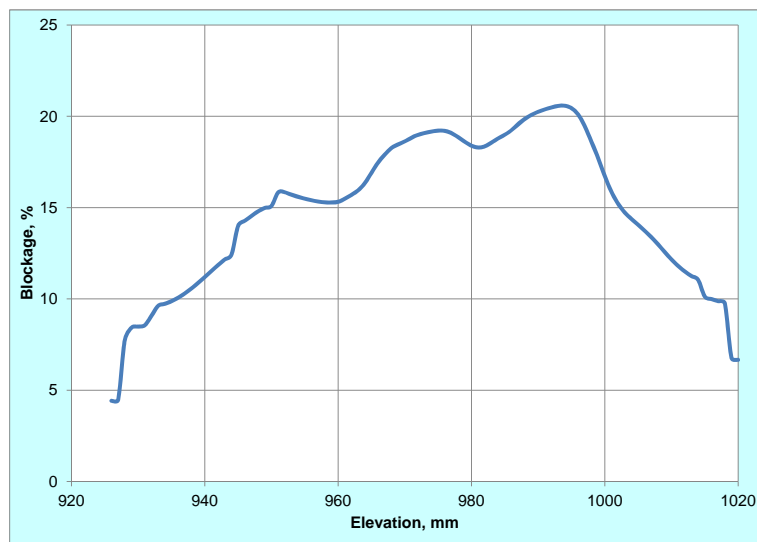


Rekonstruktion der Oberfläche von Stab 8:
Schrittinkel 1°; axiale Schrittweite 0.5 mm

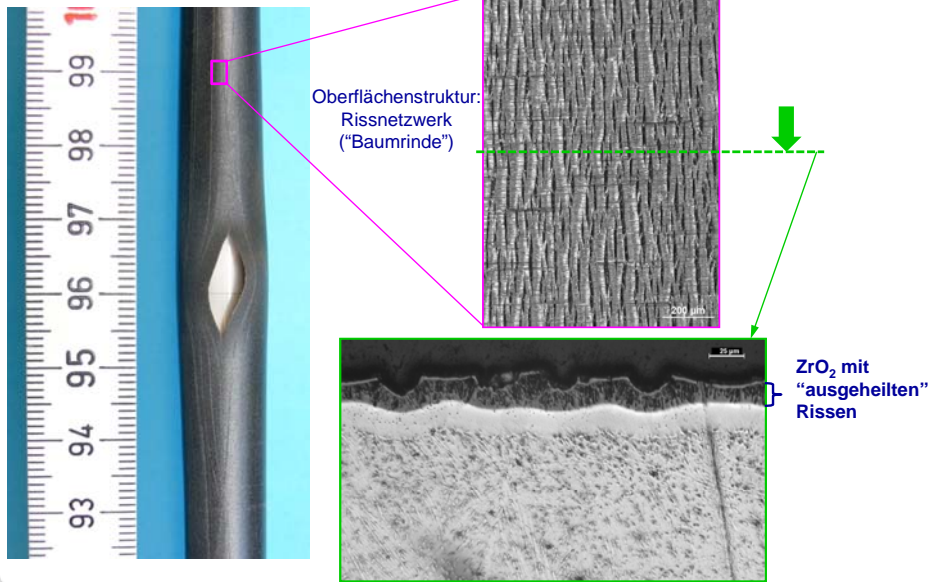
Axialer Verlauf der Hüllrohr-Dehnung von Stab 1



Kühlkanal Reduktion

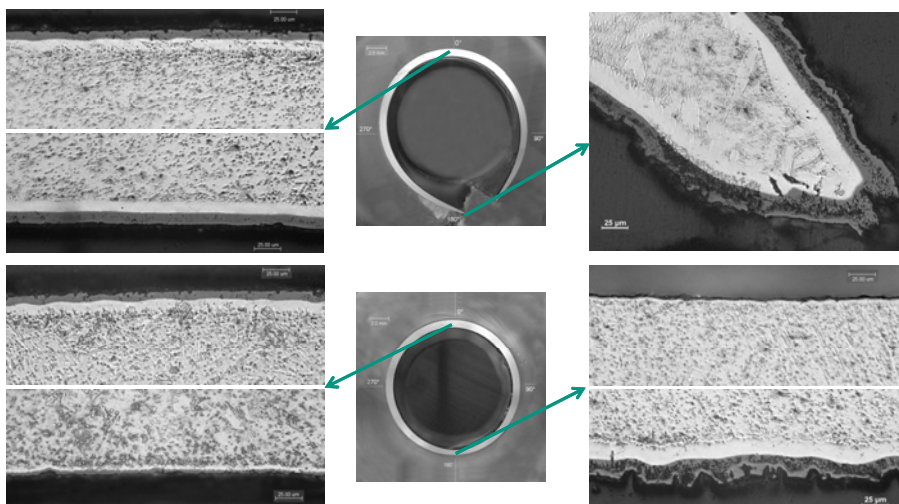


Metallographische Nachuntersuchungen



Metallographische Nachuntersuchungen

Innere Oxidation in der Nähe der Berststelle



Bestimmung des Wasserstoffgehaltes mittels Neutronenradiographie



- Hoher Kontrast zwischen Wasserstoff und Zirkonium
- Methode ist zerstörungsfrei und ortsauflösend
- Schräge Wasserstoffbänder in der Nähe der Berststelle
- Max. Wasserstoffgehalte ca. 1300 wppm
- Korrelation mit Zeit zwischen Bersten und Quenchen
- 3D Ortsauflösung mittels Neutronentomographie



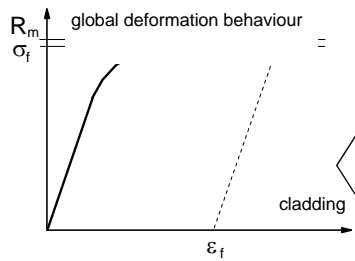
3D Bestimmung des Wasserstoffgehaltes mittels Neutronentomographie



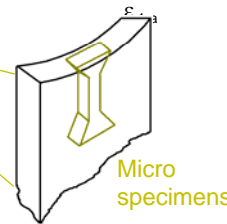
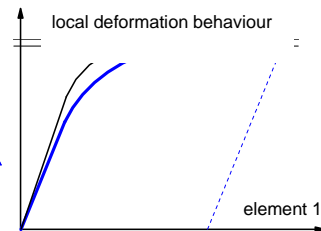
Stab 1
50 bar
 $\Delta t = 112$ s

Mechanische Nachuntersuchungen: Dehnungstests

global deformation behaviour



local deformation behaviour



Ergebnisse von Dehnungstests

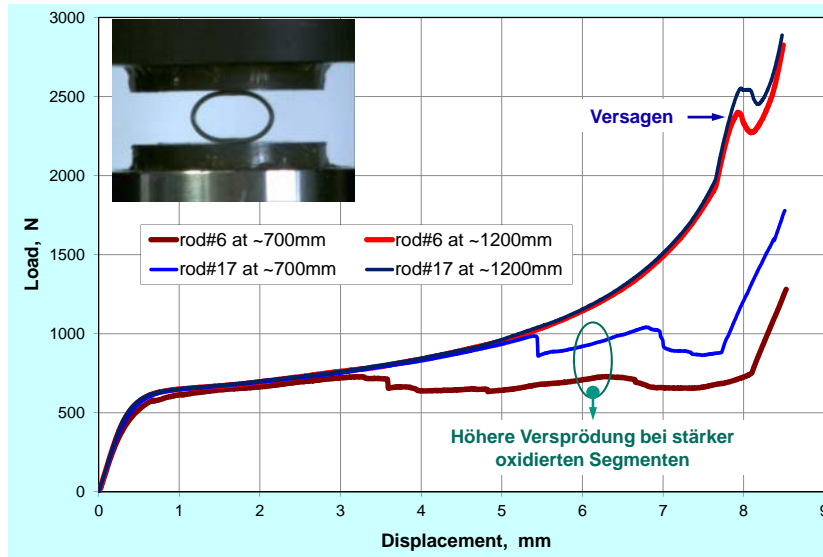
Doppelbruch durch
Wasserstoff-
versprödung
(7 von 9 inneren
Rohren)



Bruch nach
plastischer
Deformierung

Bruch in Mitte
der Berststelle

Mechanische Nachuntersuchungen: Ringdrucktests



Ausblick

- Bündel für Test QUENCH-L1 weitgehend montiert
- Heizer-Design überarbeitet (Ta-Heizer)
- Trotz Verzögerung wegen Fukushima nächster LOCA Bündeltest noch in 2011, spätestens Januar 2012, geplant