

Kärnkraften är död Död åt kärnkraften!

Av Larsen Jönsson

Många av oss har hört att kärnkraften är död. Det är en vanlig påstand som ofta återkommer i media och i offentliga debatter. Men vad betyder det egentligen? Är kärnkraften verkligen död, eller är det bara en tillfällig svacka? Det är frågor som väcker starka känslor och som ofta leder till polariserade åsikter. I denna artikel ska vi försöka belysa situationen kring kärnkraften och se om det verkligen är dags att ge upp.

Kärnkraften är dödsdömd

Kärnkraften har under lång tid varit en central del i energisystemet. Men under de senaste åren har den utsatts för en hård kritik. Många anser att kärnkraften är för dyr, för riskfylld och för miljöfarlig. Detta har lett till att många länder har beslutat att avveckla sina kärnkraftsplaner. I Sverige har detta lett till en omfattande debatt om kärnkraftens framtid. Det är viktigt att vi ser till alla aspekter av frågan och inte låter oss leda av känslor och ångest. Vi måste göra en noggrann analys av de olika alternativen och se till att vi har en säker och hållbar energiframtid.

Ryktet om min död är betydligt överdrivet

Den berömda kommentaren av Mark Twain att uppgifterna om hans död var betydligt överdrivna tror jag kan användas på kärnkraften i världen.

Kanske ter det sig inte så om man bara lyssnar till den svenska debatten, och förvisso ter det sig inte så för dem som med hela sin själ önskar se kärnkraften död.

Men om man ser på kärnkraften i världen efter Tjernobyli finner man såväl livskraft som stagnation - en skiftande bild.

Ur inledningen till föredraget "Har kärnkraften en framtid i världen?", som hölls vid Chalmers Tekniska Högskola den 21 maj 1987, av generaldirektör Hans Blix, FN:s internationella atomenergiorgan, IAEA.

Kärnkraften i världen efter 1980

Efter folkomröstningen 1980 och beslutet 1981 om avveckling av kärnkraften till år 2010, har den svenska debatten förts som om utvecklingen av kärntekniken upphört.

I själva verket har det internationella skeendet på kärnkraftområdet de senaste tio åren varit mycket dynamiskt. Vid ett ställningstagande till energipolitiken i Sverige är det viktigt att inte avskärma sig från denna utveckling.

Antalet kärnreaktorer har fördubblats

Från början av 1980 till slutet av 1988 fördubblades antalet elproducerande reaktorer i världen från 212 till 414, och den installerade effekten steg från ca 110 till 331 GWe.

Under det gångna årtiondet har USAs dominans minskat och Västeuro-pa övertagit ledningen.

Årsskiftet 1987/88 utnyttjade 26 länder kärnkraft, med följande fördelning:

Västeuropa	36% av världens nukleära effekt
USA	31%
Östblocket	13%
Japan	9%
Övriga	11%

Sveriges andel var 3%.

I slutet av 1988 var ytterligare 137 aggregat (127 GWe) under byggnad i 22 länder, och därutöver förelåg beställningar på 22 aggregat (24 GWe).

Kärnkraftens andel av den totala elproduktionen i några industriländer var under 1987 följande:

Belgien	66%
Finland	37%
Frankrike	70%
Japan	29%
Nederländerna	5%
Sovjetunionen	11%
Spanien	31%
Storbritannien	17%
Sverige	50%
Tjeckoslovakien	25%
Västtyskland	30%
USA	18%
Östtyskland	10-12%

För EG var andelen kärnkraft 1987 32% och 1988 34%. För världen är den idag ca 16%.

Trender i utbyggnaden

Utbyggnadsplanerna har under det gångna decenniet reviderats ner. Orsakerna har varit flera, och deras betydelse har varierat mellan olika länder.

De viktigaste har varit nedskrivna prognoser för elbehovet i början av perioden, sjunkande priser på fossila bränslen, och kärnkraftfientlig opinion.

Kärnkraftmotstånd

Kärnkraftmotstånd med viss politisk förankring finns i nästan alla länder. Det är emellertid i ytterst få fall som det drivits hårt av partier i regeringsställning. Följaktligen har det inte resulterat i principiella avvecklingsbeslut.

Undantagen är, förutom Sverige, Österrike som lade ner sitt enda, icke idrifttagna kärnkraftverk, och Italien, där kärnkraften svarade för ett par procent av elproduktionen.

I några länder (Schweiz, Jugoslavien, Holland, Belgien) finns opinionsbaserade politiska beslut att tillsvidare inte fortsätta utbyggnaden, något som dock inte förenar dessa länders elför-

sörjning (se nedan). Det skall understrykas att det enligt opinionsundersökningar i de länder där utbyggnaden avstannat (t ex USA, Västtyskland, Schweiz, Belgien) inte finns någon majoritet för avveckling av befintliga kärnkraftverk.

I många länder (t ex USA, Västtyskland) har dock motståndet lett till förhållningar och nedläggningar av enskilda projekt, vilket skapat osäkerhet hos investerarna beträffande kommande politiska beslut och branschens framtida livskraft.

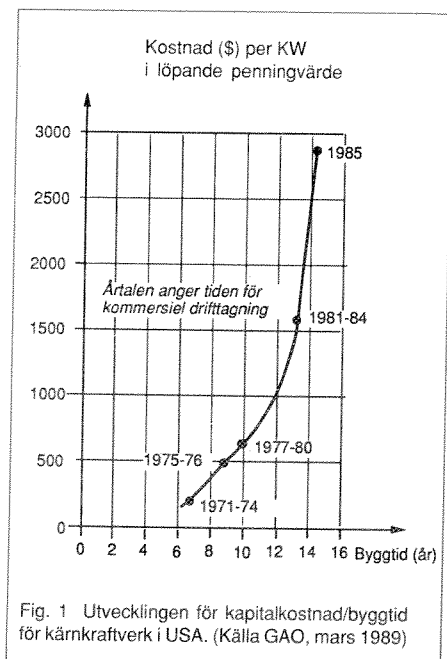
USA

Utvecklingen i USA förtjänar en särskild belysning, då den ofta felaktigt framställs som typisk. I början av perioden fanns ett kapacitetsöverskott för el, samtidigt som ett stort antal kraftverk var under byggnad. Detta bidrog till att påbörjade och planerade kraftverk avbeställdes, såväl kärn- som fossilanläggningar.

Kärnkraften i USA har varit missgynnad av flera omständigheter som saknar motsvarighet i andra länder. Bland de mest utslagsgivande är ett tungrovt och oförutsägbart licensieringssystem, som tillåter omprövningar och ingripanden under projektens gång.

Därtill kommer stora variationer i kompetens- och ansvarsfördelningen mellan beställare, leverantörer och byggföretag, som ibland lett till ineffektivitet och dålig kvalitet.

Allt detta har medfört abnormt långa byggtider.



Medelvärde har legat kring 12 år, vilket är dubbelt så lång tid som i t ex Sverige och givetvis slår hårt mot lönsamheten.

Också driftresultaten har i genomsnitt varit långt sämre än i Europa. Drift- och underhållskostnaden ligger i USA ungefär dubbelt så högt som i andra länder.

Oförutsedda fördyringar tillåts inte slå igenom i de politiskt kontrollerade eltaxorna, varför nya kärnkraftverk av de amerikanska kraftföretagen under rådande förhållanden bedöms som en alltför stor ekonomisk risk.

Ansträngningar görs dock av såväl regeringen som industrin för att ändra förutsättningarna. I mars 1987 uppdrog Representanthuset energi- och miljöutskottet åt General Accounting Office att utreda läget för kärnkraften i USA och undersöka åtgärder för att återuppliva kärnkraftalternativet [1].

Den 8 mars i år gjorde den amerikanska kraftindustrin ett gemensamt policyuttalande att ny kärnkraft kan bidra till att täcka elbehovet under 90-talet, under förutsättning att det federala licensieringsförfarandet förenklas och att staten konkretiserar planerna på avfallsförvar [2].

Frankrike

Här är motpolen till situationen i USA: ett stort antal kärnkraftverk av standardiserad konstruktion, ett strömlinjeformat licensieringssystem och en enhetlig ansvarsbild har lett till låga elproduktionskostnader. Kärnkraftmotståndet är obetydligt och saknar politisk bas.

Frankrike har sålunda påtagit sig rollen som ellexportör, en roll som förutses växa när elmarknaden integreras inom EG. (Fig. 2). Detta underlättar för grannländerna att för närvarande inte utmana kärnkraftfientlig opinion med egen nyutbyggnad.

Östblocket

Den nya liberaliseringen har skapat manifesteringsmöjligheter för den kärnkraftkritiska opinion som uppstod genom Tjernobylylyckan. Delvis som en eftergift för denna opinion, men också av säkerhetstekniska skäl, har ett antal sovjetiska kärnkraftprojekt (närförslagda kraftvärmeverk, jordbävningsshotade anläggningar, verk av tjernobylytyp) avvecklats. Därmed har de mycket ambitiösa utbyggnadsplanerna dragits ner till en, enligt många bedömare, mera realistisk nivå. För Sovjetunionen innebär det omkring 85 GWe kring sekelskiftet.

Kärnkraften ses fortfarande som en hörnsten i den framtida elproduktionen, inte bara i Sovjet utan också i Tjeckoslovakien och Östtyskland.

Asien

De mest expansiva industrinationerna har ambitiösa kärnkraftprogram och planerar fortsatt utbyggnad. Enligt den japanska regeringens långtidsplan från 1987 skall kärnkraftens andel i elproduktionen ha stigit till 45% år 2005 [3]. Kärnkraftmotståndet växer men har hittills inte fått politiskt genomslag. Sydkorea tog beslut om mera kärnkraft, utöver de 9 aggregaten i drift och de 4 planerade, så sent som våren 1989 [4].

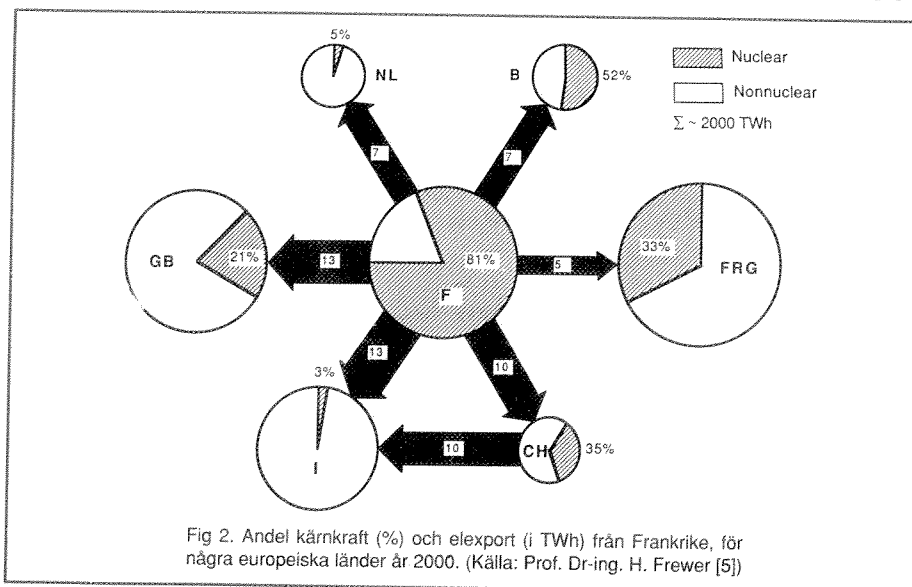


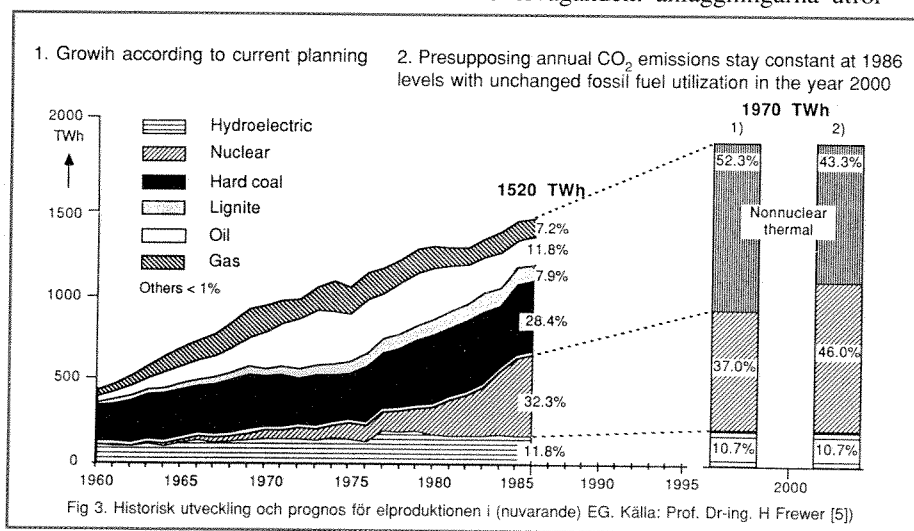
Fig. 2. Andel kärnkraft (%) och ellexport (i TWh) från Frankrike, för några europeiska länder år 2000. (Källa: Prof. Dr-ing. H. Frewer [5])

Nya faktorer

Som hittills framgått har man i åtskilliga länder, främst USA, under en tid kunnat undvika kontroversiella energibeslut genom att tillgången på el mer än väl täckt efterfrågan.

Denna situation håller snabbt på att förändras. Tiden närmar sig då behovet av nya anläggningar blir akut, dels p g a ökande elbehov, men också för att en generation av kraftverk börjar uppnå sin förutsedda tekniska livslängd i början på 2000-talet. I t ex USA förutses under 1990-talet ett behov av 120 - 200 nya, stora kraftverk [2].

Samtidigt har man de senaste åren kommit till insikt om att fossilförbränning kan resultera i en global klimatkatastrof. I det mycket pressade energiförsörjningsläge som förutses måste därför, enligt många bedömare, kärnkraft-alternativet hållas levande för framtiden. Situationen inom EG är betydande för korttidsperspektivet. Se figur 3.



Elförbrukningen väntas stiga med ca 400 TWh fram till år 2000, beroende på framförallt befolkningstillväxten och ökningen av per-capita-förbrukningen i de mindre utvecklade medlemsländerna.

Enligt gällande planer kommer kärnkraften år 2000 att svara för 37% av elproduktionen (mot nuvarande 34%), men om fossilförbränningen skall hållas kvar på 1986 års nivå, måste kärnkraftens andel ökas till 46%. Några andra alternativ räknar man inte med i detta tidsperspektiv [5].

Det pågår sedan någon tid internationellt ett betydande utvecklingsarbete på nya kärnkraftskoncept, med vilka man hoppas kunna övervinna de nuvarande

opinionsmässiga svårigheterna. Samtidigt ser man goda möjligheter att på grundval av nya kunskaper bättre utnyttja befintliga anläggningar.

Utveckling av kärnkraftsäkerheten

Harrisburgolyckan 1979 inledde en ny era i fråga om säkerhetsutveckling, som har kännetecknats av internationellt samarbete. I de flesta kärnkraftländer tillsattes statliga utredningar för att belysa olyckans betydelse för det egna säkerhetstänkandet.

Detta ledde till omedelbara punktvisa förbättringar, men framför allt har stora framsteg gjorts på ett antal breda områden som påverkat säkerheten mera principiellt.

Säkerhetsanalys

Fram till mitten av 1970-talet byggde säkerhetsarbetet på *deterministiska* överväganden: anläggningarna utfor-

Rasmussenstudien gjordes under betydande osäkerhet både i fråga om metodik och numeriska värden. Analysen gällde dessutom två specifika amerikanska lättvattenreaktorer, och det fanns ingen anledning att betrakta den som allmängiltig.

TMI-olyckan framhävde betydelsen av probabilistisk säkerhetsanalys. Det aktuella olycksförloppet fanns i sina huvuddrag beskrivet i Rasmussenstudien, men hade inte beaktats tillräckligt i driftorganisationerna.

Olyckan framhävde också en slutsats som Rasmussengruppen dragit, nämligen att risken inte dominerades av dramatiska felhändelser som stora rörbrott, utan i stället huvudsakligen kunde förknippas med smärre utlösande händelser av mera svårdiagnostiserat slag.

Denna insikt har lett till en kraftig satsning på bättre diagnostiska hjälpmedel för operatörerna, liksom på människa-maskinfrågan i dess helhet.

Efter 1980 har PSA-kompetens byggts upp hos de flesta säkerhetsmyndigheter och kraftföretag, vilket skapat förutsättningar för anläggningsspecifika analyser. Den växande erfarenhetsvolymen har givit en mera tillförlitlig databas, och metodiken har förfinats.

De nya analyserna har visat på mycket stora skillnader i olika anläggningars säkerhetsstandard, också för en och samma reaktortyp. Inom familjen "lättvattenreaktorer", som omfattar 83% av världens kärnkraftverk, kan det idag skilja på en faktor 1000 i risk för hårdsmälta. Skillnaden kan t ex bero på olika krav i fråga om övertalighet och rumslig separation hos säkerhetssystemen (se figur 4 på nästa sida).

Under 1980-talet har det vuxit fram en betydande internationell samstämmighet om målen för säkerhetsarbetet. IAEAs säkerhetsråd, INSAG, har sålunda angivit riktlinjen att risken för svår hårdskada skall vara mindre än 1 på 10 000 driftår i befintliga verk, och 1 på 100 000 driftår i nya. De verksspecifika analyserna gör det möjligt att inrikta förbättringskraven på de svagaste anläggningarna.

För vart och ett av de svenska kärnkraftblocken är sannolikheten för svår hårdskada idag beräknad till mindre än 1 på 100 000 driftår. Enligt en föreskrift som tillkommit under 80-talet skall säkerhetsanalysen upprepas för varje

svenskt block ungefär 4 gånger under dess livstid, detta för att fånga upp förändringar.

(Det måste framhållas att reaktorerna av tjernobytyltyp är så artsilda från lättvattenreaktorerna att några som helst slutsatser inte kan dras från den ena typen till den andra. PSA-kompetens saknades helt i Sovjet, något som ledande ryska tekniker kritiserat redan före olyckan [6].

Efter Tjernobyl ingick Sovjetunionen avtal med USA och Västtyskland för att skaffa know-how på PSA-området. En grov efterhandsanalys av den förolyckade reaktorn tydde på att risken för stor härdskada varit ca 1 på 100 driftår [7].

Därtill kommer att de aktuella sovjetiska reaktorerna, i motsats till de västliga lättvattenreaktorerna, saknar säkerhetsinneslutning som förhindrar att härdsador leder till stora utsläpp. I sina planer på fortsatt kärnkraftutbyggnad har Sovjet nu officiellt anslutit sig till de västliga normerna).

sultat kunde betraktas som allmängiltiga. Likaså uppstod frågan hur haveriet skulle ha utvecklats under ännu olyckligare omständigheter. Ett gigantiskt forskningsprogram, med bred internationell anslutning, inleddes kring förloppet av svåra haverier i lättvattenreaktorer ("källtermsforskning").

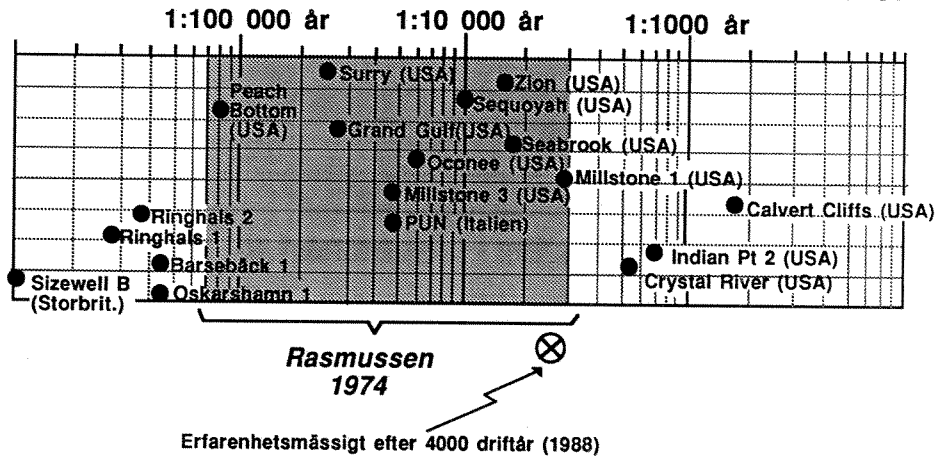
Forskningen omfattade allt ifrån systematiska laborieförsök till avsiktlig nedsmältning av simulerat och verkligt reaktorbränsle. Parallellt utvecklades beräkningsmetoder. Frågeställningarna gällde själva nedsmältningsprocessen, smältans beteende och inverkan på olika anläggningsdelar, och fenomen som kunde äventyra inneslutningen under olyckans gång.

utan konsekvenser för omgivningen är olika för olika anläggningar. Sverige har varit först med att konsekvent införa system för filtrerad tryckavlastning [8]. Frankrike, Västtyskland och Finland är inne på samma väg. Sovjet har för avsikt att införa det i nya kärnkraftverk.

Erfarenhetsåterföring

Ett haveri i ett kärnkraftverk förutsätter en lång rad av oberoende felhändelser. Sådana isolerade felhändelser, eller t o m kedjor av dem, är därför långt mera sannolika än ett fullgånget haveri. Genom att ta lärdom av inträffade störningar och undanröja orsakerna kan man succesivt minska haveririsen. Erfarenheten av inträffade fel ger dessu-

Sannolikhet för härds smälta i olika lättvattenreaktorer



Erfarenhetsmässigt efter 4000 driftår (1988)

Fig.4. Punkterna är resultat av PSA-analyser som gjorts på 1980-talet. Det skuggade området är Rasmussenstudiens resultat 1974. Kryset visar erfarenheten till dags dato. (Punkterna är inte helt jämförbara, då analyserna gjorts vid olika tidpunkter på olika stadier av säkerhetsutvecklingen. Dessutom innefattar vissa analyser risken för "yttre händelser", såsom jordbävning, medan andra inte gör det. Dessa skillnader ändrar dock inte helhetsbilden. För de svenska kärnkraftverken är analyserna framför allt en verifiering av att risken ligger under en viss nivå. Några absolutvärden under denna nivå har inte eftersträvt. Värdena är därför konservativa och ger ingen rangordning mellan kraftverken.)

Haverikunskap

TMI-olyckan 1979 var det första - och hittills enda - haveri i en lättvattenreaktor som lett till omfattande härds smälta. Det senare bekräftades tillfullo först genom uppröjningsarbetet flera år senare.

Frigörelsen av radioaktivitet skilde sig i många avseenden från vad man hade förutsett för en sådan situation, och detta huvudsakligen i gynnsam riktning. Utsläppen begränsades i stort sett till ädelgaser, som gav obetydliga stråldoser i omgivningen. Andra radioaktiva ämnen bands effektivt i vattenvolymerna inne i anläggningen. Olyckan visade också att det är möjligt att avbryta ett framskridet härds smälteförlopp innan reaktortryckkärlet hunnit förstöras.

Man frågade sig i vad mån dessa re-

Förutom att den ökat kunskapen om haverier har forskningen skapat förutsättningar för konkreta åtgärder, som ökat säkerheten mot svåra omgivningskonsekvenser om ett hårdhaveri skulle inträffa.

Det är framför allt fråga om olika förstärkningar av inneslutningsfunktionen (säkrare kylning, filtrerad tryckavlastning, åtgärder mot vätgasexplosioner).

Därutöver har det blivit möjligt att utforma detaljerade anvisningar till driftpersonalen på hur man skall avbryta ett påbörjat haveriförlopp ("accident management" - haverihantering).

Även här måste understrykas att förutsättningarna att bemästra ett haveri

tom säkrare ingångsdata för probabilistiska säkerhetsanalyser.

Den samlade internationella erfarenheten omfattar nu drygt 5 000 driftår och den ökar med 400 per år.

Vikten av erfarenhetsåterföring framstod klart efter TMI-olyckan: inledningen till ett likartat förlopp hade tidigare utspelats vid två andra kärnkraftverk men fångats upp av säkerhetssystemen. Om detta uppmärksammats mera allmänt hade olyckan sannolikt förhindrats.

1980 skapades ett nätverk för systematisk erfarenhetsåterföring. Detta skedde genom att USAs kärnkraftföretag bildade en samarbetsorganisation, INPO, till vilken också andra västliga

kraftföretag, däribland Sveriges, anslöt sig. INPO och dess systerorganisationer i andra länder förmedlar inte bara snabb information om inträffade störningar. De analyserar händelserna med avseende på orsaker och säkerhetsmässig betydelse, och söker spåra eventuella trender.

Vid sidan av kraftföretagens eget nätverk har liknande system för informationsutbyte byggts upp för tillsynsmyndigheterna, dels inom IAEA, dels inom OECDs kärnenergiorgan.

Tjernobylyckan skapade en global insikt om att svåra olyckor måste förhindras, oavsett vilken del av världen eller vilken reaktortyp som drabbas.

Denna insikt har lett till att samtliga världens kärnkraftföretag i år gått samman i en organisation för kunskaps- och erfarenhetsutbyte, WANO (World Association of Nuclear Operators). Utbytet omfattar inte bara störningar utan också god praxis [9].

En verksamhet som långsiktigt bidrar till en internationellt jämn och hög säkerhetsstandard, är de systematiska bedömningar av enskilda verk som sker både genom IAEA och INPO.

Utvärderingarna görs av särskilt tillsatta, internationella expertgrupper, och omfattar för säkerheten viktiga områden såsom stationsunderhåll, dokumentation, strålskydd, personalkompetens och haveriberedskap.

I Sverige har hittills Barsebäck och Forsmark varit föremål för IAEA-utvärderingar, medan Ringhals och kraftföretagens gemensamma centrum för simulatorutbildning granskats av INPO.

De internationella organisationerna för erfarenhetsutbyte har nyligen enats om ett antal "godhetstal" för driften av kärnkraftverk. Bland dessa godhetstal är drifttillgänglighet, frekvensen av oplanerade snabbstopp och stråldoser till personalen.

Även om varje storhet för sig inte tillåter några slutsatser om en anläggningens säkerhet, torde genomgående bra resultat i fråga om godhetstalen vara en stark indikation på att verket är välskött från säkerhetssynpunkt.

Omvänt skapar den internationella rapporteringen av driftgodhetstal ett realistiskt mål att eftersträva för de sämre verken. (Fig. 5).

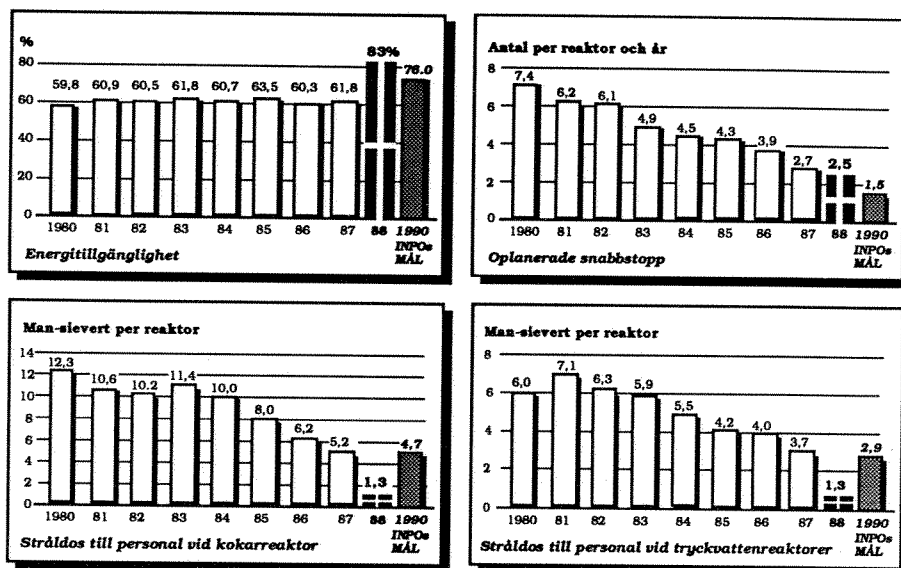


Fig. 5. Utvecklingen mot INPO:s mål av några godhetstal för reaktordrift i USA. Som jämförelse ges motsvarande svenska värden för 1988.

Omprovning av verkens tekniska livslängd

De kraftigt stigande kostnaderna för nya elproduktionsanläggningar och de skärpta kraven och begränsningarna för fossilkraft har aktualiserat frågan hur länge de nuvarande kärnkraftverken kan drivas med bibehållen säkerhet och ekonomi [10].

De förändrade ekonomiska villkoren har gjort att betydligt större summor nu kan läggas ner på anläggningarnas underhåll utan att lönsamheten går förlorad. Ett exempel är att dåligt fungerande ånggeneratorer i tryckvattenreaktorer idag byts ut nära nog rutinmässigt.

I själva verket är det ytterst få komponenter som bedöms som icke-utbytbara, och som därför blir begränsande för anläggningarnas livslängd.

Eftersom de ekonomiska och tekniska förutsättningarna hinner förändras betydligt under de tidrymder det är fråga om, måste livslängdsprognoserna kontinuerligt tas under omprovning. Tillgången på reservdelar kan t ex bli en begränsande faktor.

I USA påbörjades 1985 projektet "Light Water Reactor Plant Lifetime Extension Program", som genomförs i samarbete mellan energidepartementet (DOE) och kraftföretagen. Syftet är att fram till 1993 ha tagit fram underlag för att bedöma om den nuvarande licenstiden, 40 år, kan förlängas.

I en delrapport 1987 drog man slutsatsen att inga avgörande ("major") hinder föreligger för att driva kärnkraftverk "väsentligt längre" än den ursprungligen förutsedda tiden. Man räknar nu med att redan fram till 1991 utarbeta två "pilot-ansökningar" om licensförlängning.

I Frankrike initierades 1985 ett liknande, 4-årigt projekt, i syfte att tekniskt-ekonomiskt optimera lättvattenreaktorens livslängd. Grundförutsättningen för projektet var att livslängden ligger mellan 25 år (= avskrivningstiden) och 50 år (bortom vilken gräns bedömningar inte betraktas som meningsfulla).

1987 hade man kommit fram till att det inom den angivna ramen inte finns någon praktisk begränsning av livslängden för reaktortank och inneslutning. Andra stora komponenter, såsom ånggeneratorer, kan behöva bytas ut under ett kraftverks livstid, vilket är tekniskt och ekonomiskt möjligt.

Den ursprungligen antagna tekniska livslängden i Frankrike - 30 år - har nu officiellt reviderats till 40 år.

I Storbritannien gav regeringen 1987 klarsignal för en övergång från grafitmodererade koldioxidkylda reaktorer till lättvattenreaktorer av tryckvattentyp.

I den omfattande statliga utredning som föregick beslutet och som hade direktiv att belysa såväl de säkerhetstekniska som de ekonomiska aspekterna,

bedömdes den tekniska livstiden bli 40 år.

Nya generationer av kärnkraftverk

Kärnkraften utgör idag den enda kommersiellt mogna elproduktionsteknik som i nämnvärd omfattning kan avlösa fossilkraften vid fortsatt global elutbyggnad. Det pågår därför internationellt ett omfattande utvecklingsarbete för att underlätta framtida utbyggnad.

Det finns för närvarande två parallella utvecklingslinjer, den "evolutionära" och den "revolutionära".

Den förra bygger i hög grad på dagens lättvattenreaktorer och den långa erfarenheten från dessa.

Den "evolutionära" linjen

Nya kärnkraftverk enligt denna linje kan byggas utan demonstrationsanläggningar som mellanled. De skall uppfylla de internationellt vedertagna säkerhetskraven för nya anläggningar. Exempel på sådana krav är att sannolikheten för stor härdskada är mindre än 1:100 000 driftår och att en omgivningsolycka med sannolikhet större än 1:1 miljon driftår inte ger stråldoser över 250 mSv på 800 meters avstånd.

Samtidigt eftersträvas enklare skötsel, kortare byggtider och lägre tillverkningskostnader. Detta skall uppnås via ändamålsenliga systemlösningar, tåliga konstruktioner, ny material- och regler-teknik och mindre operatörsberoende genom högre grad av automatisering. Man eftersträvar också bättre utnyttjande av uranet.

Sådana konstruktioner för både tryckvatten- och kokarreaktorer finns framtagna av reaktortillverkare i olika länder [5], [11], [12]. Samarbete mellan USA och Japan har till exempel resulterat i två versioner av en 1300 MWe-reaktor.

Tryckvattenversionen, APWR, har utarbetats av Mitsubishi och Westinghouse. Inga beställningar föreligger idag. Kokarversionen, ABWR, bakom vilken står General Electric och Hitachi/Toshiba, skall börja byggas i två exemplar av Tokyo Electric Power Company så snart den japanska licensieringsprocessen avslutats 1992. Samtidigt håller amerikanska tillsynsmyndigheten NRC på att ta ställning till om dessa reaktorer kan licensieras i USA.

Det skall påpekas att flera av de innovationer som ingår i den avancerade amerikansk-japanska kokarkonstruktionen, redan finns i de nyare svenska kokarreaktorerna, till exempel interna huvudcirkulationspumpar, finreglerande styrtavar, och den automatik som möjliggör den så kallade 30-minutersregeln.

Projekt för vidareutveckling av nuvarande lättvattenreaktorer bedrivs också i Frankrike och Västtyskland. De fyra stora tryckvattenreaktorer av westinghousetyp som för närvarande byggs eller planeras i Storbritannien, utgör även de en vidareutveckling, framför allt i säkerhets-hänseende.

Av speciellt svenskt intresse är utvecklingsprojektet "BWR 90", som ABB bedriver i samarbete med finska TVO [11]. Två versioner studeras: 750 och 1000 MWe. Bland annat har reaktorslutningen fått en ny utformning som ökar dess förmåga att motstå en härds-mälta, och den nya lay-outen underlättar stationsunderhållet. Byggnadsvoly-men minskar med ca 150 000 m³ i förhållande till nuvarande verk. Byggtiden skall komma ned till ca 4½ år.

Sovjetunionen offentliggjorde 1988 planer på nya generationer av tryckvattenreaktorer, som är en vidareutveckling av befintliga VVER-1000 [13]. Målet är att minska sannolikheten för härds-mälta från nuvarande 1:1000 - 1:10 000 till 1:100 000 per driftår. Detta tillsammans med förbättringar av inneslutningen beräknas ge en risk för stora utsläpp på 1:1 miljon - 1:10 miljoner driftår.

Bland de nya säkerhetsdetaljerna är passiva system för tillförsel av borsyra och för resteffektkylning, en "härdfångare" i form av en vattenbassäng under reaktortanken, samt system för filtrerad tryckavlastning av inneslutningen. Den modifierade VVER-konstruktionen har fått beteckningen VVER-88. De första beställningarna väntas ske 1990.

Den "revolutionära" linjen

Parallellt med den "evolutionära" linjen drivs i många länder den "revolutionära", dvs utveckling av konstruktioner som väsentligt skiljer sig från de nuvarande. Grundtanken är att om opinionen skall kunna vinnas för kärnkraft, måste säkerhetsprinciperna bli lättare att genomskåda för lekmän.

Detta innebär att svåra olyckor

omöjliggörs av naturlagar snarare än av tekniskt komplicerade säkerhetssystem. Man utnyttjar till exempel naturlig cirkulation, tyngdkraften, gasexpansion och inbyggda värmesänkor.

Tendensen är i detta fall mot mindre aggregatstorlekar. Detta är delvis framtvingat av de "passiva" säkerhetssystemen, men det möjliggör samtidigt en smidigare anpassning till en långsamt växande elmarknad.

Storskalighetens ekonomiska fördelar tros bli mer än kompenserade genom enklare system, långtgående standardisering och modultillverkning. Det senare kan vara en säkerhetsmässig fördel, då mycket av kvalitetskontrollen flyttas från byggsplatsen till tillverkaren.

Nedanstående tabell visar hur antalet mekaniska komponenter i en kokarreaktor kan minskas vid övergång från en konventionell till en "passiv" typ [13].

Komponenttyp	Antal	
	Konv. BWR	Passiv BWR
Pumpar	41	11
Ventiler	204	171
Fläktar	30	6
Säkerhetsklassade pumpar och ventiler	185	136

I ett projekt som bekostas gemensamt av EPRI (amerikanska kraftindustrins utvecklingsinstitut) och det federala energidepartementet DOE, utarbetas nu kravspecifikationer för en passiv lättvattenreaktor på 600 MWe, i både PWR- och BWR-utförande.

Man räknar med ett principiellt ställningstagande från tillsynsmyndigheten att en anläggning enligt dessa specifikationer tillfredsställer myndighetens säkerhetskrav. Arbetet med specifikationerna väntas vara slutfört 1990.

Även för dessa reaktorer anser man att erfarenheten från tidigare lättvattenreaktorer är tillräckligt relevant för att en demonstrationsanläggning blir obehövlig.

Genom EPRI deltar kraftföretag från Frankrike, Italien, Nederländerna, Japan, Korea och Taiwan i projektet.

I februari i år begärde USAs energidepartement (DOE) in offerter på en detaljkonstruktion till en "förenklad passiv lättvattenreaktor" på 600 MWe [15]. Det vinnande projektet skall finansieras gemensamt av leverantören och DOE, som åtar sig halva kostnaden, dock högst 50 M\$. Projektet skall

vara avslutat 1995.

Offerter har lämnats av de båda stora amerikanska reaktorleverantörerna General Electric (med Simplified Boiling Water Reactor) och Westinghouse (AP 600) samt ett brittisk-amerikanskt konsortium (Safe Integral Reactor) och ABB (Process Inherent Ultimate Safety Reactor, PIUS).

Också Sovjetunionen har tillkännagit planer på en starkt förenklad, "passiv" tryckvattenreaktor (typbeteckning VVER-92), som skall börja byggas i slutet på 1990-talet [13].

PIUS

Den redan nämnda PIUS-reaktorn, som utvecklats av ASEA-Atom/ABB, är ett av flera fundamentalt annorlunda reaktorkoncept som tilldrar sig internationellt intresse. Reaktorn är nedsänkt i en stor betongbassäng med borhaltigt vatten. Reaktorvattnet är vid normal drift skilt från borvattnet genom det termohydrauliska jämviktstryck som upprätthålls av kylvattenflödet.

Om balansen mellan kylning och värmeutveckling störs, rubbas jämvikten så att borvatten automatiskt strömmar in i reaktorhärden och släcker kedjereaktionen. Resteffekten kylvats bort genom naturlig cirkulation. Något mänskligt ingripande krävs inte på flera dygn. Olika versioner av PIUS utvecklas i samarbete med FoU-organisationer i USA och Japan [11].

Högtemperaturreaktorer

Ett annat koncept med internationellt engagemang är den modulära högtemperaturreaktorn (MHTR). Grundprincipen har funnits sedan 1960-talet. Den är att metalliska material i härden ersätts med keramiska, vilket gör att reaktorn klarar mycket höga temperaturer. Detta möjliggör i sin tur hög verkningsgrad vid elproduktion och dessutom ett nytt användningsområde: produktion av högtemperaturvärme för kemiska processer, såsom kolförgasning och vätgasframställning.

Moderatorn i högtemperaturreaktorn är grafit, och kylmedlet den kemiskt helt inaktiva gasen helium. Bränslet, i form av keramiska uran- eller toriumföreningar, består av små korn (0.4 mm) som är belagda med tätande skikt av pyrolytiskt kol och kiselkarbid. Dessa beläggning ersätter de metalliska

kapslingsrören i en konventionell reaktor. De belagda kornen pressas in i grafitmatriser, antingen prismatiska (USA, Japan) eller i form av kulor (Västtyskland, Sovjet), som kylvats av förbiströmmande heliumgas.

Kraftreaktorprototyper av detta slag har länge varit i drift i Storbritannien, USA och Västtyskland. Reaktortekniken har varit mycket framgångsrik. Svårigheter har (i USA) uppstått i den konventionella anläggningsdelen (heliumfläktarna). Som udda företeelse i de dominerande lättvattenreaktorprogrammen har HTR dessutom krävt en oproportionerligt stor insats i fråga om bränsle- och avfallshantering.

Det förnyade internationella intresset för HTR gäller små enheter för process- och kraftvärme samt kondenskraft för små nät [5], [12]. Modulstorlekar på omkring 200 MW värmeeffekt förutses.

Sådana enheter har mycket goda passiva säkerhetsegenskaper. Vid kylmedelsförlust avbryts kedjereaktionen automatiskt genom den starkt negativa temperaturkoefficienten, och temperaturen begränsas genom naturliga processer (värmeledning och -strålning) till värden där bränslet förblir intakt.

Pilotprojekt planeras i USA, Japan (prototyp driftklar 1994) samt Västtyskland och Sovjet i samarbete.

Bridreaktorer och konverterar

Den snabba, natriumkylda bridreaktorn är ett av de äldsta reaktorkoncepten. Dess stora fördel är att nästan allt uran kan klyvas antingen direkt som uran-235 eller indirekt som plutonium. Bridreaktorn tillåter ett ca 70-procentigt utnyttjande av uranråvaran, mot ca 2% i lättvattenreaktorer. Detta gör att urankostnaden i bridreaktorerna blir av helt underordnad betydelse, vilket i sin tur leder till att också låghaltiga uranfyndigheter kan räknas in i resursbilden.

Kraftproducerande bridreaktorprototyper har länge funnits i flera länder (Frankrike, Storbritannien, Sovjet, USA). En fullskaleanläggning på 1200 MWe, "Superphénix", som ägs av flera europeiska kraftföretag, är nu i drift i Frankrike.

Säkerhetsanalyserna, baserade på experiment och erfarenhet, visar att den snabba bridern säkerhetsmässigt är jämförbar med lättvattenreaktorerna.

På grund av höga kapital- och bränslecykelkostnader blir emellertid bridern konkurrenskraftig i förhållande till dessa först vid väsentligt högre uranpriser än de nuvarande.

Något kommersiellt genombrott väntas inte förrän in på 2000-talet. I framför allt Västtyskland har politiskt motstånd för lamslagit det nationella utvecklingsprogrammet. I Storbritannien förbereds en kraftig nedskärning av statsfinansiella skäl.

I Västeuropa är ansträngningarna därför inriktade på att genom internationellt samarbete förhindra att kompetensen och erfarenheten går förlorad [5]. 1987 initierade en sammanslutning av europeiska kraftbolag, European Fast Reactor Utility Group (EFRUG), ett samgående om en konstruktion, European Fast Reactor, på ca 1500 MWe.

Målet är att reaktorn skall vara licensierbar i samtliga deltagande länder. Den skall i hög grad bygga på erfarenheten från Superphénix. Konstruktionsarbetet beräknas ta omkring 3 år. Parallellt skall licensierings- och förläggningsfrågan om möjligt lösas, så att reaktorn kan tas i drift omkring sekelskiftet. Den skall då ligga till grund för en utvärdering av marknadspotentialen under 2000-talet.

Japans statliga Atomenergikommission godkände 1988 en tioårsplan för fortsatt utveckling av snabba bridreaktorer. Prototypanläggningen Monju på 280 MWe skall enligt planerna tas i drift 1992. I mitten på 90-talet skall en demonstrationsanläggning på 1000 MWe påbörjas.

Sovjetunionen har nu två snabba bridreaktorer, Shevtjenko på 350 MWe (i drift sedan 1973) och Belozarskiy-3 på 600 MWe (1981). Ännu ett aggregat, på 800 MWe, väntas bli driftklart 1993. I policyuttalanden nyligen har man bundit sig för fortsatt satsning på bridreakorteknologin.

I USA arbetar man med två mera okonventionella och långsiktiga utvecklingskoncept [12]. Det ena, Power Reactor Inherently Safe Module (PRISM), som tagits fram av General Electric i samarbete med Argonne National Laboratory och med stöd från energiministeriet DOE, utgörs av kombinerbara moduler om 155 MWe. Varje modul är av bassängtyp, med integrerade mellanvärmexlars. Reaktorn har inneboen-

de stabilitet och utnyttjar passiv resteffektkylning.

Bränslet är en nyutvecklad metalllegering, som man hoppas blir ekonomiskt överlägsen det konventionella oxidbränslet. - Den relativa lättheten att tillverka och upparbeta metallbränsle ligger till grund för det andra amerikanska utvecklingsprojektet, Integral Fast Reactor (IFR). Det innebär en samlokalisering av reaktorer av PRISM-typ med bränslefabrik och upparbetningsanläggning.

Plutonium skulle därmed inte behöva lämna anläggningen. Några konkreta planer på briterkraftverk föreligger inte i USA.

Särskilt inom EG pågår visst utvecklingsarbete på en s k konverter (High Conversion Reactor) som ett mellanled mellan den lättvattenmodererade reaktorn och den snabba bridern. HCR bygger till 95% på tryckvattenreakorteknologi men skiljer sig från PWR genom en mycket kompaktare härd. Uranutnyttningen skulle kunna bli 4 gånger bättre än i en konventionell lättvattenreaktor [5].

Sammanfattning

Den nuvarande generationen kärnkraftverk, som domineras av lättvattenreaktorer (PWR, BWR) men också omfattar vissa nationella sidolinjer som tungvattenreaktorn (bl a Kanada, Rumänien, Indien) och den grafitmodererade koldioxidkylda reaktorn AGR (Storbritannien), har under 80-talet samlat betydande och i huvudsak positiv erfarenhet.

Säkerheten har förbättrats, de principiella säkerhetsfrågorna är lösta, men den individuella säkerhetsstandarden varierar fortfarande kraftigt mellan olika verk. Målet är nu en enhetligt hög internationell standard. Ett av medlen är ökat globalt samarbete.

Efter en tid av elöverskott i många länder kommer behovet av nya kraftverk att öka i mitten på 1990-talet. Samtidigt förutses restriktioner i fråga om fossilkraft. På kärnkraftsidan möter man denna situation dels genom att bättre utnyttja befintliga anläggningar, dels genom att lansera en andra generation av kärnkraftverk, där man angripit de acceptans- och kostnadsproblem som bidragit till att bromsa utbyggnaden.

Den nya generationen bygger på vunnit erfarenhet, och karakteriseras

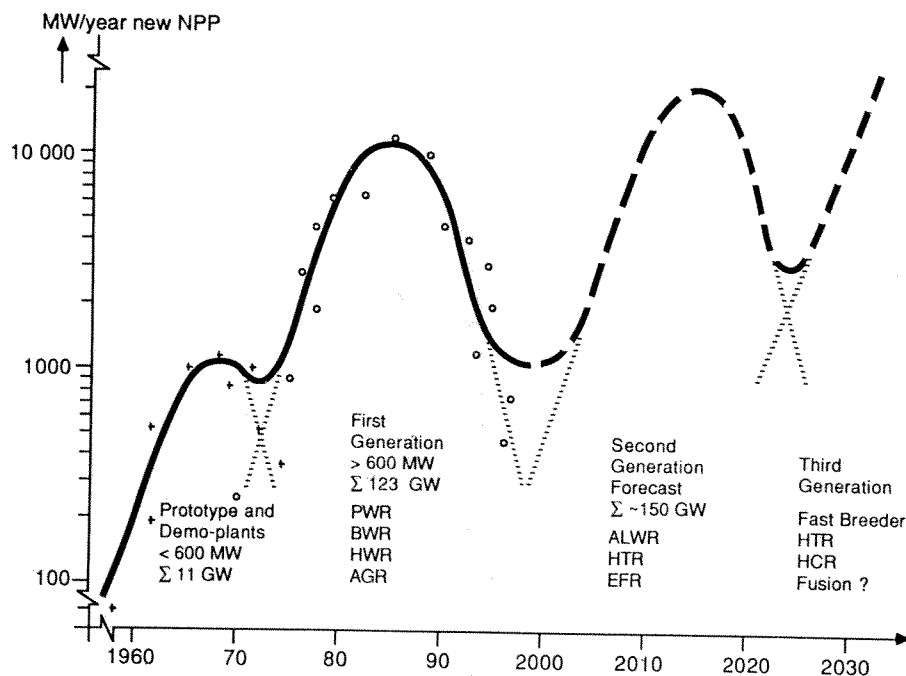


Fig. 6. Historiska och förutsedda utvecklingsfaser för kärnkraften inom EG. Källa: Prof. Dr-ing H. Frewer [5]

framför allt av förenklingar, standardisering och passiv säkerhet. Den kan komma att introduceras i mitten av 1990-talet i Västeuropa, USA, Japan och Sovjetunionen (se fig. 6 ovan).

Samtidigt pågår utveckling av och kompetensuppbyggnad för en tredje generation, som kan ta vid när uranpriserna drivs i höjden. Denna generation omfattar extremt bränslesnåla reaktorer av lättvatten- och HTR-typ (s k konverterar), och framför allt den snabba bridreaktorn.

Dessa koncept är i stor utsträckning tekniskt och säkerhetsmässigt prövade, men väntas inte nå kommersiell mognad förrän något årtionde in på nästa sekel.

Evelyn Sokolowski

Analysgruppen

Göran Apelqvist, Utveckling/Miljö, Vattenfall
Ingemar Lindholm, Sv Kärnbränslehantering AB
Anders Pechan, red sekr
Agneta Rising, Vattenfall, Ringhalsverket
Evelyn Sokolowski, KSU
Lars Thuring, Sydkraft
Gunnar Walinder, Patologi/risikoforskning S L U
Carl-Erik Wikdahl, Energiforum AB

Litteratur

- [1] United States General Accounting Office: "Electricity Supply - What Can be Done to Revive the Nuclear Option?" GAO/RCED-89-67, mars 1989.
- [2] Nucl. Engineering Internat'l, april 1989. (Även Nytt inom Kärnkraften nr 52).
- [3] Nucleonics Week, 15 okt. 1987.
- [4] Atomwirtschaft, mars 1989. (Även Nytt inom Kärnkraften nr 52).
- [5] H. Frewer: "Future Challenges of Nuclear Power in the European Community". Gästföreläsning vid European Nuclear Societys årsmöte 7 juli 1989. (Skall publiceras i Nuclear Europe).
- [6] "Rysk självvranssakan efter Tjernobyl". KSU Bakgrund nr 8, nov. 1988.
- [7] Nucleonics Week, 8 okt. 1987. (Även Nytt inom Kärnkraften nr 45).
- [8] "Säkerhetsfiltret". KSU Bakgrund nr 9, nov. 1988.
- [9] "Gränsöverskridande samarbete". KSU Bakgrund nr 3, maj 1989.
- [10] "Teknisk livslängd". KSU Bakgrund nr 4, april 1988.
- [11] L. Fogelström: "Utvecklingen inom lättvattenreaktorområdet". Mekanisten 1989:1.
- [12] John J. Taylor: "Improved and Safer Nuclear Power". Science, vol. 244, 21 april 1989.
- [13] Nucl. Engineering Internat'l, nov. 1988. (Även Nytt inom Kärnkraften nr 50).