

## Hur stänger man av en reaktor?

**N**är man diskuterar kärnkraftens säkerhet dyker ofta frågan om hur man stänger av en reaktor upp. Varför kan det vara problem vid ett kärnkraftverk i många veckor efter att det har skett en incident eller olycka?

Det första som händer när det sker en incident är att reaktorn snabbstoppas vilket avbryter de energialstrande kedjereaktionerna i bränslet. Detta sker inom några sekunder. Efter att kärnklyvningarna i reaktorn har upphört kommer dock bränslet att fortsätta alstra värme under lång tid. Detta fenomen kallas för resteffekt och är unikt för kärnkraften. Värmen kommer från radioaktiva sönderfall i bränslet som är omöjliga att stoppa. Problemet är välkänt inom kärnkraftsbranschen och en stor del av säkerhetsarbetet kring kärnkraften handlar just om hur resteffekten ska kylas bort.

### Kärnkraft – energi från kärnklyvningar

Den värme som produceras i ett kärnkraftverk kommer framförallt från klyvningar av atomkärnor av grundämnet uran. Ungefär 85 % av den energi som frigörs i en klyvning avges som rörelseenergi hos klyvningsprodukterna. De har en väldigt kort räckvidd och stannar i bränslet, som därmed värms upp. Den resterande delen av värmeenergin, ungefär 15 %, kommer från radioaktiva sönderfall som sker under driften. Bränslet och den strålning som de radioaktiva sönderfallen ger upphov till värmer i sin tur upp kylvattnet som omger bränslet. Vattenångan driver en turbin, kopplad till en generator som i sin tur producerar elektricitet.

### Hur stängs en reaktor av?

I varje klyvning av en kärna avges två eller tre neutroner. Dessa neutroner ger i sin tur upphov till nya klyvningar och på så sätt upprätthålls en kedjereaktion. Ett annat ord för kärnklyvning är fission. En reaktor stängs av genom att

neutronabsorberande stavar förs in mellan bränsleknipterna i reaktorhärden. Eftersom neutronerna då inte längre kan inducera klyvningar avstannar kedjereaktionen.

Det finns ett flertal olika system som känner av om reaktorn måste stängas av automatiskt. Utlösande faktorer kan vara en förhöjd radioaktivitet i kylvattnet eller förändringar i neutron- eller kylvattenflödet men också yttre påverkan såsom skakningar från en jordbävning.

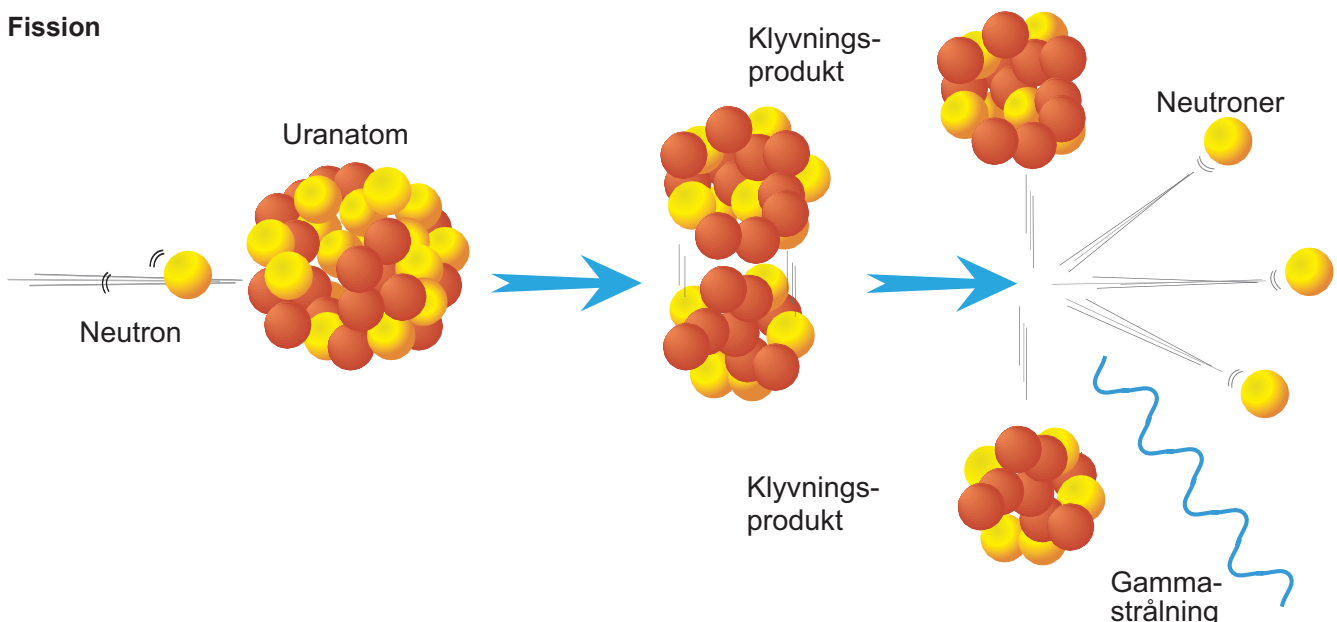
Vid ett automatiskt snabbstopp av en reaktor skjuts styrstavarna in på mellan fyra och fem sekunder. Om det automatiska systemet inte fungerar går det att föra in styrstavarna med hjälp av en elmotor. Denna manöver tar runt fyra minuter. Om styrstavarna av någon anledning ändå inte går att skjuta på plats finns det även två oberoende system för insprutning av borerat vatten. Bor används eftersom det är ett grundämne som har en hög förmåga att absorbera neutroner.

### Resteffektens uppkomst

Efter att reaktorn har stängts av och kedjereaktionerna har upphört fortsätter bränslet att producera värmeenergi, vilket kallas resteffekt. Detta beror på att en del av atomkärnorna som har skapats under driften är radioaktiva och sönderfaller. Vid ett radioaktivt sönderfall avges alfa-, beta- eller gammastrålning med olika energier. Denna strålning omvandlas sedan till värme i reaktorn.

De radioaktiva atomkärnorna i bränslet har framförallt två olika ursprung. Dels har det bildats transuraner som är ämnen med högre atomnummer än uran och dels har det skapats klyvningsprodukter som är ungefär hälften så tunga som uran. Transuranerna uppstår när neutronerna fångas in i en urankärna utan påföljande klyvning. Den nya atomkärnan är inte stabil utan kommer förr eller senare att sönderfalla. Två exempel på transuraner är plutonium och neptunium. Det är värt att notera att plutonium bildas under driften av en

### Fission



reaktor. Det kommer alltså att finnas plutonium i härden även om reaktorn inte har laddats med särskilt plutoniumbränsle, så kallat MOX-bränsle.

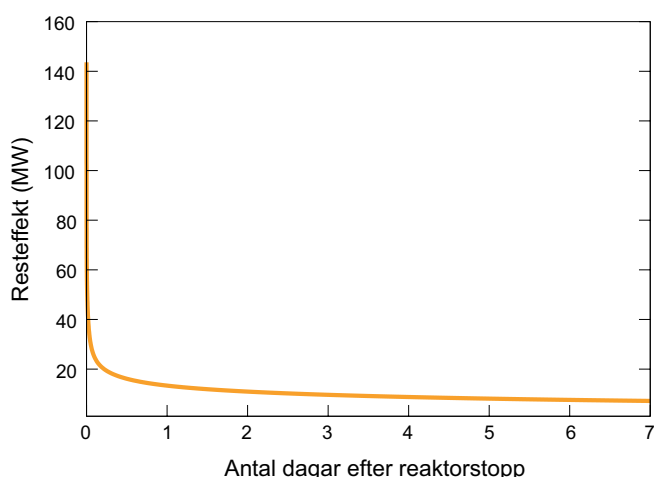
En klyvning ger nästan alltid upphov till två radioaktiva klyvningsprodukter, var och en med runt halva den ursprungliga atomkärnans vikt. Dessa klyvningsprodukter är alltid radioaktiva, utan undantag. Exempel på klyvningsprodukter är krypton, strontium, jod och cesium.

Värmen från klyvningsprodukternas sönderfall bidrar till resteffekten i högre utsträckning än värmen från transuranernas sönderfall under de 50 till 80 första åren efter att reaktorn har stängts av. Detta beror på att det finns mer klyvningsprodukter än transuraner i bränslet, och att klyvningsprodukterna i regel sönderfaller snabbare. Därefter växlar det och värmen från transuranernas sönderfall börjar dominera effektutvecklingen. Om värmen inte kyls bort i samma hastighet som den produceras kommer temperaturen att höjas i bränslet tills det till slut smälter.

### Resteffektens storlek

Direkt efter att reaktorn har stoppats motsvarar resteffekten mellan fem och sju procent av reaktorns värmeeffekt vid drift. Den avtar dock snabbt och efter en timme har den sjunkit till ungefär 1 %. Efter en månad har effekten sjunkit med ytterligare en faktor tio till strax över 0,1 % av drifteffekten.

Det kan tyckas lite med en resteffekt på några få tiondels procent efter en månad, men faktum är att detta motsvarar en värmeeffekt på ungefär 5 MW för ett normalstort svenskt kärnkraftverk. Det är en lika hög effekt som krävs för att värma upp ungefär 500 villor under vinterhalvåret. En reaktorhård är endast cirka fyra meter hög och fyra meter i diameter. Det innebär att värmen alstras i en mycket liten volym och temperaturen på härden ökar därför snabbt om ingen kylning tillförs.



Grafen visar resteffekten i Fukushima Daiichi 2 och 3 som funktion av antalet dagar efter att reaktorn stoppats. Resteffekten direkt efter stoppet är ungefär 140 MW per reaktor, vilket motsvarar 6 % av den maximala värmeeffekten. Efter en vecka återstår 7 MW resteffekt. Notera att mätdata från reaktorerna i Fukushima inte har använts för att räkna ut resteffekten, istället har en generell modell använts.

Figuren visar resteffekten som funktion av antalet dagar efter snabbstoppen av Fukushima Daiichi 2 och 3 i Japan. Reaktorerna hade en maximal värmeeffekt på 2 250 MW vardera. Figuren visar hur resteffekten minskar drastiskt de första minuterna efter avstängning, för att sedan plana ut. Detsamma går att utläsa ur tabellen. Inga specifika mätdata från reaktorerna i Fukushima har använts för att räkna ut resteffekten, istället har en generell modell för avstängning av en reaktor med 2 250 MW värmeeffekt använts.

Storleken på resteffekten beror på värmeeffekten vid driften samt hur länge bränslet har använts i reaktorn innan den stoppats. Kurvan skiftar alltså utseende beroende på dessa två parametrar. Ju högre värmeeffekten var vid driften och ju längre bränslet använts, desto högre blir resteffekten.

Det är viktigt att påpeka att det inte går att påverka resteffekten efter att reaktorn har stängts av. Det går exempelvis inte att göra så att resteffekten sjunker ännu snabbare. Orsaken till detta är att radioaktiva sönderfall inte går att påskynda. Det är också anledningen till varför använt kärnbränsle måste lagras i cirka 100 000 år.

Observera även att det är osannolikt att nya kedjereaktioner startar igen av sig själva efter att reaktorn har stängts av. Risken för nya kärnklyvningar är alltså låg.

### Resteffekten kräver kylning

Som vi nämner ovan är reaktorn avstängd när kedjereaktionerna har upphört. Nästa steg är så kallad kall avstängning. Det innebär att trycket i reaktortanken är på samma nivå som i utomhusluften och att temperaturen i tanken är lägre än 95 °C. Under normala omständigheter med tillgång till pumpar som cirkulerar kylvattnet tar det ett par dygn att uppnå detta tillstånd. I dagens reaktorer behövs elektricitet för att driva dessa kylvattenpumpar. Utan elektricitet blir det svårt att upprätthålla den kylvattencirkulation som krävs för

Tid efter reaktor stoppats	Resteffekt (MW)	% av reaktorns maximala värmeeffekt (2 250 MW)
1 sekund	140	6,4 %
1 timme	32	1,4 %
10 timmar	17	0,8 %
1 dygn	13	0,6 %
10 dygn	6,3	0,3 %
1 månad	4,3	0,2 %
3 månader	2,9	0,1 %
6 månader	2,2	0,1 %
1 år	1,7	0,08 %
5 år	1,2	0,05 %

Tabellen visar resteffekten i Fukushima Daiichi 2 och 3 vid olika tidpunkter efter att reaktorn stoppats.

att vattnet inte ska ånga bort. Efter de första dygnen krävs ett kylvattenflöde på ungefär 200 ton vatten per dygn för att upprätthålla vattennivån i reaktortanken. Det går alltså åt en vattenmängd motsvarande ungefär en halv normalstor 25-meters simbassäng per dygn.

I Sverige flyttas det använda kärnbränslet, efter minst nio månaders lagring i reaktorbyggnaden, till mellanlagret för använt kärnbränsle i Oskarshamn, CLAB. Bränslet måste fortsätta kylas med cirkulerande kylvatten i 30–40 år. Det totala kylvattenflödet i bassängerna i CLAB är 8 000 ton per dygn. I mellanlagret förvaras allt kärnbränsle som använts i våra svenska reaktorer, vilket är orsaken till det höga vattenflödet. Efter 30–40 år i mellanlagret är det dags för slutförvaring av det använda kärnbränslet. Det svenska konceptet innebär att bränslet innesluts i kopparkapslar som sedan placeras cirka 500 meter ner i urberget i Östhammars kommun.

### Barriärer mot radioaktivt läckage

Vid en incident eller olycka i ett kärnkraftverk vill man i möjligaste mån undvika att det sker utsläpp av radioaktivt material. Förenklat kan man säga att det finns tre skyddsbarriärer mot radioaktivt läckage i en reaktor:

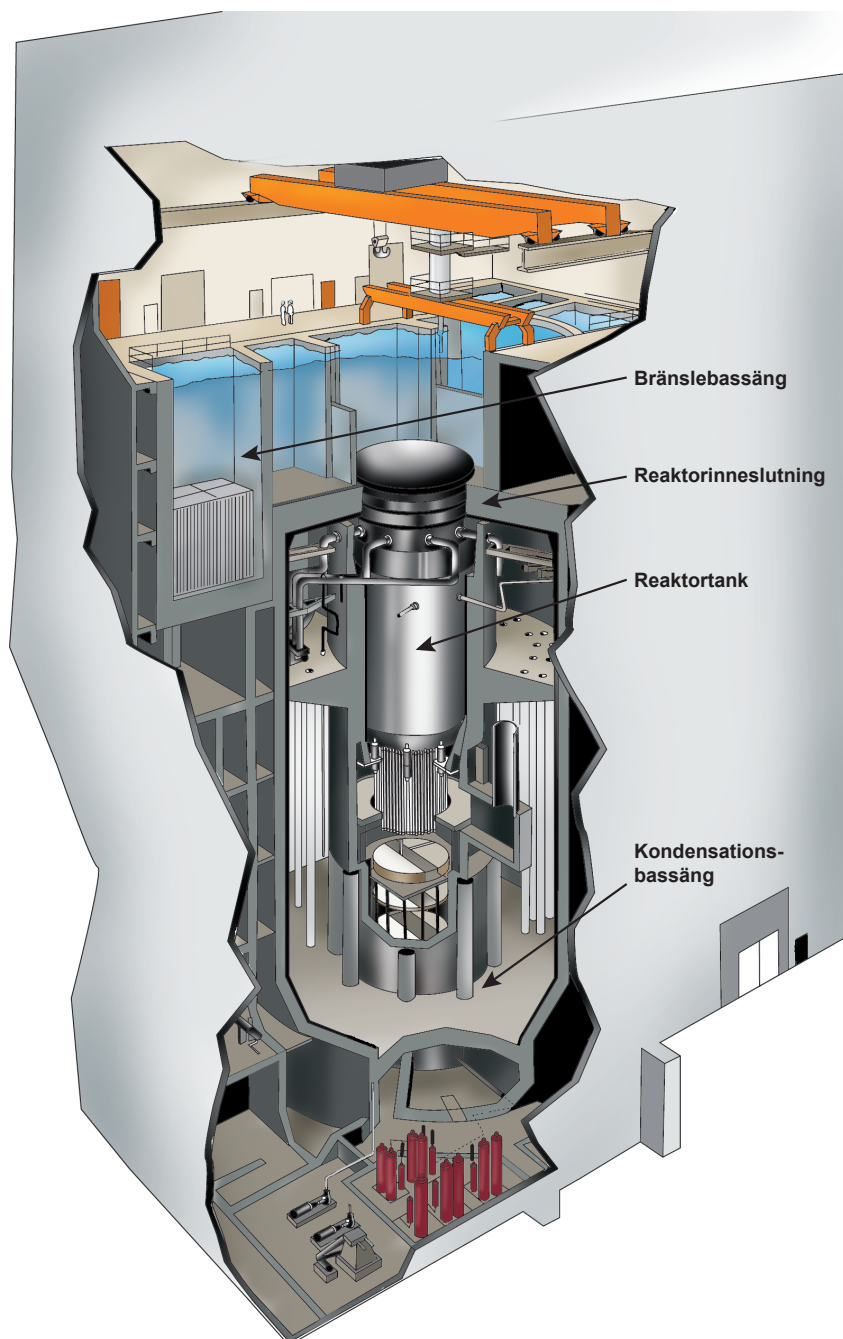
- Bränslekapslingen, som består av en zirkoniumlegering och innesluter bränslet.
- Reaktortanken, som är det tryckkärl som innehåller reaktorhärden med bränsleknipporna och de neutronabsorberande stavarna.
- Reaktorinneslutningen, som är gjord av betong och omger reaktortanken och andra delar av reaktorn som innehåller radioaktiva ämnen.

Om cirkulationen av kylvatten inte fungerar som den ska förångas kylvattnet och vattennivån sjunker snabbt. Vattenången gör att trycket ökar och ången måste släppas ut ur tanken för att minska temperaturen och trycket. Ången leds då till reaktorinneslutningen som har en vattenbassäng dit vattenången leds för att kondenseras. Om mer vattenånga bildas än vad kondensationsbassängen kan hantera börjar vattnet i bassängen koka. Ett högt tryck innebär en hög temperatur samt en ökad risk för sprickskador på reaktortanken och inneslutningen. För att inte riskera inneslutningens integritet så minskas trycket i inneslutningen genom att ången släpps ut till atmosfären, så kallad tryckavlastning.

Om vattennivån i reaktortanken sjunker så mycket att bränsleknipporna står helt eller delvis ovanför vattenytan stiger temperaturen på bränslekapslingen snabbt, och vid temperaturer över 900 °C bildas vätgas genom att legeringen zirkaloy i bränslekapslingen oxideras. Denna process gör att temperaturstegringen

snabbas på ytterligare. Trycket i reaktortanken och inneslutningen ökar då. Vattenången släpps nu ut från inneslutningen tillsammans med vätgasen för att tryckavlasta reaktorn. Vätgasen som bildas kan uppnå en detonerbar blandning i kontakt med syret i luften. Bränslekapslingen skadas vid oxideringen och den första skyddsbarriären mellan de radioaktiva ämnena i härden och utomhusmiljön runt kärnkraftverket är därmed bruten. De gasformiga klyvningsprodukterna sprids i reaktortanken och följer med vattenången och vätgasen vid tryckavlastning. I Sverige är reaktorerna utrustade med så kallade haverifilter som fångar upp vissa av de radioaktiva ämnena vid tryckavlastningen och förhindrar att de sprids ut i miljön.

Om kylningen fortfarande inte är tillräcklig kommer temperaturen i bränslet att fortsätta öka. Vid temperaturer över 1 700 °C kommer bränslet att lösas upp i bränslekapslingen som i sin tur smälter. Delar av härden kommer att smälta för



att sedan sjunka ner i botten på tanken. Nästa skyddsbarriär är reaktortanken. Det cylinderformade stålkarlet är tjugo meter högt och sex meter i diameter. Eftersom en härdsmläta har en så pass hög temperatur kan den smälta igenom reaktortanken. Den sista skyddsbarriären mot radioaktivt läckage är reaktorinneslutningen. Temperaturen på härdsmlätan gör att den även kan smälta igenom reaktorinneslutningen om ingen kylning tillförs.

Det bör nämnas att härdsmlätor sällan inträffat. Under alla år som hundratals reaktorer har varit i drift har sådana svåra haverier endast inträffat en handfull gånger. De flesta härdsmlätor har inneburit att endast delar av härden har smält och att reaktortanken fortfarande har varit intakt efter haveriet. Från olyckan i Tjernobyl den 26 april 1986 fram till jordbävningen den 11 mars 2011, då reaktorerna i Fukushima skadades, inträffade ingen härdsmläta i något kärnkraftverk.

### Härdens radioaktivitet

Utvecklingen av radioaktiviteten i härden följer samma mönster som kurvan över resteffekten. Direkt efter att reaktorn har stoppats sjunker radioaktiviteten fort till följd av att många ämnen sönderfaller. Därefter planar kurvan ut då kortlivade klyvningsprodukter har försvunnit och mer långlivade ämnen dominerar. Det innebär att efter några dagar är härden betydligt mindre radioaktiv än direkt efter reaktoravstängningen. Om man tvingas till ett utsläpp i samband med en kärnkraftsolycka kommer mängden radioaktivitet som släpps ut alltså att bero på när utsläppet sker. Det viktigaste blir att undvika utsläpp direkt efter att reaktorn har stoppats.

Som vi nämner tidigare i texten består de radioaktiva ämnena i härden framförallt av de fissionsprodukter som uppkommit vid kärnklyvningarna i bränslet och de tunga transuranerna som bildats när uran tar upp neutroner istället för att klyvas. De olika fissionsprodukterna och transuranerna har olika egenskaper vilket i sin tur gör att de beter sig på olika sätt om det sker en olycka. En viktig egenskap är halveringstiden – den tid efter vilken hälften av en viss mängd av ett radioaktivt ämne har sönderfallit. En annan viktig egenskap är ämnets rörlighet, exempelvis om det befinner sig i eller lätt övergår till gasform och därmed har en stor benägenhet att spridas. En stor rörlighet gör att det blir svårare att hålla kvar ämnet i reaktorn om det inträffar en olycka. Till de minst rörliga ämnena i härden hör de tunga transuranerna, däribland plutonium.

### Radioaktiva utsläpp

De ämnen man främst analyserar vid ett radioaktivt utsläpp i samband med en olycka är krypton, xenon, jod och cesium. Krypton och xenon är ädelgaser. De är väldigt rörliga och sticker lätt från härden om det sker en bränsleskada.

De är dessutom svåra att filtrera bort vilket gör att man kan tvingas till kontrollerade utsläpp av dessa vid reaktorhaverier. Eventuellt kan utsläppet fördröjas för att en större

mängd ska ha hunnit sönderfalla innan det når ut i naturen. Det kan också vara möjligt att anpassa utsläppet efter när vindförhållandena är som mest gynnsamma.

Xenon har en kort halveringstid medan krypton stannar kvar i atmosfären i många år. Kryptonets späds dock ut väldigt väl i luften och har dessutom liten tendens att följa med regn ner till marken och tas upp av växter och djur. Det gör att krypton i regel inte leder till något betydande dosbidrag.

Cesium och jod har en större benägenhet att lägga sig på marken och också tas upp av växter och djur. Det kan i sin tur leda till att människor får in dessa ämnen i kroppen genom födan. Cesiumisotopen Cs-137 har en halveringstid på 30 år och kan ge ett dosbidrag under lång tid, både genom bestrålning utifrån och via födan. Även jod, främst isotopen I-131, bidrar till dos och kan koncentreras i sköldkörteln. Det är anledningen till att människor som befinner sig i riskzonen för utsläpp uppmanas att äta jodtabletter vilka då mätar sköldkörteln så att den inte kan ta upp radioaktivt jod. Det ska sägas att I-131 har en betydligt kortare halveringstid än Cs-137. Efter en månad finns bara ungefär en tiondel av det radioaktiva I-131 kvar, resten har sönderfallit.

År 1986 infördes nya krav på konsekvenslindrande system i Sverige vilket medförde att bland annat haverifilter installerades vid samtliga svenska kärnkraftverk. Konstruktionskravet var att utsläpp vid olyckor ska begränsas till 0,1 % av härddinnehållet av cesium och andra ämnen som har ”betydelse ur markanvändningssynpunkt”. Haverifilter fanns inte i Tjernobyl och inte heller i reaktorerna i Fukushima i Japan.

Det är svårt att göra generaliseringar när det gäller kärnkraftsolyckor. Konsekvenserna kommer exempelvis att bero på hur det specifika kärnkraftverket är konstruerat och på hur väl man lyckas upprätthålla skyddsbarriärerna. Ett exempel på en olycka är händelsen i kärnkraftverket Three Mile Island i Harrisburg år 1979. Där skadades omkring en tredjedel av härden i en partiell härdsmläta. Det medförde att ungefär hälften av ädelgaserna och cesiumet samt en fjärdedel av joden lösgjordes från bränslet. Dock kunde den absoluta merparten hållas kvar i reaktorinneslutningen vilket gjorde att bara en liten mängd släpptes ut i naturen. Miljökonsekvenserna av olyckan blev därmed små.

Mer om konsekvenserna av tidigare kärnkraftsolyckor går att läsa i tidigare skrifter av Analysgruppen. Dessa återfinns på [www.analys.se](http://www.analys.se). Där finns också skrifter som beskriver begreppet dos och effekterna av strålning.

---

*Karin Andgren*

Vattenfall Research and Development AB

*Anna-Maria Wiberg*

Vattenfall Research and Development AB