

RÅDET FÖR
KÄRNKRAFTSÄKERHET

RKS

**HAVARIET I TJERNOBYL 4
OCH DESS KONSEKVENSER**

RKS-86-16 1986-10-15

HAVERIET I TJERNOBYL 4 OCH DESS KONSEKVENSER

1. **SAMMANFATTNING**
2. **KÄRNKRAFTPROGRAMMET I SOVJET**
3. **BESKRIVNING AV RBMK-1000**
4. **BESKRIVNING AV HÄNDELSESEKVENSEN**
5. **BIDRAGANDE ORSAKER TILL HAVERIET**
6. **VIDTAGNA OCH PLANERADE ÅTGÄRDER VID TJERNOBYL 4**
7. **PLANERADE ÅTGÄRDER VID RBMK-REAKTORER**
8. **FRIGÖRELSE AV RADIOAKTIVITET FRÅN TJERNOBYL 4**
9. **DOS OCH KONSEKVENSBILDEN I NÄROMRÅDET**
10. **KOMMENTARER**

1. SAMMANFATTNING

Den 26 april 1986 havererade en sovjetisk grafitmodererad, lättvattenkyld reaktor av kanalkokartyp, s k RBMK-reaktor, Tjernoby 4.

Haveriet inträffade i samband med ett prov med ena turbingeneratoren, inför en planerad avställning för underhåll av blocket. Provprogrammet hade inte fått officiellt godkännande.

Operatörernas avsteg från säkerhetsföreskrifterna resulterade i att den redan från grunden svårstyrda reaktorn hade hamnat i ett ytterst instabilt tillstånd. På grund av en ur säkerhetssynpunkt inbyggd oacceptabel parameter ökade reaktoreffekten okontrollerat. Effektutvecklingen ledde till ett par kraftiga explosioner som förstörde huvuddelen av reaktorn. Explosionerna åtföljdes av ett antal bränder. Den stora effektutvecklingen och den efterföljande grafitbranden gav upphov till ett omfattande plymlyft som bidrog till den långväga spridningen av radioaktiva ämnen.

Till haveriets svåra konsekvenser bidrog:

- Reaktorns konstruktionen och dess inneboende instabilitet
- Operatörernas grova avsteg från säkerhetsföreskrifter och provprogram
- Avsaknande av en tät och tryckupptagande inneslutning.

De radiologiska konsekvenserna är idag att 31 människor omkommit på grund av akuta strålskador. Ytterligare 200 har vårdats för strålskador. Alla de människor som strålskadats har befunnit sig inom kraftverksområdet under haveriet. De högsta stråldoserna erhöles av brandpersonalen vid brandsläckningsarbetet. Totalt evakuerades ca 135 000 människor inom en 30 km:s radie från den havererade reaktorn.

Redovisningen av haveriet och dess konsekvenser bygger huvudsakligen på de uppgifter som den sovjetiska delegationen givit vid ett IAEA-möte i slutet av augusti 1986.

2. KÄRNKRAFTPROGRAMMET I SOVJET

Trots att Sovjet har stora olje-, gas- och koltillgångar satsar man kraftigt på kärnkraften som energikälla. Anledningen till detta är att ca 90 % av dessa naturtillgångar och ca 80 % av all vattenkraft finns i de östra delarna av Sovjet medan ca 75 % av befolkningen och ca 80 % av energikonsumtionen finns i den europeiska delen av Sovjet.

De första kärnkraftprojekten startade redan i slutet av 1940-talet och 1950 togs beslutet att bygga den första kärnkraftreaktorn. Denna baserades på en grafitmodererad kanalkokartyp och driftsattes 1954. Anläggningen ligger i Obninsk söder om Moskva och har en storlek på 5 MWe.

Utvecklingen har sedan gått mot fyra olika reaktortyper:

- Tryckvattenreaktor (PWR-VVER)
- Grafitmodererad reaktor (RBMK)
- Bridreaktor (FBR)
- Värmereaktor (VCT)

Den första tryckvattenreaktorn installerades på isbrytaren Lenin 1959. Sedan har ytterligare två kärnkraftdrivna isbrytare byggts, Artica som blev klar 1974 och Sibir 1977.

Den första elkraftproducerande tryckvattenreaktorn driftsattes i Novovoronezh 1964. Storleken på denna reaktor var 210 MWe. Reaktortypen har sedan utvecklats vidare till en 440 MWe- och en 1000 MWe-typ. Det är dessa två reaktortyper som exporteras bl.a till andra öststatsländer, Finland och Kuba. Utanför Sovjet finns idag 17 VVER aggregat, och i Sovjet finns ca 20 i drift.

Den grafitmodererade reaktorn av kanalkokartyp (RBMK) utvecklades vidare via en 100 MWe, 200 MWe, 1000 MWe och en 1500 MWe reaktor. Av den senare typen finns ett aggregat i drift i Ignalina, Litauen. Denna är världens största kärnkraftreaktor. Reaktorerna i Beloyarsk på 100 respektive 200 MWe har dessutom intern nukleär överhettning av ångan vilket innebär att modernare och effektivare turbinaggregat kan användas. Planer finns på en fortsatt utveckling av denna reaktortyp till en 2400 MWe som bl.a också skall ha intern nukleär överhettning av ångan.

Den havererade reaktorn i Tjernobyl var på 1000 MWe. Drygt ett tiotal reaktorer av denna storlek finns idag i drift i Sovjet, bl.a fyra i Leningrad.

Ett utmärkande drag för dessa reaktorer är att man kan byta bränsle under drift, vilket bidrar till att höga utnyttjningstal kan uppnås. Siffror från Sovjet pekar på ca 75-80 % utnyttning.

Den första bridreaktorn togs i drift 1959 i Obninsk och var på 12 MWe. Den andra bridreaktorn producerar både kraft (150 MWe) och avsaltat vatten, cirka 120 000 ton per dag. Den senaste bridreaktorn finns i

Beloyarsk och är på 600 MWe. Bridreaktorerna är natriumkylda. Planer finns på att bygga 800 MWe och 1600 MWe bridreaktorer i framtiden.

Värmereaktorer har de senaste åren utvecklats i Sovjet. I Gorki och Novovoronezh pågår byggnation av anläggningar på 500 MWth. Flera värmereaktorer planeras, bl.a i Odessa vid Svarta Havet.

1975 bidrog kärnkraften med ca 2 % av elkraftproduktion i Sovjet. År 1980 var andelen 6 %. De planer som drogs upp 1980 siktade mot en kärnkraftskapacitet på 40 000 MWe 1985 vilket skulle motsvara ca 14 % av all elkraftproduktion. Detta har dock inte nåtts. Totalt fanns det 1985 i Sovjet ca 40 reaktorer i drift (se figur 1) med en kapacitet på cirka 27 000 MWe. Under 1985 producerades 131 TWh med kärnkraft vilket motsvarar cirka 9% av all elkraftproduktion. Till år 2000 planerar de sovjetiska myndigheterna en femfaldig ökning av andelen el producerad med kärnkraft.

3. BESKRIVNING AV RBMK-1000

3.1 Allmänt

Tjernobyl-kraftverket (se figur 2) består av sex grafitmodererade, lättvattenkylda kanalkokarreaktorer av typen RBMK-1000. Tjernobyl (block 1-6) är indelad i tre huvudblock där två reaktorer delar gemensam turbinhall och utnyttjar vissa gemensamma hjälpsystem.

Block 1 och 2 är av en äldre konstruktion utan kondensationsbassäng. Block 5 och 6 är under uppförande. När byggnadsarbetet skall återupptas är inte känt.

RBMK-reaktorn arbetar vid 7 MPa tryck i primärsystemet och direktcykel till 2 stycken 500 MW-turbiner. Primärsystemet är uppdelat i två symmetriska delar. Varje del innehåller 4 huvudcirkulationspumpar (HC-pumpar), 2 ångsamlingslådor, en vattenlåda på sugsidan och en på trycksidan av huvudcirkulationspumparna, strypventiler för pumpflödet och strypventiler för varje kylkanal (se figur 3 - 6).

Härden inklusive grafitmoderatoren är placerad i ett gastät utrymme fyllt med en blandning av helium och kväve. I detta utrymme finns grafitkolumner innehållande trycktuber, styrvastar samt erforderlig hårdinstrumentering.

3.2 Bränslet

Bränslestavarna har en aktiv längd på 3,5 m och en yttre diameter på 13,5 mm, zirkoniumkapslingens tjocklek är 0,9 mm. Bränslekutsarna har en diameter på 11,5 mm och en täthet ca 10,5 g/cm³, anrikning är 2% U₂₃₅. Fria volymen inuti bränslestaven är fylld med en blandning argon-helium. Ett bränsleelement består av 18 bränslestavar som hålls på plats av spridare som är fästade vid ett centralt rör bestående av zirkoniumlegering (se figur 7).

Varje bränslekanal består av ett zirkoniumrör, med 88 mm yttre diameter och 4 mm godstjocklek, i hårdregionen (ca 7 m hög) och rostfritt stål utanför hårdregionen (ca 2,5 m över resp under själva härden). En bränslekanal innehåller 2 stycken bränsleelement vilka är sammankopplade till en enhet. Varje bränslekanal svarar således för lämplig vattenströmning och kylning av tillhörande bränsleelement.

3.3 Bränslebyte

I RBMK-reaktorerna bytes bränslet kontinuerligt under drift. Detta görs med en bränslemaskin som kan anslutas till bränslekanalerna under drift. Man klarar med hjälp av maskinen att byta bränslet i 5 kylkanaler per dygn vid full effekt. Vid avställd reaktor ökas kapaciteten till minst 10 kanaler per dygn.

Bränslebytet går i princip till enligt nedan:

Bränslebytesmaskinen är fylld med 30 gradigt vatten vid atmosfärstryck. Vattnet pumpas in i bränslemaskinen från kondensatförrådstanken och trycket regleras genom en strypventil på avloppssidan. Ventilen är i detta läge fullt öppen. Den kanal som bränsle skall bytas i väljs ut och strålskyddspluggen över kanalen lyfts bort.

Bränslebytesmaskinen körs fram till den utvalda positionen och anslutes till kanalen med en snabbkoppling.

Kontrollrumsoperatören kör in styrstav(ar) lokalt kring den aktuella positionen, detta för att minimera den avgivna nukleära effekten från bränslet i kylkanalen.

Trycket höjs nu i bränslebytesmaskinen genom att man stryker in ventilen på utloppssidan från bränslemaskinen tills trycket överstiger reaktortrycket. Backventilen i kanalen öppnas därigenom och ett flöde (0,3 kg/s) upprättas från bränslebytesmaskinen in till kylkanalen. Fortfarande avger bränslet effekt. Värmen kyls bort på normalt sätt genom det vatten som strömmar upp genom kanalen och ut genom ångavloppet på sidan av övre delen på kylkanalen.

Bränslebytesmaskinens kran sänker ned en kabel med koppling för bränselementen. Elementet lyfts upp i bränslebytesmaskinen och kyls där av det vatten som pumpas in i bränslebytesmaskinen. Trycket sänks i bränslebytesmaskinen och därigenom upphör flödet in till kylkanalen som då återtätas. Bränslebytesmaskinen kopplas bort från kanalen och körs till förrådsbassängen för bränsle. Det utbrända elementet sänks ned och frikopplas. Därefter hämtas färskt bränsle upp. Det färskt bränslet sätts sedan på plats på samma sätt och proceduren avslutas med att kylflödet till kanalen justeras och styrstav(arna) drages ut.

3.4 Härden

Härden innehåller bränsle-, styrstavs- och neutroninstrumenteringskanaler. Härden är cylindrisk, 11,8 m i diameter och 7 m hög. Den omges av en grafitreflektor som är ca 1 m tjock samt övre och undre grafitreflektorer som är ca 0,5 m tjocka. Härden vilar på nedre härdupptällningsplattan, som har 14,5 m diameter och är 2 m tjock. Härden täcks uppåt av ett lock med samma dimensioner. Det hela är inneslutet i en gastät tank, 14,5 m diameter och 9,8 m hög. Denna så kallade moderatortank är försedd med en expansionsbälge för att ta upp längdutvidgningen i samband med avställning och uppstart. Tanken omges i sin tur av ett biologiskt skydd av betong samt vattenkolonner närmast härdregionen. I vattenkolonnerna är 16 PRM och 8 IRM detektorer monterade. I reflektorn är kanaler borrade för inkörning av 4 SRM detektorer. SRM-detektorerna är utdragna vid effektdrift.

Härdens moderator utgörs av ca 2500 grafitkolonner (storlek vardera 0,25 x 0,25 x 7 m) med en total vikt av 1800 ton. Varje kolonn är borrade med ett vertikalt hål avsett för antingen en bränsle-, styrstavs- eller neutroninstrumenteringskanal. I 1661 stycken grafitkolonner finns trycktuber innehållande bränsle.

Under effektdrift bevakas förekomsten av eventuella kapslingskador av ett system med avkänning av fissionsgaser för varje bränslekanal. Avkänningskamrarna är placerade omedelbart före ångsamlingslådorna och möjliggör tämligen snabb identifiering av läckande bränsleelement. Vid detekterad kapslingskada kan det berörda bränsleelementet bytas under drift.

3.5 Härdkylflödet

Härdkylflödet upprätthålls vid full effekt genom att 6 (3 på varje sida) av de 8 huvudcirkulationspumparna är i drift. Pumparna suger från vattenlådan som står i förbindelse med ångsamlingslådan via ett antal falltuber. Matarvattenanslutningen i ångsamlingslådan är utförd så att merparten av vattnet går direkt till falltuberna. Detta gör att blandningen av mättat vatten (286° C) och matarvatten (167° C) håller en temperatur av 268° C och ett tryck av 7,2 MPa vid inloppet till pumparna. Marginalen till kokning vid inloppet till pumparna måste vara minst 23 m vattenpelare som skydd mot kavitation. Pumparna ger ett flöde på ca 1700 kg/s vid en tryckuppsättning på 1,5 MPa. Tillåtet flödesområde är 1200 - 2500 kg/s. Det totala kylflödet genom härden är, vid full reaktoreffekt, ca 10 400 kg/s.

Kylmedlet, 6,3 kg/s (max tillåtet 7,8 kg/s), pumpas in i varje trycksatt bränslekanal med en temperatur av 270° C. Temperaturstegring i kylkanalen är 14° C vid medeleffekten 1,9 MW (max tillåtet är 3,0 MW). Tvåfasblandningen lämnar kanalerna (trycktuberna) med en ånghalt av ca 15% (max tillåtet 20%).

3.6 Styrstavsystem

Totalt finns 211 avstängnings- och reglerstavar med ett gitteravstånd på 700 mm. Dessa stavar är indelade i 5 typer:

- 1 Reglerstavar för styrning av den axiella neutronfördelningen
- 2 Manuella regler- och avstängningsstavar
- 3 Automatiska reglerstavar för reglering av lokal effekt
- 4 Automatiska reglerstavar för reglering av global effekt
- 5 Snabbstoppsstavar.

Samtliga styrstavar manövreras in i härden uppifrån utom typ 1 som manövreras underifrån. Vid "snabbstopp" reduceras reaktoreffekten med ca 8% / sekund.

Ett separat kylsystem svarar för kylning av de trycktuber i härden som innehåller styrstavarna.

3.7 Inneslutning

Någon inneslutning av motsvarande typ som finns i de svenska reaktorerna förekommer inte i RBMK-1000 reaktorerna. Komponenterna och ledningarna tillhörande primärsystemet är dock inneslutna i förstärkta rum, vilka är byggda för att tåla ett övertryck på mellan 0,4 och 0,5 MPa. Dessa förstärkta rum är förbundna med en kondensationsbassäng, byggd i två våningar (egentligen två överliggande skilda kondensationsutrymme). Denna kondensationsbassäng är utrustad med både värmeväxlare och sprinklersystem för begränsning av ett eventuellt övertryck, samt retention av ev fissionsprodukter.

Härden och grafitreflektorn är inneslutna i den gastäta moderatortanken. Tanken är dimensionerad för att tåla ett inre övertryck av 0,08 MPa för att klara ett brott på en tryckkanal utan att tanken spricker. Detta utrymme är gastätt för att utestänga syre från grafiten. Det gastäta utrymmet genomströmmas av en blandning av helium / kvävgas med syfte att tidigt detektera skador på en trycktub för att förebygga en reaktion mellan vattenånga och grafit. Tanken står i förbindelse med nedblåsningssängerna via ett vattenlås.

3.8 Nödkylsystem

Det konstruktionsstyrande rörbrottet i RBMK-1000 utgörs av ett hypotetiskt brott på en vattenlåda (A900) på trycksidan av huvudcirkulationspumparna. Vid ett sådant brott upphör det normala kylflödet till hälften av härdens bränlekanaler. Brottflödet uppskattas till ca 40 ton/s.

Under dessa omständigheter skall nödkylsystemet (ECCS) uppfylla nedanstående krav:

- Systemet skall starta upp automatiskt på en ECCS-signal som skall skilja den oskadade från den skadade sidan av reaktorn på basis av följande indikatorer:
 - (a) Ökande tryck i ett av de tryckupptagande utrymmena för reaktorkretsen (rörbrott).
 - (b) (a) i kombination med någon av följande signaler bestämmer vilken sida av reaktorn som skadats:
 - o Sjunkande nivå i någon av ångsamlingslådorna.
 - o Sjunkande tryckskillnad mellan ångtrycket och trycket i någon av vattenlådorna efter huvudcirkulationspumparna.
- Systemet skall förse både den skadade och den oskadade halvan av reaktorn med erforderlig mängd kylvatten så att bränslet hindras från att smälta och/eller att omfattande kapslingsskador skall uppstå.
- Flödet till den skadade reaktorhalvan skall vara återupprättat inom 3,5 sekunder.

- Brottflödet får inte på ett oacceptabelt sätt reducera härdkylflödet i någon del av reaktorn.
- Efter avslutad dumpning av vattnet från ackumulatorerna skall ventilerna stänga för att hindra kvävgas att strömma in i härden.
- Nödkylsystemet skall fungera oberoende av yttre elkraft.

För att uppnå dessa krav har nödkylsystemet fördelats på tre 50%-iga stråk. Varje stråk innehåller två delsystem, ett för korttidskylning och ett för långtidskylning.

I två av stråken sker korttids-nödkylningen med hjälp av trycksatta (10 MPa) ackumulatorer (80 m³/stråk). Dessa tömmer genom att snabböppnande ventiler öppnas på signal om lågt tryck i primärsystemet. Flödet från tryckackumulatorerna är ca 1100 kg/s och upprätthålls under minst 100 sekunder. Backventiler nedströms vattenlådorna försäkrar att härdnödkylflödet från ackumulatorerna når bränslekanalerna, och ej går förlorat via brottstället.

Det tredje stråkets korttidsnödkylning utgörs av de eldrivna matarvattenpumparna. Pumparna ger minst 50% av det erforderliga flödet till den skadade halvan av reaktorn. Om haveriet är kombinerat med bortfall av yttre nät kommer pumparna att rulla ut i tandem med turbingeneratorn.

Långtidskylningen av härden för det dimensionerande rörbrottet sker med följande utrustning i vart och ett av de tre stråken:

- Två nödkylpumpar som tar vatten från kondensationsbassängerna och förser den skadade delen med vatten.
- En hjälpmatarvattenpump som tar vatten från kondensatförrådstanken och förser den oskadade delen av härden med vatten.

Nödkylningssignalen startar samtidigt upp dieselgeneratorerna, rensar skenorna och lastar på objekten med hjälp av dieselsekvensautomatiken vid låg spänning på skenorna.

3.9 Reaktorskydd och reglering

Reaktorn är utrustad med ett automatiskt effektreduceringsystem. Skyddssystemet har tre nivåer AZ1, AZ2 och AZ5.

AZ1 Utlöses om en av de sex idrift-varande huvudcirkulationspumparna skulle stoppa. Signalen genereras även av låg nivå i någon ångsamlingslåda i kombination med lågt matarvattenflöde till den ångsamlingslådan. Signalen ger en automatisk effektnedgång till 60%.

AZ2 Utlöses vid lastbortfall eller utlösning av en av de båda turbinerna. Signalen styr ned reaktorn till 50%

AZ5 Total och snabb avstängning av reaktorn genom att samtliga utom styrstavarna av typ 1 ovan (se avsnitt 3.6) körs in i härden.

AZ5 utlöses av följande orsaker:

- Effekten överstiger 110%
- Perioden kortare än 10 sekunder
- Hög-/låg nivå i någon ångsamlingslåda
- Lågt matarvattenflöde
- Högt tryck i någon ångsamlingslåda
- Högt tryck i något rum i reaktorbyggnaden
- Högt tryck i moderatortanken
- Låg nivå i expansionstanken för styrstavskylsystemet
- Lågt kylflöde i styrstavskylsystemet
- Båda turbinerna utlösta
- Bortfall av 3 huvudkylvattenpumpar för en reaktorsida
- Spänningsbortfall
- Nöd kylningssignal
- Manuellt

3.10 Elsystem

Kraftnätet intill Tjernobyl bedöms starkt. En närbelägen transformatorstation är ansluten till två 750 kV-linjer och tre 330 kV-linjer.

Tjernobyl 4 är ansluten genom stationstransformatorn (20/750 kV) till 750 kV-nätet, se figur 8, alternativt via uppstartstransformatorn (20/330 kV) till 330 kV-nätet. Vid utlösning av generatorn sker en snabbomkoppling till matning via 330 kV-nätet om det finns tillgängligt.

Stationen är utrustad med 3 dieselaggregat per block.

3.11 Uppstart av RBMK

Vid kall avställd reaktor är en huvudcirkulationspump i drift på varje sida av reaktorn. Strypventilerna efter pumparna är inställda så att minsta tillåtna flöde erhålls, för att hålla marginal mot kavitation i pumparna. Matarvattnet tillförs två ångsamlingslådor med hjälp av hjälpmatarvattenpumparna och on/off reglering. Trycket i ångsamlingslådorna är lika med atmosfärstrycket.

Reaktorn görs kritisk och när man fått indikation på IRM drages SRM-detektorerna ut ur härden. Effekten stabiliseras vid 2-3% global effekt, dock är effekten mycket ojämnt fördelad i härden.

Värmningshastigheten av reaktorn begränsas av de termiska spänningarna i reaktorns kylkanaler och övrigt konstruktionsmaterial. Värmningshastigheten 10° C/h får inte överskridas. När man når 100° C börjar trycket att stiga och vid 0,2-0,3 MPa släpper man på ånga till matarvattentanken och vid 1,5 MPa påbörjas vakuumdregningen i en kondensor.

När man erhållit erforderligt vakuum i kondensorn påbörjas upprullningen av turbinen och vid ca 5 MPa synkroniserar man och tar minlast.

När turbinen har minlast höjs reaktoreffekten snabbare och turbinen lastas på i sådan takt att trycket sakta stiger upp till 7 MPa. Vid ca 500 MWth öppnas strypventilerna för huvudcirkulationspumparna fullt. I takt med effektökningen startas ytterligare huvudcirkulationspumpar upp till 50% då 3 pumpar är i drift på varje reaktorsida.

4 BESKRIVNING AV HAVERISEKVENSEN I TJERNOBYL 4.

4.1 BAKGRUND

Beskrivningen utgör en sammanfattning av den information som redovisades i Wien 25 - 29 augusti 1986 från sovjetisk sida.

Tjernobyl 4 togs i kommersiell drift i slutet av 1983. En planerad avställning, för underhåll av blocket, hade beslutats till den 25 april 1986. Före avställningen skulle dock ett prov utföras med ena generatoren (TG8). Liknande prov hade gjorts två gånger tidigare, 1982 och 1984, dock utan att avsedda resultat hade uppnåtts.

Målet för det planerade provet var att undersöka möjligheterna att utnyttja turbinens rörelseenergi i samband med utrullning t ex efter turbinsnabbstängning, för att spänningsmata vissa objekt såsom huvudcirkulationspumparna och matarvattenpumparna. Yttre nätbortfall eller lastfrånslag i Tjernobyl utgör en av de svåraste transienterna. Vid de två tidigare proven hade generatorns spänning sjunkit snabbare än vad man kunde förvänta sig utgående från den tillgängliga mekaniska energin hos den utrullande turbinen. Därför hade man utrustat generator TG8 med en speciell spänningsregulator avsedd att eliminera problemet med för hastigt sjunkande spänning.

Provprogrammet var, enligt sovjetiska uppgifter, inte helt genomarbetat och hade inte fått officiellt godkännande. Det förefaller som provet betraktades som ett eltekniskt experiment utan någon direkt koppling till reaktorn och dess säkerhet. Mot bakgrund av att provets säkerhetsaspekter ej studerats ingående och ej heller redovisats, var sålunda driftpersonalen föga medveten om provets eventuella säkerhetsrisker. Som kommer att framgå i det följande gjordes dessutom stora avsteg från både provprogrammet och de säkerhetstekniska föreskrifterna, vilket resulterade i det svåra haveriet.

Till bilden hör också att de personer som planerat och ledde provet var angelägna att genomföra det, då inget nytt provtillfälle skulle ges före nästa planerade avställning om ca ett år.

Tjernobyl 4 hade under lång tid körts vid full reaktoreffekt (100% = 3200 MWth). Vid den aktuella tidpunkten fanns totalt 176 personer ur driftpersonalen på block 1-4 och 268 byggnadsarbetare på byggarbetsplatsen för block 5 och 6.

4.2 HAVERIFÖRLOPP

1986-04-25

K1 01.00

Den planerade effektnedgången påbörjas. Kl 13.05 samma dag kopplas turbingeneratoren (TG7) ifrån vid 50% reaktoreffekt. Alla objekt nödvändiga för blockets drift kopplas om till spänningsmatning från generator TG8.

K1 14.00

I enlighet med provprogrammet kopplas reaktorns högtrycksnödkylsystem bort. I rådande driftläge begär kraftkontrollen att Tjernobyl 4 skall ligga kvar vid 50% reaktoreffekt. Blocket körs vidare utan att högtrycksnödkylsystemet återställs, vilket strider mot säkerhetsföreskrifterna.

K1 23.10

Effektnedgången återupptas. Generatorprovet var ursprungligen planerat att utföras i samband med turbin- och reaktorutlösning från 20 - 30% reaktoreffekt. Under effektnedgången kopplar operatören om den automatiska effektregleringen (från lokalmoden till globalmoden), vilket enligt STF endast får göras vid låg effekt. Följden blir att operatören är oförmögen att kontrollera reaktoreffekten, vilken faller ner till ca 1% (30 MWth).

1986-04-26

K1 01.00

Operatören lyckas stabilisera reaktorn vid ca 6% effekt (200 MWth). I detta läge är det omöjligt att höja effekten ytterligare till de planerade 20 - 30% då reaktivitetsmarginalen är nästan obefintlig med en härd som kraftigt förgiftats av den s k Xenon-transienten. Denna låga reaktivitetsmarginal ligger nu under det värde som kräver avställning av stationen. Dessutom måste operatören, för att uppnå 6% reaktoreffekt, dra ut ett stort antal styrtavar, vilket också utgör ett avsteg mot en av de mest grundläggande säkerhetsföreskrifterna.

K1 01.03 - 01.07

I enlighet med provprogrammet startas de två huvudcirkulationspumpar som normalt står i reserv. Detta innebär att samtliga 8 huvudcirkulationspumpar nu är i drift. Normalt är färre pumpar (troligen 2) i drift vid ett dylikt driftläge, vilket ger ett normalt förhållande mellan kylflöde och reaktoreffekt. Driftläget med det mycket höga flödet (ca 16 000 kg/s) utgör en stor risk för kavitation i huvudcirkulationspumparna och därmed vibrations-skador i hela primärsystemet. Driftsättet ligger sålunda helt utanför säkerhetsföreskrifterna. Det höga kylflödet resulterar vidare i en minskning av ånghalten i härden och därmed i en tryck- och nivå-sänkning i ångsamlingslådorna.

K1 01.07

Operatörerna försöker att hålla reaktorns driftparametrar vid stabila värden, vilket dock misslyckas. Vattennivån i ångsamlingslådorna sjunker under den nivå där snabbstopp av reaktorn initieras. Operatörerna ser detta, och för att undvika reaktorsnabbstopp blockeras nu de signaler (lågt tryck och låg nivå i ångsamlingslådorna) som normalt initierar reaktoravställning. Operatörens handlande är i detta fall ytterligare ett brott mot säkerhetsföreskrifterna .

K1 01.19

Operatören ökar manuellt det kalla matarvattenflödet till ångsamlingslådorna för att höja vattennivån i dessa.

K1 01.19.30

Matarvattenflödet är nu ca 3 gånger större än utgående ångflöde från härden. När det kalla matarvattnet når härden sker en förnyad sänkning av ånghalten som resulterar i att reaktoreffekten sjunker. Ytterligare ett antal styrstavar (både automatiska och manuella kontrollstavar) måste dras ut ur härden för att bibehålla reaktoreffekten vid ett stabilt värde. Genom att dra ut ytterligare ett antal styrstavar bryter operatören ännu en gång mot en av de mest grundläggande säkerhetsföreskrifterna, vilken anger att minst 30 styrstavar alltid skall vara inkörda i härden. I det rådande driftläget befinner sig endast 6 till 8 styrstavar i härden.

K1 01.20

Trycket i primärsystemet sjunker fortfarande, dock relativt sakta, och dumpventilen på TG8 stängs nu helt, dels för att begränsa trycksänkningen, dels för att senare kunna kontrollera ånguttaget med turbinpådragsventilen. Reaktorn befinner sig fortfarande vid ca 6% effekt (200 MWth).

För att undvika reaktorsnabbstopp vid den planerade stängningen av TG8:s turbinpådragsventil blockeras tillhörande snabbstoppsvillkor (TG7 och TG8 utlösta). Motivet bakom denna blockering är att man snabbt vill ha tillgång till reaktorn för ytterligare prov om det första provet skulle misslyckas. Denna blockering utgör också ett allvarligt avsteg från säkerhetsföreskrifterna och provprogrammet.

K1 01.22

Operatören upptäcker att ångsamlingslådorna är överfyllda och stänger snabbt spädmatningsflödet till dessa.

Efter ca 20 sekunder börjar som följd av detta vattentemperaturen i primärsystemet och i härden att öka, liksom ånghalten. Den ökande ånghalten ger ett reaktivitetstillskott på grund av den positiva ångblåskoefficienten. Några automatiska styrstavar börjar att stega in i härden.

K1 01.22.30

Härdövervakningsprogrammet "SKALA" indikerar att antalet styrstavar i härden är långt under det minsta tillåtna. Indikationen anger vidare att detta driftläge kräver snabbstopp av reaktorn. Operatören tar dock ej hänsyn till detta och ingen åtgärd vidtas.

K1 01.23

Reaktorns driftparametrar bedöms av operatörerna som stabilare än på länge (i det aktuella tidsperspektivet).

K1 01.23.04

Operatören stänger turbinens pådragsventil vilket inleder själva provet. Trycket i primärsystemet och i ångsamlingslådorna ökar eftersom ångflödet till turbinen avstängts samtidigt som reaktorn hålls kvar vid ca 6% effekt, med blockerade snabbstoppsvillkor. Med sjunkande rörelseenergi hos TG8 stannar de 4 HC-pumpar som spänningsmatades från TG8. Detta leder till en kraftig minskning av härdkylflödet som tillsammans med den reducerade spädmatningen av ångsamlingslådorna (höjning av primärvattnets temperatur) resulterar i en ökning av ånghalten i härden. (Enligt sovjetiska uppgifter skulle den positiva ångblåskoefficienten ha motsvarat ca 30 pcm / % ångvolymprocent vid provtillfället).

K1 01.23.40

På grund av den positiva ångblåskoefficienten ökar reaktoreffekten hastigt. I detta läge beordrar skiftingenjören manuellt snabbstopp av reaktorn. Alla kontroll- och styrstavar börjar gå in i härden. Den relativt långsamma inkörningen, ca 0,4 m/s i den 7 m höga härden, kan inte kompensera för den snabba effektökningen. (Under normala driftförhållanden minskas reaktoreffekten med ca 8% / s vid aktiverat snabbstoppsystem).

K1 01.23.43

Den första effekttoppen (ca 10 gånger av nominell effekt) inträffar. Den begränsas huvudsakligen av bränslets Doppler-effekt. I ett försök att snabba upp reaktorns avställning bryter operatören strömmen till styrstavarnas hållspolar som gör att kontroll- och styrstavarna faller in i härden av egen tyngd. Operatören ser att styrstavarna ej når sitt innersta läge. Vid denna effektökning är reaktorn prompt kritisk.

K1 01.23.45

Det minskande kylvattenflödet och temperaturökningen i härden leder till en massiv ångbildning. På grund av den kraftigt positiva ångblåskoefficienten ökar reaktoreffekten okontrollerat. Den andra effektexkursionen inträffar. Reaktorn är ånyo prompt kritisk och effekten ökar under ca en sekund till drygt 50 gånger den nominella effekten. Denna våldsamma effektexkursion varar en knapp sekund och avslutas genom att bränslet fragmenteras i bränslekanalerna samt genom att härdkonfigurationen spjälkas sönder.

Anm: det är knappast korrekt att tala om härdsmältning i det här fallet då bränslet bedöms ha överhettats så snabbt och till den graden att det måste ha fragmenterats i kontakt med det kalla kylvattnet / ångan. (Om man antar fullständig ångbildning i härden vid exkursionens början, dvs en ånghalt på 100% , erhålles ett reaktivitetstillskott av ca 1500 pcm, dvs ca 3 beta. Beta anger härvid andelen fördröjda neutroner i härden. Vidare och enligt sovjetiska uppgifter motsvarar snabbstoppsystemets maximala reaktivitetsvärde ca 1 beta/s, vilket dessutom förutsätter att motsvarande 30 stavar är ursprungligen införda i härden).

K1 01.23.46

Ångtrycket i bl a ångsamlingslådorna ökar med ca 1 MPa / sekund. På grund av den kraftiga ångbildningen och det ökande ångtrycket brister de trycktuber som innehåller bränslet. Härvid sker en kraftig trycksättning av den s k moderatortanken som brister katastrofalt.

K1 01.24

En kraftig explosion inträffar som lyfter alla övre interna delarna av reaktorn, inklusive den drygt 2 meter tjocka, med 17 meter diameter, 1000 ton tunga biologiska skärmen. När de övre interna delarna lyftes slits de till moderatortanken svetsade tryckrören och styrstavskanalerna av.

Ännu en explosion inträffar någon sekund därefter som förstör en stor del av reaktorbyggnaden. Denna senare explosion bedöms vara en knallgasexplosion som resulterat från vatten/zirkaloy- och vatten/grafitreaktioner i närvaron av luft från reaktorhallen efter det att den övre delen av reaktorn förstörts. (Man kan dock inte utesluta att denna explosion i själva verket varit en ångexplosion eller en senare reaktivitetsexkursion eller en kombination av dessa).

Vid den senare explosionen kastas brinnande föremål och några procent av bränslet ur reaktorbyggnaden. Ett 30-tal bränder startar, den svåraste och säkerhetsmässigt viktigaste utgörs av branden på det gemensamma turbinhallstaket för block 3 och 4..

K1 02.54

Brandmännen koncentrerar sina insatser till att släcka branden på turbinhallstaket så att block 3:s säkerhet ej äventyras.

K1 05.00

Alla bränder har släckts. Block 3 ställs av.

1986-04-27

K1 01.13

Block 1 ställs av.

K1 01.23

Block 2 ställs av.

5 BIDRAGANDE ORSAKER TILL HAVERIET

Analysen av de sovjetiska rapporterna angående haveriet möjliggör en klassificering av dess huvudsakliga felorsaker enligt följande:

- reaktorkonstruktion och säkerhetsfilosofi
- operatörernas avsteg från säkerhetsföreskrifterna
- avsaknande av en tät och tryckupptagande inneslutning

5.1 Systemkonstruktion och säkerhetsfilosofi

5.1.1 Positiv ångblåskoefficient

Det förekommer ingen lättvattenreaktor i västvärlden som körs under normal drift med en s k positiv ångblåskoefficient.

RBMK-reaktorer körs däremot med en positiv ångblåskoefficient under normal drift. Under vissa driftförhållande såsom det med för många utdragna kontroll- och styrstavar blir denna ångblåskoefficient ännu mer positiv.

Denna fysikaliska egenskap gör RBMK-reaktorerna svårstyrda och framförallt instabila, vilket medför risken att reaktoreffekten kan skena iväg (reaktorn blir prompt kritisk) utan möjlighet för operatören att stoppa effektutvecklingen innan härdsador inträffat. Det förtjänar att påpeka att Marvikenprojektet lades ner på grund av förekomsten av denna för reaktorsäkerheten negativa parameter. Vidare stängdes en kanadensisk reaktor (Gentilly) av, då reaktorn konstaterats svårstyrd på grund av en positiv ångblåskoefficient.

Sovjetiska tekniker har naturligtvis varit medvetna om denna mycket svårhanterliga parameter i RBMK-reaktorerna och infört en rad administrativa och systemtekniska åtgärder med syfte att förhindra okontrollerbar effektstegring. Vissa svagheter i dessa åtgärder måste emellertid ha varit kända för dem, baserade på den sovjetiska säkerhetsfilosofin enligt vilken vissa haverier ej betraktas som troliga.

5.1.2 Långsamt snabbstoppsystem

Snabbstoppsystemet i RBMK-reaktorerna är långsamt i förhållande till potentiellt snabba effektökningar på grund av den positiva ångblåskoefficienten. Snabbstoppsystemet är konstruerat på ett sådant sätt att en tidsmässigt tillräckligt snabb avställning av reaktorn ej kan garanteras vid missöde resulterande i snabba reaktivitetstillskott. Ett missöde tillhörande denna kategori utgörs av ett plötsligt brott på en huvudångledning vid låg effekt. Förloppet efter ett sådant ångledningsbrott i RBMK-1000 (ångledningsbrott => trycksänkning i primärsystemet => ökning av ånghalten i härden => reaktivitetsökning => effektökning i härden) har inte redovisat från sovjetisk sida.

Enligt sovjetiska uppgifter, vilka presenterats i Wien, kommer dock en förbättring av snabbstoppsystemet i RBMK-reaktorer att göras innehållande bl a den eventuella tillbyggnaden av ett snabbt borinsprutningssystem av samma principiella konstruktion som den i de svenska kokvattenreaktorerna.

Dessutom kommer de säkerhetstekniska föreskrifterna att modifieras med avseende på antalet styrstavar införda i härden under drift. Således kommer alltid en reaktivitetsmarginal motsvarande 80 st "ekvivalenta styrstavar" i stället för närvarande 30 st att finnas införda i härden. Denna åtgärd samt övergången till ett bränsle med 2,4% U-235 och fasta absorbatorer kommer att begränsa ångblåskoefficienten till, enligt sovjetiska uppgifter, säkerhetsmässigt acceptabla värden.

5.2 Driftpersonalens felhandling

Med driftpersonalen menas nedan både personalen i kontrollrummet, de tekniker som ledde provet med turbingeneratoren samt de som utformat provprogrammet.

Operatörernas felhandling resulterade i olyckans svåra konsekvenser då åsidosättandet av flera av de mest grundläggande säkerhetsföreskrifterna hade placerat reaktorn i ett ytterst instabilt tillstånd. Den positiva ångblåskoefficienten bidrog sedan till den katastrofala effektutvecklingen i härden. De viktigaste felhandlingarna och brotten mot driftföreskrifterna sammanfattas nedan.

- Minskning av reaktivitetsmarginalen till ett värde under det tillåtna. Konsekvensen av detta var att reaktorns skyddssystem var ineffektiva.
- Felaktig överkoppling av reglersystemet för reaktoreffekten. Konsekvensen blev att reaktoreffekten sjönk till 1%, långt under det inför provet planerade värdet (20 - 30%). Reaktorn förblev dessutom svårstyrd under ett antal timmar innan operatören kunde stabilisera reaktoreffekten vid ca 6%.
- Felaktig start av huvudcirkulationspumparna. Detta brott mot säkerhetsföreskrifterna gjordes för att uppfylla ett villkor i provprogrammet. Detta ledde till en kraftig underkylning av primärsystemet då reaktoreffekten enligt provprogrammet borde ha varit högre än vad den var när HC-pumparna startades.
- Blockering av utlösningvillkor för reaktorns skyddssystem vid signal för utlösning av båda turbingeneratorer. Det direkta motivet för denna blockering var att man önskade ha snabb tillgång till reaktorn för ett förnyat prov om det första misslyckats. Konsekvensen av denna blockering var en degradering av reaktorns automatiska avställningsfunktioner.
- Blockering av utlösningvillkor för reaktorns skyddssystem vid signal för lågt tryck och låg vattennivå i ångsamlingslådorna. Motivets var att genomföra provet trots reaktorns ytterst insta-

bila driftläge. Konsekvensen av denna blockering var att reaktorns skyddssystem blev helt förbikopplat med avseende på de parametrar som avspeglar värmeutvecklingen i härden.

- Utebliven manuell snabbavställning av reaktorn trots information och utskrift från hårdövervakningssystemet att sådant omedelbart skulle göras. (Operatörerna erhöll denna information knappt två minuter före effektexkursionen, dvs tid fanns fortfarande tillgänglig i detta skede för att snabbstoppa reaktorn till ett säkert driftläge).

Det är omöjligt att förstå varför operatörerna var så angelägna att genomföra provet att de medvetet bröt ett flertal gånger mot både säkerhetsföreskrifterna och provprogrammet. Händelseförloppet före själva förstörelsen av reaktorn tyder dessutom på att operatörerna ej förstod vissa processparametrar och systemfunktioner samt delvis hade tappat uppfattningen om vilka risker som var kopplade till de olika avstegen från föreskrifterna och provprogrammet.

Simulatorutbildning av de operatörer som kör RBMK-reaktorerna är troligtvis av mycket begränsad omfattning. Det är över huvud taget ej möjligt - för oss - att ange om just de inblandade operatörerna vid Tjernobyl 4 hade genomgått s k återträning vid någon simulator. Den främsta orsaken till denna begränsade simulatorutbildning i Sovjet är att endast en simulator av RBMK-konstruktionen finns tillgänglig (i Smolensk) samtidigt som ca 20 RBMK reaktorer är i drift.

5.3 Avsaknande av stark inneslutning

En inneslutning i svensk bemärkelse förekommer inte i den aktuella sovjetiska reaktortypen. Bakom avsaknanden av en tät och stark inneslutning ligger den sovjetiska säkerhetsfilosofin vilken i det avseende skiljer sig från västerländernas. Man har således hittills inte ansett att en dylik inneslutning skulle vara säkerhetsmässigt nödvändig, varken för RBMK- eller för VVER-reaktorerna. (Modernare VVER-reaktorer byggs numera med en inneslutning).

Således är det endast de utrymmen som innehåller ångsamlingslådorna och vissa andra primärkomponenter som kan emotstå en nämnvärd tryckökning. Konstruktionstrycket för dessa utrymmen är ca 0,45 MPa övertryck. Övertrycket avsäkras till kondensationsbassängen.

Den ur säkerhetssynpunkt viktiga moderatortanken anges kunna emotstå endast 0,08 MPa övertryck, också det avsäkrat mot kondensationsbassängen.

Övriga utrymmen inklusive den övre delen av reaktorbyggnaden tål endast 0,08 MPa övertryck.

Den svaga byggnadskonstruktionen tillsammans med den instabila reaktortypen är utöver de gjorda mänskliga felhandlande en av de främsta orsaker varför haveriet i Tjernobyl 4 resulterade i så omfattande konsekvenser i och utanför verket.

6 VIDTAGNA OCH PLANERADE ÅTGÄRDER VID TJERNOBYL 4

Nedan sammanfattas de viktigaste åtgärder som de sovjetiska teknikerna och myndigheterna vidtog efter haveriet.

6.1 Brandbekämpning

Den viktigaste uppgiften efter förstörelsen av reaktorn var för de sovjetiska teknikerna att bekämpa de talrika brandhärddar som brutit ut. Härvid koncentrerades resurserna på bekämpning av branden på det gemensamma turbinhallstaket för block 3 och 4. Denna svåra brand var enligt sovjetiska uppgifter bemästrad knappt en timme efter de inledande våldsamma explosionerna. De övriga bränderna var under kontroll ytterligare tre timmar senare.

6.2 Bedömning av bränsletillståndet

Vid haveriet förstördes, utöver själva härdregionen, också reaktorhärdens kylsystem. Som en följd härav och för att förekomma ett eventuellt nytt radioaktivt utsläpp var det således viktigt att kunna bedöma bränslets tillstånd som en funktion av tiden.

Den viktigaste slutsatsen blev att härdtemperaturen låg under smältpunkten för urandioxiden samt att den förstörda härdkonfigurationen vilade på nedre härduppställningsplattan.

Efter en gradvis ökning av bränslets temperatur till ca 2000 grader celsius på grund av resteffekten fram till 5 maj har en ständig sänkning av bränsletemperaturen skett.

6.3 Begränsning av olyckskonsekvenserna

Tidigt efter haveriet insåg man vikten att begränsa det radioaktiva utsläppet från härdregionen samt förebygga återkriticitet av den skadade härden. I detta syfte dumpades över härden, från militära helikoptrar, drygt 5000 ton av en blandning innehållande bland annat bor, bly och sand. Detta gjordes huvudsakligen mellan 28 april och 2 maj.

Dumpningen av ovan nämnda ämnen bidrog effektivt till begränsningen av det primära radioaktiva utsläppet. Samtidigt försämrades dock härdens kylning genom att luftflödet genom härden delvis blockerats. För att inte överbelasta reaktorns interna strukturer stoppades dumpningen den 2 maj.

Härdtemperaturen ökade kontinuerligt på grund av det försämrade luftkylflödet. Detta resulterade i ett ökande radioaktivt utsläpp, vilket kulminerade den 5 maj. Från och med den dagen begränsade man bränsletemperaturen, som då uppnått ca 2 000 grader Celsius, genom att spruta kvävgas underifrån härdregionen.

Efter det att man försäkrat sig om att den skadade härden befann sig på nedre uppställningsplattan och inte utgjorde något hot med avseende på kondensationsbassängen bestämdes att bygga en tjock betongplatta

under kondensationsbassängen. Strax ovanför betongplattan byggdes en plattvärmväxlare. Detta gjordes som ett led i skyddet av grundvattnet i det fallet att härden skulle tränga sig nedåt på grund av den utvecklade resteffekten.

6.4 Dekontamineringsåtgärder

Från tillgängliga sovjetiska uppgifter är det omöjligt att göra en någorlunda säker uppskattning av strålningsnivåerna efter haveriet vid olika platser och byggnader innanför staketet.

Däremot anges att olika dekontamineringsåtgärder vidtogs som resulterade i en minskning av strålningsnivåerna (gamma) med en faktor 10 - 15. Dosraten vid block 1 och 2 anges ha varit mellan 2 och 10 mrem/h i juni. Kring den skadade reaktorn anges motsvarande dosraten till mellan 20 och 30 mrem/h.

För att uppnå denna dosreduktion genomfördes bl a följande åtgärder:

- Spolning av yttre/inre väggar med dekontamineringsvätskor.
- Beläggning av en plastfilm (polymer) på taket på vissa byggnader och marken för att binda radioaktivt damm.
- Bortförsel av jordens övre skikt (5 - 10 cm) i behållare till anläggningen för fast avfall vid kraftverket.
- Gjutning av betongplattor för att täcka en stor del av stationsområdets markyta.

6.5 Begravning av den skadade reaktorn

Som långtids åtgärd för att innesluta radioaktiviteten från block 4 beslöts att bygga en "sarkofag" kring den skadade reaktorn (se figur 9). Hela byggnaden kommer sålunda att inneslutas i en tät och kraftig betongkonstruktion med en tjocklek > 1 m. Innanför denna "sarkofag" planeras dessutom ingjutning av härdregionen och vissa primärutrymmen i betong. Man planerar också uppbyggnaden av ett kylsystem för att begränsa temperaturökningen innanför "sarkofagen". En kraftig betongvägg kommer att resas upp i turbinhallen mellan block 3 och block 4:s turbiner.

Vidare kommer skyddstäckning att ordnas ovanför turbinhallstaket. En kraftig metallvägg kommer också att byggas i turbinhallen mellan block 1 och block 2:s turbiner.

7 PLANERADE ÅTGÄRDER FÖR ÖVRIGA RBMK-REAKTORER

Efter haveriet i Tjernobyl 4 har åtgärder planerats för att öka säkerheten vid RBMK-reaktorer. Dessa åtgärder är både systemmässiga och administrativa. De viktigaste av dessa återges nedan.

- För samtliga idrifttagna RBMK-reaktorer kommer övre stoppgränsen för kontrollstavarna i härden att vara 1,2 m. Denna åtgärd kommer att öka avstängningssystemet effektivitet att begränsa neutroneffekten vid initieringsskedet.
- Som komplettering till förra punkten kommer reaktivitetsmarginalen att höjas från 30 st till 80 st ekvivalenta styrstavar införda i härden under normal drift. Med denna åtgärd vill man motverka och begränsa den positiva ångblåskoefficienten till "ett acceptabelt värde". Denna åtgärd utgör en tillfällig lösning.
- En mera långsiktig lösning för begränsning av den positiva ångblåskoefficienten kommer att innebära att bränslets initialanrikning ökas från ca 2% till 2,4% och att man samtidigt använder sig av fasta brännbara absorbatörer i bränslet. Avsikten med denna åtgärd är att begränsa alla tänkbara reaktivitetstillskott till ett värde mindre än andelen fördröjda neutroner (en beta).
- Utöver dessa åtgärder kommer utbildning av bl a RBMK-operatörerna att prioriteras och förstärkas. Som nämnts tidigare har simulatorutbildningen av berörda operatörer varit ytterst begränsad, då endast en RBMK-simulator finns tillgänglig i Sovjet.

Enligt sovjetiska uppgifter kommer också administrativa åtgärder att vidtas för att förbättra både disciplin och uppföljning av driftinstruktionerna.

8 FRIGÖRELSE AV RADIOAKTIVITET FRÅN DEN HAVERERADE TJERNOBYL 4

Haveriförloppet i Tjernobyl skilde sig i grunden från de förlopp som är tänkbara i våra vattenreaktorer. Den enda process, som i de senare bedöms kunna leda till omfattande bränsleskador, är att kylningen av bränslet inte motsvarar energiproduktionen, med överhettning och eventuell smältning av bränslet som följd.

I Tjernobyl inleddes haveriet med en våldsam explosion: reaktoreffekten "skenade" på grund av den för reaktortypen karakteristiska positiva ångblåskoefficienten. Effektstegringen gav en tryckökning i primärsystemet på ca 1 MPa per sekund och ledde till omfattande mekanisk förstörelse, inte bara av moderatortanken med kringutrustning, utan också av bränslet, som fragmenterades eller förstoftades. Cirka 30% av bränslet uppskattas ha förstörts på detta sätt. Bränslestoftet spreds sedan utanför reaktorn när grafiten och de explosiva gaserna antändes. Ett "fyrverkeri" av brinnande flagor slog upp genom det raserade taket (och ledde till sekundärbränder) och den heta gasplymen steg till 1200 m höjd.

Det var alltså inte fråga om en härdsälta utan en mekanisk finfördelning, som kan ha varit mer effektiv då det gäller spridning av svårflyktiga ämnen. Det radioaktiva nedfallet i närområdet (ut till 30 km) hade sålunda en sammansättning som i stort sett överensstämde med den i bränslet, sånär som på att de mest lättflyktiga ämnena - jod, cesium och tellur - var överrepresenterade. Också alfaaktiva transuraner konstaterades i närområdet. Deras aktivitet härrörde till 90% från curium-242 (halveringstid 160 dygn) och till cirka 10% från olika plutoniumisotoper.

I och med att grafitbranden avtog i styrka och reaktorn täcktes med sand m m, skedde en filtrering som minskade utsläppen. Ett visst utläckage av radioaktivt stoft med de utströmmande förbränningsgaserna fortsatte dock.

En ny fas i utsläppsförloppet började den 2 maj då den dåligt kylda reaktorn på grund av resteffektutvecklingen nått så hög temperatur att stora mängder aktivitet började diffundera ut och frigöras från det kvarvarande bränslet. Det (sönderfallskorrigerade) utsläppet blev i denna fas mångdubbelt större än det som skedde vid explosionen. Man uppskattar att bränsletemperaturen nu överskred 2000° C. Till frigörelsen bidrog troligen en omvandling av urandioxid till karbid. I början av denna andra utsläppsfas var det huvudsakligen jod som frigjordes. Så småningom fick utsläppet återigen en sammansättning som motsvarade den i bränslet. De radioaktiva ämnena spreds som aerosoler, bland annat bundna till grafitpartiklar.

Den 6 maj minskade aktivitetsfrigörelsen plötsligt och upphörde nästan helt. Detta var framför allt en följd av att man tillfört kemikalier som band aktiviteten i svårflyktiga föreningar. Dessutom hade temperaturen åter börjat sjunka.

Från explosionen till och med den 6 maj har en aktivitetsmängd av uppskattningsvis 50 MCi (= $1,8 \times 10^{18}$ Bq) kommit ut i omgivningen (europeiska delen av Sovjetunionen). Ädelgaserna är ej inräknade. Värdet är sönderfallskorrigerat och gäller för tidpunkten 6 maj. Det

motsvarar ca 3.5% av härdens totala innehåll, inklusive transuraner. Ädelgaserna beräknas ha kommit ut till 100%. Följande andelar av härdinnehållet uppges ha deponerats i Sovjetunionen: jod till 20%, cesium till 10%, strontium till 4% och plutonium till 3%. Osäkerheten anges till 50%. För de mer svårflyktiga ämnena torde det rapporterade nedfallet i Sovjet vara ungefär lika med utsläppet. De lättflyktiga ämnena däremot spreds långt utanför Sovjet, varför de totala utsläppen av jod och cesium uppskattas vara 2-3 gånger större än vad ovanstående siffror anger.

9 DOS- OCH KONSEKVENSBILDEN I NÄROMRÅDET

9.1 Dos- och konsekvensbilden inom kraftverket

Som nämnts tidigare befanns 176 personer tillhörande driftpersonalen samt 268 byggnadsarbetare inom kraftverksområdet vid tidpunkten för haveriet. De första 29 strål- och brandskadade personer transporterades till närliggande sjukhus redan en halv timme efter haveriet. Jodtabletter hade distribuerats till samtliga inom kraftverket två timmar efter haveriet.

Av de personer som befanns inom kraftverket erhöll 22 personer mellan 600 och 1600 rad, alla avled senare. 23 personer erhöll mellan 400 och 600 rad, sju av dessa har avlidit. 158 personer erhöll mellan 100 och 400 rad, en av dessa har avlidit. En person som befann sig i reaktorhallen vid haveriet har ej återfunnits.

I kontrollrummet för block 4 arbetade tre eller fyra personer; samtliga lever och bedömd ha erhållit måttliga doser. Fyra av de personer som erhöll höga stråldoser och avlidit var de eltekniker som befann sig i turbinhallen när haveriet inträffade.

9.2 Dos- och konsekvensbilden i närområdet

I motsats till beskrivningen av reaktorläggningen och haveriförloppet är beskrivningen i den ryska rapporten av omgivningskonsekvenserna svårtolkad och knapphändig. Den kraftigaste markbeläggningen erhölls dagarna efter olyckan i riktningarna väst, nordväst och nordost om kraftverket. Dosraten "nära anläggningen översteg 100 mR/h". Sålunda uppmättes i staden Pripyat, 3 km från verket, 200 - 600 mR/h på förmiddagen den 27 april. Efter 15 dagar var maximala expositionsraten 50 - 60 km västerut och 35 - 40 km norrut 5 mR/h. (Som jämförelse kan nämnas att man i Sverige i Gävleområdet mätte som mest ca 0,6 mR/h).

Vid planeringen av motåtgärder har man delat in omgivningen i tre zoner: kraftverkszonen, 10 km- och 30 km-zonen. I dessa zoner sker en detaljerad kartläggning av aktiviteten, och passagen av personer och fordon är reglerad och begränsad.

På kraftverksområdet skedde en kraftig och ojämn kontaminering med radioaktiva aerosoler och damm. Tidiga åtgärder var att binda aktiviteten med snabbpolymeriserande lösningar, att avlägsna ytskikt och att gjuta betong. Huvuddelen av gammadosen härrörde emellertid inte från nedfallet utan från den havererade reaktorns direktstrålning, och någon påtaglig minskning av dosen väntas inte förrän reaktorn blivit effektivt avskärmad. Förutom att möjliggöra saneringsarbetet kring block 4 var målet för åtgärderna att förbereda återstarten av de övriga blocken. Den 20 maj uppmättes i de mest förorenade utrymmena i block 1 och 2 10 - 600 mR/h. Detta kunde genom dekontaminering nedbringas till 2 - 10 mR/h. Utanför block 1 var gammaexpositionen efter dekontaminering fortfarande 20 - 30 mR/h.

Nedfallet i kraftverkszonen hade ungefär bränslets sammansättning. På större avstånd fanns en betydande anrikning av de lättflyktiga ämnena jod, cesium och tellur. För 30 km-zonen anges att aktiviteten (i juli 1986) till mer än 90 % härrörde från zirkonium-95 ($T_{1/2} = 65$ d),

neob-95 (35 d), rutenium-103 (40 d), cerium-141 (32 d), cerium-144 (290 d), cesium-134 (2.3 år), barium-140 (13 d) och strontium-89 (54 d).

Dessa ämnen blir emellertid inte begränsande för den framtida användningen av området, då de har kort halveringstid eller liten benägenhet att tas upp i växter. I stället bestäms den radiologiska situationen på längre sikt av cesium-137 och strontium-90 (båda med halveringstiden ca 30 år).

Cesium-137-beläggningen inom 30 km zonen anges lokalt vara 30 000 kBq/m². Man kan också härleda att cesium-137-nedfallet i Kiev, summerat över tiden 26 april - 5 maj, gav ca 20 kBq/m². (Den högsta lokala cesium-137-beläggning som mätts i Sverige är ca 200 kBq/m²). Några data på plutoniumbeläggningen i 30 km-zonen ges inte. Däremot rapporteras den totala plutoniumaktiviteten i gräs och på mark i olika riktningar på ca 50 kms avstånd vara 60 - 200 Bq/m². Plutoniumbeläggningen blir inte avgörande för beslut beträffande dekontaminering eller framtida markanvändning. I 30 km-zonen är strådoserna lokalt så höga att man räknar med att kunna påvisa skador på särskilt strålningskänsliga växter. Utanför 30 km-zonen väntas ingen påverkan av det terrestra ekosystemet.

Det kommer att ta flera år innan dosläget i 30-km-zonen stabiliserats. En omfördelning av aktivitet kommer att fortgå genom naturliga processer så länge kraftiga koncentrationskillnader finns. Den aktivitet som fångats upp av vegetationen hamnar först så småningom på marken och i jorden. I barrskog kan denna process ta tre till fyra år. Man räknar inte med att den evakuerade befolkningen, 135 000 människor, kan återvända förrän en betydande stabilisering skett, dvs om några år.

Avsikten är att fortsätta utnyttja de belagda områdena i jordbruket. Olika åtgärder har vidtagits eller övervägs för detta ändamål.

- Övergång från livsmedelsproduktion till framställning av utsäde, djurfoder och industriprodukter.
- Fixering av de radioaktiva ämnena i marken för att förhindra dammbildning och växtupptag. Tillsats av lersuspensioner och zeoliter.
- Tillförsel av kalk och mineralgödselmedel som konkurrerar med de radioaktiva ämnena vid växternas näringsupptag.
- Tillämpning av särskilda dekontamineringsmetoder, t ex mekanisk bortskaffning av ytskikt, direkt eller efter stabilisering med latex-emulsion.

Innevarande år genomförs skörden på normal sätt i de evakuerade områdena, men med särskilda åtgärder, som bl a begränsar resuspension. Skördeprodukterna kontrolleras, lagras och används därefter som livsmedel och utsäde, eller i industriproduktion.

Den radioaktiva beläggningen på byggnader på landsbygden i 30-km-zonen varierar kraftigt. Dekontaminering har skett genom spolning med dekontamineringsvätska (15 l/m²). I allmänhet kunde man därigenom minska

strålningen till naturlig bakgrunds nivå. Samtidigt ökade aktivitetskoncentrationen på marken längs väggarna 2 - 2.5 gånger, varför jorden närmast husen forslats bort.

Ett stort potentiellt problem var radioaktiv förorening av vattendrag och vattentäkter. Vattenprovtagning har därför skett i stor omfattning i tillflödena till Djnepr, i Djnepr själv och i Kievs dricksvattenreservoar, som får sitt vatten från Djnepr. Till en början härrörde vattenaktiviteten från det direkta nedfallet på ytan. Senare tillfördes aktivitet genom avrinning från förorenade markområden. Knappast någon nederbörd förekom under maj månad. Den 3 maj då Kiev-reservoaren nådde sitt högsta aktivitetsvärde, var (den dominerande) jod-131-aktiviteten i ytvattnet ca 1 000 Bq/l, dvs i närheten av gränsvärdet. Dessutom fanns zirkonium-95 och barium-146-aktivitet i betydande koncentrationer. I mitten av juni var den totala vattenaktiviteten nere i några Bq/l, vilket tyder på betydande utspädning eller sedimentering. Sedimentaktiviteten var upp till några kBq/kg. Aktivitetsfördelningen i reservoaren var dock mycket ojämn.

Den högsta vattenaktiviteten mättes i kraftverkets kylvattendamm, där aktiviteten var flera storleksordningar högre än i Kiev-reservoaren. Aktiviteten i dammens bottensediment var i sin tur 100 000 gånger högre än i vattnet. Man förväntar sig omfattande strålskador på botterlevande organismer i kylvattendammen.

För de 135 000 människor som evakuerats från 30-km-zonen uppges medeldosen vara 100 mSv. I staden Pripjat och andra orter nära kraftverket har individdoser på 400 mSv erhållits. Enligt den ryska rapporten kan man vänta sig ca 200 dödfall i cancer bland de evakuerade över en 70-års-period. Detta är någon procent av det normala antalet cancerdödsfall, och kommer därför knappast att kunna påvisas i cancerstatistiken.

10 KOMMENTARER

- Efter analys av de sovjetiska rapporterna måste RBMK-reaktorerna betecknas som instabila i sin grundkonstruktion. Härvid menas risken att reaktoreffekten ökar okontrollerat vid vissa störningar på grund av den positiva ångblåskoefficienten.
- Till skillnad mot västerländska lättvattenreaktorer bidrar också den mycket stora härden i RBMK-reaktorer till deras latent instabilitet. Detta har resulterat i utvecklingen av ett komplicerat styr- och kontrollsystem för härdens neutroneffekt. I sammanhanget bör snabbstoppsystemet relativa långsamhet jämfört med västerländska lättvattenreaktorer understrykas.
- Till haveriets konsekvenser har den stora brännbara grafitmängden, drygt 1800 ton, bidragit.
- En inneslutning i svensk bemärkelse förekommer ej i den aktuella sovjetiska reaktortypen.

Frågan kommer troligtvis att ställas om Tjernobyl-haveriet kunnat få lindrigare konsekvenser om blocket varit försett med en tät och stark inneslutning av västerländsk typ.

Det är svårt att bedöma om en västerländsk inneslutning hade kunnat bibehålla sin integritet vid ett haveri liknande det som inträffade i Tjernobyl 4. Svårigheten i bedömningen ligger främst i att uppskatta den vid haveriet frigjorda energin (effektexkursionen, vätgasexplosionen samt den senare uppkomna grafitbranden).

Samtidigt som ovan nämnda fråga ställs måste man understryka att ett haveriförlopp som det som inträffade i Tjernobyl 4 ej kan förekomma i västerländska lättvattenreaktorer, varken när det gäller den utvecklade neutroneffekten, omfattningen av explosionen eller grafitbranden.

- Operatörernas sammanlagda felhandlande bidrog på ett avgörande sätt till haveriet. Reaktorn hamnade slutligen i ett ytterst instabilt tillstånd efter åsidosättandet av flera av de mest grundläggande säkerhetsföreskrifterna samt efter flera avsteg från det 1 och för sig ej säkerhetsmässigt godkända provprogrammet. Händelseförloppet före haveriet tyder dessutom på att operatörerna (inklusive eventuellt närvarande elteknikerna) ej förstod processparametrarna samt delvis tappat uppfattningen om vilka risker som var kopplade till de olika avsteg från föreskrifterna.

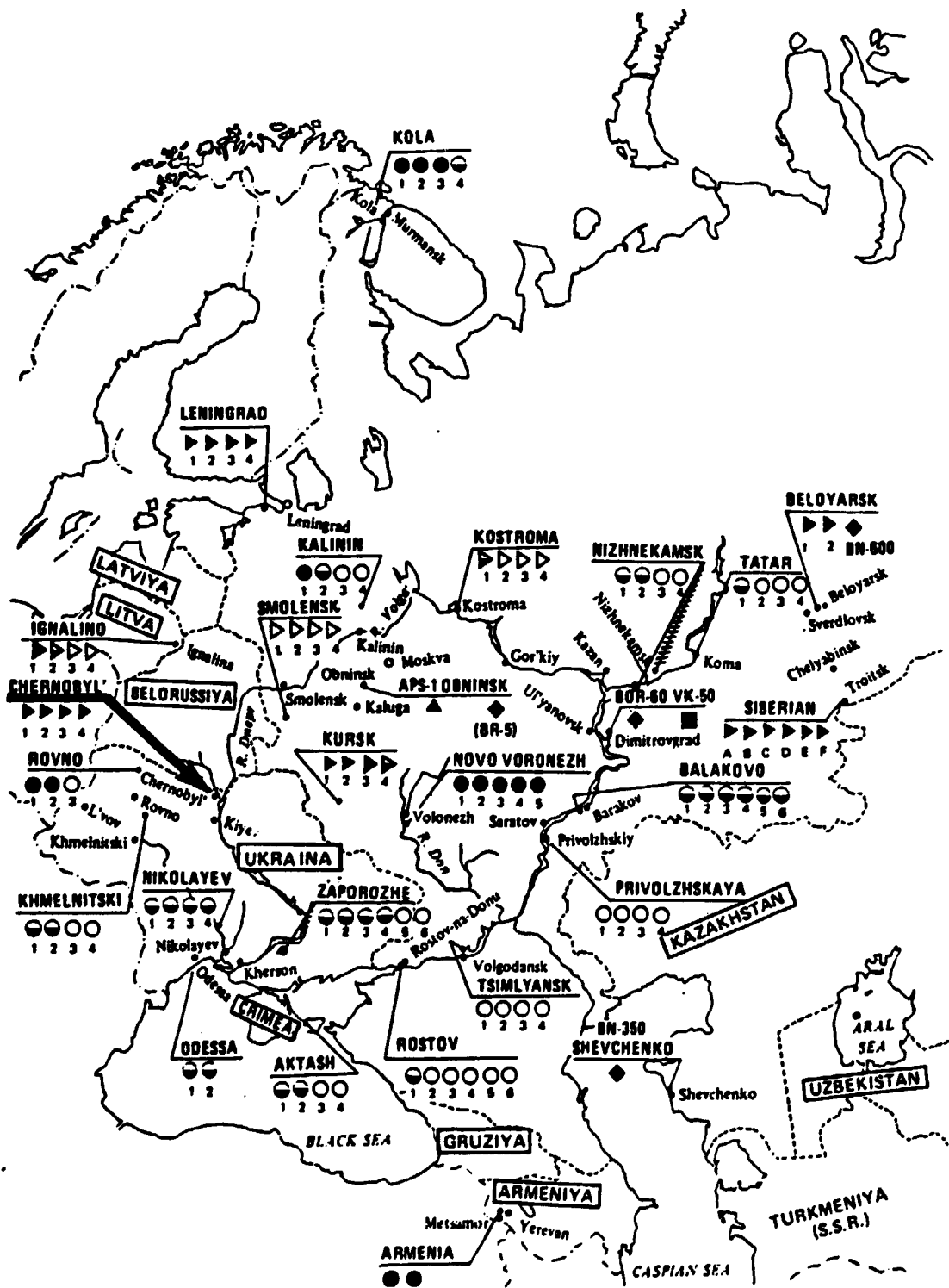
Att dylika grova avsteg och åsidosättanden från säkerhetstekniska föreskrifterna har gjorts är nära omöjligt att förstå från svensk synpunkt. Prover av den typ som genomfördes i Tjernobyl 4 förekommer knappast efter den kommersiella driftsättningen av de svenska reaktorerna. Om enstaka liknande prover ändå skulle planeras, måste dessa analyseras teoretiskt och säkerhetsmässigt av kraftföretagen och framför allt godkännas av de ansvariga myndigheterna. När både det berörda kraftföretaget och

säkerhetsmyndigheterna givit sitt tillstånd genomförs provet enligt det godkända provprogrammet vilket i god tid delgivits operatörerna. De administrativa föreskrifterna är så utformade att inga avsteg skall göras från provprogrammet, inte ens på önskemål från driftpersonal annan än kontrollrumspersonalen (detta bör jämföras med den troliga inblandningen av elteknikerna i driften av Tjernobyl 4 i samband med provet).

- I vilken omfattning operatörernas- och driftpersonalens utbildning ha bidragit till haveriet är svårt att bedöma då uppgifter om det sovjetiska utbildningsprogrammet ej finns tillgängliga.

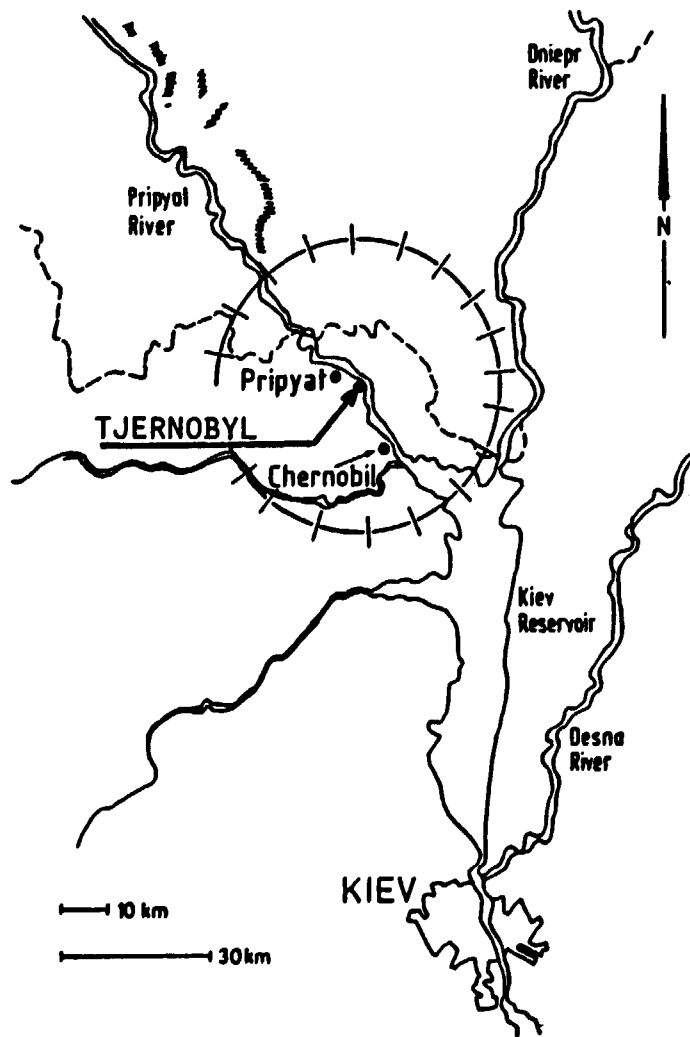
Man kan dock konstatera att endast en RBMK-simulator finns (i Smolensk) för att praktiskt utbilda driftpersonalen från sammanlagt ca 20 RBMK- reaktorer. Motsvarande svenska förhållande är 3 fullskalesimulatorer för 12 reaktorer. Detta konstaterande möjliggör slutsatsen att operatörerna i Tjernobyl 4 knappast kan ha tillfälle att öva normaldrift och störningar i någon större omfattning (om över huvudtaget någon gång) vid återkommande simulatorutbildning.

- Analysen av de sovjetiska rapporterna om Tjernobyl-haveriet har gjort det möjligt att förstå RBMK-systemkonstruktionen, följa händelsesekvensen och själva haveriet samt få en relativ klar bild av haveriets konsekvenser bl a strålningsnivåerna, evakuering med mera.

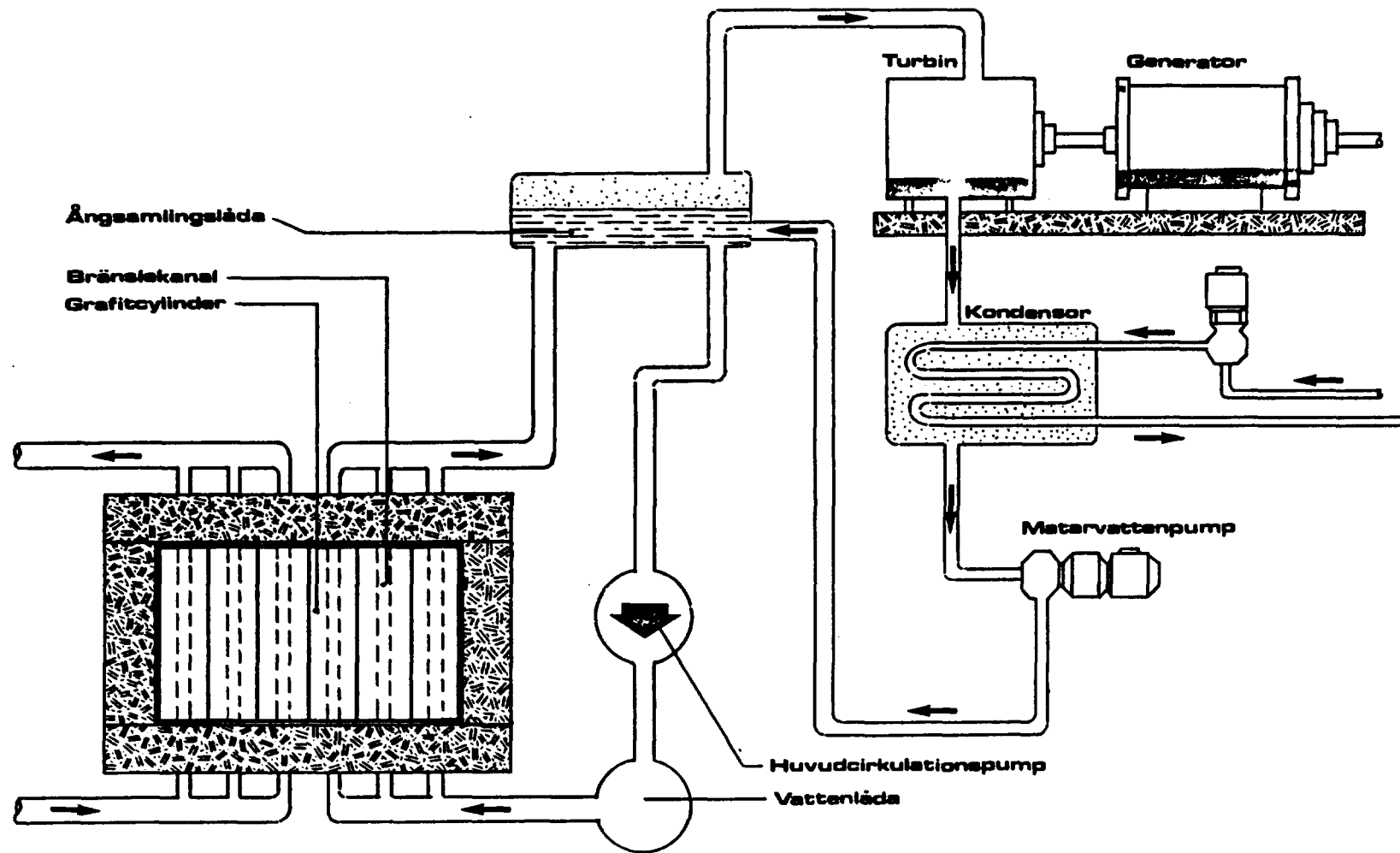


- ▶ Grafitmodererad reaktor
- Tryckvattenreaktor (PWR)
- ◆ Snabbreaktor (breeder)

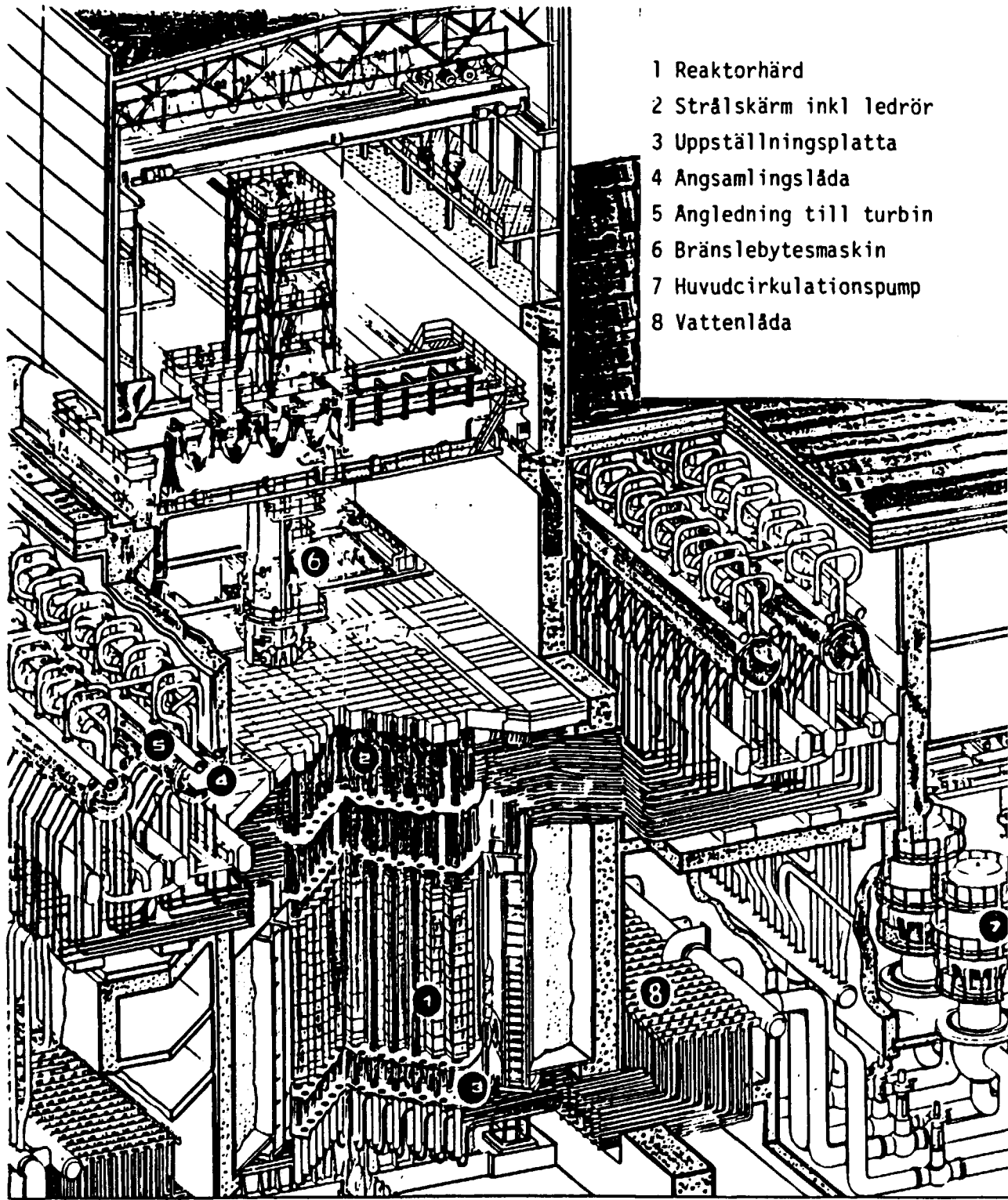
FIGUR 1: SOVJETISKA KÄRNKRAFTVERK



FIGUR 2: LOKALISERING AV TJERNOBYL-KRAFTVERKET

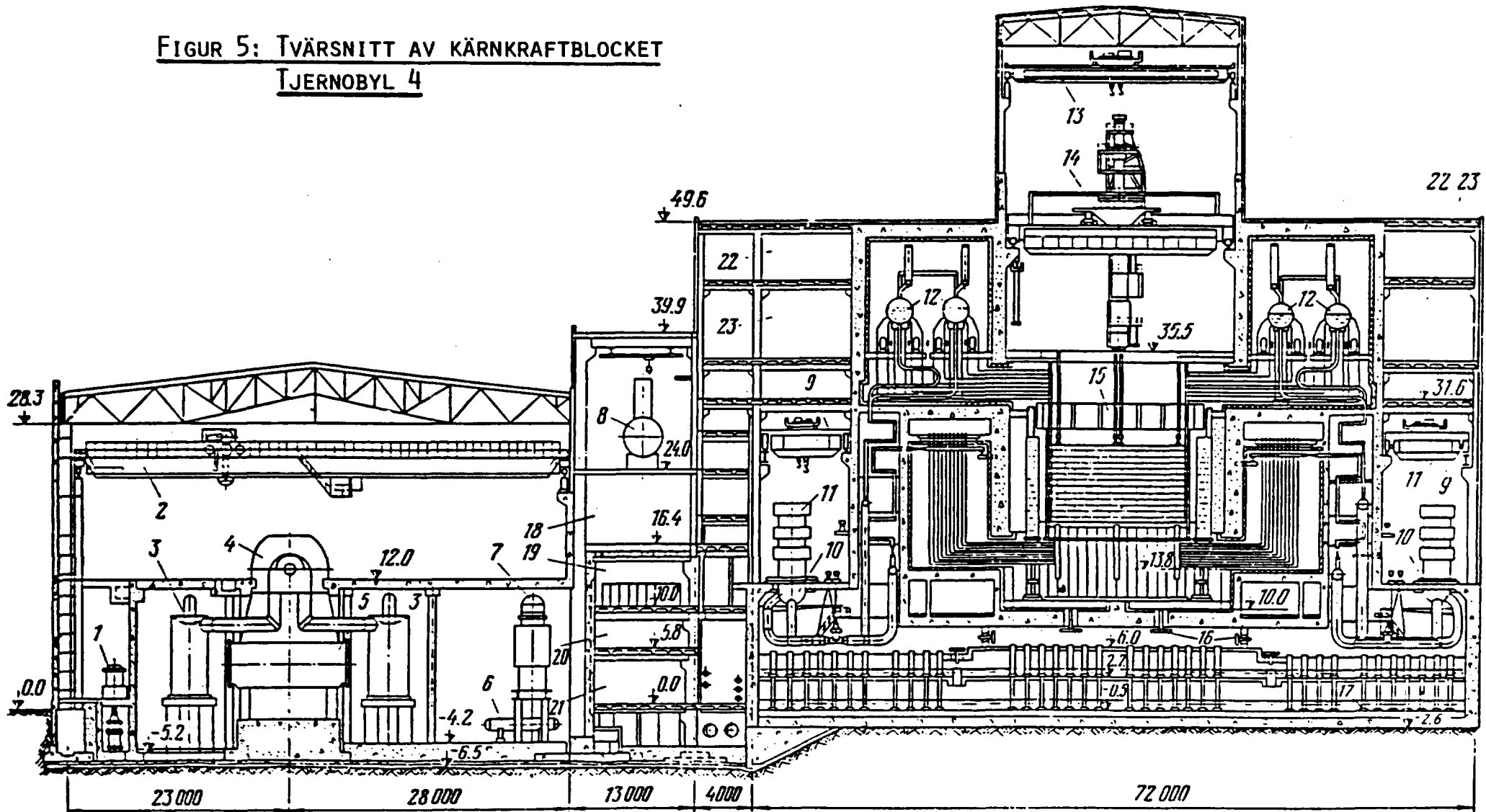


FIGUR 3: PRINCIPSKISS AV KÄRNKRAFTBLOCKET TJERNOBYL 4 (RBMK-1000)



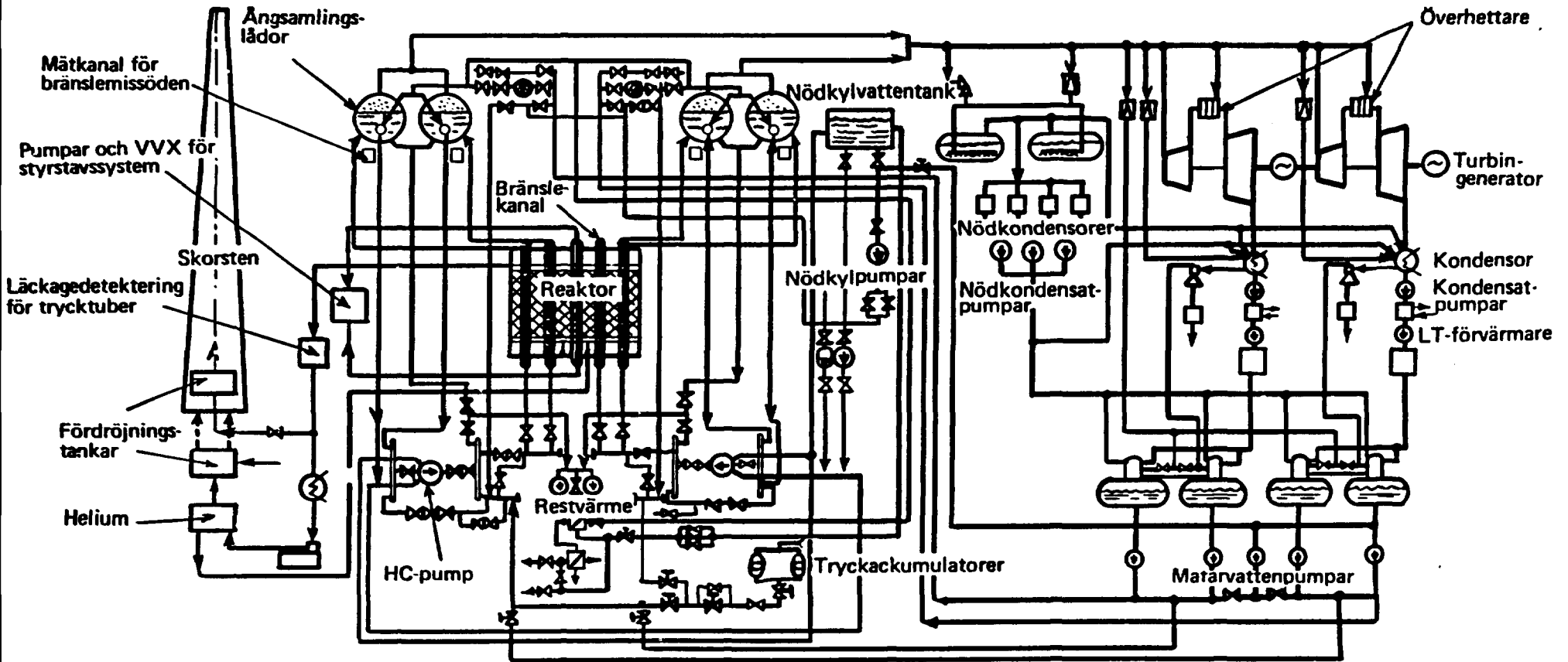
FIGUR 4: SKISS AV REAKTORDELEN FÖR RBMK-1000

**FIGUR 5: TVÄRSNITT AV KÄRNKRAFTBLOCKET
TJERNOBYL 4**

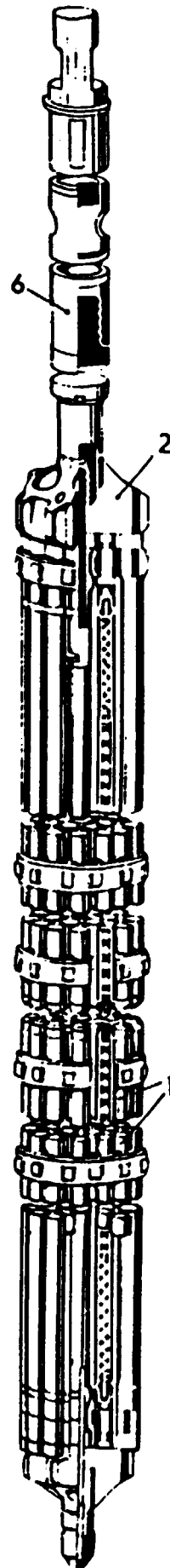
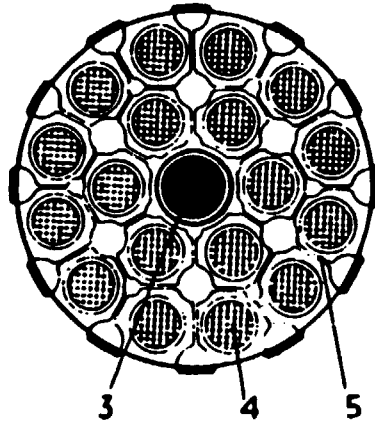


- | | | | |
|----------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1- Kondensatpump | 6- Kylare | 11- Elmotor | 16- Avbläsningsventil |
| 2- Travers | 7- Lågtrycksförvarare | 12- Ansaalingslåda | 17- Nedbläsningsbassäng |
| 3- Mellanöverhettare | 8- Matarvattentank | 13- Travers | 18- Rör Galleri |
| 4- Turbin | 9- Travers | 14- Bränslebytesmaskin | 19- Kontrollrum |
| 5- Kondensator | 10- Huvudcirkulationspump | 15- Reaktor | 20- Separeringsrun |

Systemschema för RBMK-1000



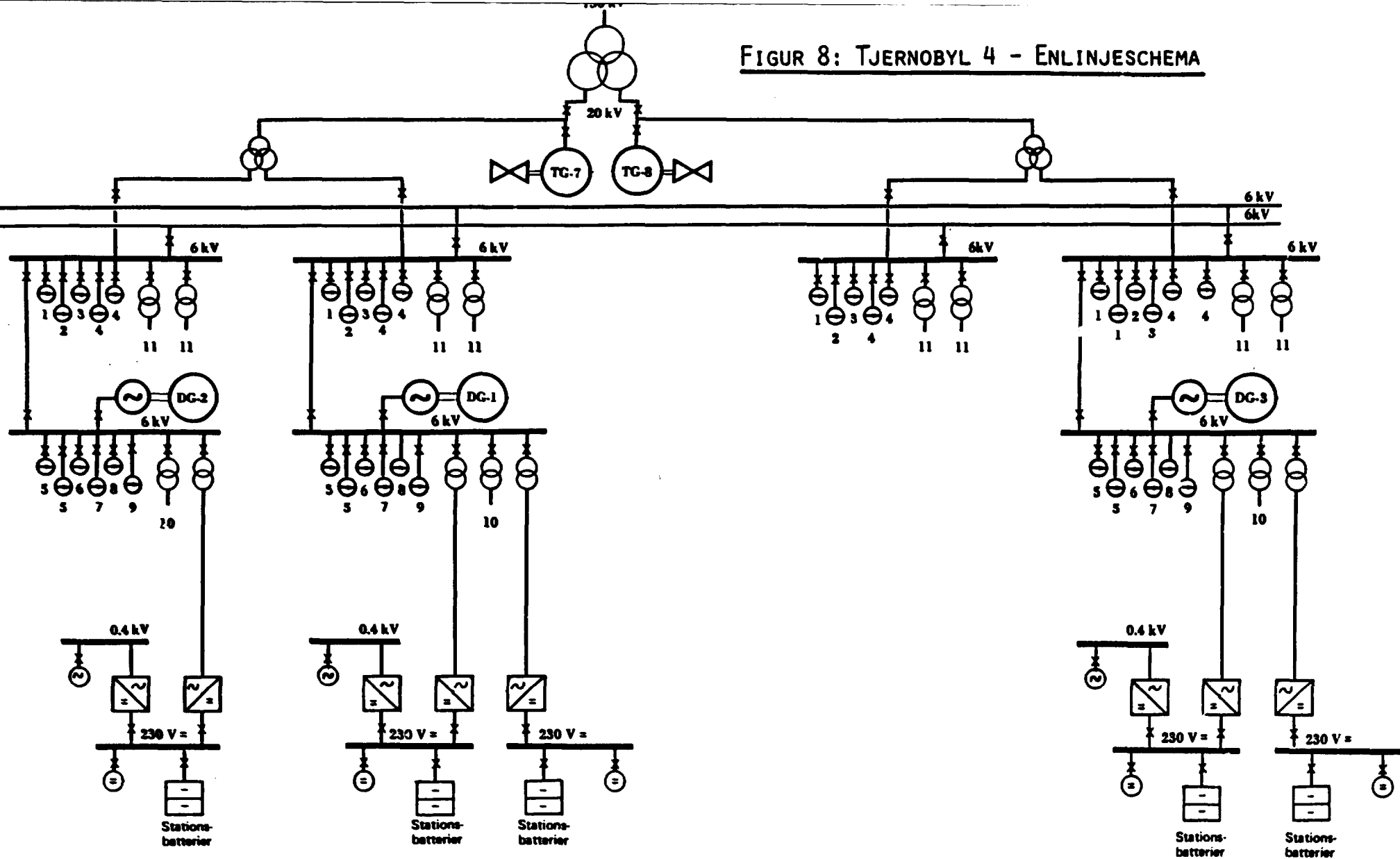
FIGUR 6: SYSTEMSCHEMA FÖR RBMK-1000



- 1 BRÄNSLESTAV
- 2 UTLOPP/TOPPLATTA
- 3 SPRIDARRÖR
- 4 BRÄNSLESTAV
- 5 SPRIDARE
- 6 ÖVERGÅNGSTYCKE

FIGUR 7: BRÄNSLEELEMENT
FÖR RBMK-1000

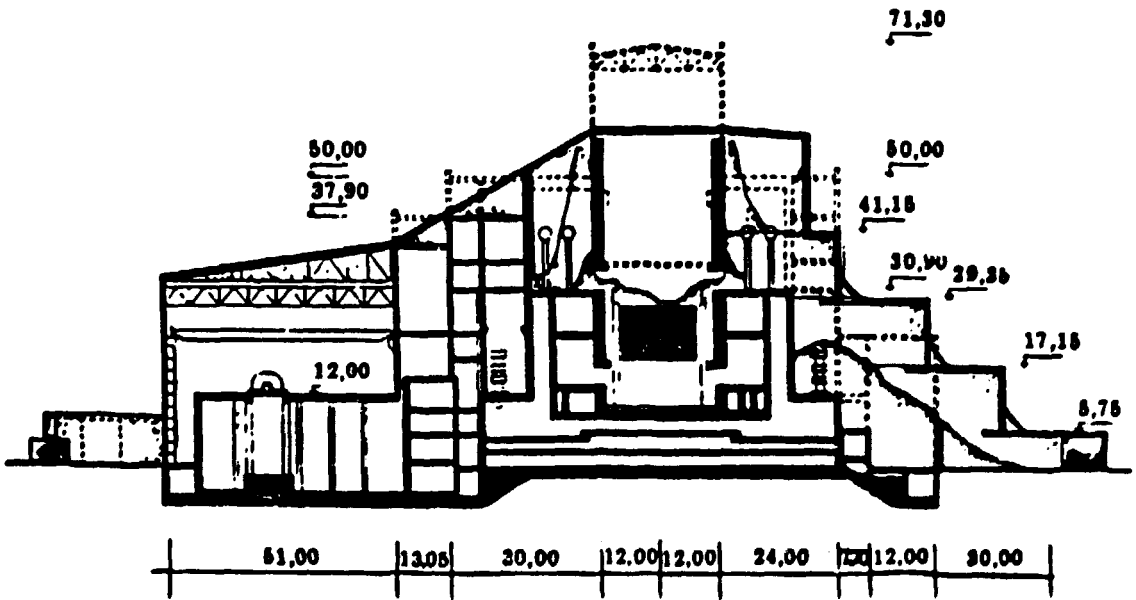
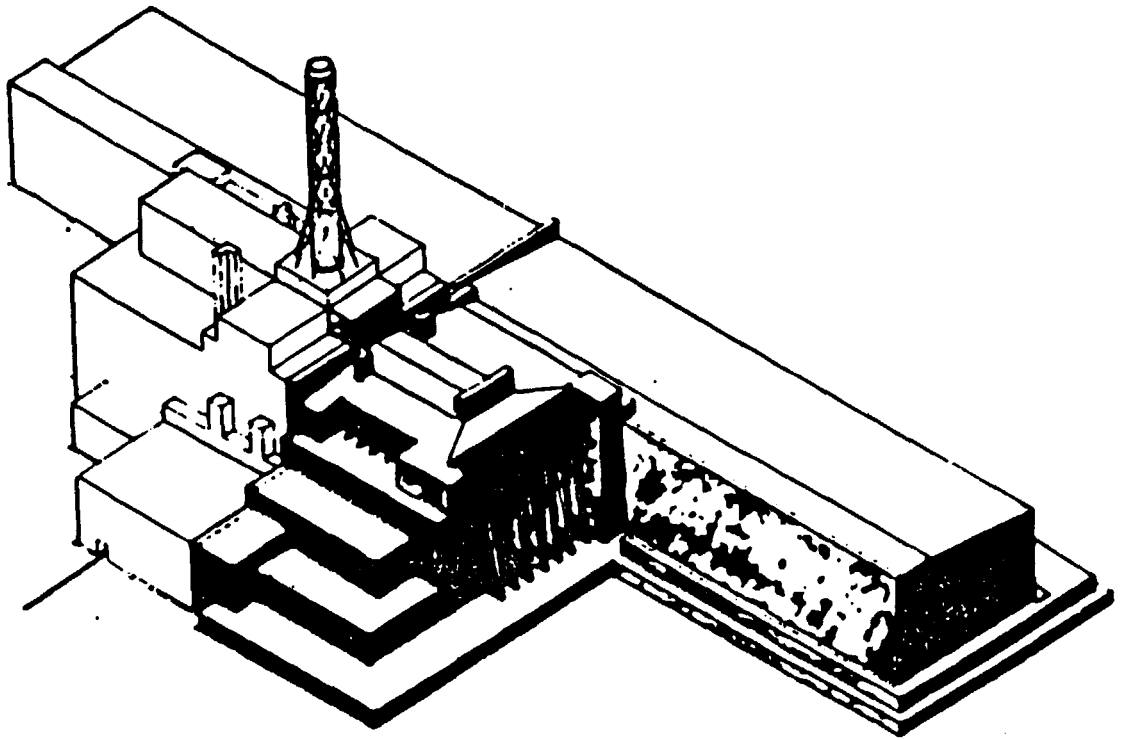
FIGUR 8: TJERNOBYL 4 - ENLINJESHEMA



- | | |
|-------------------------|--|
| 1 Matarvattenpump | 5 Hjärdödkylpump |
| 2 Kondensatpump | 6 Hjälpmatarvattenpump |
| 3 Boosterpump | 7 Sprinklerpump för kondensationsbassängen |
| 4 Huvudcirkulationspump | 8 Kylpump för styrstavkanaler |
| | 9 Spädmattningpump |

- 10 Favoriserad hjälpkraft 0.4 kV
11 Ofavoriserad hjälpkraft 0.4 kV

RKS



FIGUR 9: SKISS AV SARKOFAGEN FÖR TJERNOBYL 4 (mått i meter)