

Ulykken i Tjernobyl

Peter Bille Fynbo

Da reaktor nummer fire i Tjernobyl sprang i luften den 26. april 1986, var der mange åbne spørgsmål. Deriblandt: Hvordan gik det til? Kan det ske igen? Hvor meget radioaktivt materiale blev spredt til omgivelserne?

Det første spørgsmål kan kun besvares, hvis man ser på den særlige sovjetiske reaktortype, der var bygget fire af i Tjernobyl.

Tjernobyl-4 var en RBMK-reaktor. RBMK er forbogstaverne på russisk for "Reaktor af høj effekt af kanal-typen". RBMK-reaktorerne blev kun bygget i Sovjetunionen og findes i dag i Rusland, Ukraine og Litauen. De er lidt specielle af kraftværksreaktorer at være. For det første er de trykrørsreaktorer til forskel fra tryktanksreaktorer, og for det andet - og af større betydning for os - har de grafit som moderator og vand som kølemiddel.

I en RBMK-reaktor er uranbrændslet fordelt i 1600-1700 lodrette kanaler i en stor blok af grafit(1), der er 8 m høj og 14 m i diameter. Numrene i parentes henviser til snittegningen af Tjernobyl-4 reaktoren på figur 2. Selve reaktorkernen er 7 m høj og 12 m i diameter; grafitten i kernen er moderator, mens grafitten ovenover, nedenunder og udenom kaldes reflektor, fordi den returnerer en stor del af de neutroner, der forlader kernen. Brændslet køles af vand, der pumpes ind forneden(7,8,9) og begynder at koge et stykke oppe i kanalerne. Damp-vand-blandingen, der har et tryk på 70 bar, samles fra alle kanalerne i fire store tromler(4) (diameter 2,3 m, længde 31 m), hvor dampen skilles fra vandet og går til turbinerne(23). Der er to generatorer på hver 500 MW og den termiske effekt er maksimalt 3200 MW. (De to RBMK-reaktorer i Ignalina i Litauen har hver en elektrisk effekt på 1500 MW, men af sikkerhedsgrunde køres de i dag på lavere effekt.)

RBMK-reaktorer kan blive ustabile, løst sagt fordi de har for megen moderator i forhold til mængden af uranbrændsel - det vil navnlig sige mængden af U-235. Man siger, at de er overmodererede. Kølemediet er vand, som både modererer og absorberer neutroner. Når vandet koger, bliver begge effekter svagere, men fordi der er rigelig grafit, påvirkes modereringen ikke mærkbart. Er der nu af en eller anden årsag lidt forøget effekt i en kanal, koger vandet kraftigere. Herved falder absorptionen af neutroner, så der kan spaltes flere urankerner, det får effekten til at stige, vandet koger stærkere osv. Det går modsat, hvis effekten i en kanal falder lidt. Reaktoren er altså ustabil.

Billedet er ikke fuldstændigt. Der er en stabiliserende effekt (dopplereffekten), som skyldes, at U-238-kernernes evne til at absorbere neutroner øges med brændslets temperatur. Denne effekt giver altid negativ tilbagekobling og virker derfor stabiliserende. Overmodereringen giver positiv tilbagekobling i RBMK-reaktorer mens undermod-

erede reaktorer, som de svenske eller tyske har negativ eller næsten ingen tilbagekobling. Størrelsen af disse effekter afhænger af temperaturen i vand eller brændsel, af brændslets sammensætning, af reaktorens effektniveau og af kølemiddeltilførslen. I RBMK-reaktorer dominerer den positive tilbagekobling ved lav effekt, og der er derfor et generelt forbud mod vedvarende drift, hvis den termiske effekt er under 700 MW.

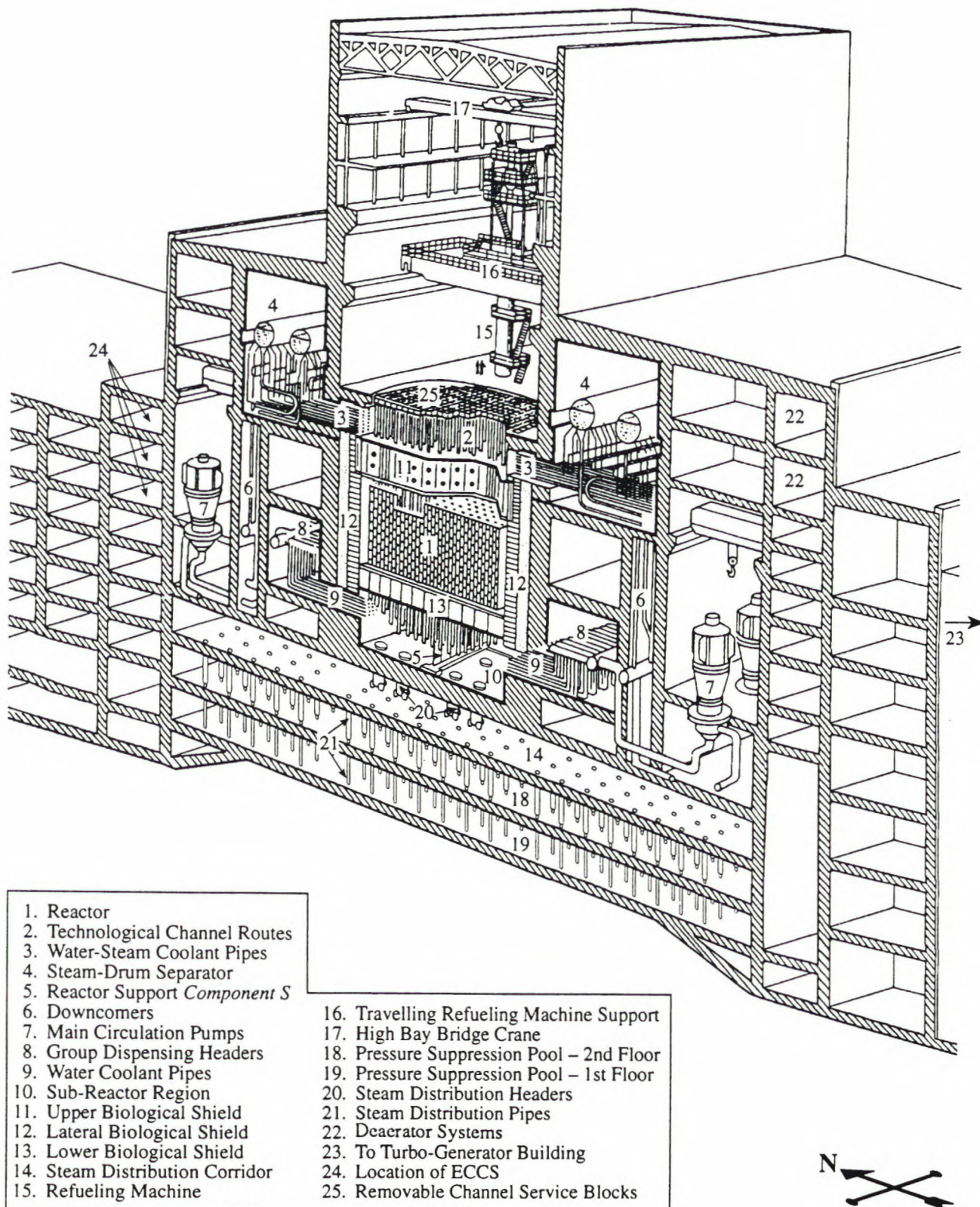
Det kan være interessant at sammenligne med den amerikanske militære N-reaktor, der blev brugt til fremstilling af våbenplutonium. Opbygningen mindede om RBMK-reaktorernes, men der var mindre grafit, så vandets evne til at moderere var væsentlig for, om reaktoren kunne virke. (Andre forskelle: trykket var så højt, at vandet ikke kogte, og brændselkanalerne var vandrette. En slægtning til N-reaktoren kan ses i Tintin-hæftet "Månen Tur-Retur". N-reaktoren blev lukket for nogle år siden i forbindelse med nedrustningsaftalerne.)

Nu er det ikke nødvendigvis på forhånd uacceptabelt, at maskiner er ustabile over for forstyrrelser. Vi har masser af den slags - biler f. eks. Det, der betyder noget for vurderingen, er dels alternativerne (herunder at give afkald på brugen), dels, hvor godt det installerede servosystem - i eksemplet altså bilist plus styretøj og bremses - der skal regulere, er i forhold til forstyrrelserne. På reaktorumrådet har de myndigheder, der fører kontrol med atomkraftværkernes sikkerhed, en udtalt skepsis til ustabile systemer. Derfor ville en reaktor med en RBMK-lignende instabilitet aldrig kunne blive godkendt i toneangivende lande som USA, Tyskland eller Sverige.

Men RBMK-reaktorerne har andre kedelige sider. En britisk studiegruppe besøgte i 1975 Sovjet og havde negative kommentarer til sikkerheden. Den manglende stabilitet er selvfølgelig med, men gruppen lagde også vægt på fraværet af et sekundært nødstopssystem, på de høje grafittemperaturer, på den utilstrækkelige mulighed for nødkøling af brændslet og på savnet af en reaktorindeslutning. De fleste vestlige reaktorer har kontrolstave til at standse kædeprocessen og et alternativt system, som typisk består i, at en såkaldt neutrongift sprøjtes ind i moderatoren, hvis kontrolstavene skulle svigte. De fleste vestlige reaktorer har også en reaktorindeslutning (også kaldt et containment), en lufttæt, trykfast bygning, som skal holde de radioaktive stoffer indespærrede i tilfælde af en alvorlig beskadigelse af reaktorkernen. At en reaktorindeslutning er en god ting, sås ved uheldet på Three Mile Island i 1979, hvor der kun var et ubetydeligt udslip.

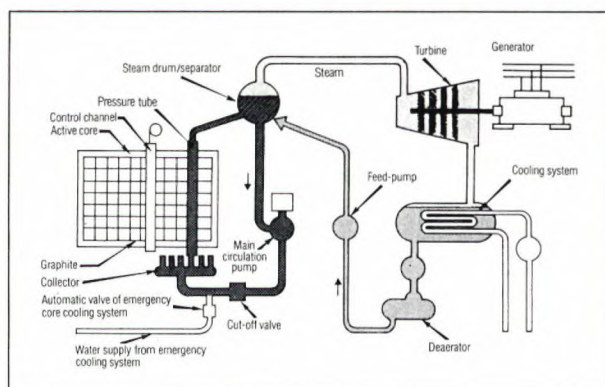
Ulykken

Ulykken skete 26. april 1986 kl. 1:24 lokal tid. Men egentlig startede det hele ca. 12 timer før. I forbindelse



Figur 1. Tværsnit af Tjernobylreaktor nr. 4. Reaktorkernen(1) er 8 m høj og 14 m i diameter. I teksten henvises til tegningens numre. Reaktoren er sikret ved samtidigt brud på nogle få af trykrørene. I dette tilfælde skal dampen ledes via fordelerrør(20,21) og fordelerkorridor(14) til vandfyldte kølebassiner(18,19). Her kondenseres dampen så trykket holdes nede, samtidigt med at reaktoren nødlukker. Dette system tåler kun et overtryk på 1 bar og kunne slet ikke følge med under ulykken.

med en rutinemæssig nedlukning skulle der udføres et eksperiment, som skulle prøve, i hvor høj grad en generator kan levere strøm til nødkølepumperne, hvis værket mister forbindelsen til højspændingsnettet og derfor ikke kan komme af med den elektriske energi. Sker det, må turbine og generator standses, og så kan værket selv komme til at mangle strøm. Under eksperimentet skulle dampstrømmen til den tilbageværende turbine afbrydes (den anden var koblet fra tidligere), og generatoren skulle så, indtil den gik i stå, levere strøm til hovedcirkulationspumperne(7) (som blev brugt ved eksperimentet i stedet for nødkølepumperne), forhåbentlig længe nok, til at dieselmotorerne kom i gang med at trække nødstrømsforsyningen. Lignende forsøg var blevet udført tidligere, men resultaterne havde været utilfredsstillende. Forsøget skulle foregå ved 700 - 1000 MW termisk effekt, svarende til 20 - 30% af den normale effekt, 3200 MW. Idet vi - indtil videre - følger den officielle sovjetiske rapport, var forløbet omtrent således:



Figur 2. Principdiagram for RBMK-reaktorer.

- 01:03, Vandstrømmen gennem reaktoren øges i
01:07, flere omgange. Da effekten er lav, kan van-
01:19 det ikke nå at fordampe. Tryk og vandstand
i de store tromler, hvor vandet skilles fra
dampen(4), falder. To beskyttelsessystemer,
der er baseret på tryk og vandstand i trom-
lerne, blokeres af operatørerne, for at ekspe-
rimentet kan gennemføres. I reaktorkernen
stiger vandet, der absorberes flere neutroner,
og de automatisk styrede kontrolstave går
oven ud. De manuelt styrede kontrolstave
trækkes også ud.
- 01:22 Operatøren mindsker strømmen af vand,
trykket falder, vandet koger igen, reak-
tiviteten stiger, og de automatiske kontrol-
stave begynder at gå ind.
- 1:23 Eksperimentet begynder. Dampen ledes
uden om turbinen, som derfor taber fart. Det
burde få reaktoren til at lukke ned, men
personalet har også blokeret dette beskyt-
telsessystem, så man kan prøve igen, hvis
forsøget skulle mislykkes første gang. Nu
begynder effekten at stige langsomt. Vand-
strømmen aftager, fordi strømtilførslen til
pumperne falder. Så stiger temperaturen i
trykrørene, og instabiliteten viser sig igen.
Men denne gang kan kontrolstavene ikke
følge med.

Kl. 01:23:40 trykker operatøren på nødstoppet. Der sker tilsyneladende ikke noget. Kl. 1:23:44 stiger effekten voldsomt. Sovjetiske beregninger viser, at reaktoren var prompte kritisk, og at effekten var 110 gange den normale, altså ca. 350 GW. Andre beregninger angiver 80 - 400 gange den normale effekt.

Der skete to eksplosioner, som er søgt forklaret på forskellige måder. De fleste mener dog, at det gik sådan til:

Effektstigningen skete på en brøkdel af et sekund. Det er for kort tid til, at det indre af brændselspindene (diameter ca. 1 cm) kan afgive varmen. Brændselspindenes indre smeltede og fordampede, og trykket sprængte resten af brændslet og dets indkapsling. Da brændslet kom i kontakt med vandet, kunne det hurtigt afgive varme til vandet, fordi overfladen var meget stor. En dampekspllosion var resultatet. Den ødelagde mange af trykrørene mellem vand og grafit og blæste den 1000 tons tunge klods(11), der lå, som strålingsafskærmning, oven over reaktoren, op i lodret stilling, og det rev på sin side alle de trykrør(3) over, der endnu ikke var ødelagte.

Vanddampen og den glødende grafit reagerede kemisk, og der blev dannet brint og kulilte, der kunne blande sig med luften i reaktorhallen, efter at klodsen var vippet op. Denne knaldgasblanding eksploderede. Eksplosion nummer to ødelagde bygningen og sendte dele af kernen op på nabobygningernes tage samt fissionsprodukter m.m. 1 km op i atmosfæren. Herfra spredtes de over det meste af Europa.

25. april 1986

- 01:00 Effektsænkningen indledes. Det sker langsomt for at undgå en opbygning af Xe-135.
- 13:05 Effektsænkningen standses ved 1600 MW, fordi elproduktionen ikke kan undværes. Den ene af de to generatorer kobles fra.
- 23:10 Effektsænkningen fortsættes mod 700 - 1000 MW. Sænkningen foregår nu betydeligt hurtigere end før.

26. april 1986

- 00:28 En operatørfejl får effekten til at falde langt under 700 MW, helt ned til 30 MW. Effekten er nu så lav, at reaktoren bør lukkes ned, og eksperimentet afbrydes.
- 01:00 Reaktoren stabiliseres ved 200 MW. Det er en overtrædelse. Den må ikke arbejde ved så lav effekt. På grund af xenonforgiftning, der hænger sammen med de 10 timer på halv effekt, må alle kontrolstave trækkes ud, og effekten kan ikke komme højere end 200 MW.

Udslippet

Udslippet fortsatte, så længe grafitten brændte. Efter 9 - 10 dage faldt udslipshastigheden stærkt, selvom der helt op til 25 - 30 dage efter ulykken var enkelte mindre, men ikke ubetydelige, udslip. Udslippet bestod af ædelgasserne xenon og krypton, hvoraf alt menes at være frigivet, af jod, mest I-131, hvor 50 - 60% blev frigivet, og af to cæsiumisotoper, hvor $33 \pm 10\%$ blev frigivet. Der var mange andre stoffer, nogle, som barium og strontium, er meget lidt flygtige, og de kom kun i ringe grad ud til omgivelserne. Andre, molybdæn og ruthenium, har letflygtige oxider, og det har været svært at vurdere målingerne, men der er i hvert fald kommet mere ud end de 2 - 3%, man først regnede med. Af selve reaktorbrændslet er ca. 3,5% kommet ud, mest som findelt støv. Tallene stammer fra OECD's Nuclear Energy Agencys nyeste vurdering, som sammenfatter, hvad vi ved i dag. Nogle af tallene er ca. dobbelt så store, som den første sovjetiske rapport angav kun fire måneder efter ulykken. Forklaringen er, at den rapport var baseret på de målinger af luftprøver og nedfald, der var foretaget i Sovjetunionen. De nye tal medregner også målingerne fra andre lande.

Isotop	Aktivitet i reaktor(PBq)	Udslip (pct)
Xe-133	6500	100
I-131	3200	50-60
Cs-134	180	20-40
Cs-137	280	20-40
Sr-89	2300	4-6
Sr-90	200	4-6
Mo-99	4800	>3,5
Ru-103	4800	>3,5
Pu-239	0,85	3,5
Pu-241	170	3,5

Tabel 1: Tjernobyl-4's indhold af nogle vigtige radionuklider og deres procentvise udslip. 1PBq er 10^{15} henfald/sek.

Man kan i dag komme ind i bygningerne og måle og tage prøver, ofte med fjernbetjent udstyr p.g.a.strålingen. En del af den ødelagte kerne smeltede, reagerede med betongulvet og gik ned gennem gulvet, før det størknede som noget, der lignede lava. Denne lava ville man gerne have prøver af, da det blev muligt at komme ind i underetagen igen nogle år efter ulykken. Nyere RBMK-reaktorer har en underetage, der er indrettet, så den kan aflaste et vist overtryk i reaktorrummet ved uheld; det gik bare alt for hurtigt denne gang. Men lavaen var så hård, at det var umuligt at tage prøverne. Hvad gør man så? Man tager en Kalashnikov riffel og ...? Ja, rigtigt gættet. Og bagefter kan man så pille splinterne op. Det mest ejendommelige er, at lavaen et par år senere var forvitret, så den smuldrede af sig selv.

Kort efter ulykken begyndte byggeriet af "sarkofagen", en meget stor bygning uden om den ødelagte reaktor. Sarkofagen, som ukrainerne hellere vil kalde "Ukrytie" - på russisk betyder det noget i retning af "Beskyttende

dække" - skal sørge for, at der ikke kommer mere radioaktivt stof ud som følge af blæst eller nedbør. Den blev bygget i et imponerende tempo, men den var ikke ment som den endelige løsning på problemet. Den kan formentlig holde nogle år endnu, men dens tilstand er ikke god. Der er huller og revner i murene - tilsammen vel 1000 kvadratmeter, og klimaet på stedet er hårdt ved betonen. Bryder bygningen sammen, vil der "kun" blive tale om en lokal forurening, men alligevel må der inden for en ikke alt for fjern fremtid gøres noget, og det vil nok sige, at der skal bygges en ny "Ukrytie" uden om den gamle. Ukraine er begyndt at se på det, men det er tvivlsomt, om landet selv kan magte opgaven, teknisk og økonomisk.

Hvem havde ansvaret? I første omgang var det operatørerne og dem, der stod for eksperimentet, der fik skylden. Synderegisteret ser også slemt ud. Tre beskyttelsessystemer blev koblet fra, reaktoren kørte i en "ulovlig" tilstand, som skyldtes, at forsøgsprogrammet blev fraveget allerede, da effektsænkningen blev standset, og alle kontrolstavene var trukket helt ud for at holde effekten. Ingen tvivl om, at de havde båret sig galt ad. Det var da også dem, der blev gjort ansvarlige i den officielle sovjetiske rapport, som blev fremlagt på en konference i Wien i august 1986. Kort tid efter blev nogle af dem fængslet og året efter idømt fra to til ti år i en arbejdslejr.

Det var imidlertid kun den ene side af sagen. RBMK-reaktorernes svagheder blev fremhævet i fagpressen, hjulpet af den "glasnost", som var en nyskabelse i Sovjet dengang. Reaktorerne tendens til at blive ustabile. Beskyttelsessystemerne, der kunne slås fra, det ene efter det andet. Kontrolstave, der ikke havde større fart end 40 cm/s, selv ved nødstop. Det forhold, at stavene kunne trækkes helt ud og, hvis det skete, skulle bevæges langt, før de begyndte at virke. Og endelig kontrolstavenes udformning med grafit under den absorberende del. Ideen er ellers god nok. Kontrolstavene kører i vandkølede kanaler. Trækkes kontrolstavene op (ud), vil neutronabsorberen blive erstattet af grafit, som næsten ikke absorberer neutroner, og ikke af vand, som absorberer. Skubbes stavene ind, er det omvendt, og stavene er altså mere effektive, end de ville være uden grafit. Men grafitten var for kort. Hvis en stav var trukket helt op, var der vand forneden i dens kanal. Skulle staven så føres ind, ville der ske det i bunden af reaktorkernen, at absorberende vand blev erstattet af ikke-absorberende grafit med en midlertidig forøgelse af reaktiviteten til følge. Det ville svare til, at en bil begyndte med at give sig til at accelerere, når man trykkede på bremsen.

Anatolij Djatlov, der var næstkommanderende driftsingeniør på Tjernobyl-4 og havde ledelsen i kontrolrummet natten til den 26. april, har beskæftiget sig med skyldsspørgsmålet, og han har gjort opmærksom på reaktorens mangler og på, at værket ikke modtog relevant information fra myndighederne. Han blev idømt ti års arbejdslejr ved retssagen, men blev benådet efter fire år, fordi han var svagelig efter den store strålingsdosis, han fik ved ulykken. Han har, indtil han døde af et hjerteanfald kort før jul 1995, argumenteret kraftigt for, at det

ikke var personalet, men reaktoren, der var noget i vejen med. Reaktordrift under 700 MW var ikke forbudt. Den regel blev indført efter ulykken og før konferencen i Wien! Det var ikke forbudt at blokere det beskyttelsessystem, der skal lukke reaktoren ned, hvis der ikke er damp til turbinerne. Det var heller ikke forbudt at blokere det signal, der skyldes lav vandstand i de tromler, hvor vandet skilles fra dampen - og det havde heller ikke været blokeret, selv om det blev påstået i Wien.

Djatlov lægger entydigt skylden på reaktoren. Det gik galt, da kontrolstavene blev ført ind, fordi grafitten var for kort. Han indrømmer, at operatørerne havde trukket kontrolstavene for langt ud, men de havde aldrig fået en ordentlig forklaring på, hvorfor stavene ikke måtte trækkes helt ud. Desuden var deres instrumenter uegnede til at fortælle dem, hvordan stavene lå i forhold til det tilladte. Operatørerne vidste selvfølgelig, at kontrolstave ikke kan kontrollere en reaktor, når de er trukket helt ud af reaktorkernen, men de havde aldrig hørt om, at stavene kunne virke modsat hensigten. Det var blevet opdaget et par år tidligere under afprøvningerne, da Ignalina-1 og Tjernobyl-4 selv skulle tages i brug. De centrale myndigheder kendte årsagen, men havde hverken gjort noget ved det eller underrettet operatørerne ved de værker, hvor der var RBMK-reaktorer.

På den anden side står det tilbage, at forsøgsproceduren uden videre blev ændret, da effekten ikke kunne holdes så højt oppe som planlagt, og at kontrolstavene blev trukket meget langt ud, selv om det ikke var forudset, at det skulle være nødvendigt for at gennemføre eksperimentet. Begge forhold vidner om dårlig sikkerhedskultur på værket. Men de rent tekniske fejl, at erkendte fejl ikke blev rettet, og at operatørerne ikke fik den information fra reaktorkonstruktører og myndigheder, de havde brug for, viser, at den dårlige sikkerhedskultur ikke var et lokalt fænomen.

Er RBMK-reaktorerne lige så usikre i dag som dengang? Nej, der er sket mange forbedringer siden 1986. Kontrolstavene er ændret, så de kun virker på den tilsigtede måde. De er blevet hurtigere, når det skal gå stærkt. Det tager nu 2,5 sekunder at få ført dem helt ind i reaktorkernen; før tog det ca. 18 sekunder. Brændslet er blevet højere beriget, så forholdet mellem mængden af moderator og mængden af U-235 er blevet lavere. Uddannelsen af operatørerne er forbedret. Beskyttelsessystemerne kan ikke blokeres samtidigt længere. Med hjælp fra Vesten er også brandsikkerheden forbedret, kabler til instrumenter udskiftet og mange andre foranstaltninger, hvor behovet måske ikke er helt så akut, men alligevel påtrængende, er blevet foretaget. Vi skal altså ikke være bange for en ny ulykke af samme karakter som Tjernobyl. Men RBMK-reaktorerne har stadig en del mangler, der skal udbedres, og to grundlæggende fejl har de stadig. De har stadig kun eet system til at standse kædeprocessen, og de mangler også stadig en reaktorindeslutning.

Den enkleste løsning, set her vestfra, er naturligvis at lukke reaktorerne, men de berørte lande kan ikke undvære elektriciteten fra værkerne. Det er derfor urealistisk,

når vestlige regeringer forlanger værkerne lukket uden videre. Der er i stedet to veje, man kan følge, hvis man er meget urolig over RBMK-reaktorerne - eller for den sags skyld over den anden sovjetiske reaktortype, VVER-reaktorerne. Enten må man betale en del af prisen for opførelsen af fossilt fyrede værker, eller også må man betale en del af udgifterne ved at få gjort de eksisterende værker sikrere. I nogle lande har det holdt meget hårdt med at nå til den erkendelse.

Konklusion

Der er skrevet mange rapporter og mange artikler i fagpressen om både uheldet på Three Mile Island i 1979 og ulykken i Tjernobyl. Forløbet på Three Mile Island er godt kendt, og der er kun enkelte forhold, der ikke forstås. Det vigtigste uløste spørgsmål handler om konsekvensen af en kernenedsmeltning: Reaktorkernen smeltede delvis, og en del af smelten løb ned i bunden af reaktortanken. Hvorfor smeltede den sig ikke igennem tankbunden? Svaret kan være væsentligt for, hvordan et eventuelt fremtidigt reaktoruheld skal håndteres.

Som det måske er fremgået, er der ved Tjernobyl langt mere, der ikke forstås, men det er også ulige sværere at skaffe data i dette tilfælde.

Ser man derimod på årsagerne, er opgaven lettere, og efter Three Mile Island stod det klart, at uddannelsen af operatører og instrumenteringen på i hvert fald nogle reaktorer skulle forbedres. Desuden bør reaktoroperatører underrettes om hændelser med sikkerhedsmæssig betydning. (Det vidste man godt, men det var blevet glemt i forbindelse med en hændelse nogle år tidligere, hvor optakten lignede det, der skete på Three Mile Island.) Generelt skulle man også se mere på at bekæmpe de små tab-af-kølemiddel-uheld end at bekæmpe de store, som man hidtil havde gjort, simpelthen fordi de små er hyppigere. Erfaringerne fra Three Mile Island blev udnyttet i Vesteuropa, Nordamerika o.s.v., men ikke i Sovjetunionen.

Helt anderledes var det med Tjernobylulykken. De konstruktionsfejl, der var så afgørende her, ville myndighederne i vestlige lande ikke have accepteret. Og som nævnt havde man efter Three Mile Island lært større omhu med at informere reaktoroperatører om hændelser, der har betydning for sikkerheden. Tjernobylulykken viste et behov og Sovjetunionens opløsning gav muligheden for samarbejde på tværs af de gamle skel. Viden og erfaringer er blevet stillet til rådighed for landene og atomkraftværkerne i Øst, der set ud fra denne synsvinkel har lært af ulykken. Men det grundlæggende i erfaringsudvekslingen drejer sig altså om noget, der var kendt før Tjernobyl. Sætter man det lidt på spidsen, kan man sige, at hvad reaktorsikkerhed som fagdisciplin angår, er der ikke meget at lære af Tjernobyl. Det kan højst blive til en bekræftelse af det, man vidste i forvejen.

Lidt reaktorfysik

Neutroner produceret ved fission er meget hurtige - adskillige tusind kilometer per sekund. Hurtige neutroner har imidlertid ringe sandsynlighed for at spalte U-235, og de må derfor "bremses ned" til nogle få km/s. Det sker i en moderator, et stof, hvor neutronerne kan aflevere deres energi ved kollisioner med atomkernerne. Velegnede stoffer er (let) vand, tungt vand og grafit. Let vand er billigst, men absorberer forholdsvis mange neutroner. Af den grund skal uranet i en letvandsmodereret reaktor være beriget, dvs. have en mere end 0,7% U-235 kerner. Berigning er dyr, og derfor bruges tungt vand og grafit som moderator i nogle reaktorer.

De fleste neutroner dannes i selve fissionsøjeblikket. Det er de såkaldt *prompte neutroner*. Men 0,65% sendes ud fra de kerner, urankernerne spaltes i. Da det først sker efter et betahenfald, kan det vare fra nogle sekunder og op til over et minut, før disse *forsinkede neutroner* kommer. De spiller en stor rolle, selv om de er få, for de forøger den effektive levetid for neutroner, der skyldes fission, så meget, at reaktoren kan styres. Kunsten består i at regulere med kontrolstave, som indeholder neutronabsorberende materiale, så der er for få prompte neutroner til at gøre reaktoren kritisk uden hjælp fra de forsinkede neutroner. Hvis der derimod absorberes så få neutroner, at de prompte neutroner kan gøre reaktoren overkritisk alene, kaldes reaktoren *prompte kritisk*. I dette tilfælde er der stor risiko for, at effekten stiger meget hurtigt. Reaktor fire i Tjernobyl var prompte kritisk.

Reaktivitet er et mål for en reaktors evne til at holde kædeprocessen i gang. En underkritisk reaktor har negativ reaktivitet, og en overkritisk har positiv reaktivitet. Reaktiviteten påvirkes af mange faktorer. F. eks. mindskes vands evne til at moderere eller absorbere neutroner ved termisk udvidelse og navnlig ved kogning, fordi tætheden af vandet falder. Et mindre trivielt eksempel er den *xenonforgiftning*, der skyldes Xe-135. Denne kerne har meget stor tilbøjelighed til at absorbere neutroner. Den dannes i mindre omfang direkte ved fission, men i betragtelige mængder ved henfald af fissionsproduktet I-135, som har halveringstiden 6,7 timer. Xe-135 forsvinder, dels ved henfald til Cs-135 med en halveringstid på 9,2 timer, dels ved omdannelse efter neutronindfangning. Efter nogle dages drift ved konstant reaktoreffekt vil både I-135 og Xe-135 være i ligevægt, men sænkes effekten, vil Xe-135 stadig dannes ved henfald af I-135, mens absorptionens bidrag til fjernelsen falder. Derfor vil koncentrationen af Xe-135 stige og reaktiviteten falde. Xenonforgiftning bidrog til, at reaktoren blev bragt i en ustabil tilstand, og var på den måde en medvirkende årsag til ulykken i Tjernobyl.

Hvis $n_U = \text{ca. } 9 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$, er den gennemsnitlige koncentration af uran-235 i reaktorkernen, n_I og n_{Xe} er koncentrationerne af jod-135 og xenon-135, λ_I og λ_{Xe} er henfaldskonstanterne, ϕ er neutronfluxen, $\sigma_f = \text{ca. } 10^{-25} \text{ m}^2$ er fissionstværsnittet for U-235, $\gamma_I = 0,06$ er antallet af I-135 kerner pr. fission og $\sigma_{Xe} = \text{ca. } 2,5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ er Xe-135's termiske absorptionstværsnit, er

$$\begin{aligned}\frac{dn_I}{dt} &= \gamma_I \cdot \sigma_f \cdot n_U \cdot \phi - \lambda_I \cdot n_I \\ \frac{dn_{Xe}}{dt} &= \lambda_I \cdot n_I - \sigma_{Xe} \cdot \phi \cdot n_{Xe} - \lambda_{Xe} \cdot n_{Xe}\end{aligned}$$

Vi har set bort fra, at I-135 destrueres ved neutronabsorption, og at Xe-135 i et vist omfang dannes direkte ved fission.

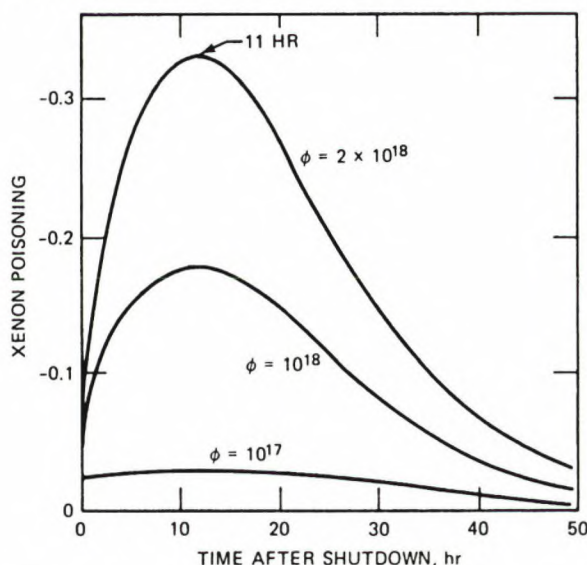
Hvis n_{I0} og n_{Xe0} er ligevægtskoncentrationerne, og fluxen pludselig falder til nul, får vi løsningen:

$$n_{Xe} = c_1 \cdot \exp(-\lambda_I \cdot t) + c_2 \cdot \exp(-\lambda_{Xe} \cdot t)$$

Her bestemmes c_1 og c_2 ud fra ligevægtskoncentrationen og den afledede til begyndelsestidspunktet:

$$\begin{aligned}c_1 + c_2 &= n_{Xe0} \\ \lambda_I \cdot c_1 + \lambda_{Xe} \cdot c_2 &= -\lambda_I \cdot n_{I0} + \lambda_{Xe} \cdot n_{Xe0}\end{aligned}$$

Løsningen giver forløbet af n_{Xe} som vist i figur 3.



Figur 3. Xenonforgiftning efter nedlukning for forskellige værdier af fluxen før nedlukning (målt i neutroner/(m²·s)). Reaktivitetsændringen, der er proportional med xenonkoncentrationen, er afsat op ad ordinataksen.

Temperaturen påvirker reaktiviteten på flere måder. En af de vigtigste, "dopplereffekten", skyldes, at brændslet i langt de fleste kraftværksreaktorer har et højt indhold af U-238, da berigningen er lavere end 4 %. U-238's evne til at absorbere neutroner afhænger af neutronernes energi. Neutroner, der er bremset ned til energier mellem 6 eV og 100 eV, er særlig udsatte, fordi absorptionsevnen bliver meget stor ved visse neutronenergier, "resonansenergierne", i dette område. Resonanserne er skarpe, men p.g.a. urankernerne termiske bevægelse vil U-238 kernerne "se" forskellige neutronenergier, selv for neutroner, der har samme hastighed. Det svarer til, at resonanserne bliver bredere, især ved høj temperatur, og derfor absorberes der desto flere neutroner i U-238 kernerne, jo

varmere brændslet er. Dopplereffekten virker således stabiliserende. (U-238 kerner kan, i modsætning til U-235 kerner, ikke spaltes af neutroner, der har så lav energi, som der her er tale om).

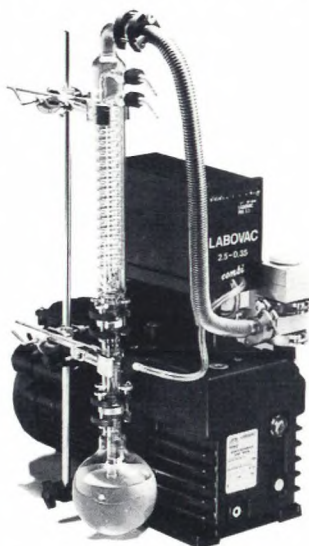
Referencer:

- 1) CHERNOBYL - Ten Years On: Radiological and Health Impact. OECD/NEA, Paris, November 1995.



Peter Bille Fynbo er seniorforsker på Risø. Han er civilingeniør og lic.techn. Hans forskning drejer sig om fissionsprodukters opførsel under et stort reaktoruheld. Desuden hjælper han gymnasiaster og andre med fysikøvelser på Risø's undervisningsreaktor DR 1, som han er leder af.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



SASKIA HOCHVAKUUM- UND LABORTECHNIK GmbH I ILMENAU er et succesrigt resultat af øst-vest genforeningen i Tyskland. SASKIA's et- og to-trins finvakuumpumper fra 4 til 200 m³h⁻¹ har rotor-skiver af et nyt PTFE materiale som sænker støjniveauet med ca. 3 dBA og tillader pumperne at arbejde konstant ved højt tryk eller med aggressive gasser. Med en frekvensregulering kan pumpehastigheden fordobles, så man f.eks. hurtigt kan evakuere et anlæg og derefter anvende pumpen som holdepumpe ved lav hastighed. SASKIA's kemisk resistente membran-pumper har liniærdrevne membraner, hvilket sikrer en lang levetid og lavt effektforbrug. En membranpumpe på ca. 30 W kan med de store afgifter på brugsvand hurtigt tjene sig ind, hvis den erstatter en vandstråle-pumpe. SASKIA's TOWER pumpestande er kemipumpestande kombineret med kondensatorer og med instrumentering for indstilling af trykket. SASKIA leverer oliefri pumpestande kombineret med turbomolekularpumper i et handy design og rootspumpestande op til 20.000 m³h⁻¹.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLØKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

WENZEL VAKUUM TEKNIK APS • NYBROVEJ 283 • DK-2800 LYNGBY • TLF. 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER • NYBROVEJ 193 • BIL 30 42 63 00 • FAX 45 93 32 93