Hans Pedersen Dambo (red.)

Kärnkraft

avveckla eller utveckla?

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

Kärnkraften har spelat och kommer att spela en mycket viktig roll för Sveriges energiförsörjning, miljö och ekonomi. Den svarar för ca 50% av Sveriges elförsörjning och har i ett par decennier varit föremål för en debatt, som ofta präglats mer av känslor, myter och föreställningar än fakta.

Den ideella föreningen "Miljövänner för Kärnkraft" vill med detta häfte ge en modern och korrekt bild av några delområden som vi anser särskilt aktuella och viktiga och vi har lyckats få fram bidrag skrivna av Sveriges mest framstående experter på dessa områden.

Särskild uppmärksamhet ägnas åt den senaste utvecklingen som syftar till byggande av underkritiska och därmed mycket säkra reaktorer som är kopplade till acceleratorer. Dessa reaktorer kan använda dagens radioaktiva avfall och kärnvapenmaterial som bränsle och lämnar enbart efter sig stabila eller kortlivat radioaktiva ämnen. Denna teknik är inte oemotsagd utan en livlig debatt har utbrutit mellan anhängare till en mer konventionell utveckling och förespråkare för den nya tekniken.

I en annan uppsats presenteras viktiga fakta på strålningsområdet där alltjämt mycken skrämselpropaganda florerar, och i ytterligare en uppsats ges en ekonomisk analys av konsekvenserna av en kärnkraftsavveckling kontra fortsatt användning. Därjämte presenterar vi en rad basfakta om teknik, drift och ekonomi gällande den nuvarande situationen.

Miljövänner för Kärnkraft
Box 83
430 24 Våröbacka
Tel. 0340-782 90

ISBN 91-44-49331-2
9 789144 493312

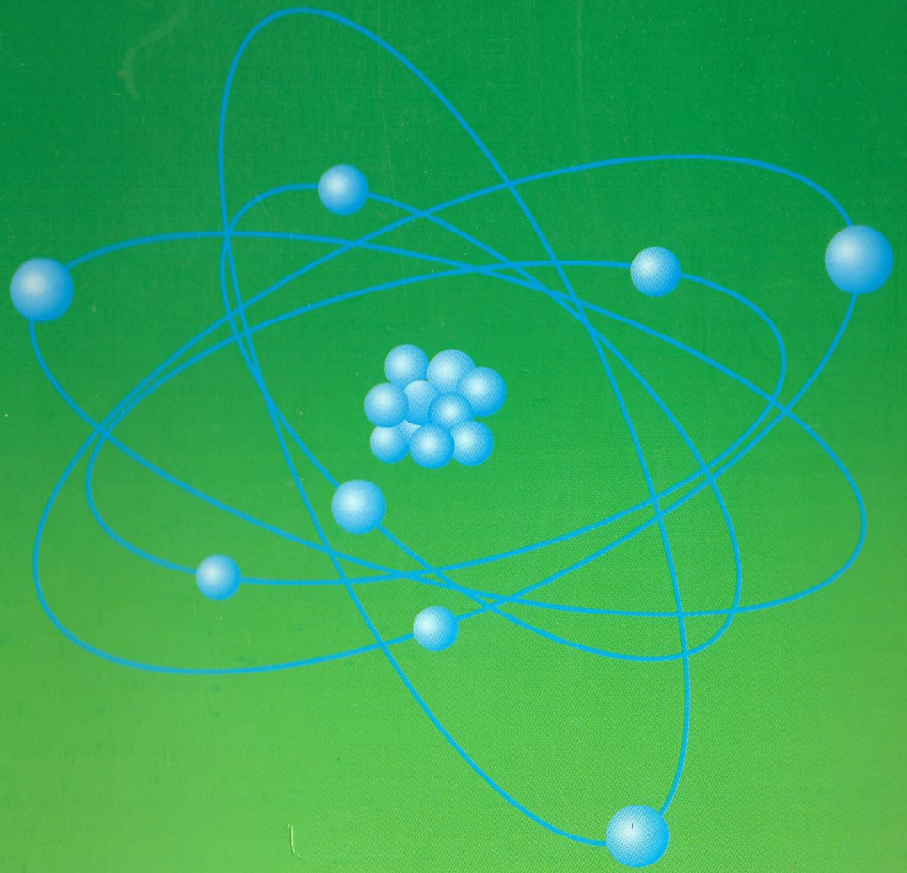
Studentlitteratur

Hans Pedersen Dambo (red.)

Kärnkraft

avveckla eller utveckla?

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft



Studentlitteratur

Hans Pedersen Dambo (red.)

Kärnkraft
avveckla eller utveckla?

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

Studentlitteratur

Innehållet i denna bok är skyddat enligt Lagen om upphovsrätt, 1960:729 och får inte reproduceras eller spridas i någon form, utan Studentlitteraturs skriftliga medgivande. Förbudet gäller hela verket såväl som delar av verket och inkluderar lagring i elektroniska media, visning på bildskärm samt bandupptagning.

ISBN 91-44-49331-2
© Hans Pedersen Dambo (red.) och Studentlitteratur 1995

Printed in Sweden
Studentlitteratur, Lund

Tryckning:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1999	98	97	96	95

Innehåll

Inledning
Carl-Erik Fröberg 5

Kärnkraft i utveckling
Karl-Erik Larsson 12

Hur farliga är de låga stråldoserna?
Gunnar Walinder 27

Kärnkraften som välfärdsvinst
Björn Karlsson 34

Bilagor
Kärnkraft i världen 38
Kärnkraft i Sverige 39
Säkerhet 42
Urantillgångar 44
Kärnbränslecykeln 45
Strålkällor i miljön 46

© Studentlitteratur

Om kärnkraften – dess orsaker och verkningar

av Carl-Erik Fröberg

Inledning

”Jag förstår inte varför det skall vara så mycket bråk om kärnkraften när vi har den utmärkta elektriciteten!” (Sophie Liljedotter, Grönköpings äldsta.)

Bakom tillkomsten av detta häfte står den ideella föreningen ”Miljövänner för kärnkraft”. Vår grundläggande strävan har varit att ge en modern och korrekt bild av ett område som har spelat och som kommer att spela en mycket viktig roll i samband med Sveriges energiförsörjning, miljö och ekonomi. Vi har lyckats få fram bidrag skrivna av Sveriges mest framstående experter på de i sammanhanget särskilt aktuella områdena. Bakgrunden är våra allvarliga bekymmer över den (med få undantag) undermåliga information som ges, inte bara till Sveriges studerande utan även till politiker och andra beslutsfattare, och självfallet gäller detta i än högre grad den breda allmänheten. Vi vill därvid särskilt ägna vår uppmärksamhet åt den senaste utvecklingen som syftar till byggande av underkritiska och därmed utomordentligt säkra reaktorer som i sin tur är kopplade till acceleratorer. I samband härmed diskuteras hur det högaktiva avfallet som nu utgör en allvarlig belastning på grund av problem med slutförvaring i stället blir en resurs som kommer att kunna producera billig energi under en period på åtminstone 50 år. Och bäst av allt: bränslet i kärnvapnen kan utnyttjas på samma sätt! I en annan uppsats presenteras viktiga fakta på strålningsområdet där alltjämt mycken skrämselpropaganda florerar, och i ytterligare en uppsats ges slutligen en ekonomisk analys av konsekvenserna vid en förtida avveckling. Därjämte presenterar vi en rad basfakta om teknik, drift och ekonomi gällande den nuvarande situationen.

Vi hoppas och tror att denna skrift skall uppmärksammas och läsas och att den i någon mån skall ersätta den närmast obefintliga information i ämnet som borde getts av ansvarskännande media. I detta sammanhang är det också ofrånkomligt att argumentera mot den okunnighet som på detta

© Studentlitteratur

område speciellt präglar vissa politiska partier och (vilket förefaller särskilt anmärkningsvärt) även en rad miljöorganisationer. Det är alldeles uppenbart att energidebatten i Sverige är 20 år efter sin tid och därför vågar vi t.o.m. hävda att vi kämpar för något så sällsamt och omodernt som sanningen.

Om energi – för och emot

"There are never more efforts in this country than when something is to be stopped!" (Z. Höglund)

Energin är som bekant oförstörbar men den kan å andra sidan omvandlas från en form till en annan. Användningen innebär som regel att man överför energi med högre kvalitet till en form med lägre kvalitet varvid processen antas medföra för användaren angenäma verkningar. T.ex. kan man starta en bilmotor varvid den kemiska energin i bensinen övergår i mekanisk energi och värme, eller kan man koppla på en elektrisk platta varvid elektrisk energi övergår i värme. Å andra sidan kan t.ex. värme under vissa omständigheter omvandlas till mekanisk eller elektrisk energi, något som sker i en ångmaskin resp. en elektrisk generator. Man inser lätt att viktiga egenskaper hos olika energiformer är miljövänlighet, god ekonomi, goda möjligheter för transport även över långa avstånd och över huvud taget god flexibilitet. De mest aktuella energislagen representeras av olja, kol, gas av olika slag, torv, biomassa, solenergi, vattenkraft, vindkraft samt kärnkraft. Vi kan direkt notera att olja, kol och kärnbränsle endast existerar i begränsade mängder och det kan vara av intresse att antyda hur länge dessa kända resurser kan beräknas räcka med nuvarande förbrukning. För oljan anges ca 40 år medan kolet med nuvarande förbrukning torde räcka i över 200 år. Uranförekomsterna i jorden räcker med nuvarande teknik i ca 90 år, men om man i stället använder brider-teknik ökar resurserna drastiskt. Uranet i havsvatten torde visserligen räcka i över 200 000 år men skulle kräva väsentligt högre kostnader för utvinning. I ett längre perspektiv pekar dessa fakta självfallet mot förnybara energikällor, och sådana existerar redan nu, främst i form av vattenkraft, medan solenergi ännu knappast kan konkurrera annat än i speciella fall. Vad vindkraft och bioenergi beträffar måste man av skäl som vi strax skall återkomma till f.n. ställa sig ytterst tveksam. I väntan på att den mycket svåra tekniken med fusionskraft skall bemästras

© Studentlitteratur

torde metoden med kombinerad accelerator och reaktor ge ett betydande andrum på kanske 100 år, kanske åtskilligt mer. Denna teknik är under utarbetande bl.a. i Los Alamos och resultaten är hittills så goda att man kan se framtiden an med betydande optimism. Här kan också nämnas att man börjat fundera över att använda även andra ämnen, främst thorium som energikälla men det är ännu för tidigt att avgöra vad som kan komma ut härav.

Enligt vår mening är idén att i förtid skrota de mycket väl fungerande kärnkraftsanläggningarna i Sverige något av det enfaldigaste som kommit fram i svensk politik under de senaste 100 åren, och vi skall senare kommentera detta mer detaljerat. Därvid kommer vi särskilt att åberopa professor Björn Karlssons uppsats om de ekonomiska följderna av en dylik åtgärd. Driften bör naturligtvis fortgå så länge alla säkerhetskrav är uppfyllda och i övrigt klarar ekonomiskt rimliga villkor. Detta är faktiskt också i överensstämmelse med vad en majoritet av svenska folket uttalade sig för i folkomröstningen.

Vi skall nu försöka redogöra för några grundläggande fakta rörande produktion av främst elektrisk energi med användande av olika energikällor. Som bekant hävdas från vissa håll att kärnkraften skall vara avvecklad till år 2010. Här blandar man samman tiden för ekonomisk avskrivning under 25 år med den tekniska livslängden som torde vara åtminstone 40 år. Dessutom påstås att man förfogar över ekonomiskt konkurrenskraftiga miljövänliga alternativ. Man anför därvid vindkraft, solkraft samt biobränslen. För att ersätta enbart Barsebäck skulle emellertid krävas 15–20 000(!) vindkraftverk jämte enorma mängder elektriska ledningar, och strömmen skulle bli väsentligt dyrare än nu. Eftersom man i Danmark under snart 100 år sökt exploatera vindkraften men ändå inte lyckats täcka mer än någon procent av behovet på detta sätt, kan vi kanske avföra denna energikälla från seriös debatt. Solkraften har förmodligen i ett längre perspektiv en framtid, men inte ens i de hetaste ökenområdena kan den ännu konkurrera med andra energislag. Direkt användning för lokal uppvärmning kräver dock ingen avancerad teknik och denna möjlighet bör givetvis tas till vara, även om den inte kan utnyttjas under vintern då den bäst behövs.

Låt oss nu se lite närmare på användning av biobränsle. Man kan då genast konstatera att det krävs enorma mängder bränsle, något i stil med 30 000 ton per dygn enbart för att ersätta Barsebäck. Det betyder att 1 000 långtradare per dygn måste köra kanske 5–10 mil med en avsevärd förbrukning av dieselolja som i sin tur ger upphov till stora utsläpp av koldioxid och en rad andra föroreningar. Även frånsett att energiskogarna skulle kräva stora delar av den skånska jordbruksmarken kan denna hantering inte med bästa vilja i världen betecknas som miljövänlig. Men energi måste vi

© Studentlitteratur

få fram, och då återstår bara kol, olja eller naturgas så låt oss se även på dessa alternativ. Det är då klart att ett kolkraftverk måste ligga vid en djuphamn, och där är tomtpriserna mycket höga. Som följd härav måste avfallet, ca 80 ton/dag fraktas långa vägar med lastbil med ytterligare utsläpp. Däremot uppgår förbränningsprodukterna från reaktorerna till mindre än 100 kg/dygn och de kan lätt deponeras i vattenbassäng. Alternativen med kol och olja måste uppfattas som nödlösningar, och detta gäller i ännu högre grad för gasturbiner som visserligen snabbt kan startas i ett kritiskt läge men som är synnerligen kostnadskrävande. Vad slutligen naturgasen beträffar så ger den endast obetydliga mängder svaveldioxid, men vid förbränning producerar den stora mängder koldioxid som man i andra sammanhang söker undvika.

Kärnkraften i Sverige

"Skånska jorden full av atomer!" (Rubrik i lokal tidning på 50-talet.)

Effekt av energi per tidsenhet, och den mäts i watt; en watt är en joule/sekund eller effekten av strömstyrkan 1 ampère då spänningsfallet är 1 volt. Större och mer användbara enheter bildas sedan på konventionellt sätt med hjälp av prefixen kilo = 1 000; mega = 1 miljon; giga = 1 miljard, tera = 1 billion. Dessa prefix förkortas k, M, G och T och följaktligen betyder kW, MW, GW samt TW resp. kilowatt, megawatt, gigawatt och terawatt. Från effekterna kan man lätt komma till energierna genom multiplikation med aktuell tid, och som tidsenhet väljer man konventionellt 1 timme, betecknad h = engelska hour. Med dessa beteckningar är 1 kWh = 1 kilowattimme och 1 TWh = 1 terawattimme. Sveriges 12 reaktorer har tillsammans effekten 10 402 MW och om man uppskattar den genomsnittliga driftstiden till 250 dagar/år så genererar de sammanlagt $24 \times 250 \times 10\,402/1\,000\,000 = 62{,}4$ TWh. Räknar man med ett genomsnittligt pris av 50 öre/kWh så representerar denna energimängd ett värde av ca 30 miljarder kronor. För mer detaljerade uppgifter hänvisar vi till faktasammanställningen.

© Studentlitteratur

Kärnkraften i politiken

"Man måste ta folks rädsla på allvar, även om den strider mot naturlagarna!" (Framstående svensk politiker, alltjämt verksam i hög befattning.)

Vad beträffar den tidiga utvecklingen kan vi inte nog understryka dåvarande statsministern Tage Erlanders avgörande roll då det gällde att etablera kärnkraften i Sverige. Men han hade också unika kvalifikationer: under sin studenttid i Lund studerade han bl.a. matematik och teoretisk fysik och är rentav en av grundarna till Lunds Matematiska Sällskap som alltjämt är aktivt. Vi kan alltså notera 10–20 års drift utan personskador och utan radioaktiva utsläpp ens i närheten av tillåtna värden, och det torde vara svårt att peka på en mera miljövänlig verksamhet. Det är förvisso inte lätt att genomskåda orsakerna till det i somliga kretsar i Sverige nästan kompakta kärnkraftsmotståndet, och det skulle vara intressant om den s.k. grävande journalistiken här kunde göra en insats! I detta sammanhang vill vi peka på en lag som vi dess bättre torde vara ensamma om i hela världen, nämligen den s.k. hjärntvättsparagrafen. Den kriminaliserar en viss typ av forskning som gäller konstruktion av reaktorer; inte ens ekonomiska kalkyler tillåts. Det kan kort och gott sägas att denna lag är en skamfläck för Sverige, och den borde omgående skrotas!

Till sist kan vi inte undgå att nämna att kärnkraften även gjort sitt intåg i Grönköping där de två reaktorerna fått namnen Gaphals 1 och Gaphals 2.

Prisjämförelser

Slutligen vill vi ange en ungefärlig prisjämförelse för olika energislag, och vi kan då inte underlåta att nämna att staten frikostigt subventionerar en viss typ av energiproduktion, nämligen vindkraft. Det är en fullständigt orimlig ordning som innebär att den som bygger ett vindkraftverk för 2,1 miljoner kronor (f.n. en vanlig storlek) av staten får 735 000 kronor! Om Barsebäck skulle ersättas med vindkraftverk måste staten satsa något i stil med 12 miljarder kronor för en dålig lösning med tvivelaktiga miljökonsekvenser.

För den fortsatta prisjämförelsen måste man ha klart för sig att själva anläggningskostnaden på något sätt måste räknas in och främst för vattenkraft och kärnkraft finns det skäl att göra en uppdelning. I båda fallen är kapitalkostnaden mycket stor medan själva driftskostnaden är liten.

© Studentlitteratur

Vattenkraft:	Utbyggd vattenkraft	2 öre/kWh
	Ny vattenkraft	20–30 öre/kWh
Kärnkraft:	Kapitalkostnad	8 öre/kWh
	Total driftskostnad	9 öre/kWh
Vindkraft:	inkl. 30% investeringsbidrag	30–45 öre/kWh
Biobränsle:	med bidrag; osäker uppskattning	70 öre/kWh
Torv:		60–70 öre/kWh
Naturgas:		25–35 öre/kWh
Olja:	Utbyggd	16 öre/kWh
	Nybyggd	38–42 öre/kWh
Kol:		35–40 öre/kWh
Flygfotogen (för gasturbin):		60 öre/kWh

Kostnader som beror på kontaminering av miljön är inte inräknade; de torde främst gälla biobränsle, torv, olja och kol medan vindkraftens negativa effekter t.ex. genom störningar av TV-sändningar ännu är ofullständigt kända.

Litteraturanvisningar

Den mera avancerade litteraturen finner man naturligtvis i facktidskrifterna i fysik och teknologi. En mycket innehållsrik bok gavs ut 1986: "Kärnenergi i utveckling" (Bonniers). Den kom strax efter Tjernobyl-olyckan och behandlar problemen i ett vidare perspektiv. I boken ges f.ö. rikhaltiga litteraturhänvisningar som dock av naturliga skäl inte beskriver det allra senaste i branschen, och vår tanke har därför varit att i någon mån fylla denna lucka.

Problematiken kring ett folkligt motstånd mot nyheter är förvisso inte unik. Då elektriciteten togs i mera allmänt bruk förekom en helt visst förståelig rädsla, och visst inträffade åtskilliga olyckor innan man fick ordning på säkerheten. Det är emellertid intressant att notera att den välkände skalden Gustaf Fröding ingrep i debatten med följande dikt (vi har fått idén till detta citat från den ovannämnda boken). Alltså:

© Studentlitteratur

Belysningsfrågan

De tändas de nya elektriska tankarne
det lyste, det sken i hvarenda vrå
– då skreko de gamla eländiga dankarne:
"det tar eld i hvar knut!
släck ut! släck ut!
låt pusten blåsa och saxen gå!"
Men skulle man sett något fräckare,
den heliga talgens gäckare,
elektriska lågor, stora och små,
sig läto ej släckas af talgljussläckare,
men brunno ändå!
Tablå!

Gustaf Fröding (1891)

Carl-Erik Fröberg är professor i emeritus i Numerisk analys vid Lunds Universitet och styrelseledamot i Miljövänner för Kärnkraft.

© Studentlitteratur

Kärnkraft i utveckling

av Karl-Erik Larsson

Tillbakablick

Nyzeeländaren Ernest Rutherford publicerade år 1919 sin upptäckt av världens första människoframställda kärnreaktion. Det var atomkärnor av kväve och helium som reagerade och gav atomkärnor av syre och väte samt en stor mängd frigjord energi. Rutherford yttrade om sin upptäckt att den en dag skulle visa sig ha större betydelse än det nyss utkämpade blodiga första världskriget. Han skulle bli sannspådd. Kärnfysiker världen över drömde från den dagen om frigörelse av atomkärnors inre energi i stor skala.

Drömmen blev verklighet. Sålunda startade fysikern och Nobelpristagaren Enrico Fermi världens första kärnreaktor den 2 december 1942. Den innehöll grafit och naturligt uran och byggde på den tyske fysikern Otto Hahns upptäckt av urankärnans klyvning som följd av neutroninfångning och med frigörelse av stora energimängder år 1938. Att man redan innan denna start skett i USA, fattade beslut att bygga några mycket stora produktionsreaktorer – också baserade på naturligt uran och grafit samt kylda med vatten – gömda långt borta i nordväst i staten Washington på en plats kallad Hanford var inte betingat av omtanke om världens energiförsörjning. Fastmer var avsikten att i dessa reaktorer transmutera (= omvandla) uranisotopen uran-238 till plutonium-239. Det var fråga om modern alkemi åstadkommen inte i retorter utan av den märkliga neutrala partikeln neutronen av vilka ca 2 av 3 frigöres då en urankärna klyves. Visserligen drevs dessa reaktorer liksom dagens kraftreaktorer genom klyvning av den sällsyntare uranisotopen uran-235, men då liksom nu fastnar en del av reaktorhärdens myriader av neutroner i uran-238, som sedan genom ett par radioaktiva sönderfall ger det långlivade ämnet plutonium.

Plutonium-239 skulle produceras atom för atom upp till kilogramkvantiteter för att ge material till en atombomb. Så blev det. Bomben avslutade andra världskriget genom att fällas över den japanska staden Nagasaki den 9 juli 1945.

© Studentlitteratur

Så tragiskt och samtidigt så löftesrikt startade den nukleära epoken. Varför löftesrikt? Jo, det var ju uppenbart att man kunde frigöra atomkärnors inre energi på ett kontrollerat sätt och i stor skala i kärnreaktorer.

Redan då, 1945, var man inne på tanken att oljan var en ändlig resurs som ganska snart skulle ta slut. Många länder, t.ex. Sverige, hade ingen egen olja och löpte risken för plötslig avspärrning. Senare erfarenheter har visat hur sårbart oljeberoendet är. Förutom bristsituation kan plötsliga höjningar lamslå ett lands ekonomi. Dessutom medför oljeförbränning utsläpp av giftiga avgaser samt koldioxid troligen bidragande till uppvärmning av vår planet. Liknande gäller kolet. Kärnkraften var lockande då den syntes ren, inga avgaser. Dessutom lockande ur en annan synpunkt: den är en oerhört kompakt energikälla. Klyvningen av atomkärnorna i ett (1) gram uran ger en energi 250 000 kWh (kilowattimmar). Två gram per varje svensk och år motsvarar vårt totala energibehov av ca 400 TWh (terawattimmar, 1 TWh = 1 miljard kilowattimmar). Vår totala el-konsumtion idag av ca 140 TWh motsvarar klyvningsenergin i 0,7 gram per person och år (räknat per 8 miljoner invånare).

Kärnenergin är i runda tal en miljon gånger kompaktare än andra vanliga energikällor som ved, kol etc. Orsaken ligger däri att förbränning av kol, ved etc. är en kemisk process genom vilken lagrad solenergi frigöres. Kärnenergin är oberoende av solen och är av kosmiskt ursprung. Den representerar ett oerhört språng i mänsklig kunskap och bör därför – rätt utnyttjad – kunna leda till avsevärda framsteg för människan.

Så tänkte man på 1940- och 1950-talen. Och så tänker fortfarande många initierade människor, som finner att löftet väger tyngre än de motgångar som drabbat fältet under utvecklingens gång.

Förhoppningar och motgångar

Åren från 1943 till 1953 kan sägas vara de gyllene förhoppningarnas år. Då skapades de flesta idéer om nya reaktortyper som kunde leda till praktiskt använd kärnkraft. Man provade olika kombinationer av kärnbränslen och moderatormaterial, t.ex. naturligt uran, anrikat uran, plutonium som bränslen och grafit, tungt vatten, lätt vatten, beryllium etc. som moderatorer (moderatorn bromsar ned de i kärnklyvningen frigjorda snabba neutronerna med hastigheter av ca 10^7 meter per sekund till ca 10^3 meter per sekund motsvarande en energiminskning med åtta tiopotenser. Fermi hade 1935 upptäckt att långsamma neutroner var 100-tals gånger mera effektiva att

© Studentlitteratur

åstadkomma kärnreaktioner, t.ex. klyvning. För detta fick han 1938 års Nobelpris i fysik.)

Denna rivande utveckling – karaktcristisk för tidsepoken – avbröts kring mitten av 1950-talet efter president Eisenhowers Atoms For Peace program. I och med implimenterandet av detta program, varigenom bl.a. anrikat uran skulle ställas till förfogande för sådana nationer eller företag som ville utveckla fredlig kärnenergi, bröts utvecklingen av olika reaktortyper och en enda typ fick övertaget, nämligen den lättvattenmodererade och -kylda reaktorn med svagt anrikat uran som bränsle. Svagt anrikat uran innehåller typiskt 3,5% av uranisotopen 235 som är lätt klyvbar och 96,5% av uran-238 som är svårt att klyva men som alltså är grundmaterial för bildande av det lätt klyvbara plutonium 239. Orsaken till Eisenhowers initiativ var rädslan för att olika nationer skulle starta egna program utanför USA:s kontroll och att därmed risk skulle föreligga för kärnvapenspridning.

Lättvattenreaktorerna gick segrande över världen, så också i Sverige. Redan pionjärerna på 1940-talet insåg att skulle kärnenergin bli en verkligt stor och varaktig energikälla så räckte det inte med att bränna upp det uran-235 som finns i naturligt uran till endast 0,7%. Man måste använda sig av den transmutationsprocess som leder från uran-238 till plutonium-239. Uran-238 förekommer ju till 99,3% i naturligt uran. En typ av reaktor som utför denna omvandlingsprocess fann man i den s.k. snabba bridreaktorn. Den kallas snabb därför att kedjereaktionen i denna reaktor drives med snabba neutroner enligt vad som beskrivits ovan. Ingen moderator skall i princip förekomma. Som kylmedel mellan bränslestavarna användes flytande metaller såsom natrium eller bly, ämnen som inte nämnvärt bromsar ned neutroner. Om man tar hänsyn till att en del uran-238 omvandlat till plutonium-239 förbrännes även i våra vanliga lättvattenreaktorer av idag så kan man säga att uranets uthållighet som energikälla förlänges med åtminstone en faktor 70 om man använder sig av bridreaktorer laddade med en blandning av plutonium och uran, t.ex. 15% plutonium och 85% uran i form av dioxider i bränslestavarna.

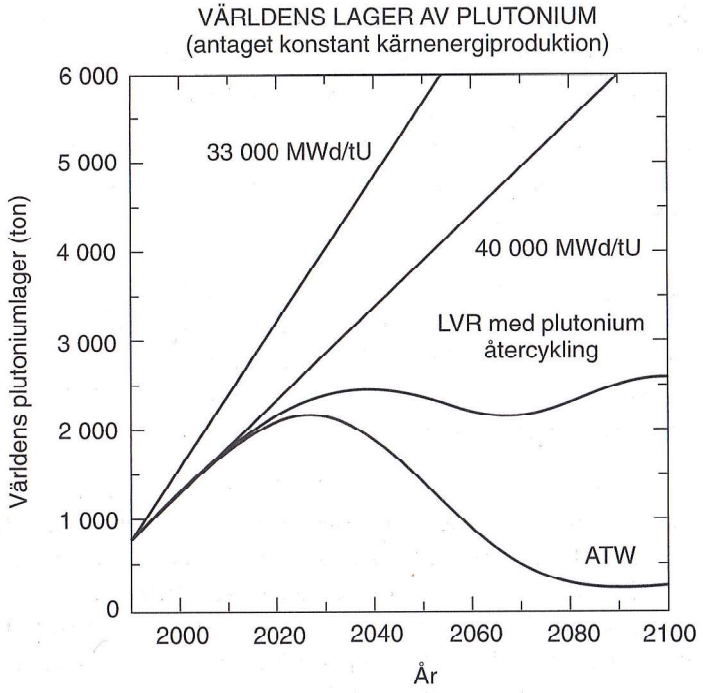
Man hade tänkt sig att plutonium som ju inte finns i naturen utan skapas i de vanliga lättvattenreaktorerna skulle utvinnas ur det från dessa reaktorer uttjänta bränslet genom kemisk upparbetning. Framför allt i USA fanns redan vid mitten av 70-talet ett stort antal lättvattenreaktorer i drift. Det började bli aktuellt med upparbetning för att få ut bl.a. plutoniet för användning i bridreaktorer. Men åter blev det storpolitiska synpunkter som bromsade utvecklingen. Under president Carters regim i USA 1976–1980 stoppades de vidare utvecklingsarbetena på bridreaktorer. Orsaken var att man fruktade att en del av det frigjorda plutoniet skulle komma på avvägar och

© Studentlitteratur

användas till kärnvapenframställning. Det blev i stort sett bara dåvarande Sovjetunionen, Frankrike och Japan som fortsatte utveckling av bridreaktorer, vilka ännu ej vunnit ekonomiskt genombrott.

Eftersom lättvattenreaktorer världen över fortsätter att producera plutonium som oundviklig biprodukt till energiproduktionen har detta lett till att lagret av plutonium i utbränt kärnbränsle är mycket stort, ca 900 ton f.n. och växer snabbt som åskådliggöres i figur 1. Tillväxttakten beror på utbränningsgraden i reaktorerna.

I figur 1 visas två rätlinjiga tillväxtkurvor som motsvarar en utbränning av 33 kg uran resp. 40 kg uran per insatt ton uran i bränslestavarna. Man kunde bryta tillväxten genom att kemiskt upparbeta bränslet från våra lättvattenreaktorer (*LVR*), omvandla det till plutoniumdioxid samt blanda in detta ämnet i urandioxiden. Denna blandning kunde sedan ingå i reaktorns bränslestavar för förnyad användning i figuren kallad återcykling. Denna sorts blandbränsle har kallats MOX-bränsle vilket kommer från *M*ixed *Ox*ide Fuel. Tyvärr går det inte att bränna ut allt plutonium i sådant bränsle



Figur 1

© Studentlitteratur

innan man måste ta ut det ur reaktorn igen. Slutligen anges i figuren en fjärde kurva som ser mera hoppingivande ut. Den anger vad som skulle kunna ske med plutoniumlagret om man tillämpade en helt ny teknik att förbränna detsamma vilken baseras på en kombinerad användning av accelerator- och reaktorteknik som vi i det följande ska granska mera i detalj. Tekniken kallas ATW.

Först skall vi emellertid peka på ett antal svagheter i nuvarande reaktorgeneration som skulle motivera utveckling av ny kärnenergiteknik.

Brister med vårt nuvarande reaktorprogram

Det nyss beskrivna problemet med plutonium måste åtgärdas. Man överväger idag att deponera använt kärnbränsle i geologiska slutna slutförvar, t.ex. djupt ned i urberget, i saltgruvor etc.

Kärnkraften har mötts av folklig skepsis. Den sakliga grunden härtill är förekomsten av mycket stora mängder radioaktiva ämnen i reaktorhanteringen. Väsentligen fruktar allmänheten spridning av radioaktivitet i biosfären genom två reaktortekniskt betingade företeelser:

1 via reaktorolyckor som i Tjernobyl, Sovjet eller Harrisburg, USA.
2 via bristfälligt omhändertagande av långlivat radioaktiva produkter i använt kärnbränsle.

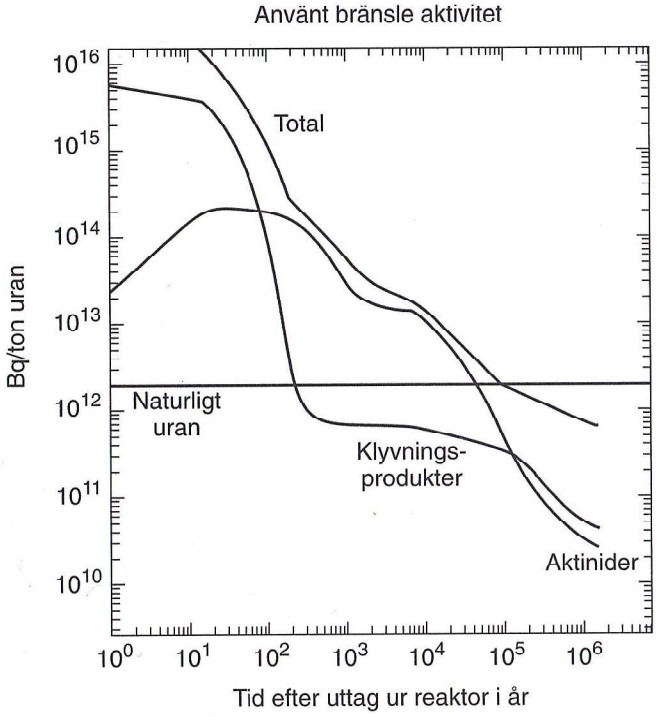
Sättet att svara på dessa farhågor bör givetvis vara att ta dem på allvar och på djupet analysera vilka de tekniska orsakerna är och vad man kan göra åt detta genom lämpligt riktad forskning och utveckling.

Vilka är då det nuvarande kärnenergisystemets principiella svagheter? Det viktigaste kan anges sålunda:

1 Kedjereaktionen i en reaktor är självgående. Det var Enrico Fermis bedrift att år 1942 starta den självgående men kontrollerade kedjereaktionen. Detta sätt att driva reaktorer är elegant och har visat sig mycket säkert. Endast en större olycka orsakad av att kedjereaktionen gått ur kontroll har inträffat, den i Tjernobyl, Sovjet, 1986. Då spreds radioaktivitet över stora arealer från olycksstället. Risken för reaktorrusning i våra lättvattenreaktorer är emellertid mycket liten men den är inte obefintlig. Tjernobyl-typen av reaktor existerar endast i forna Sovjet och är olämplig som industriell energiproducent.

© Studentlitteratur

2 Reaktorerna innehåller stora mängder bränsle som sitter i reaktorhärden under lång tid, två–tre år. Därav följer att bränslestavarna i reaktorn sammanlagt innehåller betydande mängder radioaktiva restprodukter. Denna radioaktivitet bidrar med ca 10% till att hetta upp bränslet. Även om kedjereaktionen stängts av så att de energigivande kärnklyvningarna upphört så fortsätter den radioaktiva strålningen att hetta upp härden motsvarande några procent av den termiska effekt vid vilken reaktorn opererade. Detta leder till att reaktorhärden måste kylas även efter reaktorstopp. Faller kylningen bort så kan härden upphettas till smältning av bränslet. Detta är den s.k. härdsmältan. En olycka av detta slag har inträffat i Harrisburg, USA, 1979. Reaktorinneslutningen förmådde dock hålla radioaktiviteten instängd.
3 I det använda kärnbränslet av idag finns typiskt 95% oanvänt uran, 1% plutonium och andra högre s.k. aktinider såsom neptunium, americium och curium och 4% av radioaktiva klyvningsprodukter. Radioaktiviteten och dess avklingning med tiden hos de ca 5% nybildade produkterna återges i figur 2. Det är särskilt viktigt att ange de produkter vilkas radioaktivitet avklingar mycket långsamt. Kurvan som markerats *klyvnings-*



Figur 2

© Studentlitteratur

produkter domineras först av två radioaktiva komponenter nämligen strontium (^{90}Sr) och cesium (^{137}Cs) båda med en halveringstid av ca 30 år (jämför tabell 1). Efter ca 300 år har dessas aktivitet avklingat till en nivå som motsvarar den ursprungliga radioaktiviteten hos uranet. Härefter dominerar mera långlivade radioaktiva isotoper exempelvis teknetium (^{99}Tc) och jod (^{129}I) som håller kurvan uppe i miljontals år (se också tabell 1). Mycket betydelsefull är den kurva som markerats med *aktinider*. Den beskriver den sammanlagda radioaktiviteten i plutoniumisotoperna 238, 239, 240, 241 och 242 samt i neptunium (^{237}Np), americium och curium (jfr tabell 1 övre delen). Radioaktiviteten i dessa material sjunker inte ned till den ingående uranmalmens aktivitet förrän efter ca hundratusen år.

Tabell 1 Långlivade radioaktiva produkter i använt bränsle.

Nuklid	Halveringstid (år)	Uttag från 3 000 $MW_{termisk}$LVR (kg/år)
Aktinider		
^{237}Np	2 100 000	14,5
^{238}Pu	80	4,5
^{239}Pu	24 000	166,0
^{240}Pu	6 600	76,7
^{241}Pu	14	25,4
^{242}Pu	380 000	15,5
^{241}Am	430	16,6
^{243}Am	7 400	3,0
^{244}Cm	18	0,6
Fissionsprodukter		
^{79}Se	65 000	0,2
^{85}Kr	11	0,4
^{90}Sr	29	13,4
^{93}Zr	1 500 000	13,4
^{99}Tc	210 000	23,2
^{107}Pd	6 500 000	7,3
^{126}Sn	100 000	1,0
^{129}I	17 000 000	5,8
^{135}Cs	3 000 000	9,4
^{137}Cs	30	31,8
^{151}Sm	90	0,4

© Studentlitteratur

4 Så länge bridreaktorerna inte har utvecklats till konkurrensdugliga och säkra energiproducenter så lider nuvarande reaktorgeneration av svagheten att endast ca 1–1,5% av det naturliga uranet bränns upp så som inledningsvis påpekats. Punkterna 1–4 utgör en utmaning för forskare och tekniker inom kärnenergibranschen världen över.

Nyare utvecklingslinjer inom kärntekniken

Som bör ha framgått av ovanstående skildring av kärnkraftens nuvarande dilemma är problemets kärna att ingen koncentrerad ansträngning gjorts fram till nu för att på allvar gripa sig an med ny utveckling. Detta är delvis orsakat av förlamande politiska beslut och delvis av att den nuvarande kärnenergiutvinningen i stort sett går problemfritt och med god ekonomisk avkastning samtidigt som livslängden på dessa system är lång. Incitamenten att gripa sig an med ny utveckling har varit för få. Men utvecklingen står dock ej stilla.

I Japan och i en del kärntekniskt inriktade laboratorier i USA som Los Alamos, Brookhaven och Argonne har ny-gamla idéer nu fått nytt liv. Utgångspunkten har varit att dels angripa problemet med kärnkraftens restprodukter vilka diskuterats ovan, dels problemet med överblivet plutonium från stormakternas skrotade kärnvapenarsenaler liksom avfall från denna vapentillverkning och dels ytterligare avsevärt förbättra reaktorsäkerheten.

Av kärnkraftens restprodukter kan i princip plutonium och övriga aktinider förintas genom klyvning i lämpligt kärnenergisystem och övergå från avfall till effektiva energiproducenter. De långlivade klyvningsprodukterna kan genom infångning av neutroner transmuteras till kortlivade eller stabila ämnen. Kärnvapenplutonium kan brännas upp och ge nyttig energi i lämpligt system. Reaktorsäkerheten skulle i princip kunna drivas långt mot gränsen "helt säker" om man kunde lämna principen med självgående kedjereaktion.

Det sistnämnda bör något förklaras. I en självgående kärnreaktor är antalet fria neutroner i en viss generation av kärnklyvningar exakt lika med antalet i föregående generation. Populationen är konstant om reaktoreffekten är konstant. Man säger att reaktorn är kritisk, en teknisk term utan anknytning till något säkerhetsvärdering. Om däremot antalet neutroner avtar från en föregående till en efterföljande generation säger man att reaktorn arbetar underkritiskt. Då stannar kedjereaktionen av mer eller mindre snabbt.

© Studentlitteratur

Uppenbarligen skulle ett kärnenergisystem som under alla förhållanden arbetar underkritiskt kunna bli helt säkert ur rusningssynpunkt.

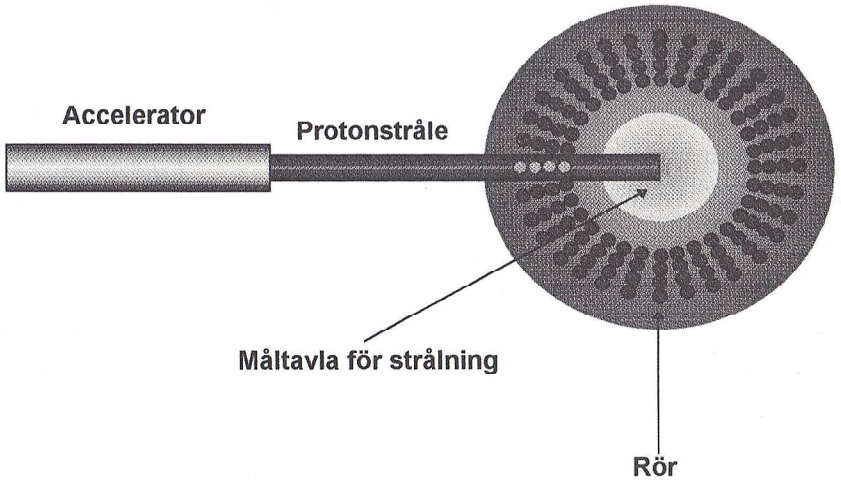
Det är också klart att för att hålla ett sådant system vid liv så erfordras ett tillskott utifrån av det drivande mediet som är neutronerna. Detta tillskott kunde fås genom att det underkritiska systemet hålles gående genom en yttre neutronkälla. Denna kunde vara en annan typ av kärnreaktion driven med en helt annan teknik.

Likaså påstods ovan att plutonium och andra aktinider kan klyvas och ge energi. Men varför sker då inte detta i våra nuvarande reaktorer? Orsaken är att de myriader av neutroner som finns i systemet trots allt är för fåtaliga. Detsamma gäller för transmutation av långlivade radioaktiva klyvningsprodukter. Vad som kan klyvas respektive transmuteras i den neutronmiljö som finns i dagens reaktorer är redan kluvet och transmuterat upp till maximum av reaktorns förmåga då bränslet tages ut efter ett par, tre år i härden. Uppenbarligen kunde ett tillskott av utifrån kommande neutroner även i detta avseende klara uppgiften.

I och med dessa klarlägganden är det lättare att förstå vilka vägar man kan tänkas gå för att lösa problemen. Helst alla på en gång. Metoden bör vara att söka efter ett symbiossystem som kopplar den välkända reaktorteknologin till någon annan sorts kärnteknologi som kunde producera neutroner i stor mängd utan för stor energikostnad.

En sådan teknologi är acceleratorteknologin. Under drygt sex årtionden har man ständigt förfinat och fulländat tekniken att accelerera atompartiklar, t.ex. protoner (= vätekärnor) till mycket höga energier. Det är sålunda idag inget problem att accelerera protoner till energier av 1 000 miljoner elektronvolt (MeV). För att få en uppfattning om vilken energi detta motsvarar så kan man jämföra med energin som frigöres i kemiska reaktioner. Då kol och syre förenas till koldioxid vid förbränning fristrälles en energi av storleksordningen en (1) elektrovolt. Neutronen är bunden i atomkärnorna med en energi av ca 7 MeV = 7 000 000 elektronvolt. Den accelererade protonen har en energi av 1 000 000 000 elektronvolt. Man har funnit att en sådan supersnabb proton kan slå ut ca 40 neutroner om den träffar ett tungt strålmål, t.ex. av bly, volfram, uran etc. Om man kunde åstadkomma en stark ström av protoner, t.ex. 100 milliampere (mA) så finge man en mycket intensiv neutronkälla av storleksordningen 10^{20} neutroner per sekund. Om detta strålmål av t.ex. flytande bly placerades i centrum av en stor moderatorgeometri, t.ex. av grafit eller tungt vatten så skulle flödet av långsamma neutroner kunna fås att överträffa det i dagens kärnreaktorer med minst någon tiopotens (jämför figur 3).

© Studentlitteratur



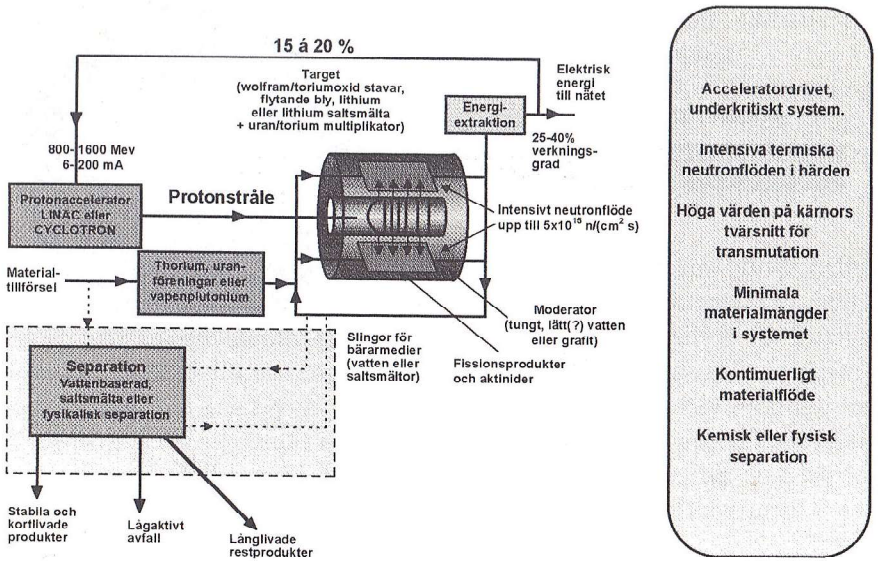
Figur 3

Man kan nu använda och ytterligare förstärka det i nämnda moderatorgeometri existerande neutronflödet genom att införa ett rörsystem i moderatorn och genom detta leda in flytande kärnbränslen som kan vara uran-235, uran-233, plutonium-239 eller vilken som helst aktinid som är lätt klyvbar. Då stiger alltså neutronflödet ytterligare genom multiplikation ty vid varje kärnklyvning frigöres i genomsnitt 2,5–3 neutroner. I ett sådant system måste man hålla koncentrationen av klyvbara ämnen så låg att energiproduktionens intensitet – effekten – hålles vid rimlig nivå samtidigt som villkoret om underkritiskt system uppfylles. Beräkningarna visar att detta är möjligt. Beräkningarna visar också att neutronproduktionen kan hållas så hög att transmutationstakten av långlivade klyvningsprodukter kan drivas upp i önskvärd hög nivå.

Vidare kan de neutroner som är på väg att läcka ut ur systemet användas till att skapa nytt lättkluvet bränsle ur det svårkluvna, d.v.s. att bilda nytt plutonium ur uran eller ännu bättre att bilda nytt klyvbart uran – uran-233 – genom bestrålning av torium-232.

Man börjar visualisera en kärnkraftens önskemaskin som samtidigt kunde skapa nytt bränsle, förbränna detsamma och ge stora energimängder och slutligen omvandla det fruktade långlivade radioaktiva avfallet till kortlivat eller stabilt sådant.

© Studentlitteratur



Figur 4

Ett principiellt sådant system åskådliggöres i figur 4. Anläggningen fungerar på följande sätt:

1 Protonstrålen från acceleratorn ger neutroner i moderatorn. Denna är genomsatt av ett stort antal rör i vilka olika material kan införas.
2 Rörsystemen i moderatorn kan tänkas bestå av tre koncentriska system. Ett yttre system av rör. Här införes det fertila icke lätt klyvbara material som skall omvandlas till lätt klyvbart. Exempel utgör det fertila torium-232 som övergår till det lättklyvbara uran-233 eller det fertila uran-238 som övergår till det lätt klyvbara plutonium-239. Detta är bridzonen. Ett mellansystem av rör. I detta införes de klyvbara produkter som bildats i yttre zonen eller eljest är lätt klyvbara, t.ex. plutonium eller andra aktinider från kärnvapenskrotning eller från våra kommersiella reaktorer. Detta är energiproduktionszonen. Ett inre system av rör med högsta neutronflöde. Här införes och cirkuleras de långlivade radioaktiva klyvningsprodukter som skall transmuteras till kortlivade eller stabila.
3 De heta produkterna från klyvningszonen – mellanzonen – ledes till värmeväxlare där deras värmeinnehåll extraheras och ger exempelvis het ånga för drift av ångturbiner och elgeneratorer. Max 20% av producerad el går tillbaka för att driva acceleratorn. 80% går till el-nätet.

© Studentlitteratur

4 Klyvbart och/eller fertilt material tillföres kontinuerligt i form av torium- eller uranföreningar. Efter energiavgivning i värmeväxlare ledes kontinuerligt ett mindre flöde av det bestrålade och kluvna materialet till en separationsanläggning i vilken klyvningsprodukter avskiljes. De kortlivade eller stabila går ut ur kretsloppet till förvaring. De långlivade återföres till den inre zonen där de transmuteras till kortlivade eller stabila varefter de också går ut ur kretsloppet.

In i systemet går fertila produkter, d.v.s. naturligt uran eller torium. Ut ur systemet kommer el-energi och kortlivade eller stabila produkter, samt en slutlig mycket liten rest av mera långlivade produkter.

Att här torium har framhållits som önskvärt naturbränsle har sin förklaring i att icke klyvbart torium omvandlas till klyvbart uran och man slipper ifrån plutonium helt och hållet samt stora delar av övriga restaktinider.

Man noterar, att systemet bygger på en koppling mellan *accelerator-* och *reaktorteknik* samt mellan *vetenskaperna* för *fission* och *spallation*, ett typiskt nukleärt symbiossystem för vilket benämningen *spallator* har föreslagits. I USA har förkortningarna ATW, ADEP och ABC använts för systemet beroende på vilken aspekt av systemet man vill poängtera. ATW = *A*ccelerator driven *T*ransmutation of *W*aste; ADEP = *A*ccelerator *D*riven *E*nergy *P*roduction; ABC = *A*ccelerator *B*ased *C*onversion.

Vilka är fördelarna med systemet? Man kan räkna upp följande:

1 Spallatorsystemet är nukleärt säkert ur den synpunkten att det drives som ett underkritiskt system. Produktionen brytes så snart acceleratorn stoppas. Reaktorrusning a la Tjernobyl kan göras utesluten.
2 På grund av de mycket höga neutronflödena i härden måste härdens innehåll av klyvbara aktinider hållas ca två tiopotenser lägre än i en reaktor, t.ex. ca 100 kg uran-233 eller plutonium jämfört med ca 10 000 kg i en reaktor. Bränslet hålles i flytande form. Risken för en härdsmälta är eliminerad. I våra normalstora lättvattenreaktorer av idag ingår typiskt 100 ton låganrikat uran varav 3–4 ton utgöres av den lättklyvbara isotopen uran-235.
3 Förekomsten av restprodukter är mycket starkt reducerad, beroende på vilken grad av separation man kan åstadkomma i den till systemet anknutna separationsanläggningen.
4 Systemet är ett bridsystem som följaktligen kräver mycket låg materialtillförsel. Om systemet levererar en termisk effekt av 3 000 MW motsvarande en el-effekt av 1 000 MW så klyves i runt tal ett (1) ton bränsle per år. Dessa siffror gäller även för våra lättvattenreaktorer av idag. Detta

© Studentlitteratur

Tabell 2 Jordens energiinnehåll i potentiella kärnbränslen.

Isotop	Förekomst i jordskorpan (gram/ton)	Total förekomst (miljarder ton)	Kärnenergi innehåll (10^{20} kWh)	Livslängd som bränsle (miljoner år)
Th (torium)	12	4,7	8	,5
U (uran)	4	1,2	2	,17
^{6}Li (isotop av litium)	4,9	1,9	9,6	0,74

skall jämföras med jordens resurser i form av torium och uran enligt tabell 2. I den sista kolumnen i denna tabell anges ungefärlig livslängd för kärnbränslena torium och uran. Härvid har antagits att man driver ca 8 000 reaktorer hela denna tid jämfört med dagens ca 400. Även med detta mycket stora kärnenergiprogram för hela världen så räcker naturresursen i upp mot miljonen år i ett system med bridteknik. Denna resurs är i praktisk bemärkelse lika "oändlig" som förekomsten av isotopen litium-6 i jordskorpan. Denna fertila isotop skulle leverera bränsle till eventuella fusions reaktorer i en obestämbar framtid, nämligen tritium (^{3}H).

5 Systemet kan anpassas till olika ändamål, t.ex. att a) ersätta dagens reaktorer för energiproduktion, b) användas som destruktionsmaskin för det kärnavfall man producerat med dagens teknik, c) bränna upp världens kärnvapenplutonium och ge energi därav. I figur 1 finns längst ned en kurva markerad med ATW som anger med vilken takt man skulle kunna bränna upp allt kommersiellt plutonium i världen om man från år 2010 introducerar två nya spallatorsystem på tre år tills man kommit upp i ett antal av sextio stycken: man kan bränna upp all plutonium. Liknande slutsats gäller allt kärnvapenplutonium.

Systemet är mycket flexibelt och de olika ändamålen kan kombineras. Som nackdelar eller osäkerheter kan nämnas:

1 Materialproblem kan uppkomma i samband med strålmålet och i rörsystemen.
2 Separationstekniken är som alltid vid hantering av starkt radioaktiva ämnen komplex och måste vara fjärrstyrd och helautomatisk. Den mest sannolika utformningen av härden i ett spallatorsystem synes f.n. består av en grafithärd genomsatt av ett stort antal rör i vilka flyter bränsle i form av fluorider. Litiumberylliumfluorid är bärare som uppblandas med toriumfluorid, uranflurid etc. Fysikalisk separationsteknik måste utvecklas för att användas på sådana saltsmältor.
3 Det måste klart demonstreras att höga protonströmmar i acceleratorn kan produceras och upprätthållas med mycket stor säkerhet och uthållighet.

© Studentlitteratur

Beträffande möjliga tidsramar för utveckling av spallationssystemet torde man behöva en period av femton år fram till fullskaleprototyp från den dag beslut fattas om uppbyggnad av densamma och kraftfull medelsatsning sker. Dessförinnan måste viss fundamental utveckling äga rum.

Beträffande kostnader för systemet kan man säga att acceleratorkostnad är någorlunda under kontroll. Härdsystemet beräknas grovt kosta ca 60% av en reaktors härdsystem. Man behöver t.ex. inga styr-, kontroll- och säkerhetsstavar i systemet. En okänd faktor är separationsanläggningen. Det yttre energiextraktionssystemet turbogenerator m.m. är detsamma som vid alla kraftcentraler baserade på värmeenergi och kostnader sålunda säkert bedömbara.

Framtidsvy

Många stater – särskilt de s.k. supermakterna – spenderade avsevärda summor på att utveckla först kärnvapen och sedan som följd därav den fredliga kärnkraften. Det kan synas rimligt att man nu satsar i relativt samma proportioner för att göra sig av med både kärnvapen och det avfall som härstammar både från kärnvapenframställning och från fredlig kärnkraft. Om tekniska möjligheter nu synes öppna sig för detta vore det etiskt oacceptabelt om man droge sig ur ansvaret. Men även små nationer med kärnkraft borde engagera sig i detta. Möjligheten för en ny typ av mycket miljövänlig och uthållig produktion av kärnkraft kan skönjas.

Det praktiska arbetet på att utveckla spallatorsystem har startats i Japan och i Los Alamos laboratoriet, New Mexico, USA. Kontakter är redan tagna på forskarnivå mellan Los Alamos och laboratorier i Sverige, Ryssland, Frankrike och Japan. I Japan är beslut tagna om acceleratorbygge. I Los Alamos existerar redan en tämligen kraftfull sådan.

© Studentlitteratur

Projektens genomförbarhet kräver en kraftsamling och en kompetensmobilisering liknande den som ägde rum på 1940–50 talen. Man skall observera att alla fysikaliska grundprinciper är klara, klyvningsprocessens alla detaljer är välkända, både accelerator- och reaktorteknik är välutvecklade. Målet och löftet för dessa ansträngningar är en hittills oöverträffad ren och uthållig energikälla. Det hänger på politisk vilja.

Karl-Erik Larsson är professor emeritus i reaktorfysik vid KTH i Stockholm.

© Studentlitteratur

Hur farliga är de låga stråldoserna?

av Gunnar Walinder

Högsta tillåtliga normer och rekommendationer inom strålskyddet grundas på risken för att vi skall drabbas av cancer. Detta beror helt enkelt på, att sådana sjukdomar anses kunna uppkomma efter lägre stråldoser än de som fordras för att åstadkomma andra skador (inklusive ärftliga skador).

Ännu ett förtydligande krävs. När jag här talar om strålning avser jag *joniserande* strålning (sådan som exempelvis utsändes från radioaktiva ämnen), d.v.s. en stråltyp som är så energirik, att den förmår göra atomer och molekyler i kroppen elektriskt laddade (skapa joner). Det är just denna joniserande egenskap, som gör det här slaget av strålning så biologiskt farlig. Men för enkelhetens skull utesluter jag i fortsättningen ordet joniserande.

I det låga dosområdet förutsätts vanligen, att frekvensen uppkomna tumörer är direkt proportionell mot stråldosen samt att det inte existerar några stråldoser under vilka vi kan vara säkra på att inte drabbas av elakartade tumörer (cancer). Man säger att sambandet mellan stråldos och antalet uppkomna tumörer (dos-respons sambandet) är linjärt och att det saknar tröskeldoser.

Det man här faktiskt säger är, att om man i ett diagram avsätter iakttagna tumörfrekvenser utefter den lodräta axeln och motsvarande doser längs den horisontella, får man ett samband, som inte bara kan approximeras med en rät linje, utan att det faktiskt *är* linjärt, d.v.s. linjäriteten är en inneboende egenskap hos sambandet. Detta innebär i sin tur, att man också anser sig kunna dra ut ett observerat dos-respons samband som en rät linje även nedanför det dosområde inom vilket man gjort observationerna. Och detta kan man göra ända ned till dosen noll.

Men det måste också sägas, att den här teorin i själva verket bygger på den gamla föreställningen att en cell skulle kunna omvandlas från sitt normala tillstånd till en fullt utbildad tumörcell i ett enda moment. Modern

© Studentlitteratur

tumörforskning har emellertid visat, att så enkel är inte den cellulära tumöromvandlingen. Det krävs en rad förändringar på olika ställen i cellens arvsmassa, för att förvandla den till en fullt utbildad cancercell. Naturligtvis är hela tanken absurd, att dos-effekt sambandet för ett så oerhört komplext biologiskt fenomen som cancer, på ett korrekt sätt skulle kunna identifieras med en rät linje eller, matematiskt uttryckt, med den enklaste av alla ekvationer, d.v.s. den av första graden med endast en oberoende variabel (dosen).

Bara idén att tala om dos-respons sambandet i bestämd form, som om det vore ett slags fysikalisk storhet, gemensamt för alla människor och befolkningar, är självfallet omöjlig. Människor är olika känsliga för strålframkallad cancer och vi vet, att detsamma gäller för hela befolkningar och att de därför, också efter bestrålningar, uppvisar specifika samband mellan dos och verkan. Detta gör att man i en viss situation inte kan veta hur dos-respons sambandet ser ut eller om det existerar tröskeldoser eller ej. Det finns också statistiska och kunskapsteoretiska skäl till denna principiella okunskap vid låga stråldoser. Men just denna bristande kunskap gör, att man i skyddssammanhang inte bör förutsätta existensen av tröskeldoser, d.v.s. man kan inte förlita sig på, att det finns helt ofarliga stråldoser. Detta gäller dock även för många andra risktyper.

Fortfarande håller man dock inom strålskyddet fast vid denna "linjärdoktrin", vilket medfört en del egendomliga konsekvenser. Utsätts t.ex. en befolkning för en viss stråldos blir antalet cancerdrabbade alltså direkt proportionellt mot befolkningens storlek. Är befolkningen tillräckligt stor, kan således även "homeopatiskt" små stråldoser leda till ett betydande antal beräknade skadefall. Denna konsekvens av doktrinen har ibland skapat förvirring bland människor. Låt mig illustrera problemet med följande två exempel.

Mitt första exempel är hämtat från en situation som inträffade strax efter Tjernobyl-olyckan när en del lantbrukare i Gävle-trakten upptäckte, att mjölken från deras kor innehöll litet mer av det radioaktiva ämnet ^{137}Cs än vad myndigheterna satt som övre gräns. De frågade då om man inte kunde spä ut den radioaktiva mjölken med ren mjölk och på så sätt komma under den fastlagda maximikoncentrationen. Till deras förvåning svarade myndigheterna nej. Till förklaring sa man, att *visst kan du minska din personliga risk med att spä ut mjölken. Men samtidigt ökar du volymen och därmed antalet konsumenter och då kvarstår ju risken. Låt vara att den nu blir fördelad på flera personer.*

Det här förstod inte bönderna: *hade vi från början fått den här mängden mjölk med samma ^{137}Cs-halt, som den vi nu skulle ha fått genom utspädningen, hade vi ju tillåtits sälja den.* Förvirringen blev inte mindre vid myndigheternas fortsatta förklaringsförsök: *det här med att dricka mjölk och äta viltkött från trakten innebär inte för dig personligen någon risk, som du på minsta sätt behöver bekymra dig för. Men det kan ändå vara fråga om nivåer, som myndigheterna tycker sig behöva åtgärda.* Bönderna konstaterade då förvånat: *det betyder alltså, att jag förbjuds äta viss mat, trots att den inte alls är farlig för mig?*

© Studentlitteratur

Detta kan ju möjligen uppfattas som en lustighet, men den här officiella riskvärderingen har faktiskt väsentligt bidragit till, att det ibland uppstått en nästan mystisk rädsla bland människor: *man går ju aldrig säker. Hur liten stråldos som helst sägs ju kunna ge oss cancer.* Men att risken ändå kan vara helt försumbar, trots de skrämmande höga skadesiffror som ibland angetts, har sällan insetts och inte kunnat åskådliggöras på ett begripligt sätt. Detta problem illustreras i mitt andra exempel.

Detta exempel rör de cirka 30 000 dödsfall i cancer som FN:s vetenskapliga strålningskommitté, UNSCEAR, har beräknat att Tjernobyl-olyckan kommer att ge upphov till bland människorna på jordens norra halvklot. Siffran låter ju förfärande hög, även om man vid närmare eftertanke kan konstatera, att den "endast" utgör 5 tusendels procent av alla människor, som ändå skulle ha dött i cancer på norra halvklotet även utan Tjernobyl-olyckan. Låt mig parentetiskt säga, att om en sådan liten höjning av den "naturliga" cancerförekomsten, kan man självfallet inte ha någon kunskap. Siffran är en beräkningshypotes, strikt baserad på antagandet av en linjär dos-respons modell.

Låt oss jämföra den här uppskattningen med vad effekten kan bli av en annan, känd strålkälla under antagande av samma linjära dos-respons samband. På grund av den strålning vi får från radonet i våra bostäder, motsvarar de här 30 000 fallen av dödlig cancer den cancerrisk vi löper, om vi som bor på norra halvklotet skulle stanna inomhus ett par minuter längre per dygn än vad som idag är fallet. Eller, med andra ord, om vi på norra halvklotet bestämde oss för att stanna utomhus ett par minuter längre varje dag, skulle vi kunna minska cancerrisken lika mycket som Tjernobyl-olyckan ökar den.

Skräcken för strålning har också blivit speciellt tydlig efter Tjernobyl-olyckan. Många vitryska och ukrainska barn tror inte att de någonsin skall uppnå vuxen ålder. Även många vuxna människor har kommit att tro, att de är dödsdömda. Folk törs inte äta eller sälja sina jordbruks- och trädgårdsprodukter, trots att myndigheterna förklarat, att de är helt riskfria för konsumtion. Då jag besökt vitryska och ukrainska orter har det nästan regelmässigt samlats en mängd människor, som frågat mig hur det förhåller sig med de livsmedel de odlat: *Kan vi äta den? Vågar vi sälja den? Ingen vill ju köpa den.*

© Studentlitteratur

Även utanför de två forna sovjetrepublikernas gränser, har Tjernobyl-olyckan skapat skräck. Atomenergiorganet IAEA i Wien har uppgivit, att mer än 100 000 aborter kan ha utförts alldeles i onödan i Europa, på grund av rädslan – således också bland läkare – för det radioaktiva nedfallet från olyckan.

Särställandet av strålrisker har naturligtvis inte bara bidragit till rädslan för vad Tjernobyl-olyckan kan komma att medföra, utan har också påverkat vår inställning till kärnkraft i allmänhet. Det finns naturligtvis också många andra anledningar till motviljan mot kärnkraft än enbart påpekandet, att inga doser kan påstås vara helt riskfria. Till denna rädsla bidrar säkert också anknytningen till atomvapen, massmedias inte sällan negativa kampanjer (en negativitet som av journalisterna själva i flera fall erkänts vara medveten), politikers lekmannamässiga tro på strålningens specifika farlighet etc. Ett bevis på strålningens specifika farlighet har man ju också tyckt sig få, genom att experterna har ansett det nödvändigt med speciella, internationella kommissioner och särskilda, nationella myndigheter för att kunna bedöma strålningens risker. För alla övriga hälsorisker räcker det ju tydligen med en enda, gemensam insats.

Är den här särställningen rimlig? Kan den verkligen skapa en bas för ett rationellt val mellan olika riskalternativ? Låt oss göra tankeexperimentet, att Tjernobyl-olyckan hade medfört ett utsläpp av cancerframkallande ämnen i stället för de radioaktiva. Låt oss vidare anta, att dessa ämnen varit lika effektivt cancerframkallande, som de radioaktiva (det finns många sådana substanser). Då hade ingen reagerat, låt oss säga utanför 1-milsradien runt den havererade reaktorn, eftersom vi inte hade kunnat mäta något (p.g.a. strålningen kan vi ju mäta så väldigt mycket lägre koncentrationer av radioaktiva ämnen än av ämnen som inte "strålar"). Och vi i Sverige, 150 mil från olycksplatsen, hade aldrig kunnat ana, att vi utsatts för något farligt. Men risken hade naturligtvis varit densamma. Sådan var faktiskt situationen efter t.ex. Seveso-olyckan i Italien eller Bhopal-olyckan i Indien för några år sedan. Här befattade man sig bara med personer, som uppvisade mer eller mindre akuta skador och med områden där man kunnat mäta en förekomst av de utsläppta substanserna.

Skall vi alltså skapa oss en realistisk uppfattning om strålningens – och kärnkraftens – faror måste vi, för att få någon fason på våra begrepp, göra jämförelser med andra, kända risker. Jag har gjort en sammanställning i de två avslutande tabellerna.

För närvarande reagerar vi ofta våldsamt på strålrisker, även när de är så små, att vi i andra sammanhang inte ens skulle förknippa dem med begreppet risk. Låt mig ta till en metafor för att belysa varför det blivit så.

© Studentlitteratur

Om man ber en person resa sig ur en stol och någon frågar om vi kan garantera, att personen inte dör om han gör som han blivit ombedd, skulle exempelvis Världshälsoorganisationen, WHO, svara: *ja, det kan vi garantera, därför att den personen måste vara mycket svårt hjärtsjuk, om han skulle dö av en så bagatellartad rörelse.* Så skulle aldrig UNSCEAR svara. Här skulle svaret i stället bli: *det kan vi inte alls garantera, för den personen kan vara så hjärtsjuk, att han avlider om han reser sig ur stolen.* UNSCEARs här förmenta svar gäller inte för en enskild person (inte en personlig risk) utan vad kommittén menar är, att bland en mycket stor mängd människor kan det mycket väl hända, att någon är så hjärtsjuk att han dör bara genom att resa sig ur en stol. Men därför betraktar vi inte den vardagliga vanan att resa sig ur en stol som en risk – utom inom strålskyddet. Risken för att vi skall komma till skada är nog betydligt större om vi aldrig reser oss ur våra bekväma fåtöljer.

Som biolog är jag utomordentligt mån om, att vi kan lösa våra industriella problem på ett för människan och hennes miljö optimalt sätt. Jag är självfallet mycket medveten om att strålningen kan vara farlig. Vi kan drabbas av både cancer och andra skador. Är stråldosen tillräckligt hög är den direkt dödande. Efter Tjernobyl-olyckan har t.ex. vissa barn i Vitryssland och Ukraina fått i sig stora mängder radioaktivt jod (huvudsakligen via mjölken). På grund av detta intag har de fått höga stråldoser i sina sköldkörtlar och vi har tyvärr kunnat konstatera, att de också drabbats av en väsentligt ökad förekomst av sköldkörtelcancer. Jag ser naturligtvis lika allvarligt på detta, som alla andra som sysslar med strålningens och kärnkraftens hälsoproblem.

Men det jag här talar om är de extremt låga stråldoser, vars skaderisker är bagatellartade, mätta med våra vanliga måttstockar, men där myndigheterna ändå anser sig behöva vidta motåtgärder. Mera sällan analyserar man den fara som kan ligga i motåtgärderna. I Ukraina flyttade man en del människor från lindrigt kontaminerade områden till Kiev, utan att ta hänsyn till att cancerrisken i städer av denna storlek normalt är mer än 10–20% högre än på landsbygden. På min fråga till de ansvariga för denna evakuering om de trodde, att en sådan förflyttning verkligen skulle sänka cancerrisken, svarade man helt uppriktigt, att det hade man inte tänkt på. Vid bedömningen av risken med sådana lågdoser måste vi helt enkelt komma bort ifrån att sätta strålningen och därmed kärnkraften i särklass. På det sättet når vi aldrig en ur hälsosynpunkt optimal lösning på alla de problem vi möter, då vi skall välja ut de bästa energialternativen. Tro inte att problemen löser sig bara för att energikällan är vad vi brukar kalla förnyelsebar. Även det som i den lilla skalan kan förefalla helt harmlöst, blir i den stora skalan undantagslöst ett problem.

© Studentlitteratur

Vi kan därför inte fortsättningsvis använda helt andra bedömningsgrunder för strålrisker än för andra risker. Självfallet skall vi ta all tänkbar hänsyn till de verkliga risker, som driften av kärnkraft innebär. Men vi måste, även när det gäller denna energikälla, bortse från de icke-individuella, bagatellartade riskerna, d.v.s. de som är av samma storleksordning, som den att resa sig ur en stol, gå i en trappa, stanna inomhus några minuter per dygn, flytta från en ort till en annan etc., d.v.s. risker av en storleksordning, som samhället idag accepterar och inte sällan kräver att vi utsätter oss för. En optimal lösning på det moderna samhällets hälsoproblem kräver balans i valet av alternativ och då måste bedömningskriterierna vara identiska.

Tabell 3 Dödlighet i cancer orsakad av strålkällor, framställda av människor (enligt UNSCEAR och ICRP).

Strålkälla	Antal dödsfall i cancer i världens idag levande befolkning
Naturlig bakgrundsstrålning	30 000 000*
Radon i bostäder	16 000 000*
Medicinsk behandling och diagnos	1 600 000**
Atmosfäriska kärnvapenprov	1 500 000
Tjernobyl-olyckan	30 000
Windscale-olyckan	100
Kärnkraft	20 000
Produktion och användning av radioaktiva ämnen	4 000
Fabrikation av kärnvapen	3 000
Andra olyckor	15

* Beräknad risk per generation för en antagen medellivslängd på 50 år.

** Beräknad risk per generation för en antagen medellivslängd på 50 år. (Värdet beräknat ur UNSCEAR-uppgift för 5års-perioden fr.o.m. 1985 t.o.m. 1989 och antagandet, att den årliga, medicinska kollektivdosen är konstant.)

Uppskattat antal dödsfall i cancer bland jordens totala befolkning: ca 600 000 000. (Denna siffra är hämtad ur svenska Cancerregistret och anpassad till "World standard population".)

© Studentlitteratur

Tabell 4 Antalet dödsfall per 100 000 människor i Sverige under 1990.

Art av dödlighet	Dödsfall per 100 000 svenskar
Total dödlighet i Sverige	1 100
Cancerdödlighet i Stockholm, Göteborg och Malmö	248*
Cancerdödlighet i övriga Sverige	210*
Skillnad mellan storstad och Sverige i övrigt	38
Cancerdödlighet i Sverige på grund av ^{137}Cs från Tjernobyl	<0,5
Cancerdödlighet på grund av radon i bostäder	3–20**
Cancerdödlighet på grund av bakgrundsstrålning	25
Cancerdödlighet vid högsta tillåtliga stråldoser från de svenska kärnkraftverken	0,03
Dödligheten i Oslo vid högsta tillåtliga, svenska luftkoncentration av svaveldioxid	20

* Siffrorna är korrigerade för olikheter i kön och ålder.

** Värdena beroende på beräkningsmetoder

Observera att värdena för konsekvenserna av bestrålningar är hypotetiska och interpolerade från epidemiologiska data vid högre stråldoser. Övriga data har erhållits ur det svenska Cancerregistret och det nedersta värdet från Walter Lindberg: Den alminnelige luftforurensning i Norge, Røykskaderådet, Oslo 1968.

Gunnar Walinder är strålningsbiolog och har varit professor vid Lantbruksuniversitet i Uppsala. Han har också varit ledamot av UNSCEAR och är styrelseledamot i Miljövänner för Kärnkraft.

© Studentlitteratur

Kärnkraften som välfärdsvinst

av Björn G. Karlsson

En omfattande studie av intresse i diskussionen om *kärnkraften* har genomförts vid ämnet Energisystem vid Tekniska Högskolan i Linköping. En metod att beräkna optimal insats av olika energislag under olika förutsättningar har gjort det möjligt att mer objektivt än tidigare bestämma *kostnaderna som följd av olika politiska beslut.* Några resultat är följande:

Det går att *avveckla* kärnkraften men det blir *dyrt* (ca 100 miljarder i nuvärde. Jämför bankförlusterna).

Miljöavgifter kan mycket *effektivt* styra utvecklingen mot resurssnålare system. Miljöavgifter ger lägre systemkostnader än utsläpp och kostnader för uppkomna skador. Det är alltså en ekonomisk vinst med miljöavgifter.

Massiv elexport ger stora välfärds- och miljövinster. 40 TWh export (30% av dagens elproduktion) kan säljas. Detta motsvarar 100 TWh kolförbränning på kontinenten. Vinsten av detta är *21 miljarder kronor* (sedan alla investeringar är gjorda, vilka uppgår till ca 100 miljarder kronor eller 200 000 manårs sysselsättning. Detta skulle alltså utlandet betala.) Skillnaden mellan en massiv elexport med bibehållen kärnkraftskapacitet och en total avveckling utan effektivisering är 150 miljarder kronor. En tredjedel av exporten utgörs av det elöverskott, som vi faktiskt har idag, en tredjedel består av el från framtida kraftvärmeverk med biobränsle och resten uppnås genom effektivisering som en följd av högre priser i Sverige. Elexport leder till prisimport.

Om koldioxidskatt införs, som det har diskuterats inom EU, blir *biobränslen* i kommunala kraftvärmeverk mycket lönsamma, om man samtidigt får en fri elmarknad. Vi har nämligen tre unika förutsättningar i Sverige:

- stort fjärrvärmeunderlag
- samtidiga behov av värme och el på vintern
- en stor biobränslepotential.

© Studentlitteratur

Detta ska tävla med nya kolkondensanläggningar med endast 40% verkningsgrad (resten kyls bort i kyltorn).

Idag använder vi 2,5 gånger så mycket elenergi per person som i västra Tyskland och priset är ungefär hälften. Vid en fri elmarknad måste vi närma oss samma nivåer i Sverige med mycket högre priser och en kraftfull effektivisering av användningen.

Bakgrund

Elmarknaden i Sverige genomgår en omvälvande förändringsprocess. Flera aktörer tillåts komma in och konkurrera om kunder, transitering tillåts och koncessioner kommer att brytas upp. Kortsiktigt kommer detta att innebära en konkurrens, som bör leda till lägre priser för konsumenterna. En nackdel i detta sammanhang är att större avtal, t.ex. mellan elleverantörer och större industrikunder, blir hemliga.

Parallellt med detta öppnande av den svenska elmarknaden följer också möjligheter för svenska kraftproducenter att sälja kraft till kontinenten, via Baltic Cable, och denna första kabels troliga efterföljare (ca 10 stycken). För den kraft som säljs till kontinenten ligger försäljningspriset på ungefär samma nivå som priset för ny kolkondenskraft. Denna kommer alltid att ligga på marginalen (såväl sommar som vinter). Eftersom priset för försäljning utomlands är högre än det inhemska priset kommer elprisnivån i Sverige att stiga för att i takt med kabelutbyggnaden närma sig t.ex. tyska elpriser (d.v.s. en fördubbling) oavsett vad vi gör med kärnkraften i Sverige. Idag bestäms prisnivån inom EU av nya anläggningar. Vid en svensk avveckling måste vi bygga samma sorts anläggningar här vilket leder till samma elpris på sikt.

Metod och resultat

Enkelt uttryckt stoppar vi in alla möjligheter i form av investeringar och drift utan "värderingar" i en simulerande datormodell. Av detta sammelsurium av möjligheter presenteras den kombination av åtgärder som blir bäst och billigast i längden. Vi använder en optimerande modell för att analysera

© Studentlitteratur

det svenska elsystemet under en tjugofem-årsperiod med 6% realränta. Modellen väljer alltså den kombination av produktion och effektivisering, som ger lägst total systemkostnad (nuvärde).

Minskad elanvändning är ett konkurrenskraftigt alternativ till ny elproduktion, särskilt vid brist på produktionskapacitet i systemet. Denna brist kan orsakas av ett ökat elbehov, avveckling av kärnkraft eller en stor efterfrågan på svensk elenergi från kontinenten. Vinsten av användaråtgärder i dagens system är 6 miljarder kronor i nuvärde. Vid en effekt-/energibrist på 4 300 MW reaktorkapacitet som en följd av en eventuell avveckling, stiger vinsten med användaråtgärder till 41 miljarder kronor. Alternativet i detta fall är en massiv utbyggnad av ny elproduktion eller import från kontinenten.

Elenergi kan bli en stor svensk exportvara. Vi har jämförelsevis billig produktion och dessutom miljöfördelar. Om EU beslutar om miljöavgifter på CO_2 i elproduktionen, kommer dessa fördelar att bli ännu större. Med enbart Baltic Cable blir elexporten drygt 4 TWh och importen försumbar. Värdet är 8 miljarder kronor i nuvärde. Med flera kablar (kapacitet 10 GW) blir exportmöjligheterna mycket större, 40 TWh i ett fall med miljöavgifter. Detta kräver då bibehållen kärnkraftskapacitet och en samtidig satsning på åtgärder för att minska elanvändningen hos de svenska elkunderna. Värdet av detta är då 21 miljarder kronor i nuvärde (d.v.s. "nettovinst" efter alla investeringar). Behovet av reservkraft kan också minska radikalt, om kablarna byggs.

Med användaråtgärder minskar miljöbelastningen (mätt som CO_2). En kombination av CO_2-avgifter och användaråtgärder ger en radikalt sänkt miljöbelastning även vid stor kapacitetsbrist i elproduktionen. Idag släpper vi totalt ut ungefär 60 miljoner ton CO_2 (inklusive trafik m.m.). Elexporten, producerad utan emission av CO_2 motsvarar en minskning på kontinenten av 30 miljoner ton. Svenska kraftvärmeverk med ca 90% verkningsgrad och 0% CO_2 kommer att konkurrera med kontinentala kolkondensverk med 40% verkningsgrad och 100% CO_2.

Kostnaden för en fullständig kärnkraftsavveckling blir 124 miljarder kronor i nuvärde. Denna kostnad kan reduceras till 69 miljarder genom effektivisering, laststyrning, konvertering till bränslen och egen elproduktion hos användarna. Att avveckla 2 700 MW reaktorkapacitet kostar 25 miljarder i nuvärde utan användaråtgärder. Med användaråtgärder blir systemet istället billigare. Dagens system är 4 miljarder kronor dyrare än att avveckla 2 700 MW och samtidigt tillämpa användaråtgärder. Resultatet förutsätter då att ingen elexport är möjlig.

Huvudsyftet med studien är varken att argumentera för en kostnadseffektiv avveckling av kärnkraften eller för en massiv elexport utan att visa på

© Studentlitteratur

möjligheter att med moderna analyshjälpmedel studera stora komplexa system. Att försöka hålla reda på tusentals olika villkor och resonemangsvis komma fram till robusta lösningar är omöjligt. Det torde mera styras av åsikter än insikter.

Industrin uttrycker ofta sin syn på kärnkraftsavvecklingen, som om den är omöjlig, medan miljörörelsens syn är att kostnaden är försumbar. Resultatet av vår studie är att det är *möjligt men dyrt* och ställt i relation till allmän resursbrist i samhället är kostnaden signifikant.

Om avvecklingens pris/kostnad upplevs av en majoritet som värd att ta p.g.a. verkliga eller förmodade risker ska avvecklingen naturligtvis accepteras. Om man ska se till största kostnads- och miljöeffektivitet borde vi nog exportera elen i den utsträckning som skissats ovan. Dessutom kan man fråga sig om det är de som röstade 1980, som ska bestämma vad som ska gälla nu och i framtiden eller vi som har rösträtt nu eller ännu hellre 2010, som ska påverka utvecklingen. Den nuvarande mer eller mindre officiella ståndpunkten tycks vara att varken avveckla och bli av med eventuella risker eller att utnyttja kraftverken så kostnads- och miljömässigt effektivt som möjligt. Det tycks föresväva inte minst politikerna att det bästa är att slösa bort strömmen i någon vag uppfattning att det stärker svensk industris konkurrenskraft. Logiskt vore då att vi behöll exempelvis svenskt stål inom landet till fromma för svensk industriell förädling till exempelvis bilar. Detta upplevs som absurt men högsta visdom för produkten el.

Detta är några slutsatser som kan dras av rapporten "Fri elmarknad – produktion, hushållning och EG" från Tekniska Högskolan i Linköping, avdelningen Energisystem.

Björn G. Karlsson är Professor i Energisystem vid Tekniska Högskolan i Linköping.

© Studentlitteratur

Kärnkraft i världen årsskiftet 1993/94

Land	Reaktorer i drift	Under byggnad	Andel i % av total elprod	Anm
Kanada	22		17	
USA	109	2	21	
Argentina	2	1	14	
Brasilien	1	1	0,2	
Cuba		2		
Mexico	1	1	3	
Belgien	7		59	
Finland	4		32	
Frankrike	57	4	78	
Nederländerna	2		5	
Schweiz	5		38	
Spanien	9		36	
Storbritannien	35	1	28	
Sverige	12		42	Normalår ca 50 %
Tyskland	21		30	
Sydafrika	2		5	
Bulgarien	6		37	
Kazakstan	1		0,5	
Litauen	2		87	
Rumänien		5		
Ryssland	29	4	13	
Slovakien	4	4	54	
Slovenien	1		43	
Tjeckien	4	2	29	
Ukraina	15	6	33	
Ungern	4		43	
Indien	9	5	2	
Japan	48	6	30	
Kina	2	1	0,3	
Nordkorea		2		
Pakistan	1	1	1	
Sydkorea	9	7	40	
Taiwan	6		35	
Världen	430	55	17	

Källa: KSU. Bakgrund nr 2/94

© Studentlitteratur

Kärnkraft i Sverige

Sverige har totalt 12 reaktorer, som försörjer halva landet med el.

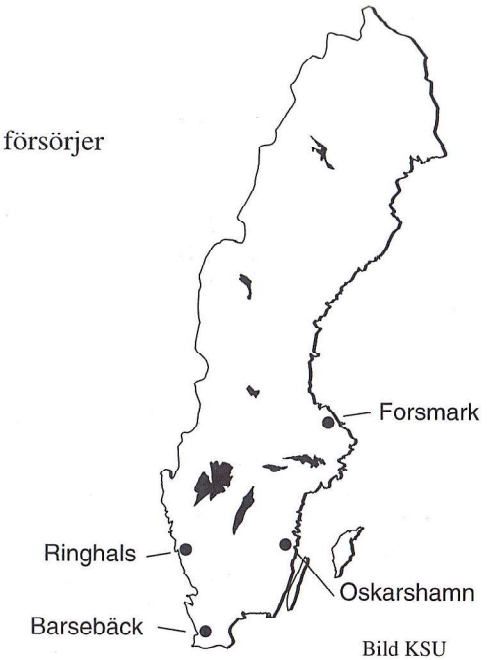


Bild KSU

Kraftverk	MW	Typ	Startår	Tillstånd
Barsebäck 1	615	BWR	1975	Obegränsat
Barsebäck 2	615	BWR	1977	2010
Forsmark 1	1 006	BWR	1981	2010
Forsmark 2	1 006	BWR	1981	2010
Forsmark 3	1 200	BWR	1985	2010
Oskarshamn 1	465	BWR	1972	Obegränsat
Oskarshamn 2	630	BWR	1975	Obegränsat
Oskarshamn 3	1 205	BWR	1985	2010
Ringhals 1	825	BWR	1976	Obegränsat
Ringhals 2	915	PWR	1975	1995
Ringhals 3	960	PWR	1981	2010
Ringhals 4	960	PWR	1983	2010
Totalt	10 402			

Av dessa är 9 reaktorer svenska ABB kokvattenreaktorer (BWR). Tre reaktorer (Ringhals 2, 3 och 4) är amerikanska Westinghouse tryckvattenreaktorer (PWR).

© Studentlitteratur

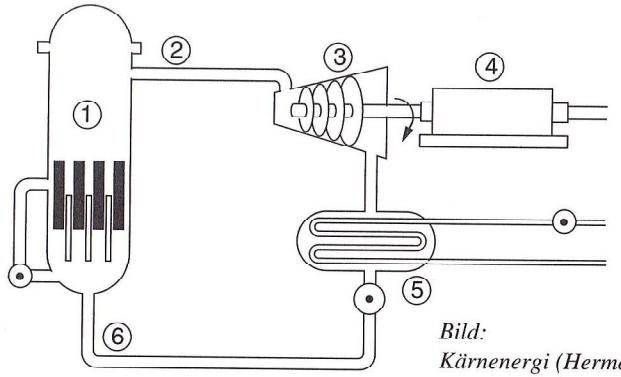


Bild:
Kärnenergi (Hermods Konsult)

I kokvattenreaktorn kokas vatten i reaktortanken (1) under högt tryck till ånga. Ångan går ut via ångledningar (2) och driver runt turbinerna (3) och generatorn (4), som i sin tur alstrar elektrisk ström. Ångan fortsätter till kondensorn (5), där havsvatten kyler ångan, som då kondenserar till vatten, som sedan pumpas tillbaka till reaktorn (6). Eftersom radioaktiva ämnen följer med ångan, ställs särskilda strålskyddskrav i turbinanläggningen under drift. När reaktorn stoppas, har denna aktivitet klingat av efter någon minut.

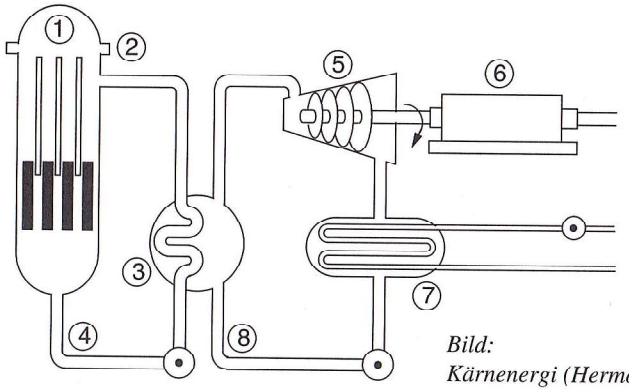


Bild:
Kärnenergi (Hermods Konsult)

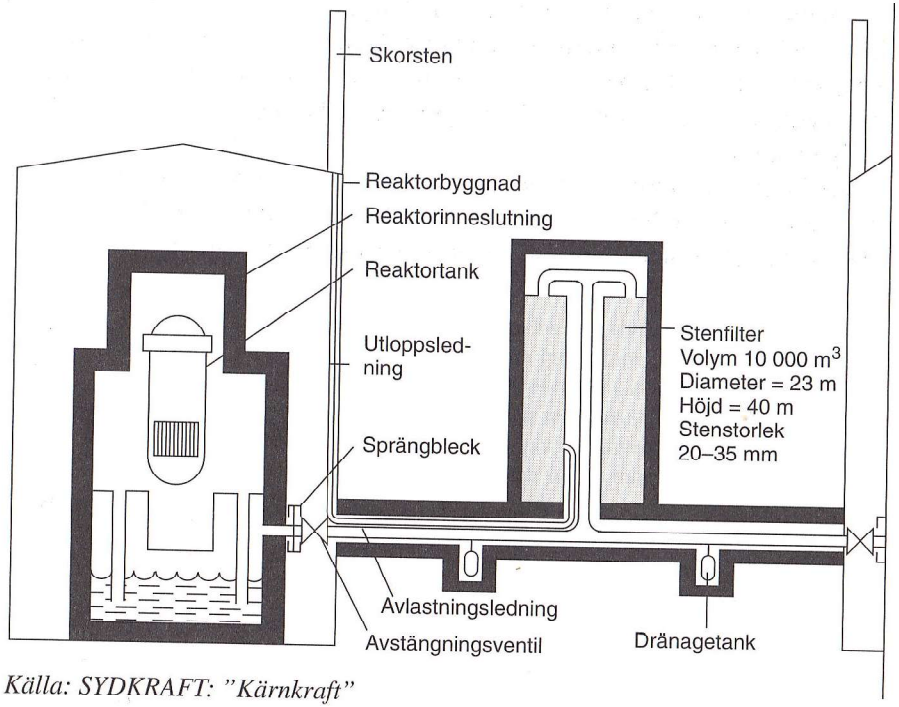
I tryckvattenreaktorn råder så högt tryck, att vattnet i reaktorn (1) inte kokar. Hetvatten går ut (2) i en primärkrets, strömmar igenom ånggeneratorer (3) och pumpas sedan tillbaka till reaktorn (4). Vatten i ånggeneratorn (3) värms upp till kokning av hetvattnet från reaktorn och ånga går ut till turbinerna (5) i en sekundärkrets. Ångan kondenseras (7) och kondensatet återförs till ånggeneratorn (8). Eftersom radioaktiva ämnen inte kan föras över från primärkretsen till sekundärkretsen, krävs inga speciella strålskyddsanordningar i turbinanläggningen.

© Studentlitteratur

Kärnbränslet består av låganrikat uran (ca 3% U-235) fördelat på ett stort antal bränsleelement. Snabba neutroner bromsas in genom kollisioner med vätekärnor i reaktorvattnet, så att de kan fångas in av U-235-kärnor, som då klyvs. Klyvningsprodukterna bromsas i bränslet, som värms upp av friktionen och i sin tur värmer vattnet i reaktorn. Vid varje kärnklyvning frigörs nya neutroner, som i sin tur klyver ytterligare kärnor. På så vis erhålls en kedjereaktion.

Reaktorn kan stoppas och effekten regleras med hjälp av styrstavar, som kan skjutas in mellan bränsleelementen. Styrstavarna innehåller bor, som absorberar neutroner och på så vis förhindrar kärnklyvningar.

© Studentlitteratur



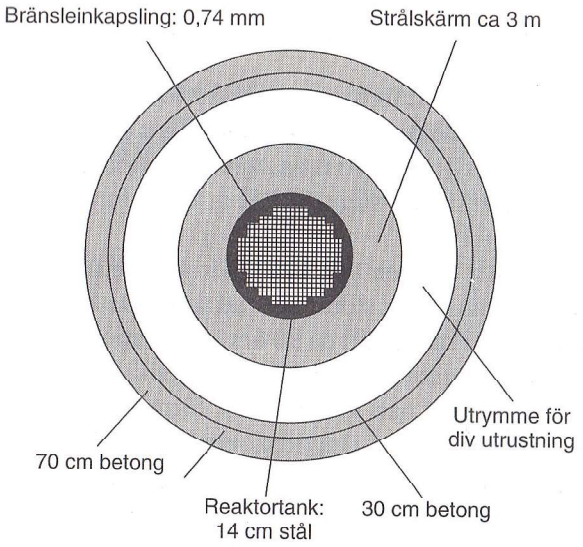
Källa: SYDKRAFT: "Kärnkraft"

Förutom en lång rad förebyggande säkerhetssystem, som är automatiska, dubblerade, separerade och diversifierade har samtliga svenska reaktorer en trycktålig inneslutning, som isolerar själva reaktorn från omvärlden. Inneslutningen har en stor bottenbassäng, som kan ta emot och kyla reaktorhärden vid ett mycket osannolikt haveri, som leder till överhettning och nedsmältning.

Om vattnet i bassängen värms upp till kokning med ökande tryck som följd, avlastas inneslutningen automatiskt via ett sprängbleck till en filterbyggnad, där ånga kondenseras till vatten, som i sin tur stannar i filterbyggnaden. På så vis förhindras radioaktiva utsläpp, som kan skada omgivningen. Bottenbassäng och filter behöver inte kunna "starta" eller "fungera" utan är helt passiva system, som styrs av naturlagar.

På bilden ovan visas Barsebäcksverkets stenfilter. Övriga kraftverks filter har en annan konstruktion men samma funktion.

© Studentlitteratur



Reaktorinneslutning i genomskärning.
Källa: SYDKRAFT: "Kärnkraft"

© Studentlitteratur

Urantillgångar

Tillgången på uran har varit fortsatt god under 1993, vilket bl.a. återspeglar sig i låga uranpriser. Priset för köp med omedelbar leverans var vid årsskiftet 1993/94 ca 155 kronor per kilo uran, vilket är något mer än vid förra årsskiftet eftersom dollarkursen stigit. Priset är dock fortfarande mycket lågt historiskt sett.

Uranproduktionen i världen var 1993, för nionde året i rad, mindre än konsumtionen. Det finns dock stora lager att ta av. De kända tillgångarna av uran är också stora. De räcker till ca 90 års konsumtion på nuvarande nivå.

För konvertering, anrikning och kärnbränsletillverkning finns god tillgång på kapacitet. SKB har under 1993 förmedlat anrikat uran åt de svenska kraftföretagen, inom långtidskontraktet mellan SKB och Techsnabexport i Ryssland.

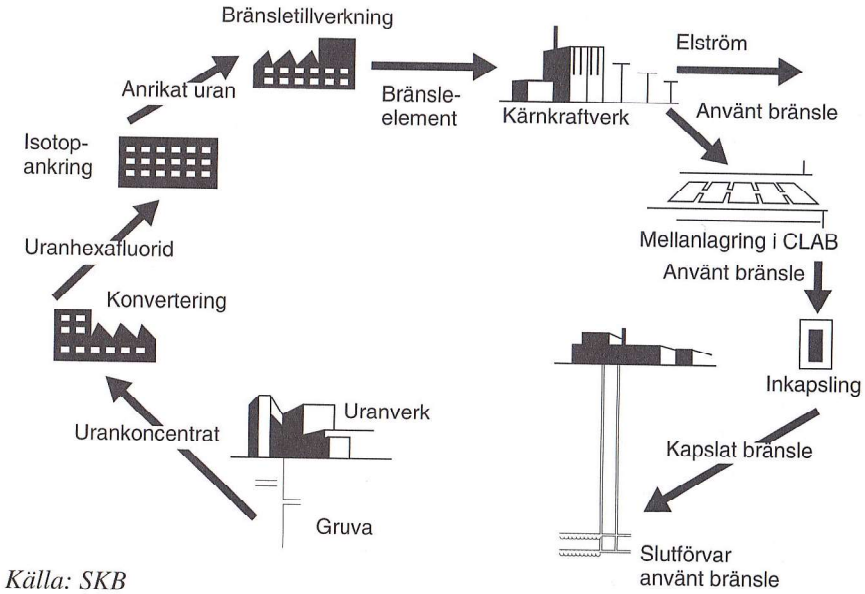
Kostnaderna för kärnbränsle varierar givetvis med de kommersiella villkoren i olika kontrakt och därmed också för olika kraftföretag. Under 1993 har kostnaden för färdigt kärnbränsle i Sverige i medeltal uppgått till 2,8 öre/kWh. Kostnaderna fördelas på följande sätt:

Natururan	0,8 öre/kWh
Konvertering	0,1 öre/kWh
Anrikning	0,9 öre/kWh
Kärnbränsletillverkning	0,9 öre/kWh
Beredskapslager	0,1 öre/kWh
Summa	2,8 öre/kWh

Ur Svensk Kärnbränslehantering AB: Verksamheten 1993.

© Studentlitteratur

Kärnbränslecykeln

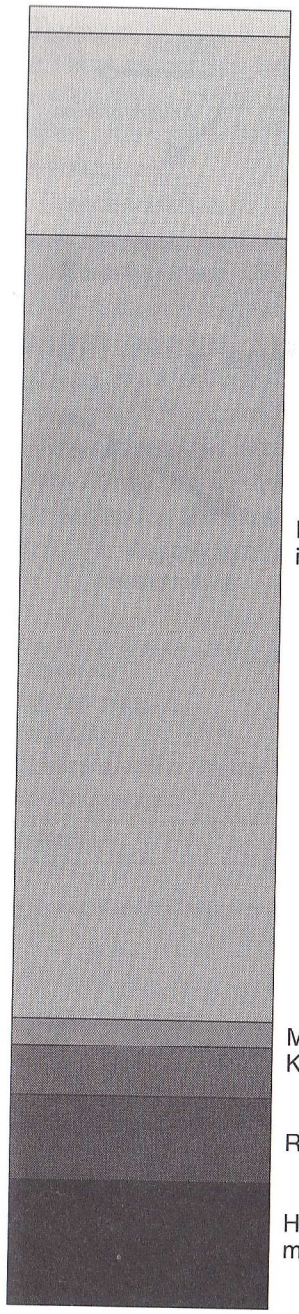


Källa: SKB

© Studentlitteratur

Strålkällor i miljön

(Genomsnittsvärde per svensk)



Övrigt 0,1 mSv

Sjukvård 0,8 mSv

Kärnvapen	0,01
Industri	0,01
Kärnkraft	0,002
Annat	0,07

Radon inomhus 3,0 mSv

Några exempel på yrkesdoser	
Gruvarbetare	20,0 mSv
Piloter	7,0 mS
Kärnkraftpersonal	2,5 mSv

Mat 0,1 mSv

Kroppen 0,2 mSv

Rymden 0,3 mSv

Hus och mark 0,5 mSv

1 sievert (Sv) = 1 joule/kg kroppsvikt.
Av praktiska skäl används normalt millisievert (mSv)

© Studentlitteratur