

Tschernobyl: Kurzbeschreibung des Unfallablaufs und seiner Ursachen

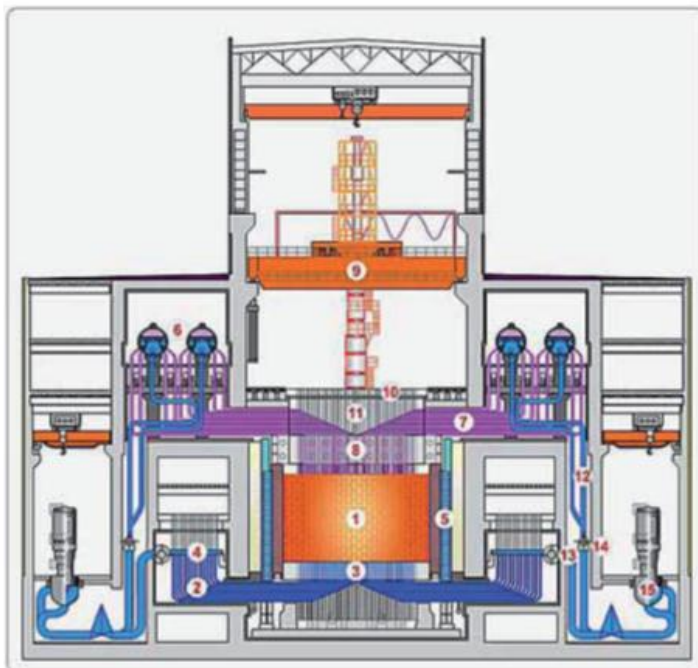
Der Unfall in Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl ereignete sich bei einem Versuch, mit dem Sicherheitseigenschaften des Not- und Nachkühlsystem des Reaktors nachgewiesen werden sollten. Der Ablauf und die Ursachen des Unfalls sind ausführlich analysiert worden. In der Fachwelt herrscht seit vielen Jahren weitgehend Einigkeit darüber, dass der Unfall auf das Zusammenwirken verschiedener Faktoren zurückzuführen ist. Zu diesen Faktoren zählen zum einen die mit der Auslegung der Reaktorbaulinie RBMK verbundenen reaktorphysikalischen Eigenschaften, die schwerwiegende Nachteile für die Betriebssicherheit mit sich brachten. Zum anderen gehörte einemangelhafte Sicherheitskultur zu den Ursachen. Sie zeigte sich darin, wie der Versuch geplant und durchgeführt wurde, aber auch in der unzureichenden Bewältigung von bereits bekannten Sicherheitsproblemen. Zum Verständnis wie und warum sich der Unfall ereignen konnte, werden im Folgenden zunächst die beiden Komplexe reaktorphysikalische Eigenschaften und Sicherheitskultur erläutert. Den Unfallablauf stellt anschließend die Chronologie der Ereignisse am 25. und 26. April 1986 dar.

1. Der Reaktortyp RBMK

Die Reaktorbaulinie, zu der auch der Unfall-Reaktor in Tschernobyl gehört, trägt die Abkürzung „RBMK“. Diese steht für „*Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny*“ und heißt übersetzt „Reaktor mit großer Leistung vom Kanaltyp“. Die Entwicklung dieses Typs Mitte der 1960er-Jahre verfolgte zunächst auch das Ziel, waffenfähiges Material zu gewinnen. Später bot sich der RBMK wegen seiner Bauweise aus Sicht der Sowjetunion dazu an, in relativ kurzer Zeit mit bekannten Komponenten und Systemen eine bedeutende Anzahl großer Leistungsreaktoren zu errichten.

1.1 Aufbau und Funktionsweise des RBMK

Beim RBMK handelt es sich um einen graphitmoderierten leichtwassergekühlten Siedewasser-Druckröhrenreaktor. Der Reaktorkern besteht aus etwa 2500 Graphitsäulen. Er ist zusammengesetzt aus einzelnen Blöcken unterschiedlicher Länge und weist eine Gesamthöhe von 7 m und einem Durchmesser von 11,8 m auf. Vertikale Bohrungen in den Graphitsäulen nehmen die Druckrohre (Anzahl ca. 1661 – 1693) und die Rohre für Regel- und Schutzsysteme (211 Steuerstäbe) auf. In jedem der Druckrohre befindet sich ein etwa 7 m langes Brennelement, das aus zwei Brennstabbündeln mit je 18 Brennstäben besteht. Es wird von unten nach oben vom Kühlmittel Wasser umströmt. Durch die von den Brennelementen ausgehende Hitze wird das Kühlmittel teilweise verdampft: Am oberen Ende, dem Kernaustritt, besteht es bei einem Druck von 70 bar zu etwa 15 - 30 % aus Dampf mit einer Temperatur von 286 °C. Durch die Wasser-Dampf-Kreisläufe (insg. zwei, je Kernhälfte ein Teilkreislauf) gelangt das Kühlmittel dann zu Dampfseparatoren. Der dort abgetrennte Dampf wird schließlich über die Frischdampfleitungen zu Turbinen geleitet, die ihrerseits Generatoren antreiben. Mit insgesamt zwei solchen Turbosätzen kommt der RBMK auf eine elektrische Leistung von 1000 MW.



- 1 Reaktorkern
- 2 Leitungen der unteren Wasserkommunikation
- 3 Unteres biologisches Schild
- 4 Gruppenverteilersammler
- 5 Seitliches biologisches Schild
- 6 Dampfseparatoren
- 7 Dampf-/ Wasserleitungen
- 8 Oberes biologisches Schild
- 9 Brennelement-Wechselmaschine
- 10 Reaktordeckel (Obere Abdecksteine)
- 11 Standrohre der Brennelementkanäle
- 12 Fallrohre (Downcomer-Leitungen)
- 13 Druckseitiger Sammler der HUP
- 14 Saugseitiger Sammler der HUP
- 15 Hauptumwälzpumpen (HUP)

Schematische Darstellung des Aufbaus eines RBMK-Reaktors der 1. Generation.

Die Reaktoren der 1. RBMK-Generation verfügen nicht über ein sogenanntes Containment. In den meisten Kernkraftwerken westlicher Bauart sind die nuklearen Komponenten (insb. der im Reaktordruckbehälter befindliche Reaktorkern) von einem solchen Containment umschlossen. Das Containment bildet dadurch eine von mehreren Barrieren gegen eine Freisetzung radioaktiver Stoffe. Bei der 2. Generation der RBMK-Reaktoren – zu diesen gehört der Unfall-Block 4 in Tschernobyl – stellen die unterhalb des Kühlkreislaufs befindlichen Druckkammern zusammen mit den Kondensationseinrichtungen einen partiellen Sicherheitseinschluss dar. Die übrigen Komponenten des Reaktorkühlkreislaufs, wie die Frischdampfleitungen oberhalb des Reaktorkerns und die Dampfseparatoren sind jedoch nicht im Sicherheitseinschluss angeordnet.

1.2 Defizite in der reaktorphysikalischen Auslegung

Bei dem Reaktorunfall von Tschernobyl handelte es sich um einen sogenannten Reaktivitätsstörfall. Darunter wird ein Störfall verstanden, bei dem die Rate der Kernspaltungen und damit die Leistung des Reaktors stark ansteigen. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen kann ein solches Ereignis im Extremfall zu einem plötzlichen und unkontrollierbaren Leistungsanstieg führen, der zur Zerstörung des Reaktors führt. Die explosionsartige Leistungsexkursion in Tschernobyl konnte nur entstehen, weil zu dieser Zeit die RBMK-Reaktoren im Gegensatz zu den Leichtwasserreaktoren westlicher Bauart eine Reihe von besonderen reaktorphysikalischen Eigenschaften mit gravierenden Nachteilen für die Sicherheit aufwiesen.

1.2.1 Positiver Voideffekt

Die mit Blick auf die Sicherheit wohl gravierendste nachteilige Eigenschaft des RBMK betrifft den sogenannten „Voideffekt“, d. h. den Zusammenhang zwischen der Bildung von Dampfblasen im Kühlmittel bzw. im Moderator und der Reaktivität eines Reaktors.

In Leichtwasserreaktoren übernimmt das durch den Reaktorkern strömende Wasser zwei Funktionen. Es dient zum einen als Kühlmittel, mit dem die Wärme aus dem Reaktorkern abgeführt wird. Zum anderem sorgt es als Moderator dafür, dass die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen moderiert, d. h. „abgebremst“ werden. Dies ist erforderlich, um eine kontrollierte Kettenreaktion in Gang zu halten, denn nur moderierte Neutronen sind in der Lage, in ausreichender Zahl weitere Atomkerne zu spalten. Gleichzeitig wirkt Wasser aber auch als Neutronenabsorber, verringert also die Anzahl der potenziell für eine weitere Kernspaltung zur Verfügung stehenden Neutronen. Die Moderatoreigenschaft des Wassers verringert sich, wenn seine Dichte z. B. durch die Bildung von Dampfblasen sinkt. In diesem Fall, aber auch beim Verlust von Wasser in Folge eines Kühlmittelverluststörfalls, stehen weniger moderierte Neutronen für Kernspaltungen zur Verfügung, so dass die Reaktivität des Re-

aktors und damit seine Wärmeleistung sinken. Diese für Leichtwasserreaktoren typische Eigenschaft wird als „negativer Voideffekt“ bezeichnet.

Bei RBMK-Reaktoren ergibt sich hingegen aus der Verwendung von Graphit als Moderator und von Wasser als Kühlmittel ein positiver Voideffekt. Das Kühlmittel Wasser wirkt auch hier zugleich als Neutronenmoderator und als Neutronenabsorber. Während die Moderatorwirkung des Wassers im

Kernspaltprozess Bei der Kernspaltung entstehen neben Spaltprodukten 2-3 schnelle Spaltneutronen. Sie werden zu > 99 % sofort (prompt) und zu < 1 % (Bruchteil β) verzögert freigesetzt.					
	effektiver Multiplikationsfaktor k_{eff}	< 1	= 1	$\leq 1 + \beta$	> 1 + β
	Reaktivität ρ $\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$	negativ	0	positiv zwischen 0 und β	positiv > β
	Reaktorzustand	unterkritisch, keine Kettenreaktion	kritisch, stabile Kettenreaktion	verzögert-überkritisch, bei geeigneter Kernausslegung und Regelung kontrollierbar	prompt-überkritisch
	Energiefreisetzung (Leistung) aus Kernspaltung	sinkt oder bleibt Null	konstant	wächst kontrollierbar (z.B. während des Anfahrens)	wächst unkontrollierbar bei unzureichenden negativen Rückwirkungen

Verhältnis zu der des Graphits nur eine untergeordnete Rolle spielt, hat seine Wirkung als Absorber einen erheblichen Einfluss auf die Reaktivität des Reaktors: Verringert sich seine Dichte durch Dampfblasenbildung oder Kühlmittelverlust, so werden deutlich weniger Neutronen absorbiert. Dies hat zur Folge, dass im Reaktorkern mehr moderierte Neutronen vorhanden sind, die weitere Kernspaltungen auslösen können. Erhöhter Dampfgehalt in den Druckrohren eines RBMK-Reaktors bewirkt also eine erhöhte Reaktivität und damit nimmt die Wärmeleistung des Reaktors zu. Durch diesen Leistungsanstieg verdampft wiederum mehr Wasser, so dass sich der vorbeschriebene Effekt weiter verstärkt.

Wie ausgeprägt der positive Voideffekt des RBMK ist, hängt von verschiedenen im Betrieb veränderlichen Faktoren ab – zu unterschiedlichen Zeiten herrscht also ein unterschiedlich hoher positiver Voideffekt. Eine Reihe dieser Faktoren spielen eine Rolle für das Verständnis des Unfallablaufs:

Betriebliche Reaktivitätsreserve (ORM). Ein reaktorphysikalischer Parameter mit großem Einfluss auf die Höhe des positiven Voideffekts stellt die sogenannte „betriebliche Reaktivitätsreserve“ (englisch: operational reactivity margin – ORM) dar. Der ORM-Wert ist das Reaktivitätsäquivalent aller (ganz oder teilweise) in den Kern eingefahrenen Steuerstäbe. Die im Jahre 1986 gültigen Betriebsvorschriften forderten, dass im Leistungsbetrieb der ORM-Wert mindestens 26 bis 30 Steuerstäbe betragen muss (minimal erlaubt waren 15). Diese Reserve dient u. a. betrieblichen Zwecken, sie darf wegen des Zusammenhangs mit dem Voideffekt aber auch aus sicherheitstechnischen Gründen nicht unterschritten werden.

Betrieb in niedrigem Leistungsbereich. Bei niedriger Leistung ist der positive Voideffekt besonders hoch. Anders als im Vollastbetrieb führen Änderungen der Leistung hier zu größeren Änderungen des Dampfgehalts im Reaktorkern.

Hoher Abbrand. Der positive Voideffekt steigt mit zunehmendem Abbrand des Kernbrennstoffs in den Brennelementen an. Unter Abbrand wird die Menge an Wärmeenergie verstanden, die während des Betriebs pro Masseneinheit in einem Brennelement erzeugt wurde.

Der hohe positive Voideffekt von Reaktoren der RBMK-Baureihe und die daraus resultierenden Nachteile für die Sicherheit waren in der Sowjetunion bereits lange vor dem Unfall bekannt. Schon 1975 war es im Kernkraftwerk Leningrad-1 zu einem lokalen Reaktivitätsstörfall mit Schäden am Reaktor gekommen. Nachfolgende Analysen hatten dabei u. a. die Zusammenhänge zwischen Abbrand und Anreicherung des Brennstoffs mit der Höhe des Voideffekts gezeigt. In der Rückschau wurde deutlich, dass alle für den Unfall maßgeblichen bauartbedingten Faktoren – auch der nachfolgend beschriebene positive Reaktivitätseffekt des Abschaltsystems – bereits vor dem Unfall in Tschernobyl bekannt waren. Dass diese Schwachstellen nicht bzw. nur unzureichend behoben wurden, ist ein Beispiel für die unzureichende Sicherheitskultur.

1.2.2 Positiver Reaktivitätseffekt des Abschaltsystems

Neben dem positiven Voideffekt spielte eine weitere reaktorphysikalische Besonderheit der RBMK-Anlagen eine maßgebliche Rolle für den Unfallablauf: der positive Reaktivitätseffekt des Abschaltsystems. Wird ein ausgefahrener Steuerstab wieder von unten in den Kern eingefahren, verdrängt ein aus Graphit bestehender Teil des Steuerstabs die im Rohr befindliche Wassersäule. Damit wird an dieser Stelle des Reaktorkerns ein Neutronenabsorber (das Wasser) durch einen Neutronenmoderator (das Graphit) ersetzt. Dadurch wird im ersten Moment lokal das Gegenteil der beabsichtigten Wirkung erreicht: Die Reaktorleistung wird nicht durch das Einbringen negativer Reaktivität (mit der Folge der Absorbierung von Neutronen) verringert, sondern durch positiven Reaktivitätseintrag (in Folge der zusätzlichen Moderation von Neutronen) im unteren Teil des Kerns erhöht. Dieser Effekt wird auch als "positiver

Abschalteffekt" bezeichnet. Ein weiteres, unabhängiges und innerhalb weniger Sekunden wirkendes Abschaltssystem gab es in den RBMK-Anlagen zu dieser Zeit nicht.

2. Der Versuch

Vom 25. auf den 26. April 1986 sollte Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl planmäßig für eine Revision abgefahren werden. Während des Abfahrvorgangs sollte ein sogenannter Inbetriebsetzungsversuch nachgeholt werden, der normalerweise im Rahmen des Probetriebs durchzuführen gewesen wäre.

Mit dem Versuch sollten bestimmte Sicherheitseigenschaften des Not- und Nachkühlsystems geprüft werden. Ein Zweck dieses Systems besteht darin, im Fall eines Kühlmittelverluststörfalls die Kühlung des Kerns weiter zu gewährleisten. Nach dem damals geltenden sowjetischen Regelwerk war nachzuweisen, dass diese Funktion auch im sogenannten Notstromfall, d. h. einem Ausfall der für den Normalbetrieb vorgesehenen Stromversorgung, gegeben ist. Zu diesem Zweck sollte nach der Auslegung der RBMK in der Zeit zwischen dem Ausfall der normalen Stromversorgung und dem Hochlaufen der Notstromdieselgeneratoren die Rotationsenergie der auslaufenden Turbinen dazu genutzt werden, die für die Notkühlung benötigten Pumpen für einen von drei Notkühlsträngen anzutreiben. Der Nachweis dieser Funktion konnte bei vorhergehenden Versuchen nicht erbracht werden. Letztlich hatte Block 4 bereits im Dezember 1983 seinen Leistungsbetrieb ohne den geforderten Nachweis aufgenommen.

Mitursächlich für den Unfall waren aber vor allem die mangelhafte Planung und Durchführung des Versuchsprogramms. So war der Versuch fehlerhafterweise als rein konventioneller Versuch eingestuft. Dabei wurde außer Acht gelassen, dass der Versuch über eine Erhöhung des Dampfgehalts im Kühlmittel zu einem höheren Voideffekt führen und damit unmittelbaren Einfluss auf die Reaktivität des Reaktors haben würde. Diese Fehleinschätzung führte zunächst dazu, dass bei der Planung die Abstimmung mit der für die nukleare Sicherheit zuständigen Fachabteilung des Kraftwerks und mit der zuständigen Fachbehörde unterblieben war. In der Folge ent-

hielt das Versuchsprogramm keine besonderen Anweisungen zur Gewährleistung der Sicherheit. Schließlich führten Verzögerungen zu Beginn des Versuchsprogramms dazu, dass das nach Schichtwechsel mit der weiteren Durchführung betraute Personal – anders als das eigentlich vorgesehene – nur über geringe Erfahrungen mit An- und Abfahrprozessen verfügte und praktisch nicht auf den Versuch vorbereitet war.

3. Chronologie des Unfalls

Das Geschehen, das schließlich zu dem katastrophalen Unfall führte, begann bereits in den frühen Morgenstunden des 25. April 1986. In der folgenden Übersicht sind die wesentlichen technischen Ereignisse des gesamten Ablaufs wiedergegeben:

25. April 1986

1:00 Uhr: *Das Abfahren von Block 4 zur planmäßigen Revision beginnt. Zu diesem Zeitpunkt weist der Reaktorkern einen hohen Abbrand auf (ca. 12 bis 15 MWd/kg bei 75 % der Brennelemente), der bereits zu einem höheren positiven Voideffekt führt. Die Ausgangslage ist damit für den geplanten Versuch, der seinerseits diesen Effekt verstärkt, besonders ungünstig. Der ORM-Wert des Reaktors liegt bei 31.*

7:10 Uhr: *Der ORM-Wert von 13,2 unterschreitet den zulässigen Wert. Der Reaktor hätte nach den damals geltenden Regeln unverzüglich abgeschaltet werden müssen. Im weiteren Verlauf steigt der ORM-Wert wieder über den minimal zulässigen Wert von 15 an. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Leistung des Reaktors bereits seit einigen Stunden bei ca. 50 % der Nennleistung, also rund 500 MW (elektrisch).*

14:00 Uhr: *Die Lastverteilerstation in Kiev fordert wegen unplanmäßigem externen Strombedarfs weiterhin eine Leistung von rund 50 % der Nennleistung an. Der Versuchsbeginn wird deshalb um ca. 9 h verschoben.*

23:10 Uhr: *Nach Genehmigung durch den Lastverteiler wird das Abfahren auf den für den Versuch vorgesehenen Leistungsbereich 700 – 1000 MW (thermisch) fortgesetzt. Eine thermische Leistung von 700 MW ist die für den stationären Betrieb minimal zulässige Leistung.*

26. April 1986

0:28 Uhr: *Weniger als eine Stunde vor dem Unfall kommt es bei einer thermischen Leistung von 500 MW infolge eines technischen Ausfalls oder einer Fehlhandlung zu Schwierigkeiten bei der Umschaltung der Reaktorleistungsregelung. Dabei fällt die thermische Leistung des Reaktors in kürzester Zeit auf nur noch rund 1 % ab. Da vor diesem Zeitpunkt der ORM mit 26 Steuerstäben kleiner war als der für ein Wiederanfahren zulässige Wert von 30, und weil die zulässige Leistungsgrenze weit unterschritten wird, hätte wiederum der Reaktor abgeschaltet und der Versuch verschoben werden müssen.*

0:43 Uhr: *Das Reaktorabschaltsignal wird unwirksam gemacht, um den Versuch eventuell wiederholen zu können. Dies stellt einen massiven Eingriff in das Reaktorschutzsystem dar, der auch nicht im Versuchsprogramm vorgesehen war.*

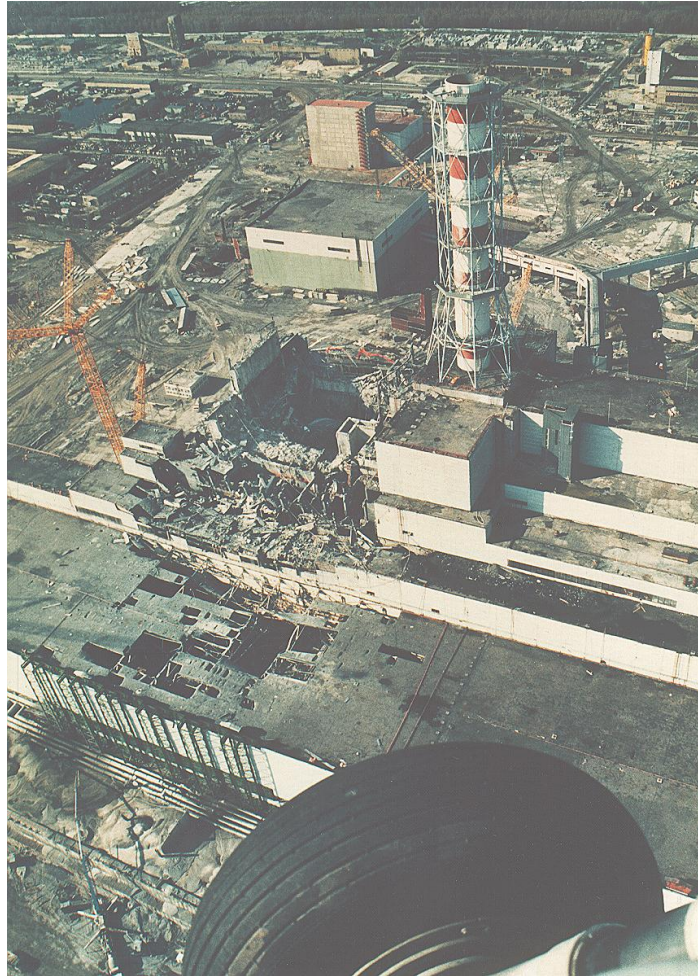
1:00 Uhr: *Die Anlage befindet sich jetzt in einem äußerst instabilen und nicht zulässigen Zustand: ungünstiger Beladungszustand, niedriges Leistungsniveau mit ungünstiger Leistungsdichteverteilung, hoher Kühlmitteldurchsatz im Kern, verringerter Speisewasserdurchsatz mit Erhöhung der Kühlmitteltemperatur am Kerneintritt und instationäres Verhalten der*

räumlichen Xenonvergiftung. Zur Stabilisierung des Anlagenzustandes wird nun mehrfach gegen Betriebsvorschriften verstoßen: z. B. Überschreiten des zulässigen Wertes für den Kühlmitteldurchsatz in einigen Hauptumwälzpumpen, weiteres Herausfahren der Steuerstäbe, Blockieren der Anregesignale für die Reaktorabschaltung. Der ORM-Wert liegt jetzt – wie durch spätere Nachrechnungen ermittelt – nur noch bei 6 bis 8.

1:23:04 Uhr: Der Versuch wird eingeleitet mit der Folge, dass die vier Hauptumwälzpumpen auslaufen. Dies führt dazu, dass weniger Kühlmittel durch den Reaktorkern strömt, was wiederum einen Anstieg der Kerneintrittstemperatur und dadurch des Dampfblasengehalts im Reaktorkern verursacht. Durch den jetzt sehr hohen positiven Voideffekt steigt die Leistung des Reaktors in einem Maße an, das die Regelung nicht mehr kompensieren kann.

1:23:40 Uhr: Bei etwa 10 % Reaktorleistung wird per Hand die Reaktorabschaltung ausgelöst. Durch den positiven Abschalteffekt hat dies einen zusätzlichen unmittelbaren Reaktivitätseintrag zur Folge. Die in diesem Moment eintretende Leistungsexkursion führt zu einem rapiden Anstieg der Energiefreisetzung in den Brennelementen. Die im Brennstoff gespeicherte Wärme wird dabei sehr schnell in das umgebende Kühlmittel übertragen, das praktisch spontan verdampft. Rechnungen lassen darauf schließen, dass die Reaktorleistung zu diesem Zeitpunkt das 100-fache der Nennleistung des Reaktors erreicht. Der resultierende hohe Druckanstieg führt zur Explosion des Reaktors. Augenzeugen beobachten eine zweite Explosion ca. 2 bis 3 Sekunden später. Ob diese durch eine Wasserstoffexplosion oder durch eine zweite Leistungsexkursion ausgelöst wurde, ist bis heute unklar.

An die durch die Explosion verursachte Zerstörung des Reaktorkerns und der Reaktorhalle schlossen sich Graphitbrände an. Dabei verbrannten rund 250 t Graphit aus dem Reaktorkern. Die Explosion und die anschließenden Brände führten zu einer massiven Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt.



Luftaufnahme des zerstörten Reaktorgebäude, aufgenommen im April 1986.

Gegen 5:00 Uhr waren die Brände außerhalb des Reaktors gelöscht und Block 3 wurde abgeschaltet. Der Einsatz von Wasser zur Kühlung des Reaktorkerns wurde nach 10 Stunden abgebrochen, da die Kühlung der Graphitblöcke nicht gelang und zusätzlich Radioaktivität aus der Anlage in die Umgebung transportiert wurde. Zudem wären die weiteren Blöcke durch Überflutung gefährdet gewesen.

Am 27. April wurden um 1:13 Uhr Block 1 und um 2:13 Uhr Block 2 abgeschaltet. Die weiteren Maßnahmen zur technischen Bewältigung der unmittelbaren Folgen der Katastrophe am Standort dauern noch bis zum 10. Mai an. Dabei werden rund 5.000 Tonnen verschiedener Materialien wie Sand, Lehm, Borcarbid, Dolomit und Blei von Hubschraubern abgeworfen und Stickstoff in das Gebäude geblasen, um den noch andauernden Graphitbrand im Inneren des zerstörten Reaktors zu bekämpfen, die Direktstrahlung zu mindern und die weitere Freisetzung radioaktiver Stoffe einzudämmen. Letztere ist erst am 6. Mai weitgehend beendet.