Behaviour of PCRV for High Temperature Reactors Under Malfunctions of Liner Cooling

K. Schimmelpfennig, G. Schnellenbach
Zerna, Schnellenbach und Partner,
Gemeinschaft Beratender Ingenieure GmbH,
Viktoriastr. 47, D-4630 Bochum, Germany

In recent time, connected with the question of availability of high temperature reactors the scope of the liner cooling system got more and more important. For that reason, a research program has been initiated, which bears upon a systematic investigation of the behaviour of prestressed concrete reactor vessels (PCRV) under all conceivable events in connection with upsets or failures of liner cooling including hypothetical cases. This paper gives a survey on the methodology used to fulfill this extensive task and shows first intermediate results. In the initial phase of work, the boundary conditions relevant for the PCRV have been selected from the numerous data from the different accident analyses. Using these data some characteristic accident transients are shown and it is demonstrated that in this early phase the amount of investigations can be restricted on a comparatively small number of ruling cases. Subsequently, instationary temperature field calculations are carried out, investigating the basic phenomena by use of detailed models representing e.g. small liner sections with single cooling pipes and welding seams. Plots of results of these calculations are shown and discussed. It becomes evident that generally the influence on the overall behaviour of the vessel is negligible, which means that most of the further investigations can be done using respective detail models. In the next step of work, analyses of stresses and strains have to be carried out considering the prestressed concrete structures and the metallic claddings as well. Generally, temperature dependence of material characteristics has to be included in the calculations. Some graphs showing the functions used are presented in the paper, and the general procedure in carrying out these analyses is outlined.

1. Einführung

In jüngerer Zeit ist im Zusammenhang mit der Frage der Verfügbarkeit von Hochtemperaturreaktoren die Bedeutung des Linerkühlsystems immer mehr in den Vordergrund gerückt. Aus diesem Grunde wurde vom Bundesminister für Forschung und Technologie der Bundesrepublik Deutschland ein Forschungsprogramm in Auftrag gegeben, das eine systematische Untersuchung des Verhaltens von Spannbeton-Reaktordruckbehältern (SBB) unter allen denkbaren Abläufen in Zusammenhang mit Störungen oder Ausfällen der Linerkühlung zum Gegenstand hat. Da die detailliertesten Untersuchungen für Hochtemperaturreaktoren in Deutschland bisher für das THTR-Kernkraftwerk Schmehausen erstellt worden sind, werden die Daten für diese Anlage der Forschungsaufgabe zugrunde gelegt. Die betrachteten Ereignisse sind jedoch derart vielfältig und weitreichend, daß diese Untersuchungen repräsentativ für sonstige Hochtemperaturreaktoren vergleichbarer Konzeption sein werden.

Eine hohe Verfügbarkeit einer Anlage läßt sich erreichen, wenn auch bei bestimmten Störungen des Betriebes - hier z.B. bei Ausfall eines Linerkühlsystems - die Anlage ununterbrochen weiter gefahren werden darf. Damit ergeben sich aber für zu unterstellende Störfälle ungünstigere Ausgangssituationen, bzw. die Eintrittswahrscheinlichkeit für Störfälle eines bestimmten Ausmaßes vergrößert sich. Das hat zur Folge, daß zwecks Ermöglichung einer höheren Verfügbarkeit auch sicherheitstechnische Fragestellungen zu untersuchen sind. Dieser Beitrag gibt einen Überblick darüber, wie durch Untersuchung eines breiten Spektrums möglicher Betriebsstörungen und Störfälle gezeigt werden kann, daß ein Spannbeton-Reaktordruckbehälter für einen Hochtemperaturreaktor in allen zu unterstellenden Situationen den jeweils an ihn gestellten Anforderungen genügen kann. Da die Arbeiten hierzu zur Zeit im Gange sind, können endgültige Ergebnisse noch nicht genannt werden, sondern es werden die Methodik der Untersuchungen erläutert, erste Zwischenergebnisse gezeigt und allgemeine Tendenzen angegeben.

2. Beschreibung von Ereignissen in Verbindung mit Ausfällen oder Störungen der Linerkühlung

Die Ereignisse - Betriebsstörungen oder Störfälle - in Verbindung mit Ausfällen oder Störungen der Linerkühlung lassen sich in zwei übergeordnete Kategorien einteilen, nämlich

- Ausfälle oder Störungen der Linerkühlung aus sich heraus,
- Ausfälle oder Störungen der Linerkühlung als Folge eines sonstigen Störfalls.

Ein weiteres grundlegendes Unterscheidungsmerkmal ergibt sich aus dem Bestreben, die Verfügbarkeit des Kraftwerks dadurch zu steigern, daß man auch den zeitweisen Betrieb der Anlage mit nur einem der beiden Linerkühlsysteme ohne zusätzliche Absenkung der Kühlwasser-Vorlauftemperatur als zulässig nachweist. Das besagt, daß alle Ereignisse sowohl ausgehend vom Betrieb mit beiden Kühlsystemen als auch ausgehend vom Betrieb mit einem Kühlsystem untersucht werden müssen.

Aus diesen wenigen Erläuterungen ergibt sich bereits ein Eindruck von der Vielfalt der zu untersuchenden Abläufe. Hier soll exemplarisch nur auf einige wenige davon eingegangen werden, die, wie sich übersehen läßt, jedoch maßgebend werden dürften.

Dominierendes störfallauslösendes Ereignis ist ein zu unterstellender Rohrbruch im Wasser- Dampf-Kreislauf. Hierdurch wird die den SBB in dieser Anlage umgebende Luftführungswand in bestimmten Bereichen aufgeheizt. Ausgelöst durch dieses Ereignis ist nun eine gewisse Aufheizung oder der Ausfall eines Kühlsystems oder beider Kühlsysteme anzunehmen. Außerdem ist, wie bereits erwähnt, der gleiche Ablauf, ausgehend vom Betrieb mit nur einem Kühlsystem zu untersuchen. Obwohl aufgrund genügend geringer Eintrittswahrscheinlichkeit nur die Häufigkeit 1 pro Lebensdauer der Anlage angenommen werden muß, ist es das Ziel der Untersuchungen zu ermitteln,

ob der SBB die zugehörigen Belastungen mehrmals ertragen kann; das bedeutet eine Einstufung als Auslegungsstörfall.

Als Basisstörfall - weil von noch deutlich geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit - soll hingegen der Fall behandelt werden, daß noch zusätzlich zu den beschriebenen Abläufen die gesamte Nachwärmeabfuhr über einen Zeitraum von 5 Stunden ausfällt. Die Wiederaufnahme der Notkühlung nach diesem Zeitraum bewirkt ein schnelles Absinken der Kaltgastemperatur.

Den bisher beschriebenen Störfällen ist gemeinsam, daß sowohl auf der Außenseite als auch auf der Innenseite des SBB besondere Temperatureinwirkungen entstehen. Bei Ausfällen oder Störungen der Linerkühlung aus sich heraus liegen hingegen nur Einwirkungen von der Innenseite her vor. Dabei sind neben Störungen des Kühlwasser-Regelventils, die zur Einspeisung extremer Kühlwassertemperaturen führen, pessimistisch häufig angenommene Ausfälle eines Kühlsystems bei Betrieb mit zwei Systemen und der Kühlungsausfall bei Betrieb mit nur einem Kühlsystem zu betrachten. Hierfür soll untersucht werden, ob die Anlage ununterbrochen betrieben werden darf, wenn nach einer bestimmten Reparaturzeit mindestens ein System wieder in Betrieb geht.

3. Festlegung der Randbedingungen für die Strukturanalyse

Der erste Schritt der Bearbeitung besteht darin, aus der Fülle der Prozeßdaten diejenigen herauszuziehen, die konkrete Randbedingungen für die Strukturannalyse darstellen. Folgende Parameter führen im wesentlichen zu Beanspruchungen des SBB:

- Innendruck
- Kaltgastemperatur
- Vorlauftemperaturen Kühlsysteme I und II
- Aufwärmspannen Kühlsysteme I und II (je nach betrachtetem Liner- oder Rohrlinerbereich unterschiedlich)
- Temperaturen auf der Außenseite der SBB

Daneben sind noch die auf der Innenseite und der Außenseite anzusetzenden Wärmeübergangszahlen von Interesse.

Dominierend sind offensichtlich die Temperaturrandbedingungen. Der Innendruck spielt nur eine sekundäre Rolle. Er folgt stets entsprechend den Gasgesetzen der Temperatur des Heliums, steigt also lediglich im Falle der zeitweise unterbrochenen Nachwärmeabfuhr über den Betriebsdruck hinaus an, und zwar bei dieser Anlage von 39 $\pm$ 1 bar auf maximal 50 bar. Demgemäß soll im folgenden auch nur auf Temperaturdaten näher eingegangen werden, und dies nur für einige wenige markante Störfallabläufe. Dabei wird der Übersichtlichkeit halber auf die Wiedergabe von Bandbreiten, zwischen denen zum Teil die Temperaturen schwanken können, verzichtet.

In Bild 1 sind die Temperatur-Randbedingungen bei Rohrbruch im Wasser-Dampf-Kreislauf und dadurch ausgelöstem Ausfall beider Linerkühlsysteme dargestellt. Pessimistisch wird vom Betrieb mit nur einem Kühlsystem ausgegangen. Die im Höhenbereich des Rohrbruches auf der SBB-Außenseite herrschenden Temperaturen erreichen ca. 45 min nach Störfallbeginn ihr Maximum bei ca. 150 ^{o}C und klingen dann wieder ab. Örtlich können höhere Temperaturen auftreten, der überwiegende Teil der SBB-Außenfläche ist nur wenig betroffen. Für das eine in Betrieb befindliche Linerkühlsystem wird ab 3 h vor Störfalleintritt eine Störung unterstellt, die entweder zu einer Aufheizung des Kühlwassers auf 54 ^{o}C oder zu einer Abkühlung auf ca. 12 ^{o}C führt. 40 min nach Störfallbeginn wird der Reaktor abgefahren, wobei die Kaltgastemperatur wie dargestellt zunächst nur wenig, nach 5 h rapide absinkt.

Den in Bild 2 angegebenen Temperaturverläufen liegt zusätzlich der Ausfall der gesamten Nachwärmeabfuhr zugrunde. Hier steigt die Kaltgastemperatur stetig an. Nach 5 h, dem Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Notkühlung, sind 370 ^{o}C erreicht; danach sinkt die Kaltgastemperatur schnell wieder ab.

Als drittes Beispiel für Temperatur-Randbedingungen wird in Bild 3 der Fall wiedergegeben, daß bei Betrieb mit nur einem Linerkühlsystem dieses aus sich heraus ausfällt. Der Reaktor wird zunächst weiter betrieben. Wenn es binnen 5 h nicht gelingt, ein Linerkühlsystem wieder in Betrieb zu nehmen, wird der Reaktor abgefahren, und zwar so, daß nach weiteren 1,5 h die Kaltgastemperatur deutlich absinkt.

4. Auswahl relevanter Ereignisabläufe und Systemteile

Da die Arbeitsergebnisse allgemein aussagekräftig sein sollen, wurde von Seiten der Anlagentechnik das Spektrum der zu behandelnden Fälle bewußt sehr breit angelegt. So ergaben sich schließlich nach Umsetzung in für den SBB wichtige Daten 17 unterschiedliche Abläufe im zuvor beschriebenen Sinne, ungeachtet einzubeziehender Bandbreiten für bestimmte Temperaturen und den Innendruck. Es liegt auf der Hand, daß eine schematische Abarbeitung aller dieser Fälle für den gesamten SBB mit allen Konstruktionsdetails einen unverhältnismäßig großen Aufwand erfordern würde. Daher mußte es das Betreben sein, in möglichst frühen Stadien der Bearbeitung Einschränkungen auf möglichst wenige Teilkomplexe vorzunehmen, die die übrigen ausgesonderten mit abdecken. Dies erfolgte

- zum einen hinsichtlich relevanter Ereignisabläufe,
- zum anderen hinsichtlich relevanter Systemteile.

Ersteres konnte durch vergleichende Betrachtung der (übersichtlich graphisch dargestellten) Temperatur-Zeit-Verläufe unter Zuhilfenahme von instationären Temperaturfeldberechnungen für Normalbereiche (vgl. Abschnitt 5) in Form von Grundsatzuntersuchungen erfolgen, wobei nicht nur das Erreichen maximaler Absoluttemperaturen, sondern auch maximale örtliche und zeitliche Temperaturdifferenzen und induzierte Wärmemengen zu berücksichtigen waren. Als Ergebnis dieser Plausibilitätsbetrachtungen sind fünf Ereignisabläufe verblieben, die im Detail zu untersuchen sind. Drei davon sind zuvor unter Heranziehung der Bilder 1 bis 3 beschrieben worden. Auch eine schematische Abarbeitung aller Systemteile - insbesondere aller Durchführungen durch die SBB-Wandungen - würde eine ungerechtfertigt großen Aufwand bedeuten. Im Falle des hier untersuchten SBB bot sich die Möglichkeit, aufgrund vorliegender Temperaturberechnungen aller Detailbereiche für den stationären Betriebszustand die im einzelnen zu untersuchenden Systemteile auszuwählen. Dabei sind neben extremen Temperaturen auch geometrische und konstruktive Parameter wie Rohrdurchmesser, Blechdicken, Stutzenformen, Anordnungen der Kühlrohre, Abstände der Durchführungen untereinander usw. zu berücksichtigen. Pauschal gesprochen ergibt sich, daß neben dem Liner im ungestörten Bereich und den großen Durchführungen der zentrale Deckenbereich wegen der dichten Anordnung der Standrohre sowie drei bis vier kleinere Durchführungen - stellvertretend für alle übrigen - im einzelnen im Zusammenwirken mit der umgebenden Betonstruktur untersucht werden müssen. Sollte sich während der weiteren Untersuchungen bei einem der ausgewählten Systemteile zeigen, daß die zulässigen Beanspruchungen restlos ausgeschöpft werden, würde die Bearbeitung wiederum auf vergleichbare, bisher ausgeklammerte Systemteile erweitert werden.

5. Temperaturfeldberechnungen

Bei den durchzuführenden stationären und instationären Temperaturfeldberechnungen wurde das Prinzip verfolgt, sämtliche Effekte im Zusammenhang mit Isolierung und Kühlung zunächst an Detailmodellen zu studieren, daraus Verallgemeinerungen herzuleiten und mit deren Hilfe schließlich größere Bereiche der Struktur zu berechnen, so daß hierbei ohne ins einzelne gehende Modellabbildung sämtliche thermischen Einflüsse genügend genau erfaßt werden. In einem ersten Schritt wurden dementsprechend mittels eines Rechenmodelles mit so feiner Rasterteilung, daß ein Kühlrohr explizit abgebildet werden konnte, die Anteile des Wärmestromes durch die Schweißnaht, durch den Bereich zwischen den Schweißnähten und durch den Beton untersucht, außerdem der Einfluß der sich im Laufe einer längeren Betriebszeit einstellenden gewissen Minderung der Isolierungwirkung sowie der Einfluß von Schwankungen der Kaltgastemperatur. Die Ergebnisse aus den genannten Untersuchungen zu den Wärmestromanteilen führten zu einer vereinfachten Modellabbildung für Kühlrohre mittels äquivalenter thermischer Kennwerte.

Die Bilder 4 und 5 zeigen exemplarisch die so ermittelten Temperaturfelder in Liner-Nähe bei Betrieb mit zwei Kühlsystemen (Bild 4) und einem Kühlsystem (Bild 5). Die beschriebene Idealisierung der Kühlrohre bewirkt unmittelbar in deren Bereich eine gewisse Verschiebung der Isothermen gegenüber einer genaueren Berechnung; dies wirkt sich jedoch insgesamt nicht weiter aus. Es ergibt sich wie ersichtlich bei Betrieb mit zwei Kühlsystemen eine mittlere Betonrandtemperatur von ca. 42 ^{o}C, bei Betrieb mit einem Kühlsystem von ca. 53 ^{o}C. Bedeutsam ist das besonders in Bild 5 anschaulich werdende Phänomen, daß im liner-nahen Bereich ein deutlich steilerer Temperaturgradient besteht als in der übrigen Wandung. Das besagt, daß für Untersuchungen eines größeren Gebietes der Wandungen die Temperaturspitze am Rand - weil als örtlicher Effekt abhandelbar - ausgeklammert werden kann, so daß man mit inneren Betonrandtemperaturen von 39 ^{o}C bzw. 50 ^{o}C rechnen kann. Zusätzlich ist noch erwähnenswert, daß diese Werte für die obere Grenze des Schwankungsbereiches der Kühlwassertemperaturen gelten; als Mittelwert für Langzeit-Untersuchungen kann man von 36 ^{o}C bzw. 46 ^{o}C Betonrandtemperatur ausgehen.

Im folgenden sollen einige Temperaturprofile der SBB-Wandung in Normalbereichen im Verlauf verschiedener Störungen bzw. Störfälle gezeigt und erläutert werden, siehe Bilder 6 bis 8. Bei Bild 6 handelt es sich um die Einspeisung extremer Kühlwassertemperaturen infolge Fehlfunktion des Kühlwasser-Regelventils. Als ungünstigster Fall wird unterstellt, daß in ein System extrem warmes (54 ^{o}C) und das andere System extrem kühles Kühlwasser (12,5 ^{o}C) über einen Zeitraum von 3 h eingespeist wird. Zusätzlich wird ungünstig unterstellt, daß zuvor in dem durch die Störung aufgeheizten System die Normaltemperatur des Wassers an der oberen, im abgekühlten an der unteren Grenze der Bandbreite liegt. So ergibt sich die maximal mögliche Temperaturdifferenz von Kühlrohr zu Kühlrohr und demzufolge im Liner, nämlich ca. 22 ^{o}C. (Dieser Zustand stellt sich bald nach Störungsbeginn stationär ein.) Wie die Temperaturverläufe über die Wanddicke zeigen, handelt es sich hier ausschließlich um ein örtliches Problem für den Liner und seine Verankerungen; die Konstruktion insgesamt ist praktisch nicht betroffen.

In Bild 7 werden in gleicher Weise wie zuvor Temperaturprofile zu verschiedenen Zeitpunkten des Störfallablaufes entsprechend Bild 2 dargestellt. Es zeigt sich, daß ein Kaltgas-Temperaturanstieg auf 370 ^{o}C während 5 h bei Ausfall des einen bisher noch in Betrieb befindlichen Kühlsystems zu einer maximalen Betonrandtemperatur von nur 114 ^{o}C führt. Weiter ergibt sich, daß nach etwa 0,4 m Betondicke keine Temperaturerhöhung mehr zu spüren ist. Daraus kann geschlossen werden, daß der Gesamtbehälter nur sehr geringfügig betroffen wird; vielmehr sind die örtlichen Zwängungen näher zu betrachten. Schließlich sind noch in Bild 8 Temperaturprofile zu verschiedenen

Zeitpunkten für den Ausfall beider Kühlsysteme, ausgehend vom Betrieb mit nur einem Kühlsystem dargestellt. Auch hier handelt es sich wegen der geringen Eindringtiefe der Temperaturerhöhung augenscheinlich um ein Problem örtlicher Zwängungen. Interessant ist, daß trotz fehlender Erhöhung der Kaltgastemperatur praktisch die gleichen Temperaturen erreicht werden wie im vorigen Beispiel. Dies erklärt sich aus der "sanfteren" Abfahrprozedur, bei der die Kaltgastemperatur zunächst über 1,5 h nicht deutlich absinkt, so daß praktisch über 6,5 h betriebliche Temperaturen anstehen, sowie in gewissem Maße auch aus der vorangegangenen Aufheizung des Kühlwassers. Es besagt, daß unter den gegebenen Bedingungen eine Verlängerung des Betriebszustandes bei Totalausfall der Linerkühlung um ca. 1,5 h von gleicher Auswirkung für den SBB sein kann wie ein Ausfall der Nachwärmeabfuhr sowie der Linerkühlung über 5 h.

Die bisher gezeigten Ergebnisse von Temperaturberechnungen sowie die angeknüpften Folgerungen gelten wie gesagt zunächst nur für Normalbereiche an den Innenflächen des SBB. Die entsprechenden Berechnungen für die ausgewählten Sonderbereiche der Struktur sind zur Zeit im Gange. Das eine oder andere markante Ergebnis hiervon wird auf der Konferenz gezeigt werden.

6. Vorgehensweise bei Spannungs- und Verformungsberechnungen sowie bei der Bewertung der Ergebnisse

Die Spannungs- und Verformungsberechnungen, die zur Beurteilung des Verhaltens des SBB unter Wirkung von Störungen oder Ausfällen der Linerkühlung erforderlich sind, lassen sich unterteilen in Berechnungen für langzeitige und Berechnungen für kurzzeitige Einwirkungen. Als Langzeitproblem ist insbesondere der Betrieb mit nur einem Kühlsystem zu behandeln, der zweckmäßig konservativ als über die gesamte Behälterlebensdauer anstehend betrachtet wird. Hiervon ist der SBB als Gesamtstruktur betroffen, und zwar weil sowohl die Temperaturbeanspruchungen als auch das Kriechverhalten aufgrund des insgesamt veränderten Temperaturfeldes gegenüber dem Betrieb mit zwei Kühlsystemen verändert sind. Diese Untersuchungen werden sich darauf konzentrieren müssen festzustellen, ob trotz der in gewissem Maße geänderten Randdeformationen der Liner und die Rohrliner samt ihren Verankerungen sich noch in einem für zulässig erachteten Zustand befinden. Für die Spannbetonstruktur dürften die Veränderungen von untergeordneter Bedeutung sein; höchstens ist für örtliche Bereiche mit möglichem Übergang in den Zustand II die Bemessung der Bewehrung zu überprüfen.

Den kurzzeitigen Einwirkungen ist gemein, daß sie, wie bereits anhand der Temperaturberechnungen gezeigt, im wesentlichen von örtlicher Auswirkung sind. Daher ist es zweckmäßig, die Differenztemperaturen gegenüber den Betriebszuständen als gesonderten Lastfall zu behandeln und die errechneten Spannungen bzw. Verformungen denen der Betriebslastfälle zu überlagern. Diese Berechnungen können an Detailmodellen analog zu denen der Temperaturberechnungen erfolgen. Da es sich bei den Differenztemperatur-Lastfällen um Zwängungsbeanspruchungen handelt, ist es wichtig, zwecks Vermeidung einer Überschätzung der Zwängungsspannungen sowohl das Absinken des Elastizitätsmoduls mit steigender Temperatur als auch das bei Aufheizvorgängen stattfindende Übergangskriechen zu berücksichtigen. Die Temperaturabhängigkeit dieser beiden Materialeigenschaften ist in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Zum Übergangskriechen ist zu bemerken, daß die angegebenen Kriechzahlen unabhängig von der Spannung und in einer relativ großen Bandbreite - was jedoch im Einzelfalle zu überprüfen ist - unabhängig von der Dauer des Aufheizvorganges sind. Selbstverständlich sind diese Materialeinflüsse auf die Betriebsspannungszustände mit zu beachten.

Die Bewertung der ermittelten Spannungen bzw. Verformungen muß sich an der zu unterstellenden Häufigkeit und Dauer der Ereignisse sowie an den Anforderungen, die während dieser Ereignisse und danach an den SBB gestellt werden, orientieren. Zu diesem Zwecke ist bereits eine Einteilung in Betriebszustände, Auslegungsstörfälle und Basisstörfälle vorgenommen worden. Da in Deutschland bisher keine generell gültigen Richtlinien für die Auslegung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern vorliegen und auch für das hier beispielhaft untersuchte Objekt die Auslegungsbedingungen nicht in der genannten Kategorie-Einteilung erstellt wurden, muß die Erarbeitung der noch erforderlichen Auslegungsbedingungen im Rahmen dieses Forschungsprogrammes erfolgen. Dabei sollen im Ausland bestehende Regelwerke sowie die Kenntnisse, die in Deutschland bis heute bei der Weiterentwicklung von SBBs für HTR-Anlagen gewonnen wurden, Berücksichtigung finden. Hierüber sowie auch sonst über die Resultate des Forschungsvorhabens wird bei weiteren Gelegenheiten in der Folgezeit berichtet werden. Schon jetzt zeichnet sich indessen aufgrund von Voruntersuchungen ab, daß ein Spannbetonbehälter der hier zugrundegelegten Konzeption in der Lage sein dürfte, die im Rahmen des Forschungsvorhabens gestellten Anforderungen zu erfüllen.

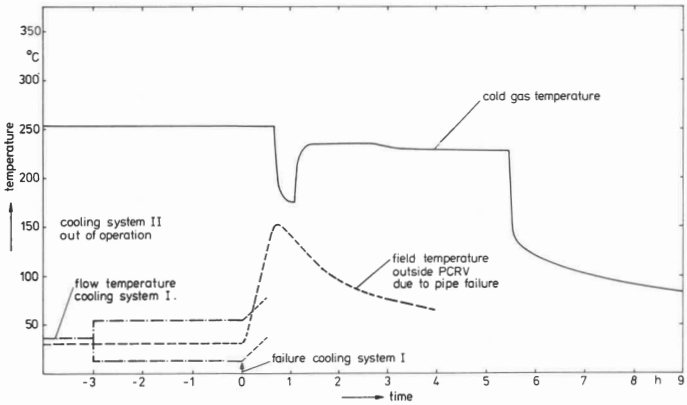

Fig. 1 Temperature conditions under pipe failure in water-steam circuit and failure of both liner cooling systems (1 system operating previously)

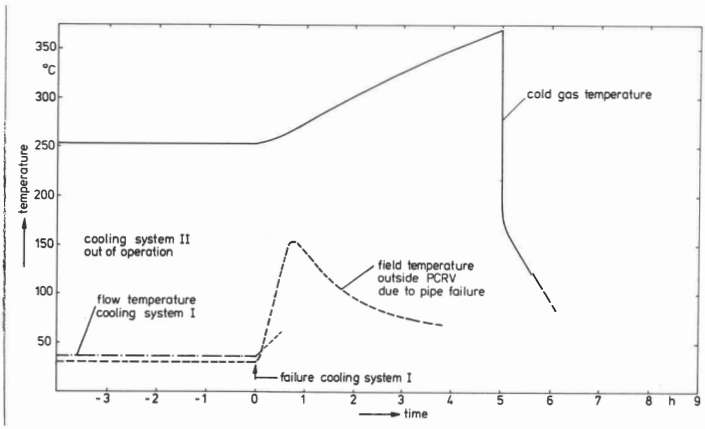

Fig. 2 Temperature conditions under pipe failure in water-steam circuit, auxiliary cooling temporary interrupted and failure of both liner cooling systems

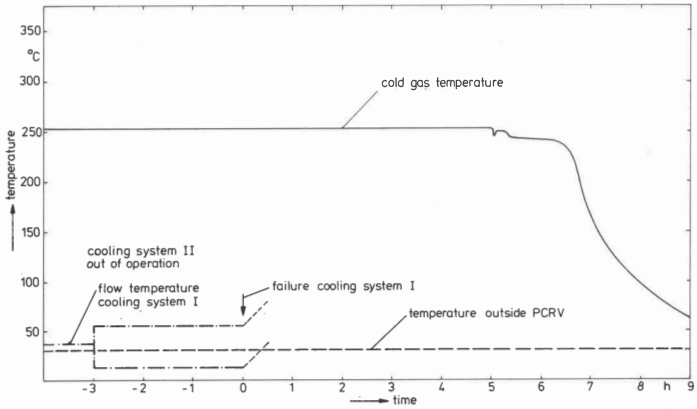

Fig. 3 Temperature conditions for service with 1 liner cooling system and failure of this system by itsself

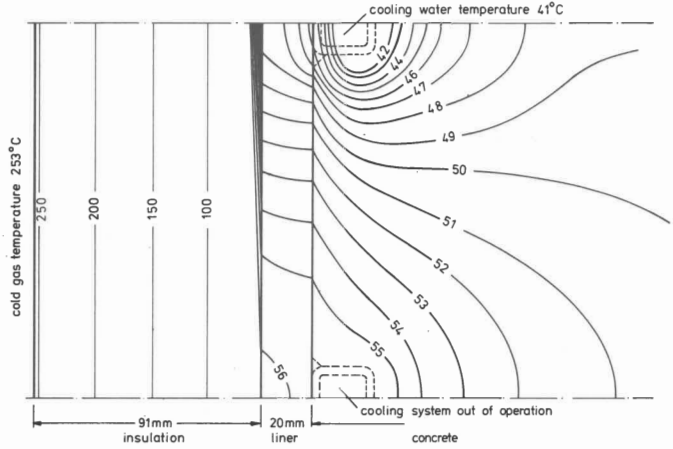

Fig. 5 Temperatures around liner under service with 1 liner cooling system

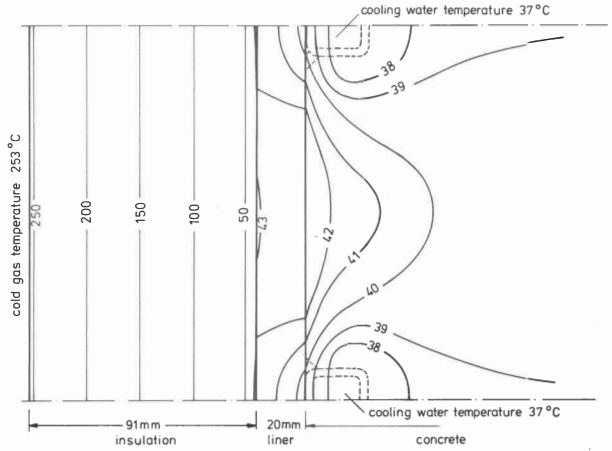

Fig. 4 Temperatures around liner under service with 2 liner cooling systems

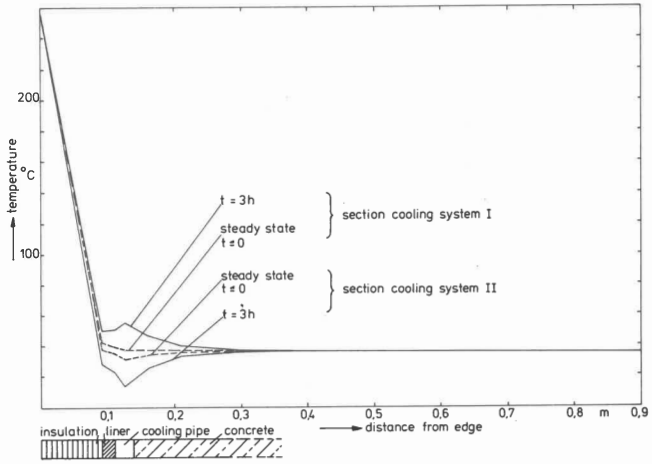

Fig. 6 Temperatures around liner under extreme cooling water temperatures

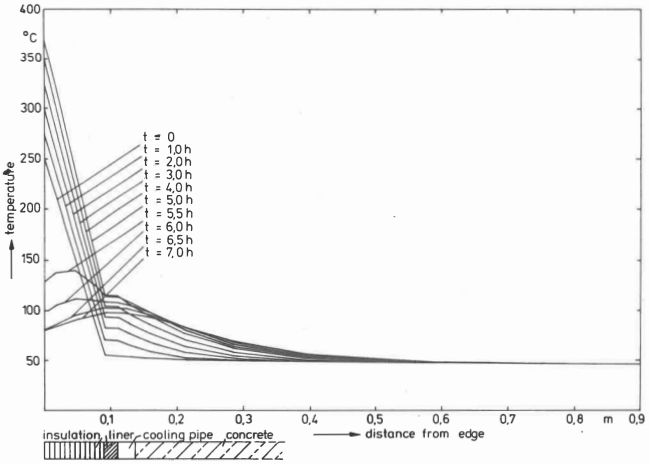

Fig. 7 Temperatures around liner, decay heat removal temporary interrupted, failure of both liner cooling systems

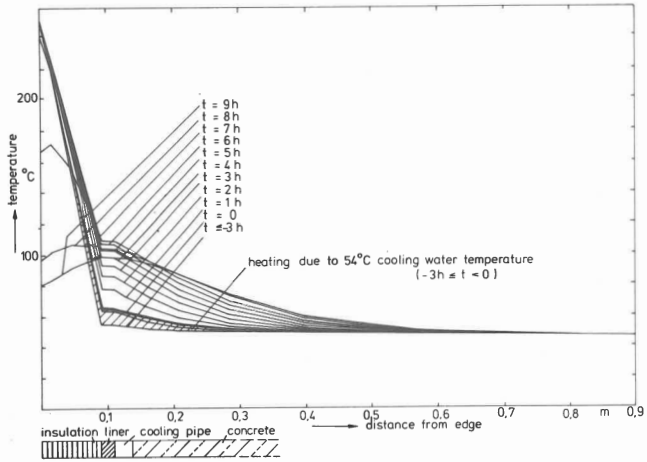

Fig. 8 Temperatures around liner under failure of both liner cooling systems (1 system operating previously)

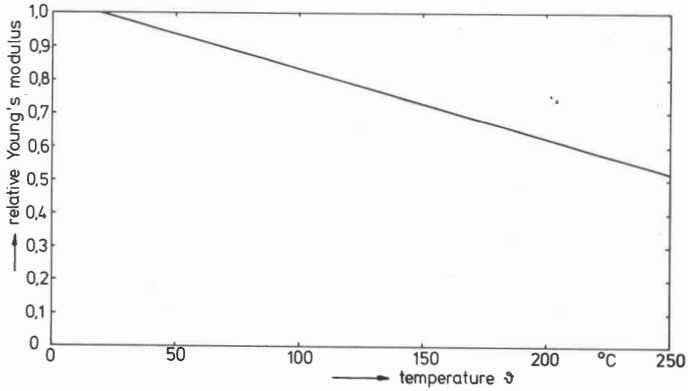

Fig. 9 Young's modulus E(ϑ) of limestone concrete (used for the calculation)

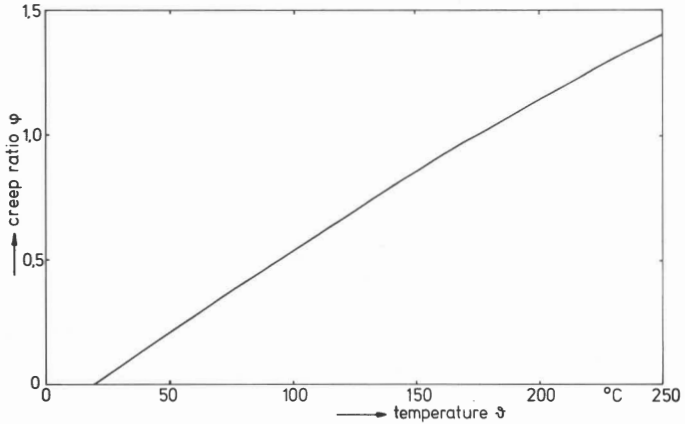

Fig. 10 Creep ratio φ(ϑ) for transitional creep (used for the calculation)