

Reaktorunfall Tschernobyl –Rückblick

Die Katastrophe und die Geschichte, wie es zu ihr kam, sind des Erinnerns wert. In einem Rückblick sollen die technischen Aspekte des Geschehenen behandelt werden. Unfallhergang und mögliche Ursachen werden aufgegriffen und diskutiert. Wir hoffen auf längeres Gedächtnis des schwerwiegenden Ereignisses vom April 1986.

Hergang

Der Betreiber plante, Block 4 außer Betrieb zu nehmen und einer längeren Reparatur- und Wartungsphase zu unterziehen. Vor oder während des Abschaltens sollte ein Dispositiv erprobt werden, mit dessen Hilfe die Schnellabschalt-Prozedur des RBMK günstiger gestaltet werden konnte. Man wollte die Rotationsenergie der auslaufenden Turbogeneratorsätze dazu verwenden, die Kühlkanäle der Brennelemente nach einer Reaktorschnellabschaltung unterbrechungsfrei zu bespeisen, auch wenn die Eigenbedarfsversorgung nicht verfügbar ist. Der Generator sollte also nach der Turbinenabschaltung noch beim Auslaufen Strom erzeugen, der dann die zugehörigen Pumpenmotoren antreibt.

Die thermische Reaktorleistung wurde innerhalb von ca. 12 Stunden von 100% auf 50% abgefahren. Nach einer weiteren Leistungsreduktion sollte das Experiment stattfinden.

In einer anderen Version wurde die Leistung von 100% ausgehend innerhalb von ca. 3h auf 50% abgefahren und dann dort beibehalten. Die zwei Versionen haben auf den weiteren Verlauf des Geschehens kaum Einfluss außer einem eventuellen Unterschied in der Xenonkonzentration des Brennstoffs zum Zeitpunkt des Versuchsbetriebs, der jedoch als gering eingeschätzt werden darf.

Nach dem Experiment sollte der Block außer Betrieb genommen werden.

Zu Beginn des 50% Betriebs kam eine Anweisung vom Netzverteiler, die Abschaltung bis auf weiteres zu verschieben. Nach ca. 10h im 50%-Betrieb wurde der Block dann zum Versuchsbetrieb freigegeben.

Der Leistungspegel zum Start des Experiments war zu ca. 25% der Nennleistung (700 – 1000 MW_{th}) geplant. Das Abfahren von 50% auf 25% misslang offenbar und ein Pegel von knapp 7% (200 MW_{th}) wurde erreicht und konnte beibehalten werden. Die Gleichgewichtswerte wurden mit relativ hohem Kühlwasserdurchsatz (ungefähr Nenndurchsatz) eingestellt. Als Testverbraucher waren vier der insgesamt 8 Hauptkreislaufpumpen ausgewählt. An ihnen sollte stellvertretend die Wirksamkeit der Anordnung demonstriert werden.

Ein wichtiger Vorgang bei der Findung des Gleichgewichts war die Einstellung des Speisewasserdurchsatzes. Zunächst wurde mit relativ hohen Werten operiert, um den Wasserstand in den Abscheidetrommeln anzupassen, und anschließend konnte der Speisewasserdurchsatz auf die Größe der entsprechenden Dampferzeugung abgesenkt werden.

Nach der Leistungsreduzierung vergingen ca. 2 Stunden, in denen das betriebliche Gleichgewicht hergestellt wurde. Anschließend begann das Experiment mit der Operation Turbinenabschaltung. Die im Leistungsbetrieb vorgesehene zugehörige automatische Reaktorabschaltung wurde unwirksam gemacht, um eine eventuelle Wiederholung des Experiments zu erleichtern (s.a. Literatur).

Die Phase des Versuchsbetriebs zwischen Turbinenabschaltung und Unfall dauerte nach Vielfach-Aufzeichnung von 1h:23min:04sek bis 1h:23min:40sek, also 36 Sekunden. Sie wird in der Literatur weniger detailliert, als es wünschenswert wäre.

Zunächst staute sich wohl der Dampf am geschlossenen Turbinenventil zu einer Druckerhöhung. Diese wird in der Literatur erwähnt und ist in der Vielfach-Aufzeichnung auch sichtbar. Wegen der damit verbundenen Verminderung des Dampfblasenvolumens fuhr eine Gruppe der automatisch gesteuerten Regelstäbe aufwärts (positiver Dampfblasenkoeffizient, Neutronenflussregelung). Ca. 10 s später wurden diese Regelstäbe wieder abwärts bewegt. Dies wird auch in der Chronologie explizit erwähnt.

Anschließend zeigt die Vielfach-Aufzeichnung keine Abnahme des Dampfdrucks sondern weiterhin einen leichten Anstieg. Trotzdem ist eher eine Reaktivitätssteigerung zu erkennen als eine Reaktivitätsminderung. Vermutlich rührte diese von dem Auslaufen der vier Hauptpumpen her. Angaben über den Verbleib von Dampf und Wärme liegen nicht vor.

Die Steuerung der Reaktivität durch die Neutronenflussregelung im o.g. Zeitraum ist von dem Einfahren der 3 Regelstab-Gruppen zu je 4 Stäbe (=12 Stäbe) bestimmt. Das war offenbar nötig, um eine im thermonuklearen System erzeugte Reaktivitätserhöhung zu kompensieren.

Die detaillierten Bewegungen der Stabgruppen sind eventuell nicht authentisch, sondern nachträglich berechnet (s.a. Literatur). In der Aufzeichnung scheinen sich die Stabgruppen eher nacheinander zu bewegen. Eine Gruppe ist bereits nach ca. 30 Sekunden nach Turbinenabschluss in Endposition, während die verbleibenden beiden Gruppen noch weitere Sekunden in Bewegung sind.

Die Vielfachaufzeichnung zeigt ca. 10 s nach Versuchsbeginn eine leichte Erhöhung des Neutronenflusses. Er soll dann unmittelbar vor der Leistungsexkursion von der eingestellten Soll-Leistung (200 MW) bis zu ca. 300 MW angestiegen sein (s.a. Literatur). Die Aufzeichnung zeigt ähnliches.

Der mit M bezeichnete Dampfdurchsatz fällt kurz nach dem Versuchsbeginn auf die Nulllinie ab und steigt erst einige Sekunden nach der Leistungsexkursion steil an. Der Speisewasserdurchsatz bleibt konstant auf seinem eingestellten Wert von <50 Kg/s (s.a. Vielfachaufzeichnung). Der Kühlwasserdurchsatz erfährt laut Literatur eine Minderung um ca. 0.8%/s, die Vielfach-Aufzeichnung zeigt ähnliches.

Die Größen Dampfgehalt-Mengenanteil, Dampfgehalt-Volumenanteil und Reaktivität verlaufen in der Aufzeichnung ansteigend. Sie sind jedoch wahrscheinlich Rechengrößen und eventuell nicht ganz authentisch. Es kann wohl ein Reaktivitätsanstieg angenommen werden, der von den einfahrenden Regelstäben nicht ganz kompensiert werden konnte, d.h. es blieb eine positive resultierende Reaktivitätsrampe.

Die Regelstäbe waren bereits Sekunden vor der Exkursion in einer Position angekommen, wo ihre Bewegung kaum noch Einfluss auf die Reaktivität hatte.

Um 1h:23min:40sek erfährt der Neutronenfluss in der Aufzeichnung eine scharfe Aufwärtsbewegung, sodass er im Sekundenbereich zu mehrfacher Nennleistung anwächst (laut Literatur 100fach). Zu diesem Zeitpunkt betätigt der Operateur das Reaktorschutzsystem, d.h. er gibt die Einfahrweisung für alle verfügbaren Absorberstäbe.

Das Einfahren aller Absorberstäbe konnte nur teilweise stattfinden (s.a. Literatur), da die Stäbe durch zerstörungsbedingte Strukturveränderungen am vollständigen Einfahren gehindert wurden.

Nach einigen Sekunden kehrte der Neutronenfluss zu niedrigeren Werten zurück und nach weiteren Sekunden kam es zu einer zweiten großen Energiefreisetzung, die in der Vielfach-Aufzeichnung ebenfalls einen Neutronenfluss-Peak zum Inhalt hatte.

Vermutlich hatten beide Exkursionen Anteil an der Zerstörung des Reaktors.

Verlaufs- und Unfallhypothesen

In der Literatur wird meist der positive Void-Effekt des RBMK 1000 als zentraler Punkt der Unfallkritik vorgebracht. Die meisten anderen wassergekühlten Leistungsreaktoren werden durch Wasser auch moderiert, was eine negative Rückkopplung der Dampfblasen auf die Reaktivität ergibt. Die ungewohnte positive Rückkopplung wurde spontan als Minderung des Sicherheitspotentials empfunden und verurteilt.

Das exponentielle Wachstumsverhalten der Kettenreaktion nach einer positiven Reaktivitätsstörung erfährt beim RBMK 1000 durch die Bildung von Dampfblasen eine Verstärkung, die – allein gelassen – eine zerstörerische Leistungsexkursion zur Folge hätte (monotone Instabilität). Die gleichmäßige nukleare Leistungsentbindung kann bei dieser Systemeigenschaft nur durch eine Leistungsregelung erreicht werden, die sich permanent der Absorberstäbe bedient.

Die negative Rückkopplung durch die Brennstofftemperatur wird auch im RBMK 1000 für die Sicherheit kaum wirksam, da ihr Einfluss zu weit ab vom Betriebspunkt liegt.

Der Zustand des thermo-nuklearen Systems vor Beginn des Versuchsbetriebs ist durch einen etwas erhöhten Xenonpegel und dem geringen Dampfgehalt im Hauptkreislauf bestimmt. Man kann auf einen Reaktivitätsmangel schließen. Das Hochfahren aller verfügbaren Absorberstäbe nach dem verunglückten Versuch der Leistungsreduzierung passt zu dieser

Annahme ebenso wie die Unmöglichkeit, eine Leistung >200 MW einzustellen. Es herrschte auch Zeitnot, da die Xenonkonzentration infolge der Leistungsreduzierung nur wachsen konnte.

Der Betrieb der nuklear beheizten Hauptkreisläufe nach dem Turbinenabschluss (Beginn des Versuchsbetriebs), wird in der Literatur wenig detailliert.

Es scheint plausibel, während des Versuchsbetriebs eine Reaktivitätszufuhr anzunehmen, wie sie auch die Aufzeichnung zeigt. Als Quellen erhöhter Reaktivität (verminderter Neutronenabsorption außerhalb des Spaltungsprozesses) kommen zunächst die Hauptkühlkreisläufe in Frage. Ihr Potential ist in dem vorliegenden Arbeitspunkt beträchtlich. Ein Anstieg des Dampf-Volumenanteils auf 100% würde einen Reaktivitätsanstieg bis zu $+5\beta$ (β =Anteil der verzögerten Neutronen, 1β bewirkt prompte Exkursion) ausmachen (s.a. Literatur). Im vorliegenden Fall des Versuchsbetriebs würde allein das geplante Abfahren des Hauptkühlwasserdurchsatzes von 100% auf 50% rechnerisch eine Zunahme der Reaktivität über den Voideffekt bis zu 1β (ein β) ergeben (unter der Annahme konstant geregelter nuklearer Leistung, d.h. resultierende Reaktivität $=0$).

Auch die Eigenschaft von parallelen Verdampferrohren, bezüglich des Dampfgehalts zwei mögliche Betriebspunkte zu besitzen, kann zu einer beschleunigten Blasenbildung führen.

Eine weitere Quelle könnte das Absorberstab-Kühlsystem sein. Auch hier hat das Wasser absorbierende Wirkung. Sein Verlust würde unabhängig vom Betriebspunkt der Anlage einen Reaktivitätsanstieg bis ca. $+2\beta$ (s.a. Literatur) verursachen. Es existiert nur der Hinweis, dass die Absorberstäbe nach Aktivierung durch den Operateur im Einfahrtvorgang behindert wurden. Ob die Hindernisse bereits vor der nuklearen Exkursion oder erst nachher entstanden, ist aus den verwendeten Unterlagen nicht zu ersehen. Eventuell kann das Entstehen der Behinderungen mit Wasserverlust verbunden sein.

Beide Werte würden jeweils ausreichen, um die automatischen lokalen Regelsysteme (geschätzter Maximalbereich ca. -0.5β) zu überfahren und die gefürchtete prompt kritische Situation zu schaffen.

Die Xenonkonzentration im Brennstoff kann in dieser Konstellation nicht Verursacher ansteigender Reaktivität sein (s.a. oben)

Die negative Reaktivitätsreserve der restlichen, nicht zur Regelung gehörigen ca. 200 Absorberstäbe betrug in diesem Zustand ca. $10-12\beta$ (s.a. Literatur). Sie wurde im fraglichen Zeitraum nicht abgerufen, sondern erst ab dem Zeitpunkt 1h23min40sek.

Auch ein Dampfstau hätte nicht zur Zerstörung des Systems führen können. Es gibt in der Literatur [3] Aussagen, dass der positive Void jedenfalls durch die Druckerhöhung beherrscht worden wäre.

Die am nächsten liegende Hypothese zur Unfallentwicklung ist dann folgende:

Die angenommene positive Reaktivitätsrampe wird durch die Wirkung der Leistungsregelung (einfahrende Regelstäbe) zunächst zu einer geringeren Größe reduziert. Am Einfahr-Endpunkt der Regelstäbe kann die Rampe dann in Originalgröße in Erscheinung treten. Das Erreichen der unteren Endposition der Regelstäbe bedeutet, dass die Leistungsregelung unwirksam wird. Das monoton instabile System von Neutronenkinetik und Voideffekt bleibt sich dann selbst überlassen und entwickelt sich unkontrolliert, was zu einem unmittelbaren, kräftigen Anstieg der Kettenreaktion (Sekunden bzw. eventuell Millisekunden bei prompter Kritikalität) führt. Hierzu trägt der Arbeitspunkt des Versuchsbetriebs bei, in dem die Verdampfung von einem Gewichtsprozent des Kühlwassers bereits ca. zwanzig Volumenprozent ergeben, was der Reaktivität von ca. 1β (ein beta) entspricht (s.o.).

Die in der Aufzeichnung gezeigte Konstellation von Reaktivität und Leistung im Sekundenzeitraum vor der Katastrophe ist allerdings nicht geeignet, um den schnellen Anstieg der Neutronenleistung zu erklären. Hierzu müsste die Reaktivität kurz vor der Exkursion einen Wert um 1β (ein beta) annehmen. Dies liegt in der Aufzeichnung erst ca. zwei bis drei Sekunden später vor. Auch eine nicht in der Aufzeichnung erfasste Reaktivitätszufuhr durch "positive scram" wäre zu spät, wenn die scram Auslösung, wie angegeben, um 1h23m40s erfolgte. Eine Beurteilung der Aufzeichnung oder ein Vorschlag zu ihrer Änderung in dieser Hinsicht wird in der verfügbaren Literatur nicht durchgeführt.

Zusätzlich entziehen sich die Bewegungen der Regelstäbe (3 autonome Stabgruppen) im Versuchsbetrieb etwas der verfahrenstechnischen Logik einer gleichmäßigen Leistungsverteilung. Eine Stabgruppe ist schon eingefahren und am Ende, während eine andere durchaus noch im wirksamen Bereich zu sein scheint. Die Entgleisung der Kettenreaktion müsste sich dann vornehmlich in einem Coreteil entwickeln und von dort auf den Rest des Cores übergreifen haben.

Nach dem ersten Anstieg des Neutronenflusses erscheint die Aufzeichnung qualitativ betrachtet sehr plausibel. Der Neutronenfluss wird durch die einfahrenden Stäbe vom Peak abgeholt. Infolge des hohen Flusses wird die Xenon-Vergiftung stark reduziert und es steht im Sekundenbereich wieder eine positive Reaktivität von β oder mehr für eine zweite Exkursion zur Verfügung. Möglicherweise haben Defekte des Stabkühlsystems Reaktivität für den zweiten Neutronenflusspeak geliefert. Die Aussage, dass die Stäbe durch Strukturveränderungen am Einfahren gehindert wurden, erlaubt die Vermutung eines Wasserverlustes des Stabkühlsystems. Dadurch könnte eine positive Reaktivität bis 2β erzeugt worden sein.

Ein eventueller „positive scram“ der Absorberstäbe würde im gezeigten und auch im postulierten Ablauf nur geringen Einfluss haben, da die Wirkung des Abschaltsystems um einige Sekunden zu spät käme – ob positiv oder negativ. Die prompte Kritikalität fand vorher statt.

Die stetige Führung der Neutronenleistung über die Absorberstäbe muss also immer gegeben sein. Für den normalen Leistungsbetrieb ist das eine gute Lösung, wie die vielen produzierenden RBMK Anlagen zeigen.

Ursachen und Abhilfen

Der Versuchsbetrieb des RBMK 4 zeigt Sicherheitslücken. Man kann ein Beobachtungsdefizit für die Entstehung der Leistungsentwicklung definieren, da nur der Neutronenfluss direkt messbar und deutlich sichtbar ist. Die Reaktivität als Summe sowie die reaktivitätssteuernden Größen wie Volumenanteil des Dampfes und Zustand im Verdampferrohr, Xenonkonzentration im Brennstoff oder Wasserverlust im Absorberstab-Kühlsystem werden nur indirekt erfasst. Der Operator kann nur durch die Beobachtung der Neutronenflussregelung auf die Bewegungen der Reaktivität rückschließen.

Eine weitere Lücke befindet sich zwischen der Automatik der Regelsysteme und der Abschaltssysteme (zumindest für den Arbeitspunkt des Versuchsbetriebs). Wenn die Regelung von einer Störung überfahren wird oder sich am Bereichsende befindet, liegt bis zum Ansprechen der Sicherheitsabschaltung ein nur vom Operator kontrollierter Zustand vor. Es scheint so, dass er nicht auf den prekären Zustand hingewiesen wurde. So konnte im ungünstigen Falle eine Konstellation entstehen, die - vom Operator unbemerkt oder unterschätzt und als ungefährlich bewertet – den Modus der Kettenreaktion vom Bereich der verzögerten Neutronen in Richtung prompter Kritikalität verschob. Dem Operator blieben dann nur Sekundenbruchteile zur Reaktion.

Eine Schließung der Steuerungslücke wäre z.B. möglich, wenn eine Automatik eingerichtet würde, die so auf eine größere Anzahl der Stäbe wirkte, dass die Regelsysteme immer in ihrem Wirkungsbereich gehalten würden.

Bei Akzeptanz der aufgeführten Hypothesen kann also festgestellt werden, dass der Operator strategisch zu schlecht ausgerüstet war, um der gefährlichen Entwicklung der Systemgrößen im vorliegenden Versuchsbetrieb erfolgreich entgegenzuwirken. Das Bemühen, das Experiment erfolgreich zu beenden, hat zu einem Konflikt geführt, der zur Verspätung der Abschaltung als adäquater Maßnahme führte.

Die strategisch richtige Handlung des Operators wäre die Mobilisierung weiterer über das Core verteilter Stabgruppen zu Beginn des Versuchsbetriebs zur Unterstützung der Regelung gewesen. Das Gelingen dieses komplexen manuellen Vorgangs wäre in improvisierter Form allerdings nicht sehr wahrscheinlich gewesen.

Zur Verfügung stehende Literatur:

- 1) Formlose Aufzeichnung mit Chronologie, Sowjetunion Sept.86
- 2) DatF Okt 86
- 3) Nuclear Engineering Jan.88
- 4) GRS 96 (Internet)
- 5) DatF 11 (Internet)

Anhang1)

Aufzeichnung Sep. 86, Sowjetunion

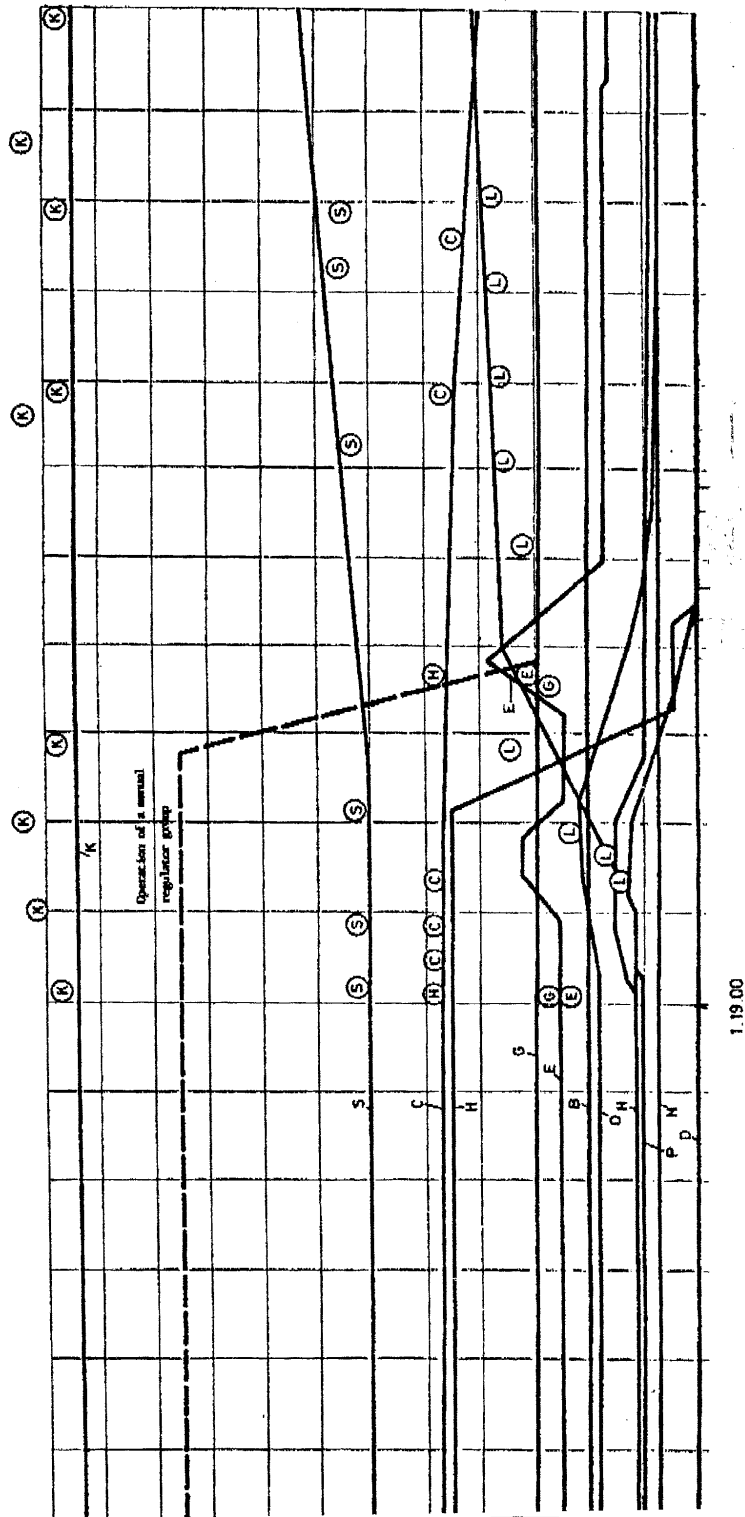
DRAFT

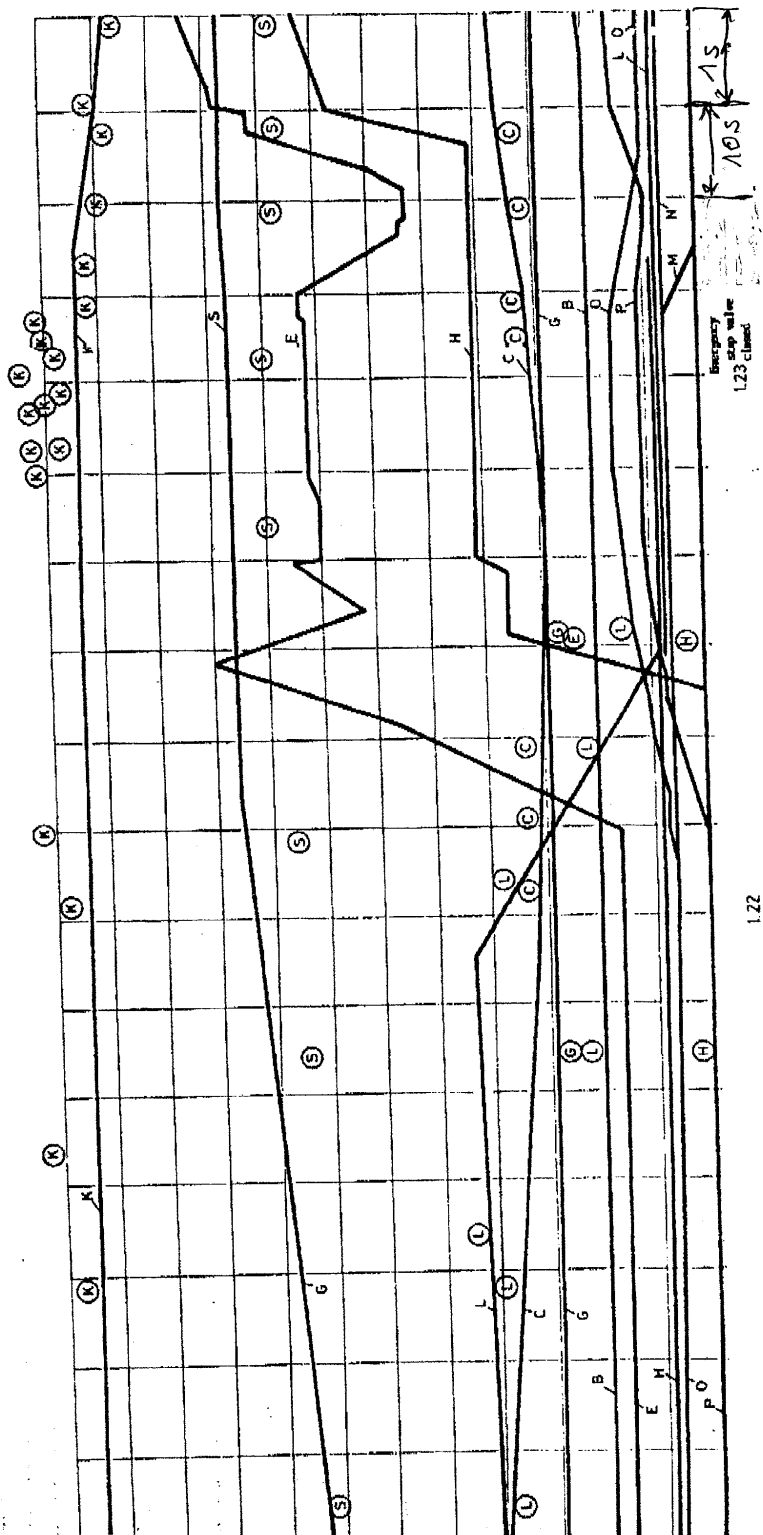
KEY TO THE CURVES ON PP. 31-32 OF GENERAL MATERIAL

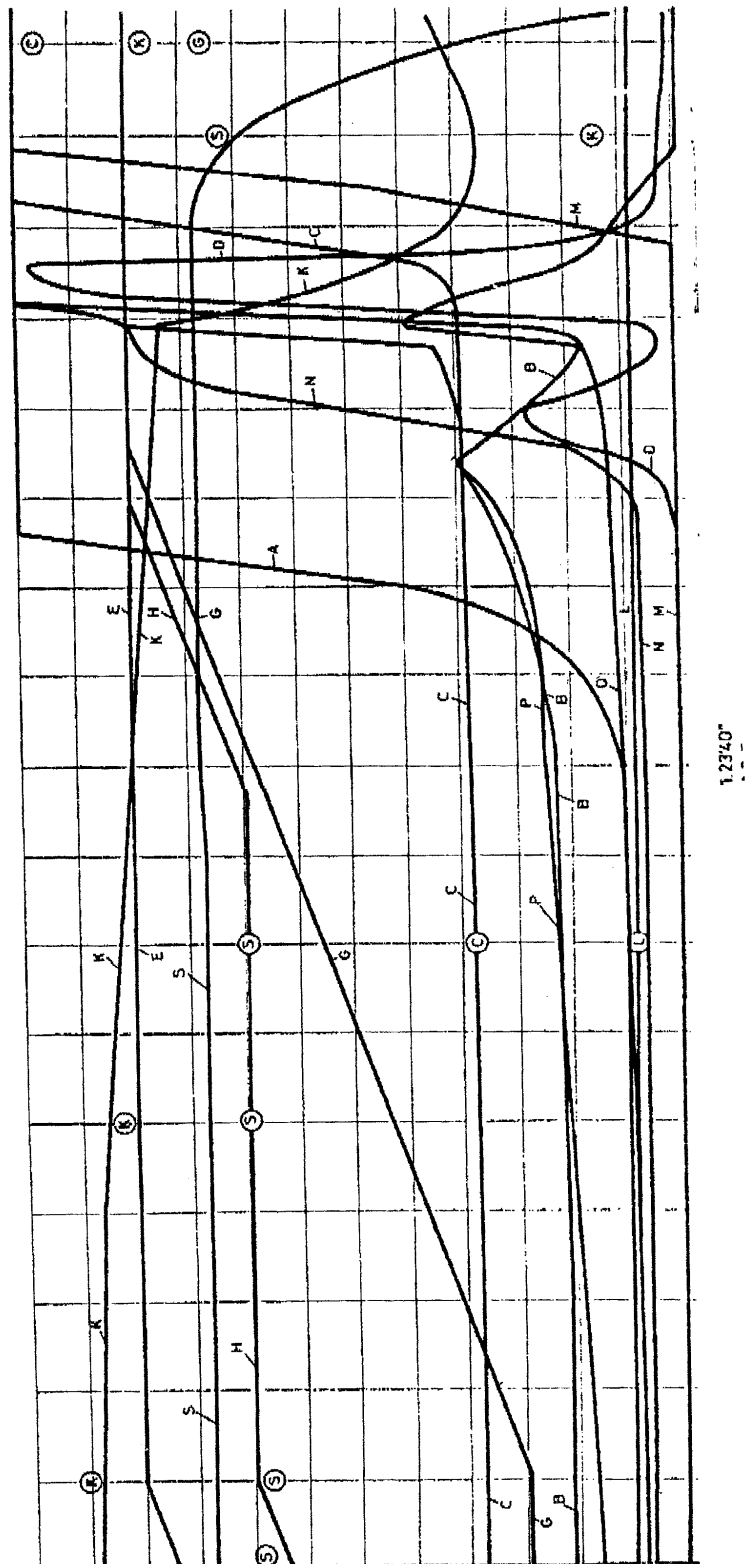
SYM	MIN	MAX
A Neutron power (%)	0	120
B Reactivity, sum. (%)	-1	+9
C Pressure, steam drum (bar)	54	90
D Neutron power (%)	0	48000
E Rod group AR-1 (fraction inserted)	0	1.2
G Rod AR-2 (fraction inserted)	0	1.2
H Rod AR-3 (fraction inserted)	0	1.2
K Flow, MCP (m^3/s)	2	8
L Flow, Feedwater (kg/s)	0	600
M Flow, steam (kg/s)	0	600
N Fuel temp. ($^{\circ}C$)	200	2000
O Steam mass quality (Exit of core, %)	0	8
P Steam vol. quality (Core average, void fraction)	0	1.2
S Level (steam drum, mm)	-1200	0

Time scale through 10 sec (0-330 sec)
then through 1 sec

A	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
B	-10.0	-5.0	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
C	54.0	57.0	60.0	63.0	66.0	69.0	72.0	75.0	78.0	81.0	84.0	87.0	90.0
D	0.0	4000.0	8000.0	12000.0	16000.00	20000.0	24000.0	28000.0	32000.0	36000.0	40000.0	44000.0	48000.0
E	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
G	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
H	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
K	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
L	0.0	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0	400.0	450.0	500.0	550.0	600.0
M	0.0	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0	400.0	450.0	500.0	550.0	600.0
N	200.0	350.0	500.0	650.0	800.0	950.0	1100.0	1250.0	1400.0	1550.0	1700.0	1850.0	2000.0
O	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
P	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
S	-1200.0	1100.0	-1000.0	-900.0	-800.0	-700.0	-600.0	-500.0	-400.0	-300.0	-200.0	-100.0	0.0







Die zugehörige Chronologie ist schwer lesbar und soll daher o.a. Literatur entnommen werden

MONITOR

Consensus growing on positive scram at Chernobyl

With the Soviets now appearing to admit that positive scram (ie positive reactivity insertion caused by entry of the control rods themselves), was a factor in the Chernobyl accident, Andrew Hall discusses recent analyses of its potential role.

In the 12 months since the Soviets presented their report on the Chernobyl accident at a special International Atomic Energy Agency Experts' Meeting in Vienna in August 1986, teams of nuclear safety specialists around the world have been assessing their description of the development of the accident.

So comprehensive was the information provided by the Soviets that it has proved possible to perform independent calculations to assist understanding of the report and to validate the Soviet analysis. Independent analyses performed by teams at the US Department of Energy (USDoE) and Atomic Energy of Canada Ltd (AECL) have been particularly valuable.

Western reviews have all confirmed the plausibility of the Soviet description of events. By the start of the fateful turbine-generator experiment, the reactor had been placed in a highly dangerous condition. It was operating at low power with a high coolant flow through the core with the result that the water in the fuel channels was just simmering

and had the potential to start boiling vigorously should the power to flow ratio increase. Under these conditions, a small increase in the power could lead to a relatively large increase of the volume of steam in the fuel channels, which, combined with the reactor's positive void coefficient, led to the reactor having a fast-acting positive power coefficient.

Soviet analysis of the initiation of the accident at Chernobyl.

	Min	Max
A. Neutron power (per cent)	0	120
B. Reactivity, sum (per cent)	-1	+5
C. Pressure, steam drum (bar)	54	90
D. Neutron power (per cent)	0	48 000
E. Rod group AR-1 (fraction inserted)	0	1.2
G. Rod group AR-2 (fraction inserted)	0	1.2
H. Rod group AR-3 (fraction inserted)	0	1.2
K. Flow, main circulation pumps	2	8
L. Flow, feedwater (kg/s)	0	600
M. Flow, steam (kg/s)	0	600
N. Fuel temp (°C)	200	2000
O. Steam mass quality (exit of core, per cent)	0	0
P. Steam vol. quality (core average, void fraction)	0	1.2
S. Level (steam drum, mm)	-1200	0

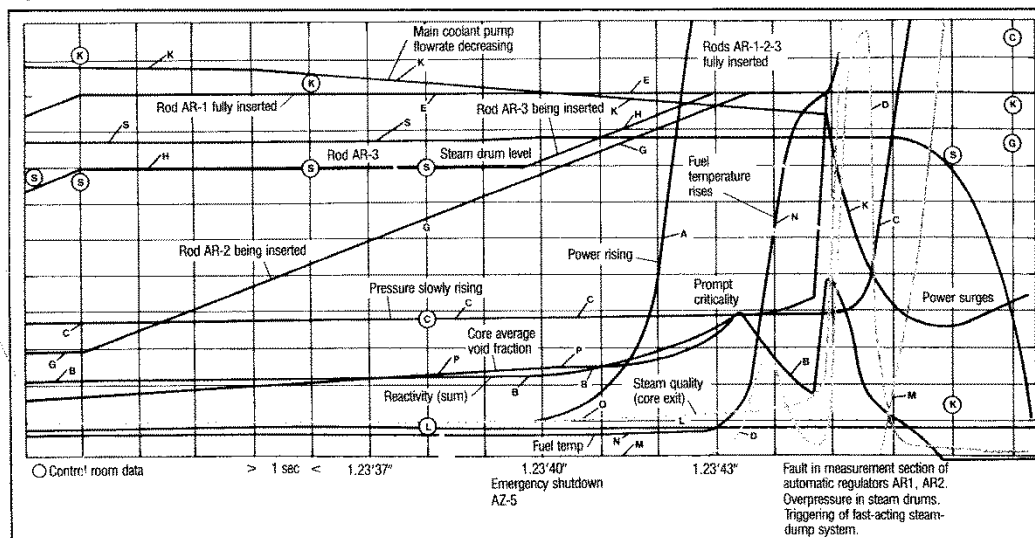
A. N. Hall is with the Safety and Reliability Directorate, UK Atomic Energy Authority, Wiggshaw Lane, Culcheth, Warrington WA3 4NE, England.

The reactor therefore was operating in an unstable condition, in which any disturbance that raised the power could lead to a rapid power escalation through positive feedback. The design was fundamentally flawed in allowing such a circumstance to arise. In the event, it was the run-down of four main circulation pumps when the turbine-generator experiment was begun that initiated the power escalation.

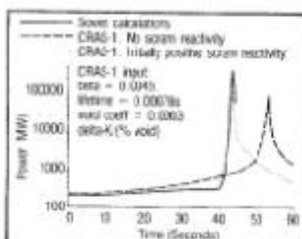
USDoE analyses. Following the Chernobyl accident last year, the USDoE team assembled a suite of computer codes to analyse the entire accident sequence and to assess the quantitative validity of the Soviet description of events. When the Soviets released their report of the accident, considerable effort was put into obtaining a full understanding of the development of the power surge, illustrated in the, now famous, Soviet figure below.

As a result, the team was able to draw attention to two areas where particular care is needed in the interpretation of the figure. First, the control rod motion in the figure is hypothetical, although it is clear that the local automatic control rods were being inserted during the final moments of the accident. Second, the USDoE analyses have shown consistently that the pressure build up in a closed system suppresses a power excursion, so steam must have been released. It is understood that the Soviets have since confirmed that this did indeed occur. This lends support to a USDoE claim that curves M and O of

continued on page 18



MONITOR



CRAS-1 analyses of the Chernobyl 4 power excursion, compared with Soviet calculations. An insertion of positive reactivity on scram is needed for the curves to match up.

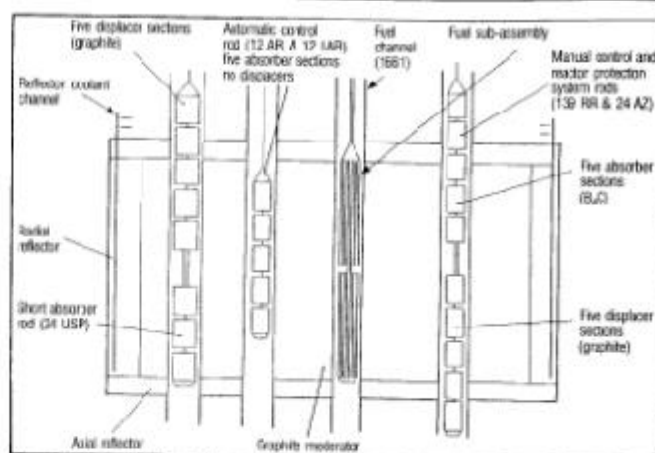
continued from p.16

the Soviet figure are labelled incorrectly.

The USDoE team have analysed the Chernobyl power surge by using the MINET and CRAS thermal-hydraulics computer codes, both of which include a simple reactivity model. These code runs clearly demonstrated the type of transient displayed in the Soviet figure, that is a power excursion driven by the large positive void coefficient. With both codes, however, it was necessary to introduce a transient positive reactivity addition (10c for MINET, 15 for CRAS) at about the time that the emergency shutdown button was pressed in order to obtain detailed agreement with the timing of the power surge in the Soviet figure.

Transient positive reactivity addition. The USDoE team's investigation of potential causes for such a reactivity addition revealed what is thought to be a serious flaw in the design of the reactor's control system. The control rods moved within dedicated control rod channels and were cooled by water. In BWR reactors, however, the main neutronics effect of water is as an absorber, so if water took the place of the control rods as they were withdrawn from the reactor, the effect of withdrawal would be reduced. To counteract this, long non-absorbing graphite rods known as followers were suspended below all of the top entry control rods, to take their place as they were withdrawn.

Due to height restrictions within the reactor, however, the graphite followers had to be made shorter than the fuelled region of the core. Consequently, when the control rods were fully withdrawn from the core, the followers did not occupy the full length of the control rod channels and the bottom 1.2m contained just water. A potentially dangerous situation could therefore arise. If control rods were

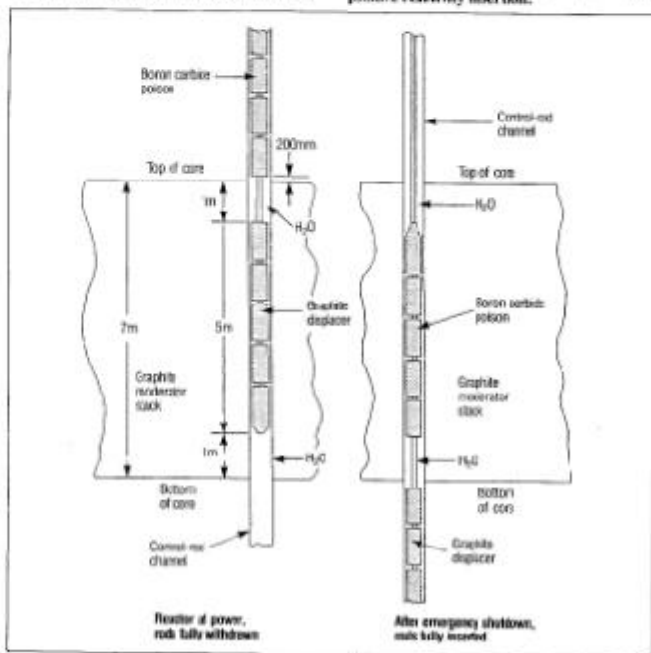


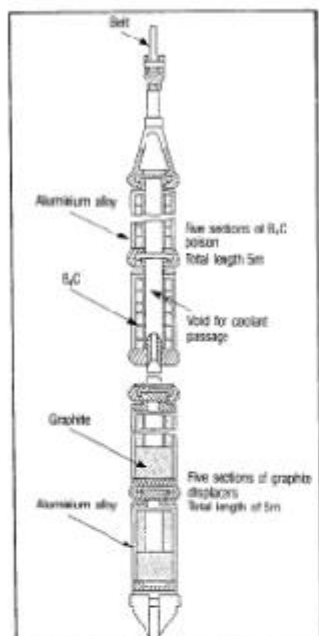
The structure of the Chernobyl core.

inserted from the fully withdrawn position, the water at the bottom of the core would be displaced by the graphite followers and there could be a transient local positive reactivity addition, the so-called "positive scram" effect. Such was the situation after the operators of the Chernobyl reactor noticed that the

power was beginning to rise and pressed the emergency shutdown button. It now appears that this action could have significantly increased the magnitude of the power surge.

Positions of the control rods at power (left) and after emergency shutdown (right). As the reactor scrammed the water at the bottom of the control rod channel was ejected, causing a positive reactivity insertion.





Design of the RBMK's top entry control rods.

AECL analyses. A team at AECL have performed a detailed analysis of the Chernobyl power surge and the role of the suggested transient positive reactivity addition. They have shown that the immediate effect of the insertion of the fully withdrawn control rods would have depended crucially upon the conditions in the reactor at that time. The neutron flux spatial distribution at the moment of rod insertion is of particular importance and this depends on the irradiation history of the core and the positions of all the control rods.

In most circumstances, the increase of reactivity at the bottom of the core would have been overwhelmed by the reduction in reactivity caused by entry of the control rods at the top of the core and the reactor would have shut down. Prior to the turbine-generator experiment, however, xenon poisoning of the core and the withdrawal of almost all the control rods had caused an unusual double-humped vertical neutron flux profile to develop. The top and bottom halves of the reactor could therefore have acted to some degree independently. A transient local positive reactivity addition could then have contributed significantly to the severity of the power surge in the bottom half of the core and might even have initiated its rapid development.

January 1988

Present position. Without a more detailed knowledge of the exact conditions in the Chernobyl reactor at the time of the accident than is currently available, it is not possible to quantify the transient positive reactivity addition with any precision. None the less it does appear very likely that the attempt to shut down the reactor did initiate such an event and that this contributed to the severity of the power surge.

Some additional evidence for this may be found in the fact that the Soviets have now adjusted the control rod linkages on RBMK reactors to ensure that the graphite followers can never be withdrawn above the bottom of the core. This move is, of course, related to the positive void coefficient of RBMK reactors as the displacement of water from an RBMK core causes the reactivity to rise, whether it be by steam production or movement of the graphite followers.

People in Sweden have claimed that pump cavitation and subsequent

voiding at the bottom of the core was the most important contributor to the reactivity insertion. However, hydraulic analyses in Canada and Britain suggest that, whilst pump cavitation could have led to local boiling within the pump, it is unlikely that bubbles would have been discharged from the pump into the core. In addition, it is felt that, unless large bubbles formed at the pump inlet, cavitation would have had little effect on the coolant flow rate.

Whether the transient positive reactivity addition simply caused the power to surge several seconds earlier than otherwise, as suggested by the USDoE analyses, or whether it was so potent as to have initiated the rapid power surge, as indicated by the AECL analyses, will only be elucidated if the Soviets provide more detailed information about the state of the core at the time of the accident. Either way, however, the potential for it to exist at all must be regarded as a serious design shortcoming. □

Anhang 3)

Anmerkung zur Xenon-Entwicklung

Die Xe-Entwicklung berechnet sich nach den Gleichungen:

$$\frac{dJ}{dt} = c_1 * \Phi - c_2 * J$$

$$\frac{dX}{dt} = c_2 * J + c_3 * \Phi - c_4 * \Phi * X - c_5 X$$

mit J – Jod, X – Xenon, Φ – Neutronenfluss, $c_{1...5}$ – Konstanten

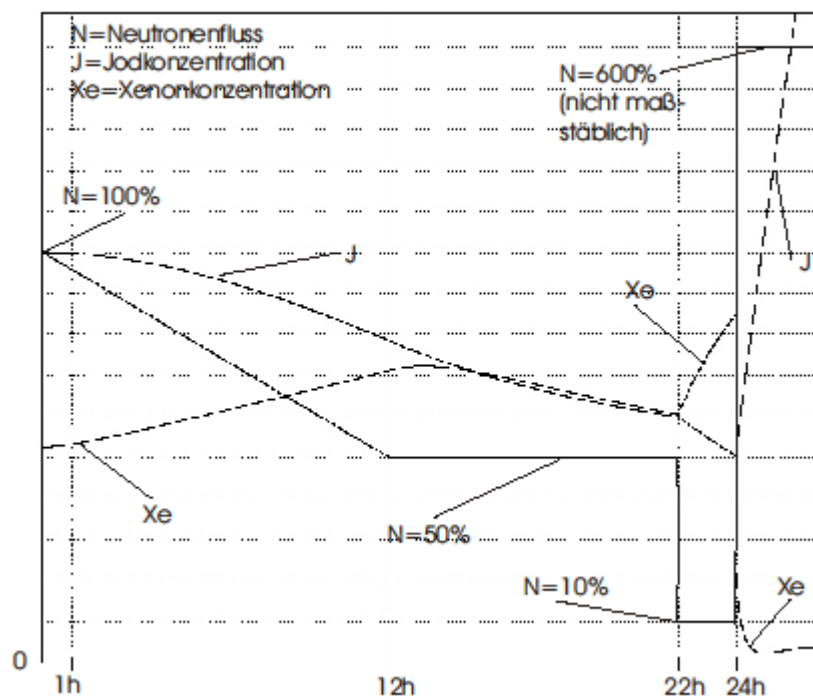


Abb1. Tendenzielle Xenonentwicklung

Anhang 4)

Relation Gewichtsprozent zu Volumenprozent

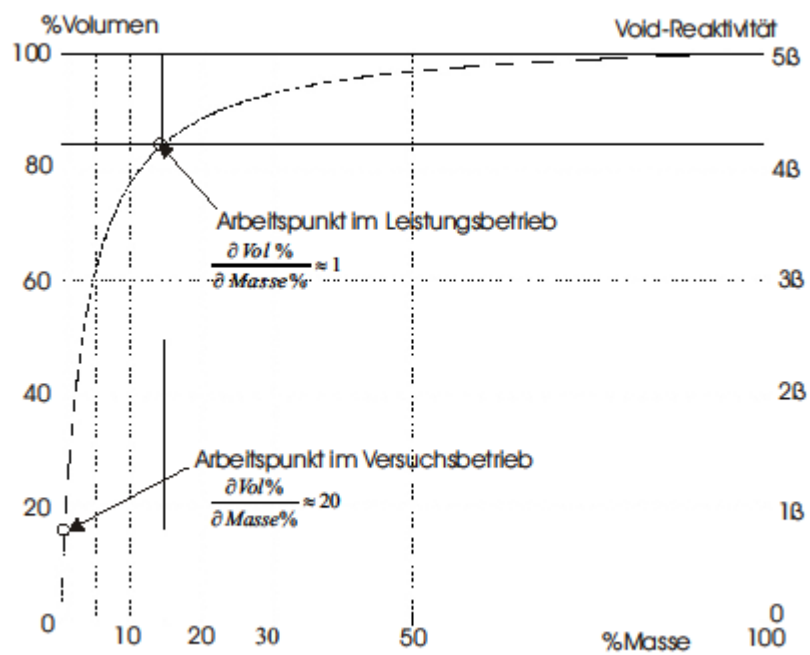


Abb.1) Einfluss des Arbeitspunkt auf die Reaktivität

Anhang 5)

Aspekte zur Neutronenfluss-Entwicklung

Zur Berechnung wurden folgende Gleichungen und Zahlenwerte verwendet:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{\infty}}{l_p} (\rho - \beta) * n + \lambda * N$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{k_{\infty}}{l_p} * \beta * n - \lambda * N$$

mit n – Neutronenfluss, N – verzögerte Neutronen, $k_{\infty} = 1$, $l_p = 0.0014$, $\lambda = 0.1$, $\beta = 0.0075$,
 ρ – Reaktivität

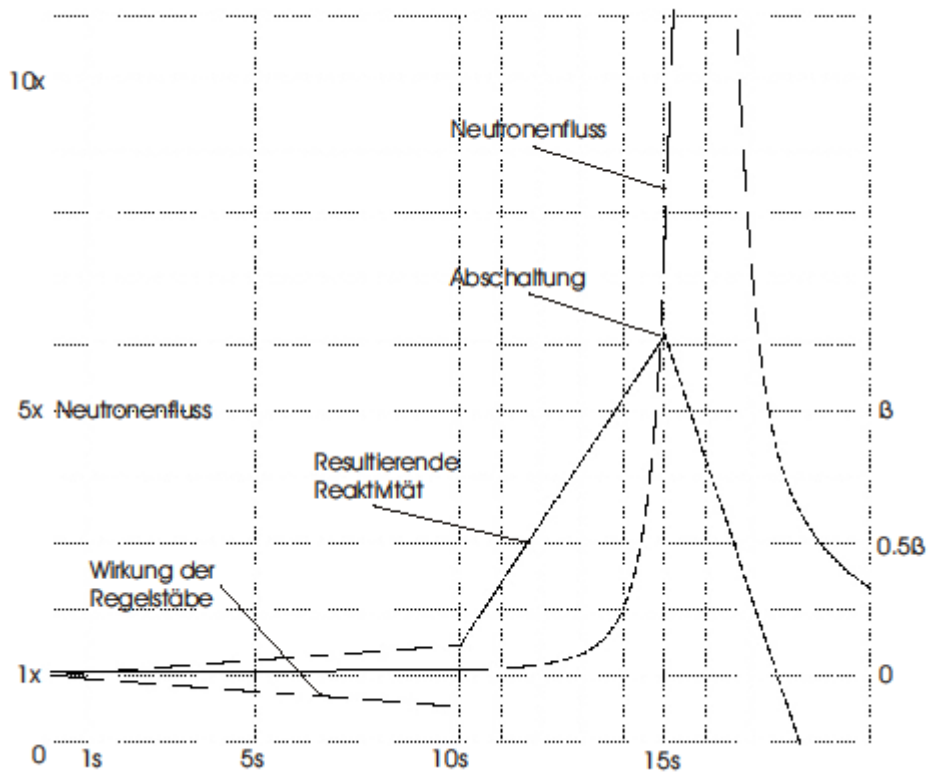


Abb.1) Nachstellung einer Neutronenflussentwicklung als Funktion der Reaktivität