

Hans Pedersen Dambo (red.)

## Kärnkraft ur olika perspektiv

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

Kärnkraftdebatten som har pågått i ett par decennier har på nytt aktualiserats i samband med Energikommisionens arbete. Tyvärr har vi inte kunnat se någon förnyelse i debatten utan det är i stort sett samma låsningar och argument i dag som vid tiden för folkomröstningen 1980.

Den ideella föreningen "Miljövänner för Kärnkraft" gav 1995 ut skriften "Kärnkraft – avveckla eller utveckla?" och tar nu upp några aspekter i energifrågan som hamnat i skymundan i debatten.

Därför ägnas uppmärksamhet åt etiska synpunkter på valet av energikälla och kärnkraftens betydelse för en god hälsa, miljö och social välfärd. En historisk återblick görs och den senaste utvecklingen inom fission och fusion behandlas ingående.

Ett avsnitt diskuterar riskbedömningar, ett annat tar upp några fakta som inte är allmänt kända och avslutningsvis ges en förklaring av olika mått och enheter som ofta hörs i debatten.

Miljövänner för Kärnkraft

Box 83

430 24 Väröbacka

Tel 0340-782 90

E-post mfk@sbbs.se

www-adress

<http://www.sbbs.se/com/home/dambo/mfk.html/>

Art.nr 6234

ISBN 91-44-00070-7



9 789144 000701

 Studentlitteratur

Hans Pedersen Dambo (red.)

# Kärnkraft ur olika perspektiv

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft



???

*Risk*

*Etik*

*Miljö*

*Hälsa*

*Arbete*

*Välfärd*

 Studentlitteratur

Hans Pedersen Dambo (red.)

# Kärnkraft ur olika perspektiv

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

# Om det fanns ...

*Carl-Erik Fröberg*

Om det fanns ett kärnkraftverk i närheten  
skulle vi kunna få värme och ljus  
och kraft till trådbussar och tåg,  
utan att skada miljön,  
utan att förstöra fler älvar,  
utan att döda sjöfågel och sälar  
genom ständiga tankbåtshaverier.  
Koldioxidtaket skulle vi nog också kunna sänka.

Om det fanns fler reaktorfysiker  
med kunskap om modern teknologi,  
som utan hinder av regeringen  
kunde bedriva forskning,  
så skulle vi ta itu med saken  
från den teoretiska sidan,  
och från den experimentella sidan,  
eftersom problemet kräver bådadera

Om vi hade politiker med insikt  
och byråkrater med förnuft,  
om etermedia och tidningar förmedlade sanningen  
utan några vinklingar,  
så skulle vi kunna fatta kloka beslut  
till gagn för det här landet.

Om vi hade litet anrikt uran,  
tungt vatten eller lätt vatten,  
styrstavar och moderatormaterial,  
så skulle vi nog kunna få fram några neutroner  
så att fissionen kom i gång.

Men nu har vi dåligt med insiktsfulla politiker  
och med förnuftiga byråkrater,  
etermedias rapportering är skev  
och reaktorfysikerna håller på att flytta utomlands.  
Forskningen är förbjuden  
och koldioxiden bara ökar,  
älvarna byggs ut till sista forsén.  
Energiskogen breder ut sig,  
tar död på det öppna landskapet,  
blommorna försvinner och fåglarna tystnar.  
Lite maskrosor och kråkor  
skulle vi väl annars kunna kosta på oss.

*Denna dikt som är helt orimlig har en förebild, nämligen Karl Vennbergs opus "Om det fanns telefon" vilken ingår i samlingen "Halmfackla". Det är en mycket mörk dikt som tillkom under kriget. Den skildrar fasorna på slagfältet och har ett tidlöst humanistiskt budskap. Jag hoppas nu att denna framställningsform skall förmedla den känsla av maktlöshet som vi upplever gentemot somliga politiker och s.k. experter, om än på ett trivialare plan. Kanske kommer läsaren rentav att tänka på Kafkas romaner "Slottet" och "Processen". Det är emellertid vår förhoppning att resten av uppsatserna i detta häfte skall förmedla en mer optimistisk stämning. Trots all politisk enfald och trots all okunnighet som florerar i massmedia tycker vi oss känna att sanningen är på väg!*

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

## En etik som talar för användning av kärnkraft

*Lars Persson*

Filosofen Kants kategoriska imperativ för den enskilda människans handlande lyder: "Handla så att du också kan vilja att din maxim blir allmän lag". I bibeln får vi också goda råd i vårt mänskliga handlande: "Allt vad ni vill att människorna skall göra er skall ni också göra dem" är en huvudregel.

Den framstående moralfilosofen Hans Jonas (1903–1993) har i ett utkast till en etik för den teknologiska civilisationen under boktiteln Ansvarets princip (utgiven på svenska av bokförlaget Daidalos, 1994) framlagt följande nya imperativ som passar till den nya typen av mänskligt handlande och är riktat till handlingssubjekt som stater och industrier i världen: "Handla så att verkningarna av din handling är förenliga med bevarandet av äkta mänskligt liv på jorden" eller negativt uttryckt "Handla så att verkningarna av din handling inte är destruktiva för den framtida möjligheten till sådant liv" eller helt enkelt "Äventyra inte villkoren för mänsklighetens indefinita fortbestånd på jorden" eller åter positivt: "Inbegrip i ditt nutida val människans framtida integritet såsom ett av föremålen för din vilja". Kort sagt "Vi får inte spela tärning om människans framtid".

I rapporten kallad "Sweden's National Report under the United Nations Framework Convention on Climate Change" från Miljödepartementet år 1994 ges en omfattande översikt av sårbarheten i Sverige för en klimatförändring orsakad av växthuseffekten. Effekterna på ekosystem, näringar och hälsa redovisas. Nästan alla effekter är negativa. Man säger bl.a. "Om klimatförändringarna på sikt skulle leda till en förändring i havsströmmarnas värmetransport skulle konsekvenserna kunna bli katastrofala för alla klimatberoende ekosystem och näringar i Skandinavien". Detta tycks mig verkligen vara ett tärningsspel om vår framtida överlevnad i Sverige och måste på allt sätt förhindras.

Med användning av Hans Jonas nya imperativ skall vi alltså försiktigtvis avhålla oss från att förstöra atmosfären genom ökade utsläpp av växthusgaser t.ex. koldioxid och liknande från fossila bränslen. Utsläpp av gaser som skadar det mot ultraviolett strålning skyddande ozonskiktet i övre

atmosfären har redan förbjudits. Vi bör också motverka kärnavapnen som vid en total användning skulle kunna ge upphov till den så kallade nukleära vintern som kunde innebära slutet för äkta mänskligt liv på jorden.

Däremot synes inte användningen av kärnkraft för elproduktion strida mot Hans Jonas nya imperativ. Som vi ser det idag inom strålskyddsområdet hotar inte en kärnkraftskatastrof som Tjernobylyolyckan människans framtida existens. Även en kraftigt utökad användning av kärnkraft leder inte till att vi spelar tärning om människans framtid. Kärnkraftens normala utsläpp av radioaktiva ämnen är inte hotande mot miljö och hälsa utan betydligt mindre skadliga än jämförbara utsläpp från kol, olja, torv, naturgas och även från förbränning av trä (biomassa).

Att i Sverige ersätta miljö- och hälsovänlig kärnkraft med klimatförstörande bränslen som kol, naturgas, gas, olja eller torv strider därför mot Hans Jonas nya imperativ. Utnyttjandet av biomassa är däremot tillåtet enligt Hans Jonas etiska princip. Visserligen torde en utökad användning av biomassa i Sverige kunna skada vår hälsa genom utsläpp av cancerbildande kemiska ämnen men en utökad förbränning av biomassa hotar inte alls vår framtida existens om biomassan tas ur den årliga tillväxten i våra skogar eller på våra åkrar. Någon teknisk möjlighet att ersätta hela kärnkraften med biomassa finns dock inte i Sverige. Biomassa är att se som ett komplement till kärnkraft och vattenkraft för elproduktion i en framtid som använder mera el enligt de prognoser som årligen görs av den ansvariga statliga myndigheten inom energiområdet Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

En riklig tillgång av billig elenergi är en grundförutsättning för social välfärd, hög levnadsstandard, industriproduktion och kommunikationer. I utvecklingsländerna kommer energibehovet med mycket stor sannolikhet att öka drastiskt. OECD:s energiorgan IEA räknar med en ökning av den globala elanvändningen fram till år 2010 på hela 75 procent.

Från det material som finns här på IAEA i Wien och som framläggs årligen för medlemsstaterna om kärnsäkerheten i världen, synes det rimligt att man med stor varsamhet kan använda kärntechniken för elproduktion i länder med högt tekniskt kunnande. Sverige synes efter nära 35 års användning av kärnkraft för elproduktion och drygt 40 år med reaktorer utan olyckor kunna vara ett sådant land.

Liksom man inom flygtekniken under detta sekel har lyckats utveckla säkra flygplan, har man inte slagit sig till ro inom kärntechniken utan utvecklar och bygger nya säkra reaktorer. Många tekniska och fysikaliska fakta tyder idag på att man kan bygga mycket säkra reaktorer med utnyttjande av avancerad teknik för elproduktion.

I Japan har man byggt två avancerade kokarvattenreaktorer av ett utförande som är snarlikt de svenska reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3. Den första av dessa reaktorer har tagits i drift i januari 1996 och de har en effekt av 1350 MW vardera, vilket innebär lika mycket el per aggregat som man får från en utbyggd, stor Norrlandsälv. Man planerar också börja bygga två avancerade tryckvattenreaktorer med en effekt av 1420 MW vardera.

Vid IAEA har man kommit långt i arbetet på en internationell konvention för kärnavfallshantering, bl.a. utgående från de grundprinciper som nyligen fastlagts av atomenergiorganets styrelse. Vidare arbetar man inom IAEA med försäkringsskyddet för tredje man vid reaktorolyckor. En konvention för kärnsäkerhet antogs under 1994 i Wien och vidare godkände IAEA:s styrelse 1994 internationella strålskyddsregler. Man är således på väg mot en global harmonisering av kärnsäkerheten under IAEA:s ledning.

De jämförande studier om kärnkraft och andra energislag ur hälso- och miljösynpunkt som gjorts i världen bl.a. här på IAEA visar att kärnkraften är fördelaktig. Antalet stora olyckor med kärnkraft har varit få och inverkan av kärnkraften på hälsa och miljö är ringa.

Kärnkraften är idag en stor tillgång för Sverige bl.a. ur hälso- och miljösynpunkt och ny säker kärnkraft bör därför kunna byggas i vårt land när så behövs ur elförsörjningssynpunkt. En försiktig användning av säker kärnkraft synes mig vara moraliskt ansvarsfullt i framtiden i Sverige.

Den romersk-katolska kyrkan har med utgångspunkt från nuvarande kunskaper och efter en etisk analys kommit fram till att utnyttjandet av den fredliga kärnkraften är tillräddig. Denna ståndpunkt har bl.a. redovisats vid IAEA:s årliga generalkonferenser i Wien. Den s.k. Romklubben och FN-kommissionen som studerade möjligheterna för en hållbar utveckling (Brundtlandkommissionen) räknar också in kärnkraften som en del av den framtida energiförsörjningen.

Enligt min mening har kärnkraftsmotståndarna inte trovärdighet när de undviker att ställa olika energislags hälso- och miljörisker mot varandra. Att utan analys förkasta kärnkraften är som att stoppa huvudet i säcken inför verkligheten. Att bara säga att kärnkraften är farlig utan att se att de fossila bränslen som idag är huvudalternativen till kärnkraft är mera miljö- och hälsoskadliga och att de även kan hota människans framtida existens är ansvarslost.

Hans Jonas nya imperativ "Att inte spela tärning om framtiden" talar enligt min mening emot en utökad användning i Sverige av naturgas, kol, olja och torv men för en ökad användning av ny säker kärnkraft, biomassa, vindkraft och solceller. Vattenkraften har vi ju av miljöskäl (omsorg om de

outbyggda älvarnas ekosystem) av sagt oss att bygga ut men däremot kan den effektiviseras med modern teknik och således ge ett tillskott för det ökande, framtida elbehovet i Sverige.

*Byråchef, fil. dr Lars Persson är strålskyddsexpert och verksam vid avdelningen för kärnsäkerhet vid FN:s internationella atomenergiorgan – IAEA – i Wien.*

## Kärnkraft och välfärd

*John Takman*

Sol, vind och energiskog kan inte få någon avsevärd betydelse för elförsörjningen i Sverige under den tid som nu kan överblickas. En utbyggnad av de återstående norrlandsälvarna skulle inte rädda situationen. Enligt betänkandet om vattenkraftutbyggnad i norra Norrland (SOU 1976:28) skulle en utbyggnad av Kalixälvens samtliga sjutton fall ge en effekt på 850 MW (megawatt). Utbyggnaden skulle få katastrofala följder för de renskötande samerna och samekulturen. Minst två av de viktigaste samebyarna skulle bli uttraderade. Andra mycket allvarliga följder är allmänt kända. Och man bör hålla i minnet att en fullständig utbyggnad av Kalixälven endast skulle ge samma elektriska effekt som den minsta av de fyra reaktorerna i Ringhals.

Det är inte sant, som det ofta påstås i debatten här, att "kärnkraften är på väg ut". Åtminstone 109 kärnreaktorer är antingen under byggnad eller definitivt planerade. Av de 439 som nu är i gång togs 8 i drift 1994, därav två i Kina, fyra i Japan, en i Sydkorea och en i Mexico samt under 1995 ytterligare 7 reaktorer i Storbritannien, Armenien, Ukraina, Japan, Sydkorea och Indien. Taiwan, för att ta ett exempel, har sex reaktorer i drift och ska börja bygga ytterligare två. Många länder saknar vattenkraft och egna tillgångar på fossila bränslen. För att bli självförsörjande på el är kärnkraft för dem det enda realistiska alternativet.

Sverige är lyckligt lottat. Vi får nu nästan hälften av den el vi förbrukar från vattenkraften och mer än hälften från kärnkraften. Vi kan köra kärnkraften på sommaren och låta vattenmagasinen fyllas för vinterns behov. Under vattenrika år med en mycket större vattenkraftproduktion än normalårsproduktionen kan Sverige vara nettoexportland. El skulle faktiskt kunna bli landets viktigaste och mest inkomstbringande exportvara.

Men vi kan nöja oss med att diskutera nuläget och den s.k. överproduktion av el som man i vissa kretsar talar om och upprörs över i stället för att tacksamt notera det förutseende den vittnar om. Under år 1994 producerades i Sverige 137,7 TWh el, fördelad på 70,2 TWh kärnkraft, 57,9 TWh vattenkraft och 9,5 TWh övrigt, främst industrimottryck och kraftvärme.

Det räckte inte helt. Export av 6,4 TWh och import av 6,7 TWh blev en nettoimport på 0,3 TWh.

När man läser och lyssnar till dem som agiterar för en avveckling av kärnkraften får man ett intryck av att terawattimmarna är utsmetade i ett jämntjockt lager över hela året och att 20 eller 30 TWh kan sparas utan märkbara följder. Så enkelt är det ju inte. De väldiga svängningarna i behovet av el är viktigare än antalet terawattimmar för hela året.

Den högsta medeleffekten under en timme 1994 var 24 400 MW och den lägsta 7 400 MW. Under industrisemestern i juli kan effektbehovet gå ner till en fjärdedel av vad som krävs för att hålla industrin i gång och förse hushåll, kontor, sjukhus, skolor, livsmedelsbutiker, järnvägar, tunnelbanor, hissar i höghus, minst 36 000 mjölkmaskiner, minst en miljon persondatorer etc med nödvändig el under vinterns kallaste arbetsdagar. Ett utvecklat industrilands elförsörjningssystem som inte klarar toppbelastningarna är programmerat för katastrofala konsekvenser.

En avveckling av två av de mindre reaktorerna skulle betyda ett bortfall av 10 TWh om året. Allvarigare är att den skulle medföra ett effektbortfall av 1 400 MW och därmed bidra till elransonering eller blackout för delar av landet när de första kalla arbetsdagarna kommer. Redan nu – med vattenkraften sparad till vintern tack vare kärnkraftselen under sommarmånaderna – måste man under den första mycket kalla arbetsveckan köra allt vad Sverige har av kärnkraft, vattenkraft och annars avställda oljepannor och kolpannor. Under 1994 då en reaktor var avstängd för reovering och det blev ett tillfälligt stopp för två reaktorer importerade Sverige el från koleldade kraftverk i Tyskland, Finland och Danmark.

Kunskaperna om olika energislags nackdelar, risker och skadeverkningar har avsevärt ökat sedan 1976 års energikommission lade fram sina betänkanden och kärnkraftsomröstningen ägde rum 1980. Växthuseffekten och försurningens mycket allvarliga följder är allmänt kända.

Även om man bortser från den globala nedsmutsningen med alla andra ämnen vid förbränning av kol och olja är den ofantliga mängden koldioxid en tankeställare. Varje TWh (miljard kilowattimmar) elektricitet som produceras med kol resulterar i en miljon ton koldioxid. Genom att producera drygt 72 TWh el med kärnkraft 1994 undvek Sverige att belasta den globala miljön med 72 miljoner ton koldioxid. Genom att 2 000 terawattimmar el om året nu produceras med kärnkraft i många länder undviks en belastning av den globala miljön med *två miljarder ton* koldioxid, som det skulle bli om samma mängd el producerades med kol.

Statens strålskyddsinstitut beräknade 1979 att den genomsnittliga radon-dotterkoncentrationen på 53 Bq (becquerel) per kubikmeter luft i våra

bostäder kunde komma att medföra mellan 300 och 3 000 lungcancerfall i Sverige varje år med 1 100 fall som mest sannolika värde.

Energisparkampanjerna har hittills minskat den ökning i elförbrukningen som annars varit ofrånkomlig. Men de har samtidigt medfört en ökning av antalet dåligt ventilerade och hälsovådliga bostäder och skolor. Radonet som var vårt verkligt stora och allvarliga strålningsproblem har blivit ett ännu allvarligare problem.

Den allergiutredning som leddes av LOs förre ordförande Gunnar Nilsson betonade i sina betänkanden (SOU 1989:76–77) vikten av renare luft i våra bostäder, daghem etc. Även om vi är sparsamma med elen krävs *mera el* för att ge oss bättre luft inomhus och därmed förbättra folkhälsan. Ett modernt industriland som Sverige kan inte existera och utvecklas utan en säker och god tillgång till billig el. U-länderna kan inte lyfta sig ur den misär som majoriteten av folket lever i utan tillgång till billig el.

För de utvecklade industriländerna betydde elektrifieringen – och rationaliseringen och mekaniseringen av hushållsarbetet – en frigörelse för kvinnorna ur hemmets slaveri. Den betydde en revolutionerande förbättring av kroppsarbetarnas arbete och levnadsvillkor. Men den överväldigande majoriteten av världens befolkning kämpar alltjämt för att få så elementära förutsättningar för ett normalt modernt liv som elektriskt ljus, kylskåp och – i tropiska länder – luftkonditionering utgör.

För mig är elförsörjningen framför allt en stor och avgörande social fråga. God tillgång till billig el är en förutsättning för ett människovärdigt liv för alla och för en folkhälsa på högsta möjliga nivå. Den är en ofrånkomlig förutsättning för en god yttre och inre miljö. För Sverige och de flesta andra länder finns det inget miljövänligt och ekonomiskt acceptabelt alternativ till kärnkraften innan det blir ett genombrott för fusionskraften. Jag vill ha en rationell elförsörjning i världen och i Sverige. Jag vill behålla kärnkraften. Det skulle vara en klok politik att redan nu planera för kärnkraftens utbyggnad i vårt land.

*Med. dr John Takman har varit socialläkare vid Stockholms stads barnavårdsnämnd. Han representerade kommunisterna i Stockholms stadsfullmäktige 1955–1970 och i riksdagen 1971–1976.*

# Kärnkraft för framtiden

Bengt Å Andersson

Kärnkraften är idag en mogen teknik med olika former av tillämpning på alla jordens kontinenter. De olika stadier av utveckling som kärnteknik genomgått under ett halvsekel har lett fram till en kommersiellt och miljömässigt god teknologi som bidrar till att fylla mänsklighetens ständigt ökande behov av energi.

Den fortsatta utvecklingen styrs dock inte enbart av tekniska framsteg. I en studie från World Energy Council (WEC) om morgondagens energi sägs bland annat:

Kärnkraftens användning kommer att avgöras av om allmänhetens tveksamhet inför driftsäkerhet och avfallshantering kommer att minska. Det fordrar att tillförlitliga lösningar kan presenteras och att för allmänheten trovärdiga bedömningar om säkerheten i båda frågorna kan redovisas och accepteras.

Det finns idag inget som tyder på att dessa krav inte skulle kunna tillgodoses. För detta borgar inte minst den stränga övervakning som nationella och internationella myndigheter bedriver. Denna leder bland annat till att erfarenheter från reaktorernas drift återföres i den tekniska utvecklingen och bidrar till att kvaliteten hos anläggningarna ständigt förstärkes.

## Dagsläget är positivt

Totalt producerar kärnkraften omkring 18 procent av den elkraft som användes i världen. I Sverige och Kanada är det vattenkraften och kärnkraften som svarar för huvuddelen av elproduktionen. I resten av kärnkraftländerna är det i första hand kraftproduktion baserad på fossila bränslen som är alternativet. Dessa förhållanden påverkar naturligtvis den miljömässiga bedömningen av kärnkraften i de olika länderna.

De politiska och administrativa förhållandena kring kärnkraften varierar i än högre grad och har, framför allt i USA, en stor inverkan på kärnkraftens ekonomi.

De bedömningar av kärnkraftens framtid som nu görs får dock allt oftare positiva förtecken. Kärnkraftens framtida utveckling är emellertid en fråga som har både politiska, miljömässiga, ekonomiska och tekniska aspekter. Värderingen av dessa visar avsevärda skillnader mellan olika länder beroende på såväl politisk och kulturell bakgrund, som på tidigare erfarenheter av energiproduktion.

## Miljö och säkerhet

De olika formerna av energianvändning i samhället har en fundamental betydelse för miljön i såväl naturen som på arbetsplatserna och i våra bostäder. De senaste 20 årens allt större medvetande om betydelsen av en tjänlig miljö har påverkat och kommer framdeles, i än högre grad, att påverka vårt val av energikällor.

I en sådan jämförelse har kärnkraften en stor fördel i att helt sakna sådana avfallsprodukter som rökgaserna vid alla typer av förbränning utgör. De radioaktiva klyvningsprodukterna, som är starkt koncentrerade, och i normalfallet inkapslade i bränslet, är ur volymsynpunkt enklare att ta om hand.

Strålningen som miljörisk medför emellertid behov av system med hög tillförlitlighet för transport, behandling och lagring av det radioaktiva avfallet. De anordningar som den svenska kärnkraftindustrin byggt upp för dessa ändamål är av mycket hög klass och i många avseenden en förebild för andra kärnkraftländer.

Till kärnkraftens miljöaspekter räknas även den risk för omgivningen som radioaktiva utsläpp vid ett allvarligt reaktorhaveri skulle kunna medföra. Även i detta avseende har Sverige intagit en ledande position i och med införande av utrustning för filtrerad tryckavlastning (FILTRA) i inneslutningen till samtliga svenska reaktorer. Flera andra länder har följt efter med liknande installationer.

Kriteriet för de svenska filtren är, att även vid en svår reaktorolycka med nedsmältning av reaktorhärden, skall detta ej kräva att de kringboende måste evakueras eller att restriktioner för jordbruket måste tillgripas.

I den nya generationen av s.k. inherent säkra reaktorer (PIUS m fl) skall denna höga nivå på omgivningssäkerheten tillgodoses med mindre komplexa, tekniska lösningar och förhoppningsvis till lägre kostnader.



## Ekonomi

Den ekonomiska strukturen hos ett kärnkraftverk präglas av stora grundinvesteringar och låga bränslekostnader. I förhållande till andra alternativ har kärnkraften därmed höga fasta kostnader och låga rörliga. Detta medför i sin tur att konkurrenskraften är starkt beroende av en hög nyttjandegrad av anläggningarna.

De svenska kraftföretagen har successivt stärkt utnyttjandet av investerat kapital genom ökade effektuttag av reaktorer i drift. I praktiken har man på detta sätt, och till relativt låga kostnader, erhållit utökad kapacitet motsvarande en trettonde reaktor i Sverige. Dessutom genomföres nu omfattande granskning av äldre reaktors konstruktion som underlag för modernisering till dagens krav på säkerhet och effektivitet.

”Life cycle cost” för ett kärnkraftverk är också mycket beroende av anläggningens totala livslängd till följd av den höga grundinvesteringen. I Sverige gäller i princip en 25-årig avskrivningstid, medan anläggningarna är dimensionerade för en minst 40-årig teknisk livslängd. Ur ekonomisk synpunkt är därför politiskt betingade inskränkningar av kärnkraftverkens användning i Sverige en belastning.

Internationellt och även i Sverige bedrivs idag ett arbete inom kärnkraftbranschen i syfte att undersöka hur man ytterligare skall kunna öka nyttan av gjorda investeringar. Det går under benämningen Plant Life Extension (PLEX) och omfattar analyser av åtgärder som kan krävas för en ökad teknisk livslängd hos anläggningarna. I USA talas om upp till 60 års drifttid som en helt realistisk möjlighet.

I det tekniska utvecklingsarbetet är givetvis ekonomin en central fråga. Detta gäller såväl nya anläggningar som modernisering av redan driftsatta kraftverk.

## Teknik

Av Sveriges tolv kärnreaktorer i drift har nio kokvattenreaktorer (BWR) levererats av ABB Atom och tre tryckvattenreaktorer (PWR) av amerikanska Westinghouse. Dessa togs i drift under åren 1972 till 1985. De har efter driftsättningen fått del av den tekniska utvecklingen vad gäller såväl drifteffektivitet som säkerhetskrav, genom större eller mindre ombyggnader. Exempel på sådana åtgärder är den ovan nämnda filterinstallationen i samtliga reaktorinneslutningar, och mycket framgångsrika byten av ånggenera-

torer i två reaktorer i Ringhals. Den stora renovering som Oskarshamn 1 genomgått, bland annat vad gäller reaktortanken, är ett annat exempel på hur reaktorerna kan följa med utvecklingen i tiden.

Ett omfattande internationellt utbyte av drifterfarenheter och analyser av dessa är grund för den tekniska utvecklingen av dagens kärnkraftverk. Effektivare reaktorbränsle, förfinad materialteknik och modernare kontrollutrustning är exempel på vad som kommit ut av detta. Förnyelsen bidrar starkt till att förlänga kraftverkens livslängd.

Samtliga svenska reaktorer får årligen en genomgripande översyn i syfte att hålla en kontinuerligt hög teknisk status på alla ingående system. I samband med den årliga servicen ger också ett stort antal kontroller och inspektioner besked om systemens status och om vad som behöver åtgärdas.

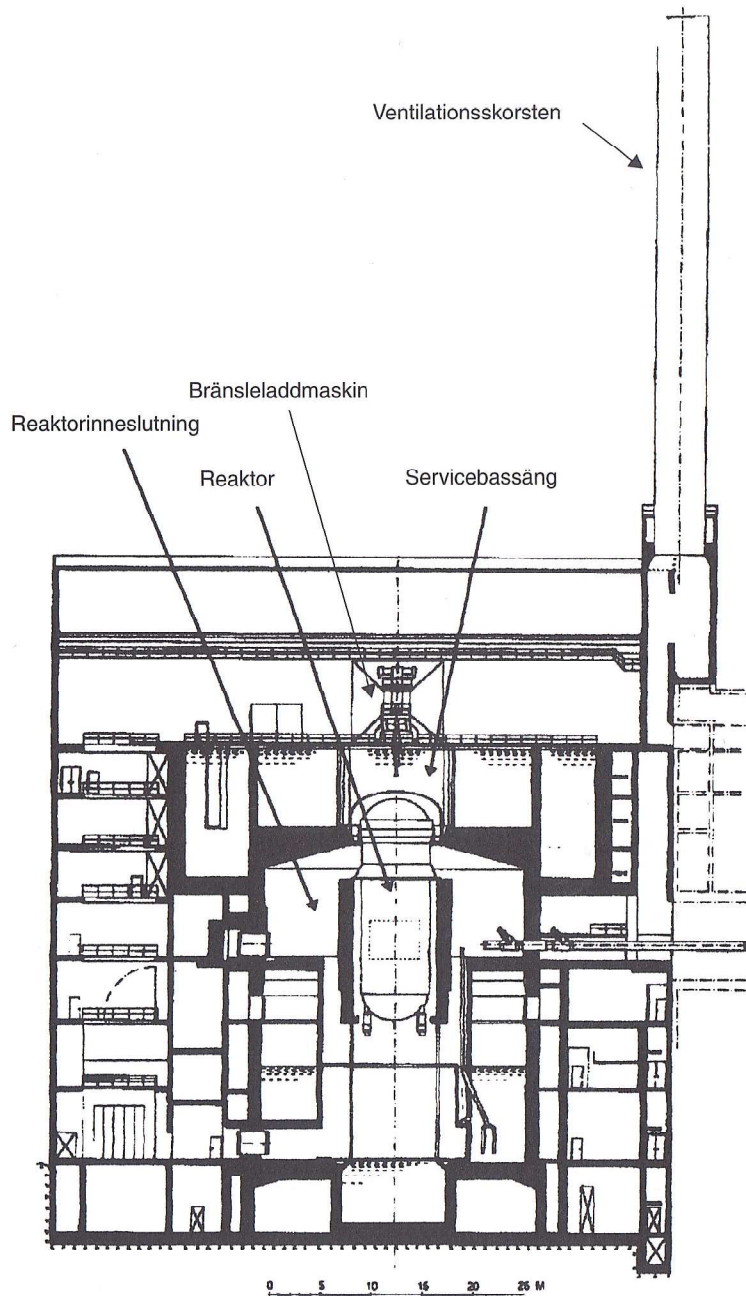
## Utveckling av nya reaktorer

Den tekniska utvecklingen på reaktorsidan följer idag två huvudlinjer. Båda bygger på principen att man ska ta tillvara erfarenheter från tidigare konstruktioner och dra nytta av lärdomar från driften. Den ena ägnas åt förbättringar på de traditionella reaktorkonstruktionerna – den så kallade evolutionära linjen – och den andra åt framtagning av en helt ny generation av tekniska lösningar.

Den första linjen innebär att relativt måttliga utvecklingssteg tas utifrån nuvarande lättvattenreaktorer och leder fram till medelstora avancerade lättvattenreaktorer (ALWR) med elektrisk produktionsförmåga på omkring 600 megawatt, som bättre svarar mot ökningstakten för elbehovet än tidigare stora LWR med effekter på uppåt 1500 megawatt.

Denna linje koncentreras i Sverige till vad som kallas BWR 90, som planeras i varianter med eleffekt på 800–1300 megawatt. Konstruktionen utgår från de reaktorer som levererats till Forsmark 3 och Oskarshamn 3. Uppdateringen av konstruktionen gäller en ”effektiviserad” layout som medför minskning av byggnadsvolym och därmed lägre byggkostnad. Reaktorinneslutningen får också, som standard, ett säkerhetsfilter av den typ som nämnts ovan. Reaktorns kontrollutrustning har moderniserats med en omfattande användning av mikrodatareor. Till detta kommer att de senaste årens drifterfarenheter och säkerhetskrav givetvis tillämpas i den nya konstruktionen (figur 1).

Ytterligare steg i förenkling och för ökad säkerhet tas i den andra utvecklingslinjen som kallas den innovativa. I Sverige har detta gjorts i det så kal-



Figur 1 Reaktorbyggnad BWR 90.

lade PIUS-konceptet. I detta förlitar man sig enbart på naturlagar för reaktoravstängning och resteffektkylning i händelse av ett svårt haveri. Därigenom är risken för härdskada i princip eliminerad även vid en mycket svår driftstörning.

De så kallade restriskerna, med extremt låg sannolikhet men med svåra konsekvenser, som diskuteras för konventionella reaktorer har också i princip eliminerats genom att reaktortanken utformats som en tjockväggig, förspänd betongtank (figur 2).

Även andra, i en del fall mycket avancerade, reaktorkonstruktioner studeras utomlands. Ett relativt realistiskt alternativ är en så kallad högkonversionsreaktor, som bättre än nuvarande reaktorer både producerar och förbränner plutonium. Detta leder till mindre uranföbrukning och är ett mellansteg till bridreaktorn. Starkt förenklat kan man säga att det förutom i Sverige finns konkreta utvecklingsprojekt på gång i USA, Frankrike, Tyskland och Japan.

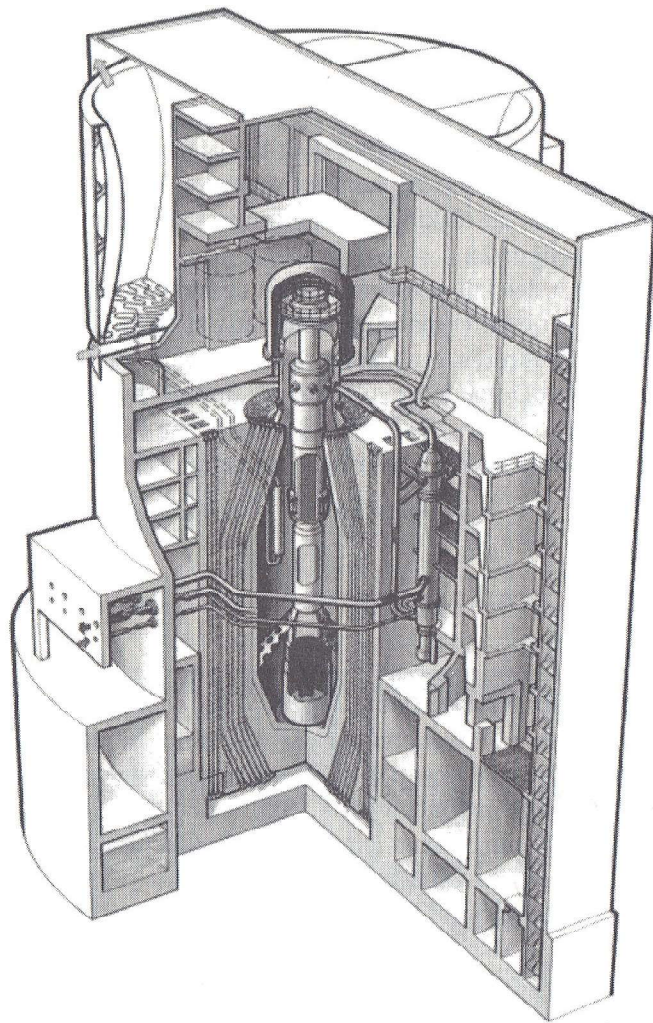
## PIUS-reaktorn

PIUS är en modifierad tryckvattenreaktor (PWR), som bygger på drifterfarenheter från befintliga lättvattenreaktorer vad gäller härdens neutronfysikaliska och termohydrauliska egenskaper, bränsleteknik, material, kemi, avfallshantering och komponentteknik. Skillnaden mot dagens reaktorer ligger i säkerhetsfilosofin och har lett till förändrad konstruktion av reaktorkylkretsen och vissa hjälpsystem.

Akronymen PIUS står för Process Inherent Ultimate Safety. "Process Inherent" betyder att säkerheten mot allvarliga olyckor är inbyggd i den process som tar ut värme från reaktorhärden, det vill säga i konstruktionen av reaktorkylkretsen. Därmed är den inte beroende av ingrepp från operatörer eller från system utanför det primära kylsystemet. "Ultimate" innebär att processens inbyggda säkerhet inte ska slås ut under några omständigheter.

Konstruktionen i reaktorkylkretsen är sådan, att reaktorn, i händelse av en allvarlig störning eller ett haveri, stänger av sig själv. Eftervärmningen, som genereras av efterföljande sönderfall av klyvningsprodukter i bränslet, bortförs genom själv-cirkulation av kylvattnet.

Kommandon från yttre styrsystem styr driften och får härden att avge värme till vattnet som cirkulerar i reaktorkylkretsen. I händelse av en driftstörning är det dock naturliga gravitations- och hydrodynamiska krafter på



Figur 2 Piusreaktorn.

kylmediet som får härden att återgå till ett "naturligt" jämviktsläge med garanterad kylning.

Principen är på ett sätt motsatt till den som tillämpas i dagens lättvattenreaktorer. Styrsystemen i PIUS har inte som huvuduppgift att garantera härden säkerhet, utan att hålla energiproduktionen igång. Säkerheten är inte, som hos tidigare lättvattenreaktorer, beroende av styrsystemet eller av per-

sonalens kompetens och beteende i nödsituationer. PIUS kan därför definieras som den enda vattenkylda reaktorn med "Naturlig Säkerhet".

Reaktorkonstruktionen i PIUS bygger på följande grundregler:

- Härden säkerhet får på inget sätt vara beroende av korrekt funktion hos någon mekanisk eller elektrisk utrustning som kan drabbas av fel.
- Varje lastbärande konstruktionselement i anläggningen antas kunna vara behäftad med dolda fel som kan leda till brott.
- I en nödsituation ska anläggningen tåla att personalen gör felmanövrer utan att härden säkerhet påverkas.
- Det får inte finnas någon rimlig möjlighet för personer – även med stor kunskap om anläggningen – att utföra sabotage som kan leda till härdskada.
- Anläggningen måste tåla att utsättas för extrem yttre påverkan utan att skador på härden riskeras.

Det övergripande målet för nukleär säkerhet är att hindra radioaktivt material från att komma ut i omgivningen eller i oskyddade delar av anläggningen. Följaktligen är skydd av härden mot skador det allt överskuggande syftet med reaktorsäkerhet. För att uppnå det måste temperaturen hos bränslestavarnas kapsling begränsas i alla lägen. I praktiken är det två villkor som måste vara uppfyllda för att garantera en godtagbar temperatur, nämligen att härden alltid är vattentäckt samt att kylkapaciteten i den vattenvolym som omger härden är större än värmegenereringen i denna.

Dessa krav tillgodoses genom att reaktorn placeras i en bassäng med tillräckligt stor vattenvolym för att genom långsam förångning kunna föra bort den värme som produceras genom resteffekt i härden. Detta måste ske under så lång tid att kompetenta ingrepp utifrån – i första hand påfyllning av borerat vatten i reaktorbasängen – med stor säkerhet kan påräknas. För PIUS har denna säkerhetstid satts till en vecka. För en reaktor med termisk effekt på 2 000 megawatt (ca 640 megawatt eleffekt) behövs en bassängvolym på omkring 3 000 kubikmeter vatten för att klara nödkylningen.

## PIUS-reaktorns konstruktion

PIUS-reaktor är som nämnts ovan baserad på välkänd teknik för lättvattenreaktorer, även om huvudsystemet fått en annan utformning än i dagens reaktorer. Reaktorhärden är, som i andra PWR-anläggningar, öppen och består av drygt 200 bränsleelement. Dessa är uppbyggda av bränslestavar av urandioxid inkapslad i zircaloy.

Härden är placerad nära botten i reaktorbasängen, en vattenmassa med hög halt av bor, innesluten av en tank av förspänd betong. Till skillnad från de flesta andra reaktorer används inte styrstavar i PIUS, varken för styrning av effekten eller för avställning. Istället kontrolleras effekten med hjälp av kylmedlets borhalt och temperatur. Bor är ett grundämne som absorberar neutroner och används för att begränsa reaktorns effekt.

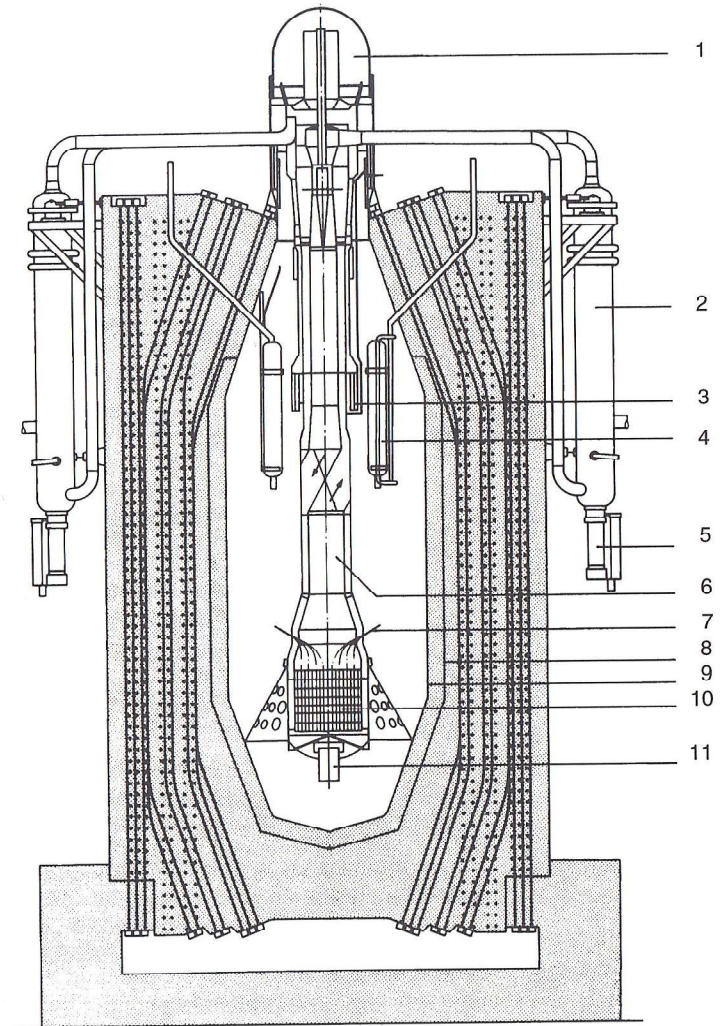
I härden värms under drift kylvattnet (13 000 kg per sekund) från 260 till 290°C. Trycket i tanken är under drift 9 MPa. Efter att ha lämnat härden stiger vattnet genom stigarröret och halvvägs upp genom detta, ca 10 meter, leds flödet över till en ringspalt på utsidan av det fallrör där kylvattnet kommer in. Längst upp i stigarröret lämnar kylvattnet reaktortanken och förs till ånggeneratorerna. Efter passagen genom dessa driver cirkulationspumpar vattnet åter till reaktorn (figur 3).

Som förutsatts av konstruktionsprincipen finns även en självcirkulationskrets, vilken förbinder härden med den stora volymen borhaltigt vatten i bassängen.

Nerifrån räknat finns ett så kallat densitetslås, där det heta vattnet i reaktorkylkretsen under normal drift ligger stilla, lagrat ovanpå det relativt sett kallare och därmed tyngre bassängvattnet. Ovanför densitetslåset finns en buffertvolym från vilken leder individuella rör genom huvudinloppet till var och en av härdens bränslepatroner. Härden och stigarröret däröver fullbordar självcirkulationskretsen som högst upp avslutas med ännu ett densitetslås i förbindelse med reaktorbasängen.

Det bor som tränger in i härden med självcirkulation från bassängen är garanterat för att kärnklyvningen i reaktorhärden avbrytes vid en driftstörning. Under normal drift motverkas självcirkulation, med avstängning av reaktor som följd, av cirkulationspumparnas vattentillförsel till härden.

1. Ångvolym i tryckhållare
2. Ånggenerator (4)
3. Övre densitetslås
4. I vattnet nedsänkta bassängkylare vars sekundärkrets kyls via självcirkulation mot ytterluften
5. Cirkulationspump (4)
6. Stigarrör
7. Härdinstrumentering
8. Ingjutet stålskikt
9. Tankfoder
10. Hård
11. Undre densitetslås



Figur 3 Ångproduktionssystemet i PIUS 800.

De globala miljöproblemen i samband med starkt utvidgad användning av fossila bränslen visar på behovet av maximal insats av andra energikällor. Under de närmaste decennierna är kärnkraften ett av de få realistiska alternativen.

För att övervinna den existerande misstron i industriländerna, och för att göra kärnkraften lämpad även för tekniskt sett mindre avancerade länder i tredje världen, där en stor expansion av energianvändningen kommer att äga rum, behövs en reaktorteknologi där säkerheten vilar på enkla, lättfattliga sammanhang och som är i hög grad okänslig för mänskligt felhandlande. Av praktiska skäl måste denna teknologi bygga på erfarenheterna från dagens hundratala lättvattenreaktorer och utnyttja den nuvarande infrastrukturen för deras bränslecykel.

PIUS är ett exempel på sådan teknologi som går mycket längre i uppfyllande av dessa krav än något annat känt koncept. PIUS kan vara ett sätt att möta den kraftigt ökande efterfrågan på "ren" elektrisk energi som måste följa, om mänskligheten ska ta sig ur en ond cirkel av resursutarmning och miljöförstöring.

*Bengt Å Andersson är verksam inom kärnkraftbranschen sedan 30 år tillbaka.*

## Kärnenergin i världen – vad göra med en given kunskap?

*Per Ragnarson*

### *Debattanpassad historieskrivning*

För övrigt var det väl känslan som gjorde att kärnkraftsatsningen överhuvud taget kom igång. Det var hisnande att man kunde klyva atomer och utvinna energi. Helt enkelt för spännande att låta bli, även om miljöriskerna var stora och satsningen dyrbar.

*Åsa Domeij (mp), Ny Teknik 18:95*

När en svensk kärnkraftutveckling sonderades i slutet av 1940-talet och sedan tog sig de turer som ledde fram till Ågesta-reaktorn, var utgångspunkterna påträngande nära till hands. Man kan förvisso tala om förväntningar i skuggan av atombomberna. Det blev ju snart nog ett närmast euforiskt program, "Atoms for Peace", lanserat av Eisenhower-administrationen i USA. Samtidigt kunde (naturligtvis) militärledningar som i Sverige, inte låta bli att intressera sig för den nya vapentechnologins destruktiva möjligheter. Resultatet blev för Sveriges vidkommande en långvarig klutenhet kring begreppet "handlingsfrihet i kärnvapenfrågan", innan de militära ambitionerna förvisades till historiens skräpkammare. En skada var emellertid redan skedd – kärnenergin som en kunskapsgåva till mänskligheten hade råkat komma i en tid, då världen genom naziregimen i Tyskland var utsatt för ett politiskt/militärt hot av aldrig skådad omfattning.

Låt oss för stunden tänka bort den militära delen av historien och låta den vetenskapliga kunskapsutvecklingen ha sin gång fram till den praktiska demonstrationen av kärnklyvningen – alltså helt utan krig och militär-politiska drivkrafter. Antagligen hade det tagit sin tid, men det hade också kun-

nat ge människan möjligheter att begrunda den nya kunskapen, dess möjligheter och risker. Den som får en stor gåva måste fråga sig vad den skall användas till. Frågor skulle ha ställts om atomernas energi: Är denna energikälla outsinlig? I vilka former kan den bäst utnyttjas? Till vad skall den utnyttjas? Naturligtvis hade bland svaren också kommit in militära förhoppningar, men kanske kunde vägar ha utstakats utifrån förutsebara mänskliga behov. En liten tankeövning av det här slaget kan vara nyttig för den som vill försöka frikoppla kärnenergin som kunskap från de grovt polariserade intressekonflikter som nu har vuxit fram under 25 år och satts på sin spets, inte minst i Sverige. Det var faktiskt inte så enkelt som att "känslor" i kombination med en överdriven teknisk fascination tog överhanden. Ett sådant fenomen kan bara iaktas i Hiroshima-ruelsens spår med t.ex. namnet "Plowshare" (plogbill) på ett visserligen fredligt tänkt men helt orealistiskt nukleärt sprängmedelsprojekt. Snarare präglades den första tiden av insikterna om att detta område av naturvetenskap och teknik var långt mer krävande än något annat som det moderna samhället hade ställts inför. I synnerhet gällde denna "känsla" i ett litet land som Sverige (och – med senare tiders ofta moraliserande kärnkraftdebatter i minne – varför döma ut just "känslan" som en av grunderna för kloka beslut?).

## Det vita kolets tid

Med namn som Porjus, Älvkarleby och Trollhättan och upprustningen av "folkhemmet", skrevs "det vita kolet" – den elektricitetsburna vattenkraften – in i skolböckerna som någonting för framtiden outhärligt. Samtidigt hade oljan under efterkrigstiden kommit in som värmekälla för frusna svenskar, som åren dessförinnan eldat med ved, kol, koks, torv eller briketter. Vad man i början inte anade var, att det växte fram ett "oljeberoende", ett beroende av omvärlden för en energiförsörjning som i stor utsträckning hade varit baserad på lokala resurser. Industrin rusade in i en efterkrigskonjunktur, världen var ju krigsskadad och vi hade sluppit undan. Sverige elektrifierades långt ut på landsbygden och användningen av elektricitet fördubblades på mindre än tio år. Men så var ju också den förnybara vattenkraften en billig resurs (om man bortsåg från vissa överdämda byar i Norrland). Fördubblingarna brukade på den tiden noteras som ett mått på välfärdsutvecklingen, något som då faktiskt motsvarade folkviljan. Men den oåterkalleligen sista fördubblingen dröjde så långt borta i tiden att ingen orkade fundera över dess möjligen förödande konsekvenser.

När motståndet mot att binda den ena älven efter den andra i jord-, sten- och betongkonstruktioner började märkas i Norrland och få rikspolitisk betydelse, kom naturligtvis frågorna upp, om vad som skulle möjliggöra en fortsatt allt högre elkraftanvändning. Då, mitt i 1950-talet, släpptes de första resultaten från det civila atomprogrammet i USA. Här kunde man ana vad som skulle kunna efterträda vattenkraften i den fortsatta utbyggnaden. "En outsinlig energikälla" hette det, när landets ledande politiker och vetenskapsmän samlades på biografen Rigoletto i Stockholm för en debatt om framtiden. Den passade in i förväntningarna på fortsatt uppgång. Det går inte att tala om att den konferensen och de följande årtiondenas debatter präglades av andra känslor än förhoppningarnas. Det handlade om framtidsvisioner, som dock bromsades av en påtaglig respekt för de tekniska svårigheterna i en komplex teknologi. "Det vita kolets" billiga krafttillgång hade inte väckt intresse för återhållsam energieffektivitet. En generös krafttillgång hade blivit en självklarhet för svenskar. Detta glöms gärna av dem som vill att verkligheten skulle ha varit annorlunda.

## När kärnkraften kom

När de första besluten om ett utvecklingsprogram för kärnkraft fattades i Sverige, var de nära och påträngande utgångspunkterna i korthet följande:

- En ny energikälla, vars råvara fanns i Sverige – om än i fattiga malmer (ca 230 gram uran per ton bruten skiffer).
- En ny energikälla, som i kärnvärmeverk skulle kunna motverka den växande importen av olja.
- Nya produktionsresurser för att klara en fortsatt elektrifiering.
- Det militära intresset för kärnvapen, vilket också gärna baserades på inhemska uranfyndigheter.

Förutsättningarna för att inleda och förhoppningsvis klara utvecklingen av en helt ny, komplex och kvalitetskrävande teknologi med konstruktion, tillverkning och drift av kärnvärmeverk och/eller kärnkraftverk ansågs ligga i landets industriella struktur. Man tänkte sig nog också en befrielse från importberoende genom att hela "bränslecykeln" från uranbrytning via tillverkningsfaser, reaktordrift och avfallshantering skulle kunna skötas inom landet. Så blev det inte helt.

Tankarna på små eller medelstora värmeverk höll inte, när takten bestämdes av reaktorutvecklingen i USA. Teknikerna tvingades att skjuta mot ett

rörligt lönsamhetsmål. Plötsligt var det storleksfaktorn som allt kretsade omkring. Lönsamheten krävde en uppskalning av reaktorerna och den dramatiken, med alla dess signaler tvärs över Atlanten, har skildrats i samband med besluten om de första reaktorerna i Oskarshamn och Barsebäck. När man ser tillbaka på den första tiden, kan en del antaganden om framtiden kanske se ut att vara mera blåögda än blågula, men så är det ju alltid, när man har facit i handen. Det enda allvarliga exempel på andlig moderatorförlust i 1960-talets "kärnprocesser" var, när någon på allvar förde fram tesen att Sverige inom ramen för tungvattenprojektet Marviken skulle kunna komma ikapp ett par generationer av amerikanska reaktorer. Sådana genvägar bjuds nog inte inom avancerad teknologi.

Efterhand som "atomenergin" fick sina tekniska drag i form av tryckkärl och ångmaskineri, förlorade den något av sin mystik men aldrig tillräckligt mycket, förrän en ny mystik började att odlas från kretsar som nymornat hade upptäckt, att någonting var på väg att hända. Till de nymornade hörde vissa politiker som haft tillgång till internationell information om karakteristiska problem men tydligen inte förstätt diskussionerna och den förestående utvecklingens villkor.

Det finns skäl att säga, att den nya, alltjämt vagt definierade kunskapen verkligen prövades utifrån ett svenskt nyttoperspektiv och att den inte alls dög som en hisnande form av självtillfredsställelse för forskare och tekniker. Förväntningarna delades av alla. Alla hade ju redan bevittnat, vilken form av kärnenergi som de *inte* ville ha. Den socialdemokratiska kvinnofronten mot svenska atomvapen under ledning av Inga Thorsson är idag historiskt erkänd, men självklart fanns det generaler, som inte tyckte om att "fruntimmer" lade sig i så viktiga angelägenheter.

"Atomklyvarna" från 1950-talets början fick också snart se sig övergivna av allmänheten som idoliserade framtidsmän. Snart blev det rymdmännen som kom i mediafocus. Nu skulle rymden utforskas! I början av 1970-talet inleddes en debatt med många överdrifter, bland andra sådana som bokstavligen syftade till att fränkänna energitekniker i allmänhet och kärntekniker i synnerhet allt socialt ansvar. Antagandet att den svenska industrin skulle kunna anta utmaningen att skapa en "tam", socialt acceptabel kärnteknik visade sig riktigt, även om 1950-talet kännetecknades av "revirbataljer" mellan industrin och staten samt inbördes mellan industrigrupper. Dessa strider tillhör nu det mera kuriösa i svensk industri- och teknikhistoria.

## Oljekris – energiframtid

Mycket har hänt sedan dess. Oljekrisen 1973 gav industri och samhälle en första anledning till att effektivisera energianvändningen i stället för att importera olja. Av många olika skäl började också den ständigt uppåtsträvande kurvan för elanvändning att successivt plana ut, men (det väl tilltagna) reaktorprogrammet från 1980 har kunnat ta hand om en betydande del av uppvärmningsbehovet. Import och förbränning av olja (och kol) har minskat. Detta har gynnat ekonomin och bidragit till att hålla luftföroreningarna nere. Vem vill idag kompromissa med sådana mål för ett konstruerat årtals skull?

Kärnkraftdebatten var bara ett par år gammal, när oljekrisen kom och tillförde energiförsörjningens problem helt nya dimensioner. Nu började man allmänt tala om vår "energiframtid". Därmed hade energikällor och energiteknik för gott kopplats till sociala och ekonomiska värden, till vilka också bevarandet av en god miljö hör. Men nu gällde debatten inte längre teknisk/ekonomiska kriterier, nu kom det in synpunkter på moral och etik i perspektiv från nu till evigheten och därmed bäddades naturligtvis för en konflikt, som egentligen inte har någon lösning. Man mäter ofta med olika måttstock när det gäller risker i en framtid som saknar historiska proportioner: långlivat radioaktivt avfall, försurade sjöar, sjuka skogar, luftföroreningar och cancerrisker, etc.

## Avveckling eller utveckling

Det finns många icke-tekniska värderingsfrågor i energidebatten, frågor som är besvärande och viktiga, oavsett vilken syn man har på hur samhällets energiförsörjning bäst kan sättas samman. Frågorna är av den arten att de inte bara kan viftas bort. Med ökande insikter har det efterhand blivit substans också i den en gång retoriska frågan från luttrade kärntekniker: "Vem skulle kunna älska kärnkraftverk?" Ändå talar kärnkraftmotståndare idag om "kärnkraftkramare" eller "kärnkraftkrämare". Sanningen är ju att det inte finns någon *enkel* framtid för kärnkraften. Ändå, eller just därför, är det viktigt att en debatt om utveckling kontra avveckling inte tabustämplas av opportunistiska politiker utan tillåts föras på nationell basis men kanske ännu mera motiverat i det internationella samarbetets tecken.

Det finns heller inte någon enkel lösning, om man ser till *världens* energiproblem. När överbefolkade länder som Kina, Indien m.fl. börjar efter-

fråga en någorlunda energistandard, ligger svaret för överskådlig tid *inte* i de förnybara alterantiven. Detta innebär avsevärda hot om ökande luftföroreningar, globalt sett. Väst har ju inte föregått med något föredömligt exempel när det gäller att mota u-ländernas miljöproblem i grinden. Kommer svenska kylskåps säljare att lansera solcellsdrivna, freonfria och ozonsäkra kylskåp till några miljoner kineser? Möjligen kan Sverige som ett av naturen välgynnade, glesbefolkade land finna en framtid som är förenlig med måttliga uppoffringar, men det beror i så fall på att vi lever i ett resursmäsigt privilegierat land. De dagsaktuella förutsättningarna för en fortsatt användning av kärnkraften i Sverige skiljer sig något från läget vid mitten av 1950-talet: Här är några, som förefaller tydliga:

- Bevarandet av hittills orörda älvar grundat på politisk enighet.
- Trepartiöverenskommelsen 1991: tryggad elförsörjning på med omvärlden konkurrenskraftiga villkor, företrädare för förnybara energikällor, stränga miljö och säkerhetskrav.
- Skapande och bevarande av arbetstillfällen.
- Rio-konferensens krav på minskning av luftföroreningarna genom minskad användning av fossila bränslen, för Sveriges del en stabilisering av koldioxidutsläppen på 1990 års nivå.

Till dessa förutsättningar hör också krav, som vid den tiden kändes angelägna och som formulerades på röstsedlarna för linjerna 1 respektive 2 vid folkomröstningen 1980:

- Hänsyn till behovet av elektrisk kraft för upprätthållandet av sysselsättning och välfärd.
- Samhället skall (enl. linje 2) ha ett huvudansvar för produktion och distribution av elkraft.
- Minskning av oljeberoendet.
- Förhindrande av direktverkande elvärme i ny permanentbebyggelse.
- Särskilda säkerhetsstudier respektive säkerhetskommittéer vid varje kärnkraftverk.
- Undvikande av elproduktion genom olje- och kolkondenskraftverk.

Dessa krav har inte tappats bort genom åren, sämre har det väl av olika anledningar gått för de hos linjerna 2 och 3 förekommande kraven på forskning och utveckling för förnybara energikällor och alternativ energiproduktion. Linje 3:s krav på effektivare energihushållning har tyvärr – ännu under energikommissionens stressade arbetsmånader – haft svårt att ta någon tät plats på agendan, trots i många fall mycket goda ekonomiska incitament.

De speciella säkerhetsstudierna vid varje reaktor har liksom de lokala säkerhetskommittéerna haft mindre betydelse än den dynamiska, internationella utveckling, som samtidigt ägt rum. Kravet hos linje 2 på att samhället skall ha huvudansvaret för produktion och distribution av elkraft har brutits upp på senare tid och ägarkonflikterna har blivit tydliga inför avvecklingshot.

Under åren som gått sedan 1980 och under inverkan av ett avsevärt mera finslipat säkerhetstänkande efter händelsen i Harrisburg har kärnkraftverken i Sverige visat hög tillgänglighet. Säkerhetsmyndigheterna har stärkts i kompetens och agerande och ligger idag i högsta internationella klass, även om de ibland sviktar något, personellt sett, under växande krav och arbetsbörda. Kraftföretagen har också visat, att även mera komplicerade fel och skador kan åtgärdas och att man kan gå mycket längre i utbyttbarhet för komponenter än någon vågade förutsäga för femton år sedan. Detta är inte tekniskt konstigare än att flyget utvecklats med en säkerhet som även omfattar plan i överljudsfart, trots att de ju har visat sig ekonomiskt omotiverade.

## En förhastad dom

Det finns sålunda många skäl till att ifrågasätta visheten i att utfärda en dödsdom över ett helt kunskapsområde med angivande av ett årtal för domens verkställande. Folkomröstningens valsedlar innehöll inte ett ord om avveckling till något bestämt årtal. Men i skuggan av ett då ännu inte analyserat haveri i Harrisburg varken kunde eller vågade ledande svenska politiker föra fram andra visioner än avveckling. De föreföll närmast paralyserade. Avveckling omedelbart eller efter ett övergångsskede var uttryckt i Olof Palmes ord den förutfattade meningen. Därför inleds texterna på valsedlarna för linjerna 1 och 2 med orden "Kärnkraften avvecklas ...". Dock ligger det ju avsevärda förbehåll i texterna både på framsidor och baksidor. Att Sverige inte skall driva kärnkraftverk för deras egen skull var och är enkelt och självklart. Om man däremot skulle hamna i det läge som aviserats av energiministern att ett väl fungerande kärnkraftverk vägs mot en eller annan oexploaterad älvsträcka i Norrland, då är saken satt på sin spets. Dessutom är kärnkraftteknologin från alla möjliga utgångspunkter en internationell angelägenhet och utvecklingen fortgår trots åsiktsstriderna i Sverige.

Blickar vi så österut, från det håll där de verkligt akuta problemen med kärnenergis utnyttjande – civilt som militärt – kommit, finns det ett otal



skäl, inte minst egoistiska, för Sverige att upprätthålla kompetens och att delta i vidareutveckling av kärnkraftverk och kärnsäkerhet i vidaste mening. Nu rör vi oss inte inom staketet till ett blå-gult centerpartistiskt Sörgården. Tjernobyl och Murmansk är idag skräckmonument över kommunistregimen.

Det är en självklarhet att varje kärnkraftverk har ett slutdatum, som bestäms av faktorer som säkerhet och ekonomi. Sålunda avvecklar sig de nuvarande kärnkraftverken av sig själva inom en tid som nu kan överblickas. Avgörandet i dessa frågor bör ligga hos säkerhetsmyndigheterna, vars personal i antal och kompetens förutsätts inte naggas i kanten. Går man då tillbaka till den inledande tanken om kärnenergin som en given (om än inte gudomlig) kunskap, är det svårt att inte bekräfta riktigheten i det tänkande, som lett till reaktorkonstruktioner med mera måttliga driftdata och framförallt en självreglerande fysik med fullständigt annorlunda säkerhetsvillkor. Det borde vara med stolthet som svenska energidebattörer talar om att den svenska industri som på 1950-talet med viss tvekan bedömdes ha förutsättningar att hantera kärnkraften dels klarat uppgiften med beröm godkänt i den första, av de historiska omständigheterna framkastade versionen av tryckvatten- och kokvattenteknologi, dels kunnat gå tillbaka till fysikens grunder och skapa det som naturligtvis borde ha varit det ursprungliga svaret på frågan: Hur? Med den säkerhetsmässiga vidareutvecklingen av kokreaktorn och koncept som Secure och Pius har ASEA, senare ABB-ATOM, provocerat till ett om- och nytänkande som antyder hur vanskligt det kan vara att sia om framtiden med bestämda årtal eller andra låsningar. Det har också visat på det orimliga att i ett fritt, öppet samhälle introducera och lagfästa sådana begränsningar i den tekniska fantasin och tankeverksamheten som Birgitta Dahls förbudslagstiftning. Jag är inte jurist, men nog undrar jag hur en sådan lag rimmar med det europeiska regelsystemet.

## Avfallsfrågan en akilleshäla

Idag finns det tydliga exempel i USA och Tyskland på att företagsledningar i kraftbranschen inte vågar tänka på investeringar i kärnkraft. De undviker gärna nya produktionsinvesteringar överhuvud taget, vilket naturligtvis gynnar samarbetet om de produktionsresurser som finns på nära håll på kontinenterna. Den fria energimarknaden i Europa bidrar också till att skjuta sådana beslut på framtiden. Detta är ju bra och rimmar med en utgångspunkt som också är bra att ha antingen man talar om ny kärnkraft

eller effektiviseringar i energianvändningen, nämligen den att *ingen energi är renare och billigare än den som man faktiskt inte behöver*, om man kan klara uppsatta sociala och ekonomiska mål på ett enklare och finurligare sätt.

Min tro och övertygelse är dock att världen kommer att behöva den från grunderna nyutvecklade kärnenergin och till den bilden hör inte högkomplexifierade bldreaktorer, som just nu står inför kommersiell idrifttagning i t.ex. Japan. En förutsättning är naturligtvis att det demonstreras en rimlig strategi för den långsiktiga avfallsdeponeringen. Mycket har gjorts i form av vetenskapliga och tekniska studier av möjligheterna till permanent omhändertagande av radioaktivt avfall, men frågan släpar efter på grund av lokala protester, "inte i vår kommun!", och därav följande politisk handlingsförlamning. Kanske kör man fast med projekt för permanenta deponier, kanske är det vanligare att bibehålla handlingsfrihet i hanteringen av även radioaktivt avfall, inte minst med tanke på att forskningen antyder framtida möjligheter till "avaktivering" genom kärnomvandlingsprocesser i acceleratörer. Till detta kommer att det i realpolitiken förmodligen ingår att brett förankrade, lokala säkerhetskommittéer måste etableras i alla demokratiska länder, där avfallsdeponier aktualiseras, och då är det kanske inte så meningsfullt med en för evigt sluten bergrumsförläggning?

## Moral och samhällstrygghet

Ute i världen råder inga teknologiska tankeförbud, men det gör det i Sverige på detta enda område. Så länge detta förhållande råder måste det bli utvecklingen utomlands som visar vilka effektivitets- och säkerhetsmässigt förnyade versioner av teknologi hela bränslecykeln runt som kan praktiseras. I ett framtidsperspektiv för kärnkraften kan Sverige riskera att på ett olyckligt sätt tappa tempo. De finansiella problemen för nya kraftanläggningar och för vidareutvecklande demonstrationsprojekt är ansenliga, men det finns redan exempel på bi- och multilaterala satsningar på olika kärnenergikoncept. Det stoppas inte av ett årtal som tillkom på basis av ett vagt antagande om ekonomisk livstid för en reaktoranläggning, det stoppas inte av en folkomröstning i Sverige. Men det berör även oss. Vi har inte folkomröstat om en fri europeisk energimarknad, vilket kan innebära att vi kommer att dra nytta av en fransk-tysk kärnkraft, som sannolikt nått en ännu högre grad av utveckling på basis av tusentals reaktorårs drifterfarenheter men som vi inte kunnat påverka.

En smällkall vinter efter ett torrår står vi oss ännu slätt med krav på enbart grön el i ledningarna, när el finns. Lars Persson, fysiker från Strålskyddsinstitutet, nu verksam inom IAEA i Wien, har fört resonemang om Sveriges moraliska ansvar för att upprätthålla kärnkraftkompetens. I ett framtida internationellt perspektiv ter det sig som ett motiverat krav på god moral, förutsatt att det är kunskapsgåvan som tas om hand, inte att några självändamål tar över. Om inte all högteknologisk utveckling på energiområdet skall vara tabu, därmed också vätefusionen, måste kunskapsutvecklingen få fortsätta också inom de teknologiska ramar, som vi idag kan tänka oss. Professor Bo Lehnert, KTH, påpekade detta förhållande inför gråtfärdigt besvikna folkampanjare i gamla riksdagshuset redan för femton år sedan. De hade väntat sig att han skulle tala med "husbondens" (Hannes Alfvéns) röst.

Energidebatten just nu har dock mognat till en fråga om framtidens samhällstrygghet. I detta begrepp ingår mycket, som t.ex. även öststaterna efter Sovjet-diktaturen och Tjernobyli. Häri ingår också de risker som vi nyss hämtat andan efter, med svårtämjda vattenmassor i de norrländska älvarna och de långsiktiga farorna med luftföroreningarna. I samtliga fall, hur man än vänder på det, så är det kunskap som måste till. Snabba, opportuna eller rentav godtyckliga politiska beslut hjälper inte, det har vi fått se nu. Därför finns det anledning att noga begrunda alla utvecklings- och samarbetsmöjligheter och hur olika energislag kan blandas på effektivast möjliga sätt. För ett antal år sedan hette det att man inte skulle ha alla äggen i en korg (oljekorgen). Så fördelade man de svenska äggen så att de hamnade i två stora (vatten- och urankorgarna). Idag tycks det finnas flera stora och små korgar, alla av betydelse om resonemangen sker utifrån dagens situation och fakta och inte efter de i många stycken otillräckliga insikter som fanns i slutet av 1970-talet.

### Slutsatser

Mina slutsatser och förhoppningar för framtiden skulle kunna sammanfattas så här:

- 1 En förnyad internationalisering av kärnkraften som en del av världens energiförsörjning skulle innebära en politiskt användbar sammanfattning av kriterier för denna teknologiska nuvarande användning och framtida utveckling. Skälet till detta är dels, att kärnkraften kommer att finnas kvar i världen oavsett vad Sverige skulle kunna göra (t.ex. markerade den litauiske presidenten Algirdas Brazauskas (Stockholm 1995-11-21) Igna-

linas närvaro i östersjöregionen långt bortom ett svenskt 2010), dels ett nytt informationsbehov, bl.a. därför att mycket har hänt och händer på den europeiska energimarknaden. Det finns skäl till nya former av europeiskt samarbete på nationsbasis, utan förutfattade meningar och fobier åt något håll, nu när en fri energimarknad har etablerats.

- 2 I perspektivet med reviderade internationella riktlinjer för utvecklingsprojekt rörande nya (och förnyade) reaktorkoncept, avfallshantering m.m. bör långsiktiga diskussioner för en tid bortom en eventuell demonstration av kraftproduktion baserad på fusion. En helt ny form av Genève-konferens om kärnenergis villkor och framtid?
- 3 Ökat tryck på länder, som inte kommit lika långt i vetenskaplig/teknisk behandling av avfallsfrågorna som Sverige. Kritiken gäller naturligtvis inte enbart f.d. kommunistländer utan i högsta grad t.ex. USA. Praktiskt fungerande beslut om avfallshanteringen är en nyckelfråga.
- 4 Med en snabb avveckling av nuvarande reaktorer utan förutsättningar för en förnyelse av kärnkraften i landet (i måttlig omfattning) skulle Sverige avsäga sig och snabbavveckla sina möjligheter att konstruktivt påverka utvecklingen. De svenska reaktorerna tillåts "avveckla sig" i den takt som bibehållet eller förstärkt kompetenta säkerhetsmyndigheter anser sig böra rekommendera med goda marginaler.
- 5 Kärnkraftberoendet för elproduktion bör på sikt begränsas. Den borde inte ha tillåtit uppgå till över hälften av den svenska elförsörjningen. Enligt det gamla "äggresonemanget" rekommenderas ett lämpligt antal korgar, varav en – med skärpt tillämpning av energieffektivitet – skulle kunna bli vindkraft.

*Per Ragnarson var 1959–1967 verksam inom Vattenfall och AB Atomenergi. Publicist, dags- och fackpress, radio/TV, f. tekn. museichef.*

# Kontrollerad termonukleär fusion – Framtidens energikälla?

Indrek Martinson

## Inledning

I energidebatten har man länge diskuterat olika alternativ som helt eller delvis skulle kunna ersätta dagens väl fungerande men av olika orsaker mer eller mindre kontroversiella energikällor som kol, olja och kärnenergi. I första hand tänker man på sol-, vind- och bioenergi, men en del debattörer har också fört fram *fusionsenergin*, i dagligt tal ofta kallad vätekraften. Sistnämnda energikälla är från många synpunkter speciellt attraktiv, inte minst för att bränslet finns i vanligt vatten, i en sådan omfattning att en liter vatten innehåller lika mycket energi som 300 liter bensin.

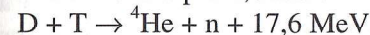
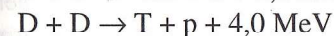
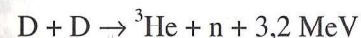
## Vad är fusion?

Allting i universum, från luften som vi andas till benen i vår kropp består av atomer. När dessa först upptäcktes trodde man att de var naturens minsta beståndsdelar. Nu vet vi emellertid att varje atom har en kärna, som är sammansatt av protoner (ofta betecknade med bokstaven p) och neutroner (n). Protonerna har positiv elektrisk laddning medan neutronerna är oladdade. Runt den positivt laddade kärnan kretsar ett antal elektroner (vilka är negativt laddade) som planeterna runt solen. I den lättaste atomen väte (H) är kärnan en proton som omges av en elektron. Det finns också s.k. tungt väte, deuterium (D), där kärnan förutom protonen även innehåller en neutron, samt en ännu tyngre variant (isotop), tritium (T) vars kärna består av en proton och två neutroner.

Deuterium ingår i s.k. tungt vatten, D<sub>2</sub>O. I medeltal finns det en liter tungt vatten per 6 000 liter vanligt havsvatten, och det är relativt enkelt och

billigt att framställa deuterium. Tritium är en radioaktiv isotop, med en halveringstid på 12 år, som knappast förekommer i naturen. Det kan emellertid framställas med hjälp av kärnreaktioner mellan neutroner och grundämnet litium (Li). Väte (liksom deuterium och tritium), helium och litium är de lättaste atomerna. Som exempel på en tung atom kan vi nämna uran där kärnan består av 92 protoner och 143 eller 146 neutroner,  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , respektive  ${}_{92}^{238}\text{U}$ .

Atomkärnan med sina protoner och neutroner (vilka i sin tur består av kvarkar och gluoner) hålls ihop av utomordentligt starka krafter. Om man lyckas slå sönder tunga kärnor i mindre fragment kan emellertid en del av den energi som finns lagrad i kärnorna frigöras. Det är fråga om omvandling av massa ( $m$ ) i energi ( $E$ ) enligt Einsteins berömda formel  $E = mc^2$ , där  $c$  är ljusets hastighet i vakuum,  $3 \times 10^8$  m/s. Om man exempelvis bestrålar  ${}_{92}^{235}\text{U}$  med neutroner slås urankärnan sönder i två lättare kärnor, t.ex. barium (Ba) och krypton (Kr) och energi frigörs. Denna process, *fission*, ligger till grund för dagens kärnreaktorer. En alternativ möjlighet att utvinna kärnenergi består emellertid i att slå ihop lätta kärnor och därigenom erhålla en tyngre kärna. Detta kallas för *fusion*. Om två deuteriumkärnor reagerar med varandra kan slutprodukten bli en heliumkärna ( ${}^3\text{He}$ ) och en neutron, alternativt en tritiumkärna och en proton. Dessa två processer är lika sannolika, man talar här om DD-reaktioner. Även deuterium- och tritiumkärnan kan slås ihop, till en heliumkärna ( ${}^4\text{He}$ ) och en neutron, DT-reaktionen. I samtliga tre fallen frigörs energi. Reaktionsformlerna ser ut på följande sätt:



Inom kärnfysiken anges energi oftast i miljoner elektronvolt (MeV). De energier som här frigörs är drygt en miljon gånger högre än energierna vid kemiska reaktioner, t.ex. förbränning av olja. Om man kunde tillvarata energin från fusionsprocesser skulle världens energiproblem vara lösta. Om man utnyttjade DT-reaktionen skulle jordens förekomst av Li (för att framställa T) räcka till att producera energi på nuvarande nivå under 100 000 år. Om däremot DD-reaktionen används skulle det i naturen tillgängliga bränslet räcka till energiproduktion under  $10^{10}$  år!

Ovanstående kärnreaktioner kan tyvärr inte ske vid rumstemperatur. Anledningen är att atomkärnor är positivt laddade och därför repellerar varandra. För att övervinna sådana krafter måste man ge D- och T-kärnorna

mycket höga hastigheter, något som kan åstadkommas genom att upphetta en gas (bestående av D och T) till tiotals miljoner grader. Först då börjar fusionsreaktionerna bli sannolika.

I laboratorier har man faktiskt i drygt 60 års tid kunnat åstadkomma fusionsreaktioner. Med hjälp av en s.k. partikelaccelerator (t.ex. en cyklotron) kan man nämligen ge deuteriumkärnorna sådana hastigheter att reaktionerna kommer igång. Den energi som erhålles är emellertid en bråkdel av vad som behövs för att köra acceleratoren. Metoden kan alltså inte användas för energiproduktion, men exemplet visar betydelsen av grundforskning. De praktiska resultaten kan ligga långt framme i tiden.

Vi kan emellertid då och då observera en arbetande fusionsreaktor, som befinner sig på 149 miljoner kilometers avstånd från oss. Det är solen som får sin energi från fusionsprocesser. I solens inre uppgår temperaturen till miljontals grader och där omvandlas väte till helium. Det bör påpekas att solens effekt är  $4 \times 10^{20}$  megawatt (MW), drygt  $10^{17}$  gånger högre än effekten från en konventionell kärnreaktor.

Här på jorden har fusionsreaktionerna drastiskt demonstrerats i stormakternas vätebombsexplosioner. De största vätebombarna utvecklar en energi som svarar mot drygt 50 miljoner ton trotyl, 3 000 gånger så mycket som Hiroshimabomben. I en vätebomb åstadkommer man den extremt höga temperaturen genom att först låta en konventionell "atombomb" explodera.

För att framställa nyttig fusionsenergi behövs det emellertid en reaktor som arbetar kontinuerligt och under kontrollerade förhållanden. Den energi som då frigörs måste givetvis vara betydligt större än alla energiförluster (genom strålning, värmeledning m.m.) samt den energi som krävs för att köra reaktorn. År 1958, dvs. sex år efter den första vätebombsexplosionen, offentliggjordes det i Genève att stormakterna i flera år hade arbetat för att åstadkomma en fusionsreaktor. På den tiden var optimismen stor, och man förutspådde att energiproduktion med en fusionsreaktor skulle bli en realitet omkring 1970. I dag, drygt 25 år efter detta datum, är emellertid vägen till en fusionsreaktor fortfarande lång och mödosam, även om en betydande optimism nu tycks råda.

## Hur arbetar en fusionsreaktor?

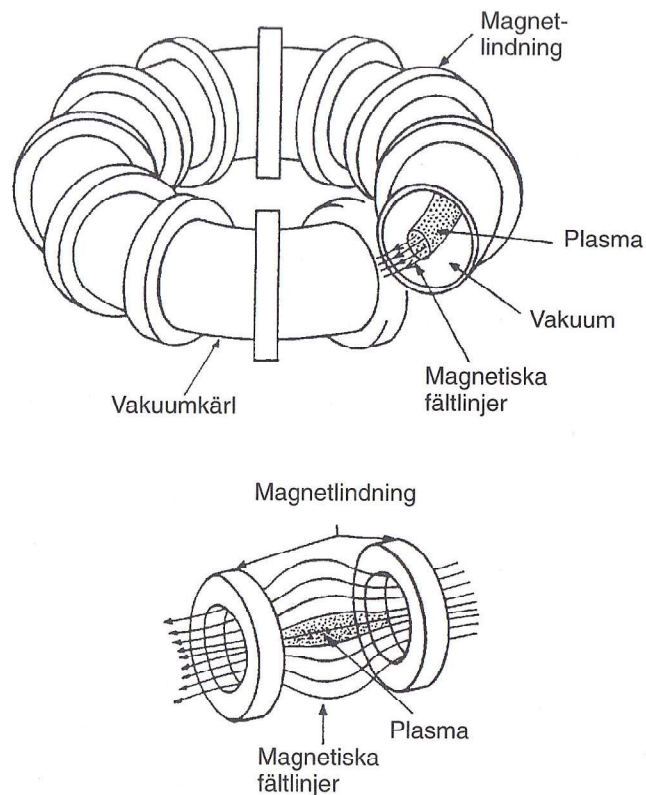
Som redan påpekats måste man upphetta en gas (deuterium eller blandning av deuterium och tritium) till extremt hög temperatur för att fusionsprocessen skall starta på allvar. För DT-reaktionen krävs det minst 100 miljoner grader, medan DD-processen erfordrar ca 300 miljoner grader. Vid sådana

temperaturer är elektroner och kärnor separerade och de rör sig oberoende av varandra. Man har producerat ett *plasma*, ofta kallat materiens fjärde tillstånd. (De andra är som bekant fast kropp, vätska och gas). I naturen förekommer plasmor i bl.a. solen, stjärnorna, norrskenet, kometsvansar och interstellära rymden. Man har uppskattat att omkring 99% av all materia i universum är i plasmaform.

För att få producera tillräckligt med fusionsenergi behöver plasmat hållas ihop under en viss minsta tid (inneslutningstiden  $\tau$ ) som är 1–2 s. Dessutom måste partikeltätheten  $\rho$  i plasmat vara relativt hög (ca  $3 \times 10^{20}$  partiklar per  $m^3$ ). I annat fall sker inte kollisionerna tillräckligt ofta. Dessa tre krav (temperatur  $t$ , inneslutningstid  $\tau$  och densitet  $\rho$ ) måste dessutom uppfyllas *samtidigt*, vilket brukar uttryckas så att den s.k. fusionsprodukten  $P = \tau\rho$  måste överstiga  $6 \times 10^{22}$  för DT-reaktionen (här anges  $t$  i miljoner  $^\circ C$ ,  $\tau$  i s och  $\rho$  i antal partiklar/ $m^3$ ).

Att på ett kontrollerat sätt nå de nödvändiga temperaturerna i laboratoriet kan förefalla omöjligt för den som inte sysslar med plasmafysik. Man kan emellertid höja temperaturen hos ett plasma miljontals grader genom att använda elektriska strömstyrkor på hundratusentals ampere. Problemet är att förvara ett så hett plasma: en behållare av det mest svårsmälta material skulle genast förgasas om den kom i kontakt med plasmat. Ett plasma leder emellertid elektricitet och det kan också påverkas av magnetiska krafter. Det är därför möjligt att förvara plasmat i en lufttom behållare och med pålagda magnetiska fält isolera det från behållarens väggar. Fusionsforskarna har mycket systematiskt undersökt olika s.k. *magnetiska flaskor* och ett par möjligheter visas schematiskt i figur 4. Sådana experiment, baserade på magnetisk *inneslutning*, har i USA, Sovjetunionen/Ryssland och England pågått i drygt 40 års tid. Även andra länder, bl.a. Japan, Tyskland och Frankrike har länge bedrivit denna forskning. I Sverige har en grupp vid KTH, Stockholm, under ledning av professor Bo Lehnert, gjort internationellt uppmärksammade insatser på detta område.

Man har att göra med ytterst svåra problem. På en sekund hinner en D- eller T-kärna röra sig flera tusen km i en behållare vars volym är några  $m^3$  – men den får inte träffa väggarna. I ett plasma uppstår lätt olika slags vågor som kan leda till instabila förhållanden. Det var sådana instabiliteter, den ena värre än den andra, som satte käppar i hjulet för fusionsforskningen för drygt 30 år sedan. Man talade om *anomala* plasmafänomen, vilka så småningom kunde förstås och elimineras tack vare systematisk och tålmodig-prövande teoretisk och experimentell forskning. I dag är därför situationen betydligt gynnsammare, men fortfarande väntar en hel del plasmafysikaliska problem på sin lösning.



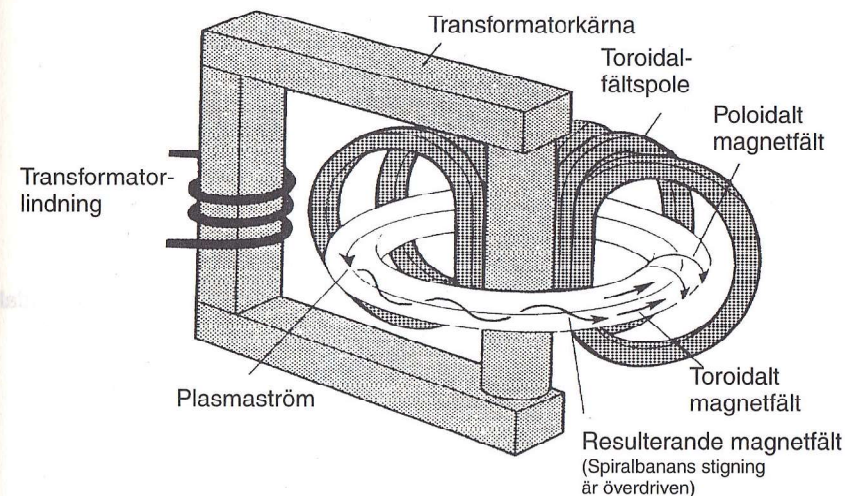
Figur 4 Två möjliga anordningar för magnetisk inneslutning av ett plasma. Överst ser vi en s.k. toroidal modell. Med hjälp av elektromagneter åstadkommer man ett ringformat magnetfält som avgränsar plasmat. Den mest lovande utvecklingen av denna idé är den s.k. tokamaken (se figur 5). Figuren visar också en öppen magnetflaska. Med hjälp av starkare magnetfält vid ändarna (spegelfält) håller man plasmat koncentrerat och begränsar partikelförluster.

Energien som frigörs vid fusionreaktionerna består av rörelseenergi hos neutroner och He-kärnor (DT-reaktionen) och hos protoner, neutroner och He-kärnor (DD-reaktionen). Vid DT-reaktionen stannar He-kärnorna (energi 3,5 MeV) i plasmat som därigenom blir ytterligare upphettat medan neutronerna (energi 14,1 MeV) tränger in i och upphettar en s.k. mantel som omger det heta plasmat. Det så producerade värmets kan ledas till en värmväxlare där vatten omvandlas till ånga som sedan på vanligt sätt driver en turbin och en elektrisk generator. Mycket i en framtida fusionsreaktor torde således vara baserad på beprövad teknik.

## Hur långt har man hunnit inom fusionsforskningen?

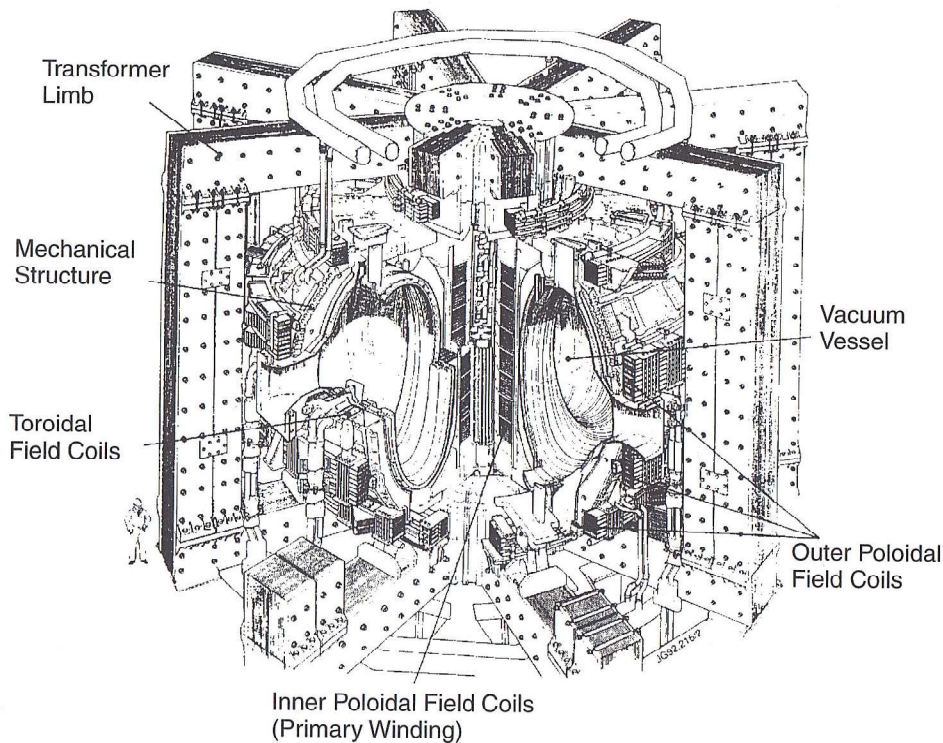
Efter de första årens optimism och de därpå följande bakslagen kom det år 1967 ett hett efterlängtat genombrott. I en rysk anläggning, s.k. tokamak (se figur 5) uppmättes då en plasmatemperatur på 2 miljoner grader! Detta resultat ledde till stora satsningar på tokamaklinjen. Även i USA, där man tidigare utvecklat ett eget koncept för toroidal plasmainslutning, *stellator*, blev tokamaken snabbt den dominerande fusionsanläggningen. År 1978 uppnåddes plasmatemperaturen 80 miljoner grader i en tokamak i Princeton (USA), men problemet var att plasmats täthet var jämförelsevis låg. Under 1980-talets första år färdigställdes tre stora fusionsanläggningar, TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) i Princeton, JET (Joint European Torus) i Abingdon, England, och JT-60 i Tokai, Japan. Av dessa är JET (se figur 6) den största och den hittills mest framgångsrika maskinen.

JET är ett europeiskt projekt som finansieras av EURATOM. Deltagarländerna uppgår till 15, däribland även Sverige. Under de 12 år som JET



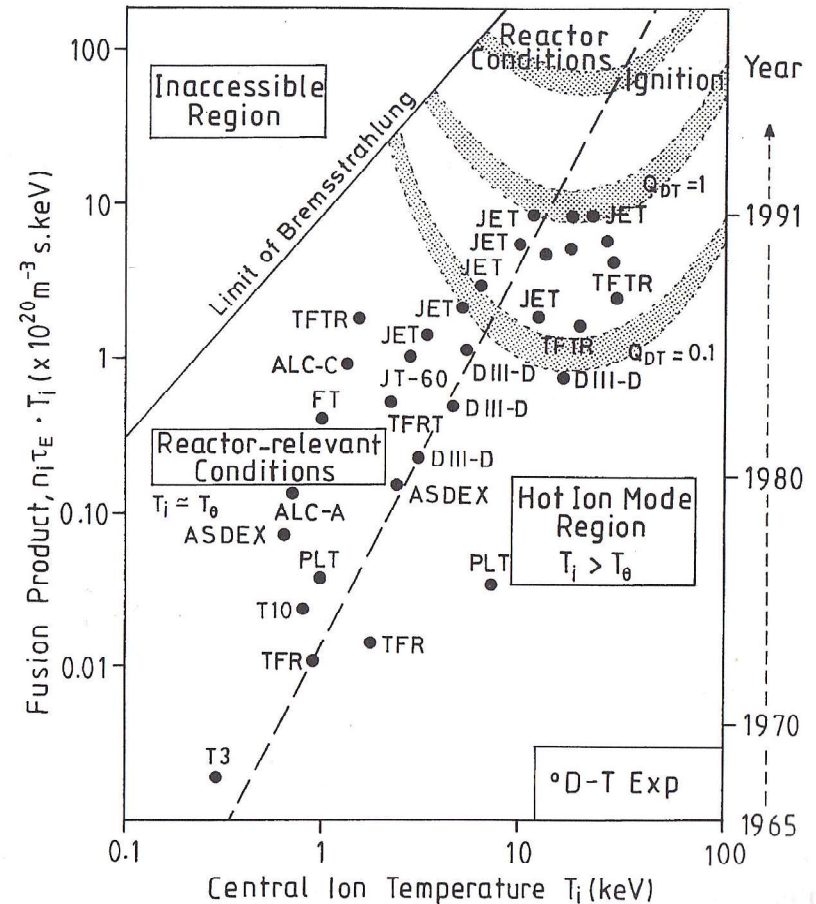
Figur 5 Principen för en tokamak. (Ordet som kommer från ryskan är en förkortning och betyder torusformad magnetisk kammare). Tokamaken utvecklades av Andrei Sacharov m.fl. i Sovjetunionen. Plasmaringen kan jämföras med en sekundärlindning till en transformator. En ström genom primärlindningen genererar en ström som upphettar plasmat. (Källa: Hans Persson "Fusionsenergi" Energiforskningsnämnden (1985)).

har utnyttjats har den motsvarat högt ställda förväntningar. Man har exempelvis uppnått följande plasmamparametrar:  $t = 300$  miljoner  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 4 \times 10^{20}$  partiklar/ $\text{m}^3$  samt  $\tau = 1,8$  s. (Dessa höga värden har dock inte kunnat erhållas samtidigt, varför det högsta värdet på fusionsprodukten ( $P = t\rho Q$ ) är lägre än produkten av de individuella rekorden, nämligen  $P = 1 \times 10^{22}$ . Detta värde, 1/6 av det som erfordras för en reaktor, är dock betydligt bättre än man frestas tro, något som blir uppenbart om man betraktar utvecklingen under de senaste 25 åren. Det bästa värdet på fusionsprodukten (i procent av reaktorvärdet) har nämligen ökat på följande sätt: 0,004% (1970), 0,14% (1980), 10% (1990) och 17% (1995).



Figur 6 JET tokamaken i England. Plasmats volym är  $150 \text{ m}^3$ , och maximala plasmastrommen uppgår till 7 MA (miljoner ampere). På detta sätt når man temperaturen 50 miljoner C. För att ytterligare höja plasmats temperatur används upphettning med radiovågor och med snabba atomer vilka skjuts in i plasmata. Anläggningen väger drygt 3 000 ton. (Volymen hos ITER, sid. 45, blir närmare 10 gånger större!).

Denna utveckling pekar på att en fusionsreaktor inte längre är en utopi, något som ytterligare bekräftats vid de experiment med tritium som utförts vid JET och TFTR. År 1991 injicerades en liten mängd tritium i JET (för att åstadkomma DT-reaktioner), och man kunde påvisa en fusionseffekt på 1,7 MW under 2 sekunder. (På grund tritiums radioaktivitet ville man inte kontaminera JET i onödan, något som hade kunnat försvåra andra experiment). En större portion tritium användes år 1993 vid TFTR, och där blev fusions-



Figur 7 Fusionsforskningens framsteg efter 1965. Plasmatemperaturen anges i energienheten keV (kiloelektronvolt), 1 keV motsvarar ca 10 miljoner C. Även fusionsprodukten anges i delvis andra enheter än de som använts i denna artikel. Notera att de senaste resultaten från JET ligger nära break-even, dvs.  $Q = 1$ . Med ITER väntas man komma i närheten av det approximativa reaktorvärdet  $Q = 10$ .

effekten 6,2 MW. 1994 uppnådde man, också vid TFTR, fusionseffekten 10,7 MW under en halv sekund, vilket är rekordet hittills. Dessa värden utgör visserligen en bråkdel av de effekter som måste tillföras för att utföra experimenten, men resultaten får ändå betecknas som stora vetenskapliga genombrott. Man lyckades nämligen experimentellt bevisa att fusionsreaktioner verkligen äger rum i stor omfattning. Därmed har JET och TFTR uppfyllt de kanske viktigaste målsättningarna. Det nuvarande läget på fusionssidan illustreras i figur 7.

Det framgår bl.a. att de senaste experimenten vid JET har närmat sig det som kallas *break-even*, dvs.  $Q_{DT}$  (kvoten mellan effekten som kommer från plasmat och den tillförda effekten) är lika med ett. Med tanke på olika effektförluster krävs det emellertid för en fusionsreaktor att värdet  $Q_{DT}$  ligger i närheten av 10.

## Varför kan man inte gå fram snabbare?

Trots intensiva insatser under fyra decennier kommer det att dröja innan en arbetande fusionsreaktor är färdig. Varför måste det ta så lång tid? Svaret är att man har att göra med ett stort antal mycket komplexa problemställningar vilka måste lösas systematiskt. Lehnert (Kosmos, 1982) har indelat problemen i tre grupper, nämligen (a) *Plasmafysikaliska problem*, (b) *Fusionsteknologiska problem* och (c) *Fullskaliga reaktorns problem*. Till de olika kategorierna hör exempelvis (a) Generering av plasma, plasmainslutning, plasmats upphettning, strålningsbalans, föroreningars inverkan (b) Generering av starka magnetfält, generering av stora upphettningseffekter, begränsning av plasmats föroreningshalt, tillförande av kärnbränsle och bortförande av förbränningsprodukter, materialfrågor, strålskydd, energiuttag, kylsystemets utformning, regenerering av tritium, hantering av radioaktivt avfall och (c) Funktionsduglighet hos reaktorn under praktiska driftförhållanden, reparationer och byten av konstruktionsdetaljer, säkerhets- och miljöfrågor, energipris och lönsamhet. Lehnert påpekar dessutom att de flesta i detta komplex ingående problemen är kopplade, varför forskningen och utvecklingen måste sikta på allomfattande lösningar vilka samtidigt uppfyller alla kraven (a)–(c).

Som en kommentar till detta bör påpekas, att det är omöjligt att helt isolera plasmapartiklarna från behållarens vägg, utan dessa kan slå ut tyngre atomer från väggen vilka hamnar i det heta plasmat. Detta leder oftast till stora strålningsförluster och avkyllning av plasmat. Stora ansträngningar har

därför gjorts för att minimera en så skadlig process. Materialfrågor utgör ett annat viktigt problemkomplex. Väggarna i en fusionsanläggning utsätts för stora påfrestningar, varför det ställs mycket höga krav på de material som används i en fusionsreaktor. Genom att väggarna bestrålas med neutroner (14,1 MeV energi) från fusionsprocessen kan radioaktivitet induceras genom olika kärnreaktioner. Det gäller därför att välja sådana ämnen som har låg sannolikhet för sådana reaktioner.

Eftersom fusionen är en form av kärnenergi ingår följaktligen radioaktivitet i bilden. Fusionens anhängare framhåller gärna att en framtida fusionsreaktor är betydligt säkrare än en konventionell kärnkraftreaktor. Mängden radioaktivitet är liten, det finns inga långlivade aktiviteter och en härdsmälta kan inte inträffa. Allt detta är korrekt, men samtidigt får man inse att här jämförs en väl fungerande teknologi med en annan som kan finnas om drygt 40 år. Motsvarande jämförelser skulle framstå som meningslösa när det gäller flygplan eller datorer.

## Framtida satsningar

Efter de senaste årens framgångar diskuteras nu fortsättningen av fusionsprogrammet. För att komma vidare krävs det betydligt större anläggningar än JET, vars återstående livslängd nu också diskuteras. Tidigare nämndes 1996 men nu kan 1999 utgöra en "bortre parentes".

Den fortsatta fusionsforskningen blir så dyr och komplicerad att inget land helt kan förlita sig på egna ekonomiska, vetenskapliga och tekniska resurser. Allt pekar för närvarande på att nästa stora steg i utvecklingen blir ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), som utgör ett samarbetsprojekt mellan Västeuropa, Ryssland, Japan och USA. ITER är nu inne i en projekteringsfas som pågår till 1998. Redan 1996 måste man emellertid besluta om förlägningsplats, och här har visst intresse uttryckts från svenskt håll. Om allt går enligt nuvarande planer kommer ITER att kunna invigas år 2006. Kostnaderna för att bygga ITER beräknas till 50 miljarder kronor medan ytterligare 40 miljarder måste tillskjutas för driften under en 20-årsperiod. I jämförelse med JET kommer ITER att bli betydligt större (dubbla längdskalan, dvs. ca 8 gånger större volym) och den förväntas kunna utveckla 1500 MW fusionseffekt. Fusionsprodukten beräknas bli 6–10 gånger högre än det värde som uppnåtts vid JET. Det är viktigt att notera att inte ens ITER kommer att vara en fungerande fusionsreaktor utan snarast en avancerad testanläggning, avsedd för att studera egenskaperna

hos ett brinnande plasma samt för att lösa teknologiska problem, rörande t.ex. a) supraledande magnetiska spolar b) mantel i vilken tritium produceras c) produktion av plasmapulser som är drygt en timme långa och med en uteffekt på tusentals MW. Först när dessa problem studerats och funnit sin lösning är det dags att vidta nästa steg, nämligen att bygga en reaktor (DEMO) som är tänkt att demonstrera fusionsenergin i full skala. En sådan reaktor hinner knappast bli färdig före 2030, något som i sin tur väntas medföra att vi (eller rättare sagt våra barn och barnbarn) inte kommer att kunna utnyttja "jordisk" fusionsenergi före år 2050. Det kan givetvis inte uteslutas att något oförutsett vetenskapligt eller tekniskt genombrott påskyndar processen. Man har ibland ställt frågan om det är värt att fortsätta med fusionsforskningen eftersom slutresultatet är så avlägset. Det är dock uppenbart, att om man nu skulle avbryta de pågående satsningarna, kommer denna energiform inte att finnas tillgänglig om 50–60 år då den av mycket att döma verkligen skulle behövas.

I denna artikel har vi endast berört forskningen baserad på magnetisk inneslutning av ett hett plasma. Även andra metoder har utvecklats, exempelvis *laserbaserad fusion*. Här är bränslet inte i gasform utan man använder små kulor, en blandning av deuterium och tritium, dvs. is. Kulorna utsätts för snabba oerhört energirika ljusblitzar från kraftfulla lasrar. Därvid sker en snabb uppvärmning av de yttre delarna samtidigt som innandömet trycks ihop och temperaturen stiger varvid DT-reaktionerna kan komma igång och energi produceras. Trots stora satsningar är det idag svårt att bedöma om laserfusionen någonsin kan utvecklas till en praktisk energisurs.

*Indrek Martinson är professor i Fysik vid Lunds universitet och ordförande i Miljövänner för kärnkraft.*

## Några biologiska synpunkter på kärnkraftens risker

*Gunnar Walinder*

De internationella rekommendationer och nationella lagstiftningar som anger vilka högsta tillåtliga stråldoser som skall gälla för människor i deras yrkesverksamheter och för ett lands befolkning i sin helhet, grundas väsentligen på strålningens förmåga att framkalla cancer. Att så är fallet beror helt enkelt på, att cancer anses kunna uppstå efter lägre stråldoser än dem som krävs för att åstadkomma andra skador.

De cancerrisker som är förenade med den här (s.k. joniserande) strålningen anses vara av ett principiellt annat slag än flertalet andra risker. Man säger att cancer är en *stokastisk* effekt av strålningen och menar därmed att den kan uppstå slumpvis i kroppens celler och därmed också att den slumpmässigt drabbar människorna i en bestrålad befolkning. Med det här betraktelsesättet kan man visserligen inte peka ut vilka som kommer att få cancer, men väl antalet som kommer att drabbas.

En följd av detta synsätt är att det råder en direkt proportionalitet mellan stråldos och därav uppkommen cancerfrekvens. Sambandet mellan dos och cancer (dos-respons sambandet) anses således vara linjärt och sakna tröskeldoser, dvs. det går inte att ange några stråldoser under vilka strålningens cancerverkan helt kan uteslutas.

Exponeras således en befolkning för en viss medeldos, blir antalet väntade fall av cancer direkt proportionellt mot antalet människor i befolkningen. För att beräkna detta antal har man infört begreppet *kollektivdos*, som är summan av alla stråldoser till de enskilda människorna i den bestrålade befolkningen eller uttryckt på annat sätt, produkten av medeldosen och antalet bestrålade personer. På grundval av kollektivdosen kan sedan antalet väntade cancerfall beräknas.

I mycket stora befolkningar kan således även en liten kollektivdos ge upphov till ett mycket stort antal fall av cancer, men detta betyder inte att en sådan effekt också innebär en stor personlig risk, dvs. det som vi i vardags-



lag menar när vi använder ordet risk. Låt mig ge ett par exempel för att belysa vad jag menar.

FN:s vetenskapliga strålkommitté (UNSCEAR) har beräknat att totalt kommer cirka 30 000 människor på jordens norra halvklot att dö i cancer på grund av Tjernobyloolyckan. Det kan ju tyckas vara ett förskräckande högt tal, men det måste ställas i relation till den aktuella folkmängden på norra halvklotet som är ungefär 4,5 miljarder människor. I en så stor befolkning kommer cirka 450 miljoner människor ändå att dö i cancer under en 50 års period. De 30 000 dödsfallen på grund av Tjernobyloolyckan innebär således att av 15 000 dödsfall i cancer på norra halvklotet kommer 1 att bero på Tjernobyloolyckan.

Det går lätt att räkna ut att risken med Tjernobyloolyckan i detta hänseende motsvarar den risk vi löper om vi stannar inomhus ca 2 minuter längre per dag (på grund av radonet i bostäderna). En obetydlig ändring i våra levnadsvanor skulle alltså helt uppväga olyckans cancerframkallande konsekvenser. Nu skall det väl också sägas, att den här slutsatsen gäller ett statistiskt världsomsparande medelvärde. För personer i vissa områden i Vitryssland, Ukraina och Ryssland har stråldoserna (exempelvis i barns sköldkörtlar) varit så höga, att den här jämförelsen med radonrisker blir både missvisande och cynisk.

Men för oss som lever utanför den gamla Sovjetunionen, är Tjernobyloolyckans konsekvenser helt försumbara och säkert mindre än många av dem vi dagligen och oftast omedvetet utsätter oss för och som rentav krävs, för att vi ska kunna leva och verka. Det är ju här inte heller fråga om sådant, som vi normalt tänker på, när vi talar om risker.

Mitt andra exempel är följande. Statens strålskyddsinstitut (SSI) har nyligen till den sittande Energikommissionen lämnat in beräkningar på vad en svensk kärnkraftolycka kan ställa till med. Enligt referat i massmedia kunde man ur SSI-rapporten utläsa, att en restriskolycka skulle kunna åstadkomma 20 000 dödsfall i cancer vid en mycket ogynnsam vädersituation. Återigen ett förskräckande högt antal. Det man emellertid inte talade om i dessa rapporter var bland annat att:

1 Konsekvenserna av en restriskolycka aldrig tidigare tagits med i den här typen av beräkningar, inte ens när det gäller kärnkraftsolyckor. En restriskolycka är en ytterst osannolik händelse av typen "en fullastad jumbojet störtar över centrala delar av en storstad under värsta rusningstid", eller "att en damm i t.ex. Luleälven kollapsar och medför att flodvågen drar med sig byggnader och människor och skapar stor förödelse även i Boden och Luleå". Flera liknande dammolyckor med tiotusentals döda

har inträffat utomlands (enligt en uppgift i tidskriften RERF (*Update*), som är den officiella tidskriften för den USA-japanska samarbetsstiftelsen *Radiation Effects Research Foundation*, skulle en kinesisk dammolycka några år tidigare ha krävt 250 000 dödsfall).

Med en restriskolycka i ett kärnkraftverk avses inte bara en så osannolik olycka som en härdsvälta, utan också en utslagning av alla de utsläppsförebyggande system och konstruktioner som byggts upp för att förhindra yttre konsekvenser av en härdsvälta.

2 Vädersituationen skall vara sådan, att människor inom en 90° sektor av 200 mils längd kommer att omfattas av den luftburna radioaktiviteten och den radioaktiva markbeläggning som kan uppkomma vid regnväder. Detta innebär att större delen av Europas befolkning (cirka 300 miljoner människor) omfattas av utsläppet från den havererade reaktorn.

Om vi nu gör samma beräkningar för en svensk reaktorolycka, som i Tjernobylfallet, kan vi uttrycka den personliga risken av denna i sig förskräckande totalsiffra (20 000 dödsfall i cancer) på följande sätt: Av 1 000 europeiska dödsfall i cancer under en 50 års period, kan 1 sporadiskt inträffa fall bero på en restriskolycka vid Barsebäck.

Den här "översättningen" av en hypotetisk, mycket hög totalsiffra till en personlig risk kan ge anledning till några reflektioner. Även en lekman inser nog att varken SSI eller någon annan kan ha någon verklig kunskap om, att just ett av tusen dödsfall i cancer någonstans i Europa skulle bero på en svensk kärnkraftolycka (och än mindre gäller detta självfallet om den hävdade kunskapen, att av 15 000 cancerdödsfall som under en 50 års period kommer att inträffa på jordens norra halvklot, skulle ett vara orsakat av Tjernobyloolyckan).

En annan fråga man kan ställa sig är varför den strålningsframkallade canceren fått den här exklusiva särställningen i alla risksammanhang. Det är inte så alldeles lätt att ge ett kortfattat svar på den frågan, bl.a. därför att den delvis är historiskt betingad. Men visst är det så, att det inte bara är dosresponsen för cancer, som i bestrålade befolkningar ibland förefaller vara linjär och sakna tröskeldoser, utan det är även fallet med exempelvis dödligheten som funktion av luftens halt av svaveldioxid och naturligtvis för effekter av cancerframkallande substanser.

Vilken typ av sådana risker vi än kalkylerar med, skulle antalet skadefall bli mycket stort även efter exponeringar av "homeopatiskt" små agenskonskoncentrationer eller doser. Efter exempelvis Seveso-olyckan i Italien eller efter Bhopal-olyckan i Indien skulle man ha fått fram helt andra dödstal än dem som nu offentliggjordes, om man räknat ut det "kollektiva" antal döds-

fall som kan ha orsakats av de cancerframkallande ämnen som läckte ut vid dessa olyckor. Men, som sagt, beräkningar av kollektivdoser och dessas konsekvenser görs endast om de utsläppta doserna är cancerframkallande på grund av sin radioaktivitet.

Vad är det nu vi som enskilda människor är mest intresserade av? Är det en för hela kontinenter framräknad och med nödvändighet hypotetisk siffra för det totala antalet cancerfall som är viktig för oss, eller är det sannolikheten för att vi som enskilda människor kan utsättas för en allvarlig risk? För människor i grannskapet av en förolyckad reaktor är inte bara den personliga cancerrisken större än vad den är på större avstånd, utan här tillkommer också en hög sannolikhet för att man skall åsamkas andra, mycket allvarliga och kanske livshotande skador, som människor på längre avstånd inte behöver befara.

I SSI-rapporten nämns, att en dos om 4 Sv dödar hälften av en bestrålad befolkning. Men i många av rapportens tabeller ges mycket högre dosvärden än så för den närboende befolkningen (dvs. för personer som befinner sig inom ungefär 1 mils avstånd i vindriktningen från den havererade reaktorn). Problemet med den betydande personliga risken för dessa människor ges dock inte alls samma utrymme i SSI-rapporten eller i massmedias rapportering, som den höga, hypotetiska siffran för det totala antalet europeiska dödsfall i cancer. Är denna diskrepans möjligen en fråga om siffrornas magi?

Av Tjernobyl-olyckan har vi lärt, att om vi inte gör något för att skydda barnen från de stora mängder radioaktiv jod de kan få i sig och därmed de mycket höga stråldoser deras sköldkörtlar kan utsättas för, riskerar vi att ett stort antal barn kan drabbas av sköldkörtelcancer. Det måste dock sägas, att härvidlag är vi avsevärt bättre förberedda i planeringen av skyddsåtgärder än vad man var i Vitryssland och Ukraina. Olyckan i Tjernobyl visade också det vi visste förut, nämligen att vissa områden, flera mil från utsläppsplatsen kan utsättas för särskilt stora nedfallsmängder på grund av lokala väderförhållanden. Problemen med höga stråldoser är därför inte enbart bundna till närområdet kring en förolyckad reaktor.

Skillnaden i grundsynen på riskerna med avseende på de låga stråldosernas cancerframkallande verkan och på dem som antas gälla i alla andra sammanhang, är i viss mening en fråga om tro och vetande. Man har aldrig kunnat iaktta en ökning av cancerfrekvensen i bestrålade befolkningar, då doserna legat under ca 200 mSv. De biologisk-teoretiska 'hållhakar' som man hänvisar till när man ändå hävdar, att cancer framkallas i direkt proportion till (linjärt med) stråldosen, även då denna är mindre än 200 mSv, har genom den moderna tumörforskningen visat sig otillräckliga för en så bestämd gränsdragning.

I valet mellan olika energialternativ tvingas vi till riskjämförelser, vilket i sin tur kräver, att bedömningskriterierna är identiska. Så är alltså inte fallet idag och detta är sannolikt en av de viktigaste orsakerna till att kärnkraften närmast axiomatiskt anses farligare än allt annat vi kan utsättas för. Den joniserande strålningen är förvisso inte ofarlig. Den kan åstadkomma både cancer och andra, mera akuta skador som vid högre doser kan vara direkt livshotande. Men våra möjligheter att mäta ytterst låga stråldoser och de stränga säkerhetskrav vi inte minst därför kan och bör ställa på kärnkraften innebär, att de idag realistiska alternativen, inklusive de s.k. förnyelsebara energikällorna, undantagslöst kan visas vara sämre ur hälso- och miljösynpunkt. Visst skall vi avveckla kärnkraften, men först sedan vi hittat något som i dessa avseenden är bättre.

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

# Visste Du att ...?

Hans Pedersen Dambo

När människor tar ställning i olika frågor utgår de ifrån vad de vet eller tror sig veta. "Vetandet" har de ofta fått från massmedia. Ju mer politiskt laddad en fråga är desto mer färgad blir informationen av informationslämnaren, som ofta är en journalist, politiker eller opinionsbildare utan sakkunskaper. I kärnkraftsfrågan har allmänheten serverats en mängd felaktigheter, myter och osanningar i rena sakfrågor, som inte borde kunna påverkas av subjektiva åsikter. Nedan har vi valt ut 4 exempel där vi försöker ge den oinvidge en korrektare bild av verkligheten.

## ... alla världens vindkraftverk ger tillsammans mindre el än Sveriges minsta kärnkraftverk

Vindkraften framhålls ofta i debatten som ett alternativ till kärnkraften och beskrivs gärna med ord som "uthållig", "förnybar", "miljövänlig" och "estetiskt tilltalande" i jämförelse med kärnkraftverk. Vi ska inte här diskutera vare sig dessa subjektiva värdeomdömen eller de ekonomiska subventionerna av vindkraften utan i stället granska de tekniska sakförhållandena.

Barsebäcksverket som är Sveriges minsta kärnkraftverk har två reaktorer som tillsammans kan producera 9 miljarder kilowattimmar el om året.

Alla världens 28 000 vindkraftverk producerar tillsammans 7,8 miljarder kilowattimmar under ett år. (Paul Gipe: *Wind Farms of the World 1995*). För att komma upp i Barsebäcksverkets produktion skulle det därför behövas 32 000 vindkraftverk. Eftersom det inte blåser dygnet runt med optimal vindstyrka måste de ha en effekt i kilowatt som motsvarar 4 hela Barsebäcksverk för att komma upp i samma årsproduktion.

För att få plats med alla dessa vindkraftverk skulle vi t.ex. behöva ställa dem i 3-dubbla rader längs hela den svenska kusten från Haparanda via Smygehuk och vidare upp till norska gränsen.

En besvärande faktor är att en kall vinterdag när vi behöver som mest el, blåser det sällan. Därför är det svårt att ersätta ett befintligt kraftverk med vindkraft. Man kan däremot minska produktionen i andra kraftverk i takt med vindkraftens tillskott, men en backup måste alltid finnas tillgänglig, eftersom el är en färskvara som måste tillverkas i samma ögonblick som den ska användas.

## ... Du är själv radioaktiv

Sedan Tjernobyloolyckan inträffade har svenska folket fått ta del av många larmrapporter i media om radioaktivitet i sjöar, fiskar, rådjur, svamp m.m. där också radioaktiviteten angivits kvantitativt i ett visst antal becquerel. Många människor kände sig oroade av värden som ofta angavs i hundratal eller tusental och därför lätt upplevdes som höga eller farliga. Det kan vara värt att jämföra med att mäta avstånd enbart i millimeter. 600 miljoner mm mellan Stockholm och Malmö skulle förmodligen upplevas som en lång sträcka för den som inte visste hur liten en mm är.

Radioaktivitet är något helt naturligt som härstammar från The Big Bang varifrån jorden skapades och finns alltså överallt omkring oss. Varje människa är också radioaktiv. En vuxen människa har ca 7 000 becquerel i sin egen kropp ständigt och jämnt från framför allt kalium 40 men även kol 14, radium och en del andra radioaktiva grundämnen. Vi ger oss själva en intern stråldos om 0,2 millisievert varje år. Inte mycket men ändå dubbelt så mycket som ett svenskt kärnkraftverk maximalt får ge sina närmaste grannar och 100 gånger mer än vad medelsvensken i verkligheten får från all svensk kärnkraft.

Om ett evenemang har fyllt Globen i Stockholm med 16.000 åskådare sker det faktiskt ett radioaktivt utsläpp om 112 miljoner becquerel när evenemanget är slut och åskådarna lämnar Globen. Om de åker buss därifrån med 64 passagerare per buss blir det 250 radioaktiva transporter med 448.000 becquerel i varje. Detta innebär naturligtvis ingen radiologisk fara, men ger kanske kommande Becquerelrapporter ett nytt perspektiv.

De allra flesta ämnena lämnar inte den egna kroppen och kan inte påverka någon annan. Bland det som kommer ut finns kol 14 som följer med utandningsluften.

Beträffande innebörden av Becquerel och milliSievert hänvisar vi till Nils-Erik Nilssons artikel.

## ... Stockholm är farligare än en urangruva

Våra tre storstäder Stockholm, Göteborg och Malmö har på grund av sin miljö en högre cancerdödlighet än övriga landet. Kön- och ålderskorrigerade data ur cancerregistret för en hel 10-årsperiod visar att om en person från övriga landet flyttar till Stockholm, Göteborg eller Malmö, ökar sannolikheten för att dö i cancer så pass mycket att om hela denna ökning i stället hade förorsakats av joniserande strålning, då skulle det motsvara en dosrat om ungefär 10 mSv/år varje år under resten av livet.

Vid urangruvorna Olympic Dam och Ranger i Australien får den mest utsatta yrkesgruppen en stråldos som är mindre än 5 mSv/år under de år de tillhör denna personalgrupp.

*Man kan därför med fog säga att det ur miljösynpunkt är farligare för en svensk att flytta till Stockholm, Göteborg eller Malmö från någon annan plats i Sverige än att börja arbeta i en australisk urangruva.*

## ... Plutonium har i decennier använts som energikälla i pacemakers

Grundämnet plutonium har fått ett oförskyllt dåligt rykte genom att många kärnkraftmotsståndare spridit osanna påståenden som "dödens gift", "världens farligaste ämne", "en miljondels gram är dödande" m.m.

Plutonium är förvisso både radioaktivt, toxiskt och en tungmetall. Det finns inte i naturen i dag annat än i små mängder. För ett par miljarder år sedan, när naturliga kärnreaktorer var verksamma, bildades plutonium i naturen och "slutförvarades" naturligt.

Tungmetaller är vi vana vid i det dagliga livet. Bly har väl de flesta varit i kontakt med. Alla är miljöskadliga och ska därför inte slängas på soptippen hur som helst. Ur tungmetallsynpunkt är plutonium inte unikt.

Giftigheten då? Plutonium är ett radiologiskt gift som kan komma in i kroppen genom t.ex. inandning eller öppna sår och skada vävnader genom hög energi från alfasönderfall. Koncentrerat plutonium är ett intet i giftighet jämfört med t.ex. botulintoxin eller sarin som den japanska "dödssekten" hade tillverkat. Flugsvampsgift är också mycket giftigare än plutonium och betydligt lättare att komma över.

Radioaktiviteten varierar mycket beroende på vilken isotop det rör sig om. Det man talar mest om i debatten är Pu-239, som finns i det använda kärnbränslet tillsammans med flera andra plutoniumisotoper. Pu-239 kallas

också vapenplutonium och framställs i ren form i särskilda vapenreaktorer. Använt kärnbränsle används inte av någon kärnvapenmakt till kärnvapen. Det beror på att kärnbränslet står i reaktorn i ca 5 år innan det är utbränt och byts ut. Då innehåller bränslet bara 1% plutonium som dessutom inte är av vapenkvalitet. För att utvinna plutonet ur kärnbränslet krävs först uppberedning, som är mycket komplicerat. Vill man sedan få vapenkvalitet krävs dessutom ytterligare bearbetning.

Därför är det mycket enklare för kärnvapenmakterna att framställa vapenplutonet i särskilda vapenreaktorer, där man kan ta ut bränslet under drift i rätt ögonblick när koncentrationen av Pu-239 är som störst. För bränslet stanna kvar för länge klyvs Pu-239 upp och halten minskar.

Plutonet är alfastrålande liksom t.ex. uran och radon. Alfastrålningen kan inte tränga genom huden och plutonet är ofarligt om man inte först omvandlar det till en form som man t.ex. kan andas in. I så fall kan alfapartiklarna skada de tunna lungväggarna och på sikt öka risken för lungcancer. Det finns andra saker som ökar den risken ännu mer.

Pu-239 har en halveringstid om 24.000 år. Radioaktiviteten är därför ganska låg, eftersom det tar 24.000 år för hälften av atomerna att sönderfalla och avge sin energi. Vid sönderfallen avges värme och en 60-grams rund bit plutoniummetall av nära vapenkvalitet är så varm att den är svår att hålla i en knuten hand med gummihandske på.

Isotopen Pu-238 har en halveringstid om bara 87 år och är därmed nästan 300 gånger mer radioaktiv än Pu-239 och följaktligen mycket varmare. En tillräckligt stor bit kan få vatten att koka och en 60-grams bit går inte att hålla i handen trots gummihandskar. Men fortfarande är det alfastrålning det handlar om som alltså inte kan tränga igenom huden.

Denna isotops värmenergi kan under lång tid direkt omvandlas till elektricitet. Sådana plutoniumbatterier har använts i Apolloprojektets månuppdrag för att driva seismisk och annan utrustning på månytan. Navigationsfyrar, satelliter och väderstationer har också drivits med plutonium.

Ett viktigt användningsområde har i decennier varit som energikälla till pacemakers. På så vis har alltså plutonium opererats in i kroppen för att hålla hjärtpatienter vid liv. Naturligtvis var det inkapslat. Batteriutvecklingen har gått framåt, så i dag finns det andra ämnen som kan ersätta plutonet. Därför har man i varje fall i Sverige slutat använda plutonium som drivkälla i pacemakers. Ett sådant batteri innehöll 160 mg Pu 238 och 1976 fanns det 2 000 personer med sådana batterier.

Liksom för många andra ämnen finns det gränsvärden för plutoniumintag. En vuxen människa kan vid ett enda tillfälle äta nära 1 milligram Plutoniumdioxid utan att överskrida gränsen för maximalt tillåtet innehåll i krop-

pen men får inte upprepa det. Detta gränsvärde har dessutom en betydande säkerhetsmarginal.

För inandning i aerosolform av plutonium är gränsvärdena lägre. Gränsvärdet är här  $0,1 \text{ Bq/m}^3$  av 1 mikrometers partiklar i luft under normal arbetstid (40 timmars vecka).

## Becquerel, Röntgen, Gray och Sievert – vad är det??

*Nils-Erik Nilsson*

I debatten om kärnkraft talas det ofta om radioaktivitet och joniserande strålning. Då förekommer olika sorter och begrepp som halveringstid, Becquerel, Curie, Röntgen, Gray, Sievert, Rem, Rad alfastrålning, gammastrålning osv. Dessa olika sorter och begrepp kan verka förvirrande. Jag skall därför försöka åskådliggöra vad dessa sorter står för och hur de hänger samman.

Låt oss först konstatera att radioaktiva ämnen, vilket egentligen betyder "ämnen som avger strålning", alltid funnits i vår miljö. Praktiskt taget alla ämnen har någon variant, isotop, som är radioaktiv. Naturligt kalium innehåller t.ex. en viss andel  $\text{K}^{40}$  som är radioaktivt. En sådan radioaktiv atom innehåller för mycket energi och vill därför förändras och göra sig av med denna energi. Denna förändring kallas radioaktivt sönderfall.

Vid radioaktivt sönderfall avger atomkärnorna en liten mängd joniserande strålning. Denna strålning är atomens överskottsenergi. Den kallas joniserande därför att strålningen har en så stor energi att den kan slå ut en elektron från en atom som den träffar. Denna får då en elektrisk laddning och kallas jon.

För att förstå en massa olika begrepp när det gäller detta radioaktiva sönderfall och joniserande strålning kan vi likna radioaktiva atomer vid apparater som kan kasta ut bollar i alla riktningar. Bollarna den kastar ut är strålningen som utsänds vid sönderfallet. Den joniserande strålningen kan vara alfa- beta- eller gammastrålning eller ev. neutronstrålning. Låt alfastrålningen motsvara stora medicinbollar, betastrålningen lite mindre fotbollar och gammastrålningen små golfbollar.

Strålningen kan också ha olika energi. Låt detta motsvara hur mycket kraft man använder när man kastar bollarna. Ju mer kraft man använder ju fortare går bollarna, men med lika stor kraft går de större bollarna långsammare än de mindre. Olika radioaktiva ämnen (slag av bollkastare) har olika egenskaper när det gäller vad för slag av strålning (bollar) som skickas ut

*Hans Pedersen Dambo är sekreterare i Miljövänner för kärnkraft och har arbetat med kärnkraftinformation sedan 1985.*

och vilka energier strålningen har (hastigheter hos bollarna). Genom att mäta strålningsslag (typ av bollar) och energier (deras hastighet) kan man bestämma vad det är för ett ämne som faller sönder, d.v.s. vad det är för slags bollkastare i vår liknelse.

Vad innebär då de olika sorterna? Först Becquerel eller Curie. Det är antalet sönderfallande atomer per sekund. I vår liknelse är det hur många av bollkastarna som faktiskt kastar bollar (eller bollkombinationer) per tidsenhet. Även om vi känner igen dem på de bollar som vi kan mäta storlek och energi på så säger antalet aktiva bollkastare, "Becquerel", inget om vad det är för slag av "bollar", hur hårt de kastas ut, i vilken riktning eller vad de träffar. Det talar bara om hur många "bollkastare" per sekund som faktiskt kastat bollar. Skillnaden mellan Becquerel (och Curie) är bara storleken på sorten precis som kilometer (och tum) båda är längdmått men olika stora. Tum och Curie är också äldre sorter och sådana kommer i fortsättningen att sättas inom parentes.

När en atom fallit sönder har den sänt ut sin strålning, Detta kan man likna vid att varje bollkastare bara har en laddning bollar att kasta ut. Om det totalt sett finns ett visst antal radioaktiva atomer, "bollkastare", så kan man ju tänka sig att de skickar ut bollar i snabb takt så att nästan alla skickar ut sina bollar inom en kort tid, eller att det hela går långsammare. Detta är olika för olika radioaktiva ämnen. Man hör ofta talas om begreppet halveringstid. I denna liknelse är det den tid det tar tills hälften av alla bollkastare kastat ut sina bollar. Det blir då självklart att sådana ämnen som har kort halveringstid motsvarar bollkastare som skickar ut sina bollar i snabb takt. Man kallar också detta för att de har hög specifik aktivitet. Kastar de ut sina bollar mera sällan får de låg specifik aktivitet och då också lång halveringstid.

Precis som med bollarna är det först när de träffar något som de åstadkommer någon effekt. Det är först då som de t.ex. kan vara farliga. Och precis som för bollarna beror detta på var man befinner sig i förhållande till bollkastaren, strålningskällan, och om bollarna når fram. De stora "alfabollarna" når t.ex. inte särskilt långt.

När det gäller de effekter som strålningen åstadkommer finns det flera olika sätt att mäta dessa och vi får därmed också olika sorter. Låt oss börja med sorten Röntgen. Den anger hur mycket strålningen påverkar luften och mäter egentligen den jonisationsladdning som strålningen åstadkommer i ett kg luft. I vår liknelse blir det hur mycket energi luften tar upp från bollarna dvs. hur mycket luften värms upp av att bollarna bromsas i den. Här börjar det nu spela en viss roll vad det är för slag av bollar och vilken hastighet de har. Precis som medicinbollen når inte alfastrålningen så långt

utan avger sin energi på en mycket kort sträcka. Fotbollen eller betastrålningen når lite längre och delar ut sin energi på ett lite större område. Golfbollen eller gammastrålningen når mycket längre och sprider då också ut sin energi över ett mycket större område.

Detta hur mycket strålningen, eller bollarna i vår liknelse, påverkar luften ger ju ett visst begrepp om hur den skulle påverka oss själva, om vi befann oss i "bollregnet". Det blir ett ganska bra mått på hur farligt det är att gå in i strålningsfältet eller bollregnet. Det ger ett begrepp om hur många bollar som man kan träffas av och om de kan åstadkomma någon skada. Men det är fortfarande påverkan på luft som mäts. Biologisk vävnad kan ju tänkas påverkas på annat sätt.

När man skall mäta hur mycket strålningen påverkar människor eller djur så använder man sorten Gray (eller Rad). Den mäter hur mycket energi som tas upp av det som träffas av strålningen. I vår liknelse blir det hur mycket vår kropp värms upp av att bollarna träffar oss och bromsas upp. Nu blir det avgörande hur många bollar som faktiskt träffar oss. Det är ju t.ex. viktigt var vi står i förhållande till "bollkastaren" och om det finns något "skyddsnät" mellan oss och bollarna. Precis som när det gäller Becquerel (och Curie) eller km och (tum) så är Gray (och Rad) olika storlekar av samma sak.

Nu är det ju inte säkert att det är själva energiupptagningen, uppvärmningen i vår liknelse, som är det riktiga måttet på "farligheten". Det kan ju vara olika om den åstadkoms av stora alfabollar eller små gammabollar. Man har därför sett ett behov av att införa ett bättre mått på strålningens "farlighet". Därför har man infört begreppet dosekvivalent som mäts i sorten Sievert (eller Rem). Då har man tagit hänsyn till att stora "alfabollar" kan ge större skada om de verkligen avger hela sin energi inuti kroppen osv. Man har infört en kvalitetsfaktor som är olika för olika slags strålning. Precis som tidigare när det gällde Gray (och Rad), eller Becquerel (och Curie) eller kilometer (och tum) så är Sievert (och Rem) olika storlekar för samma sak.

Det är alltså dessa sorter, Sievert (eller Rem), som man skall använda om man vill tala om hur farlig en viss strålning kan vara. När det gäller bollkastarna och man vet var de finns, hur många som är aktiva per sekund, vad det är för slags bollar de kastar ut och vilken hastighet bollarna har så kan man räkna ut hur farligt det är för en människa att vistas på ett visst ställe i närheten av bollkastarna. På samma sätt kan man räkna ut vilken dos, "Sievert", man får, dvs. hur farligt det är, om man vet var det radioaktiva ämnet finns, hur snabbt det sönderfaller, "Becquerel", vilken slags strålning det ger vid sönderfallet och vilka energier den har. Man kan naturligtvis också

räkna ut hur mycket den skulle jonisera luft, "Röntgen", eller hur mycket energi som biologisk vävnad skulle ta upp, "Gray". Vill man veta den medicinska inverkan, "farligheten", är det naturligtvis dosekvivalenten, "Sievert", som man skall ta reda på.

Efter detta resonemang kan det verka konstigt att man satt gränsvärden för livsmedel i Becquerel. Detta är emellertid ett lite slarvigt och förenklat sätt att i debatten säga hur gränsvärdet bestäms. Egentligen är gränsvärdet satt i "Becquerel från Cs<sup>137</sup> per kg livsmedel". Här har man då angett att det gäller cesiumisotopen med masstalet 137. Därmed är strålningsslaget (typ av bollkastare) fastlagt. Det är också sagt att det gäller livsmedel och man räknar då med att man äter cesiet. När man vet att det är det kemiska ämnet cesium man äter så vet man också hur det sprids i kroppen och hur länge det stannar kvar. Därmed vet man var strålningskällan (bollkastaren) finns. Det är först när man har alla dessa underförstådda uppgifter som man kan räkna ut stråldosen man får av att äta 1 kg av livsmedlet. Om man då antar att man äter ett visst antal kg per år av det så kan man naturligtvis också få fram en årsdos.

De gränsvärden vi har är satta på så sätt att man bestämt sig för att begränsa dosen, "Sievert", till ett visst värde. När man vet att den helt övervägande dosen kommer från Cs<sup>137</sup> kan man, genom att man vet hur det sprids i kroppen och vad för slags strålning det avger, bestämma hur många sönderfall denna stråldos motsvarar. Om man också vet ungefär hur mycket man äter av detta livsmedel per år kan man sätta ett gränsvärde i Becquerel Cs<sup>137</sup> per kg av livsmedlet. Att man gör detta beror på att så länge man har livsmedlet utanför kroppen så är det bara antalet sönderfall, som ju mäts i Becquerel, som man faktiskt kan mäta. Då blir det praktiskt att sätta gränsvärdet i denna enhet även om antalet sönderfall, "Becquerel" i allmänhet inte är något mått på "farlighet".

## Storheter och enheter

Storhet	Enhet	Definition
Aktivitet	becquerel (Bq)	1 Bq = 1 sönderfall/s
Absorberad dos	gray (Gy)	1 Gy = 1 joule/kg
Ekvivalent dos	sievert (Sv)	Absorberad Dos × Kvalitetsfaktor*
Exposition	röntgen (R) coulomb per Kg	1 R = 2,58*10 <sup>-4</sup> coulomb/kg

\*Kvalitetsfaktorn tar hänsyn till slag av strålning.

Fransmannen Henri Becquerel (1834–1908) upptäckte strålningen från naturliga sönderfall.

Engelsmannen Harold Gray (1905–1965) var banbrytare för forskning kring tumörvävnaders strålkänslighet.

Svensken Rolf Sievert (1896–1966) byggde upp den svenska strålskyddsverksamheten och tog initiativet till den internationella strålskyddskommissionen ICRP.

Tysken Wilhelm Röntgen (1845–1923) upptäckte och studerade det som han kallade X-strålar och som vi idag kallar röntgenstrålar.

*Nils-Erik Nilsson är civilingenjör vid Ringhalsverket och styrelseledamot i Miljövännen för kärnkraft.*