Hans Pedersen Dambo (red.)

Kärnkraft i människans tjänst

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

Detta är den fjärde boken i Miljövänners för Kärnkraft:s skriftserie om kärnkraft. Tidigare böcker i serien är *Kärnkraft – avveckla eller utveckla, 1995, Kärnkraft ur olika perspektiv, 1996 och Kärnkraft i dag och i morgon, 1997.*

Med titeln *Kärnkraft i människans tjänst* vill vi påminna om de fördelar kärnkraft, kärnenergi i andra former och strålning inneburit för hälsa, miljö, välstånd och teknisk utveckling.

Björn Wahlström försöker i den första artikeln få oss att se på dagens problem ur en helt ny synvinkel.

Att världen står inför stora miljöproblem i framtiden är uppenbart. IAEA:s förre generaldirektör, *Hans Blix,* tar upp dessa i en artikel, som också visar vikten av ett globalt synsätt.

Per-Eric Ahlström och *Ingemar Lindholm* behandlar miljöfrågor i kärnbränslecykeln från uranbrytning till avfallshantering.

Ofta utmålas ett haveri vid Barsebäcksverket som den ultimata olyckan med vittgående konsekvenser i både Sverige och Danmark. *Jan-Olov Liljenzin* gör en ingående genomgång av säkerheten i de svenska reaktorerna och beskriver också ett härdsmälteförlopp.

Atomförsäkringspoolens förre VD, *Gunnar Andersson,* redogör för vad som verkligen gäller i försäkringsfrågan.

Björn Wahlström berättar i en artikel om strålning på ett lättförståeligt sätt och *Ragnar Hellborg* beskriver i en mer ingående artikel olika tillämpningar av strålning i medicinen.

Att kärnenergin har indirekta fördelar och tillämpningar av mycket större omfattning än kärnkraften är nog okänt för många. *Imre Pázsit* visar på ett antal sådana tillämpningar.

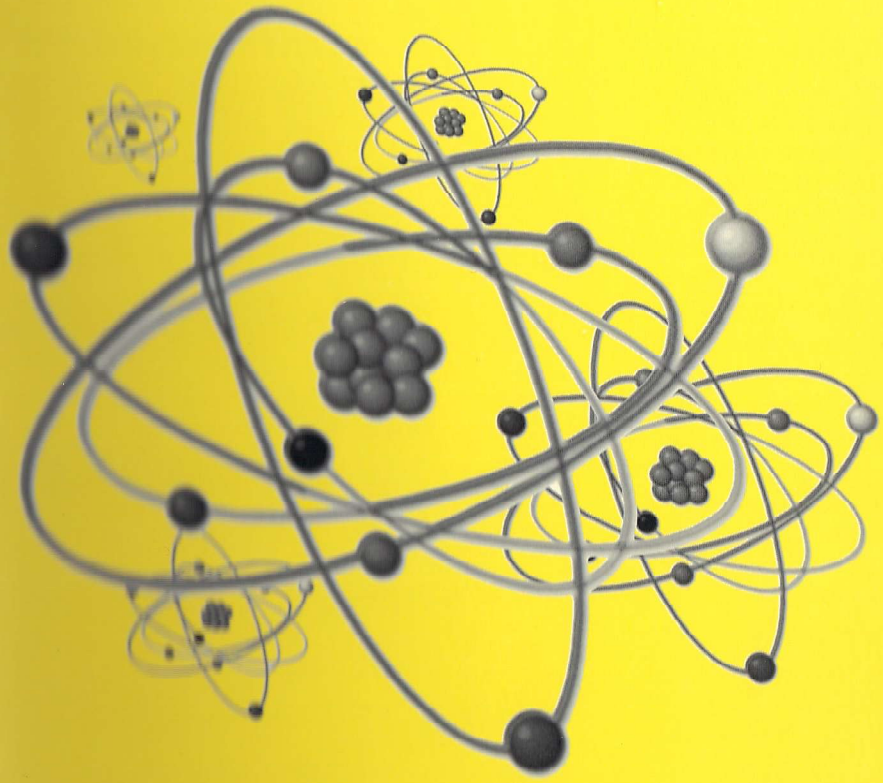
Slutligen beskriver *Hans Blix* med en artikel om IAEA:s många verksamhetsområden, som är betydligt fler än kärnkraft och kärnvapenövervakning.

Miljövänner För Kärnkraft, Box 83, 430 24 Väröbacka
Tel 0340-67 82 90, E-post mfk@algonet.se, www.algonet.se/~mfk/

ISBN 91-630-7857-0
© Miljövänner För Kärnkraft 1999

Hans Pedersen Dambo (red.)

Kärnkraft i människans tjänst



Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

Hans Pedersen Dambo (red.)

Kärnkraft

i människans tjänst

Ett debattunderlag från Miljövänner för Kärnkraft

ISBN 91-630-7857-0
© Miljövänner för Kärnkraft 1999

Tryck: Krontryck AB, Eslöv 1999

Innehåll

Förord
Hans Pedersen Dambo 5

Om kärnkraften varit först
Björn G Wahlström 7

Kärnkraften och miljön
Hans Blix 16

Miljön i kärnbränslecykeln – urangruvor och kärnavfall
Per-Eric Ahlström – Ingemar Lindholm 28

Kärnkraft och säkerhet
Jan-Olov Liljenzin 41

Kärnkraftsförsäkringar
Gunnar Andersson 53

Vår dagliga dos – Om strålning och risker
Björn G Wahlström 62

Strålning i medicinen – till nytta för människan
Ragnar Hellborg 73

Kärnenergi i samhällets tjänst
Imre Pázsit 92

IAEA – en organisation för kärnenergi mot kärnvapen
Hans Blix 101

Förord

Hans Pedersen Dambo

Detta är den fjärde boken i Miljövänner för Kärnkraft:s skriftserie om kärnkraft. Tidigare böcker i serien är:

- *Kärnkraft – avveckla eller utveckla, 1995*
- *Kärnkraft ur olika perspektiv, 1996*
- *Kärnkraft i dag och i morgon,1997*

Denna gång har vi valt titeln *Kärnkraft i människans tjänst* för att påminna om de fördelar både kärnkraft, kärnenergi i andra former och strålning inneburit för hälsa, miljö, välstånd och teknisk utveckling – en sida som det tyvärr inte talas så mycket om i samhällsdebatten.

Ibland kan det vara välgörande att frigöra sig från sitt konventionella tänkande och se på dagens problem ur en helt ny och imaginär synvinkel. Detta ger sig Björn Wahlström i kast med i den första artikeln.

Att världen står inför stora miljöproblem i framtiden är uppenbart. IAEA:s förre generaldirektör, Hans Blix, tar upp dessa i nästa artikel, som också visar hur viktigt det är att gå utanför den egna sfären och betrakta de globala problemen.

Per-Eric Ahlström och Ingemar Lindholm fortsätter miljödiskussionen genom en mera ingående behandling av miljöfrågor i kärnbränslecykeln från uranbrytning till avfallshantering.

Ofta utmålas ett haveri vid Barsebäcksverket som den ultimata olyckan med vittgående konsekvenser i både Sverige och Danmark. Jan-Olov Liljenzin gör en ingående genomgång av säkerheten i de svenska reaktorerna och beskriver också ett härdsmälteförlopp. Förhoppningsvis får läsarna en något mer nyanserad syn på detta än vad som ofta framförs i media.

En vanlig angreppspunkt när det gäller kärnkraft är försäkringsfrågan. Atomförsäkringspoolens förre VD, Gunnar Andersson, redogör i en artikel för vad som verkligen gäller i detta avseende.

Strålning upplevs av många människor som något skrämmande och rent av onaturligt. Björn Wahlström berättar i en artikel om strålning på ett sätt som är förståeligt för de flesta.

Efter detta behandlar MFK:s ordförande Ragnar Hellborg i en ingående artikel olika tillämpningar av strålning i medicinen och hur den är till nytta för människan och väsentlig för att rädda liv.

Att kärnenergin har indirekta fördelar och tillämpningar som är av mycket större omfattning än kärnkraften är nog okänt för många. Imre Pázsit visar på ett antal sådana tillämpningar.

Slutligen återkommer Hans Blix med en artikel om IAEA:s många verksamhetsområden. Den som till äventyrs trodde att IAEA enbart sysslade med kärnkraft och kärnvapenövervakning drar här nya lärdomar.

Nytt för årets bok är att vi också angett e-postadresser och hemsidor i samband med vissa författarpresentationer. Ta också gärna kontakt med Miljövänner för Kärnkraft, mfk@algonet.se, www.algonet.se/~mfk.

Hans Pedersen Dambo har arbetat med kärnkraftsinformation sedan 1985
hans.pedersen-dambo@telia.com.

Om kärnkraften varit först

Björn G. Wahlström

Låt oss för en stund glömma världen vi lever i. Glöm bort hur allt ser ut och fungerar. Glöm alldeles speciellt bort hur världens energiförsörjning är ordnad. Globalt sett bygger den ju nästan totalt på förbränning av kolföreningar, dvs. stenkol, olja, naturgas, torv, ved mm. Kärnkraftens andel är endast några få procent av totalenergin. Inte ens av världens elström är kärnkraftens andel större än 17 procent. Men som sagt, glöm bort allt detta. Nollställ ditt vetande. Utgå från att världen kunde ha fått en helt annan start. Var med och lek en stund. Vissa lekar är lärorika!

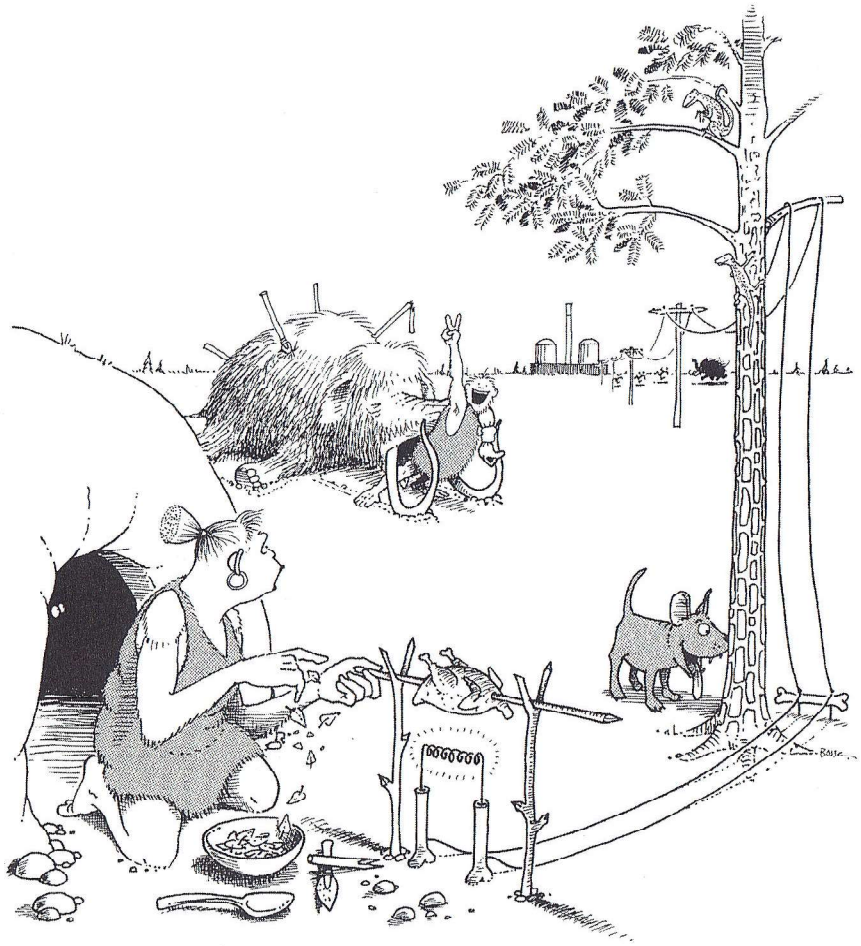
Låt oss leka med tanken att inte elden uppfunnits först - utan kärnkraften. Vi flyttar oss i vår tanke till en förhistorisk tid, där grottmänniskorna grillade sin antilop över elektriska motstånd värmda med kärnkraft, där järnålderns människor tvingade järnet ur malmen med kärnvärme och där bronsålderns folk smälte sina legeringar med ström från kärnkraftverk.

Eld och fossila bränslen var okända begrepp. England var inte nedsotat av hundratals kolkraftverk, man hade aldrig bränt brunkol i öststaterna, atmosfären var totalt obefläckad av drivhusgaser och ingen hade hört talas om sura regn. Såväl den tunga industrin som offentliga sektorn och privatkonsumenterna hade sedan urminnes tider fått all sin energi från uranet.

Låt oss tänka oss att vi i denna fantasivärld närmar oss den tid, när man börjar ana ett slut på uranresurserna. Häftiga prisvariationer vittnar om en minskande tillgång, och de stater som sitter på de trytande tillgångarna planerar ransoneringar. Allt tyder på att man redan nu måste börja söka nya energiformer som ska kunna ersätta kärnkraften i världen inom ett tiotal år eller så.

I denna bakvända värld ska vi nu få åhöra ett mycket intressant föredrag av den välkände energiprofeten Albrecht Onestone. Enligt förhandsreklamen ska han avslöja nyheter som sagts vara både fascinerande och chockerande, som väcker hopp och betänkligheter, som kan innebära jor-

dens räddning eller undergång. Vi bänkar oss därför förväntningsfullt i en av de främsta raderna.



Talaren stiger långsamt upp i talarstolen och tittar ut över publiken. Under några sekunder ger han oss en chans att kolla in honom ordentligt. Sedan harklar han sig diskret, tar en liten klunk ur vattenglaset, knackar på mikrofonen för att försäkra sig om att den är påkopplad och inleder därefter sitt föredrag:

"Mina Damer och Herrar,

– Världen står idag inför en ny och främmande, kanske rentav skrämmande situation: Uranet som varit vår och våra förfäders, ja rentav våra urfäders trogna tjänare, hotar nu att ta slut. Kanske inte helt slut med en gång, men det är uppenbart att tillgångarna snabbt blir allt knappare. Man har redan varit tvungen att ta i bruk allt mindre lönsamma fyndigheter. Men också dessa har naturligtvis sin gräns. I något skede i en relativt nära framtid står vi där utan uran och kärnenergi.

Men, mitt herrskap, det finns inget skäl till panik. Ingen är så klok som människan – förutom naturligtvis ingenjörerna. Dessa har redan i flera års tid intresserat sig för en ny tänkbar energiform, som kan komma oss till hjälp den dag uranet är slut, *slut*, definitivt slut."

Här tar sig talaren en konstpaus, för att väcka vår nyfikenhet inför den nyhetsbomb han nu ska låta brisera. För att förlänga pausen på ett naturligt sätt och höja publikens spänning till bristningsgränsen, läppjar han igen en gång på vattenglaset, ställer det eftertänksamt tillbaka och fortsätter:

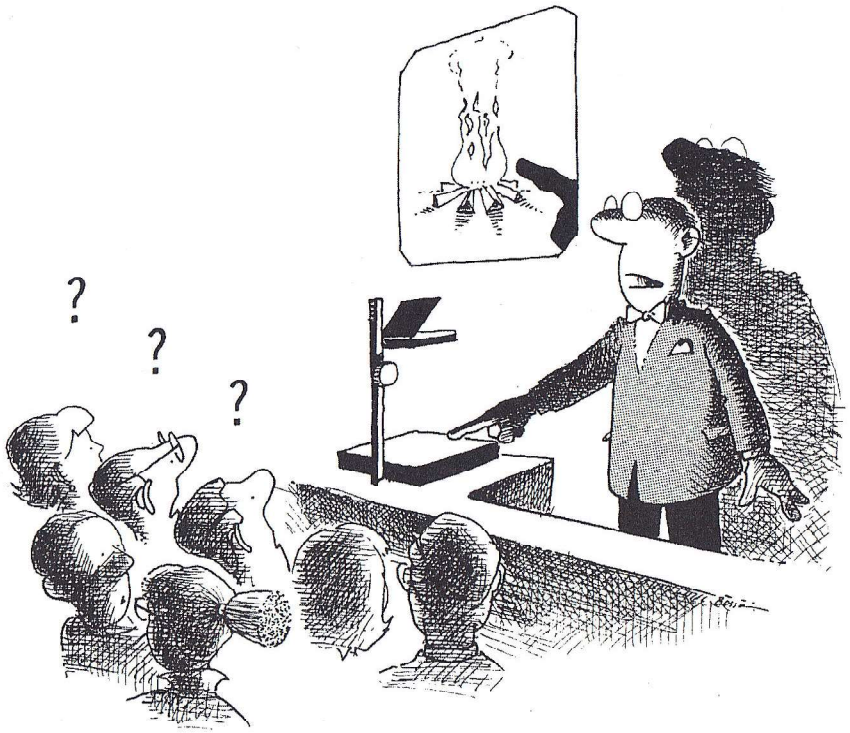
– "Det förhåller sig nämligen så, att det i princip verkar möjligt att producera värme genom en nyupptäckt process benämnd oxidering eller förbränning! Genom denna process, som är en kemisk process – inte fysikalisk som kärnklyvningen, bör man kunna få till stånd en självunderhållande, exoterm kedjereaktion. Enklare sagt skulle det innebära en fortgående reaktion som frigör värme. Som onyttig biprodukt uppstår strålning av det synliga ljusspektrets våglängd.

Energitätheten hos denna tänkbara energiform är emellertid flera fantiljoner gånger lägre än hos den vardagliga kärnklyvningen. De internationella forskarna har därför givit den nya värmekällan namnet *Energy of Low Density* (energi med låg täthet), förkortat E L D. På yrkesslang säger man helt enkelt "eld".
Elden skulle då på sätt och vis ersätta den välkända kärnfissionen, och i stället för uran skulle man som bränsle nyttja kolväteförcningar, som ligger på hundratals meters djup i jordskorpan. Dessa förekommer i såväl fast som flytande form och som gas.

Den fasta formen av kolväten kallas för "stenkol" eftersom den är stenhård. Den flytande formen har på grund av sin oljiga konsistens fått namnet "olja". De gasformiga kolvätena, som förekommer i naturen har helt enkelt döpts till "naturgas". Tillsammans kallas alla ovan nämnda

kolväteföreningar med ett mycket betecknande namn för *fossila* bränslen. Fossil betyder, som vi alla vet, något gammalt, primitivt, stenålders . . .

Denna något nedlåtande benämning "primitiva stenåldersbränslen" är beskrivande och klart motiverad, ty förbränning av kolväten är förknippad med en hel del otympliga lösningar och miljömässiga olägenheter av en art och ett omfång, som vi hittills totalt besparats från."



Jag kan knappt tro mina öron! Skulle det vara möjligt att hitta en ersättare för kärnkraften? Har då aldrig hört på maken. Detta är en verklig sensation! Nu kommer vi emellertid till den knepiga biten, miljöfrågorna. Kan en ersättande energiform bli lika skonsam för atmosfären och miljön i övrigt som kärnkraften? Talaren fortsätter:

– "Det första problemet ligger däri, att förbränningsprocessen avstannar om den innesluts i ett gastätt tryckkärl. Processen kan alltså inte, på det sätt vi vant oss vid, hygieniskt och miljövänligt isoleras från sin omgivning. Detta känns ju redan i sig motbjudande och förnuftsvidrigt och kommer med säkerhet att stöta på synnerligen starkt motstånd hos dem

som värnar om en ren miljö. Den tekniska orsaken är dock uppenbar: processen kräver en ständig tillförsel av stora volymer friskluft.

Värre är dock det som sker med luften under dess användning. Vid förbränningen av fossila bränslen förenar sig varje kolatom i bränslet med två syreatomer. Tillsamman bygger de på så sätt upp en molekyl koldioxid. Ett normalstort fossilt kraftverk, skulle bränna cirka 300 ton stenkol i timmen, varvid 1 000 ton koldioxid skulle produceras. Den sammanlagda mängden från all kolförbränning kunde leda till mätbar ökning av atmosfärens koldioxidhalt, vilket skulle leda till en förhöjning av jordens temperatur.

Det säger sig självt att omhändertagandet av dessa ofattbara avfallsmängder – 1 000 ton per timme per kraftverk – är en omöjlighet. Våra välkända avfallshanteringsmetoder, som alltid utgjort en garanti för naturens renhet, skulle inte kunna tillämpas vid användning av kolbaserade bränslen. Till exempel ingjutning i betong eller bitumen eller inkapsling av avfallet i kopparkapslar med påföljande slutdeponering i urberget, är tillämpliga endast när det gäller de pyttesmå avfallsmängder vi vant oss vid från kärnkraftsindustrin.

En del forskare anser dock att man kunde frångå den hittills förhärskande principen för avfallsbehandling *Koncentrera-Isolera*. De anser att vi måste vänja oss vid ett nytänkande: det är inte längre självklart att energiproduktionens avfall skall koncentreras och isoleras från naturen. Vilken motbjudande tanke!

De mest radikala "fossila forskarna" – så kallar jag dem mer än gärna – vill rentav införa en ny avfallsfilosofi, som internationellt kallas DD från *Dilute-Disperse*. Min fyndiga svenska översättning skulle då vara SS, det vill säga *Späd ut-Sprid ut*. Tanken är den, att man kunde låta allt det gasformiga avfallet gå rakt upp i atmosfären genom höga skorstenar, på samma sätt som vi släpper ut de små mängder tritium som förekommer i kärnkraftverkens gasreningssystem.

Jag anser den tanken vara totalt ansvarslös! Tritium är som känt ett i naturen normalt förekommande ämne, radioaktivt väte, som alltid funnits där och som ständigt nyproduceras i naturens egna processer. Det har aldrig påvisats att naturen lider av detta. ELD-energins förbränningsgaser skulle däremot förutom koldioxiden komma att innehålla många för naturen och mänskligheten skadliga och onaturliga kemiska ämnen såsom kväveoxider, svavelföreningar och tungmetaller.

I detta sammanhang vill jag gärna påminna om att alla radioaktiva ämnen alltid avklingar, vilket betyder att de spontat förintar sig själva. Mängden i naturen minskar ständigt, såvida man inte producerar mera.

Radioaktiviteten försvinner med tiden. Många kemiska ämnen är däremot för evigt beständiga.

Det säger sig också självt att SS-metoden *de facto* inte leder till något skydd av miljön. Att späda ut och sprida ut skadliga ämnen ger ingen total vinst när man betraktar helheten. Med höga skorstenar och god utspädning kan man visserligen undvika *stora skador* på *små områden*, till exempel lokal snabbförgiftning av naturen och akut skogsdöd. I stället får man *små skador* på *stora områden*, bland annat ökande mängder tungmetaller i naturen och allmän försurning av mark och sjöar.

Tänk också på hälsorisken! Även välfungerande kolkraftverk skulle sprida en hel del fina partiklar med förbränningsgaserna. Denna partikelförorening och de därmed följande tungmetallerna skulle enligt tillförlitliga beräkningar innebära en förhöjd risk för lungcancer hos befolkningen i kraftverkets omgivning.

Beträffande kärnkraften vet vi ju, att hypotesen om förhöjd cancerrisk eller andra hälsoeffekter i omgivningen av kärnkraftverk inte i något fall blivit bekräftad. Naturligtvis är det så, ty strålnivån i miljön påverkas ju i lägre grad av gasutsläppen från kärnkraftverk än av t.ex. omställningar i vädret. Ingen tror väl att man får cancer av att snön smälter på våren, även om naturens strålning då ökar synnerligen markant!

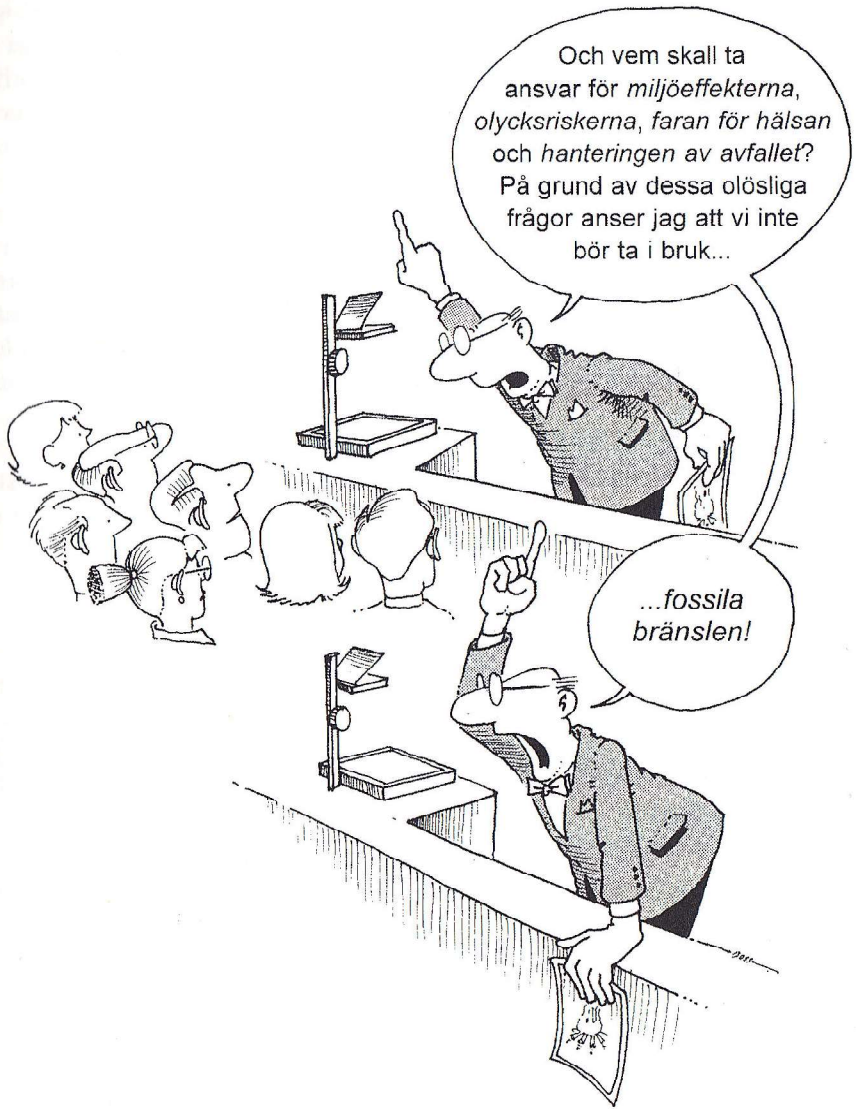
Förbränningsprocessen ger också upphov till formliga berg av fast avfall. Varje försök att installera avgasrening leder dessutom i sin tur till att mängden av fast avfall mångdubblas. Volymerna är gastronomiska, nej, *astronomiska* i jämförelse med vad vi vant oss vid hittills, och detta avfall avklingar inte, det består för evigt. Låt mig här ställa några frågor, som säkert ter sig obekväma för ELD-kraftens förespråkare:

– Vem tar ansvar för den fossila kraftens avfallsfrågor?
– Vem skall betala efterstädningen när kraftverkens drift är över?
– Vem garanterar att avfallsproblemen överhuvudtaget går att lösa?
– Vad är det för ett arv vi lämnar till våra barn och barnbarn?

Det är viktiga och stora frågor som talaren lyfter fram, tänker jag. Frågor som sträcker över en oöverskådlig framtid, frågor som nästan är större än livet. På tal om livet så har Albrecht Onestone ännu inte berört säkerhetsfrågorna. Hur reglerar man en fossilt eldad reaktor?

Och vilka säkerhetsrisker innebär brytningen av stenkol, utvinnandet av olja, transporterna av naturgas? Brytningen av uran sker ju i dagbrott, alltså under bar himmel, och transporterna innebär ingen risk för miljön. Hur blir det om vi tar i bruk fossila bränslen? Precis när jag kommit såhär

långt i mina egna funderingar höjer talaren rösten och sänker samtidigt tonläget:



– ”Jag har än så länge inte med ett ord berört säkerhetsfrågorna. Det finns minsann säkerhetsrisker förknippade med både själva produktionen av ström vid fossila kraftverk och med såväl utvinning som transport av fossila bränslen. Vi måste nog bereda oss på förluster av människoliv då och då som följd av explosioner vid fossila kraftverk.

Jag återkommer till olycksriskerna om ett ögonblick. Först vill jag emellertid understryka att den fossila förbränningsprocessen inte kan styras enkelt och elegant med motorreglerade styrstavar, såsom vid kärnkraftverken. Nej, processen kan endast stoppas genom att a) upphöra med bränsletillförseln, b) strypa tillgången på syre eller c) förhindra förbränningsgasernas avgång. Samtliga metoder är långsamma. Den enkla och genialiska säkerhetsfunktionen vid varje kärnkraftverk – snabbstoppet – är inte att tänka på!

Vi skall också vara medvetna om, att stenkolet inte kan transporteras i hermetiska transportbehållare, såsom uranet. Transporten, lastningen och lossningen av stenkol, ävensom lagringen kommer därför att medföra lokala olägenheter på grund av koldamm. Och man bör hålla i minnet, att ett medelstort kolkraftverk faktiskt behöver *tio järnvägsvagnar* stenkol *per timme*. Jämför detta med kärnkraftverkens bränslebehov, *en vagnslast per år*.

Oljan skulle komma att transporteras med supertankers till havs. Eftersom havstrafik alltid medför risker för grundstötning och haveri, måste vi nog räkna med en hel del nedsmutsning av oceanerna och stränderna med fågeldöd, säldöd och andra miljörisker i släptåg.

Naturgasen skulle däremot transporteras med väldiga rörledningar. Att bygga dessa, från produktionscentra till konsumenterna är nog inte det största problemet, även om det kommer att bli dyrt. Med tanke på miljön blir nämligen det största problemet att dessa tusentals mil av rörledningar under tryck inte kan förbli helt täta. Gasläckage blir nog snarare regel än undantag, och jämfört med koldioxidmolekylerna har de rätt så stora gasmolekylerna mycket starkare drivhuseffekt, det vill säga förmåga att höja jordens temperatur.

Risken för liv är ett kapitel för sig. Medan kärnkraftens säkerhetsfacit är tämligen obefläckat, med något enda undantag, kommer den fossila kraften att skörda liv regelbundet. Utan att alls spekulera om antalet fall av långsam död som den fossila kraftens utsläpp kan komma att förorsaka, måste man kallt kalkylera med tusentals akuta dödsfall i olyckor varje år. Alltså varje år – inte bara undantagsvis.

Vi kan vänta oss hundratals dödsfall årligen i gruvolyckor, och vi måste räkna med ytterligare hundratals offer i olyckor på havererade oljeplattformer, oljeriggar, borrtorn och tankers. Också gasexplosioner och gasbränder kan komma att skörda hundratals – ja till och med tusentals civila människors liv på en gång.

Tyvärr måste jag konstatera, att den bild av framtiden jag målat upp inte ter sig särskilt ljus. Dessvärre innehåller den inga överdrifter, utan allt det jag framfört är antingen kontrollerbara fakta eller vad jag skulle kalla

"best estimate", bästa tänkbara bedömning. Men, har vi då några alternativ? Knappast. Produktion av energi medför alltid en viss olycksrisk, men brist på energi leder till krig.

Frågan är alltså inte om vi behöver energi utan hurudan energi vi vill ha. Vi måste tänka på vilken slags värld vi lämnar efter oss till våra barn, barnbarn och barnbarnsbarn. Det är vårt ansvar gentemot våra kära. Vi måste slå vakt om att bevara jorden och naturen orörda och oförstörda så länge det bara är möjligt. Vad jag ovan anfört rörande 1) miljöfaktorer, 2) hälsorisker, 3) utsläppsfrågor, 4) avfallsproblem och 5) olycksrisker, talar tyvärr för att vi inte borde ta i bruk fossila bränslen. Den fossila kraften innebär både hälso- och miljörisker, och den utgör ett hot mot många nu levande växt- och djurarter. Den hotar rentav att rubba jordens klimat. Något som mänskligheten aldrig gjort förut. Därför bör vi så länge som möjligt hålla fast vid de fördelar uranet och kärnkraften erbjuder!

Tack för er uppmärksamhet, kära åhörare."

Björn Wahlström är strålskyddsexpert och forskningssamordnare vid Lovisa kärnkraftverk i Finland.
wahls@kolumbus.fi, www.kolumbus.fi/wahls

Kärnkraften och Miljön

Hans Blix

Miljöproblemen

Medvetandet om miljö- och resursproblem har successivt stegrats under de senaste 30 åren och alla bekänner sig idag – åtminstone med läpparna – till kravet på *"hållbar utveckling"*. Med detta uttryck, som präglades av Brundtlandkommissionen, menas att vår användning av resurser inte får ske på ett sådant sätt att det minskar eller undergräver följande generationers möjligheter att uppnå högre levnadsstandard.

Det måste dock genast tilläggas att dessa möjligheter oundvikligen också är beroende av hur många vi är på jorden. Det har beräknats att det vid tiden för Kristi födelse fanns ca 350 miljoner människor på jorden. År 1900 var det 1.5 miljarder. År 1990 hade vi blivit 5 miljarder och år 2000 beräknas vi vara 6 miljarder. Under detta sekels tio sista år beräknas vi alltså öka med nästan lika mycket som under de 1900 första åren av vår tidräkning. Det är svårt att se möjligheten till "hållbar utveckling" om vi inte snabbare än vad som redan sker håller igen på att förmera oss.

Under 1960-talet kom man mer allmänt i världen till insikt om hur vårdslösa särskilt industrisamhällena varit med råvarutillgångar och miljö. Från att främst ha varit lokala problem blev nedsmutsningen en regional fråga. På svenskt håll engagerade vi oss i hur man skulle hindra oljeutsläpp kring våra kuster och hur man skulle förhindra *gränsöverskridande luftföroreningar*. Då som nu var Sverige nettoimportör av försurande regn.

Under samma skede började man reagera mot jordbrukets användning av insektsgifter och betat utsäde som ledde till kvicksilverutsläpp. Det är inte förvånande att man då också kom att oroa sig för det *avfall som kom från kärnkraften*. Kunde vår generation ta ansvar för att lämna efter sig avfall som skulle förbli radioaktivt i tiotusentals år? Sådana frågor kom under 60-talet att inflyta i en bredare miljödossier. En del av dessa frågor – dock inte kärnkraften – stod i fokus då Sverige tog initiativ till och blev

värd för FN:s miljökonferens i Stockholm 1972. Den gav en viktig larmsignal och blev startpunkten för ett intensivare miljöarbete.

Mycket positivt har sedan uträttats. Användningen av många substanser, som DDT, har förbjudits och kontrollen av kemiska medel som används inom jordbruk och industri har blivit större. Tekniska metoder har kommit fram att reducera eller eliminera utsläpp av svaveldioxid och kväveoxider som bildas vid förbränning av kol och olja och som bidrar till sura regn och skogsdöd.

Å andra sidan har nya, miljöfarliga ämnen tillkommit och globala och ännu mer skrämmande miljöhot identifierats. Någon har sagt att medan folken på jorden under det kalla kriget var inriktade på att förgöra varandra, så har de därefter inriktat sig på att gemensamt förgöra jorden. Även om man anser sig ha utrönt att den främsta orsaken till det s.k. ozonhål som säsongvis uppträder över Antarktis är utsläppen av CFC-gaser och man kommit överens om att stoppa dessa utsläpp, så är det oroande att läsa att hålet den senaste säsongen varit större och mer långvarigt än någonsin tidigare.

Växthuseffekten

Det största, mest uppmärksammade och mest oroväckande globala miljöproblemet är dock *växthuseffekten*, d.v.s. den höjning i jordatmosfärens temperatur och därmed förknippade klimatförändringar som befaras följa främst av de enorma utsläpp av koldioxid och metan som är förknippade med den accelererande globala förbränningen av kol, olja och gas. Eftersom över 85 % av all världens kommersiella energi kommer från denna förbränning och energin är som en motor i världsekonomin är inga åtgärder enkla eller okontroversiella på detta område.

Inte överraskande hävdas på en del håll att det är osäkert om det alls finns eller blir någon växthuseffekt. Och det tilläggs att om de små temperaturökningar som redan registrerats bara skulle bero på naturliga cykler, vore det orimligt att kräva att länder och näringsliv skulle genomföra oerhört kostsamma omställningar, som kanske skulle visa sig bortkastade. Mot sådana resonemang invänds att även om full säkerhet inte kan vinnas, så bjuder försiktigheten att man bromsar innan det kanske blivit för sent. Och till dem som säger att litet varmare klimat inte skulle vara så ovälkommet i det kalla Norden, svaras att det kanske i stället blev kallare här om det skulle visa sig att Golfströmmen ändrade riktning. Några föreslår

att man i varje fall bör vidta alla sådana åtgärder som kan vara verksamma för att minska de farliga utsläppen och som inte skulle vara bortkastade *även om* det skulle visa sig att ingen växthuseffekt hotar – vad som kallats en *no regret politik*. Dit kunde t.ex. höra

- att täta läckande metangasledningar
- att, där det är ekonomiskt acceptabelt, i stället för kol bränna gas (som ger mindre CO_2 per producerad energimängd)
- att, där kostnaden inte blir oproportionerlig, öka effektiviteten i produktion och användning av energi (för att minska CO_2 utsläppen i relation till producerad eller konsumerad energimängd); och
- att öka odlingen av skog vilket kan vara ekonomiskt meningsfullt och samtidigt leda till att CO_2 sugs upp.

Mot en passivitetslinje står också en överväldigande majoritet av klimatforskare som anser att risken för växthuseffekt är högst reell. Allteftersom denna vetenskapliga övertygelse vuxit sig starkare och media och opinion blivit mer alarmistisk och pressande, har i-ländernas regeringar gradvis drivits till hållningen att risken måste tas på allvar och leda till åtgärder. En hel del ö-stater i Stilla Havet och på andra håll är rentav oroliga att de skall riskera att översvämmas eller försvinna om polarisar smälter och havsytan stiger.

Det är emellertid svårare att på statlig nivå enas om hur stora begränsningar som skall göras i utsläppen och av vem, än att på vetenskaplig grund beräkna *hur mycket* de globala utsläppen av CO_2 och andra växthusgaser skulle *behöva minska*. Diskussionerna härom har pågått ett antal år och även om viktiga framsteg gjorts är man ännu ganska långt från beslut om gemensamma och verksamma åtgärder. Regeringarnas målsättningar har blivit gradvis mer preciserade – fast mycket mer blygsamma än vad forskarna anser behövas. Samtidigt har dock verkligheten hittills tillåtits gå motsatt håll.

1988 antogs det s.k. *Torontomålet* att *minska* CO_2 utsläpp med ca 20% fram till år 2005. Men fram till 1997 *ökade* de globala CO_2 utsläppen med 16% –och då var det ännu åtta år kvar till 2005...

1992 – 20 år efter Stockholmskonferensen – hölls en andra världskonferens om miljön och en *klimatkonvention* utarbetades. I-länderna rekommenderas att fram till år 2000 komma tillbaka till 1990 års nivå på

utsläppen av CO_2. Men fram till 1997 *ökade* CO_2 utsläppen i OECD-länderna med ca. 8% – och det var då fortfarande tre år kvar...

1997 enade sig industristaterna vid *Kyotokonferensen* att sammantaget *minska sina utsläpp av växthusgaser med ca. 5%* fram till perioden 2010-2012. Detta mål kvarstår, men enligt en studie av OECD:s respektabla International Energy Agency kan CO_2 utsläppen år 2010 förväntas bli 36 till 50% *över* 1990 års nivå.

Det kan noteras att Sverige för sin del utverkat att man inom den gemensamma EU-ramen skall få *öka de svenska utsläppen av växthusgaser med 4%*. Det förnekas visserligen på officiellt svenskt håll att detta skulle ha något att göra med en kärnkraftsavveckling men av andra europeiska länder uppfattas det i alla fall på det sättet. I Sverige tycks de relevanta utsläppen i slutet av 1998 ligga ca 7% över 1990-års nivå.

Fler tecken på klimatförändringar – Ökad oro

Mellan Riokonferensen 1992, Kyotomötet med klimatkonventionens parter 1997 och det nyligen (1998) i Buenos Aires timade mötet, *förstärks oron att en växthuseffekt redan börjat inträda*. Det rapporteras att sex av de första åtta månaderna 1998 var de varmaste som uppmätts för dessa månader sedan (globala) mätningar började 1886. Enligt ett forskningslag från US Geological Survey är Antarktis idag varmare än vid någon tidpunkt under de senaste 4000 åren och i mars i år bröts 200 kvadratkilometer is loss från kontinenten. Hälften av glaciärerna i Alperna rapporteras vidare ha försvunnit under det senaste seklet.

Samtidigt som naturen tycks sända alltmer oroväckande signaler, framträder med dramatisk tydlighet fundamentala motsättningar mellan många stora u-länder och många i-länder om fördelningen av ansvaret för att minska de relevanta utsläppen. I botten på dessa motsättningar ligger lättbegripliga ekonomiska, politiska och tekniska fakta. Hög levnadsstandard har krävt hög konsumtion av kol, olja och gas – medförande höga utsläpp av växthusgaser. De globala utsläppen har redan blivit för stora. Vad skall vi då göra, när fler vill nå hög levnadsstandard, använda mer energi och göra större utsläpp? Ekvationen går inte ihop. Låt oss titta närmare på den.

Globalt ökad energianvändning och risk för växthuseffekt

De teknologiskt utvecklade länderna har uppnått ett aldrig tidigare skådat välstånd mycket tack vare ett allt starkare utnyttjande av kol, olja och gas. Så kommer under det senaste decenniet u-länder i snabb ekonomisk utveckling – i Asien, Korea, Kina, Taiwan, Indonesien, Thailand och Indien, men också på annat håll, Turkiet, Mexico, Brasilien m.fl. – och vill öka sin industriproduktion och höja sin levnadsstandard bl.a. genom att, liksom vi, använda mer energi.

En studie i det amerikanska energidepartementet förutspådde 1997 att den globala energikonsumtionen skulle stiga med 54% redan till år 2015 – mest på grund av ökad konsumtion i u-länderna. World Energy Council förutspår att den globala konsumtionen av *elektricitet* kommer att gå upp med 50 till 75% till år 2020. Det är inte så förvånande när vi ser på dagens konsumtionsnivåer. Några exempel på länder som använder mycket elektricitet:

- Sverige – ca 15.000 kWh per person och år
- Japan – ca 7.500 kWh per person och år
- Sydkorea – ca 5.000 kWh per person och år

Å andra sidan några länder som vill öka sin el-användning:

- Kina – nu ca 1.000 kWh per person och år
- Indien och många andra – nu mindre än 1.000 kWh per person och år
- Tanzania, Bangladesh och några andra – nu mindre än 100 kWh per person och år.

När man under den asiatiska boomen (som väl en dag kommer igen) kunde se vart den globala energikonsumtionen barkade iväg då de folkrika lågenergi-länderna ökade sin användning av kol, olja och gas, insåg man också vilka miljökonsekvenser det kunde bli. *Just som ett antal u-länder är på väg att bli storkonsumenter av kol, olja och gas, deklarerar i-världen att en ökad förbränning av fossilbränslena utgör jordens kanske nu största miljöhot.*

I-länderna med USA i spetsen konstaterar att den största ökningen i energiförbrukningen väntas i de ekonomiskt snabbt växande u-länderna, t.ex. Kina, Indonesien, Indien, Brasilien. Om inte de till fullo medverkar i att hålla igen på växtgasutsläpp, så når man inte långt. Och vad säger då u-länderna? Jo, inte så överraskande påpekar de att det är i-länderna som genom sin oerhörda konsumtion av fossila bränslen släppt ut för mycket koldioxid och andra gaser och att det måste falla på dessa länder att vidta verksamma åtgärder. U-länderna bör ha rätt att *öka sin konsumtion av fossila bränslen* för att höja sin levnadsstandard och förse växande befolkningar med energi. Om man eftersträvar rättvisa och anser att alla människor är lika värda, kan man ju diskutera att fördela rätt till utsläpp av växthusgaser *per capita.*

Förslag som framkastats av UNDP (FN:s utvecklingsprogram) *att u-länderna skulle hoppa över den fossila bränsle-eran* och basera sin förestående energiexpansion på förnybara bränslen har säkert inte stora förutsättningar att välkomnas. Varför skulle u-länderna, som har att konkurrera med i-världens effektiva industrier, hänvisas till energislag som dessa industrier av kostnadsskäl inte anammar?

Hur skall utsläppen av växthusgaser kunna minska?

I diskussionerna mellan staterna sägs det intressant nog ganska litet om *hur man skall hejda eller minska utsläppen av växthusgaser.* I Kyotoprotokollet överlåter man med varm hand åt de enskilda staterna att var efter sina förhållanden bedöma hur det skall gå till. Tre rekommendationer finns dock – utan kvantifieringar:

Ett mer effektivt energiutnyttjande.
Främjande av nya och förnybara energikällor.
Främjande av avancerade och innovativa miljövänliga teknologier.

Fast Kyotoprotokollet sålunda *inte med ett ord nämner kärnkraft* och varje försök att skriva in det säkerligen skulle mötts med visslingar av en del närvarande organisationer och dessutom blockerats av länder som Österrike, Danmark och Irland, så är det alldeles säkert att en del andra länder, som Japan, Kanada och Frankrike läste in kärnkraft bland de "avancerade miljövänliga teknologierna". Åsiktsskillnaderna mellan staterna är alltså dolda i dubbeltydiga formuleringar.

Större effektivitet i produktion och konsumtion av energi

Rekommendationen om större effektivitet i användning av CO_2 producerande energikällor – kol, olja och gas – är viktig och praktisk och leder i sin generella form inte till invändningar. Den kan stimuleras med ekonomiska medel, som koldioxidskatter och handel med utsläppsrättigheter. Att ett bensinpris på en krona eller två inte stimulerar till återhållsamhet i dagens Ryssland verkar klart, men en skatt på en femma skulle kanske vara skadlig för ekonomin. Energisparande och effektivitetsökningar är inte önskvärda *till varje pris*.

Enligt de råd som i Sverige ges på högsta regeringsnivå beträffande energi och miljö, bör vi visserligen steg för steg ersätta fossila resurser med *förnybara bioråvaror*, men *huvudstrategin* anges dock vara att *effektivisera* användningen med ny teknik. Det är här som den berömda *faktor tio*-slogan kommer in. Inte minst i de rika länderna måste vi, sägs det, lära oss att utnyttja naturresurserna tio gånger effektivare än idag. Bilar bör t.ex. kunna köra milen på några deciliter bränsle. (Stefan Edman i *Göteborgsposten* 98-03-07 och 98-10-18)

Efter oljeprishöjningarna på 70-talet gjordes i stora delar av den industriella världen betydande och framgångsrika ansträngningar att höja effektiviteten i produktion och konsumtion av energi. Inte minst skedde detta genom övergång från direkt användning av fossila energikällor till elektricitet, som har större effektivitet i slutanvändning. Säkert kan mycket mer åstadkommas – även om "faktor tio" kanske är en väl enkel slogan. En tyngre invändning är antagligen att medan strömåtgången i TV-apparater, kylskåp och mycket annat minskar, så ökar antalet apparater hela tiden. Medan bensinåtgången i bilar halverats har antalet bilar dubblerats osv.

Ett annat viktigt påpekande, för den globala situationen, är att den största expansionen i energianvändning väntas i folkrika u-länder med snabbt växande ekonomier. Även om de lägger sig till med modernaste och energisnålaste teknik så är det inte genom energisparande som t.ex. Kina kan mångdubbla sin energianvändning. Som ovan framgått använder Kina ca 1.000 kWh elektricitet per person och år medan vi i Sverige använder 12.000. "Huvudstrategin" i Kinas energiplanering går inte ut på energisparande utan på *ökad energianvändning och ökad energiproduktion*. Den planerade ökningstakten för elektricitet är rejäl: ca 16 GW per år under lång tid framåt. Det motsvarar 16 mycket stora kraftverk per år! En del av denna kapacitet är vattenkraft, och en annan – ganska blygsam del – är kärnkraft, men det allra mesta är *kolkraft*. Bilden är inte mycket annorlunda i andra energihungrande u-länder. Några siffror på planerad ökning av *kolproduktion* mellan 1992 och 2020 är av intresse.

- Kina – från 1.138 miljoner ton per år till 2.100 miljoner ton per år
- Indien – från 241 miljoner ton per år till 485 miljoner ton per år
- Sydafrika – från 182 miljoner ton per år till 326 miljoner ton per år

Det är väl troligt – och förvisso önskvärt- att dessa länder siktar på en hel del energisparande fram till 2020 genom att pressa mer energi ur de kolkvantiteter som bränns, men någon minskning tycks i alla fall inte vara på gång i konsumtionen av det fossila bränsle som resulterar i mest koldioxid per producerad energimängd, nämligen kol.

I anknytning till planerna på ökad global kolproduktion krävs en kommentar till de möjligheter som det ibland hänvisas till att producera *"clean coal"*. Man bör ha klart för sig att vad det här är fråga om är åtgärder för att undvika utsläpp av svaveldioxid och kväveoxider – vilket är miljömässigt önskvärt för att *minska försurande* utsläpp. Någon ekonomiskt acceptabel metod att separera den koldioxid som bildas vid förbränning av kol, olja eller gas – att segregera och neutralisera den, finns inte. (En annan sak är att metangas som innehåller alltför höga halter av koldioxid för att kunna användas, kan – som Norge visat – vid gasfälten befrias från dessa innan den pumpas till förbrukning. Vid förbränningen uppstår dock CO_2 som vanligt.)

Förnybara energikällor och avancerad energiteknologi

De fossila bränslena ger idag världen över 85% av dess kommersiella energi. Vattenkraft och kärnkraft ger tillsammans ca 11. *De kommersiella förnybara energikällorna ger mindre än 1 % och det mesta är inte sol, vind och biomassa utan geotermisk energi.* Är det verkligen trovärdigt att dessa energikällor skulle kunna utvecklas till att ge huvudparten av världens energi, som en del av deras förespråkare vill göra gällande?

Otvivelaktigt har en hel del framsteg gjorts i att öka deras effektivitet och ekonomi och ytterligare förbättringar kan förväntas. *Solpaneler* används idag med framgång *till att värma vatten* i hushåll på många håll. I Israel är det lag på att nya hus skall ha sådana. *Solceller* för att generera

elektricitet används i klockor, miniräknare och satelliter där kostnaden inte spelar större roll. På en del isolerade platser dit det skulle vara svårt eller omöjligt att dra kraftledningar används också elgenererande solceller.

Vindkraftverk finns på en hel del håll – i Danmark, Tyskland, USA och Sverige, men trots att förbättringar åstadkommits i deras verkningsgrad skulle knappast några av dem kommit till stånd om inte betydande subsidier till byggnad eller drift eller bådadera gavs.

Biomassa har länge använts som en betydande energikälla av den svenska cellulosaindustrin, men det finns betydande skepsis mot att snabbväxande trädslag skulle utan subsidier kunna ge bränsle för någon större elproduktion eller ens kombinerad el- och värmeproduktion. Hur miljövänlig användning av biomassa är kanske också återstår att visa.

World Energy Council – som är en av de mer respektabla och professionella organen på energisektorn – har uttalat som sin åsikt att de förnybara energikällorna *"med tillräckligt stöd"* skulle fram till 2020 kunna öka sin andel av världens kommersiella energi från nuvarande låga nivå till 5 – 8%.

Det *"stöd"* man tänker sig kan kanske vara av olika slag, t.ex. direkta subsidier till byggnad och/eller skyldighet för kraftproducenter/ leverantörer att tillhandahålla en viss del av sin kraft från förnybara energikällor. Den extra kostnaden övervältras då på konsumenten.

Det är osannolikt att den fortfarande minimala roll som de förnybara energikällorna spelar – trots decennier av forskning, utveckling både på statligt och privat håll – skulle bero på någon konspiration emot dem. Med all sannolikhet skulle det finnas miljarder att tjäna på dem, om de kunde göras något sånär konkurrenskraftiga.

Det är inte heller så att skepsisen mot dem grundar sig på uppfattningen att det skulle vara tekniskt eller teoretiskt omöjligt att utvinna mycket energi ur dem.
Snarare på uppfattningen att det skulle kräva mycket stora – och dyra – anläggningar. Sol och vind är fri och finns överallt – åtminstone emellanåt – *men energin är spridd och måste skördas och då den inte finns tillgänglig måste reservkraft finnas.*

Det har beräknats att
- 1 kg ved ger en energimängd motsvarande 1 kWh
- 1 kg kol ger en energimängd motsvarande 3 kWh
- 1 kg olja ger en energimängd motsvarande 4 kWh

Som jämförelse kan nämnas att
- 1 kg naturligt uranbränsle ger en energimängd motsvarande 50.000 kWh, och
- 1 kg plutonium ger en energimängd motsvarande 6.000.000 kWh.

Den *låga energitätheten* hos de förnybara energikällorna leder till att mycket stora ytor och mycket material måste användas. Det har beräknats att om man vill uppnå en elproduktionskapacitet motsvarande ett 1000 MW(e) kraftverk

så krävs solceller över mer än 20 km^2
eller vindkraftverk i en park på mer än 50 km^2
eller biomassplantering på mer än 4000 km^2.

Det är en stor förtjänst hos de förnybara energikällorna att de ger upphov till mycket litet koldioxid och de kan förväntas ge välkomna marginella bidrag till världens framtida energiförsörjning. Deras ekonomiska och praktiska handikapp gör dem dock inte till sannolika kandidater att ersätta fossila bränslen – eller kärnkraft – i någon större utsträckning.

Ibland rekommenderas förnybara energikällor – särskilt biomassa – i Sverige med motiveringen att de kan ge mer sysselsättning. Jo, men skulle någon vilja rekommendera rodd i stället för segling för att det skulle ge mer sysselsättning?

På energiområdet har världen gått från ved och vind till kol, olja, gas och uran för att *ökad energitäthet gett billigare och mer praktisk användbar energi.* Segelfartygen ersatte roddbåtar och kanoter. Kolångare ersatte segelbåtarna för att de var mer pålitliga och krävde mindre besättning. Dieseldrivna fartyg ersatte kolångarna för att det var billigare. Idag går hangarfartyg och undervattensbåtar med uranbaserade kärnreaktorer jorden runt många gånger utan att behöva nytt bränsle och ryska atomisbrytare arbetar år efter år i världens svåraste klimat. Bara opinionen hindrar oss att driva stora oljefartyg med kärnkraft. Är det troligt att vi vill vända tillbaka?

De stora tiomiljonstäderna i de alltmer urbaniserade u-länderna, där en väldig expansion av energianvändningen väntas – typ Shanghai, Canton,

Calcutta, Bombay, Karachi, Teheran, Kairo, Rio, Sao Paolo, Buenos Aires och Mexico – kommer inte att basera sin elektricitetsproduktion och knappast mycket annan energiproduktion heller på förnybara bränslen. För närvarande är det huvudsakligen fossila bränslen som gäller.

Den pinsamma verkligheten är att de flesta av dem som högröstat varnar världen för växthuseffekten, står nästan tomhänta när det gäller att föreslå praktiska åtgärder för att motverka farorna. Att de inte som "avancerad teknologi" rekommenderar *fusionskraften* (fast den kopierar solen) skall vi inte sörja. Den ligger långt bort – om den någon gång blir praktiskt hanterlig. *Vätgas* är en tänkbar sekundär energikälla, men även den ligger sannolikt många år fram i tiden och den kräver också betydande energimängder för att produceras.

Kärnkraften

Ingen påstår att kärnkraften är problemfri men dess mycket små avfallsmängder kan utan oöverstigliga problem i sin helhet isoleras i jordskorpan, medan utsläppen/avfallet från de fossila bränslena till volymen är så enorma att jordatmosfären och jordens yta oundvikligen blir deras slutförvar. En radikalt ökad användning av kärnkraft i de teknologiskt utvecklade länderna skulle öppna möjlighet för en betydligt större användning av fossila bränslen i de teknologiskt underutvecklade staterna. En sådan policy skulle idag vara den mest verksamma och ekonomiskt-praktiskt framkomliga vägen att, utan tillskott av koldioxid eller andra växthusgaser, producera de enorma energimängder som världen kommer att behöva. Man måste hoppas att miljörörelserna skall kunna förmå sig att lägga av sina *fundamentalistiska skygglappar* och inse att deras oföränderliga motstånd mot kärnkraften leder till en ökad global användning – av fossila bränslen. Kan de verkligen inför efterföljande generationer ta ansvaret för ett förändrat klimat på jorden?

Kärnkraften är enligt en omfattande färsk EU undersökning den energikälla som ger de i särklass lägsta 'externkostnaderna', d.v.s. kostnaderna i liv (exempelvis genom olyckshändelser och skadliga utsläpp), hälsa och miljö. Den ger praktiskt taget inte upphov till några växthusgaser. Redan dagens ca 440 kärnkraftverk hjälper oss verksamt att undvika betydande utsläpp. Om de skulle stängas och ersättas med kraftproduktion av den i övrigt idag gällande mixen, skulle koldioxidutsläppen från världens energiproduktion öka med ca 8-10% . Motsatt gäller naturligtvis att en expansion av kärnkraften skulle hjälpa oss att hålla igen på CO_2 utsläpp. Chefen för OECD:s International Energy Agency påpekade häromåret att kärnkraften var den mest betydande faktorn i minskningen av kolintensiteten i OECD-ländernas ekonomier under de senast 25 åren. Det spelar alltså roll om avvecklingsmogna kärnkraftverk ersätts av kol- eller gaskraftverk eller omvänt om sådana ersätts av kärnkraftverk. Kraftverkens livstid kan räknas till 50 år eller mer, så våra beslut påverkar koldioxidsituationen i jordatmosfären för lång tid.

Den faktiska situationen idag är dock att kärnkraften bara ökar i några länder i Asien där man behöver mycket mer baskraft, och stagnerar i väst, där fossilgasen f.n. är attraktiv på grund av mycket lågt pris, stor flexibilitet och mindre koldioxidutsläpp än kol.

Miljörörelsernas enträgna arbete mot kärnkraften och kärnkraftsvänliga regeringars och partiers föreställning att de skulle kunna förlora fler röster än de skulle vinna, om de gick ut och kraftfullt stödde kärnkraftanvändning, reser frågor om kärnkraften kommer att hanka sig fram till dess en tydlig folkopinion *för* kärnkraft blir synlig. Kanske man åtminstone i det läget kan vänta sig att den politiska världen kommer att göra det som redan stora delar av den vet är rationellt, nämligen att yrka på fortsatt och ökad användning av kärnkraft.

Det framstår redan idag i Sverige som demokratiskt besynnerligt att en stängning av Barsebäck kan ha stöd av en stor majoritet i riksdagen, medan opinionsundersökningar visat att ca 80 % av svenska folket tycks vara emot en stängning och att det inom alla partier – även center, vänsterparti, miljöparti och socialdemokrati tycks vara en majoritet emot stängning. Vem företräder denna majoritet i vårt parlament? Och vem klargör att medan vackert tal – och mycket subsidier – ägnas övergång till förnybara energikällor som skall ställa Sverige i spetsen för världens omställning till ekologisk och hållbar utveckling på energiområdet, så inser praktiskt folk att sol, vind och biomassa blir välkomna men ganska marginella tillskott. De pratar i stället om användning av gas. Prospekterare av gasledningar kuskar förväntansfullt riket omkring för att titta var ledningarna bäst kan placeras.

Hans Blix har varit generaldirektör för Internationella atomenergiorganet (IAEA) i Wien och är styrelseledamot i Miljövänner för Kärnkraft.

Miljön i kärnbränslecykeln – urangruvor och kärnavfall

Per Eric Ahlström – Ingemar Lindholm

Urangruvor

Inledning

Brytning av uranmalm och framställning av urankoncentrat är de första stegen vid tillverkning av kärnbränsle. I de länder där uran utvinns har regeringarna stiftat lagar som reglerar verksamheten. Dessa regeringar har infört regler för att skydda miljön och se till att tillräckliga säkerhetsåtgärder vidtas. Sådana regler grundas på principer som införts genom internationella överenskommelser. För gruvföretagen är det ett minimikrav att uppfylla dessa regler, i många fall inför de ett bättre skydd än som behövs enligt reglerna.

Företag som utvinner uran måste ha en rad olika tillstånd innan de kan starta sin verksamhet. Sådana tillstånd, som utfärdas av nationella eller regionala myndigheter, bestämmer i detalj de villkor som krävs för säker drift, bra arbetsmiljö och skydd för yttre miljö. Myndigheterna inspekterar och ser till att dessa villkor följs.

Arbetsmiljö

De konventionella arbetsmiljöfrågorna (d.v.s. utom strålskyddsfrågor) är desamma i urangruvor och uranverk som de arbetsmiljöfrågor som finns i andra gruvor och metallverk. Gruvföretagen vidtar åtgärder som utbildning inom hälso- och arbetarskydd för att minska risken för att de anställdas hälsa påverkas och för att undvika olyckor på arbetsplatsen. De anställda utrustas med anpassad skyddsutrustning. Kontroller utförs för att säkerställa att utrustningen används och at arbetet utförs på rätt sätt.

Allmänhetens tillträde till områden där uranmalm bryts eller koncentrat framställs är begränsad, som ett led i säkerhetsarbetet.

Strålskydd

Eftersom uranmalm är radioaktiv finns strålning på arbetsplatserna som en oundviklig konsekvens. Därför måste ytterligare säkerhetsåtgärder vidtas, utöver de som finns på andra arbetsplatser.

Stråldoser kan komma från tre olika håll:

- Direkt strålning från uranmalm i berget eller från malm som processas;
- Luftburen strålning som kommer från sönderfall av radon, en gas som avges av malm innehållande uran;
- Nedsmutsning med uranmalm eller koncentrat.

Strålningsnivåerna vid urangruvor och uranverk är låga, ofta bara några gånger högre än den strålningsnivå som finns naturligt. Nivån minskar snabbt med avståndet till anläggningarna.

Radon som avges till luften vid uranbrytning späds snabbt ut av vindarna i den öppna luften. Därför blir stråldoserna från urangruvor till allmänheten mycket låga.

De åtgärder som behöver vidtas för att begränsa stråldoserna till anställda beror huvudsakligen på den uranhalt som finns i malmen. I Kanada finns några djupa malmer med hög uranhalt, > 10% uran. När dessa nu förbereds för underjordsbrytning har man utvecklat ny teknik "Non-entry mining". Tekniken innebär att malmen bryts utan att personal finns i närheten.

Mätningar av både strålningsnivåer vid anläggningar och stråldoser till anställda är viktiga delar av strålskyddet. Individuella mätningar görs överallt där anställda kan få stråldoser som uppgår till en nämnvärd del av den tillåtna stråldosen. Persondosimetrar används rutinmässigt för detta ändamål. Dessutom finns program för de anställdas hälsokontroll.

En av uranets sönderdelningsprodukter är en gas, radon, som kommer ut i luften till närmiljön. Radon innebär i sig inte någon nämnvärd strålrisk men radonet sönderdelas i sin tur och de ämnen som då bildas innebär en strålningsrisk om människor andas in luften där dessa ämnen finns. Det effektivaste sättet att undvika sådan strålning är att ordna stark ventilation. Sådan ventilation behövs på alla ställen där anställda arbetar i ett rum med uranmalm och det är särskilt viktigt i underjordsgruvor. Under 1950- och 1960-talen kände man inte till hur farligt detta var – och det ledde till många lungcancerfall både i urangruvor och i andra gruvor.

Uranhaltigt damm i luften kan innebära att anställda andas in sådan luft. På de ställen där damm är ett problem är det vanligt att spola vatten

på malmen för att undvika damm. Inom områden där urankoncentrat förpackas måste de anställda bära andningsmasker.

Luftburna ämnen späds ut i den öppna luften och sprids snabbt med vindarna. Därför innebär radon från urangruvor inte någon nämnvärd hälsorisk för allmänheten.

Vid gruvor och uranverk finns skyddskläder och möjligheter att tvätta och duscha för att undvika att uranhaltiga ämnen fastnar på huden. Detta är vanligtvis tillräckligt för att de anställda inte skall riskera att bli nedsmutsade med uranhaltiga ämnen.

Miljö

De flesta länders lagstiftning kräver att en omfattande utredning utförs för att ta reda på de miljökonsekvenser som kan bli följden av ett föreslaget projekt. När en sådan utredning utförs, måste företaget som vill bygga gruvan och uranverket beskriva de åtgärder som de kommer att göra för att minska påverkan på miljön. Om projektet blir godkänt av myndigheterna kommer åtgärderna att prövas före byggstart och kontrolleras under bygge och drift.

Det finns två tänkbara vägar där radioaktiva ämnen kan spridas, via luften och via vattnet. Vid gruvan och uranverket tar man ofta prover på utgående luft och vatten för att kontrollera att utsläppen ligger under godkända nivåer. Det tas också prover från miljön i närheten av gruvan för att försäkra sig om att miljöpåverkan hålls låg.

Uranindustrin har utfört ett omfattande forskningsarbete för att utveckla processmetoder som begränsar industrins miljöpåverkan på lång sikt samt metoder som visar att anläggningarna kan rivas och återställas efter fullbordad drift

Kontroll av damm

Damm som kommer från driften av gruva, malmupplag eller uranverk är en tänkbar källa för nedsmutsning av miljön. När det är nödvändigt sprayas vatten för att hindra spridning av damm.

I uranverk där ventilationssystemet kan samla uranhaltigt damm används filter för att ta bort dammet från luften innan luften blåses ut till omgivningen.

Hantering av vatten

Använt vatten återförs i kretslopp så mycket som möjligt vilket minskar behovet av färskvatten till uranverket. Förorenat vatten från driften av gruva och verk som inte kan återföras renas innan det släpps ut till miljön.

Det finns fastställda gränser för vilka halter av olika föroreningar som är tillåtna för att sådant vatten ska få pumpas ut. Vanligtvis är halten av en av uranets sönderfallsprodukter, radium, det ämne som bestämmer om vatten kan återföras till miljön. Det är relativt enkelt att rena vatten från radium.

På vissa platser kan dammar eller andra uppbyggda barriärer installeras för att undvika att föroreningar från gruva eller uranverk når ytvatten eller grundvatten. Dessa barriärers syfte är att isolera gruvan och verket från vatten i den yttre miljön.

Behandling av avfall

Det avfall som uppkommer vid drift av gruva och uranverk är:

- Gruvavfall;
- Avfall från uranverket (lakrester).

Det finns flera sätt att ta hand om dessa avfall.

Gruvavfallet består av gråberg som måste tas bort för att man ska kunna komma åt malmen. I de flesta fall innebär detta material ingen risk för att miljön förorenas och det kan läggas upp i närheten av gruvan. I vissa fall innehåller gruvavfall andra mineraler som kan lakas ut av vatten som rinner genom gruvavfallet. Om sådan risk finns vidtar man åtgärder för att försäkra sig om att sådant lakvatten inte kommer ut till omgivande miljö.

Avfall från uranverket, lakrester, innehåller ämnen från uranets sönderdelning, och kan dessutom innehålla andra mineral som ursprungligen fanns i malmen. Det vanligaste sättet att hindra ämnena i lakresterna att via lakvatten komma ut i miljön är att under gruvans och verkets driftstid deponera dessa ämnen. Upplaget utformas så att den långsiktiga inverkan på miljön blir så liten som möjligt. Vid vissa uranverk är det praktiskt att deponera lakrester i ett dagbrott när detta brutits färdigt.

Lakrester är vanligtvis en uppslamning, d.v.s. en blandning av vatten och fasta ämnen. När denna blandning har deponerats kommer de fasta ämnena att sjunka till botten med vatten över. Detta vatten har ofta hg radiumhalt och ibland andra förorenande ämnen. Det måste renas innan det kan pumpas ut i den yttre miljön.

Rivning och återställning

När driften vid en gruva upphör, t ex när malmen tar slut, måste anläggningarna rivas och miljön återställas. Gruvföretagets plan för återställning innebär att området så långt som möjligt återställs till hur det var före brytningen eller till andra former som ansluter till miljön.

Återställningsplanen granskas av myndigheter måste godkännas innan återställningen börjar. När en gruva och ett verk stängs, krävs att mätningar i omgivande miljö pågår under en längre period så att man kan försäkra sig om att det inte kan bli någon nämnvärd påverkan av miljön på längre sikt.

In Situ Lakning

Tekniken "In Situ Lakning" kan användas vid utvinning av uran från vissa porösa malmer om berglagren under och över malmen är täta. Den innebär att ett antal hål borras ned till malmen. Därefter pumpas en basisk eller sur lösning via rör ned till malmen, genom den porösa malmen och via andra rör upp till markytan. Lösningen som nu innehåller uran pumpas genom en jonbytare där uranet fastnar. Därefter kan urankoncentrat framställas från uranet i jonbytaren i ett uranverk.

Eftersom ingen malm tas upp till ytan är det lätt att klara miljö och strålskydd. Däremot måste noggrann kontroll ske av grundvatten kring anläggningar med "In Situ Lakning". I dag framställs cirka 15% av uranet i världen med denna nya teknik.

Arbetsmiljö – jämförelse mellan olika energiformer

Det finns en svensk utredning som jämför konsekvenserna för arbetsmiljön vid produktion av el med olika metoder. Den är utförd av Yngve Hagerman för Statens Energiverk. Han har lång erfarenhet från Arbetarskyddsstyrelsen. Resultaten i rapporten "Arbetsmiljö/energi" i serien "Ett miljöanpassat energisystem" sammanfattas nedan.

Tabell: Arbetsskador för energikällor, räknat för produktion av 1 TWh_e.

Energikälla	*Arbetsskador*	*Dödsfall*	*Förlorade arbetsdagar*
Vindkraft, landbasering	23	0,05	750
" havsbasering	18	0,04	570
Solkraft	160	0,32	6430
Kärnkraft	3	0,01	70
Kol, kondens	100	0,30	3100
Olja, kondens	14	0,06	550
Naturgaskombi	9	0,04	510
Flis, kraftvärme	20	0,05	660
Torv, kraftvärme	16	0,05	480

Arbetsskadorna vid utvinning av energiråvara, förädling, transporten, anläggande av kraftverk samt drift av detta samt omhändertagande av avfall ingår. För kärnkraft ingår således utvinning av uran, isotopanrikning, kärnbränsletillverkning, elproduktion, alla transporter samt slutförvar av radioaktivt avfall och rivning av kärnkraftverk. Även s.k. "sena skador" från joniserande strålning ingår.

Tabellen är baserad på data från industrier i många olika länder. För de nya energikällorna där långvarig arbetsskadestatistik inte finns, har jämförelser gjorts med industrier av liknande karaktär.

Det framgår klart att kärnkraften, inklusive uranbrytning och hantering av kärnavfall ger de lägsta konsekvenserna.

En jämförelse mellan uranbrytning och kolbrytning i undersökningen visar att antalet förlorade arbetsdagar per 1 TWh_e i urangruvor i Saskatchewan, Kanada är 3, medan antalet förlorade arbetsdagar för samma elproduktion vid kolbrytning är 1689. Antalet dödsfall vid denna uranbrytning anges till 0,002/TWh_e medan antalet dödsfall vid kolbrytning enligt en tysk utredning refererad av Hagerman uppgick till 0,37/TWh_e. Detta är av särskilt intresse eftersom beslut fattats i Sverige att lägga ned reaktorerna i Barsebäck varvid ersättningskraften på kort och meddellång sikt i huvudsak blir importerad kolkondenskraft.

Om dessa förhållanden gäller, skulle ersättning av elproduktion av 8 TWhe/år kärnkraft med motsvarande kolkondensproduktion innebära en ökning med ca 3 dödsfall per år.

Kärnavfall - en långsiktig miljöfråga

Driften av kärnkraftverk ger upphov till flera typer av radioaktivt avfall. I Sverige har vi utvecklat ett system av anläggningar som tar hand om alla dessa olika avfallstyper på ett säkert sätt. Låg- och medelaktivt driftavfall slutförvaras i bergrum i SFR vid Forsmark. Använt bränsle och en del annat avfall förvaras i mellanlagret CLAB vid Oskarshamn. Transporterna från kärnkraftverken till dessa anläggningar sker med ett specialbyggt fartyg Sigyn. Allt detta fungerar och har fungerat på ett för såväl arbetsmiljö som omgivande miljö utmärkt sätt sedan tio à femton år. När kärnkraftverken en gång har gjort sin tjänst och skall rivas kommer största delen av det radioaktiva avfall som då uppkommer att kunna förvaras på samma sätt och på samma plats som det avfall som idag sänds till SFR.

Trots detta pågår en ständig diskussion om kärnkraftens olösta avfallsfråga. Debatten tar fart flera gånger per år. Ibland är det "nya vinklar" men merendels är det variationer på samma tema: Avfallet är extremt långlivat, vetenskapen kan inte överblicka så långa tidrymder, ingen kan garantera säkerheten. I centrum för argumentationen står ofta – plutonium – världens farligaste ämne, skapat av människan, ofattbara 24 000 års halveringstid, det tar längre tid innan det försvinner än som människan funnits på denna jord o s v.

Låt oss fundera en smula över några av argumenten.

Plutonium

Plutonium upptäcktes i början av 1940-talet. I ren form är det ett metalliskt ämne med en täthet på 19,9 g/cm^3 vid rumstemperatur. Det är ett grundämne med atomnummer 94 och det har påvisats ca 15 skilda isotoper med atomvikter från 232 till 246. Alla är radioaktiva och halveringstiderna varierar från 21 minuter till 83 miljoner år. Den vanligaste isotopen är plutonium-239 som har just 24.100 års halveringstid.

I använt kärnbränsle finns plutonium i form av plutoniumoxid. Detta ämne är mycket svårlösligt i vatten. Lösligheten är ca 2 mikrogram per liter.

Plutonium är en alfastrålare (åtminstone de flesta och vanligaste isotoperna). Detta betyder att det kan endast skada människor (eller andra levande organismer) om det kommer in i kroppen (organismen). Får man i sig plutonium via föda eller vätska är upptaget i mag-tarmkanalen mycket litet, mindre än 0,1%. Inandning av plutoniumstoft är betydligt farligare. Det hamnar direkt i lungan och kan där också tas upp i blodet. Den internationella strålskyddskommissionen anger ett maximalt tillåtet årligt intag för alfastrålande plutonium på 40.000 Bq via mag-tarmkanalen och 300 Bq via inandning.

40.000 Bq motsvarar ca 17 mikrogram plutonium-239. Man skulle således kunna dricka ca åtta liter vatten "mättat" med plutonium-239 utan att överskrida det tillåtliga årliga intaget för en kärnkraftsarbetare.

Plutonium förkommer i naturen. Det mesta har visserligen människan spridit ut. Ett antal ton spreds genom de provsprängningar av kärnvapen som gjordes i stor skala under 1950- och början av 1960-talen. Men det bildas också fortlöpande små, men mätbara mängder plutonium genom kärnreaktioner i jordskorpan. Undersökningar av en rik uranmalm i Cigar Lake i Kanada visar att varje gram uran innehåller mellan 1,9 och 3,2 pikogram plutonium (pikogram=10^{-12} gram). Antar vi att jämvikt uppnåtts mellan bildat och sönderfallande plutonium kan man beräkna att halten

borde vara mellan 2 och 5 pikogram per gram uran. Denna överensstämmelse visar att uran och plutonium (i oxidform) vid normala geokemiska förhållanden inte separeras från varandra under mycket lång tid – många tiotusentals år . Detta är en viktig kunskap när man skall bedöma säkerheten för djupförvar.

I naturen finns också kvar spår av det plutonium-244 (halveringstid 82,6 miljoner år) som bildades när jordens alla övriga grundämnen bildades.

Använt kärnbränsle innehåller en blandning av flera plutoniumisotoper. I vikt dominerar plutonium-239 (ca 50%) men i aktivitet de mer kortlivade plutonium-238 (ca 2%; halveringstid 88 år) och plutonium-241 (ca 13%; halveringstid 14 år). Den senare är en betastrålare som sönderfaller till americium-241 (halveringstid 430 år). Dessa tre isotoper svarar för nästan 90% av radioaktiviteten från plutonium i använt bränsle under de första åren och dominerar under ca 1.000 år. Kortlivade radioaktiva ämnen är farligare än långlivade räknat per gram!

Långlivade radioaktiva ämnen

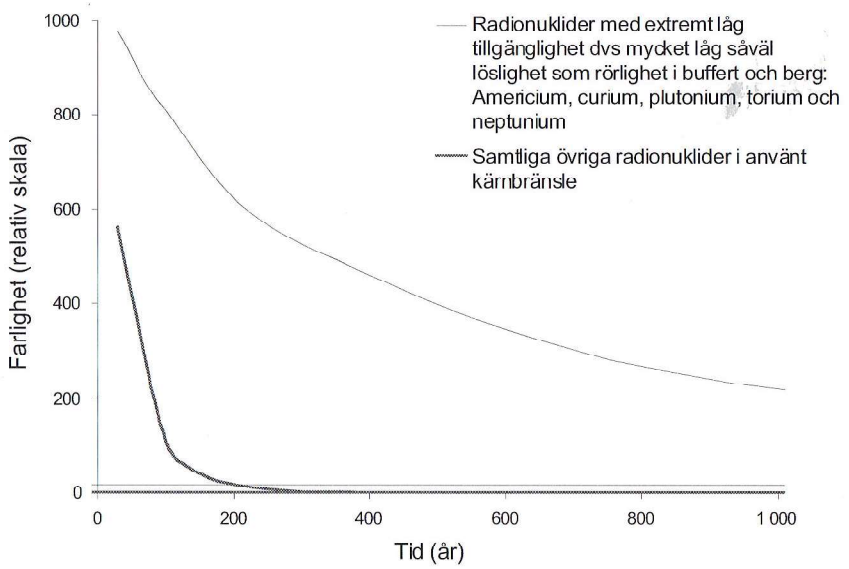
Därmed kommer vi in på ett av debattens hetaste missförstånd. De ofattbara långa halveringstiderna som gör ämnena till de farligaste på jorden!? I så fall borde väl de som har oändligt lång halveringstid (d v s är stabila ämnen) vara de allra farligaste? Så är naturligtvis inte fallet. Det är i stället tvärtom. Plutonium-238 har ca 275 ggr kortare halveringstid än plutonium-239. Båda isotoperna sänder ut alfastrålning med ungefär samma energi. Ett gram plutonium-238 är därför ca 275 ggr "farligare" än ett gram plutonium-239. Använt högutbränt kärnbränsle innehåller ca 25 ggr mer plutonium-239 än plutonium-238, men trots det är det den senare isotopen som dominerar "farligheten" hos plutonium i bränslet! (Plutonium-238 är också en energikälla med låg vikt och volym och med lång uthållighet. Det används därför bl.a. i satelliter och rymdsonder).

I det använda bränslet finns också en rad kortlivade radioaktiva ämnen som är långt farligare är plutonium. Några av dessa är även lättflyktiga. Exempel är jod-131 med åtta dygns halveringstid. Bränsle får inte transporteras bort från kärnkraftverken innan jod-131 har sönderfallit (till stabilt xenon) vilket tar ca sex månader. Jod-131 är det ämne som gett påvisbara medicinska effekter på barn som bodde i närheten av Tjernobyl i slutet av april och början av maj 1986.

Efter ett år när bränslet normalt brukar forslas till CLAB är aktiviteten ca 1% av den aktivitet som fanns när reaktorn ställdes av för bränslebyte. Innan det använda kärnbränslet ca 40 år senare kommer att kapslas in för

djupförvaring kommer ca 90% av denna kvarvarande aktivitet att ha klingat av. De radiologiska arbetsmiljöproblemen vid anläggningar för inkapsling och djupförvaring är därför en storleksordning enklare än vid kärnkraftverken och vid CLAB. Varför är avfallsproblemet olösligt?

De radioaktiva ämnen som finns kvar efter 40 års mellanlagring kan indelas i två huvudgrupper: - mycket svårlösliga (och långlivade) aktinider respektive alla övriga radioaktiva ämnen. "Farligheten" hos dessa två grupper illustreras av figur 1. "Farligheten" jämförs här med "farligheten" hos den mängd natururanmalm som behövs för att tillverka en viss mängd anrikat uranbränsle. (I exemplet i figuren innebär detta åtta ton natururan med urandöttrar i uranmalm per ett ton uran i kärnbränsle; uranmalmen har "farligheten" 1 beräknad som produkten av aktiviteten i Bq multiplicerad med dosfaktorn Sv per Bq vid intag med dryck eller föda).



Figur 1. För att illustrera riskbegreppet i samband med djupförvaring av använt kärnbränsle kan radionukliderna delas in i två kategorier; nuklider med extremt låg tillgänglighet (övre linjen) samt övriga (nedre linjen). Av figuren framgår att nuklider med låg tillgänglighet dominerar farligheten redan då avfallet deponeras. Den övre linjen domineras kraftigt av isotoper av plutonium och americium. Kurvorna börjar vid tiden 30 år eftersom avsikten är att det använda bränslet ska mellanlagras i 30-40 år innan det placeras i ett djupförvar.

Figuren visar att det tar mycket lång tid innan aktiniderna väsentligen plutonium och americium kommer ned i nivå med natururanet (med döttrar) medan övriga radioaktiva ämnen har avklingat till denna nivå efter drygt 300 år. I själva verket tar det drygt 100 000 år innan plutonium sönderfallit till i nivå med uranet i uranmalmen.

Plutoniumvandring i berg

Viktigt i detta sammanhang är att americium och plutonium är extremt svårlösliga i djupa grundvatten och dessutom är deras rörlighet mycket låg såväl i bergsprickor som i lera. Detta gör att även om man skulle placera dessa ämnen oskyddade direkt nere på stort djup i berg skulle endast mycket små mängder kunna spridas med grundvattnet.

Denna slutsats har nyligen ifrågasatts med hänvisning till en rapport i den vetenskapliga tidskriften Nature i januari 1999. I denna redovisas att små mängder plutonium (från en underjordisk kärnsprängning år 1968) fastnat på små partiklar (kolloider) och följt med grundvattnet. Aktiviteten är emellertid mycket låg beroende på bl.a. att halten av kolloider i djupa grundvatten är mycket låg. Plutoniumaktiviteter på 0,1 Bq per liter vatten har uppmätts i prover tagna i över 1000 meter djupa borrhål ca 1300 meter från explosionsplatsen. Detta är långt under de halter som skulle vara farliga.

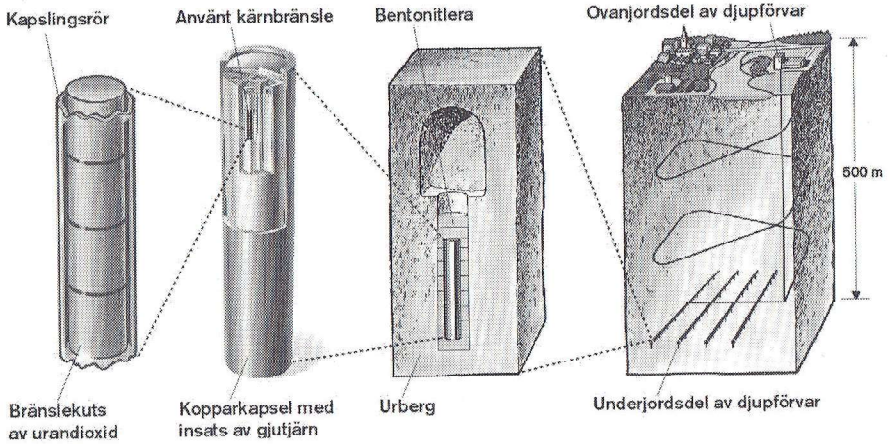
Möjligheten av sådan s k kolloidtransport av plutonium och av andra radionuklider diskuterades redan i slutet av 1970-talet i SKB:s rapporter. Den har beaktats i alla säkerhetsanalyser sedan dess och många undersökning har skett i SKB:s och andra forskningsprogram. En slutsats från dessa undersökningar av kolloider är att den låga kolloidhalten i djupa grundvatten är allmän och att den beror på att vattnet innehåller bl.a. kalciumjoner vilka lätt fastnar på kolloidpartiklar och gör dessa instabila.

Djupförvaringens principer

Avsikten är naturligtvis inte att lägga ned "naket" kärnbränsle i berget. Djupförvaret utformas i stället så att de radioaktiva ämnena isoleras av flera barriärer.

SKB:s plan är att kapsla in bränslet i behållare av koppar och gjutjärn. Järnet ger kapslarna god hållfasthet och utgör ett mekaniskt skydd för bränslet. Koppar är kemiskt stabil i sådant vatten som finns djupt ner i berget. Kopparkapseln skyddar därför mot korrosion. Tio cm tjocka (metall)väggar på behållaren hindrar att strålningen från de radioaktiva ämnena sönderdelar vattenmolekylerna genom radiolys.

Kapslarna placeras i ett djupförvar ca 500 meter ner i urberget. Kapslarna placeras en och en i deponeringshål som tas upp från tunnlar. Vattenomsättning runt en kapsel hindras eller begränsas genom att den omges av en tätpackad bentonitlera. Denna har egenskapen att den sväller och fyller alla hålrum. Vidare förhindrar den kolloider att passera och fördröjer dessutom starkt transport av de flesta ämnen som kan lösas i vatten. Genom att leran är plastisk ger den också ett mekaniskt skydd för kapseln. Efter det att alla deponeringshål i en tunnel har fyllts med kapslar och bentonit återfylls tunneln med bergkross eller lera och pluggas igen i mynningen. För deponering av det använda kärnbränsle som uppkommer från driften av de svenska kärnkraftverken fram till 2010 (ca 8000 ton eller 4000 kapslar) behövs det ca 30 km tunnlar. Figur 2 visar de olika barriärerna i förvaret.



Figur 2. Djupförvarets barriärer

De farliga långlivade ämnena, framförallt plutonium och americium, skyddas i ett sålunda utformat förvar av flera barriärer. För det första förväntas kapseln förbli tät under hela den tid som det finns plutonium kvar i bränslet d v s mer än 100 000 år. För det andra om det trots allt skulle gå hål på någon kapsel så är uran, plutonium och americium mycket svårlösliga i grundvatten. Förhållandena inne i en kapsel där det av någon anledning kommit in vatten kommer sannolikt att medföra korrosion av dels järn och dels bränslestavarnas zirkaloy under bildning av vätgas. Vätet kommer ytterligare att försvåra upplösning av uran och plutonium. För det tredje - den lilla mängd plutonium (och americium) som till äventyrs tar sig ut ur en kapsel med hål på kommer effektivt att bromsas av lerbarriären. Denna släpper ej igenom kolloider och dessutom fördröjer den transport av upplöst plutonium och americium så länge att de hinner sönderfalla innan de tar sig igenom.

Jämförelser

Det är en stor skillnad mellan ett djupförvar utformat på detta sätt och den kärnvapenexplosion som gav upphov till plutoniumvandringen under Nevada-öknen. Denna ägde rum på ca 1400 m djup den 19 december 1968 och hade en sprängkraft på 1,15 megaton TNT. Kilovis med plutonium och tonvis med berg förgasades när temperaturen steg till en miljon grader. Många tiotal ton berg smältes och ytterligare mängder spräcktes upp. Trots detta pekar det mesta på att grundvattnet är tjänligt på 1300 meters avstånd!

En intressantare jämförelse är dock den mellan en uranmalm och ett djupförvar. I uranmalmen finns uran och dess dotterprodukter. "Farligheten" domineras av radium och radon med radondöttrar. Malmen isoleras av berg och ibland även av sediment t ex lera. Ofta tränger radon ut från malmen och man kan hitta malmen genom att mäta strålning från radon och radondöttrar på markytan. Uranmalmer har funnits på jorden under miljarder år även om människan inte börjat intressera sig för dem förrän under det senaste hundratalet år.

I djupförvaret med använt kärnbränsle finns också uran. I vikt utgör det ca 95% av det radioaktiva materialet. Det finns emellertid mycket litet radium, radon och radondöttrar. Dessa togs bort vid reningen av malmen och finns i gruvavfallet. Under tiden som plutonium och americium och många andra ämnen sönderfaller inuti kapseln kommer emellertid nytt radium att bildas i uranet. Efter drygt 100 000 år kommer återigen "farligheten" hos bränslet att domineras av radium, radon och radondöttrar! Kretsloppet är så att säga slutet; vi är tillbaka till en rik "uranmalm" i berget. Skillnaden är att under mellantiden har vi förbrukat en liten del av uranet och därvid plockat ut en massa energi ur materialet. Vidare har vi isolerat bränslet med extra barriärer för att hindra andra radioaktiva ämnen som är mer kortlivade och "farligare" än uran att komma ut i berget. Denna isolering kommer med största sannolikhet att vara effektiv även långt efter de 100 000 åren.

Världens farligaste ämne?

Låt oss återvända till plutonium - i debatten ideligen utnämnt till världens farligaste ämne. Om detta är sant måste väl dödligheten vara osedvanligt hög bland dem som utsatts för stora mängder plutonium i sitt arbete.

De i detta avseende värst utsatta borde vara de som medverkade i bombtillverkning under 1940- och 1950-talen. Många av dessa arbetare har erhållit plutoniumdoser som långt överstiger de gränsvärden som gäller idag. De har följts upp noggrant under årens lopp och en serie artiklar har publicerats i den vetenskapliga tidskriften Health Physics och annorstädes. Slutsatserna av dessa studier är att i USA har man inte sett någon ökad dödlighet eller sjukdomsfrekvens bland dem som överexponerats av plutonium. Snarare är det så att de lever längre och mår i genomsnitt bättre än andra grupper som ej arbetat med plutonium. I Ryssland är erfarenheterna något annorlunda. Där har man observerat en ökad frekvens av lungcancer bland dem som utsatts för höga lungdoser från plutonium. Överexponeringarna är också väsentligt högre och fler än de som förekommit i USA. Enligt den ryska studien är dock tobaksrökning en större bidragande orsak till lungcancer bland "plutoniumarbetare" än överexponering av plutonium.

Slutsats – plutonium är farligt; man måste skydda sig effektivt när man hanterar och förvarar plutonium. Det finns dock många ämnen som är långt farligare och svårare att hålla kontroll på.

Kärnkraft och avfall

I diskussioner med motståndare till kärnkraft får man ofta höra argumentet att "vi kan inte ha kärnkraft ty avfallsfrågan är inte löst. Ingen kan garantera ett slutförvar för 100 000 år". Jag menar att avfallet kan aldrig ur teknisk-vetenskaplig synpunkt vara ett motiv för att inte använda kärnenergi. Kärnavfallet kan vara mycket farligt om man inte hanterar det rätt. Detta gäller också många andra ting och verksamheter i det moderna samhället. Det finns emellertid bra teknik och goda erfarenheter för att ha en fortsatt säker hantering av avfallet. Kärnavfallet utgör en relativt liten och väl kontrollerbar mängd. Det gäller att samhället tar sitt politiska ansvar för att tekniken används effektivt. Störningar i samhället är att mycket större hot mot människor och miljö än störningar i berget även om man i det senare lägger in ett 100 000 års perspektiv. Varför grovt överdriva faran i stället för att medverka till att den effektivt elimineras?

Per-Eric Ahlström är civilingenjör i teknisk fysik och tidigare bl.a. vice VD och utvecklingschef vid SKB. Numera pensionär och konsult.
Ingemar Lindholm är tekn.lic. och verksam inom "Projekt Kärnbränsle och Miljö". Mer information om kärnbränsle och -avfall finns hos info@skb.se, www.skb.se.

Kärnkraft och säkerhet

Jan-Olov Liljenzin

Alla kända sätt att producera energi i användbar form påverkar vår miljö och medför en viss risk för människors hälsa. Vid en jämförelse mellan olika sätt att producera energi är det dels en teknisk fråga att bedöma hur stora riskerna är och dels en politisk fråga att bedöma om dessa risker är acceptabla ur samhällets synpunkt. Riskerna får då vägas mot kostnaden för den producerade energin och behovet av denna. Säkerhet innebär i princip att riskerna bedöms så små att samhället upplever dem som acceptabla i förhållande till riskerna från andra sätt att producera energin eller till de risker och konsekvenser för miljö, samhälle och hälsa som finns om man helt avstår från energin.

Kärnkraften är en pålitlig och ekonomisk energikälla, men bildning och hantering av radioaktiva ämnen medför en risk för att dessa skall spridas i omgivningen. En annan typ av risk är missbruk av material och reaktorer i syfte att producera kärnladdningar, vilket behandlas av Hans Blix i denna bok. Här kommer olyckor i kärnkraftverk samt deras risker och konsekvenser att behandlas. För en mer detaljerad beskrivning hänvisas till en rapport av Pershagen[1].

Storleken av den beräknade *olycksfrekvens* som kan accepteras för att ett kärnkraftverk skall uppfattas som säkert ur samhällets synpunkt varierar något från land till land. Olycksfrekvensen är antalet olyckor per tidsenhet. Den uttrycks som 1 delat med det antal år som en reaktor varit i drift (*reaktorår*). Den första mer omfattande beräkningen av olycksfrekvensen i kärnkraftverk och deras konsekvenser gjordes under 1970-talet av en grupp under ledning av prof. Norman Rasmussen[2]. Man konstaterade då att frekvensen för haverier med stor omgivningspåverkan är omkring ett per 10.000 reaktorår för typiska reaktorer av västerländsk konstruktion. I Sverige är det eftersträvade riktvärdet idag högst ett svårare haveri per 100.000 reaktorår. Ansvaret för att ett kärnkraftverk i Sverige drivs på ett säkert sätt ligger hos den som har tillstånd att driva verket. Statens kärnkraftinspektion (SKI) är en statlig myndighet som ställer upp säkerhetskraven för drift av kärnkraftverk samt sedan övervakar att dessa krav efterlevs. SKI har rätt att stoppa driften om man anser att säkerheten inte uppfyller ställda krav. Huvudmålet är att ett svårt reaktorhaveri aldrig

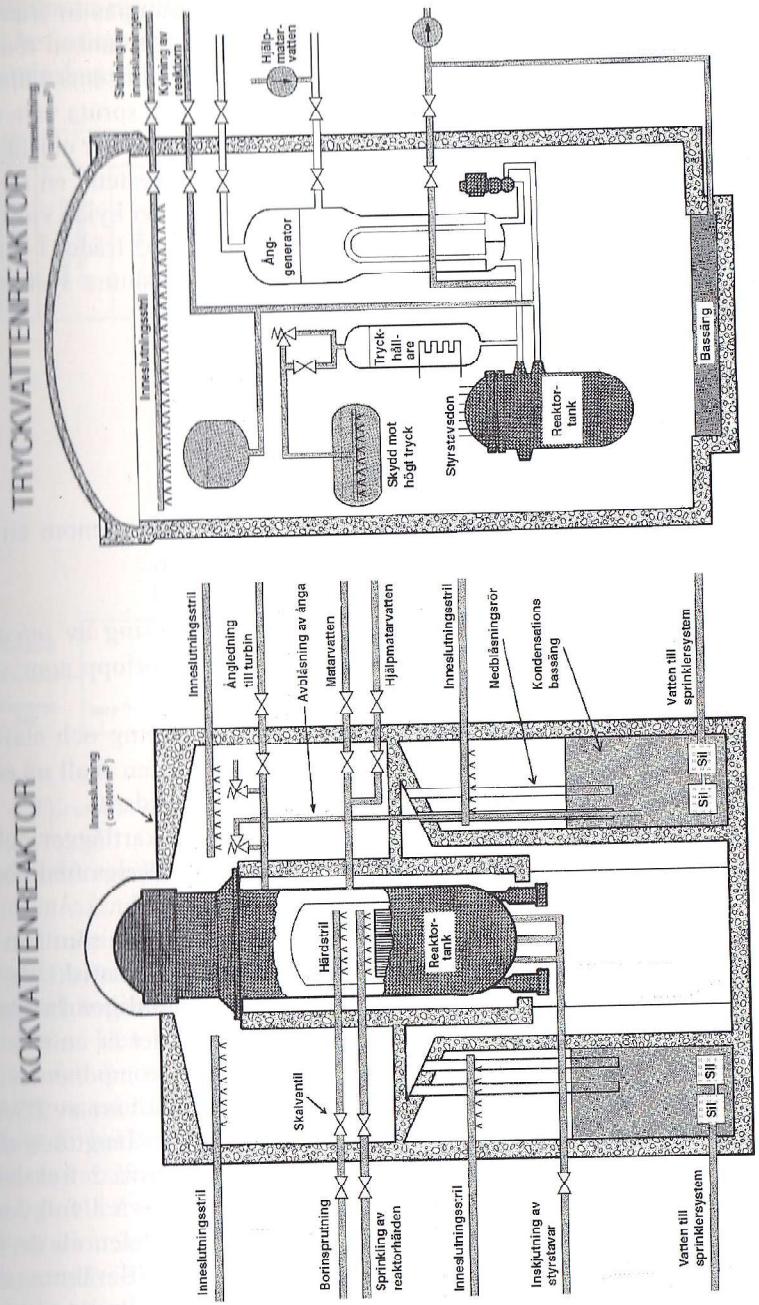
skall inträffa i svenska reaktorer. Den radiologiska säkerheten hos personal och allmänhet övervakas samtidigt av Statens strålskyddsinstitut (SSI).

Konstruktionsförutsättningar

Vid konstruktion av ett kärnkraftverk skall anläggningen utföras så att den klarar det som kallas för *dimensionerande haveri* utan någon betydande skadeverkan på miljön utanför anläggningen. Det dimensionerande haveriet skall vara en händelse som är fysiskt möjlig och som kan leda till stor spridning av radioaktiva ämnen i omgivningen om detta inte hindras av tekniska anordningar. Samtidigt får inte ett enstaka fel i ett säkerhetssystem medföra haveririsk, det så kallade *enkelfelkriteriet*.

I Sverige finns två sorts kärnreaktorer: *tryckvattenreaktorer* eller PWR-reaktorer (3 st) och *kokvattenreaktorer* eller BWR-reaktorer (9 st). Eftersom den senare typen är vanligast kommer i huvudsak denna att behandlas. För båda typerna har det dimensionerande haveriet antagits vara ett *giljotinbrott* hos ett av de största rören som leder ut från reaktortanken. Med ett giljotinbrott menas ett tvärt brott rakt över röret där de uppkomna rörändarna samtidigt flyttas i sid- och/eller höjdled så att de inte sitter i vägen för varandra. Ett sådant brott kommer att leda till att reaktortanken efter hand töms på vatten. Om ingenting görs förlorar bränslet då den kylning som behövs för att leda bort den värmeenergi som produceras genom sönderfall av radioaktiva ämnen som finns kvar i bränslet efter det reaktorn stoppats[1,3]. Efter en tid skulle detta leda till svåra skador på härden med åtföljande förångning av vissa radioaktiva ämnen och till sist en nedsmältning av delar av härden, en *härdsmälta*.

För att klara ett dimensionerande haveri förses reaktorn i första hand med en gastät *inneslutning*, se Fig. 1. Samtliga förbindelser mellan inneslutningen och omgivande byggnader förses med automatiskt stängande *skalventiler*. Volymen på inneslutningen väljs antingen så stor att den rymmer allt vatten i form av ånga under acceptabelt tryck (vanligast för PWR) eller också leder man ned utströmmande ånga och hetvatten i en bassäng med kallt vatten där ångan kondenserar varigenom inneslutningen kan ha mindre volym (vanligast för BWR). Dessutom sätter man in rörledningar och ventiler som kan användas för tillförsel av nytt vatten till reaktortanken som ersättning för det som förloras som ånga eller vatten genom det avbrutna röret. Detta vatten kan antingen hämtas med hjälp av



Figur 1. Säkerhetsrelaterade system för kok- och tryckvattenreaktorer

pumpar från inneslutningens botten via silar, eller pumpas in från något yttre förråd av vatten. Härigenom kan man motverka att tanken töms helt på vatten. För att kunna kyla härden om tanken trots allt töms sätter man in en *härdstril* i reaktortankens övcrdel. Härdstrilen kan spruta vatten över bränslet i härden på liknande sätt som ett sprinklersystem för eldsläckning i byggnader. Slutligen placeras ofta ett yttre sprinklersystem, en *inneslutningsstril*, i inneslutningen så att även dcss atmosfär kan kylas vid behov. Dessa säkerhetssystem är kopplade så att de automatiskt träder i funktion när någon händelse inträffar i reaktorn eller andra anslutna system som tyder på att de kan behövas.

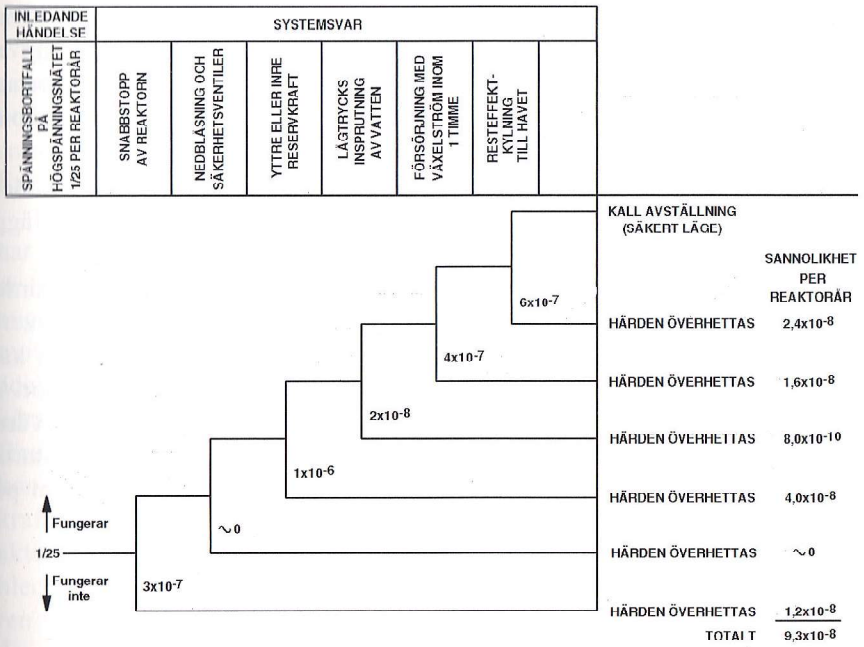
Säkerhetsanalys

Säkerheten hos ett kärnkraftverk måste kunna verifieras genom en återkommande *säkerhetsanalys*. Denna har tre beståndsdclar.

- *Deterministisk säkerhetsanalys* innebär en inventering av *inledande händelser* som kan drabba anläggningen och utlösa förlopp som skulle kunna leda till någon form av haveri.
- *Probabilistisk säkerhetsanalys* omfattar en kartläggning och statistisk behandling av de händelser som krävs för att anläggningen skall nå ett *säkert tillstånd* efter en inledande händelse; mer om detta nedan.
- *Människa-teknik-organisation-analys* (MTO-analys) kartlägger och bedömer människans och arbetsorganisationens säkerhetsmässiga funktion.

För att kunna uppskatta sannolikheten för en serie händelser som kan leda till någon form av reaktorhaveri använder man ett matematiskt verktyg som kallas probabilistisk säkerhetsanalys (PSA). Egentligen borde det kanske kallas för statistikbaserad riskanalys, eftersom det är en risk som uppskattas ur statistiska data för felfunktion hos olika komponenter med kännedom om hur dessa samverkar i anläggningen. Tre nivåer av PSA förekommer, beroende på hur grundlig analysen är och hur långt den drivs. På nivå 1 beräknas bara frekvensen av härdskador, på nivå 2 frekvensen av radioaktiva utsläpp utanför inneslutningen, och på nivå 3 frekvensen för olika konsekvenser av radioaktiva utsläpp. Största delen av de PSA som utförts på svenska kärnkraftverk ligger på nivå 1. Beräkningar på nivå 2 pågår för samtliga anläggningar. Fullständiga beräkningar på nivå 3 har ännu inte utförts i Sverige.

Det viktigaste resultatet av PSA är en identifiering av de största svagheterna i befintliga anläggningar. Dessa bör då åtgärdas, varigenom haveririsken minskas.



Figur 2. Förenklat exempel på händelseträd

Grunden för en PSA utgörs av ett *händelseträd*, se Fig. 2. Detta börjar med en *inledande händelse*. Genom en omsorgsfull analys av anläggningens konstruktion kan man sedan förutsäga de händelser som sker efter den inledande händelsen fram till ett slutligt tillstånd där förloppet avstannar. För varje händelse grenar man *händelsekedjan* till två fall; *funktion* eller *felfunktion*. I en gren inför man sedan statistiska data på hur vanligt respektive fall är. Sannolikheten att nå ett visst sluttillstånd blir nu produkten av de sannolikheter längs händelsekedjan som leder till detta tillstånd. Så långt är beräkningen relativt enkel. Svårigheter uppstår när det finns händelser vars funktion beror på andra händelser som kan inträffa tidigare, samtidigt, eller senare. För att motverka detta sker ett mångfaldigande och en separation av säkerhetssystem till två, tre, eller fyra helt oberoende *stråk*, som fysiskt är åtskilda av brandväggar etc. Detta kallas för *redundans*. För att ytterligare minska risken för identiska fel i annars oberoende system inför man även system som bygger på olika fysikaliska principer,

t.ex. elektriskt respektive hydrauliskt säkerhetssystem. Detta kallas för *diversifiering*. Typexempel på diversifiering är *styrstavsdrivdonen* i svenska BWR som dels har en elektrisk drivmotor och dels en hydraulcylinder, som vardera kan föra in *styrstaven* oberoende av den andra (om än med olika hastighet). Som ytterligare säkerhet när det gäller att stänga av BWR-reaktorer finns möjlighet att utlösa ett system som med hjälp av kvävgas från gastuber sprutar in en koncentrerad borlösning i reaktortanken och härigenom garanterar att reaktorn stannar. Detta system har ännu aldrig behövt användas.

Då nya erfarenhetsdata ständigt tillkommer ökas det statistiska underlaget, varför PSA måste upprepas regelbundet. Även ändringar i anläggningens utformning, t ex modernisering, medför behov av en ny PSA.
Gemensamt för alla PSA är att man inte får tillgodoräkna sig de åtgärder som reaktoroperatörerna kan vidtaga för att stoppa eller lindra haveriförloppet. Vid simulatorprov har det visat sig att operatörerna ofta kan stoppa en påbörjad händelsesekvens, som skulle kunna ge härdskador. Å andra sidan visar haveriet i TMI-II att operatörerna även kan förvärra förloppet genom att manuellt stänga av t ex säkerhetssystem som startat automatiskt för att förhindra ett haveri; i det aktuella fallet - genom påfyllning av mera vatten.

Den mänskliga faktorn

Medan det är relativt lätt att verifiera den "maskinmässiga" säkerheten så är det svårare att verifiera att personal handlar på ett säkert sätt. Man försöker öka säkerheten mot mänskliga fel genom tre åtgärder: i) Årligt återkommande simulatorträning av operativ personal, ii) 30-minuters-regeln, d.v.s. anläggningen skall automatiskt fungera på ett säkert sätt under minst 30 minuter efter en händelse som har betydelse för säkerheten. Härigenom undviks onödig stress hos personalen; iii) utförande av instrument, datorskärmar, instruktioner, manöverdon, etc., som ger en låg risk för misstag. En viktig del är också *erfarenhetsåterföring* och *utbildning* så att man hela tiden lär av egna och andras misstag.

Restrisker

Förutom de händelser som klaras av anordningarna för hantering av ett dimensionerande haveri kan ett antal mycket osannolika händelser eller kombinationer av händelser inträffa, som skulle kunna leda till ett haveri

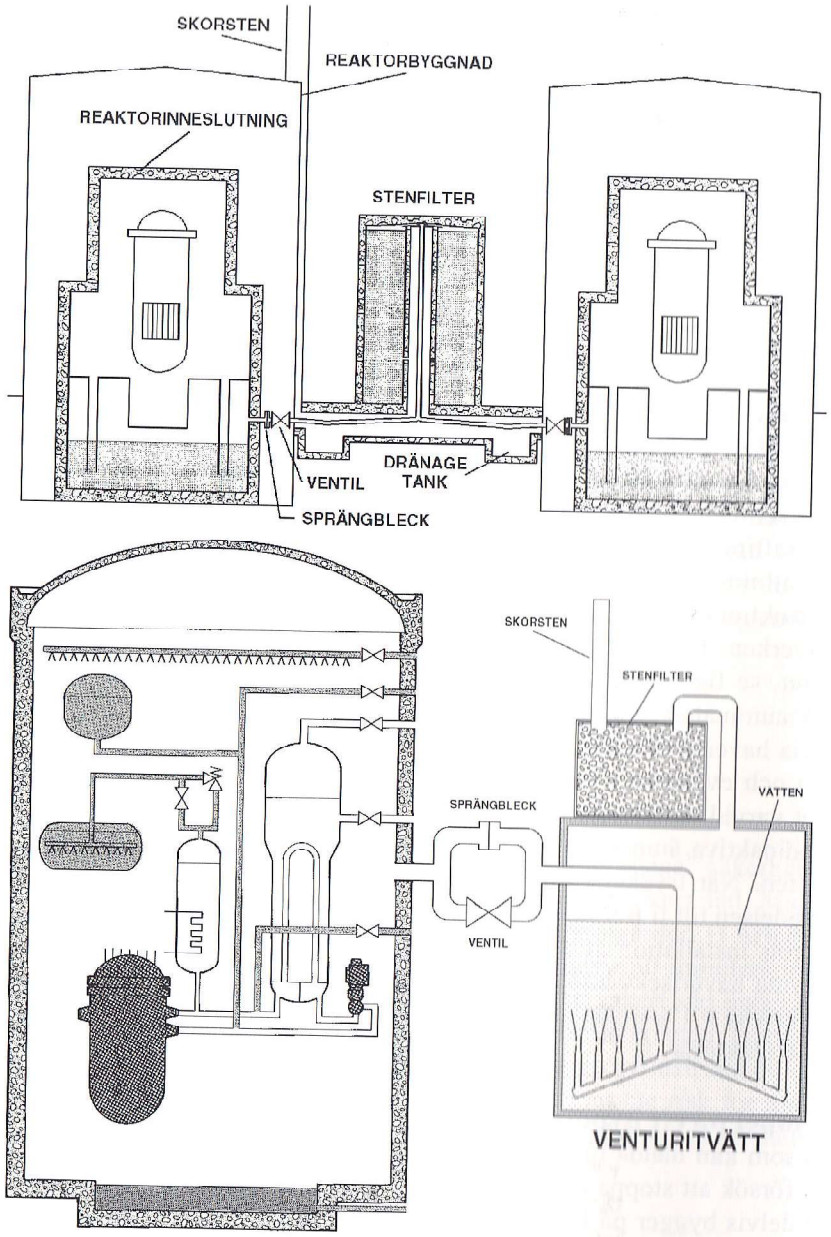
med omgivningspåverkan. Dessa sammanfattas normalt under begreppet *restrisker*. Som ett exempel kan vi ta ett fall där ett stort ångledningsbrott i en BWR medför att ett antal nedblåsningsrör för ånga lossnar. Härigenom försvåras kondensation av utströmmande ånga och trycket i inneslutningen stiger tills risk finns för att betongen i inneslutningen börjar spricka på svaga punkter, vilket kan medföra läckage av radioaktiva ämnen till omgivningen. Ett annat exempel är totalt elbortfall på högspänningsnätet i kombination med ett långvarigt fel på de gasturbiner och dieselgeneratorer som annars skulle förse anläggningen med nödström. Även i detta fall finns en risk för att trycket i inneslutningen med tiden blir för högt.

För att minska verkan av många händelser inom gruppen av restrisker har regeringen i Sverige krävt ytterligare *konsekvenslindrande anordningar*. Kravet är att från och med 1989 får mängden radioaktiva ämnen som avges till atmosfären vid ett svårt haveri högst vara 0.1% av mängden av motsvarande ämnen i en härd av Barsebäcks storlek, oräknat radioaktiva ädelgaser. Genom två stora forskningsprojekt, FILTRA[4] och RAMA[5], tog kärnkraftindustrin i samverkan med SKI och SSI fram konstruktionsförutsättningar för det som kallas *filtrerad tryckavlastning*. Två skilda konstruktioner för *haverifilter* har framtagits och installerats vid kärnkraftverken; Filtra i Barsebäck 1 och 2, och Venturitvättar vid övriga reaktorer, se fig. 3. Funktionsprincipen bakom båda typerna är att sprängbleck automatiskt öppnar en förbindelse från inneslutningen till atmosfären via haverifiltret när trycket i inneslutningen stigit till en för hög nivå. Ånga och eventuella radioaktiva ämnen i denna strömmar då ut igenom filtret varvid en betydande del av ångan kondenseras och huvuddelen av de radioaktiva ämnena avlägsnas innan återstoden ventileras ut genom en skorsten. När trycket i inneslutningen sänkts till normala värden stängs förbindelsen till filtret av verkets operatörer.

Trots installation av filtrerad tryckavlastning finns fortfarande mycket sällsynta haverisekvenser där utsläppen till omgivningen kan nå över den föreskrivna 0.1%-nivån. Frekvensen av dessa ligger betydligt under en per miljon reaktorår.

Exempel på ett hypotetiskt och ostört reaktorhaveri

Vad som kan hända under ett svårt reaktorhaveri som får förlöpa till slut utan försök att stoppa detta illustreras av följande kortfattade beskrivning, som delvis bygger på RAMA-rapporter[6,7,8]. Det beskrivna förloppet är hypotetiskt och dess totala sannolikhet bedöms som extremt liten. De tider som ges är mycket approximativa. I verkliga haverisimuleringar utnyttjas omfattande datorprogram, t ex MAAP (Modular Accident Analysis Pro-



Figur 3. Stenfilter och Venturitvätt

gram), och databaser som definierar en verklig anläggnings olika delar och deras uppträdande, styrsystem, etc.

Ett stort rörbrott nära reaktortanken leder plötsligt till en kraftig utströmning av ånga. Inneslutningen isoleras från omgivningen genom att skalventilerna stänger. Inpumpning av matarvatten upphör. Sjunkande vattennivå i reaktortanken utlöser nu en automatisk öppning av samtliga ventiler mellan reaktortanken och inneslutningen; *tvångsnedblåsning*. Den kraftiga ångutströmningen antas nu medföra att mellanbjälklaget skadas med följd att ett antal nedblåsningsrör slits loss (utan detta antagande ligger händelsen helt inom ramen för det dimensionerande haveri som varit en del i konstruktionsförutsättningarna). Reaktorn stannar när styrstavarna skjuts in, men avkokning av vattnet i reaktortanken leder till en sjunkande nivå. Härdsprinkling antas nu vara förhindrad, dels genom skador på rör och silar, dels genom igensättning av de silar som fortfarande är funktionsdugliga med lösriven isolering. Operatörerna antas nu stänga pumparna utan att backspola silarna. Trycket i inneslutningen stiger snabbt till högsta tillåtna och avblåsningsledningen till haverifiltret öppnar. Kraftigt kokande och skummande vatten i reaktortanken hindrar bränslet från överhettning tills dess vattennivån når nedre delen av härden. Ångbildningen avtar, trycket i inneslutningen sjunker och operatörerna stänger ledningen till haverifiltret. I övrigt vidtas inga åtgärder. Ännu har inga stora mängder radioaktiva ämnen frigjorts. Det har nu gått ca 45 minuter från rörbrottet.

Temperaturen på de frilagda delarna av bränslet i härden stiger nu på grund av värmeutvecklingen från radioaktivt sönderfall av kortlivade radioaktiva ämnen i bränslet. Cirka 2 timmar och 30 minuter efter haveriets början når delar av bränslets hölje en temperatur på ca 1300 °C. Nu börjar zirkonium i kapsling och bränsleboxar reagera häftigt med närvarande vattenånga, vilket ger vätgas, zirkoniumoxider och värme. I de flesta fall begränsas hastigheten hos förloppet av tillgången till ånga. Som följd av den kemiska reaktionsenergin stiger temperaturen hos frilagt bränsle fort. På bränslepinnarnas insida reagerar kapslingens zircaloy kemiskt med innanmätet av urandioxid till en smälta av uranmetall och zircaloy. Härvid frigörs ytterligare värmeenergi. Denna smälta börjar rinna nedåt inne i pinnarna samtidigt som kapslingen på utsidan når smältpunkten för zircaloy och börjar rinna nedåt utanpå bränslepinnarna. Kvarvarande urandioxid, som nu saknar hölje, splittras genom inre tryck från inneslutna gaser och flyger omkring innan den faller nedåt i härden. I detta läge frigörs alla ädelgaser, samt en betydande del av det skadade bränslets innehåll av mer lättflyktiga ämnen, t ex cesium och jod. De radioaktiva ämnena följer med ångströmmen ut i inneslutningen där alla utom ädelgaserna börjar depone-

ra som en beläggning på olika ytor eller hamnar i bassängvattnet. Nedrinnande smälta når kallare delar av bränslepinnarna och stelnar. Förloppet kallas "candeling" eftersom det liknar rinnande stearinljus.

Mängden stelnad smälta på bränslepinnarnas yta ökar nu tills en sammanhängande yta uppstår. Denna har sin lägsta punkt i härdens centrum, eftersom smältförloppet startade centralt, och en högre nivå nära härdens yttersida. På denna yta hamnar nu resten av det nedfallande och smältande materialet. Därvid uppstår en smält pöl med hög temperatur. Denna orsakar återsmältning av bottenytan och samtidig ny stelning på undersidan. Denna yta kommer härigenom att röra sig långsamt nedåt i härden samtidigt som den bär upp en ökande pöl av smält bränsle. Beräkningar, och studier av härdresterna från TMI-II, visar att en del av pölen sedan plötsligt kommer att rinna över kanten på underliggande yta. Nedrinnande smälta från pölen är så pass överhettad att den rinner genom kvarvarande vatten och når reaktortankens botten innan den börjar stelna. Därvid sker en avsmältning av större delen av de rör som leder styrstavs-donen genom tankbotten. Förloppet ger en kraftig ångbildning vilket på nytt accelererar den kemiska reaktionen mellan zircaloy och vattenånga och påskyndar fortsatt nedsmältning.
Någon tid senare har mängden stelnad smälta på tankbotten blivit så stor att dess värmeutveckling leder till genomsmältning av styrstavsdonens genomföringar och utrinning av smälta denna väg. Genom erosion vidgas öppningarna i tankbotten ganska snabbt. Smält material rinner nu ur reaktortanken och hamnar på det strålskydd av järn som finns kring styrstavsdonen under tankens botten. Med stor sannolikhet leder detta till att större delen av resterna av styrstavsdonen med tillhörande motorer och kablage ramlar ned i inneslutningens centrala del åtföljt av smält material. Kvarvarande vatten rinner också ut ur reaktortanken. Det har nu gått ca 3 timmar från haveriets början.

Som led i den förberedda haverihanteringen har ventiler öppnats mellan den ringformade kondensationsbassängen och inneslutningens centrala del, som härigenom vattenfyllts. Nedfallande material hamnar därför i en stor volym med många meter djupt vatten. Den nedrinnande smältan kommer därvid att granuleras och bilda en grusliknande hög på inneslutningens botten. Denna hög växer under hand i storlek, men förblir till större delen kyld genom det vatten som strömmar in från sidan, igenom högen och uppåt på grund av termosifonverkan. Efter ca 12 timmar slutar smälta att bildas och rinna ur reaktortanken.

I "grus"-högens centrala delar kan kylningen bli för dålig varför temperaturen stiger och ny smälta bildas. Denna reagerar då med underliggande betong. Betongresterna löses därvid i smältan och späder ut denna. Efter-

som sönderdelning av betong är en kraftigt energiförbrukande reaktion kommer smältan att återstelna när den trängt ned någon halvmeter i betongen. Detta beror på att värmeeffekten från kortlivade radioaktiva ämnen avtar hela tiden under haveriförloppet och nu når så låg nivå att fortsatt uppvärmning till smält tillstånd blir omöjlig, energin räcker helt enkelt inte till längre för att täcka värmeförlusterna. Det har nu gått flera dygn sedan haveriet startade. Det radioaktiva ämne som befinner sig till påtaglig del i inneslutningens atmosfär är jod, vars huvudisotop har en halveringstid på ca 8 dygn.

Under det beskrivna förloppet har trycket i inneslutningen stigit på nytt som följd av vätgasbildning och stigande temperatur hos vattenbassängen. Flera alternativ har därvid funnits under de dygn som gått, t ex i) operatörerna beslutar att ventilera igenom haverifiltret ännu en gång, eller ii) inneslutningsstrilen startas med extern vattentillförsel och sänker trycket genom att kondensera ånga, eller iii) härdstrilen startas med extern vattentillförsel och sänker trycket genom att kondensera ånga, iv) matarvattenpumparna startas. För dessa ändamål finns förberedda anslutningar som är åtkomliga utanpå reaktorbyggnaden.
I detta läge bör man överväga att höja pH i inneslutningens vatten genom tillförsel av någon lämplig alkalisk lösning. Härigenom kommer jodhalten i inneslutningen atmosfär att sjunka kraftigt. Sedan återstår hantering av den havererade anläggningen i ett längre tidsperspektiv, och efter många års väntan - dekontaminering och rivning.

Under det beskrivna förloppet har i stort bara radioaktiva ädelgaser och mindre mängder radioaktiv jod lämnat anläggningen som luftburen radioaktivitet. Samverkan av vattenfyllning och tidig tryckavlastning via haverifiltret reducerar i det beskrivna fallet utsläppet av radioaktiva ämnen till atmosfären till mindre än 0.1% av innehållet i en härd av Barsebäcks storlek (ädelgaser oräknade), vilket är regeringens krav.

Referenser

1. B. Pershagen, Lättvattenreaktorers säkerhet, Energiforskningsnämnden, Efn-rapport nr 20, ISBN 91-38-09244-1, Januari 1996.
2. Reactor Safety Study, United States Regulatory Commission, WASH-1400, 1975.
3. G. Choppin, J. O. Liljenzin, J. Rydberg, Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-2300-4, 1995.
4. FILTRA, Slutrapport, Studsviks bibliotek, November 1982.
5. E. Söderman, m.fl., Severe accident analysis in Sweden. Methods and results. RAMA III Final Report, RAMA III 89-02, Studsviks bibliotek, ISBN 91-7010-116-7, December 1989.
6. J. O. Liljenzin, Release and Deposition of Fission Products and Actinides, RAMA III Final Report, RAMA III 89-05, Studsviks bibliotek, ISBN 91-7010-119-1, December 1989.
7. K. Johansson (red.), RAMA Slutrapport, RAMA-85/1, Studsviks bibliotek, ISBN 91-7010-061-6, Januari 1985.
8. J. O. Liljenzin (red.), Reactor Accident Mitigation Analysis (RAMA). Final Report from the RAMA Source Term Group, RAMA-85/3, Studsviks bibliotek, Januari 1985.

Jan-Olov Liljenzin är professor i Kärnkemi vid Chalmers tekniska högskola.
jol@nc.chalmers.se, www.nc.chalmers.se

Atomansvar och försäkring

Gunnar Andersson

Lågfrekventa storskador

Låt mig inleda denna redogörelse med att helt kort beskriva hur försäkringsbolagen ser på sådana risker, där sannolikheten för att en viss händelse skall inträffa är mycket liten men, om händelsen ändå inträffar, de materiella skadorna blir mycket omfattande. Bolagens riskbedömning sker utifrån vilka skador som en och samma händelse beräknas kunna ge upphov till. En villabrand, t ex, leder endast i undantagsfall till skador utanför själva villafastigheten. En ihållande hagelstorm över ett tätbebyggt samhälle skulle däremot kunna leda till skador på ett stort antal byggnader, fordon m.m. För försäkringsbolagen är det således av vikt att i sin bedömning särskilt beakta sådana händelser som kan leda till skador på ett flertal försäkrade objekt.

I början av 90-talet gjordes en utredning i syfte att försöka klarlägga de ekonomiska konsekvenserna av ett dammgenombrott i någon av de stora norrländska älvarna. Man antog att en större regleringsdamm brister och att vattenmassorna drar med sig nedströms belägna dammar med omfattande översvämningar till följd. Man utgick ifrån mycket extrema - enligt vissa bedömare alltför extrema - förhållanden vad gäller vattennivåer, flöden, snösmältning mm. Beräkningarna visade att en sådan dammkatastrof skulle kunna leda till egendomsskador uppemot 50 miljarder kronor, för vilka försäkringsbolagen hade att utbetala ersättning. Var då bolagen beredda att ta på sig denna risk?

Ett försäkringsbolag får naturligtvis inte göra hur stora åtaganden som helst, än mindre obegränsade. Samhället och försäkringstagarna måste kunna förlita sig på att bolaget är i stånd att infria sina åtaganden även vid extrema skadefall. Regler härom finns i såväl lag som i försäkringsbolagens statuter. Verksamheten övervakas av Finansinspektionen. Den översta gränsen för ett bolags åtagande bestäms normalt i förhållande till bolagets eget kapital, d.v.s. bolagets tillgångar. Och här visade det sig att dessa tillgångar sammantaget icke är av den storleksordningen att den

samlade svenska försäkringsindustrin är beredd att svara fullt ut för konsekvenserna av en händelse som den ovan beskrivna. Bolagen ställdes sålunda inför valet att antingen helt slopa skyddet för skador genom dammgenombrott eller maximera ersättningen för sådana skador, t.ex. som man gjort i min hemförsäkring till blygsamma 10.000 kronor. Bolagens ställningstaganden skall således inte ses som ett uttryck för hur man bedömer sannolikheten för att den värsta skadan skall inträffa. Inte heller skulle en höjning av försäkringspremierna kunna locka bolagen till ytterligare åtaganden.

Ansvaret vid en atomolycka

Det finns vissa likheter mellan dammkatastrofen och en olycka i ett kärnkraftverk. Sannolikheten för en större atomolycka är mycket liten, men konsekvenserna kan bli omfattande. I slutet av denna redogörelse görs en jämförelse mellan en atomolycka och ett dammhaveri vad gäller de skadelidandes möjlighet till ersättning.

Inom OECD insåg man redan på 50-talet behovet av en internationell och enhetlig reglering av ansvarsfrågan i händelse av en atomolycka. Arbetet inom OECD ledde fram till "1960 års Pariskonvention angående skadeståndsansvar på atomenergins område", som fastlägger de grundläggande reglerna för ansvaret i händelse av en atomolycka. Dessa regler har sedan lagts till grund för den svenska lagstiftningen, 1968 års atomansvarighetslag. Pariskonventionen har med något undantag antagits av samtliga västeuropeiska länder.

Även många länder som står utanför Pariskonventionen, t ex USA, har i sin lagstiftning infört bestämmelser som i stora drag överensstämmer med konventionens.

Pariskonventionen, och därmed atomansvarighetslagen, bygger på följande fyra grundläggande principer:

- Anläggningsinnehavarens ansvar är strikt, d.v.s. han ansvarar oberoende av vållande från hans sida.

- Enligt den s.k. kanaliseringsprincipen är innehavaren ensam ansvarig för varje atomskada, som härrör från hans anläggning. En tillverkare eller leverantör av utrustning till anläggningen kan således aldrig göras ansvarig, inte ens vid eget vållande.

- Ansvaret är beloppsmässigt begränsat, för svensk del till 175 miljoner Särskilda Dragningsrätter, SDR. En SDR motsvarar i dag cirka 11 kronor, varför ansvaret i svensk valuta uppgår till cirka två miljarder kronor per skadehändelse. Varje deltagande land bestämmer själv sin beloppsgräns.

- Innehavaren är skyldig att täcka sitt ansvar genom försäkring eller ställa annan motsvarande säkerhet.

Genom ett tillägg till Pariskonventionen har man infört ett ytterligare ersättningssteg, enligt vilket ersättning utgår av statsmedel för skador överstigande anläggningsinnehavarens ansvar upp till ett sammanlagt belopp av 300 miljoner SDR eller cirka tre och en halv miljard kronor. För denna ytterligare ersättning svarar konventionsstaterna gemensamt enligt viss överenskommen fördelningsgrund. Förhandlingar pågår inom OECD, f.ö. under svenskt ordförandeskap, om en höjning av ersättningen enligt detta steg, sannolikt upp till minst 500 miljoner SDR.

Utöver ovan angivna fyra grundprinciper gäller enligt den svenska lagstiftningen följande:

- Lagen ger rätt till ersättning för s.k. ren förmögenhetsskada, d.v.s. ekonomisk skada som inte har samband med person- eller egendomsskada. Sålunda är t ex en rörelseidkare som drabbas av en avspärrning i samband med en atomolycka berättigad till ersättning för därigenom uteblivna intäkter. Detta innebär en utvidgning av rätten till ersättning, jämfört med den allmänna svenska skadeståndsrätten, som inte medger rätt till ersättning för sådan indirekt skada.

- Preskriptionstiden för innehavarens ansvar är tio år, räknat från tidpunkten för atomolyckan. Därutöver har svenska staten påtagit sig en ytterligare preskriptionstid om 20 år, varigenom de skadelidandes rätt till ersättning upphör först efter 30 år.

- Vid tillämpning av atomansvarighetslagen betraktas samtliga reaktorer på en och samma plats som en anläggning.

- Lagen innehåller också regler om ansvaret för atomskada som uppkommer i samband med transport av atomsubstans. Med atomsubstans avses alla steg i bränslecykeln från anrikat, obestrålat UF_6 (uranhexa-

fluorid) till det använda kärnbränslet. I fråga om transport inom landet eller mellan två konventionsstater är huvudregeln, att atomansvaret åvilar den avsändande anläggningsinnehavaren. Parterna har dock rätt att skriftligen avtala om en annan ansvarsfördelning dem emellan. I andra fall, d.v.s. vid transport mellan en svensk anläggning och en anläggning i en icke-konventionsstat, åvilar ansvaret den svenska anläggningsinnehavaren.

- Skada till följd av krig eller krigsliknande händelse omfattas inte av lagen. Ersättning för s k krigsskador regleras i annan ordning. Däremot ersätts atomskada som uppkommer som en följd av ett sabotage utan samband med krig.

- Skulle det av någon anledning visa sig, att försäkringsbolaget inte kan infria sina åtaganden i händelse av skada eller att ställda säkerheter inte är tillräckliga, garanterar staten ersättning till de skadelidande inom ramen för anläggningsinnehavarens ansvarsbelopp.

För att ersättning skall utgå enligt ansvarsförsäkringen fordras naturligtvis, här liksom i andra skadeståndsfall, att den skadelidande verkligen kan påvisa ett samband mellan en inträffad skada och den nukleära verksamheten ifråga. Inte minst när det gäller cancersjukdomar kan det vara svårt, eller rent av omöjligt, att bevisa ett sådant samband. Mer än var tredje människa drabbas ju förr eller senare av någon form av cancer, och hur skall då en person kunna styrka, att just hans sjukdom föranletts av en viss speciell händelse? Skulle sådana skadeståndskrav uppkomma i framtiden blir det till sist våra domstolar som har att avgöra vilken grad av bevisning som kommer att krävas.

Svenska Atomförsäkringspoolen

När det på 50-talet blev fråga om att utnyttja kärnenergin för elproduktion fann man det nödvändigt med ett samgående inom försäkringsindustrin. Det gällde att möta behovet av försäkringsskydd till mycket höga belopp och inte minst att täcka risker som man på den tiden hade mycket liten erfarenhet av. Ett antal atomförsäkringspooler bildades på olika håll i världen, idag uppgående till ett antal av drygt trettio. I dessa pooler samlas försäkringsbolag inom respektive länder. Samarbetet poolerna emellan

kan enklast beskrivas så, att varje pool försäkrar anläggningarna inom sitt land, varefter återförsäkring sker mellan de olika poolerna. Härigenom har man uppnått inte bara en avsevärd försäkringskapacitet utan också en omfattande och nödvändig riskspridning.

Genom dessa pooler har naturligtvis konkurrensläget försäkringsbolagen emellan kommit att påverkas. Tämligen stränga regler härom finns såväl inom EU som i svensk lagstiftning. De svenska poolmedlemmarna har erhållit Konkurrensverkets godkännande av samgåendet, t v tidsbegränsat till år 2004. Det har i detta sammanhang kunnat konstateras, att poolsamarbetet inte verkat konkurrensbegränsande då det gäller försäkringstagarnas möjlighet att välja försäkringsgivare utanför poolen. Att trots detta samtliga svenska atomansvarsförsäkringar är tecknade i poolen beror i första hand på att det hittills inte ställts någon försäkringskapacitet till förfogande utanför den egentliga poolkretsen, d.v.s. de bolag världen över som inte deltar i poolsamarbetet har inte varit beredda att delta i denna typ av risk. På senare tid har emellertid ytterligare kapacitet blivit tillgänglig på marknaden, i första hand vad gäller egendoms- och avbrottsförsäkringarna. De svenska anläggningarna är numera till drygt en tredjedel egendomsförsäkrade utanför poolen.

Försäkring av de svenska atomanläggningarna

Atompoolen har som sagt meddelat atomansvarsförsäkring för samtliga svenska atomanläggningar, vilka försäkringar till cirka 85 procent återförsäkrats i andra pooler Försäkringarna avser, förutom de tolv reaktorerna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals även anläggningarna i Studsvik, den sedan 70-talet nedlagda Ågestaanläggningen, ABB Atoms bränslefabrik i Västerås, centrallagret för använt kärnbränsle, CLAB, i Simpevarp, slutförvaret för låg- och medelaktivt avfall, SFR, i Forsmark samt en anläggning för behandling av anrikat uran i Ranstad. Härtill kommer försäkring av ett stort antal transporter av atomsubstans, huvudsakligen i sådana fall då en svensk innehavare är ansvarig. Att gamla nedlagda Ågesta alltjämt måste försäkras beror på att anläggningen ännu inte är nedmonterad och friklassad, viket är en förutsättning för att an-

läggningen inte längre skall betraktas som en atomanläggning i lagens mening.

Man frågar sig varför man i Sverige valt just 175 miljoner SDR per skadehändelse som högsta ersättningsbelopp. Beloppet fastställdes 1994 efter samråd med Atompoolen och svarar mot poolens dåvarande kapacitet, d.v.s. det maximala åtagande poolen, tillsammans med återförsäkrarna, kunde göra enligt de regler som redogjorts för ovan. Poolen meddelar ju som sagt inte bara ansvarsförsäkring utan även egendoms- och avbrottsförsäkring för dessa anläggningar. En och samma atomolycka kan naturligtvis, och högst sannolikt, komma att medföra rätt till ersättning enligt samtliga försäkringar. Poolens maximala åtagande är således lika med summan av försäkringsbeloppen för dessa försäkringar eller totalt cirka 12 miljarder kronor. Sedan 1994 har kapaciteten ökat inte oväsentligt, varför man snart kan räkna med en höjning av beloppet. Detta sker då genom att riksdagen beslutar om en ändring i atomansvarighetslagen.

Kritik har riktats mot att endast en mindre del av den totala försäkringskapaciteten förbehållits ansvarsförsäkringen, medan innehavarens försäkringsskydd för skada på den egna anläggningen uppgår till avsevärt högre belopp. Den huvudsakliga orsaken till denna fördelning ligger i ansvarsförsäkringens natur, och detta gäller inte bara atomansvaret utan alla typer av ansvarsförsäkring. Vid egendomsförsäkring kan försäkringsgivaren tämligen väl bedöma vilka skador som kan inträffa på försäkringsobjektet, och han får i regel kännedom om en skada redan i samband med att den inträffar. Åtagandet vid en ansvarsförsäkring är betydligt mer ovisst, då åtagandet är mer eller mindre generellt, d.v.s. i princip varje fall av skadehändelse skall täckas. Inte heller är det säkert att försäkringsgivaren får kännedom om en skada förrän långt efter det att den inträffat. Detta gör att försäkringsbolaget först flera år efter försäkringsperiodens slut vet, om det har att betala ut någon ersättning. Preskriptionstiden är normalt 10 år, och minst under denna tid måste bolaget hålla böckerna öppna och reservera medel för eventuellt senare skadeutbetalningar.

Försäkringsbolagen världen över har sedan 70-talet drabbats av ett stort antal skador som lett till ersättningar långt utöver vad man ursprungligen antagit och beräknat försäkringspremien efter. Detta har främst gällt den typ av skador, där skadan orsakas under försäkringsperioden men upptäcks först senare. Skador genom hantering av asbest är ett exempel, där försäkringsbolagen drabbats av ofantliga ersättningskrav som många gånger framställts lång tid efter det skadorna uppkommit. Härigenom begränsas i hög grad bolagens möjligheter att ställa kapacitet till förfogande för ansvarsförsäkring jämfört med förhållandet vid egendomsförsäkring.

Bl.a. genom att en ansvarsförsäkring kan omfatta flera reaktorer på samma plats kan man inte utesluta möjligheten av att två eller fler atomolyckor inträffar på platsen under en och samma försäkringsperiod, normalt kalenderåret. Ingen försäkringsgivare kan dock påta sig ansvaret för flera sådana skador med hänsyn till de höga beloppen. Lagen ger därför möjligheten att försäkring tecknas att gälla upp till ett belopp motsvarande ansvarsbeloppet per händelse ökat med 20 procent, d.v.s. (1,2x175) =210 miljoner SDR, vilket då är den högsta sammanlagda ersättning som kan utgå under en och samma försäkring. Tanken är att om det inträffar en atomolycka och del av eller hela ansvarsbeloppet tas i anspråk för skadeutbetalningar, skall det finnas ytterligare medel tillgängliga i det fall ännu en olycka skulle inträffa i anläggningen under perioden. Det åligger innehavaren att snarast efter den första olyckan omförhandla med försäkringsgivaren om ett återställande av försäkringsbeloppet till ursprunglig nivå.

Några jämförande synpunkter

Frågan om anläggningsinnehavarens ansvar i händelse av en allvarlig atomolycka och hur detta ansvar försäkras har alltsedan 70-talet varit föremål för debatt. Inte minst inom de kretsar som ogillar kärnkraften har man riktat kritik mot att anläggningsinnehavarens ansvar har begränsats till visst belopp och att staten ålagts ansvaret för skador över detta belopp. Men jämfört med annan industriell verksamhet är skillnaden kanske inte så stor. Ansvarsbegränsningar finns även på andra områden, t ex inom sjöfarten, där redarens ansvar sedan länge varit begränsat och bestämts i förhållande till fartygets dräktighet. Vidare är ett obegränsat ansvar i många fall rent illusoriskt. Ett företag kan ju aldrig ersätta skador utöver sina egna tillgångar. Man kan tänka sig många olika skadesituationer, där samhället skulle få gå in och ersätta skador sedan skadevållarens betalningsförmåga uttömts.

Under den senaste valrörelsen uppmanades väljarna att ta fram sina hemförsäkringsbrev och konstatera, att s.k. atomskada inte omfattas av försäkringsskyddet. Rimligen borde man då också ha uppmanat väljarna gå vidare i läsningen av villkoren för att konstatera, att försäkringsskyddet har begränsats även vad gäller dammskador. Man underlät också att nämna, att atomskadan ersätts i annan, i lag reglerad ordning, viket inte gäller dammskadan.

Vad gäller ansvaret för skador till följd av en dammolycka kom detta att regleras så sent som 1997 genom ett tillägg i vattenlagen. Genom de nya reglerna görs dammägaren strikt ansvarig för uppkomna skador, d.v.s. oberoende av vållande, och ersättning kan utgå även för ren förmögenhetsskada. Så långt överensstämmer ansvaret med atomansvaret. Man har emellertid inte ålagt dammägaren någon obligatorisk försäkringsplikt, och inte heller har man infört några bestämmelser om statsansvar.

Man möter ofta den invändningen att statens åtagande i sammanhanget skulle innebära en så stor subvention för kärnkraften att prisbilden för denna skulle påverkas märkbart. Visst innebär statens åtagande en viss subvention för kraftverksägaren. Frågan är då hur man skall beräkna det ekonomiska värdet av denna subvention. Genom minst tre av varandra oberoende beräkningar har man kommit fram till att värdet motsvarar mellan några hundradels och någon tiondels öre per producerad kWh.

Låt oss så se på de skadelidandes möjligheter att få ersättning vid en atomolycka, jämfört med förhållandet vid en dammolycka:

- Den avgörande frågan huruvida skadeståndsskyldighet verkligen föreligger och mot vem den skadelidande då skall rikta sitt krav har fått en likformig reglering i de båda fallen, liksom rätten till ersättning även för ren förmögenhetsskada. Möjligen kan en skillnad sägas ligga i att om flera dammar skulle rasa samtidigt kan oklarhet uppstå i fråga om vilken eller vilka dammägare – rätteligen den eller de som har underhållsskyldigheten – som skall göras ansvarig.

- Man har garantier för att det finns en försäkring eller annan säkerhet till skydd för de skadelidande i händelse av en atomskada. Härtill kommer statens garantier. Motsvarande skydd har inte de skadelidande vid dammskadan, även om staten sannolikt måste träda in och svara för ersättningarna vid ett större haveri. De svenska dammägarna har här tagit sitt ansvar och frivilligt, tillsammans med sina norska kollegor, tecknat en ansvarsförsäkring mot skador till följd av dammgenombrott och med försäkringsbelopp i samma storleksordning som gäller för atomansvaret.

- Vanligen fungerar försäkringsskyddet så, att ersättning för en skada kan utgå antingen enligt skadevållarens ansvarsförsäkring, om nu vållande förelegat, eller enligt den skadelidandes egen sakförsäkring. Vi kan ta bilskador som exempel. Även om jag har min bil helförsäkrad och oförskyllt blir påkörd av en annan bil, ser jag naturligtvis helst att skadorna på min bil inte belastar min egen försäkring utan ersätts genom den andres ansvarsförsäkring. Genom att kanalisera allt atomansvar till innehavaren och ålägga denne försäkringsplikt besparar man bl.a. tillverkare och leverantörer besvär och kostnader för att teckna egna ansvarsförsäkringar. Inte heller finns det anledning att skydda den egna egendomen genom sakförsäkring mot atomskada. Man undviker härigenom många fall av onödig dubbelförsäkring.

Lyckligtvis har det ännu inte hänt att en svensk ansvarsförsäkring har behövt tas i anspråk på grund av atomskada. Och såvitt jag känner till är förhållandet detsamma inom övriga stater som biträtt Pariskonventionen. Men värdet i detta regelsystem ligger inte bara i att de skadelidande bereds rätt till ersättning i händelse av en atomolycka. Det ligger också ett stort värde i att ansvarsfrågan är entydigt och en gång för alla reglerad, vilket avsevärt underlättat och i flera fall varit en förutsättning för bl.a. de entreprenadavtal som träffats inom kärnenergiområdet och som möjliggjort vårt nuvarande kärnkraftprogram.

Gunnar Andersson är jur. kand. och har varit VD för Svenska Atomförsäkringspoolen.

Vår dagliga dos

Om strålning och risker

Björn G. Wahlström

Historien känner några människogrupper som först exponerats för stark strålning och bland vilka man senare konstaterat ökad förekomst av cancer. Den grupp som givit oss mest information i detta hänseende är offren för bombningarna av Hiroshima och Nagasaki 1945. Nästan 100 000 människor, som då utsattes för stråldoser av varierande storlek, överlevde.

Under de påföljande decennierna har man noggrant följt upp hälsotillståndet hos dessa personer och deras efterkommande. Resultaten visar på något ökad cancerförekomst hos den bestrålade populationen, men inget avvikande hos senare generationer. De cancertyper som ökade mest var leukemi samt sköldkörtel- och bröstcancer. Av de vanligare cancertyperna uppträdde något hundratal fall utöver det förväntade antalet. Mindre vanliga cancertyper visade upp mindre ökning, några tiotal fall per cancertyp. Ökningen var mest markant bland de personer som fått de största doserna.

Totalt var inte ökningen av cancerfall särskilt dramatisk, cirka 6 procent, men det var tillräckligt för att klart synas i statistiken. Uppföljningen pågår fortfarande även om det redan förflutit ett halvt sekel sedan bestrålningen skedde och ingen längre väntar sig väsentligt förändrade siffror.

Människogrupper med höga doser

Gruppen av bomboffer uppfyller två villkor som är nödvändiga för att ge tillförlitlig information om strålningens hälsoeffekter. Gruppen var tillräckligt stor och stråldoserna var tillräckligt stora. Det finns några grupper till som uppfyller dessa villkor, nämligen:

- Röntgenläkare som var verksamma vid seklets början innan strålningens faror var kända och innan rimliga dosgränser togs i bruk.
- Patienter som fått strålbehandling. Den starka strålningen har ibland förorsakat *hudcancer*.
- Gruvarbetare som utsattes för mycket koncentrerad radongas vid den tid när man inte ännu insåg vikten av god ventilation i gruvorna. Ökad förekomst av *lungcancer*.
- En grupp kvinnor som vid seklets början målade självlysande siffror på urtavlor med radiumhaltig färg. De spetsade den fina penseln med läpparna och fick på så sätt i sig radium. En del drabbades av *skelettcancer*.
- Personer som exponerades för stora doser av radioaktiv jod som följd av kärnkraftskatastrofen i Tjernobyl år 1986. Speciellt hos barn ökade förekomsten av *sköldkörtelcancer*.

Ingen av dessa grupper använde stråldosmätare, så man kan inte veta exakt hur stora stråldoser de fick. I stället har man senare gjort försök att uppskatta deras doser. Man hade sålunda dels uppgifter om antalet extra cancerfall och dels en uppfattning om stråldosernas storlek, vilket gjorde det möjligt att bedöma *cancerrisken per stråldosenhet*. Detta samband kallas strålningens riskfaktor.

Det är skäl att nämna att man inte i någon av dessa grupper konstaterat någon ökning av genetiska skador hos efterkommande. I motsats till vad många tror, känner man inget fall av "nedärvd strålskada" hos människor, inte heller bland de 80 000 avkomlingarna till de japanska bomboffren. När vi i det följande diskuterar strålningens hälsorisker koncentrerar vi oss på risken för cancer, hållande i minnet, att risken för genetisk skada förorsakad av strålning under alla omständigheter är mycket mindre.

Rekommenderade riskfaktorer

Internationella strålskyddskommissionen ICRP rekommenderar att man för leukemi använder riskfaktorn *0,005 fall per 1 000 mSv (tusen millisievert)*. Tusen millisievert är en mycket större stråldos än vad personer, som i sitt yrke utsätts för strålning, tillåts få totalt under hela sitt yrkesmässiga liv.

Riskfaktorn för dödlig bröstcancer anges av ICRP till *0,002 fall per 1 000 mSv*. Risken för att dö av cancer i sköldkörteln är mycket mindre och anges till *0,0008 fall per 1000 mSv*. Dessa riskfaktorer är endast några exempel.

Viktigare än enskilda riskfaktorer för speciella cancertyper är naturligtvis riskfaktorn som anger den totala risken att dö av vilken cancer som helst. Denna beräknas som summan av riskfaktorerna för alla enskilda cancertyper. ICRP rekommenderar att faktorn *0,04 fall per 1 000 mSv* tillämpas på vuxna personer som exponeras i sitt yrke och den något högre faktorn *0,05 fall per 1 000 mSv* på befolkningen som helhet.

Dessa riskfaktorer har uträknats på basen av de stora stråldoser som förorsakat en observerad ökning av cancer. Det är inte klargjort och inte självklart att samma riskfaktorer gäller också för de små doser, där inga iakttagelser om ökad cancer föreligger.

Om man dricker en hel flaska starksprit på en gång blir man kraftigt berusad. Men hur är det om man intar lite sprit – t.ex. en tesked. Blir man då lite berusad? Eller inte alls? Finns det ett tröskelvärde för påverkan? Kan lite sprit rentav vara nyttigt?

Om riskfaktorn 0,05 cancerfall per 1 000 mSv är riktig och grundar sig på iakttagelser hos starkt exponerade populationer, kan man då fastslå att risken är 0,0005 om man får 10 mSv och 0,00005 om man får 1 mSv? Det finns inga iakttagelser som bekräftar eller kullkastar en sådan hypotes. Det kan vara just på det viset, men några tror att det finns ett tröskelvärde under vilket riskfaktorn blir mindre eller till och med noll. Kanske små doser rentav är nyttiga? Eller kanske tvärtom risken per mSv är större vid små doser. Så länge ingen kan visa hur det egentligen förhåller sig har alla dessa olika uppfattningar sina förespråkare.

Fem olika riskmodeller

Vi ska nu titta närmare på fem olika teoretiska riskmodeller. Det är värt att ägna dem några minuter, så att vi kan känna igen dem när de dyker upp i olika sammanhang och så att vi bättre skall förstå den eviga diskussionen om linjärt eller icke-linjärt samband mellan stråldos och hälsorisk.

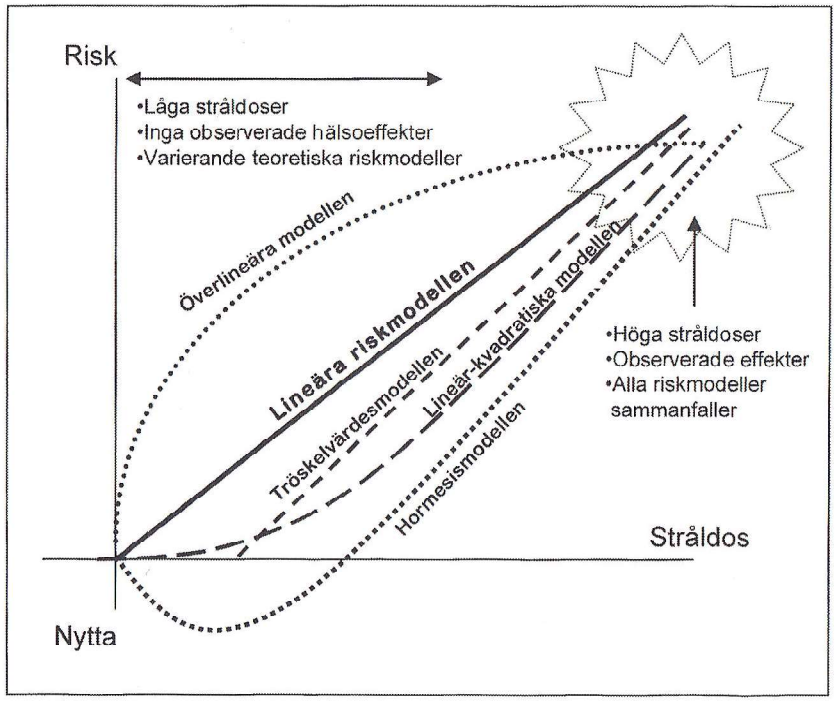
Riskmodellerna kan avbildas i ett koordinatsystem med stråldosen längs den vågräta axeln och risken på den lodräta. Både dosen och risken har värdet noll i origo, där axlarna skär varandra. Den räta eller krökta linje som avbildar riskfunktionen måste givetvis gå genom den punkt man

känner, den punkt som representerar stora stråldoser och observerade hälsoeffekter. I området med små doser måste man nöja sig med gissningar och teorier.

Lineära riskmodellen

Den modell som bör användas i alla riskbedömningar och som ledstjärna för strålskyddsverksamheten är den s.k. lineära riskmodellen. I vårt diagram ser den ut som en rät linje som dragits från "den kända punkten" med stora doser och observerade risker rakt till origo. Enligt den lineära riskmodellen är risken *per mSv* konstant, oberoende av hur liten eller stor dosen är. Modellen överskattar sannolikt risken av små doser. När man använder den lineära riskmodellen är man troligen på den säkra sidan. Det är därför just denna modell bör användas vid riskbedömningar. Och dessutom är den ju så enkel att använda.

De olika teoretiska riskmodellerna



Den linеära riskmodellen används till exempel för att bedöma "nettonyttan" av förebyggande massundersökningar med röntgen. Sådana har tidvis utförts för motarbetande av tuberkulos (lungröntgen) och bröstcancer (mammografi). Principen är följande: Antag att 1 000 000 personer skall undersökas och att var och en då får en dos på *1 mSv*. Om nu cancerrisken är 0,05 per *1 000 mSv*, så är risken enligt denna riskmodell 0,00005 för var och en av de undersökta personerna. Undersökningen kan därför beräknas förorsaka 1 000 000 gånger 0,00005, dvs. 50 cancerfall (vilket sannolikt är en överskattning). Å andra sidan kan man räkna med att upptäcka inemot 2 500 fall av cancer i det tidiga stadium när den kan botas. Nyttan är alltså klart större än skadan, och massundersökningen är därför berättigad.

Lineär-kvadratiska riskmodellen

Även om ICRP rekommenderar att den lineära riskmodellen används vid riskuppskattningar av ovanstående slag konstaterar kommissionen att den modell som representerar den biologiska sanningen knappast är en rät utan snarare en krökt linje, vars lutningsvinkel är liten vid låga doser och blir brantare vid större. Kurvan "hänger som en hängmatta" under den lineära modellens lutande räta linje. Detta är den lineär-kvadratiska riskmodellen, som innebär att små doser representerar en mindre risk per mSv än stora doser. Den biologiska förklaringen anses vara organismens förmåga att korrigera små skador av små doser effektivare än stora skador av stora doser. Bestrålningsförsök med växter och smådjur förefaller även enligt många forskare att stödja denna modell.

Tröskelvärdesmodellen

Några forskare går längre än så. De anser att risken av små doser faktiskt är precis noll och inte bara "nästan noll". Enligt denna modell medför endast doser som överstiger en viss toleransnivå en riskökning. Modellen har fått namnet tröskelvärdesmodellen. De som stöder denna modell litar starkt på de enskilda molekylernas och cellernas självreparerande förmåga. De räknar med att små skador läker helt, men inte stora. Därför utgör små doser ingen hälsorisk medan stora gör det.

Tröskelvärdesmodellens supportrar pekar på att cancern inte är mera vanlig i regioner där bakgrundsstrålningen är många gånger högre än medelvärdet och förklarar detta med, att bakgrundsstrålningen alltid ligger under toleranströskeln. Tröskelvärdet ligger tydligen också över de accepterade dosgränserna för arbetare, eftersom man inte heller funnit ökad cancerfrekvens hos personer som arbetar med strålning, trots alla de omfattande studier som utförts i denna fråga. Tröskelvärdet kan dock inte exakt bestämmas på grund av att den naturliga cancerfrekvensen stör observationerna.

Överlineära riskmodellen

De flesta experter accepterar inte tanken på ett tröskelvärde, och några ensamma profeter anser tvärtom att små doser är farligare per mSv än stora doser. Ritar man motsvarande riskkurva i vårt koordinatsystem så ligger den för små doser ovanom den lineära modellens räta linje. Följdriktigt har den fått namnet överlineära riskmodellen. Det är svårt att finna stöd för denna modell. Ett motbevis som framförts är att inte ens stora skillnader i bakgrundsstrålningen på olika orter ger upphov till skillnader i cancerförekomst. Enligt den överlineära riskmodellen skulle ju hälsoeffekterna av små doser, såsom av bakgrundsstrålningen, vara särskilt markanta. Men så är det ju inte.

Hormesismodellen

Den femte modellen som har sina trogna förespråkare är hormesismodellen. Hormesis är namnet på en biologisk effekt som gäller för många ämnen och som innebär, att små mängder är nyttiga även om stora mängder är skadliga. Det här gäller bl.a. för de flesta mediciner. Små doser läker men överdoser förgiftar. Samma sak gäller för de viktiga spårämnena litium, kadmium och selen, som i större doser är dödliga gifter. Och tänk på självaste Moder Sol! Alltför starkt solsken skadar hälsan och hotar till och med livet – men litet solsken behöver alla.

De som talar för hormesismodellen anser att bakgrundsstrålningen behövs och är nyttig. De säger sig ha visat att försöksdjur mått dåligt då de för lång tid avskärmats från bakgrundsstrålningen, och att växtplantor utvecklats snabbare och blivit kraftigare då de bestrålats lite extra varje dag. De påpekar att folk som bor i bergstrakterna, där den kosmiska strålningen är starkare, lever längre och är friskare än människor i allmänhet. Iakttagelsen är i och för sig riktig men slutsatsen blev kanske ändå fel. Måhända lever bergsnomaderna längre för att de andas friskare luft – eller äter mera hälsobringande yoghurt . . .

Positiv okunskap och nödvändig kunskap

Alltnog. Ingen skola av forskare kan stiga fram med forskningsresultat som bevisar att just deras riskmodell är den riktiga:

– "Titta här. Vi har äntligen funnit ett samband mellan små stråldoser och cancerrisk. Så här ser sambandet ut. Här har ni riskfunktionen. Vi har alltså rätt och alla ni andra fel!"

Nej, i brist på bevismaterial i form av empiriska forskningsresultat eller obestridliga teorier har samtliga riskmodeller sina anhängare. När nu inte ens världens främsta vetenskapsmän inom strålningsbiologin kunnat enas om vilken riskmodell som är riktig, hur ska då lekmän kunna veta det?

Det går naturligtvis inte och det är inte heller nödvändigt. Det viktiga är att vi inser *innebörden av denna okunskap*. Det är ju synnerligen lyckligt att hälsorisken vid små stråldoser är för liten för att kunna observeras! Om det nämligen vore möjligt att bestämma små stråldosers riskfaktor på basen av observerade effekter, ja, i så fall måste risken vara större än den i själva verket är. Okunskapen om det exakta sambandet mellan stråldos och hälsoeffekt visar att är risken så liten att den inte genom någon vetenskaplig undersökningsmetod kunnat skiljas från noll. I detta fall är okunskapen något positivt.

Rent generellt är naturligtvis okunskap inte något positivt. För att kunna förhålla sig rätt till strålningen i vår omgivning är det tvärtom nödvändigt med ett visst mått av kunskap. Alla har rätt att själva ta ansvar för sin säkerhet. Därför bör också alla ha en rimlig chans att kunna bedöma när man kan känna sig lugn och när man bör vidta skyddsåtgärder. För den skull görs i det följande ett sammandrag av vår erfarenhetsmässiga kunskap om normala och onormala stråldoser från naturliga och onaturliga strålkällor i vår omgivning.

Normala doser från naturliga strålkällor

Normala stråldoser från naturliga strålkällor – det är vad var och en av oss får ta emot när vi går ut. Vi bestrålas då av strålning från marken, strålning från rymden och strålning från naturligt radioaktiva ämnen i vår kropp. Beroende på var vi är bosatta blir summan av dessa dosbidrag 1-2 mSv per år. I en del regioner på vårt jordklot är bidraget från marken så stort att den årliga naturliga stråldosen blir 10 mSv eller rentav 20 mSv. Den naturliga bakgrundsstrålningen varierar också med höjden över havet, med väder och vind, regn och snö, högtryck och lågtryck. Ingen kan undgå bakgrundsstrålningen.

Det finns teorier om hur bakgrundsstrålningen kan tänkas påverka vår hälsa, men inga bevis för att teorierna håller streck. Den vanligaste uppfattningen är att bakgrundsstrålningen i princip är skadlig men i praktiken saknar betydelse. Några anser att så låga värden inte ens i princip är skadliga, och det finns de som tror att bakgrundsstrålningen är nyttig för hälsan.

Förhöjda doser från naturliga strålkällor

I många situationer blir man exponerad för onaturliga mängder av naturlig strålning. Den allmännaste orsaken är radongasen i våra bostäder. Vårt moderna byggnadssätt och strävan efter god värmeekonomi förorsakar oss en förhöjd stråldos, som i de flesta fall är *en* eller *några* mSv per år. Det finns emellertid hus där invånarna får en årlig tilläggsdos på tiotals eller hundratals mSv på grund av radonet. Då är vi uppe i nivåer som ligger högre än de dosgränser som föreskrivits för personal som utsätts för strålning i sitt arbete. Det finns alltså många hem med så hög strålnivå att den skulle vara olaglig på en arbetsplats, t.ex. ett kärnkraftverk. I brist på bevis råder det delade meningar om vad detta kan ha för betydelse för hälsan.

Flygplansbesättningar utsätts i sitt arbete för en årlig stråldos som är högre än medeltalet för kärnkraftsarbetare. Piloter och kabinpersonal tillbringar årligen över tusen timmar på en höjd där den naturliga kosmiska strålningen är cirka tjugo gånger starkare än på marknivå. Detta ger besättningen en stråldos på 3 – 4 mSv per år, vilket är högre än den årliga medeldosen inom kärnkraftsindustrin.

Brukar du åka utför i *alperna* på din semester? Tycker du om *bergsbestigning* eller fotvandring i bergen? I så fall utsätter du dig frivilligt för förhöjda värden av naturlig strålning. Den kosmiska strålningen tilltar nämligen tydligt i styrka redan på en höjd av ett par tusen meter över havsnivån.

Förbränning av fossila bränslen är ännu ett exempel på förhöjd exponering för naturligt radioaktiva ämnen. Djupt nere i marken ger de radioaktiva ämnena ingen människa någon stråldos. Men de följer med kolet, oljan och gasen, när dessa hämtas upp till markytan. Sedan sprids de i naturen med rökgasen och flygaskan. De sänker sig till marken och ger ett tillskott till bakgrundsstrålningen. Dessa naturligt radioaktiva ämnen, som inte nybildats på konstgjort sätt genom kärnklyvning eller aktivering, har mycket lång halveringstid. De har existerat miljoner år i jordens inre, och de kommer att existera miljoner år till på jordens yta. Tillskottet till bakgrundsstrålningen är dock litet.

Alla människor i industrialiserade länder utsätts för förhöjda stråldoser från naturliga strålkällor. Den extra dosen är i många fall liten men kan också uppgå till hundratals mSv per år. Extremt höga stråldoser från naturligt radioaktiva ämnen anses ha förorsakat lungcancer hos gruvarbetare i början av seklet. Numera är problemet under kontroll tack vare effektiv ventilering av gruvorna. Hälsoeffekter av de radonhalter som förekommer i våra bostäder har inte entydigt påvisats.

Normala doser från konstgjorda strålkällor

År 1895 uppfanns röntgenröret. Därmed var det för första gången möjligt att bli utsatt för "onaturlig" strålning. En del av de första experimenten med röntgenstrålning förorsakade bl.a. hudskador. Senare har röntgenstrålningen i medicinens tjänst besparat mänskligheten mycket lidande och räddat oräkneliga liv.

År 1934 producerades för första gången radioaktiva ämnen på konstgjord väg. I forskningslaboratorier hade man lärt sig tekniken att bombardera stabila atomkärnor med neutroner. Om en neutron trängde in i en stabil kärna och stannade kvar blev kärnan i många fall instabil, "radioaktiv". Man har funnit stor användning för konstgjorda radioaktiva ämnen inom vetenskap, forskning, miljövård och medicin.

Vid experiment med neutronbombardering upptäckte man 1938 att vissa urankärnor delades i två delar om de träffades av en neutron med lämplig energi. När den tunga kärnan klövs till två lättare frigjordes samtidigt två eller tre neutroner. Det visade sig också möjligt att under vissa omständigheter förmå en del av de frigjorda neutronerna att klyva nya urankärnor och på så sätt få till stånd en kedjereaktion. Människans förmåga att klyva atomkärnor har senare använts både i det ondas och det godas tjänst.

I kärnkraftverk bildas radioaktiva ämnen som icke önskvärd biprodukt. Till största delen stannar de kvar i det radioaktiva avfallet vilket i sin tur isoleras från den levande naturen. De radioaktiva utsläppen från ett välfungerande kärnkraftverk är så små att deras bidrag till bakgrundsstrålningen är omätbart. Största tillåtna dosbidrag till de mest utsatta individerna i omgivningen är 0,1 mSv per år. Den verkliga dosen är vanligtvis någon procent eller någon promille av detta.

För att garantera säkerheten vid arbete med strålning har man infört dosgränser. De flesta länder använder sig av de dosgränser som rekommenderas av den internationella strålskyddskommissionen ICRP. Enligt de nyaste rekommendationerna, som gavs år 1990, får stråldosen till strålningsarbetare inte överstiga *20 mSv* per år som medelvärde per femårsperiod. Under enskilda år får dosen stiga till högst *50 mSv*. Dessa dosgränser gäller personer som exponeras för strålning i sitt yrke. För allmänheten gäller ännu strängare dosgränser.

Teoretiska riskbedömningar till trots har man inte kunnat påvisa, att normala doser från konstgjorda strålkällor påverkar hälsan skadligt. Erfarenheten av arbete med strålning sträcker sig redan över en tidsrymd av hundra år. Forskningsprojekt som omfattat hundratusentals arbetare, med doser inom dosgränserna för personer som arbetar med strålning, har inte visat på skadliga effekter av strålningen. För allmänheten gäller dosgränser som är blott en bråkdel av arbetarnas.

Höga doser från konstgjorda strålkällor

I medicinskt bruk räddar strålningen liv, men strålning kan också döda. Får man en mycket hög dos under en kort tid är livet i fara. Engångsdoser på 3 000 mSv eller mer kan vara livshotande. En engångsdos på 6 000 mSv överlever knappast någon. Helkroppsdoser av denna storlek förekommer endast i samband med strålningsolyckor eller kärnvapenkrig.

Höga engångsdoser som inte är livshotande kan ge övergående sjukdomssymptom. Man talar då om strålsjuka. Symptomen uppträder efter några timmar eller dagar och försvinner inom några dagar eller veckor. Strålsjuka lämnar inte bestående men. Den höga dosen medför en något förhöjd risk att senare i livet drabbas av cancer. På det individuella planet kan riskökningen inte påvisas men däremot i stora människogrupper med stora engångsdoser, såsom de överlevande japanska bomboffren.

Vid den stora grafitbranden i Tjernobyl 1986 fick 31 brandmän dödande stråldoser. Detta är den enda olycka vid ett kommersiellt kärnkraftverk där någon dödats av strålning. Reaktorn totalförstördes och radioaktiva ämnen från kärnbränslet fördes med brandgaserna till tusen meters höjd. Branden fortgick i tio dygn, och de radioaktiva ämnena spreds med vinden tusentals kilometer i olika riktningar.

I omgivningen uppträdde många år senare över tusen fall av sköldkörtelcancer, dock endast få med dödlig utgång. Främsta orsaken var radioaktiv jod. Jod som hamnat i kroppen söker sig till sköldkörteln, som därför får en mycket större stråldos än övriga organ. Jod utgör alltid en speciell risk vid reaktorolyckor, dels för att den förekommer rikligt som klyvningsprodukt i bränslet och dels för att den vid hög temperatur är gasformig och därför flyktig.

Sköldkörteln kan ta emot endast en begränsad mängd jod. Därför kan man vid ett allvarligt reaktorhaveri ha nytta av s.k. jodtabletter. Om man intar en jodtablett vid lämplig tidpunkt, hinner tablettens icke-radioaktiva

jod till sköldkörteln innan den radioaktiva joden hinner fram. Denna kan därför inte bosätta sig i sköldkörteln, och den upptas aldrig av något annat organ. I stället utsöndras den radioaktiva joden innan den hunnit förorsaka någon avsevärd dos.

Ordet "olycka" betecknar i sig ofta en händelse som medför risk för liv. Så är det också med strålningsolyckor. Höga stråldoser från konstgjorda strålkällor har vid några få olyckstillfällen lett till döden. Tursamt nog är strålningsolyckor synnerligen ovanliga. Man kunde rentav säga att av alla "typolyckor" har strålningsolyckorna skördat minst liv.

Vår strålande värld

Inom teknologi, medicin, industri och forskning är konstgjorda radioaktiva ämnen och konstgjord strålning till ovärderlig nytta. Men den joniserande strålningen är som elden – en bra tjänare men en dålig herre. Skador av normala doser av konstgjord strålning har inte kunnat konstateras. Också den teoretiskt uppskattade risken är nära noll. I de mängder och koncentrationer som naturligt radioaktiva ämnen förekommer, innebär de inga påtagliga risker. Radonet i våra bostäder kan möjligen utgöra ett undantag. Det får kommande forskning utvisa.

Vi lever i en strålande värld. Var och en av oss, liksom hela universum, innehåller radioaktiva ämnen. Sådan är naturen. Sådan har den alltid varit. Naturlig radioaktivitet tillhör naturen och de naturligt radioaktiva ämnena i vår kropp utgör en del av oss själva. Som en följd av kärnsprängningarna på 1960-talet och olyckan i Tjernobyl finns det numera också ett tillskott av konstgjorda radioaktiva ämnen i naturen och i var och en av oss. Det tillskottet är litet.

Så, i det stora hela, med avseende på strålning, har mänskligheten inte förändrat världen särskilt mycket.

Björn Wahlström är strålskyddsexpert och forskningssamordnare vid Lovisa kärnkraftverk i Finland.
wahls@kolumbus.fi, www.kolumbus.fi/wahls

Strålning i medicinen - till nytta för människan

Ragnar Hellborg

Inledning

Det som kallas strålning är egentligen en transport av energi, i form av en partikelström eller som elektromagnetiska vågor. Strålning kan indelas i två olika kategorier: *icke-joniserande* och *joniserande*. Exempel på icke-joniserande strålning är värmestrålning (infraröd strålning), synligt ljus, mikrovågor och radiovågor. Dessutom brukar ultraljud räknas till kategorin icke-joniserande strålning, även om den inte är elektromagnetisk. Ultraljud är en energitransport där energin överförs genom vibrationer hos molekyler i ett medium, t ex vävnad. Joniserande strålning har högre energi än icke-joniserande strålning och kan därför - som namnet säger - jonisera det material den passerar. Jonisera innebär att elektroner kan slitas loss från materialets atomer/molekyler av strålningen. Därvid bildas vad som kallas radikaler, d.v.s. laddade atomer/molekyler. Om detta sker i t ex människans kropp kan det uppstå en strålskada. Dock blir man inte radioaktiv, vilket ofta är en missuppfattning. Exempel på joniserande strålning är strålning från rymden och från naturligt radioaktiva ämnen i t.ex. marken eller människans kropp. Andra exempel på joniserande strålning är förknippade med mänsklig verksamhet, t ex strålning vid kärnreaktorer, från radioaktivt avfall, vid forskningsacceleratorer, röntgenapparater mm.

Strålning innebär både nytta och risker. Solstrålning är en förutsättning för liv på jorden, men samtidigt kan UV-strålning från solen ge upphov till tumörer och sannolikheten för detta ökar t ex med oförsiktigt solande. Värmestrålning från en lägereld känns skön, men alltför intensiv värmestrålning kan ge brännskador. Joniserande strålning från radioaktiva ämnen i t ex byggnadsmaterial och inomhusluft innebär en risk. Samtidigt är detta senare svårt att undvika eftersom ämnen som uran, torium och kalium är vanligt och naturligt förekommande. Radium finns överallt i mar-

ken. När radium sönderfaller bildas den radioaktiva gasen radon som kan tränga upp i våra hus.

Joniserande strålning är inget nytt fenomen förknippat med mänsklig verksamhet. Det har alltid funnits. I själva verket var strålningen mycket intensivare vid världsalltets tillkomst för mellan 10 och 20 miljarder år sedan. All materia i universum var då radioaktiv. Radioaktiva ämnen innehåller ett överskott av energi. När dessa atomkärnor sönderfaller skickar de ut sitt energiöverskott i form av strålning. De flesta atomkärnor som finns i naturen idag har dock för länge sedan hunnit avge sitt överskott av energi och blivit stabila. Dock finns det fortfarande mängder av naturligt radioaktiva atomkärnor omkring oss, som fortsätter att sända ut strålning. Detta är ett minne från skapelseprocessen. Människan har därför alltid utsatts för strålning.

Kunskapen om joniserande strålning är relativt ny. Den tyske fysikern W.C. Röntgen upptäckte 1895 en strålning som vi idag kallar röntgenstrålning. Röntgen demonstrerade strax efter sin upptäckt de medicinska möjligheterna genom att genomlysa sin hustrus hand. Den franske fysikern H. Becquerel upptäckte 1896 den naturliga radioaktiviteten. Radiobiologiska experiment startades mycket snart, bland andra av Pierre Curie som medvetet och planerat utsatte sin underarm för strålning från ett radiumpreparat. Marie Curie initierade användningen av radium för strålbehandling genom att placera en radiumkälla i eller invid tumörvävnaden. Människan började således mycket snart att ta röntgenstrålning och radioaktiva ämnen i medicinens tjänst. Under det sekel som gått sedan de fundamentala upptäckterna har teknikerna förbättrats och finslipats. Nya metoder har ständigt tillkommit. Det är ingen överdrift att säga att dagens sjukvård är helt beroende av en effektiv användning av strålning.

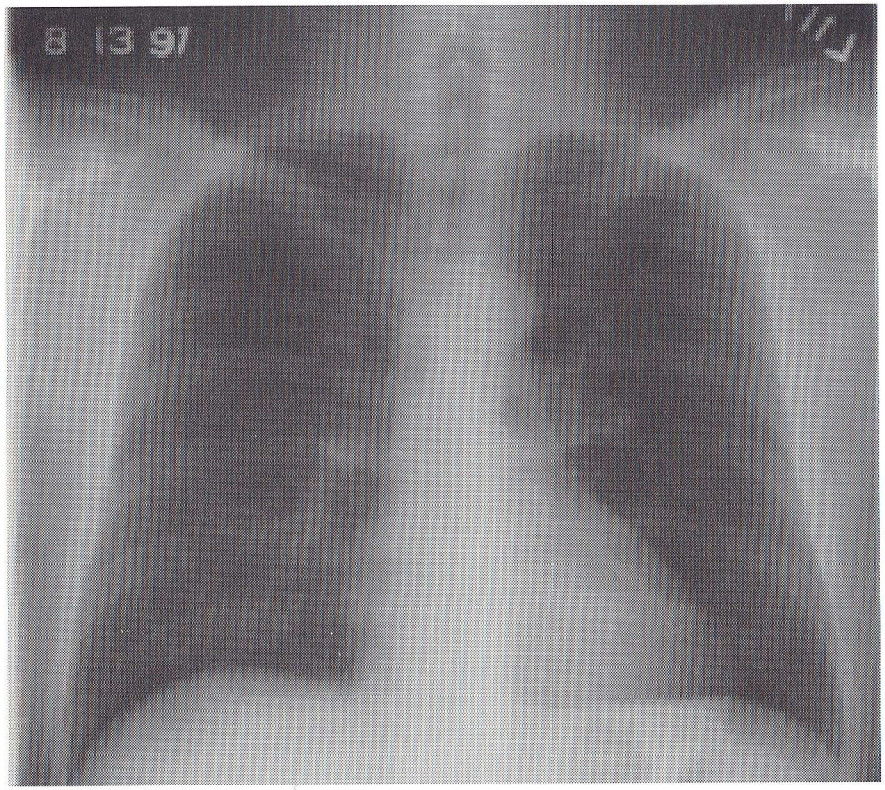
Nedan beskrivs ett antal exempel på den nytta som strålning har fått inom medicinen. Dels för undersökning av patienter – strålningsdiagnostik, dels för behandling av patienter – terapi eller med ett svenskt ord strålbehandling. I slutet av artikeln finns förklaringar till en del tekniska och medicinska ord som används i artikeln.

Strålningsdiagnostik

Idag finns, utöver röntgen, en rad kompletterande metoder för avbildning av människans inre. Teknikerna är olika, likaså den kliniska information man får. Här följer en kort beskrivning av olika tekniker.

Röntgen

Vid röntgenundersökningar utnyttjas normalt elektromagnetisk strålning även kallad fotonstrålning i energiområdet 40 till 150 keV[1]. Ett undantag är mammografi (bröströntgen) där betydligt lägre energi 15-30 keV används. Strålningen kommer då den passerar kroppen att absorberas och spridas olika beroende på vilken typ av vävnad, skelett, lungor etc., som den passerar. Strålningen som passerat kroppen får svärta en röntgenfilm.



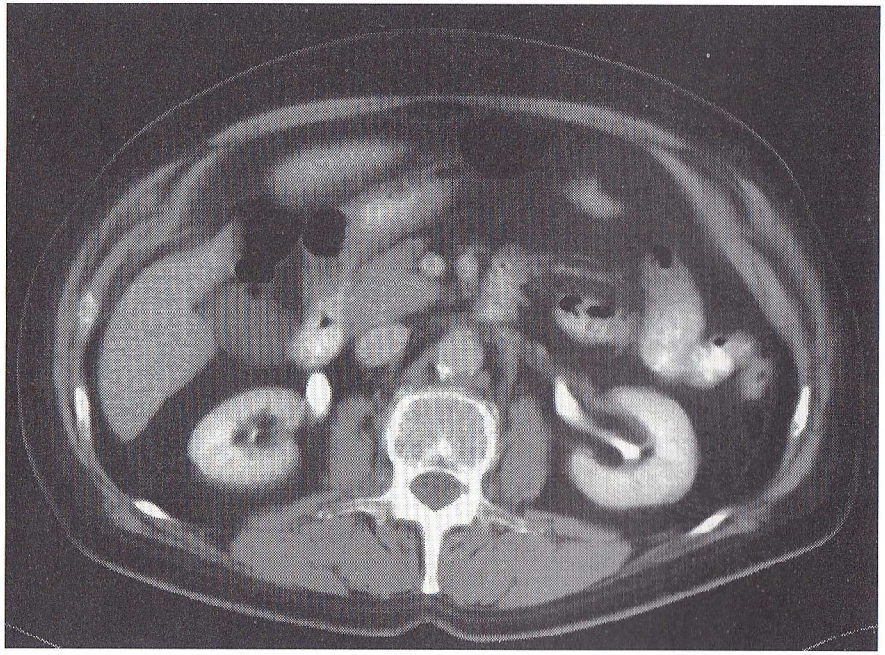
Figur 1. Röntgenbild av lungor.

Detta är en typ av fotografisk film, som för att uppnå bättre effektivitet (lägre stråldos till patienten) är placerad i en kassett. Kassettens väggar består av material som absorberar röntgenstrålning och utsänder ljus som i

[1] 1 keV = 0,001 MeV = 1.000 eV; eV är en energienhet lämplig i strålningsfysikaliska sammanhang, 1 eV = $1{,}6\times10^{-19}$ joule

sin tur svärtar filmen. Efter framkallningen beror svärtningsgraden i varje punkt på filmen på absorptionen och spridningen i kroppen. Man får en "bild" av kroppens inre. Ju "tätare" vävnad, desto ljusare film etc. Röntgenfilmen är exempel på en *analog teknik*. Tyvärr utnyttjar denna klassiska metod dåligt den information som finns i strålningen som passerat kroppen. Dessutom avbildas ett tre-dimensionellt objekt som en tvådimensionell bild. I figur 1 visas exempel på en lungröntgenbild.

Ett mycket stort framsteg gjordes under 1970-talet då **datortomografin** (CT) utvecklades. Vid CT används ett stort antal elektroniska detektorer känsliga för röntgenstrålning. Dessa detektorer är mekaniskt förbundna med röntgenröret och får liksom detta rotera runt patienten. På så sätt mätes hur mycket strålning som passerar genom patienten i olika riktningar. Registreringarna från de olika detektorerna lagras i digital form i en dator. Efter undersökningen får datorn räkna ut hur olika tvärsnitt av patienten ser ut. Ett antal närliggande tvärsnitt ger en 3-dimensionell bild. I figur 2 visas exempel på en CT bild.



Figur 2. CT-bild av ett snitt genom buken. Bilden visar ett tvärsnitt vinkelrätt mot kroppens längdriktning sett underifrån. Framsidan av kroppen uppåt i bilden.

Kvantitativ information kan fås ur olika delar av bilderna. CT är exempel på en *digital teknik*. En förutsättning för utvecklingen av CT har givetvis varit tillgången till kraftfulla beräkningsdatorer. Idag utnyttjar man mer och mer digitala tekniker. Detta ger möjlighet att behandla bilder, att skicka bilder via interna och externa datanätverk. Digitaltekniken kräver dessutom mycket mindre lagringsutrymme än film och tillgängligheten till gamla bilder blir bättre. Man kan åstadkomma digitala bilder på olika sätt. Det enklaste är att läsa av en röntgenfilm punkt för punkt och lagra informationen i digital form. Man kan också lagra signalerna från en bildförstärkare. Idag finns dessutom en rad andra digitala detektorer som fosforplattor, som måste utläsas efteråt och så kallade direkt-digitala detektorer uppbyggda av t. ex. amorft selen eller kisel.

Nuklearmedicin

Om radioaktiva spårämnen tillförs patienten, kan den utsända strålningen (om dess energi medger att den når ut ur kroppen) registreras genom mätning med yttre detektorer i olika riktningar runt kroppen. Detta är jämfört med röntgendiagnostik en rätt ovanlig teknik även om det årligen i världen görs omkring 20 miljoner nuklearmedicinska undersökningar. Radionukliderna tillverkas med hjälp av kärnreaktorer och acceleratorer. Det finns i världen mer än 200 små kompakta cyklotroner med jonenergier upp till 20-40 MeV och strålströmmar i milliampere-området, för detta ändamål. Inom nuklearmedicin arbetar man i koncentrationsområden som ligger långt under de vanliga för kemisk syntes. En undersökning kräver inte mer än 0,1 μg (10^{-7} g) av en viss substans. Trots de rent praktiska svårigheterna att arbeta med så små mängder material med kortlivade inbyggda nuklider medför de samtidigt fördelar. Varje undersökning ger en förhållandevis låg stråldos, som följd av det snabba sönderfallet och de låga koncentrationerna, varför upprepade undersökningar på samma patient inom några dygn är möjliga. Dessutom kan också fördelningen av starkt toxiska substanser studeras, eftersom de använda mängderna är så försvinnande små att de i många fall inte skulle kunna detekteras om de inte vore radioaktivt märkta.

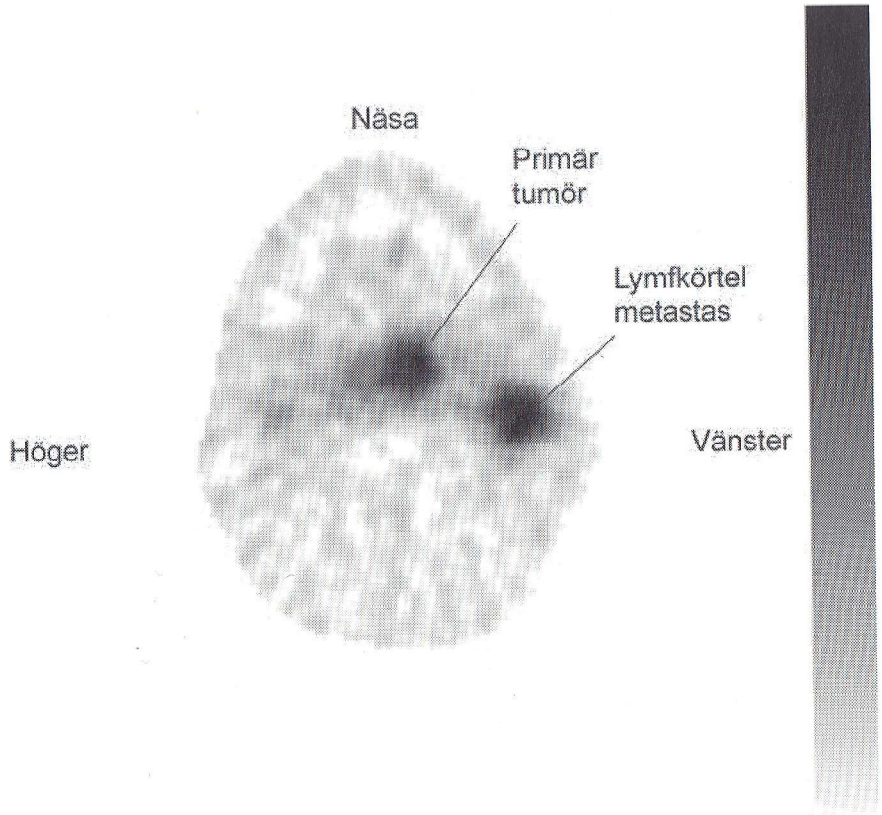
För att registrera strålningen används framför allt **gammakameror**. En sådan består av en stor scintillationsdetektor som är känslig för gammastrålning. Detektorn är oftast försedd med en parallellhålskollimator och den innehåller elektronik för energi- och lägesbestämning. Om man låter detektorn rotera kring patienten, kan man också framställa tomografiska bilder. Som spårämnen används substanser som vanligtvis märks med $^{99}Tc^{m}$, ibland med ^{111}In, ^{123}I eller någon annan radionuklid. Styrkan i en

nuklearmedicinsk undersökning är möjligheten till funktionella och dynamiska studier. Även snabba dynamiska förlopp som t ex hjärtfunktionen kan studeras. Däremot är inte nuklearmedicinska metoder lämpliga för detaljavbildning av anatomiska strukturer.

I stället för att använda en komplett gammakamera kan enskilda mindre detektorer användas för icke-avbildande mätningar. Sådana upptagsmätningar görs t ex över sköldkörteln.

Det är också möjligt att göra tomografiska avbildningar med en teknik som kallas **PET** (positronemissionstomografi). I detta fall utnyttjas kortlivade radionuklider som vid sitt sönderfall sänder ut positroner. Exempel på sådana nuklider är ^{11}C (halveringstid 20 min), ^{13}N (10 min), ^{15}O (2 min) och ^{18}F (110 min). Positronen, som utsändes då atomkärnan sönderfaller, kommer efter en mycket kort sträcka att sammanslås med en elektron. Vid denna sammanslagning förintas de båda partiklarna och två gammakvanta bildas. Dessa sänds ut samtidigt åt diametralt motsatt håll och med vardera energin 511 keV. Denna strålning med hög energi kan lätt registreras i koincidens med lämplig tomografiutrustning. Kolisotopen ^{11}C hör till de mest utnyttjade i PET-sammanhang. Med dess korta halveringstid är det uppenbart att hanteringen ställer särdeles höga krav på kemisk syntesteknik när den efter tillverkning ska byggas in i den önskade biologiska substansen.

Den stora fördelen med PET-metoden är egentligen inte de morfologiska bilderna utan istället information om biokemiska processer. Det finns en möjlighet att studera fysiologiska förlopp *in vivo* (d.v.s. i kroppen utan provtagning) i både tid och rum. Vilken substans man väljer som spårmolekyl avgörs av frågeställningen inför varje undersökning. Exempel på studier är hjärnans energiomsättning, blodflödesmätningar i hjärnan under olika typer av mental aktivitet, studier av receptorfunktion samt studier av tumörers förändring. T ex kan man konstatera om en viss tumör svarar på en viss cytostatika-behandling några få dagar efter behandlingsstarten. Det finns ett stort antal substanser som kan märkas med någon av dessa nuklider. Därigenom finns möjlighet att följa substansernas fördelning och omsättning i kroppen. Ett PET-system innehåller tre viktiga komponenter: en partikelaccelerator för tillverkning av positronstrålande nuklider, ett radiokemilaboratorium med kunnande och teknik för att framställa biologiskt aktiva substanser märkta med de radioaktiva nukliderna och en PET-tomografi-utrustning för studier av spårämnet i patienten. Det finns idag omkring 150 PET-centra i världen, varav 2-3 i Sverige.



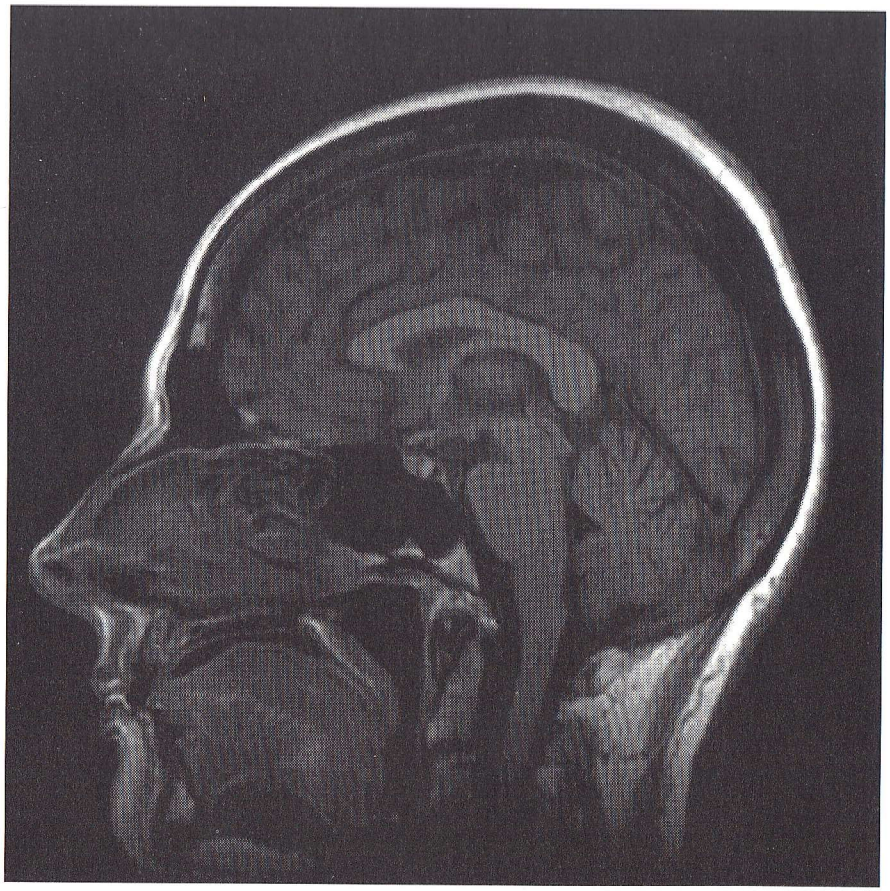
Figur 3. PET-undersökning av en patient utförd vid Radiofysiska institutionen vid Lunds Universitetssjukhus. Bilden visar ett tvärsnitt vinkelrätt mot kroppens längdriktning i öron-näsa-hals regionen sett underifrån. Ansiktet är uppåtvänt i bilden.

I figur 3 visas resultatet av en PET-undersökning i öron-näsa-hals regionen av en patient med okänd primär tumör. Lymfkörtelmetastasen i vänstra käkvinkeln var känd före PET-undersökningen, men däremot inte den primära tumören i munbotten. Den radioaktivt märkta socker-analogen 2-[^{18}F]fluoro-2-deoxy-D-glucose (FDG) injicerades intravenöst 50 minuter före registreringen av radioaktivitetsfördelningen med PET-utrustningen. Tumörceller har generellt en högre sockeromsättning än normala celler, och därför lagrar tumörceller in mer FDG än normala celler och syns därför som mörkare områden i bilden.

Magnetisk resonans

På 1940-talet demonstrerades en metod att mycket noggrant mäta ett magnetfält. Metoden utnyttjar att vissa atomkärnor har ett magnetiskt dipolmoment och således kan betraktas som mycket små magneter. Normalt är dessa små atomkärnmagneter slumpvis orienterade, men om de utsätts för ett kraftigt yttre magnetfält inställer sig en jämvikt där en knapp majoritet av atomkärnorna orienterar sig parallellt med det yttre fältet. En sådan jämvikt kan rubbas om man utsätter atomkärnan för ett svagt radiofrekvent fält vinkelrätt mot det yttre magnetfältet och avstämt till atomkärnans resonansenergi. I detta resonansläge får man ett antal kärnor att ta upp energi från det radiofrekventa fältet och därmed ändra sin magnetiska orientering. Atomkärnorna återgår efter en kort stund till jämviktsläget och avger den nyss upptagna energin i form av en svag radiosignal. Metoden kallas *kärnspinresonans*.

För något mer än 20 år sedan visades att samma princip kan tillämpas såsom en avbildande teknik på föremål som innehåller lämpliga atomkärnor, t ex vätekärnor i människokroppen. Metoden kallas i medicinska sammanhang för **magnetresonans (MR)**. Patienten placeras i ett kraftigt statiskt magnetfält (inte så sällan används supraledande magneter för att starka fält ska kunna utnyttjas). Patienten utsätts för ett radiofrekvent fält avstämt till väteatomkärnornas resonansenergi. De svaga signalerna som utsändes vid atomkärnornas återgång till jämviktsläget används för diagnostik i form av bilder eller pulshöjdsfördelning. Signalstyrkan beror framför allt på koncentrationen av väteatomkärnor och på deras omgivning. Varaktigheten på signalen skiljer sig mellan olika typer av vävnad och beror på hur atomkärnan existerar i vävnaden, huruvida den är fri eller kemiskt bunden, om den finns i vätska eller i fastare vävnadsstrukturer, i tumörer eller frisk vävnad. Signalen från de enskilda atomkärnorna beror också på vilka andra kärnor som finns i den närmaste omgivningen. Man utnyttjar också möjligheten att tillföra paramagnetiska kontrastmedel till kroppen. Liksom vid CT framställs av de registrerade signalerna tomografiska bilder av kroppstvärsnitt. Vid MR fås samtidigt bilder från flera olika plan. Sådana bilder ger i jämförelse med CT ny och kompletterande information. Benvävnad syns inte på MR-bilder, vilket medför att andra vävnader, som annars är gömda i ben, t ex i ryggmärgskanalen och bakre skallgropen, avbildas tydligt med MR. I figur 4 visas exempel på en MR-bild.



Figur 4. MR-bild av ett snitt genom skallen.

Ultraljud

Ultraljud består liksom hörbart ljud av en mekanisk vågrörelse i något medium, t ex vatten, luft etc. Dess natur skiljer sig alltså från övrig strålning som behandlas i denna artikel. Våglängden för ultraljud är kortare än för hörbart ljud (annorlunda uttryckt är dess frekvens över vår hörbarhetströskel, d.v.s. över 20.000 Hz). Ultraljudsgivaren hålls mot huden med kontaktvätska emellan. I de första medicinska tillämpningarna registrerades enbart storlek och löptid för det reflekterade ultraljudet. Idag används ultraljudgivare med flera kristaller som via bildskärmar ger ögonblicksbilder med hög upplösning av det undersökta organet. Ultraljud är den patientbundna medicinska undersökningsmetod som ökar snabbast idag. Det

är en viktig metod när det gäller undersökning av hjärta, blodkärl, olika bukorgan och foster. Med hjälp av Doppler-teknik kan man också få kvantitativ information om flödesförhållandena i t. ex olika blodkärl.

Speciella tekniker

Helkroppsmätning

Om en person placeras tillsammans med instrument som är känsliga för gammastrålning i ett rum som är bakgrundsskärmat med decimetertjocka väggar av järn och/eller bly kan den strålning som utsänds från personen registreras. Detta brukar kallas **helkroppsmätning**. Strålningen från människokroppen domineras av gammastrålning från naturligt radioaktivt ^{40}K. Denna radionuklid utgör 0,012 viktsprocent av naturligt kalium. En vuxen person innehåller ca. 140 g kalium, och var och en av oss innehåller därför ca 0,017 g ^{40}K. Denna mängd har en aktivitet av omkring 5000 Bq, d.v.s. 5000 ^{40}K atomer sönderfaller per sekund i var och en av oss. Genom att skärma av omgivningen kan man med helkroppsmätning på detta sätt studera kroppens innehåll av kalium. Utrustningar av detta slag används också för att studera upptag och omsättning av olika radioaktivt märkta spårämnen. Man kan då använda ännu mindre substansmängder och aktivitet än vid vanliga nuklearmedicinska undersökningar.

Neutronaktivering

Ytterligare en teknik för mätning *in vivo* av innehållet i hela eller delar av kroppen av ett specifikt grundämne är **neutronaktivering**. Metoden innebär att patienten (eller del av kroppen) bestrålas med neutroner. Neutronerna kan i kroppen infångas i vissa atomkärnor. Vid den efterföljande deexcitationen av kärnan (d.v.s. då kärnan gör sig av med överskottsenergin) utsänds för kärnan karakteristisk gammastrålning som kan registreras i t.ex. en helkroppsmätutrustning. Exempel på denna typ av undersökning är mätning av kroppsprotein via prompt neutronaktiveringsanalys av kväve.

Röntgenfluorescens

Denna teknik går ut på att bestråla patienten (eller del av patienten) med röntgen- eller gammastrålning som har en energi något högre än K-elektronernas bindningsenergi i det grundämne som man vill studera. Det finns då en stor sannolikhet att en K-elektron slås ut och atomen därigenom blir exciterad (s k fotoelektrisk absorption). Vid den efterföljande deexcitationen utsänds röntgenstrålning med för ämnet karakteristisk energi.

Genom att mäta antalet fotoner med denna karakteristiska energi, som sänds ut från kroppen, är det möjligt att bestämma mängden av ett givet grundämne. På detta sätt kan tungmetallerna bly, kadmium och kvicksilver mätas *in vivo*. Bly mäts lämpligast t. ex. i ett fingerben, kadmium och kvicksilver i njurarna. Stråldoserna vid dessa analyser är mycket låga jämfört med t. ex. röntgenundersökningar.

Laserljus och synligt ljus

Det finns idag ett antal olika tekniker under utveckling där laserljus och synligt ljus används för undersökning av patienter. Metoderna bygger som regel på att efter bestrålning och excitation av atomer/molekyler i patienten registreras spritt och genomträngande ljus och spektroskopisk analys göres av detta ljus. Ett antal lovande metoder under tidig utveckling är för närvarande aktuella bland annat inom t ex det tvärvetenskapliga samarbetet mellan kliniska forskare och fysiker vid Lunds Lasercentrum.

Acceleratormasspektrometri

Acceleratormasspektrometri, AMS, är en metod för räkning av antalet atomer i ett prov. Metoden används för mätning av mycket låga koncentrationer av både radioaktiva och stabila nuklider. För radioaktiva ämnen är de främsta fördelarna med AMS jämfört med konventionella radiometriska metoder att mycket små prov (mg-storlek) kan analyseras och att mättiden är kort (mindre än en timme). Exempel på användning av metoden är kartläggning av upptag, fördelning och omsättning av långlivade radioaktiva ämnen i människokroppen.

AMS används i Sverige för medicinska studier vid Radiofysikavdelningen på Universitetssjukhuset MAS i Malmö för bland annat långtidsstudier av ^{14}C-retentionen i kroppen efter rutinmässiga tester av eventuella störningar i fettupptaget med hjälp av ^{14}C-märkt fett. Detta är ett så kallat andningstest. Ju mer fett som tas upp i mag-tarm-kanalen och förbrännes, desto mer $^{14}CO_2$ utandas. Prov på utandningsluften tages före och vid olika tidpunkter efter fettintaget. Kol extraheras på kemisk väg ur proven och analyseras med AMS-metoden vid Pelletronacceleratorn, Fysiska institutionen, Lunds universitet. Det har visat sig att AMS är en mycket kraftfull metod när det gäller grundläggande studier av metabolism och energiomsättning i kroppen.

Helicobacter pylori är en bakterie som, om den förekommer i magsäcken, visat sig ge ett antal kliniska problem alltifrån gastrit till magsår och t.o.m. magcancer. Bakterien bildar enzymet ureas, som hydrolyserar urinämnet urea till bl. a. CO_2. Ett enkelt sätt att påvisa *Helicobacter*-infektion är därför att ge ^{14}C-märkt urea i samband med en testmåltid och

sedan mäta halten $^{14}CO_2$ i utandningsluften. Kraftig $^{14}CO_2$-utsöndring är ett tecken på infektion. Med AMS behövs mindre än 0,4% av den aktivitet som fordras då mätningen göres med vätskescintillator, vilket är den normala kliniska metoden. Majoriteten av aktiviteten utsöndras snabbt via urinen. AMS-metoden ger, utöver diagnostikmöjlighet, också en möjlighet till noggrann kartläggning av de stråldoser som är förenade med ett radiofarmaka-test.

Synkrotronljus

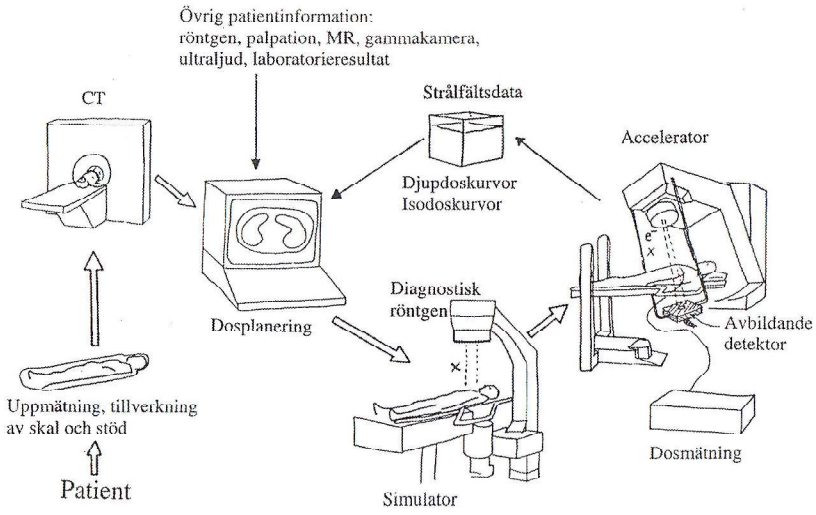
Den höga briljansen (stråltäthet i förhållande till utbredning och vinkelspridning) hos synkrotronljus och den lätthet med vilken våglängden hos utsänd strålning kan ändras gör att för speciella ändamål röntgenstrålning producerad vid synkrotronljusanläggningar kan användas för röntgenundersökningar. I preliminära undersökningar har blodkärlen i hjärtat undersökts genom att en liten mängd stabil jodlösning tillförts patienten intravenöst. En röntgenstråle med rätt energi för absorption i jod riktas mot patientens hjärta och med detektorer bakom patienten erhålles en bild av absorptionen. Därefter ändras röntgenenergin till att vara strax under absorptionsenergin och en ny bild registreras. I datorn subtraheras den andra bilden från den första och i resultatet framträder en bild av artärer och blodkärl som är många tiopotenser starkare än bilden av ben och andra vävnader. Fördelarna med denna metod är att man får mycket bättre bilder och att mycket lägre jodkoncentration och lägre stråldos kan användas jämfört med äldre metoder. Nackdelen är att synkrotronljusanläggningar är extremt stora och dyra och endast finns på ett tiotal platser i världen.

Strålbehandling

Strålterapi med höga stråldoser spelar en central roll vid behandling av tumörsjukdomar. Näst efter kirurgi är strålbehandling den viktigaste metoden att behandla cancer. En förutsättning för att strålterapin ska bli framgångsrik är att en tillräckligt hög och jämn dos kan ges till hela tumörvolymen. Samtidigt måste skador på omkringliggande frisk vävnad undvikas. En betydande ökning av läkningssannolikheten kan fås för en liten ökning av dosen. Men tyvärr ökar också riskerna snabbt för allvarliga biverkningar eller komplikationer för ett litet dostillskott till frisk vävnad eller intilliggande riskorgan. Kraven på precision vid strålbehandling är därför utomordentligt höga. Det gäller att åstadkomma bästa möjliga för-

utsättningar för bot till minsta möjliga risk för biverkningar. En precision i stråldos på ±5% och ibland ±3% är nödvändig liksom en god geometrisk precision. Detta ställer stora krav på såväl personal som strålbehandlingsutrustning. Som diagnostiska metoder före strålbehandling används CT och MR och för dosplanering i tre dimensioner används numera rutinmässigt CT och på försöksstadiet MR. För varje patient tas en optimal dosplan fram. Under hela behandlingsserien – som ofta pågår någon månad – kontrolleras behandlingarna med hjälp av mätningar med små termoluminiscenta dosimetrar i punkter på huden eller i sonder i t ex matstrupen samt med röntgenfilm eller avbildande detektorer som placeras i den genomgående strålningen bakom patienten. Idag finns för extern strålbehandling en rad olika typer av acceleratorer (för strålbehandling med fotonstrålning (röntgen), elektroner och protoner) för olika energier och därmed olika djupverkan. I figur 5 finns en schematisk beskrivning av tillvägagångssättet vid strålbehandling med högenergetisk fotonstrålning eller elektronstrålning.

Även behandling med hjälp av fasta strålkällor, som placeras i kroppshåligheter eller sticks in i tumören, utnyttjas där detta är förmånligt jämfört med extern strålbehandling. Även icke-joniserande strålning som ultraljud, laserljus och värmebestrålning används vid terapi. Några olika exempel beskrivs nedan.



Figur 5. Strålbehandling, schematisk beskrivning av tillvägagångssättet.

Högenergetisk fotonstrålning
Det överlägset vanligaste strålslaget vid strålbehandling är högenergetisk fotonstrålning som producerats i acceleratorer och omkring 80 % av all strålbehandling görs idag med sådan strålning. Den vanligaste utrustningen är en linjär elektronaccelerator, där elektronerna efter acceleration till 5-20 MeV beroende på önskat inträngningsdjup får träffa ett tungt material, t ex wolfram. I materialet bromsas elektronerna och samtidigt produceras en bred stråle av högenergetisk fotonstrålning. Med hjälp av utjämningskroppar åstadkommes en bred och jämn stråle. Fotonstrålningen kollimeras till lämplig tvärsnittsyta innan den får träffa patienten. Acceleratorsystemet kan rotera runt patienten och strålning ges från flera olika riktningar. Patienten måste ligga stilla under själva strålbehandlingen. Det finns omkring 2.000 anläggningar för behandling med högenergetisk fotonstrålning i världen och de har i stor utsträckning ersatt de tidigare använda ^{60}Co-apparaterna, vilka som strålkälla använde starka radioaktiva ^{60}Co-preparat.

Elektroner
Efter fotonbestrålning är elektronbestrålning den vanligaste formen och mellan 10 och 20 % av all strålbehandling görs med elektroner. Utrustningen som fordras är densamma som för fotonstrålning, men istället för att de accelererade elektronerna får träffa en metallbit, så får de lämna acceleratorns vakuumsystem genom ett tunt fönster och därefter direkt träffa patienten. Skillnaden mellan foton- och elektronstrålning är främst den snabba minskningen av dosen med djupet för elektronstrålningen.

Protoner (pi-mesoner, tunga joner)
Med en ideal bestrålningsutrustning borde strålens hela energi avlämnas i tumörvolymen och ingenting alls i omgivande frisk vävnad. Terapi med laddade partiklar (protoner och tyngre) skulle kunna uppfylla detta krav betydligt bättre än foton- och elektronstrålning eftersom räckvidden för protoner och tyngre joner är mycket mer väldefinierad och nästan hela rörelseenergin och därmed stråldosen avlämnas under den sista sträckan av nedbromsningen. För att ha tillräcklig räckvidd i vävnad och därmed kunna användas kliniskt krävs protonenergier i 200 MeV-klassen. Detta kräver därför stora och komplexa utrustningar. Användningen av sådana maskiner för medicin är därför ofta en bianvändning vid stora anläggningar, utvecklade för kärnfysikalisk forskning. Strålbehandling med protoner bedrives idag framgångsrikt vid omkring femton anläggningar runt om i världen och då ofta för specifika problemställningar, t ex vid The Svedberg-laboratoriet i Uppsala för behandling av tumörer i ögat. Strålbehandling med andra tunga partiklar (neutroner, pi-mesoner och tunga joner) har prövats vid ett antal anläggningar, men ännu inte blivit någon direkt framgång och flera sådana anläggningar har avslutat sin verksamhet. Främsta orsaken är att man inte uppnått några riktigt stora fördelar jämfört med konventionell strålbehandlingsteknik som kan motivera den stora merkostnaden och komplexiteten.

Radioaktiva läkemedel
Radioaktiv jod kan användas för behandling av sjukdomar i sköldkörteln (t. ex. giftstruma). Behandlingen kan ges genom att patienten får dricka ett glas vatten i vilket en väl avvägd mängd radioaktiv jod finns upplöst. Den radioaktiva joden tas effektivt upp i mag-tarm kanalen. En del tas effektivt upp i sköldkörteln (i ämnesomsättningshormonet tyroxin) och avger vid sitt sönderfall en stråldos till körteln. Man försöker idag använda samma "målsökningsprincip" för strålbehandling av t. ex. tumörsjukdomar. Det är emellertid svårt att åstadkomma preparat som ger ett högt och specifikt upptag i tumörvävnaden.

Bor-neutron infångningsterapi
Bor-neutron infångningsterapi (BNCT) är en typ av strålbehandling, som är speciellt utvecklad för behandling av ej lokaliserad cancer. BNCT kräver därför tumörsökande bärarmolekyler som märkts med den stabila isotopen ^{10}B (20% av naturligt bor). Principen är att man efter intravenös injektion får bärarmolekylerna att ansamlas i tumörvävnaden. Termiska eller epitermiska neutroner från en kärnreaktor får infalla mot tumören. Sannolikheten att neutronerna ska fångas in av ^{10}B är stor och via en kärnreaktion (^{10}B(n,α)^{7}Li) slås boratomkärnorna sönder i en helium- och en litium-atomkärna. Dessa nybildade atomkärnor har mycket kort räckvidd och bromsas in på bara några få celldiametrar (5-10 μm). Energiavgivningen blir hög och de celler som passeras dör. Metoden är inte ny utan föreslogs redan på 1930-talet och utvecklades på 1950-talet. Genom utvecklingen av ny teknik för att selektivt få de bormärkta substanserna att söka upp tumörer och inte i alltför stor utsträckning hamna på andra ställen i kroppen har metoden fått ny aktualitet. Planering pågår att i Sverige använda en forskningsreaktor i Studsvik för denna typ av patientbehandling. Detta blir i så fall Sveriges första (Europas tredje och världens sjätte) anläggning för BNCT.

Ultraljud

Det förmodligen mest välkända exemplet på användningen av ultraljud för medicinsk terapi är behandling av njursten. Njursten består av svårlösliga kristaller innehållande bl.a. kalcium. Stenarna bildas i njurarna. Om kristallerna blir tillräckligt stora kan de blockera urinvägarna. En fokuserad energirik ultraljudpuls riktas genom vatten in i patienten för att slå sönder stenen i mindre delar. Dessa stenfragment kan sedan lämna kroppen utan att stoppas i urinvägarna. Endast begränsad skada åstadkommes på njurarna vid denna behandling. Det finns förhoppningar att kunna använda samma metodik för bekämpning av cancertumörer. Idén är att chockvågen ska döda cellerna i tumören genom att slita sönder cellmembranen. En annan idé är att fokusera ett antal ultraljudhögtalare mot en punkt i kroppen och där få en volym med förhöjd temperatur och på så sätt slå ut tumörceller. Ljudet kan fokuseras så väl att i gränsskiktet mellan förstörda celler och fullständigt opåverkade celler finns färre än tio cellskikt. Ultraljud kan också användas för att stoppa inre blödningar genom att höja temperaturen i aktuellt skikt ca 1 mm tjockt tills koagulering sker.

Laserljus

Laserljus kan användas inom kirurgi. Laserstrålen skär sterilt och på grund av koagulering i snittet blir blödningen minimal. Med en pulserande stråle kan högre intensitet och kortare (och därmed energirikare) våglängder användas utan att ge termiska effekter i kringliggande vävnader. En sådan stråle kan användas för att effektivt bryta molekylband och i vävnad kan strålen avlägsna cellager efter cellager. En sådan stråle utgör en mycket precis kirurgisk kniv och används t ex vid ögonkirurgi för korrektion av brytningsfel och för öppning av förkalkade kärl.

Som nämndes ovan har det utvecklats substanser med egenskapen att om de tillföres patienten intravenöst, så tas de mer eller mindre selektivt upp i tumörvävnad. Ämnena är sådana att vid bestrålning inom det röda våglängdsområdet där vävnader är relativt genomsläppliga, exciteras vissa atomer i ämnena. Vid den efterföljande de-excitationen överföres överskottsenergin framför allt till vävnadens syremolekyler, som övergår till fria syreradikaler. Detta leder till celldöd för de celler som innehåller den aktuella substansen, d.v.s. framför allt tumörcellerna. För behandling av djupt liggande tumörer pågår för närvarande utveckling av metoder med tunna optiska fibrer som förs in i tumören.

Termisk behandling

Att laserljus kan användas för medicinsk behandling insågs redan kort efter att laserprincipen demonstrerats för närmare 40 år sedan. I första hand har dess termiska effekter utnyttjats. Med en laserstråle på 10-tals watt kan vävnader uppvärmas och förändras. Till exempel sker redan vid en temperatur av 44 °C förändringar i enzymaktiviteten. Vid ungefär 60 °C inträffar koagulering, vid 100 °C kokar vattnet i cellerna och dessa sprängs. Vid ännu högre temperatur sker en förkolning av cellerna. Man kan också åstadkomma temperaturhöjning genom tillförsel av mikrovågsenergi eller ultraljud. Verksamheten kallas hypertermi och används såväl vid tumörbehandling (oftast tillsammans med strålbehandling) som vid t. ex. behandling av prostatasjukdomar.

Slutord

Inom dagens sjukvård används en rad olika undersöknings- och behandlingsmetoder som utnyttjar strålning i olika former. Tillgången till flera av dem är av helt avgörande betydelse för såväl sjukvård som medicinsk forskning. De vanligaste är röntgenundersökningarna. Om vi lägger ihop antalet röntgenundersökningar inom sjukvården och tandvården blir det ungefär en undersökning per år och svensk. Användningen av MR- och ultraljudundersökningar ökar kraftigt. När det gäller metoder som utnyttjar joniserande strålning (röntgen, nuklearmedicin) lägger man i dag ner mycket arbete på att utnyttja strålningen så effektivt som möjligt d.v.s. att framställa en tillräckligt bra bild för så låg stråldos som möjligt. Det gör man mot bakgrund av att medicinska undersökningsmetoder (helt dominerat av sjukvårdens röntgendiagnostik - tandvården ger jämförelsevis små bidrag) i medeltal per svensk svarar för ett stråldostillskott på bortåt 1 mSv per år. Det är det största artificiella stråldosbidraget i samhället och i klass med bidragen från naturlig bakgrundsstrålning (från kosmisk strålning, strålning från hus och mark och människokroppen). Bara stråldosbidraget från inomhusluftens radon och radondöttrar i lungor och luftvägar är större. Det anses i medeltal motsvara en helkroppsbestrålning av ca 2 mSv per år.

Vissa tekniska och medicinska termer

Amorft material: (amorf grek. *a'morphos 'oformlig', formlös'*) material med atomerna slumpvis placerade i motsats till kristallint material där atomerna är placerade i rader.
Magnetiskt dipolmoment: vissa atomer kan betraktas som små magneter. Dipolmomentet är ett mått på deras magnetiska styrka.
Dopplereffekt: skenbar förändring av en vågrörelses frekvens då observatör och källan för vågrörelsen närmar sig varandra (eller avlägsnar sig från varandra).
Elektron: negativt laddad stabil och mycket liten elementarpartikel.
Excitation: upptagande av energi. **De-excitation:** avlämnande energi.
Foton: odelbar elektromagnetisk energimängd.
Gammakvanta: fotoner som utsänds från sönderfallande atomkärnor.
K-elektron: elektron i banan närmast atomkärnan.
Kollimator: anordning för att åstadkomma ett avgränsat strålfält (av partiklar, ljus el. dyl.).
^{60}Co-preparat: preparat innehållande den radioaktiva koboltisotopen ^{60}Co.
Metabolism: ämnesomsättning.
Morfologiska bilder: visar uppbyggnaden av objektet.
Paramagnetisk: ett omagnetiskt ämne som då det utsätts för ett yttre magnetfält blir svagt magnetiskt.
Positron: elementarpartikel identisk med elektronen men med positiv laddning.
Radionuklid: instabil (radioaktiv) atomkärna.
Receptor: mottagare i vid bemärkelse t.ex. celler i kroppen som är känslig för t.ex. ljus, lukt, smak, ljud, läge, tryck etc., eller strukturer på cellers ytor som binder olika molekyler.
Scintillationsdetektor: inkommande strålning ger upphov till ljusblixtar som förstärkes och därefter registreras.
Spektroskopisk analys: registrering av energifördelning hos t.ex. strålning som ger betydligt mer information än enbart registrering av totalmängd strålning.
Strålström: den elektriska ström som en stråle av laddade partiklar transporterar.
Supraledande magneter: elektromagneter vars strömlindningar nästan saknar elektriskt motstånd. Strömmen kan därför cirkulera under mycket lång tid utan yttre strömkälla. Supraledning uppnås för vissa material vid

mycket låga temperaturer (flytande heliumtemperatur, -269 °C). Betydligt högre magnetfält kan uppnås jämfört med vanliga magneter.
Synkrotronljus: intensiv elektromagnetisk strålning skapad vid cirkulär partikelaccelerator.
Termoluminiscens: utsändning av ljus från ett material vid försiktig uppvärmning.
Termiska och epitermiska neutroner: neutroner med låg energi och därmed större sannolikhet att avge sin energi.
Tomografi: metod för att åstadkomma skiktbilder.
Toxisk: giftig.

Radioaktiva och stabila ämnen nämnda i texten

Beteckn.	Grundämne	Halveringstid	Medicinsk anv.
α=^{4}He	helium =alfa partikel	stabil	
^{7}Li	litium	”	
^{10}B	bor	”	
^{11}C	kol	20 min	PET-studier
^{13}N	kväve	10 min	”
^{14}C	kol	5730 år	många olika studier t ex metabolism, läkemedelprov
^{15}O	syre	122 s	PET-studier
^{18}F	fluor	110 min	”
^{40}K	kalium	1,3·10^{9} år	mätning av kroppens kaliuminnehåll
^{60}Co	kobolt	5,3 år	strålbehandling
^{99}Tc^{m}	teknetium	6,01 timmar	nuklearmedicinska studier
^{111}In	indium	2,8 dagar	”
^{123}I	jod	13,3 timmar	”

Tack

Professor Sören Mattsson, Radiofysikavdelningen, Universitetssjukhuset MAS i Malmö, har välvilligt bidragit med ett antal faktauppgifter.

Ragnar Hellborg är docent i fysik vid Lunds universitet och ordförande i Miljövänner för Kärnkraft.
Ragnar.Hellborg@nuclear.lu.se, www.fysik.lu.se/nuclearphysics/ams

Kärnenergi i samhällets tjänst

Imre Pázsit

Inledning

Det primära målet med kärnkraftutveckling har varit att utveckla och utnyttja en effektiv och miljövänlig energikälla, d.v.s. kärnenergi. Emellertid har utvecklingen även resulterat i en rad nyttiga sidoeffekter. Man kan formulera detta så att det förutom den direkta nyttan av kärnenergi, d.v.s. energiproduktion, finns utomordentligt många indirekta fördelar genom användning av neutron- och gammastrålning i vetenskap, teknik, medicin, jordbruk och miljöteknik. Användningen gäller utnyttjandet av strålningseffekter genom direkt bestrålning, tillverkning av isotoper, användning av primära och sekundära strålkällor för icke-förstörande provning, avbildning (radiografi), processkontroll m.m. Omfattningen av dessa fördelar i form av ekonomiska och miljömässiga termer är dessutom mycket större än hela kärnenergisektorns.

Föreliggande artikel har huvudsakligen två inspirationskällor. Den ena är en översiktsartikel av V. S. Crocker i Progress in Nuclear Energy 1990 med titeln "Nuclear Power - it's indirect benefits". Den andra är ett föredrag av dåvarande presidenten för American Nuclear Society, Alan E. Waltar, vid en konferens 1995 med titeln "The invisible, but not imaginary numbers". Dessa två arbeten ger en ganska omfattande lista över alla icke-energirelaterade kärntekniska tillämpningar och en viss kvantifiering av deras betydelse för samhället.

Budskapet från ovanstående artiklar, liksom från föreliggande arbete, är att det finns en lång lista av kärntekniska tillämpningar som möjliggjordes genom utveckling av kärnkraften. Deras betydelse för utveckling av samhället, både i termer av förbättrad livskvalité och i termer av sysselsättning, ekonomi, miljö och hälsa är långt större än vad allmänt är känt. Vi ger därför en viss kvantifiering av dessa effekter samt en översikt av de viktigaste tillämpningarna. En fullständig lista över alla tillämpningar skulle lätt fylla en bok, varför listan här blir mera översiktlig och även något godtycklig.

Omfattningen av indirekta fördelar

Det är naturligtvis inte möjligt att ge ett exakt kvantitativt mått på betydelsen av de indirekta fördelarna. För detta använder vi data ifrån ovannämnda föredrag av Alan E. Waltar. I hans föredrag sammanfattas området icke-energirelaterade kärntekniska tillämpningar under rubriken "radioaktiva material". Man kan då ta inventarier från alla industrier som arbetar med framställning och/eller användning av radioaktiva ämnen och ta fram data angående omsättning och antal sysselsättningar. Motsvarande data kan tas fram för kärnkraftsindustrin. Resultaten, tagna från två undersökningar genomförda i USA 1991 ger följande belysande siffror:

	Årsomsättning i miljarder US$	Antal sysselsatta i miljontal
Radioaktiva ämnen	257	3.7
Elproduktion från kärnkraft	73	0.4

Tabellen visar att omsättningen är en faktor fyra större och antalet sysselsatta är mer än en faktor nio större inom området, som kan identifieras med den indirekta nyttan av kärnenergi jämfört med området traditionell kärnenergi. Siffrorna är ganska slående även om man bör medge att denna jämförelse, som alla andra jämförelser, kan kännas något godtycklig. Man kan ju undersöka även andra parametrar som kanske visar andra proportioner. Å andra sidan kan det tilläggas att området "elproduktion från kärnkraft" är ganska väl definierat, varför ingen underskattning av valda parametrar bör förekomma. Ovanstående jämförelse kan därför antas vara konservativ.

Icke-energirelaterade tillämpningar

Här nedan ger vi en lista över ett antal viktiga tillämpningar som utgör de indirekta fördelarna. Man kan naturligtvis välja olika typer av grupperingar vid redovisningen varför beskrivningen nedan bör tolkas som en utav flera möjliga.

Grundforskning, materialvetenskap

Av naturliga skäl finns de främsta tillämpningarna i grundforskning inom fysik, närmare bestämt subatomär fysik, fasta tillståndets fysik och materialvetenskap. I första hand används neutroner från reaktorer för att mäta nukleära reaktioner, tvärsnitt, fördröjda neutroner m.m. Inom materialvetenskap tillhör neutronspridning och neutrondiffraktion de mest kraftfulla metoderna för kartläggning av struktur och egenskaper av kondenserad materia. Strukturbestämning av kristaller, föreningar, högtemperatursupraledare, magnetisk struktur m.m. görs med elastiskt spridda neutroner, neutrondiffraktion och småvinkel-neutronspridning. Samma teknik används även i mera tillämpningsorienterat syfte, nämligen bestämning av integritet av mekaniska strukturer, fördelning av restspänning i svetsningar m.m. En viktig egenskap hos kärntekniska metoder är att de är beröringsfria eller icke-förstörande. Detta gäller även alla tillämpningsområden. Bestämning av atomära bindningskrafter och dynamiska egenskaper av kristaller kan göras med inelastisk neutronspridning, inklusive neutron spin echo-metoden. Från sådana mätningar blir det möjligt att förklara eller prediktera en mängd viktiga makroskopiska egenskaper av olika materialtyper.

Ett viktigt område är jonstråleinducerade effekter såsom defekter och implantation av joner i t ex halvledarmaterial. Där används neutroner för att bestämma djupfördelning (depth profiling) av defekter och implanterade joner.

Ovannämnda metoder är baserade på användning av långsamma, s.k. termiska neutroner. De används därför vid forskningsreaktorer såsom R2-reaktorn i Studsvik. Under senare tid har dock även acceleratorbaserade neutronkällor, såsom spallationskällan vid ISIS i England, kunnat framställa intensiva strålar av termiska neutroner.

En ny metod med stor potential för materialundersökning använder sig av positroner och positron annihilation. Positroner erhålls vanligen från en radioaktiv källa som i sin tur framställs via bestrålning i en reaktor. Man använder sig dock även av positroner direkt från en reaktor, t ex vid Tekniska Högskolan i Delft, Holland.

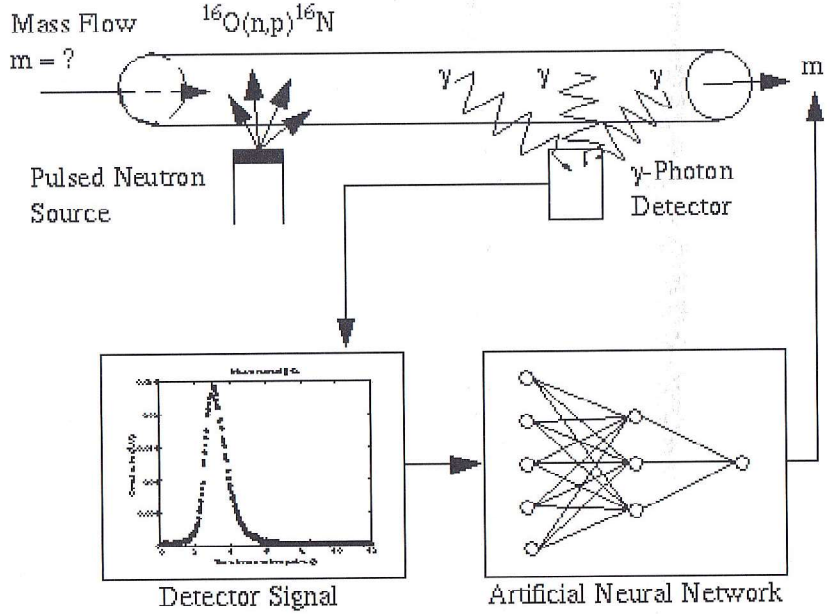
En del av metoderna används som stöd för grundforskning inom andra områden, såsom åldersbestämning av geologiska formationer, arkeologi m.m. Andra tillämpningar gäller grundläggande frågor i geofysik och allmänt i geovetenskap, såsom strukturbestämning av bergformationer, transport av grundvatten i urberg, rörelse av sediment i insjöar, hav, älvar m.m. Vissa av dessa nämns i andra sammanhang senare i denna artikel.

Tillämpningar inom teknik och industri

Detta område är mycket stort och beskrivningen bör vara begränsad av utrymmesskäl. Ett stort område är aktiveringsanalys och tillämpning av spårämnen (tracers). Aktiveringsanalys innebär bestrålning av ett ämne med neutroner som genom neutroninfångning åstadkommer kortlivade isotoper. Avklingningen av dessa kan mätas med gammadetektorer, och olika grundämnen kan urskiljas genom skillnader i deras gammaspektra. Med aktiveringsanalys kan extremt små mängder av ett visst ämne påvisas. På det sättet kan närvaron av t ex miljögifter påvisas från ett mycket litet prov, och dessutom på ett icke-förstörande sätt. Som ett kuriosum kan nämnas att metoden har använts även för att bestämma om en viss tavla är äkta eller en förfalskning eller om en sedan länge död person hade blivit förgiftad. Metoden kan även användas för att övervaka utsläpp och transport av föroreningar, se under miljövård nedan. Vidare, med spårämnen kan materialflödet övervakas i en process både i liten skala (kemisk industri) och i stor skala (geosfär, världshav m.m.).

Inom processindustrin finns otaliga tillämpningar: mätning av materialflöde, inklusive upptäckt av läckage; mätning och kontinuerlig övervakning av mått (tjocklek av skivor och plåt) samt täthet. En annan tillämpning är mätning och övervakning av integritet av olika komponenter inklusive svetsningar. En tillämpning av processövervakning som är baserad på en kombination av aktiveringsanalys och spårämnesmetod är mätning av massflöde av vatten i rör med pulserad neutronaktivering. Metoden har studerats på flera ställen och har nyligen vidareutvecklats avsevärt inom ett projekt kallad FlowAct vid Chalmers, Avdelningen för reaktorfysik. Principen framgår av Fig. 1 nedan. Mätningar och simuleringar gjorda vid CTH hittills pekar på att beröringsfri mätning av vattenflöde med en noggrannhet bättre än 1 - 0.5% kan uppnås.

Visualiseringsmetoder, främst dynamisk neutronradiografi, är på stark frammarsch med tillämpningar på många områden. Statisk neutronradiografi har använts länge för att ta en "röntgenbild" med neutroner av olika komponenter, utrustning och maskiner. Neutroner är mycket effektiva för att visualisera fördelning av vätehaltiga ämnen, såsom vatten och olja i olika material. Med utveckling av effektiva konverteringsmaterial och tillgång till intensiva neutronkällor har dynamisk neutronradiografi fått en rejäl utveckling under senare tid. Man kan studera transport av vätehaltiga vätskor i turbulent tillstånd och i flerfasform. Transport av kylmedel i kylskåp, i värmeelement, smörjningsmedel m.m. i motorer och olika apparater har lett till avsevärd förbättring av diverse produkter.

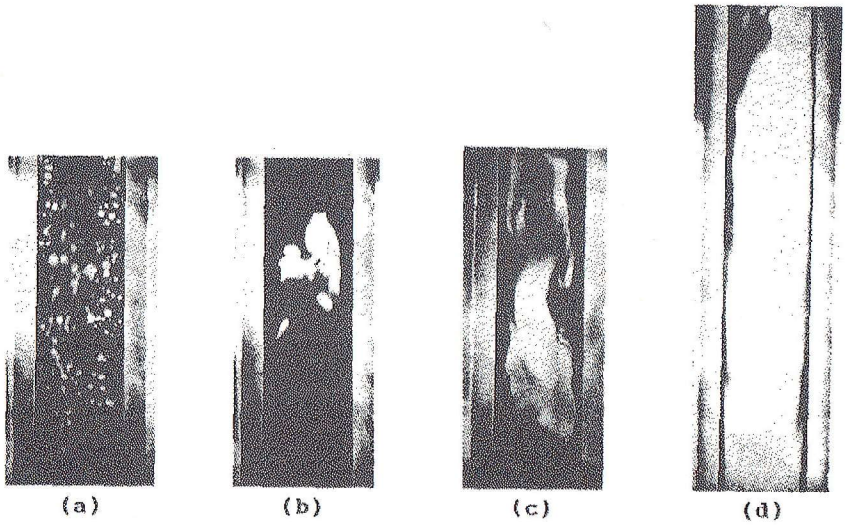


Figur 1. FlowAct-metodens princip

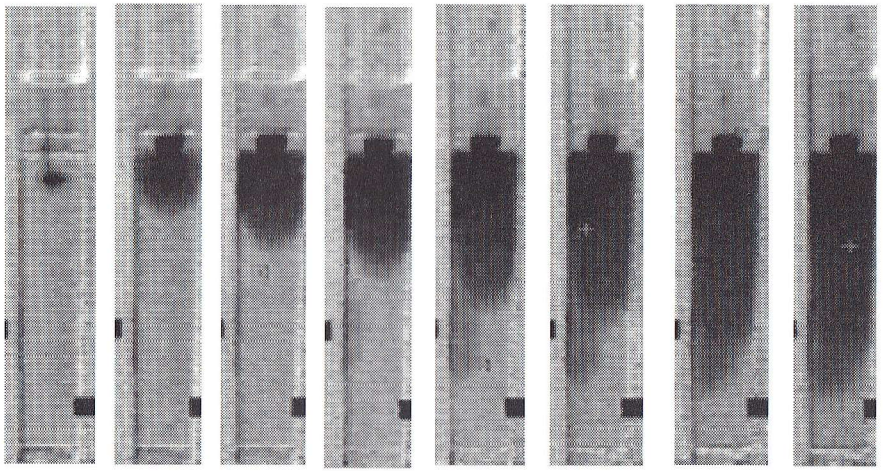
Med nutidens teknik kan även ganska snabba förlopp studeras, såsom förbränning inne i en motor eller intensiv kokning. En fördel med neutroner är att de, till skillnad från röntgenstrålar, tränger genom metalldelar, vilket behövs i de flesta industritillämpningar. Som ett exempel visas neutronradiografibilder av olika former av tvåfasflöde, d.v.s. intensivt kokande vatten under tryck i ett aluminiumrör (Fig. 2). Bilderna är tagna vid en forskningsreaktor i Kyoto University Research Reactor Institute med en bländarehastighet av 1/2000 sekunder.

En annan tillämpning gäller studium av långsamt intrång av vatten i geologiska prov. Ett samarbetsprojekt bedrivs inom detta område bl.a. vid Chalmers mellan avdelningarna Petrofysik och Reaktorfysik för användning av dynamisk neutronradiografi för att visualisera flödet av vatten och olja i urberget. Ett exempel visas i Fig. 3, tagen vid forskningsreaktorn i Budapest. Figuren visar intrång av vatten i ett prov från Visingsö. Sådana undersökningar ger värdefull information som kan utnyttjas i t ex oljeprospektering, men även i samband med slutförvar av kärnavfall genom bättre förståelse av flödet av grundvatten i urberget. Metoderna har en klar

relevans inom andra miljörelaterade frågor såsom upptäckt av spillolja och kontroll av effektiviteten av saneringsarbete.



Figur 2. Dynamisk neutronradiografi av tvåfasflöde



Figur 3. Dynamisk neutronradiografi av intrång av vatten i geologiskt prov (sandsten från Visingsö)

En helt annan tillämpning gäller modifiering av material genom neutronbestrålning. Man tillverkar halvledare för elektronikindustri genom dopning av kisel med neutroner. Detta är en mycket effektiv metod, till stor nytta för mikroelektronikindustrin. Framställning av halvledarmaterial görs bl.a. vid reaktorn R2 i Studsvik.

Medicinska tillämpningar

Kärntekniska metoder används, förutom för sterilisering av utrustning och test av läkemedel via radioaktiv "taggning", både i diagnostik och terapi. Vad diagnostik beträffar använder man både spårämnen och avbildningsmetoder. Spårämnen används för att studera omsättning av olika ämnen i kroppen i både friska och sjuka vävnader. När det gäller avbildningsmetoder är konventionella röntgenbilder de första som har använts för visualisering. På senare tid har datorstyrd tomografi, d.v.s. rekonstruktion av två- eller tredimensionella bilder av ben, vävnad och tumörer blivit mer och mer effektiva. Man använder förutom röntgenbilder även positronemissionstomografi (PET) och magnetresonans (MR) för två- och tredimensionell avbildning av vävnader och tumörer.

När det gäller terapi har skadliga tumörer behandlats länge genom direkt bestrålning med gammastrålning eller neutroner. En senare och mycket lovande metod är bor-neutron infångningsterapi (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT). Principerna för denna metod beskrivs mer detaljerad i Hellborgs artikel.

BNCT har hittills prövats på ett fåtal ställen, där USA och Japan har lett utvecklingen och testerna. Man har nyligen beslutat att uppföra en BNCT-anläggning vid R2-0 reaktorn i Studsvik. Konstruktionen är på gång och man beräknar kunna ta emot de första patienterna mot slutet av 1999, d.v.s. före millennieskiftet. Studsviksreaktorns goda prestanda samt en unik, patenterad filterkonstruktion för att åstadkomma optimalt neutronspektrum vid behandlingen gör att Sverige kommer att inta en mycket framstående plats inom BNCT-teknikens utveckling och tillämpning.

Tillämpningar i jordbruk och boskapsskötsel

Användning av kärntekniska metoder minskar behovet av kemikalier (konstgödsel och bekämpningsmedel), samt behov av vatten. Man kan också utveckla arter både när det gäller växter och boskapsdjur, som är mer resistenta mot sjukdomar, infektioner och skadedjur, samt ger mer föda och bättre kvalité. En annan tillämpning, ovärderlig för många u-länder, har varit utrotning av vissa infektionsbärande skadedjur, t ex "screw worm", fruktfluga m.m. Genom bestrålning av mat kan man öka hållbarheten genom att döda bakterier, parasiter m.m.

Miljöteknik, naturvård, säkerhet

Inom miljöteknik och naturvård används kärntekniska metoder i tre olika syften: upptäckt av utsläpp av föroreningar, mätning av mängden och transport av föroreningar, samt utarbetande av förebyggande åtgärder. Man kan t ex kartlägga halter av konstgödsel och bekämpningsmedel i mark och vatten, samt identifiera källor av sådana föroreningar. Man kan också följa kretslopp av växthusgaser, inklusive produktion och upptag både i mark och vatten samt i växter.

Ett annat område som redan har nämnts är uppföljning av utsläpp och sanering av oljehaltigt material. Man kan dels göra mätningar i konkreta fall, dels studera transportegenskaper av olja i olika mark- och bergarter i syfte att öka förståelsen av transportprocesser, och därigenom göra bättre bedömningar vid utredning av miljökonsekvenser av olika utsläpp.

Ett omgivningsproblem som inte har att göra med utsläpp av föroreningar är detektering av landminor. Detta är ett enormt problem i vissa krigshärjade områden och det finns f n absolut ingen metod som är bäst för att upptäcka begravda minor. Neutronmätningar, t ex mätning av tidsförlopp och spektrum av neutroner reflekterade från marken samt aktiveringsanalys är metoder som används som komplement till andra metoder. Till samma kategori hör upptäckt av sprängmedel t ex vid flygplatser. Neutronradiografi och aktivering är mycket värdefulla kompletterande metoder till den vanliga röntgenmetoden som kan användas för att avslöja olika typer av sprängmedel.

Slutsatser

Ovanstående beskrivning har förhoppningsvis kunnat demonstrera bredden och betydelsen av de vetenskapliga, tekniska, medicinska och miljötekniska tillämpningar som möjliggjordes av utvecklingen av kärnenergi. Man kan konstatera att inverkan av dessa tillämpningar på vår livskvalité är enorm, och dessutom mycket större än vanligen känt. Ingen annan energikälla har lett till uppkomst av så många, så viktiga och så pass diversifierade indirekta fördelar.

Det är också viktigt att betona dessa fördelar för att kompensera en bild av kärnkraft som framhåller kopplingen mellan civil och militär användning av kärnenergi. Därvid betonas att utveckling av kärnenergi har lett till möjligheten av icke-humanitära tillämpningar. Som tur är har kärnvapen inte kommit till någon användning sedan andra världskriget. Däremot har alla ovanbeskrivna indirekta fördelar fått en mycket bred tillämpning. Vissa av dem är rentav humanitära såsom minröjning eller bekämpning av cancer. Dessa fakta bör man också ta hänsyn till för en samlad och balanserad bedömning av samhällsnyttan av kärnenergi.

Imre Pázsit är professor och föreståndare för Avdelningen för reaktorfysik, Chalmers tekniska högskola.
imre@nephy.chalmers.se, http://www.nephy.chalmers.se/~imre

IAEA – en organisation för kärnenergi, mot kärnvapen

Hans Blix

Kärnenergins Janusansikte

Det sägs ibland att kärnenergin har ett Janusansikte, en god sida och en ond sida. Det internationella atomenergiorganets (IAEA:s) uppgift är att som staternas gemensamma instrument verka för den goda sidan och motverka den onda.

Att någonting kan användas såväl till vårt fromma som till vår skada är inte unikt.

- *Elden* – den kemiska föreningen av en kolatom i ved, kol, gas eller olja med två syreatomer i luften till koldioxid – ger oss energi att värma vår mat och oss själva, men hur ofta har man under tidernas lopp inte använt elden till att döda och föröda.
- Krutet – som gett gevärskulan mycket större *kinetisk energi* än vad pilen kunde få – hjälpte människan i jakten på villebråd, men också i att döda varandra.
- *Tyngdkraften* utnyttjas i vattnets lägesenergi för att ge oss elektricitet, men många olyckor beror på fall – nerför trappor, i berg etc. – och de energirelaterade olyckor som kräver flest dödsoffer är de som inträffar när kraftdammar brister.

Vi avvecklar inte kemisk energi, kinetisk energi eller tyngdkraften för att de kan leda till olyckor och skada. För att kärnenergin kan användas i stridsspetsar finns det heller ingen anledning att vi inte skulle utnyttja den till exempel till att

- förbättra och öka produktionen av livsmedel och minska spill
- underlätta medicinska diagnoser och möjliggöra terapi
- ge oss värme och elektricitet.

Vi kan f.ö. inte "avuppfinna" kärnenergin. Anden har kommit ur flaskan. Vad vi kan och bör göra är att till fullo *utröna dess positiva potential och utnyttja den och samtidigt kontrollera den*. Vi har kommit en god bit på den vägen och de flesta av de fredliga användningarna av kärnenergin är okontroversiella – inom medicinen, industrin och jordbruket.

Det är främst elektricitetsproduktionen genom kärnkraft och bestrålning av livsmedel som väcker opposition. Samtidigt finns motstånd – från Japan i öster till Kanada i väster – mot allt förvar av kärnavfall, oavsett om det är hög- eller lågaktivt. Detta motstånd är på sina håll – i USA – så starkt att t.o.m. medicinsk användning av strålning har måst inskränkas för att man inte längre funnit någonstans att deponera radioaktivt avfall!

Atoms for Peace

När USA demonstrerat sin förmåga att anrika uran, att genom upparbetning producera plutonium och att åstadkomma en kontrollerad kärnreaktion förstod man tidigt på amerikanskt håll , att man i andra länder skulle söka göra detsamma. Man insåg att den sekretesspolitik som man först följt inte i längden skulle hindra andra att lyckas med det som man i USA redan gjort. Man drog slutsatsen att det var bättre att göra sitt anrikade uran och sin teknik tillgänglig för andra mot bindande utfästelser om uteslutande fredlig användning än att mottagarna själva utvecklade sin nukleära förmåga utan varje sådan utfästelse. Detta – och förslaget att skapa en internationell organisation för att främja den fredliga användningen av kärnenergin och för att motverka en militär användning – var kärnan i den plan för 'Atoms for Peace' som President Eisenhower 1953 framlade i FN:s generalförsamling.

IAEA:s organisation och samarbetspartners

The *International Atomic Energy Agency* (IAEA) – eller på svenska Internationella Atomenergiorganet – tillkom 1957 och började sin verksamhet 1958. Den skulle utgöra *staternas* instrument att *främja den fredliga användningen av kärnenergin* och samtidigt möjliggöra fortlöpande *verifikation att en stats användning verkligen var uteslutande fredlig*, det som vi idag kallar 'safeguards' eller på svenska IAEA kontroll.

Man lade de flesta befogenheterna i en mindre styrelse som man hoppades skulle kunna bli handlingskraftig. IAEA:s generalkonferens, som f.n. består av representanter för ca. 130 stater, ger mer policy än operativ ledning. Så t.ex. rekommenderar styrelsen budgeten och konferensen kan anta eller förkasta den – inte ändra den.

IAEA:s sekretariat – ung. 2200 personer – har också en ovanligt stark ställning, både på grundval av stadgan och i kraft av att det under åren med hjälp av högt kvalificerad tekniskt eller vetenskapligt utbildad personal i stor omfattning tagit initiativ. IAEA är sannolikt den mellanstatliga organisation som har det största antalet vetenskapligt utbildade anställda. Organisationen har under sina 40 år visat en grundmurad respekt för vetenskap – vilket inte hindrar att politiska frågor hanteras politiskt.

Budgeten uppgår till ca 300 miljoner dollar per år och ungefär en tredjedel härav går till att finansiera *safeguards* – IAEA-kontrollen.

Det förekommer att kärnkraftsmotståndare försöker utmåla IAEA som ett organ för kärnkraftindustrin. Det är vilseledande. Både budget och arbetsprogram antas – regelmässigt med enhällighet – av IAEA:s generalkonferens, i vilken också regeringar som är uttalade motståndare till kärnkraft deltar, exempelvis värdlandet Österrike. Det måste understrykas att IAEA är en *mellanstatlig organisation*, dvs. den utför det arbete som medlemsstaternas regeringar lägger på den och dess budget finansieras helt genom bidrag av regeringarna. Att medlemsstaterna bestämmer vad organisationen skall göra innebär å andra sidan inte att verksamheten skulle vara utan intresse för andra än regeringar.

På *strålskyddsområdet* samarbetar IAEA med den *vetenskapliga världens* eget mest auktoritativa organ, *the International Commission on Radiological Protection* (ICRP), vilken tillkom vid en stor radiologkonferens i Stockholm 1928 och i vilken svenska ledamöter spelat en stor roll. IAEA har varit ledande i att på grundval av ICRP:s rekommendationer tillsammans med WHO, ILO och ett antal andra organisationer utarbeta generella regler rörande strålskydd – basic safety standards (BSS).

På *industrisidan* inbjuder IAEA ofta representanter för *företag* till såväl konferenser som kommittéer t.ex. för att utbyta erfarenheter om arbetet på nya reaktorkonstruktioner eller annan ny teknik. Ett viktigt samarbete existerar med företag som driver kärnkraftverk och deras världsorganisation, *the World Association of Nuclear Operators* (WANO). Medan Agencyn kallat till internationella konferenser t.ex. om 'man-machine interface' och även i stor utsträckning sänt och sänder internationella expertgrupper att på inbjudan granska driftssäkerheten i kärnkraftverk eller specifika incidenter, så har WANO organiserat ett mycket nära erfarenhetsutbyte direkt mellan kärnkraftverk. WANO tillkom några år efter Tjernobylolyckan, bl.a. i syfte att bryta isoleringen för personalen i många kärnkraftverk, inte minst i öst, och främja en global säkerhetskultur.

Med *forskarvärlden* har IAEA under hela sin tillvaro haft betydande kontakt. Ett exempel gäller *fusionsforskningen,* där IAEA ger ut en av världens ledande tidskrifter och där ett stort fyrpartsprojektet mellan USA, EU, Ryssland och Japan (ITER) äger rum under ett IAEA paraply.

Ett annat exempel är det institut, *International Institute of Theoretical Physics* som under IAEA:s ledning och budget växte upp i Trieste med nobelpristagare Abdus Salam som dynamisk ledare. Med betydande bilateralt ekonomiskt stöd från italienska staten och staden Trieste har tusentals och åter tusentals fysiker från hela världen samlats vid institutet till seminarier, kurser och konferenser. Särskilt för u-länderna har denna samlingspunkt varit värdefull. En av Professor Salams teser var att u-länderna för sin utveckling måste ha tillgång till en egen kvalificerad forskningskapacitet.

IAEA har varit ett betydelsefullt stöd för och ofta t.o.m. en förutsättning för tillkomsten av *atomenergikommissioner* i många u-länder. Genom råd och bistånd – exempelvis i form av utrustning – till deras verksamhet har IAEA kunnat hjälpa dessa länder att ta de första stegen in i atomåldern. De har kanske kunnat börja införa en del nukleärmedicinska metoder och nationella regler om strålskydd. Särskilt två mekanismer som upprättats i Agencyn förtjänar att nämnas. Den ena är *the International Nuclear Information System* (INIS), som är ett globalt informationssystem för all fredlig användning av kärnenergi. Det finns numera on line. Bidragsgivare till detta system finns i ungefär 100 länder och systemet drivs från Wien. Det innehåller f.n. ca 2 miljoner notiser.

Ett annat viktigt instrument är för *nukleärmedicinen* i u-länderna det nätverk av s.k. Secondary Standard Dosimetry Laboratories *(SSDLs),* som IAEA tillsammans med WHO hjälpt till att skapa i syfte att säkra att de stråldoser som ges till patienter mäts enligt internationell standard. Sedan

1979 har Agencyn i Wien haft ett eget dosimetrilaboratorium som kunnat tjäna som modell för ett medelstort u-landslab.

IAEA:s arbetsmetoder

Den enklaste – men inte nödvändigtvis minst givande – arbetsmetoden är *erfarenhetsutbyte.* IAEA anordnar mängder av större och mindre konferenser, seminarier och andra möten och har ett stort antal tillfälliga eller stående kommittéer där erfarenheter utbyts beträffande säkerhet i drift, ny teknik, avfall, icke-spridning och tusen andra ämnen. Liksom andra konferensorganisatörer *trycker IAEA en stor del av sitt konferensmaterial, – föredrag, uppsatser, diskussioner och slutsatser.* Agencyn är världens största enskilda producent av tryckta skrifter på kärnenergins område. År 1997 publicerade IAEA 110 böcker, rapporter, tidskriftsnummer eller broschyrer.

En andra arbetsmetod är att på grundval av det internationella erfarenhetsutbytet formulera gemensamma *normer,* riktlinjer, standards. På kärnkraftsäkerhetsområdet har t.ex. under årens lopp serien *Nuclear Safety Standards (NUSS)* kommit att omfatta något 70-tal instrument i skilda frågor. För många u-länder är det av stort värde att kunna basera sin egen nationella normgivning på rekommendationer som utformats i samarbete mellan några av världens bästa experter. Man finner att även länder som Kina i stor utsträckning mer eller mindre överför de internationella normerna till intern lagstiftning. Och även i-länderna är angelägna att tillse att deras nationella regler är förenliga med gällande internationella normer. På detta sätt skapas en viss internationell regelharmonisering på hög kvalitativ nivå.

På en del områden är man angelägen att ha normer som är *juridiskt bindande.* Efter Tjernobyl-olyckan infördes *två konventioner – den ena* rörande staters skyldighet att ge omedelbar information till IAEA och till andra stater om olyckor som kan ha gränsöverskridande verkan. *Den andra konventionen* skapade mekanismer för omedelbar hjälp vid radiologiska olyckor. Båda konventionerna har kommit till användning vid ett antal mindre olyckor. Några större har ju sedan Tjernobyl inte förekommit.

En *tredje konvention* – om *nukleär säkerhet i kärnkraftverk* kom till för några år sedan och innehåller grundläggande säkerhetsregler. Kärnkraft-

verk som inte når upp till de nivåer som föreskrivs skall antingen bringas till denna nivå eller stängas. Konventionen innefattar skyldighet för anslutna stater som har kärnkraft att med ett par års mellanrum ge utförliga rapporter om säkerhetsläget beträffande deras kärnkraftverk. Dessa får sen bli föremål för "kollegial granskning" – *peer review*. Det innebär att andra staters representanter får möjlighet att vid särskilda möten ställa frågor och diskutera innehållet. I en värld utan överstatlighet är detta en både praktisk och verksam metod för ömsesidiga påtryckningar att leva upp till gemensamt utformade normer.

Det skall tilläggas att det inte hos staterna funnits någon önskan att göra IAEA till någon sorts övernationell kontrollmyndighet för säkerhet. Synen har dock i viss mån ändrats. Man har kommit att känna behov av en viss kompletterande internationell kontroll på säkerhetsområdet. Dock vill man inte på minsta sätt lyfta av de nationella myndigheterna deras ansvar och befogenheter. På det nationella planet finns ju också lagstiftningsmakten och hela den exekutiva makten.

En fjärde konvention antogs i IAEA under 1997. Det var konventionen om *säkerhet i hantering av utbränt kärnbränsle och kärnavfall*. Den är upplagd på samma sätt som den första säkerhetskonventionen – alltså grundläggande regler, återkommande nationella rapporter med tillfälle till ömsesidig granskning (peer review).

Det bör också nämnas att en mycket omfattande modernisering i det internationella regelverket rörande *ansvar vid kärnkraftsolyckor* slutfördes under 1997 efter många års förhandlingsarbete.

Sammanfattningsvis kan man säga att den fredliga användningen av kärnenergin kommit att omgärdas av en ganska omfattande internationell legal infrastruktur genom de skilda konventioner och andra regelsystem som utarbetats och antagits inom IAEA. Utanför kärnkraften är regelsystemen sällan formellt bindande, vilket inte hindrar att de – som vid 'basic safety standards' – har stor genomslagskraft.

En tredje verksamhetsform inom IAEA skulle kanske kunna kallas *service*. Hit skulle man kunna räkna hela den tekniska biståndsverksamheten som årligen kostar bortåt 100 miljoner dollar och som syftar till att u-länder skall kunna utnyttja åtminstone mindre avancerad nukleär teknik.

"Främjande" av kärnkraft

I det ganska kärnkraftnegativa klimat som på många håll rått under det senaste decenniet har flera stater efterfrågat en större och mer aktivt främjande av kärnkraften från IAEA:s sida. Det finns dock goda skäl för IAEA att inte gå in i direkt opinionsbildande verksamhet för att främja acceptans av kärnkraft. Ett är att man inte skulle fått alla medlemmar med på det. Ett annat är att den opinionsbildande verksamheten i varje land måste anpassas efter den lokala situationen. Ett tredje skäl är att man ansett sig bäst fylla IAEA-stadgans krav på att organisationen skall "främja" den fredliga användningen av kärnenergi genom att kontinuerligt arbeta för att öka säkerhet och effektivitet i all användning av kärnenergi och all hantering av avfall och en minskad militär användning. Härutöver finns givetvis utrymme för en betydande faktainformation.

Områden inom vilka nukleära metoder främjas

Jordbruk och livsmedel

Gemensamt med FAO har IAEA en hel avdelning (förlagd till IAEA) som sysslar med skilda nukleära metoder för att främja livsmedels- och jordbruksproduktion och att minska spill i livsmedel och foder.

Genom bestrålning av frön, kan man stimulera till *mutationer* och därefter söka efter sådana som har lämpliga egenskaper. IAEA har en betydande verksamhet för att bistå u-landsmedlemmar på detta område och har exempelvis hjälpt till att få fram nya bananSorter med tidigare mognad, nya bomullssorter som gett betydligt högre avkastning än de gamla och nya växter som klarar att växa på ganska salthaltig mark.

Radioaktiva isotoper är unika *spårämnen* både inom medicinen och jordbruket. Man kan t.ex. kartlägga *grundvattenresurser* och avgöra om det är gamla eller förnybara vattenresurser man har att göra med. Sådana spårämnen kan också användas till att utröna när växter bäst tar upp vatten eller konstgödning.

Mer kontroversiellt är att *bestråla livsmedel* för att döda ev. bakterier eller virus. I Sverige förbjöd man för några år sedan all bestrålning av livsmedel, men sedan salmonellainfekterade kryddor lett till några sjukdomsfall, släppte man förbudet mot bestrålning av kryddor. Lagstiftningen varierar mellan olika länder. Ryssarna använde för ett antal år sedan metoden för att desinficera stora mängder spannmål som man importerat. I Frankrike kan man få bestrålad kyckling, vilket minskar risken för salmo-

nella. I USA kan man också i stor utsträckning bestråla frukt, vilket förlänger lagringstiden för jordgubbar och flera andra bär.

En del konsumentorganisationer och säkert de flesta gröna organisationer är negativa till livsmedelsbestrålning. På samma sätt som folk en gång vände sig mot el-ugnar och befarade att maten skulle bli elektrisk och nu är oroliga över mikrovågsugnar, så är en del gott folk nu oroliga att bestrålad mat skall bli radioaktiv. Få konserveringsmetoder torde dock vara mer undersökta och testade.

Färskvatten håller i många områden på jorden på att bli en bristvara men *desalinering* av saltvatten är en möjlig – men dyr – metod att klara behoven. Det sker f.n. mest i oljeländer och genom att man hettar upp vattnet och kondenserar det. Användande av kärnreaktorer skulle ge en möjlighet att med bibehållen effektivitet och *utan utsläpp* producera de stora mängder energi som behövs för desalinering. Inte heller detta skulle bli billigt.

Nukleär medicin

På IAEA ansåg man tidigt att nukleärmedicin och framför allt bekämpning av cancer med strålning borde finnas bland de metoder som u-ländernas nyskapade atomenergikommissioner rimligen borde införa, inte minst mot bakgrund av den ökande livslängden och den därmed ökande cancerfrekvensen i u-länderna.

När vi idag tittar i backspegeln kan vi nog konstatera att det var en framsynt satsning att finansiera radiologisk utbildning av medicinsk personal från u-länder och bidra med enkel utrustning till kliniker på skilda håll. Givetvis krävdes också komplement i form av hjälp att utveckla regler rörande strålskydd och utbildande av personal vid övervakande myndigheter.

Nukleära metoder för industrin. Kärnkraften

Det finns åtskilliga intressanta nukleära metoder som används med god ekonomi inom industrin – vid sidan av kärnkraft för att generera el. Nukleära metoder är vanliga för precisa mätningar exempelvis i pappersindustri. Man använder sig också av strålning för att åstadkomma polymerisering av isoleringsmateriel. Naturgummi som bestrålats blir starkare, t.ex. i kondomer!

En intressant nukleär metod har utvecklats för att eliminera svaveldioxid och kväveoxider ur rökgaserna från kol och olja. Den prövas nu i industriell skala. Man tillsätter ammoniak och med en inmonterad accelerator utsätter man blandningen för en elektronstråle och får som resultat ammoniumsulfat och ammoniumnitrat vilka kan användas som gödningsmedel!

Kärnkraften

Som redan ovan framgått ägnar IAEA en betydande del av sitt arbete – och sina resurser – åt att främja säkerhet i konstruktion och drift av kärnkraftverk och säkerhet i hantering av utbränt bränsle och radioaktivt avfall. Det sker såväl genom erfarenhetsutbyte som normgivning och service. Alla olyckor och incidenter involverande kärnenergianläggningar och nukleärt material skall rapporteras till Agencyn och klassas efter allvarlighetsgrad enligt en skala från 1 till 7 (INES eller International Nuclear Event Scale), så att myndigheter och allmänhet snabbt skall få en uppfattning om nivån. Agencyn tillser att alla medlemmar kan ta del av de lärdomar som dras ur tinade händelser och den brukar begära att med opartiska expertteam få vara med och utreda händelser av större betydelse.

Inom Sovjetunionen fanns en betydande forsknings- och ingenjörskapacitet för konstruktion och byggnad av kärnenergianläggningar. Många intressanta lösningar kom fram. Men det skedde i den isolerade sovjetsfären och undgick därmed den hälsosamma internationella granskning som ständigt pågår i den öppna världen. Samtidigt som en hel del värdefulla idéer och konstruktioner i öst inte blev uppmärksammade i väst, så blev en hel del svagheter i öst opåtalade. Det var sådana svagheter som i Tjernobylreaktorn (av RBMK-typ) kom att leda till katastrof. Efter Sovjetunionens upplösning har IAEA i samarbete med ryska och andra myndigheter i öst och medverkan av internationell expertis spelat stor roll för att kartlägga problem och svagheter i sovjetkonstruerade kärnkraftverk så att alla parter skall veta vilka förbättringsarbeten som behöver genomföras. Agencyn deltar däremot aldrig själv i dessa arbeten. Den har inga resurser för bistånd och ger aldrig råd i val av leverantörer.

Agencyn är naturligt nog insamlingspunkt för all internationell statistik som rör kärnkraften, – verkens antal, ålder, kapacitet, produktion etc. Av denna statistik kan man se att "tillgängligheten" (d.v.s. den tid som ett kärnkraftverk är i drift under ett år) under de senaste decennierna gått upp från ca. 60% till ca. 80%. Samtidigt kan man se att antalet oplanerade driftstopp minskar och att den dos radioaktivitet som driftspersonal utsätts för gått ner. Detta är tecken på en allt bättre och säkrare drift.

Lyckligtvis inhämtas värdefull erfarenhet inte bara genom negativa händelser. Ett betydande utbyte av kunskap, idéer och erfarenhet rörande konstruktioner av skilda nya typer av kärnkraftverk sker i stående kom-

mittéer och i konferenser som då och då inkallas. Vad man f.n. söker är lösningar som kan drastiskt minska konstruktionskostnaderna och *samtidigt* öka säkerheten och förenkla driften, bl.a. snabbare industriell byggnad av moduler och mindre skräddarsömnad på platsen, licensieringsförfaranden som är pålitliga och undviker byggnadsstopp. Det gäller att stå beredd med billigare, säkrare och driftvänligare konstruktioner den dag då allmänhet och regeringar kommer underfund med att den växthusgasfria kärnkraften måste bli en huvudkomponent i ansträngningarna att motverka risken för klimatförändringar.

IAEA mot kärnvapen

IAEA är säkert mest känt bland allmänheten för sitt 'safeguards system' –sin kontroll att kärnenergianläggningar inte används för att utveckla vapen, inklusive verksamheterna i Irak och Nordkorea – två länder som brutit mot förpliktelser som de åtagit sig i kontrollavtalen med IAEA. Att driva safeguardssystemet är en betydande del av organisationens arbete. Safeguards-avdelningen har ca 600 anställda, de flesta stationerade i Wien, men några inspektörer är placerade i Tokyo och i Toronto – bl.a. för att reducera resekostnader och för att öka möjligheten av snabbt insatta inspektioner.

Man kanske skulle kunna säga att världens ansträngningar f.n. går ut på att söka förhindra att fler stater skaffar sig kärnvapen och att hos de existerande kärnvapenmakterna minska antalet stridsspetsar så mycket som möjligt – för att vi någon gång i framtiden skall kunna komma till en kärnvapenfri värld.

Utsikterna till framgång ter sig idag inte så mörka. Under det kalla kriget sade president Kennedy om en värld med dussintals kärnvapenstater och för varje ny sådan stat ansåg man risken för användning av vapnen öka. När den nukleära kapplöpningen mellan stormakterna, främst USA och Sovjet, var längst kommen, anses de ha disponerat många tiotusentals atomstridspetsar, tillräckligt många för att förgöra all mänsklig civilisation. Man talade om *mutually assured destruction* eller MAD.

Idag ter sig detta lyckligt långt borta. Ryssar och amerikaner är på sitt andra START avtal och monterar ner atomstridsspetsar så snabbt att deras största svårighet är hur de skall ta hand om allt anrikat uran och allt plutonium som frigörs.

Vad gäller den horisontella spridningen av kärnvapnen, så har den stannat vid "fem plus", d.v.s. de fem stormakterna som finns i säkerhetsrådet plus Indien och Pakistan som demonstrerat sin vapenkapacitet genom provsprängningar och Israel som länge bedömts ha kärnvapen – utan att ha demonstrerat det. Å andra sidan har många länder som man tidigare befarade möjligen skulle skaffa sig kärnvapen avstått från det, exempelvis Argentina, Brasilien, Algeriet, Egypten och Sydkorea. Och Sydafrika som hade skaffat sig kärnvapen, har efter apartheidregimens fall eliminerat dem och öppnat sig för full kontroll. Kärnkraft och kärnvapen har inte visat sig vara de *siamesiska tvillingar* som en del motståndare befarade.

Det kalla krigets slut och den avspänning som följt har varit avgörande för en utveckling bort från kärnvapnen. Ingen tror längre på ett globalt kärnvapenkrig eller, för den delen, annat krig mellan stormakter. Harmagedon och ett radioaktivt Ragnarök står inte längre på agendan. Konkurrensen mellan stora stater förväntas i stället gälla inflytande och bestämmanderätt över handel, finanser och informationsflöden.

Ännu är kärnvapenhoten dock inte borta. Att Indien och Pakistan 1998 provade kärnvapen var en stor besvikelse och kan riskera att fresta någon annan stat i regionen att försöka gå i samma riktning. Samtidigt har vi sett att liksom Frankrike kunde ansluta sig till det fullständiga provstoppsavtalet när landet väl hade gjort en sista omgång prov i Mururoa-atollen, så tycks Indien och Pakistan nu beredda att förbinda sig att avstå från fler prov. Att de också är med på att diskussioner öppnas rörande stopp på produktion av anrikat uran och plutonium för vapenändamål är också positivt.

I *Irak* och *Nordkorea* finns två betydande osäkerhetsclement. Genom IAEA:s inspektioner i Irak under många år får det anses säkert att Irak inte har någon egen kapacitet att tillverka klyvbart material för vapenändamål. För det skulle det krävas en infrastruktur som inte längre finns. Den risk som finns ligger snarast i att landet skulle lyckas köpa plutonium eller anrikat uran svart. Men även då ter det sig osannolikt att man oupptäckt skulle kunna tillverka bomber. Hotet från Irak ligger mer i de biologiska och kemiska stridsmedlen som är lättare att dölja. Att inspektionerna på marken fortsätter är önskvärt. Satelliter och flygplan kan inte titta *inne i byggnader*, sätta upp kameror och sensorer eller ta miljöprover. Men givetvis utgör *också de* varningsmekanismer som kan slå larm och utlösa politiska, diplomatiska och militära åtgärder.

Även där inspektioner på markplanet äger rum, med de tekniska hjälpmedel som nu finns och med de ökade befogenheter som IAEA–inspektörerna ges enligt det efter Irak förstärkta safeguardssystemet, bör man varna för föreställningen att man genom inspektioner kan komma till

total visshet om att *ingenting finns* som är av betydelse för produktion av massförstörelsevapen. Hur långtgående inspektion än blir – och i Irakfallet har inspektörerna haft rättigheter som går milsvitt längre än även IAEA:s förstärkta kontrollsystem – kan man aldrig vara säker på att det inte inom ett stort territorium skulle kunna finnas dolda dataprogram, mindre skrymmande utrustning – eller specialister – som skulle kunna ägna sig åt vapenutveckling. Varken i Irakfallet eller något annat fall kommer det någonsin att ges den fullständiga *"clean bill of health"* som ibland efterfrågas. Men ju grundligare och skickligare kontrollen kan göras och ju känsligare tekniska medel man har till sitt förfogande, desto sannolikare är det att när kontrollen inte finner några tecken på vapenutveckling, detta beror på att någon sådan inte äger rum.

Hans Blix har varit generaldirektör för Internationella atomenergiorganet (IAEA) i Wien och är styrelseledamot i Miljövänner för Kärnkraft.