

Sven Winnell 17 maj 2015:
Svensk elförsörjning i framtiden – en fråga
med globala dimensioner. En tvärveten-
skaplig rapport från Uppsala universitet

<http://winnell.com/omr36-39zzzc.pdf>

En avskrift från

Institutionen för fysik och astronomi vid Uppsala universitet. [Hem](#)

[Rapport 2014 - Svensk elförsörjning i framtiden \(PDF\)](#)

[Environmental and health impacts of a policy to phase out nuclear power in Sweden](#)

Skapad 2014-09-10 11:56.

Senast uppdaterad 2015-05-13 10:26.

Ansvarig: Anna Davour

Svensk elförsörjning i framtiden **– en fråga med globala dimensioner. En tvärvetenskaplig rapport från Uppsala universitet**

Sammanfattning

Många av de viktigaste politiska frågorna hänger ihop med energi och elförsörjning – det handlar om klimatet och miljön och om förutsättningarna för industri, sysselsättning och välfärd. De här frågorna är till sin natur inte heller begränsade till ett enskilt land, utan behöver sättas in i de globala sammanhangen.

Denna rapport från Uppsala universitet som presenteras här riktar sig till beslutsfattare, forskare och den intresserade allmänheten. Den är avsedd att:

- * skapa en plattform på vetenskaplig grund för diskussion om svensk energiförsörjning
- * peka på vikten av akademisk forskning och tvärvetenskapligt samarbete när det gäller energiteknologi
- * utgöra en byggsten i Sveriges bidrag i det internationella klimatarbetet.

Sverige har för närvarande en god och stabil elproduktion som orsakar mycket små koldioxidutsläpp. Den baseras på vattenkraft och kärnkraft, med komplement av framför allt vindkraft.

Rapporten tar sin utgångspunkt i försiktiga antaganden om vilken teknik som kommer att finnas tillgänglig för elproduktion under kommande decennier. I rapporten diskuteras elförsörjningen utifrån förutsättningen att Sverige även i framtiden kommer att vara ett tungt industrialiserat land, att välfärden ligger kvar på den nuvarande nivån, och att vi även i framtiden vill producera el i Sverige med liten klimatpåverkan.

Ett illustrativt exempel är jämförelsen med Danmark, som förbrukar hälften så mycket elenergi per capita som Sverige. Det står klart att det går att ersätta all kärnkraft i Sverige med en kombination av vindkraft och energibesparingar men vilka blir konsekvenserna? Att väsentliga delar av den svenska tunga industrin då måste övergå till fossila bränslen eller avvecklas? I bägge fallen innebär det att utsläppen av växthusgaser kommer att öka globalt.

En av slutsatserna i rapporten är att kärnkraften har varit starkt bidragande till att Sverige internationellt sett släpper ut mycket små mängder koldioxid för sin elproduktion. Rapporten innehåller därför ett scenario för att hushålla ansvarsfullt med naturtillgångarna, bland annat genom att dra nytta av det som idag är kärnavfall. Scenariot bygger på att utnyttja dagens kärnkraftteknik i kombination med att gradvis införa en ny generation kärnkraftssystem i mitten av seklet. Då ges också andra elproduktionssätt tid att mogna innan kärnkraften eventuellt fasas ut.

Den globala dimensionen är viktig och i rapporten konstateras att den utbyggnadstakt av fossilfri elproduktion som krävs för att uppnå tvågradersmålet kan möjliggöras med hjälp av kärnkraft.

Rapportens kärna är en diskuterande text som sätter energifrågorna i perspektiv: historiskt, globalt och nationellt. Dessutom berörs universitetens och forskningens roll. En uppsättning utförliga appendix ger fakta och data om olika aspekter av elproduktion, energi, kärnkraft och relaterade frågor om säkerhet, opinion och samhälle.

Inledning

Knappast någon samhällsfråga har debatterats så intensivt och så länge som energiförsörjningen i landet. Tyvärr har denna fråga i allt mindre utsträckning präglat dagens politiska debatt. Trots den framåtsyftande karaktär frågan har ges det framtida samhället och dess behov av energi med andra ord liten uppmärksamhet i denna centrala debatt. Även den historik och de förutsättningar som skapat en internationellt sett hög välfärdsnivå i Sverige ägnas i allmänhet alltför litet intresse i diskussionen. I debatten kring energiförsörjningen finns numera även en global dimension i och med klimatförändringarna och nödvändigheten av att bygga en global välfärd och tillväxt för att motverka fattigdom. Denna dimension påverkar i hög grad Sverige och kräver adekvat diskussion. Debatten kring energiförsörjningen saknar alltså viktiga komponenter för att möjliggöra skapandet av en rationell plattform som kan stödja svåra politiska beslut inför framtiden. Föreliggande tvärvetenskapliga rapport pekar på vikten av att en allomfattande analys av frågeställningen genomförs men rapporten i sig föreslås även utgöra en startpunkt för ett mer djuplodande arbete. Som vi ser det krävs bidrag från flera vetenskapliga discipliner för att möjliggöra en utökad dialog kring dessa centrala framtidsfrågor.

Vilka energikällor kommer Sverige att behöva använda i det medellånga och långa perspektivet? Svaret beror naturligtvis på vilka teknologiska framsteg som kommer att göras, vilken energipolitik som väljs och hur samhället och näringslivets energibehov kommer att utvecklas. Vi menar att det är olyckligt att den nutida energidebatten inte i högre grad ställer besvärliga och kontroversiella frågor om vårt beroende av olika energikällor. Vi vill särskilt uppmana till en intensifierad politisk debatt i valrörelsen. Vi börjar se fler politiska partier ta tydlig ställning, men debatten behöver fokuseras kring ett antal mycket komplexa och svåra frågor. Även FN:s klimatrappporter skulle behöva diskuteras och analyseras betydligt mer ingående i Sverige. Förhoppningsvis kan denna rapport bidra till just en sådan debatt.

Då flera av författarna till denna rapport under lång tid fördjupat sig i olika aspekter av kärnkraftens teknik och utveckling, finns det skäl att nämna en sak redan inledningsvis. Vid sidan av sina förtjänster är vi fullt medvetna om att dagens kärnkraftteknologi, liksom all teknologi, är behäftad med såväl upplevda som faktiska problem och ingen av de medverkande i denna rapport har anledning att förhålla sig odelat positiv till kärnkraften som den ser ut idag. Dock, i ljuset av de monumentala problem mänskligheten står inför, är det vår uppfattning att alla seriösa analyser om framtiden även måste inkludera kärnkraften som en möjlig källa till nyttig energi om det uppsatta målet om maximalt två grader global temperaturhöjning skall nås. Detta är för övrigt skälet till att vi i analysen utesluter fossil kraft i landet som ett möjligt scenario. Vi noterar vidare de framsteg som vi kan se när det gäller förnyelsebara energikällor. Dessa kommer att behövas i den framtida energimixen men vi ifrågasätter deras förmåga att ensamma utgöra den bas på vilken världen i framtiden kommer att energiförsörja sig.

Hur ser framtiden ut? Det finns flera goda skäl till att vara synnerligen försiktig med förutsägelser, särskilt inom energiområdet. Ett aktuellt exempel som nyligen diskuterades i en bilaga till den kommande långtidsutredningen av professor Lars Bergman, illustrerar detta väl. De senaste årens revolution i produktionen av ”fracking” olja och gas har snabbt förändrat spelreglerna och strukturen på den globala energi-marknaden. I och för sig innebär detta möjligen ett något bättre alternativ än kol, men samtidigt kan de stora miljöriskerna inte förringas. Två ekonomer, Radetzki och Aguilera, har nyligen [1] belyst denna snabba utveckling i tidskriften *Ekonomisk Debatt* och intar en mycket positiv hållning till dessa energikällor. Denna utveckling påverkar naturligtvis prisbildningen för olja/gas jämfört med kärnkraft på ett sätt som ingen kunde föreställa sig för fem år sedan.

Några debattörer, som exempelvis Åsa Moberg, har hävdats att de ekonomiska kalkylerna för kärnkraft har försämrats under senare tid [2]. Å andra sidan, som framgår av ett arbete [3], är kostnadsbildningen av olika energikällor synnerligen komplex och det går inte att på ett tydligt sätt jämföra kostnaderna. Sammantaget innebär emellertid detta att vi inte kan blunda för frågan om var Sverige kommer att befinna sig inom energiområdet i framtiden, med särskild hänsyn till kärnkraften. Utifrån några olika framskrivningar [4] har Energimyndighetens prognoser visat på ett fortsatt beroende av kärnkraft. Om ett antal år kommer fortfarande knappt hälften av elenergin komma från kärnkraften. Målsättningen att öka energiuttaget vid kärnkraftverken har varit en viktig utgångspunkt för dessa prognosberäkningar. Å andra sidan har vi sett exempel de senaste åren där kärnkraftsolyckan i Japan ledde till det tyska beslutet att stoppa kärnkraften, något som inte ingått i tidigare prognoser.

Det är givetvis inte en lätt uppgift att förutsäga hur det framtida samhället kommer att gestalta sig och särskilt inte utgående från en visionär ståndpunkt som lätt kan urarta i ren spekulering med liten verkanshöjd som följd. I denna rapport har vi därför valt att utgå från rådande omständigheter och de erfarenheter som har vunnits såväl nationellt som internationellt och därifrån analyserat hur det framtida samhället kan påverkas av det vi faktiskt vet idag. Vi har vidare utgått från att svenskarna även i framtiden kommer att värdesätta en hög välfärdsnivå och att denna, liksom idag, i stor utsträckning baseras på produktionen inom exportsektorn. Denna ansats förstärker ytterligare de globala dimensionerna i frågeställningen och vi vill särskilt lyfta det faktum att Sveriges elproduktion, med dess stora inslag av vatten- och kärnkraft, medför minimala utsläpp av växthusgaser. Detta förhållande öppnar upp för en diskussion om hur konkurrenskraft gentemot omvärlden kan och sannolikt bör definieras för att Sverige på ett effektivt sätt ska kunna agera internationellt i kampen mot klimatförändringen och i övrigt fungera som föredöme för en klimatneutral industriproduktion i framförallt utvecklingsländerna. Att kunna öka konkurrenskraften för svensk exportindustri, understödd av vår klimatneutrala elproduktion, berörs därför i rapporten som en intressant möjlighet för det svenska samhället att utveckla i framtiden och som bör utredas närmare i fortsatta arbeten.

I rapporten har vi genomgående arbetat med konservativa uppskattningar. Exempelvis har vi uppskattat det framtida elbehovet fram till 2050 utifrån förutsättningen att svensk exportindustri har en lika stor andel av världsmarknaden som idag, vilket av ovan nämnda skäl kan vara en underskattning. Å andra sidan kan energibehovet komma att minska om man i framtiden väljer eller tvingas att sänka välfärdsnivån men här har vi alltså valt utgångspunkten att det svenska välfärdssamhället består på lägst nuvarande nivå.

Uppsala 2014-06-25

Fil. Dr. Anna Davour, tillämpad kärnfysik

Tekn. Dr. Sophie Grape, tillämpad kärnfysik

Tekn. Dr. Carl Hellesen, tillämpad kärnfysik

Professor Ane Håkansson, tillämpad kärnfysik

Tekn. Dr. Mattias Lantz, tillämpad kärnfysik

Professor Jan Ottosson, ekonomisk historia

Professor Stephan Pomp, tillämpad kärnfysik

Fil. Dr. Staffan Qvist, tillämpad kärnfysik

Universitetslektor Mikael Höök, naturresurser
och hållbar utveckling

Syften och utgångspunkter

Rapportens syften är att:

- 1) Utifrån vedertagna vetenskapliga principer skapa en rationell plattform för den fortsatta energidiskussionen i landet.
- 2) Uppmana till att förutsättningar för akademisk forskning och analys inom energiteknologi och dess koppling till samhällsvetenskaperna kommer till stånd.
- 3) Från punkt 2) skapa en intellektuell bas för Sverige att bidra effektivt i det internationella arbetet att bekämpa klimatförändringen.

I arbetet som redovisas i rapporten har följande utgångspunkter använts:

- 1) All elproduktion i landet skall framgent ske på ett sätt som minimerar *klimatbelastningen* såväl nationellt som internationellt.

- 2) All elproduktion i landet skall framgent ske på ett sätt som minimerar *miljöbelastningen* såväl nationellt som internationellt.

Ovanstående två utgångspunkter måste anses som rimliga då de står i samklang med såväl nationell lagstiftning som internationell konsensus.

- 3) Sveriges välfärd kommer i framtiden att vara på minst nuvarande nivå. Även denna utgångspunkt måste betraktas som rimlig då den kopplar till att de mänskliga behoven (och önskemålen) av vård, skola, omsorg och offentlig service knappast kommer att minska med tiden utan snarare att öka i takt med en större befolkning och en större andel äldre i samhället.

- 4) Exportintäkternas andel av Sveriges BNP kommer under överskådlig tid att befinna sig på minst nuvarande nivå och baseras på industriell verksamhet.

Denna utgångspunkt kan möjligen uppfattas som politisk men vi menar att en ökad satsning på exportindustri, driven av klimatneutral elproduktion, kan skapa goda förutsättningar för att öka den svenska konkurrenskraften och samtidigt utgöra ett föredöme för omvärlden hur tung exportindustri kan bedrivas på ett sätt som står i samklang med såväl miljö- som klimatmål.

Utöver dessa utgångspunkter har följande fyra principer legat till grund för slutsatserna i rapporten:

- a) Den betraktade teknologin ska antingen vara fullt tillgänglig idag eller vara i ett utvecklingsstadium där stor *kommersiell potential*

förväntas. Alltså, inga inteckningar i vad möjlig framtida teknologi eventuellt kan åstadkomma har gjorts.

b) Oavsett teknologi skall inga *stadigvarande* ekonomiska eller andra subventioner belasta framtida generationer människor.

c) Använd teknologi ska betraktas som överbryggande tills annan, mer effektiv teknik har nått *kommersiell* mognad.

d) Vi, dagens människor, skall ge framtida generationer människor *maximal frihet* att själva bestämma på vilket sätt man vill ordna sin energiförsörjning.

Energi

Fram till industrialiseringen var det muskel-, vatten och vindkraft som utgjorde basen för den mänskliga energianvändningen. I tabell 1 visas hur den uppskattade energibalansen såg ut i Europa före industrialiseringen.

Tabell 1. *Energibalansen före industrialiseringen av Europa [5].*

Kraftkälla	Tillgänglig kapacitet (MW)	Ungefärlig andel %
Hästar, oxar etc	7500	50
Ved	3000-4000	25
Vatten	1000-2000	12
Människor	750	5
Väderkvarnar	350	2
Segeldrift	200	1

Från tabell 1 kan man dra slutsatsen att ca 15 GW "installerad" effekt fanns tillgänglig vid denna tid. Iakttagelsen leder till slutsatsen att man förr hade en energikonsumtion per person som normerad till befolknings- och BNP-ökning faktiskt är högre än den är i dagens industriländer. Slutsatsen illustrerar även att nutidens "lågenergiländer" ofta gör av med mycket energi p.g.a. låg verkningsgrad (se Appendix 1) i energisystemet. Exempelvis innebär användandet av en häst att förhållandevis stora odlingsarealer måste avsättas till foderproduktion. Inte minst på grund av att en häst måste ha föda även när den är överksam.

Tekniska landvinningar under den första industriella revolutionen, pådrivna av god tillgång på billig energi, har möjliggjort att människor i allt större utsträckning kunde dra nytta av ett mer effektivt jordbruk. Samtidigt började Sverige träda fram som en industriell nation. Vägen från det fattiga 1800-talets jordbrukssamhälle, via industrisamhällets uppbyggnad till dagens tjänstesamhälle har präglats av en god tillgång till en jämn energiförsörjning, med undantag för kriser i energiförsörjningen som exempelvis under världskriget och oljekriserna. Det svenska exemplet visar dels på elkraftens enorma betydelse för den svenska utvecklingen liksom det snabbt minskade oljeberoendet. En närmare betraktelse av dessa förhållanden redogörs för i Appendix 2.

I debatten talas det ofta om "hållbar" eller "ren" elproduktion. Att begreppet hållbart inte är entydigt och i allmänt svårhanterligt åskådliggörs i Appendix 3. De miljöproblem som all mänsklig aktivitet medför är naturligtvis inte sol- och vindkraft förskonade ifrån, lika lite som kärnkraften. Vad det alltid måste handla om är att i ett övergripande och numera globalt perspektiv minimera miljö- och klimatbelastningen. Exempelvis innebär Tysklands och Danmarks stora satsningar på förnybar produktion även stora klimatutsläpp då den intermittenta

energin måste stödjas av, i dessa länders fall, av en stor andel fossilkraft. Följande siffror är klargörande: Tyskland och Danmark släppte 2010 ut 461 g respektive 360 g koldioxid per producerad kWh el medan det i Sverige genereras ca 30 g koldioxid per producerad kWh [6]. I Appendix 4 finns en redogörelse om status för ett antal europeiska länder beträffande detta (notera att i Appendix 4 redovisas medelvärden mellan åren 2009 och 2011).

Kärnkraften kommer ut väl i livscykelanalyserna [7]. Skälet till det är energibalansen i de processer som ligger till grund för kärnkraften (se appendix 1 och 5). Dagens kärnkraftteknik utnyttjar dock natururanet dåligt. Runt 0,6 % av det uran som bryts används av kärnkraftverken och det väcker frågor kring uthållighet.

Med ny teknik, som den så kallade fjärde generationens kärnkraftssystem (Gen-IV) som beskrivs i Appendix 6, blir uthållighetsdiskussionen snarast akademisk. Gen IV-system används förvisso ännu inte kommersiellt, men det finns tekniskt intressanta lösningar med stor kommersiell potential redan nu och som närmare beskrivs i t.ex. ref. [8]. Att Gen-IV fortfarande har en experimentell prägel beror främst på att incitamentet att kommersiellt införa ett nytt, mer uthålligt kärnkraftssystem ännu är litet då stora investeringar har gjorts i den nuvarande nukleära infrastrukturen. I en framtida global nukleär expansion kan det dock bli en helt annan sak. I en publicerad forskningsöversikt från Statens Kärnavfallsråd [9] är en bedömning att en svensk implementering av Gen IV inte kommer till stånd förrän tidigast i mitten av seklet. Andra bedömningar i översikten talar om en längre tidsperiod.

All teknikanvändning medför såväl operativa risker som risker för missutnyttjande. Kärnkraften har fått sin skärv därvidlag och särskilt

dess koppling till kärnvapen har diskuterats vid flera tillfällen [10]. Låt oss här bara konstatera att det finns delar i kärnkraftssystemet som kan utnyttjas felaktigt och det gäller framförallt anrikningen av natururanet. Av det skälet har världssamfundet infört en omfattande kärnämneskontroll och som kordineras av IAEA (International Atomic Energy Agency) i Wien. I fjärde generationens system finns visserligen ingen anrikning men en kärnämneskontroll kommer ändå att behövas, särskilt om man ser en global utbyggnad av denna teknik. I Appendix 7 presenteras vad kärnämneskontroll är för något och hur den bör anpassas till fjärde generationens kärnkraftssystem.

Utöver ovanstående överväganden måste också de upplevda riskerna med kärnkraften belysas. I Appendix 8 görs en genomgång av hur opinionen har svängt genom åren.

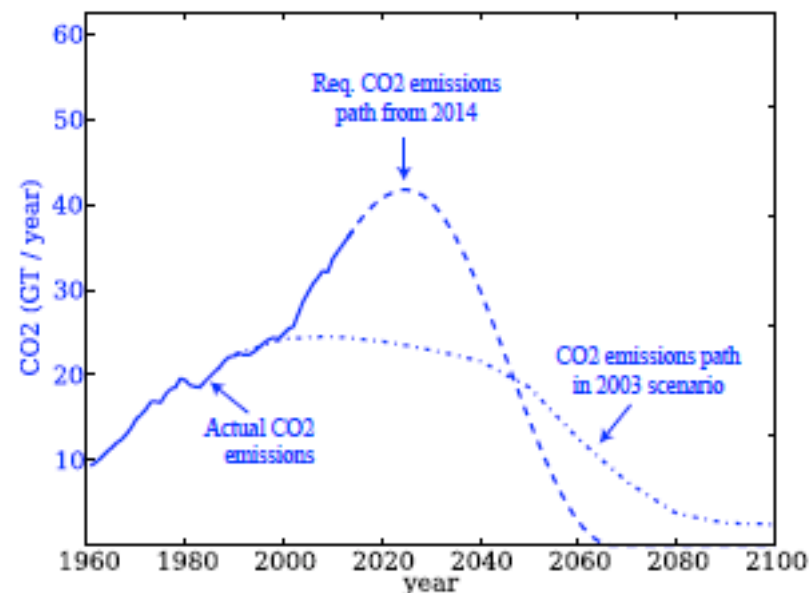
Det globala perspektivet

Klimatfrågan är global; inget land kan ensamt lösa denna globala utmaning, utan det är ett projekt som världen måste lösa gemensamt. Genom Köpenhamnsavtalen beslutade länder ansvariga för 80 % av de samlade CO₂-utsläppen att verka för att begränsa den globala uppvärmningen till maximalt 2 grader Celsius. För att, med en rimlig chans, klara det måste de totala kumulativa CO₂-utsläppen hållas inom 3 700 miljarder ton; en siffra som nyligen fastslogs av FN:s klimatpanel IPCC. Räknas andra växthusgaser in blir de maximalt tillåtna utsläppen något lägre. År 2011 hade 1 900 miljarder ton redan släppts ut, vilket innebär att världen nu har in-tecknat mer än hälften av den tillåtna utsläppsbudgeten. Skulle budgeten överskridas kommer vi sannolikt, enligt idag vedertagen klimatforskning, att missa tvågradersmålet.

För att förstå hur situationen ser ut idag kan det vara illustrativt att backa bandet 17 år till 1997, då Kyotoavtalet skrevs på. Under det året släppte världens länder totalt ut 24 GT CO₂ i atmosfären. Det är förvisso en hög siffra, men det fanns ändå skäl att då vara hoppfull. Hade takten på utsläppen nått ett maximum strax efter millennieskiftet skulle det ha krävts en långsam utfasning av fossila bränslen under första halvan av 2000-talet. Under andra halvan av 2000-talet, när CO₂-snåla tekniker mognat något, kunde utfasningen sedan snabbas på. Den utvecklingen ligger också i linje med de scenarier för framtida energiproduktion som presenterades i början av 2000-talet. Ett sådant scenario, med målet att begränsa koncentrationen av CO₂ i atmosfären till 400 ppm, är illustrerat i figur 1 i de punktstreckade linjerna.

De årliga utsläppen har sedan början av 2000-talet emellertid ökat markant; 2013 låg de på 35 GT. Hur de faktiska utsläppen utvecklats visas i den heldragna linjen i figur 1. Den bana som måste följas för att de kumulativa utsläppen skall hålla sig inom den tillåtna budgeten ser nu drastiskt annorlunda ut än den som gällde när Kyoto-avtalet skrevs under. Kurvan måste nu vända tvärt inom en 10-årsperiod för att sedan sjunka brant (se streckade linjen i figur 1). Kring 2050 måste denna bana ha nått ned ner till ungefär hälften av dagens nivåer.

Vad är det då som ligger bakom denna oroande utveckling? Om man enbart tittar på gruppen höginkomstländer, där Sverige ingår, så är trenden för dessa faktiskt inte helt olik scenariot från 2003 som diskuterades ovan. Effektiviseringar och ett gradvist införande av förnybar energi gör att utsläppen i de flesta länder i den gruppen faktiskt har minskat. Istället kommer de ökande utsläppen nästan uteslutande från världens medelinkomstländer. I Kyotoavtalet var dessa länder undantagna från bindande utsläppsminskningar eftersom utsläppen till största del skedde i höginkomstländer.



Figur 1. Koldioxidutsläpp historiskt och i framtiden. De olika kurvorna förklaras i texten.

Det var ett rimligt synsätt; 1997 utgjorde höginkomstländerna 20 % av världens befolkning, men stod bakom 60 % av CO₂-utsläppen. Man kunde med fog säga att klimatfrågan var ett problem skapat främst av den rika världen.

I takt med att många länder idag tar sig ur fattigdom snabbare än väntat ökar dock det globala energibehovet, och därmed utsläppen, på ett sätt som man inte räknade med för 17 år sedan. Här är det dock viktigt att poängtera att utsläppen från dessa länder, räknat per person, fortfarande är mycket lägre än i höginkomstländerna. Anledningen till genomslaget är att deras samlade befolkning är så pass stor. Men även om den rika världen fortfarande kan anses ha ett moraliskt huvudan-

svar för klimatfrågan går det inte längre att blunda för den samlade bilden. För att hålla de totala utsläppen inom den tillåtna budgeten på 3 700 miljarder ton måste tillväxten i de fattigare delarna av världen tas med när utbyggnaden av CO₂-snål energiproduktion planeras.

Hur fort måste då utbyggnaden gå för att vi ska klara 2-gradersmålet? För att svara på den frågan måste vi veta hur det globala energibehovet kommer att utvecklas under 2000-talet. Idag ligger den totala årliga elproduktionen på knappt 24 000 TWh. Men många talar om en fördubbling av den globala energianvändningen till 2050 och en ännu större ökning av elanvändningen. Anledningen till att elanvändningen förväntas öka snabbare är att tekniker som idag huvudsakligen förses med energi från fossila bränslen, som t.ex. transporter och uppvärmning av hus, till stor del förväntas elektrifieras då de fossila energislagen ska fasas ut.

Sammantaget innebär det att den årliga utbyggnadstakten av CO₂-snål elproduktion, räknat per person, behöver nå nivåer om minst 300 kWh/cap/år. Utslaget på hela världen (7 miljarder människor) blir den efterfrågade utbyggnadstakten runt 150 kWh/cap/år, men man kan knappast förvänta sig att den halvan av jordens befolkning som idag knappast har tillgång till elektricitet inledningsvis ska ta ett lika stort ansvar som de rikare länderna. Därav den högre siffran på 300 kWh/cap/år.

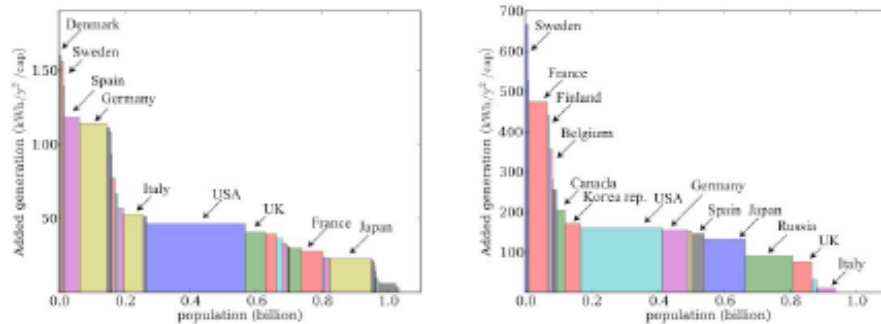
Prognoser över framtida energibehov är alltid behäftade med mycket stora osäkerheter så siffran på 300 kWh/cap/år som anges här skall alltså ses som indikativ för den utbyggnadstakt vi bör sträva mot. Det finns dock inte många tecken på att det globala elbehovet skulle sluta att öka på sikt. Idag har över 3 miljarder människor mycket lite, eller ingen, tillgång till elektricitet. Fram till år 2100 måste vi också räkna in cirka 3 miljarder människor till som ännu inte är födda.

Hur förhåller sig då den nödvändiga utbyggnadstakten av CO₂-snål elproduktion till de historiska erfarenheterna. I figur 2 visas en sammanställning för samtliga länder i höginkomst kategorin. Förnybart visas t.v. och kärnkraft t.h. Höjden på staplarna visar den maximala genomsnittliga utbyggnadstakten per person som varje land lyckats uppnå under en tioårsperiod. Bredden på staplarna visar storleken på landets befolkning under tiden för utbyggnaden. Överlag kan man se att endast ett fåtal länder har lyckats att uthålligt bygga ut CO₂-snål elproduktion i den takt om 300 kWh/cap/år som kan ses som indikativ för vad vi kommer behöva för att klara 2-gradersmålet.

Noterbart är att inga länder som klarat det har gjort det utan hjälp av kärnkraft. Och här ser vi den svenska kärnkraftsutbyggnaden på en ohotad förstaplats med nästan 700 kWh/cap/år. Det första större landet, Frankrike, hamnar på knappt 500 kWh/cap/år. Den genomsnittliga utbyggnadstakten i höginkomstländerna låg på 120 kWh/cap/år och uppnåddes mellan 1982 och 1992.

När det gäller utbyggnad av förnybar elproduktion intar Danmark förstaplatsen med runt 160 kWh/cap/år. Men Danmark är tätt följt av Sverige som uppnått nästan lika hög utbyggnadstakt. Det mest framgångsrika större länderna, Spanien och Tyskland, har uppnått utbyggnadstakter av förnybar elproduktion runt 120 kWh/cap/år.

Vi kan alltså notera att Sverige hamnar i tätposition för utbyggnad av CO₂-snål elproduktion med både kärnkraft och förnybar energi. Just de exceptionella resultaten för det svenska kärnkraftsprogrammet redogörs för i Appendix 9 med en kortfattad historik över hur snabbt Sverige kunde införa stora tillskott av el i vårt nät på relativt kort tid genom en samlad nationell insats. Med den svenska erfarenheten som presenteras i Appendix 9 har vi i vårt analysarbete kunnat uppskatta



Figur 2. Sammanställning av utbyggnadstakten av CO₂-snål elproduktion för samtliga länder i höginkomst kategorin. Förnybart visas t.v. och kärnkraft t.h.

hur lång tid det skulle ta att ersätta världens idag existerande fossilkraft med kärnkraft. Om världen gör en lika snabb implementering av kärnkraft som Sverige ensamt maktade med skulle detta ta runt 25 år [11].

Det ska understrykas att detta resultat baseras på en teknisk implementering och vi är givetvis införstådda med att det finns andra faktorer att ta hänsyn till. Vi vill dock peka på att det inte är ett tekniskt hinder som ligger i vägen för att ersätta den fossila kraften i världen med t.ex. en kombination av kärnkraft och förnybar energi. Erfarenheterna visar att så är möjligt. Men, skulle kärnkraften uteslutas ur den framtida globala elmixen talar erfarenheterna hittills emot att 2-gradersmålet skulle kunna uppnås.

Det nationella perspektivet

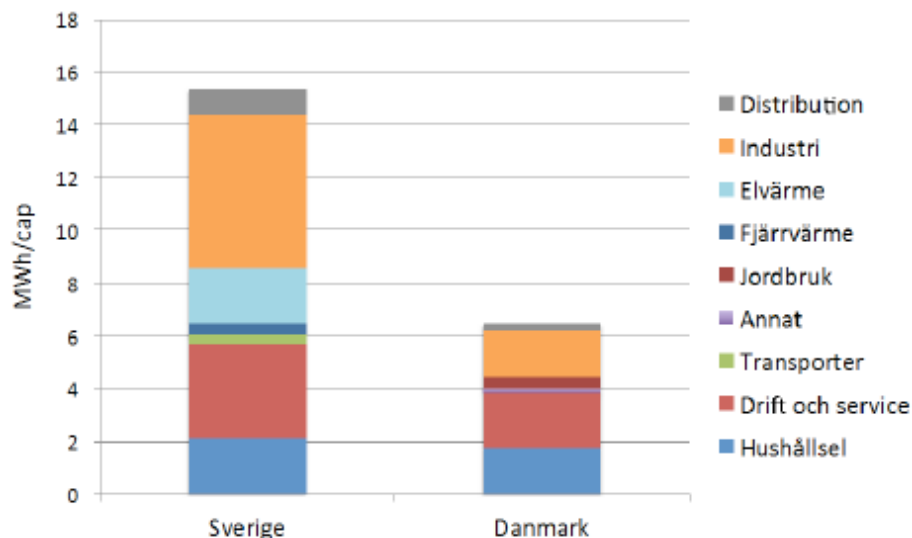
Som nämnts har vi i föreliggande rapport bl.a. utgått från att det svenska samhället även i framtiden kommer att vara beroende av en omfattande exportindustri. Vi antydde vidare att denna utgångspunkt är mer politiskt betingad än de övriga utgångspunkterna. Det kan här vara på sin plats att något utveckla detta resonemang.

I debatten påstås ofta att kärnkraften utan vidare kan ersättas av exempelvis vindkraft och annan ”förnybar energi” [12], andra menar att detta är helt omöjligt [13]. Här måste man se upp eftersom bägge ståndpunkterna faktiskt är korrekta, beroende på vilka utgångspunkter man har. Det som ofta gör diskussionen förvirrad är att utgångspunkterna sällan redovisas.

Den stora skillnaden mellan de två energislagen är att vindkraften är intermitterant. Med det avses att den inte kan styras till att leverera effekt när ett behov uppstår. I princip finns det inga hinder mot att fylla igen underskotten i effektbalansen med andra energislag, och det är i det ljuset man ska se ett ökat intresse i debatten för flexibla kraftverk som med kort varsel kan slås på vid dålig vind, och sedan lika fort stängas av vid god vind. Men, när den svenska vattenkraften inte maktar med att fylla igen hela underskottet är det i dagsläget bara fossil elproduktion som står till buds, antingen inhemsk eller genom import. Det utgör en utgångspunkt.

En annan utgångspunkt är den att vi ska effektivisera samhället och förlita oss långt mindre på el som en energibärare. Då skulle underskotten i effektbalansen vid dålig vind lättare kunna hanteras av befintlig vattenkraft. Här lyfter många fram Danmark som exempel.

Elanvändningen per person är i Danmark mindre än hälften av vad den är i Sverige. Att effektivisera användandet av energi är vid första anblicken tilltalande, men det kan inte ske utan konsekvenser. I figur 3 visas elkonsumtionen per person, i Sverige respektive Danmark uppdelad i olika användningsområden.



Figur 3. Elkonsumtionen per person i Sverige och Danmark.

I figur 3 kan man se orsakerna till varför vi i Sverige har en högre elförbrukning än i Danmark. Som tydligt framgår utgör industrins elbehov en stor del av skillnaden, och då främst de två dominerande branscherna massa och papper samt järn och stål. Dessutom finns skillnader i bl.a. bostadsuppvärmning vilket i Sverige sker med en inte obetydlig andel el. Motsvarande uppvärmning i Danmark sker till stor del med fossila bränslen. Den elförbrukningen vi normalt ser till vardags, d.v.s. hushållsel samt drift och service, är ca 30 procent högre

i Sverige men vi är också ett kallare och mörkare land med en glesare befolkning. Främst är det alltså en annorlunda struktur av samhället som ligger bakom den väsentligt högre svenska elförbrukningen, och inte ett in-effektivt nyttjande av elen. Det är följaktligen mer relevant att diskutera i former av besparingar än effektiviseringar.

Sammantaget innebär detta att det går att ersätta all kärnkraft i Sverige med en kombination av till exempel vindkraft och energibesparingar, men vilka blir konsekvenserna? Att väsentliga delar av den svenska tunga industrin då måste övergå till fossila bränslen eller avvecklas? I bägge fallen innebär det att utsläppen av växthusgaser kommer att öka eftersom Sverige idag, genom export av varor, är en nettoexportör av energi med internationellt sett låga CO₂-utsläpp. Vi måste även radikalt förändra uppvärmningen av våra bostäder.

Vilka konsekvenser som är acceptabla för det svenska samhället är i slutändan en politisk fråga men i sammanhanget menar författarna till denna rapport att det är av oerhörd betydelse för den politiska processen att helheten i problemställningarna belyses på ett rationellt sätt. Vidare används ofta i debatten just Danmark men även Tyskland som goda exempel på införandet av sol- och vindkraft (som framgår av figur 2 har Sverige dock installerat mer förnybar energi än vad Tyskland har gjort, räknat per år och invånare). Det finns förvisso intressanta lärdomar att dra från dessa exempel, men frågan är om man har gjort några klimatvinster (se Appendix 4)?

I nuläget anser vi att det finns all anledning att skapa förutsättningar för en långsiktig energipolitik, då detta skulle underlätta för den svenska industrin, liksom för övriga samhället. Vår ståndpunkt är att olika valda alternativ i energifrågan och särskilt elkraften i Sverige, kommer att medföra olika typer av konsekvenser för den svenska

industrin. Därför är det oerhört väsentligt att ny kunskap tas fram som belyser de olika nationella och globala effekterna av en vald och tydligt uttalad energipolitik. I sammanhanget kan Storbritanniens vägval avseende den framtida elproduktionen vara av stort intresse att studera.

Med andra ord menar vi att det finns starka skäl som talar för att Sverige bör skapa en långsiktigt stabil politisk plattform som erbjuder den elintensiva industrin avsevärt tydligare förutsättningar för framtiden än vad som nu gäller. Detta dels för att kunna erbjuda omvärlden varor producerade med liten klimatpåverkan och dels för att framgent skapa goda förutsättningar för välfärd. Slutligen kan Sverige utgöra ett föredöme för andra länder hur ett industrialiserat samhälle kan blomstra utan att generera nämnvärda utsläpp av växthusgaser.

Långsiktigt hållbar kärnkraft

Den nuvarande strategin för deponering av det högaktiva avfallet (KBS-3) erbjuder en robust och så säker förvaring av avfallet från dagens reaktorer som rimligen går att begära. Tankegången bakom KBS-3 är:

- 1) att inte återanvända avfallet och
- 2) att det svenska kärnkraftprogrammet skall begränsas till de tolv reaktorer Sverige byggde.

För svensk del innebär en fortsatt användning av kärnkraft på samma nivå som idag att det kommer att krävas ett slutförvar av samma storlek som den som nu planeras för i Forsmark ungefär vart femtonde år. I ett långt perspektiv är detta givetvis ohållbart och i det sammanhanget erbjuder fjärde generationens kärnkraftssystem en mycket intressant möjlighet som dels bättre utnyttjar de naturliga resurserna och

dels möjliggör att vi kan använda det slutförvar som idag planeras under en mycket lång tid. Den senare aspekten står i samklang med en av utgångspunkterna för detta arbete: att inte ekonomiskt belasta framtida generationer.

Givet att framtida generationer önskar använda kärnkraft för sin elförsörjning, går det att se ett scenario som:

- 1) utnyttjar naturresurserna minst hundra gånger bättre än med dagens kärnkraftteknik,
- 2) innebär att man kan använda kärnkraft i tusentals år framåt utan att ett nytt slutförvar behöver byggas,
- 3) genererar kortlivat avfall.

I Appendix 10 redogörs för ett scenario som bygger på användandet av snabba reaktorer som växelvis körs i s.k. brännarkonfiguration och självförsörjande konfiguration. Som brännare förbrukar de den fissila delen av dagens avfall som bränsle, och som självförsörjande behöver de ingen tillförsel alls av fissilt material. Sammanfattningsvis innehåller scenariot fem faser:

o Den första fasen sträcker sig fram till 2045 och bygger på drift av endast lättvattenreaktorer. Det är här antaget att de reaktorer som av åldersskäl måste stängas med början under 2020-talet ersätts med nya lättvattenreaktorer.

o Den andra fasen sträcker sig mellan 2045 och 2102 och produktionen utgörs nu av kombinerad drift av lättvattenreaktorer och Generation IV-reaktorer. De senare är här konfigurerade som brännare, varför den totala mängden transuraner i systemet då hålls konstant. Det mesta som byggs upp i lättvattenreaktorerna förbränns i Gen IV-reaktorerna.

o Den tredje fasen tar drygt 50 år och det finns då endast Generation IV-reaktorer kvar vilka fortfarande körs som brännare. I den fasen förbränns de kvarvarande transuranerna och mot slutet konfigureras Generation IV-reaktorerna succesivt om till självförsörjande.

o I den fjärde fasen är alla reaktorer konfigurerade som självförsörjande. I det läget förbrukas varken transuraner från lättvattenreaktorernas avfall eller anrikat uran utan endast fertilt uran behöver tillföras. Det finns tillräckligt med fertilt uran i dagens avfall för att förse ett svenskt Generation IV-system med bränsle i 10 000 år.

o I den femte fasen antas framtida generationer ha löst sin energiförsörjning på annat sätt och har inte längre något behov av kärnkraft. Den femte fasen kan inledas vid godtycklig tidpunkt, och då konverteras Gen IV-reaktorerna återigen till brännare och stängs succesivt ner. De kvarvarande reaktorererna konsumerar de transuraner som tidigare använts som bränsle. Om alternativa energislag, förnybart, fusion eller vad som nu kan ligga i framtiden blir tillräckligt mogna så kan alltså framtida generationer fasa ut kärnkraften på ett säkert sätt.

I den nutida världen har klimathotet kommit på var persons läppar och är utan tvekan det mest angelägna problemet mänskligheten har att finna lösningar på och vi måste nu föra upp kärnkraftens framtida roll i såväl Sverige som globalt på dagordningen. Kärnkraftssystemen måste dock utformas så att de medför minimal belastning för framtida generationer. Det scenario som redogörs för i denna rapport visar att detta kan vara fullt möjligt och samtidigt ge en maximal flexibilitet för framtida generationer att själva bestämma hur man vill trygga sin elförsörjning.

Universitetens roll

Den tidigare och numera upphävda paragraf 6 i lagen om kärnteknisk verksamhet ("tankeförbudslagen") fick mycket allvarliga konsekvenser för kärnteknisk forskning och utbildning på landets lärosäten. Beslutet att kärnkraften skulle vara nedlagd till 2010 spädde på situationen ytterligare genom att två av lärosätenas grundpelare: finansiering och studentintresse i ett slag försvann. Situationen var så allvarlig att den kärntekniska verksamhetens akademiska bas var på väg att utdö vilket i sig skulle utgöra en säkerhetsrisk då kärnkraftindustrin och myndigheter inte kunde påräkna att människor med relevant kompetens skulle finnas tillgängliga för driften av kärnkraftverken i framtiden. Av det skälet bildades Svenskt kärntekniskt centrum (SKC) 1992 som ett samarbete mellan dåvarande Statens kärnkraftsinspektion, kärnkraftverken, Westinghouse i Västerås samt de tre lärosätena Uppsala universitet, KTH och Chalmers.

Syftet med SKC var att utgöra en finansiell plattform för att bygga upp de akademiska strukturer som politiska beslut under åttiotalet hade raserat. SKC:s årliga budget om ca 17 miljoner kronor var inte stor men den var ändå tillräcklig för att lärosätena kunde börja anställa unga, duktiga forskare som dessutom engagerades i undervisning på grund- och forskarutbildningsnivå. I nuläget har SKC:s budget minskat till ca 9 miljoner kronor och ansvarig myndighet, Strålsäkerhetsmyndigheten, är inte längre partner i SKC. Istället finansierar Strålsäkerhetsmyndigheten numera forskning på lärosätena utgående från myndighetens behov av specifik kunskap för sin tillsyn och via sitt tidigare stöd till SKC uppgående till ca 6 miljoner kronor. Via fakultetsmedel uppgår den statliga finansieringen av kärnteknisk forskning vid landets lärosäten till uppskattningsvis i storleksordningen 10 miljoner kronor per år. Till det kommer ett direkt stöd från kärnkraftsindustrin om ca 5

miljoner kronor. Vi konstaterar därmed att det statliga stödet för forskning och utbildning måste betraktas som blygsamt i ett land vilket härbärgerar tio reaktorer och som till 45 procent tryggar sin elförsörjning med kärnkraft.

Den korta historiken ovan visar på den fara som uppstår när statsmakten önskar styra forskningens inriktning. Vi som representerar olika vetenskapsområden vid Uppsala universitet vill här passa på att betona vikten av en fri forskning, även kring områden som politiskt uppfattas som problematiska och konfliktfyllda. Detta för att på bästa sätt gagna det omgivande samhälle som helt naturligt förlitar sig på att lärosätena ska fungera som stöd till politiker och andra beslutsfattare i komplicerade frågeställningar.

Få områden kommer att kräva så mycket av samarbeten mellan vetenskapsområdena som energifrågan, och kärnavfallsområdet, vilket bland annat betonas av en genomgång av det aktuella kunskapsläget avseende kärnavfallsområdet [10]. På det internationella planet ser vi också en allt större interdisciplinär samling runt kärnkraften som en framtida energikälla för världen. En hel del av den internationella forskningen koordineras av IAEA där inte endast tekniska aspekter belyses utan även där kompetens inom bl.a. samhällsvetenskaperna, medicin, beteendevetenskap och juridik och ges en självklar roll i utvecklingen av kärnkrafttekniken. Vid Uppsala universitet ser vi därför stora möjligheter att samla forskare från olika vetenskapsområden, såväl inom som utanför vårt lärosäte, för att bredda och fördjupa våra kunskaper kring energifrågan från ett brett spektrum av perspektiv.

Slutsatser

En central slutsats vi kan dra av arbetet med att sammanställa denna rapport är att otydligheten i den politiska debatten är av stor skada för samhället. En blocköverskridande diskussion som tar hänsyn till hela energiförsörjningsproblematiken vilken även innefattar den globala dimensionen måste initieras. Osäkerheten som bland annat präglar diskussionen kring kärnkraften måste föras upp på den politiska dagordningen för att hanteras på ett rationellt sätt.

Vårt budskap kan säkert uppfattas som provokativt men om samhällsdiskussionen inte utgår från:

- 1) mycket konkret formulerat svar på vilket samhälle (och värld) vi önskar oss i framtiden och
- 2) naturlagar-nas begränsningar för vad vi kan och inte kan göra beträffande elproduktionen givet detta samhälle, kommer vi obönhörligen in i en återvändsgränd. Av det skälet är det viktigt att nu initiera en central diskussion innehållande såväl naturvetenskapliga som samhällsvetenskapliga, humanistiska och juridiska dimensioner.

En annan slutsats är att kärnkraften, givet de utgångspunkter som redovisades i inledningen av denna rapport, sannolikt kommer att stå för en betydande del av den svenska elproduktionen framgent. Som framgår av denna rapport finns det minst tre skäl för detta:

1. Miljö- och klimatöverväganden
2. Skapa bästa förutsättningar för framtida generationers välfärd
3. Tekniken runt fjärde generationens kärnkraftssystem kan göras till svenska profilprodukter inom en högteknologisk exportindustri

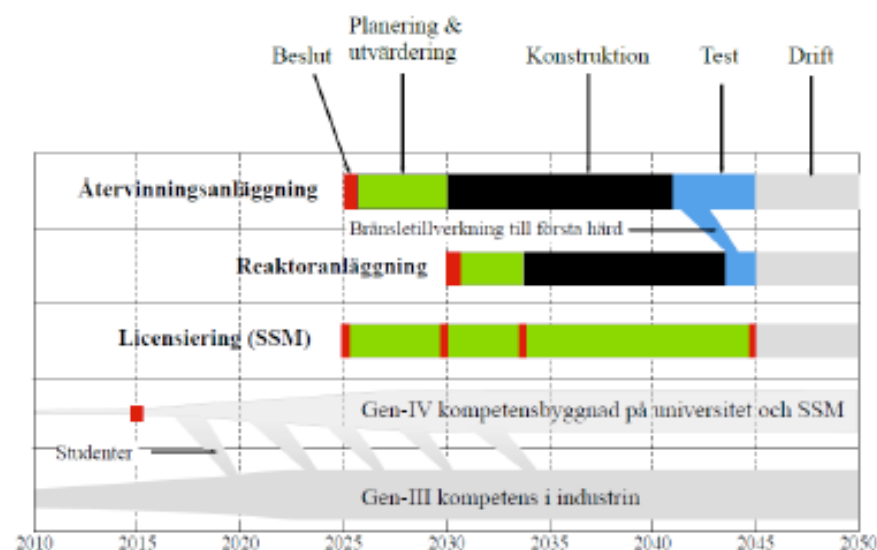
En tredje slutsats är att om samhället ser positivt på den utveckling som vi här skisserar och förespråkar måste man inse att en sådan utveckling inte kommer till stånd genom enstaka insatser som t.ex. att ta fram en rapport som denna. Det kommer att krävas utarbetandet av en plan om ett nationellt åtagande som involverar den politiska sfären, myndigheter, industri, allmänhet och akademi för att alla aspekter ska kunna ges adekvat belysning.

En sådan plan kommer att bli mycket komplex och denna rapport har inte som syfte att i detalj redogöra för alla nödvändiga moment som måste beaktas. Däremot redovisar vi övergripande i Appendix 10 hur olika delar i en sådan plan kan motiveras genom den "tidslinje" som visas i figur 4.

Den övergripande tanken i figur 4 är följande: I närtid måste det tas skarpa beslut om en fortsatt kärnkraftdrift i landet med reaktorer av Generation III och III+ syftande dels till att undvika effektbrist när de äldsta reaktorerna tas ur drift och dels för att lärosätena ska ges en rimlig chans att bygga upp en relevant utbildningskapacitet. Det senare är viktigt för att kunna försörja befintlig kärnkraftindustri med personal vartefter nuvarande personal pensioneras men även för att skapa en attraktiv grund för forskare / universitetslärare att söka sig till området.

Statsmakten måste därför ge lärosätena kraftfulla incitament för att möjliggöra att resurser tillställs forsknings- och utvecklingsarbetet inom Generation IV-system. Med en adekvat finansiering av dessa förberedande åtgärder kan Sverige kompetensmässigt stå starkt runt 2025-2030 då beslut måste tas om byggandet av testanläggningar för Generation IV-system.

Ett svenskt fortsatt kärnkraftprogram förutsätter alltså att vi skapar och underhåller en nationell kompetens inom kärnteknikområdet under många år framåt. Här vill vi understryka att vi inte endast talar om teknisk kompetens. En stor del av dagens kärnkraft och i ännu högre grad Generation IV, kräver och kommer att kräva kompetenser inom många olika discipliner för tekniken ska kunna införas på ett sätt samhället bedömer som adekvat.



Figur 4. Tidslinje över beslut och andra handlingar som behöver göras för att scenariot i Appendix 10 ska kunna genomföras så effektivt som möjligt.

Referenser

1. R. F. Aguilera och M. Radetzki, "Skifferrevolutionen – hur den kommer att transformera de globala gas- och oljemarknaderna", Ekonomisk debatt nr 2, 2014
2. Åsa Moberg, "Ett extremt dyrt och livsfarligt sätt att värma vatten", 2014, ISBN 9789127134997
3. S. Larsson et al. "Reviewing electricity production cost assessments", Renewable and Sustainable Energy Reviews 30 (2014) 170–183
4. Se exempelvis Energimyndighetens "Långsiktsprogno 2010", ER 2011:03
5. Oxford Institute of Energy Studies: "Energy: The Long View", Malcolm Keay, October 2007
6. International Energy Agency, 2010
7. Se exempelvis: "Livscykelanalys - Vattenfalls elproduktion i Norden", Vattenfall, 2012.
http://www.vattenfall.com/en/file/Livscykelanalys_Vattenfalls_elproduktion_i_Norden_11336961.pdf
eller:
IPCC, "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change", Working Group III Contribution to the IPCC 5th Assessment Report, Chapter 7: Energy Systems,
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3>
8. <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/>
9. SOU 2014:11, s 45
10. Uppsala Nya Tidning 2010-06-28
11. S. Qvist: "Feasibility assessment of replacing global fossil fuel electricity production by nuclear power based on data from Sweden's nuclear program", skickat för publicering i Nature, 2014
12. Se till exempel Sveriges Radio: <http://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=99&artikel=5746446>
13. Se till exempel DN Debatt, 2010-11-12

Appendix 1 Energiomvandlingar

Professor Ane Håkansson, tillämpad kärnfysik

En av fysikens huvudsatser är att energi inte kan skapas eller förintas utan endast omvandlas från en form till en annan. Av det skälet bör man alltså inte tala om "energiproduktion" utan i specificerad form som t.ex. elproduktion, hetvattenproduktion eller mer generellt, produktion av *nyttig* energi. Det finns andra, mer strikt definierade begrepp, men för denna genomgång räcker det med en mer alldaglig definition.

I fysikalisk mening involverar alla processer i naturen energiomvandlingar. Ett exempel är biologiska processer i t.ex. celler där molekyler i reaktioner (energiomvandlingar) förenas eller spjälkas i nya konstellationer.

Oftast sker energiomvandlingar i flera steg och dessutom krävs i allmänhet komplementära processer, som alltså även de involverar energiomvandlingar, för att åstadkomma t.ex. elproduktion. För att illustrera: Ett värmekraftverk förutsätter att t.ex. biobränsle produceras

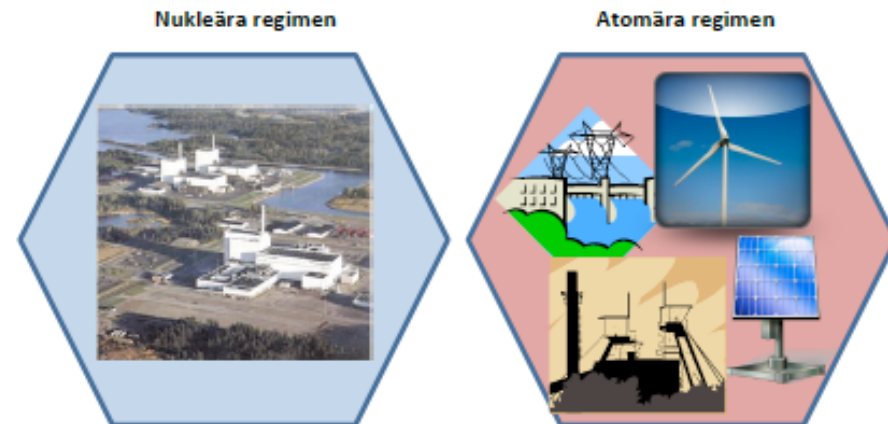
som sedan förbränns och genererar värme som i sin tur används för att koka vatten som genererar ånga och som driver turbiner. Dessa driver i sin tur generatorer som genererar elektricitet. Förutom att illustrera kedjan av energiomvandlingar tydliggör exemplet att det också krävs komplementära energiomvandlingar där t.ex. skogsmaskinernas dieselbränsle omvandlas till avverkningsarbete. Skogsråvaran ska sedan med hjälp av olika energiomvandlingar transporteras, torkas och processas vidare innan bränslet är färdigt för användning.

I detta appendix diskuteras olika former av energi, begreppet verkningsgrad samt energisystemens klimat- och miljöpåverkan.

Former av energi i naturen

Energi finns i många olika former och det kan för den fortsatta diskussionens skull underlätta att dela in naturens energiinnehåll i två huvudområden eller regimer se figur 1. I den ena regimen dominerar atomära och molekylära krafter. Dessa är de krafter vi dagligdags kommer i kontakt med genom att de ger upphov till energiformer som ljus, värme, ljud, rörelse etc. Även det biologiska livet på jorden är helt styrda av dessa krafter. Det är alltså krafter i denna regim som är föremål för de atomära och biologiska vetenskaperna och för att förenkla det fortsatta resonemanget kan vi kalla denna för den "atomära regimen".

I den andra regimen huserar de nukleära krafter som håller ihop atomkärnorna. I vardagslivet har vi sällan anledning att reflektera över dem förutom att det är dessa krafter som får solen och stjärnorna att lysa och de skapar ett skyddande magnetfält runt jorden genom att radioaktivt sönderfall värmer upp jordens inandöme. De orsakar även den naturliga bakgrundsstrålning som vi ständigt omges av. Låt oss kalla denna regim för den "nukleära regimen".



Figur 1. De båda energiregimerna och de olika elproduktionssätt som är associerade till dessa.

Varför manifesterar sig krafterna i de två energiregimerna så olika? Svaret på frågan ligger i att de atomära krafterna binder ihop atomer och molekyler med relativt liten styrka. Så liten att atomära föreningar lätt kan bildas genom reaktioner (energiomvandlingar) med de energinivåer som står till förfogande i vår "normala" värld. Exempelvis möjliggör detta att vi kan få värmeenergi genom att elda ved, kol etc. eller elektricitet från solceller. Vidare har mekaniska krafter sitt ursprung i denna regim och möjliggör utnyttjandet av t.ex. vind- och vattenkraft.

De nukleära krafterna, å andra sidan, binder samman atomkärnorna och de gör det med en styrka som är många miljoner gånger större än de atomära krafterna. Detta gör att de inte kan ingå i normal kemi eftersom dessa krafter är så stora att de splittrar atomära föreningar och liv skulle omöjliggöras. Intressant nog är det egenskapen att kunna splittra kemiska föreningar som i en rimlig omfattning är en viktig

drivkraft bakom den biologiska evolutionen genom att den kan orsaka mutationer.

De väldiga krafter som gömmer sig i atomkärnorna innebär en intressant möjlighet att utvinna nyttig energi i en omfattning som saknar motstycke. Denna möjlighet har utforskats och utnyttjats under de senaste sjuttio åren och hur det går till beskrivs närmare i Appendix 5.

Verkningsgrad

Ytterligare en huvudsats i fysiken beskriver att inga energiomvandlingar kan ske med hundra procent effektivitet. En viss del av energin förloras till andra, oftast oönskade energiformer, som i allmänhet ger upphov till det vi kallar för avfall. Fenomenet är kopplat till begreppet *verkningsgrad*. Verkningsgraden definieras som kvoten mellan nyttiggjord energi och tillförd energi. Till exempel om en elmotor har verkningsgraden 0,9 betyder det att 90 % av den tillförda elektriska energin omvandlas till rotationsenergi. En bensinmotor, å andra sidan, har en verkningsgrad runt 0,2 vilket innebär att endast 20 % av den kemiska energin i bensinen utnyttjas för framdrift. Vart tar resten av energin vägen? För elmotorn försvinner ca 10 % i värme medan i bilmotorn försvinner 80 % av energin som värme och avgaser. Av dessa exempel framgår att det är önskvärt att ett energiomvandlingssystem (el- och bensinmotorerna i de här exemplen) har en så hög verkningsgrad som möjligt.

Verkningsgraden är multiplikativ, d.v.s. i en längre kedja av energiomvandlingar multipliceras verkningsgraderna i varje länk så att det sammantaget kan medföra att den totala verkningsgraden för systemet blir betydligt lägre än de enskilda verkningsgraderna. Ta exemplet med det bioeldade kraftvärmeverket ovan. Även om verkningsgraden för en

elektrisk generator är ca 0,95 så kommer totala verkningsgraden för kraftverket att i huvudsak bestämmas av verkningsgraden i omvandlingen av värmeenergi till ångturbinernas rotationsenergi (typiskt 0,38) genom: $0,95 \cdot 0,38 = 0,36$. Alltså, 36 % av biobränslets energiinnehåll omvandlas till elektricitet. Tar man dessutom i beräkning de verkningsgrader som förekommer i skogsavverkningen, tillverkningen av bränslet, bortforsling av aska etc. sjunker totala verkningsgraden för *systemet* ännu mer. För att få en realistisk bild av i det här fallet biobränsle, måste alla processer i kedjan tas med i beräkningen dvs. allt från oljeutvinning via transporter av råolja, raffinering, distribution av dieselolja, transporter av skogsråvara etc.

För att rätt bedöma ett energisystems värde är det alltså viktigt att ta hänsyn till alla förekommande länkar i kedjan och deras respektive verkningsgrader. Detta är särskilt viktigt från ett avfallsperspektiv eftersom en låg verkningsgrad genererar mer avfall per genererad kWh än ett system med hög verkningsgrad.

Appendix 2

Energien och industriella revolutioner

Professor Jan Ottosson, ekonomisk historia 1

1) Författaren vill framföra sitt tack till professor Magnus Lindmark och professor Lena Andersson-Skog, båda vid Umeå universitet, för synpunkter på detta appendix.

Energins betydelse för det ekonomiska framåtskridandet har varit central, enligt ny forskning. Ekonomihistoriker har tydligt visat på interaktionen mellan den industriella utvecklingen, ekonomisk tillväxt,

naturresurser och energiförbrukningen [Kander & Lindmark 2004]. Genom att föra in miljöfaktorer i de historiska nationalräkenskaperna har forskningen också kunnat visa på historiska tolkningar av begreppet hållbar utveckling [Lindmark & Acar 2013, 2014]. Nya rön har visat att den tidigare synen på sambandet mellan ekonomisk tillväxt och energiförbrukning, där man betonade ett jämnt händelseförlopp, nu har bytts mot en betoning av en betydligt mer asymmetrisk utveckling. Detta innebär att olika energislags dominans under vissa perioder liksom övergången mellan olika energibärare har behandlats i termer av ojämna utvecklingsförlopp [Kander, Malanima & Warde 2014]. Dessutom har frågan om energins roll i ekonomisk utveckling också diskuterats intensivt under senare tid. Olika åsikter bryts kring dessa frågor, där ekonomer som Rostow, betonade att energin snarast var något som inte hade någon betydelse för ekonomisk tillväxt [Kander 2013]. Sociologen Anthony Giddens och ekonomen Nicholas Stern är två exempel på samhällsvetenskapliga forskare vilka debatterat klimatfrågorna under senare tid och bland annat poängterat marknadsmisslyckanden och att politiska låsningar tenderar att låsa fast klimatfrågan. Detta betonas av den svenske ekonom-historikern Lars Magnusson [2014, ss 51ff].

Andra forskare har valt att betona energins viktiga roll sett i relation till ekonomisk utveckling. Bland denna grupp av forskare har exempelvis ekonomhistorikern Astrid Kander [Astrid Kander et al., 2013] betonat att utvecklingen inte kan ses i enkla termer av en jämn utveckling av energiförbrukning och BNP. Ett resultat är att BNPs energiintensitet har fallit också i ett långsiktigt historiskt perspektiv. Detta är intressant eftersom ökad energieffektivitet idag ofta lyfts fram som en målsättning för klimatpolitiken. Den förändrade energiintensiteten har dock inte varit jämn över tid, utan är koncentrerad till vissa perioder. Utifrån detta synsätt måste energifrågan sättas i relation till

olika industriella faser. En sådan indelning brukar benämnas tre industriella revolutioner [Magnusson 2010, Schön 2011, Isacson och Ottosson 2001].

En debatt har förts kring frågan om vilka drivkrafter som var viktigast för att den första industriella revolutionen kunde uppstå. En tidigare generations ekonomhistorikers tolkning av de klassiska produktionsfaktorernas roll (bland annat arbete, kapital och naturresurser) har utvecklats till en rad verk som mer betonat olika institutioners roll i den ekonomiska utvecklingen [North 1990, 2005, Acemoglu och Robinson (2012)] eller innovationernas centrala roll [Mokyr 2002]. Under senare tid har återigen en betoning av riklig tillgång till billig energi, i praktiken stenkol, och priset på arbetskraft tagit plats i debatten om orsakerna bakom den första industriella revolutionen [Allen 2009]. Den första industriella revolutionen möjliggjordes utifrån denna tolkning genom att energitillförseln kunde öka exponentiellt när fossila bränslen ersatte biobränslen, som inte kunde öka exponentiellt eftersom veden, via fotosyntesen, är direkt kopplad till den produktiva landytan [Wrigley 2006]. Övergången till industrisamhället innebar en allt knappare tillgång på träkol och ved, vilket ekonom-historikern Lena Andersson-Skog [2005] har påpekat. Stenkolet och ångkraften präglade det europeiska landskapet i allt större omfattning.

Under den andra industriella revolutionen blev beroendet av olja och bensin till bland annat förbränningsmotorer allt tydligare, särskilt efter andra världskriget. Den andra energikällan som fick en enorm betydelse både för hushåll och den framväxande industrin var elektriciteten. Införandet av olja, bensin och elektricitet förändrade villkoren för produktion, konsumtionsmönster och energifördjupning. Tillgången till billig energi var en helt nödvändig förutsättning för den snabba expansionen – där världskriget och mellankrigstiden kännetecknades

av en ojämn utveckling inom energiområdet. Den snabba tillväxten efter andra världskriget var beroende av billig olja, samtidigt som nya fyndigheter av naturgas och etableringen av kärnkraft medförde olika användningsmönster i olika nationer. Under 1970-talets oljekriser präglades flera länders energipolitik av en ambition att minska oljeberoendet. En effekt av höjda oljepriser och av den förda energipolitiken blev att Sverige minskade sina koldioxidutsläpp kraftigt under perioden 1970- och 1980-talen [se t ex Lindmark et al 2011].

Om de båda första industriella revolutionerna kan sägas ha varit beroende av en energiökning, så präglas den tredje industriella revolutionen av en annan energiutveckling. Det som brukar kallas den tredje industriella revolutionen har präglats av informationsrevolutionen (det som brukar kallas IKT), vilket haft stora konsekvenser för att det tidigare nära sambandet mellan ekonomisk tillväxt och energiförbrukning nu har ändrats. Energiförbrukningens ökning har sedan 1970-talet brutits, vilket innebär att Sverige idag förbrukar ungefär lika mycket energi som för 45 år sedan [Kander 2013]. Tillväxten har samtidigt fortsatt (för översikter om den tredje industriella revolutionen, se Magnusson och Schön). Därmed inte sagt att IKT skulle vara helt oproblematiskt ur ett energi- och elperspektiv. Datorhallar förbrukar en oanad mängd elektricitet. Till exempel kommer Facebooks serveranläggning i Luleå att årligen förbruka ca 1 TWh, alltså knappt en procent av hela Sveriges elförbrukning.

Den svenska utvecklingen uppvisar några intressanta drag ur detta perspektiv. Införandet av elektriciteten baserat på vattenkraften blev tidigt en viktig energikälla i den svenska energianvändningen under den andra industriella revolutionen. Under 1940-talet initierades diskussionerna kring hur oljan liksom en stor utbyggnad av vattenkraften skulle tillgodose de stora behoven av el.

Under efterkrigstiden började även kärnkraften, både ur ett militärt liksom ur ett civilt perspektiv att utvecklas. Lena Andersson-Skog har poängterat att det finns ett nära samband mellan ekonomisk utveckling, prioriteringar från samhällets sida och politikens beslut sett i relation till kärnkraftsfrågan i Sverige (2005). En slutsats som dras är att det föreligger svåra avvägningar mellan tillväxt, välfärdens utveckling, industrins produktion och sysselsättningen sett i relation till olika energikällor, särskilt kärnkraften. En annan viktig aspekt rör hur frågan om globala mål relateras till nationella mål [Andersson-Skog, 2005]. Den svenska utvecklingen har under lång tid präglats av en interaktion mellan staten och det privata näringslivet, samtidigt som strukturomvandlingen i ekonomin har bidragit till det delvis specifika svenska exemplet, vilket Arne Kaijser och Astrid Kander nyligen belyst (2013). Lindmark (2013) lägger emellertid större vikt vid förändrade relativpriser mellan tjänster och varor än strukturomvandlingsargumentet. Teknisk utveckling och produktivitet står därmed i fokus för denna ståndpunkt.

Ny forskning har noterat att den svenska minskningen av koldioxid huvudsakligen skedde före införandet av en aktiv energipolitik. Den tekniska utvecklingen, främst en förändrad energimix, och energisparande, medförde stora nedgångar i utsläppen under perioden 1970-1990. En viktig faktor i denna utveckling var införandet av kärnkraften [Lindmark och Andersson, 2010], tillsammans med målsättningen att minska det stora oljeberoendet i den svenska ekonomin. Ytterligare en central aspekt rör den svenska industrins flexibilitet avseende grönare produktionsmetoder i relation till regleringar och utländsk konkurrens under 1970- och 1980-talen [Söderholm & Bergquist (2013)].

Referenser

- Andersson-Skog, Lena (2005), Från ren energi till farligt avfall – kärnkraftsfrågans reglering i det svenska välfärdsbyggandet, i: André, Mats & Strandberg, Urban (red), *Kärnavfallens politiska utmaningar*, Gidlunds Förlag, ss 16-32.
- Kaijser, Arne och Kander Astrid (2013), *Framtida energiomställningar i historiskt perspektiv*, Rapport 6550, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Lindmark, M. & Andersson, L-F. (2010), *Unintentional Climate Policy: Swedish experiences of carbon dioxide emissions and economic growth 1950-2005*, CER Working Paper, 2010:14, Umeå.
- Lindmark, M. (2013) Strypa tillväxten – bästa lösningen?, i: Magnus Jiborn och Astrid Kander (red), *Generationsmålet*, Dialogos, Stockholm.
- Kander, Astrid, Paolo Malanima, Paul Warde (2013), *Power to the People - Energy in Europe over the last five Centuries*, Princeton University Press, Princeton.
- Magnusson, Lars (2014), *Mästarens återkomst*, Dialogos, Stockholm.
- Magnusson, Lars (2010), *Sveriges ekonomiska historia*, Norstedts, Stockholm.
- Schön, Lennart (2011), *En modern svensk ekonomisk historia : tillväxt och omvandling under två sekel*, SNS Förlag, Stockholm.
- Söderholm, K., Bergquist, A. (2013) "Growing Green and Competitive: A Case Study of a Swedish Pulp Mill" *Sustainability*, 5 (5): 1789-1805.
- SOU 2014: 11, *Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2014* Forskningsdebatt, alternativ och beslutsfattande. Kärnavfallsrådet.
- North, D., (1990), *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*, Cambridge University Press.
- North, D., (2005), *Understanding the Process of Economic Change*, Princeton University Press. 24
- Acemoglu, D och Robinson, J (2012) *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty*, Crown Publishers.
- Mokyr, J (2002). *The Gifts of Athena: Historical Origins of the Knowledge Economy*, Princeton: Princeton University Press.
- Allen, R (2009), *The British Industrial Revolution in Global Perspective*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wrigley, A. (2006) "The transition to an advanced organic economy. Half a millennium of English agriculture," *Economic History Review*, 59:3, pp. 435–480.
- Lindmark, M., Bergqvist, A.K. & Andersson, L.F. "Energy transition, CO2 reduction and output growth in the Swedish pulp and paper industry: 1973-2006", *Energy policy* 39 (2011), 5449-5456
- Lindmark, M. & Acar, S. "Sustainability in the making? A Historical estimate of Swedish sustainable and unsustainable development 1850-2000". *Ecological Economics* 86 176-187 (2013)
- Lindmark, M. & Acar, S. "The Environmental Kuznets Curve and the Pasteur Effect: Environmental Costs in Sweden 1850-2000" *European Review of Economic History* (2014 *forthcoming*).
- Astrid Kander and Magnus Lindmark "Energy consumption, pollutant emissions and growth in the long run-Sweden during 200 years". *European Review of Economic History* vol. 8 nr. 3 (2004) ss. 297-335.

Appendix 3

Hållbara energisystem – inte så lätt som man tror

Universitetslektor Mikael Höök , naturresurser och hållbar utveckling

Brundtlandkommissionen definierade hållbar utveckling enligt följande:

”En hållbar utveckling tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov”

Försök att överföra denna anda till energisystem görs ständigt och har resulterat i ett sökande efter hållbara energisystem för framtiden. Dessvärre finns det inte någon entydig definition eller allmängiltiga kriterier för vad som går att kalla hållbarhet. Somliga ropar efter stark hållbarhet, som innebär att samhället inte tär på naturresurserna. Andra förordar svag hållbarhet som kännetecknas av att samhällets totala kapital inte minskar. Begreppsförvirringen och avsaknaden av entydighet kring hållbarhetsbegreppet gör att debattörer ofta pratar förbi varandra.

Vad som är ett hållbart energisystem är inte så lätt att avgöra som många tror. Hur gör man med energikällor som är miljömässigt hållbara, men dessvärre ekonomiskt ohållbara? Hur hållbart är det med energikällor som inte kan leverera energi i den form som efterfrågas av konsumenter? Hur hållbart är det exempelvis med energisystem som leder in i importberoenden från diktaturer eller andra politiskt problematiska länder? Vad som är hållbart beror på vad man väljer att baka in i definitionen av hållbarhet [1,2].

Förnybara energitekniker som solceller och vindkraftverk antas ofta ”*automagiskt*” bidra till hållbara lösningar, utan att man egentligen reflekterar över vad ett hållbart energisystem är. Inte ens om själva energikällorna, så som sol, vind och vatten, är förnybara innebär det per automatik att kraftverken som konverterar energin till användbara former, så som elektricitet eller värme, är förnybara, eller för den delen kan betecknas som hållbara. Alla energiomvandlingar har miljöpåverkan och kräver utvinning av naturresurser för att kunna byggas. För det må finnas förnybar energi men det finns inga förnybara kraftverk i praktiken. Även om råvaran är förnyelsebar kommer konsumtion av energi alltid att innebära konsumtion av resurser då själva kraftverken måste byggas och underhållas. Utan att se till hela försörjningskedjan framträder inte dessa problem.

Hur snabbt tekniker förväntas växa kan också påverka deras hållbarhet. Ofta glömmar man att många förnybara energitekniker vanligtvis har förhållandevis kort förväntad livslängd och behöver ersättas om 20-30 år. De vindkraftverk vi bygger från nu och fram till 2030 kommer kanske inte ens finnas kvar i drift år 2050. Dessa korta livstider står i stor kontrast till de 40-60 år som fossileldade kraftverk eller kärnkraftverk lever. Om elsystemet ska kunna liknas vid något hållbart måste vi även fundera kring dessa frågor [3]. Långsiktighet är fundamentalt för hållbarhet.

Vi måste även tänka i flera led och se till helheter istället för utvalda beståndsdelar. Ett exempel är elektrifiering av transportsektorn som utmålats som den mest troliga och kanske enda möjliga vägen att gå mot det diffusa målet om en fossilfri fordonsflotta. En elmotor är effektiv på egen hand, men kommer elektriciteten från ineffektiva kraftverk blir hela systemet mindre energieffektivt. Som jämförelse må bensin/dieselmotorer vara ineffektiva, men effektiv utvinning och

raffinering gör att endast bråkdelar av energin försvinner från oljekälla till bilens tank. Sett som system kan den totala verkningsgraden vara jämförbar. När det plockas ut väl valda delar från systemen ser man inte helheten. Just sådana tveksamma överförenklingar missleder debatten och flyttar fokus från energisystem till tekniska detaljer.

Svårigheterna blir tydliga när man försöker se problemet från flera perspektiv. Att välja de energikällor som ska ingå i ett energisystem är på många sätt ett optimeringsproblem där man väger fördelar och nackdelar hos de olika alternativen mot varandra för att hitta en konfiguration som är mest optimal utifrån den behovsspecifikation man har att utgå från. Geologisk tillgänglighet, geografiska förekomster, teknisk tillförlitlighet, ekonomisk lönsamhet, miljövänlighet, politisk och social acceptans är parametrar som ställs mot varandra i valet av energisystem. Överförenklingar kring hållbarhet och brist på helhetsperspektiv för energisystem är tyvärr något som präglar allt för mycket av debatten.

Referenser:

- [1] Santoyo-Castelazo, E., Azapagic, A., (2014) Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, in press. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
- [2] Glavic, P, Lukman, R., (2007) Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, Volume 15, Issue 18, December 2007, Pages 1875–1885. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.12.006>
- [3] Davidsson et al. (2014) Growth curves and sustained commissioning modelling of renewable energy: Investigating resource constraints for wind energy. *Energy Policy*, in press. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.003>

Kostnader och energislag

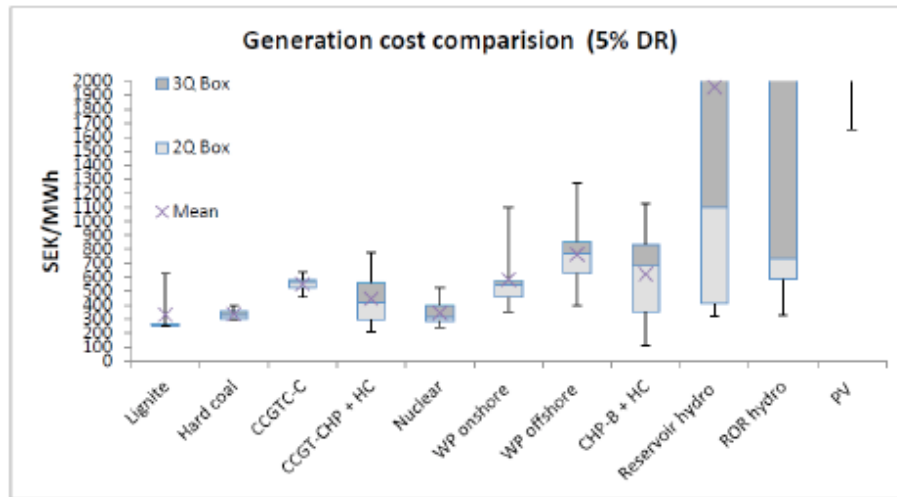
Förväntade kostnader för olika elenergitekniker är en viktig del av beslutsunderlag när det gäller att välja och utforma framtida energisystem. Myndigheter, företag och oberoende forskare genomför regelbundet sådana studier och de tenderar att frekvent återopnas i den offentliga debatten [1-9]. Ett problem är dock att studier ofta kommer fram till vitt skilda resultat och siffrorna ofta generaliseras utifrån diskutabla antaganden.

Det finns inget allmänt vedertaget upplägg för kostnadsberäkningar och närmare analys visar att metodik och antaganden har en stor påverkan på de elproduktionskostnader som presenteras [10]. Olika studier använder helt olika sätt att räkna och det leder till att det blir svårt att jämföra olika studier med varandra utan att blanda äpplen och päron. Beslutsfattare är ofta helt omedvetna om detta problem. Figur 1 illustrerar spridningen och skillnader i uppskattade elproduktionskostnader från 12 aktuella studier genomförda efter 2005.

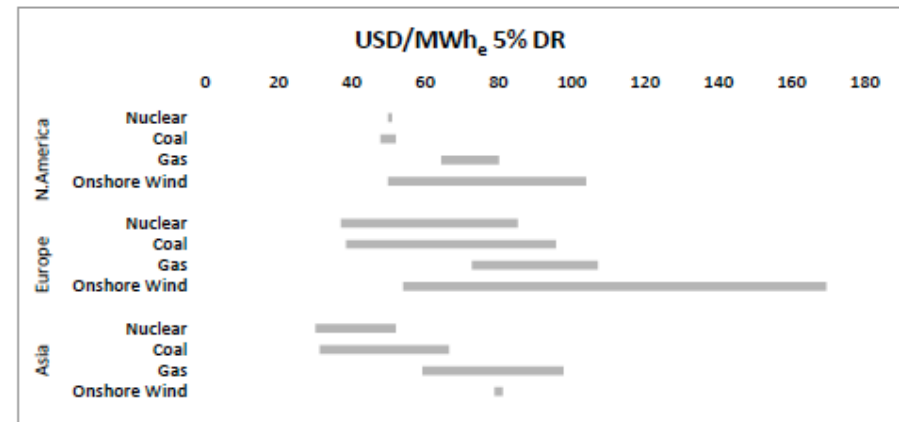
Ett annat problem som gör det svårt att generalisera produktionskostnader är att de platsspecifika och känsliga mot ändringar i ingående parametrar (Se figur 2). Kostnader för arbetskraft, försäljningspris för elektricitet och andra parametrar kan skilja sig påtagligt mellan olika länder och världsdelar. Ett annat problem är att flertalet av de granskade studierna sällan inte lägger något fokus på känslighetsanalyser i sina rapporter. På detta sätt får läsare ingen uppfattning om känsligheten i de presenterade resultaten.

Det finns alltid avvikande extremfall som kan visa att en enskild energikälla är dyr eller billig, men att plocka fram sådana resultat är att ta russinen ur kakan och missar en stor del av helheten. Det krävs att

man tittar på flertalet studier för att få en bättre bild av den faktiska situationen. Försiktighet rekommenderas och det är viktigt att beslutsfattare inser hur stor spridning det finns i resultaten och hur skillnader i metodik påverkar uppskattade kostnader.



Figur 1. Sammanställning av elproduktionskostnader från aktuella studier baserat på en diskonteringsränta på 5%. Notera att y-axeln är trunkerad vid 2000 kr/MWh. CCGT = Gaskombikraftverk, CHP = kraftvärmekonfiguration, WP = vindkraft, ROR hydro = vattenkraft utan damm, HC = värmekrediter, PV = solceller. Omarbetad graf från [10]



Figur 2. Sammanställning av resultat från aktuella studier av uppskattade elproduktionskostnader för olika världsdelar baserat på en diskonteringsränta på 5%. Källa: [10]

Nuvarande metoder lämpar sig inte heller för att jämföra intermittenta, väderberoende kraftslag med reglerbara alternativ. Detta på grund av att nuvarande metoder inte tar någon hänsyn till de kostnader som ett givet kraftverk har om man ser på elsystemet i sin helhet. Fokus ligger på kostnader för producenten och inte på de kostnader som möts av konsumenterna. Systemkostnader är högre för intermittenta kraftslag än för reglerbara alternativ. Det är dock mycket svårt att kvantitativt yttra sig om omfattningen av dessa kostnader då området är i behov av mer forskning.

Nuvarande metoder övervärderar dessutom intermittenta kraftslag på grund av att all el antas säljas till samma pris. I verkligheten varierar elpriset från timme till timme och skillnaderna kan vara signifikanta. Ingen hänsyn tas till att reglerbara kraftslag har en större sannolikhet att kunna producera el under de timmar på året då elpriset är som högst.

Referenser:

- [1] Canton J, Johanesson LÅ. Support schemes for renewable electricity in the EU. European Commission. Directorate-General for Economic and Financial Affairs. Brussels; 2010.
- [2] Ecofys. Financing Renewable Energy in the European Energy Market. Study ordered by the European Commission Directorate-General for Energy; 2011.
- [3] Hamilton K, Stöver J. Economic analysis of Projects in a Greenhouse World. Policy research working paper 6117. The World Bank Development Research Group Environment and Energy Team; 2012.
- [4] NEEDS. Project Reports. New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS) 2009b. 29
- [5] IEA & NEA. Projected Costs of Generating Electricity 2010 Edition. International Energy Agency (IEA); 2010.
- [6] EIA. Updated Capital Cost Estimates for Electricity Generation Plants. U.S. Energy Information Administration (EIA); 2010b.
- [7] VGB. Survey 2011. Investment and Operation Cost Figures - Generation Portfolio. VGB Powertech e.V. (VGB); 2011.
- [8] Elforsk. El från nya och framtida anläggningar 2011. Elforsk report 11:26.; 2011.
- [9] DECC. Electricity generation costs. Department of Energy and Climate Change (DECC); 2012.
- [10] Larsson, S., et al. (2014) Reviewing electricity production cost assessments. Renewable & Sustainable Energy Reviews, Volume 30, February 2014, Pages 170–183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.028>

Andra aktörers strategier på den globala energiscenen

Sverige är inte frikopplat från händelser på den världsscenen utan påverkas på en mängd olika sätt via den globaliserade energimarknaden. Högre oljepriser till följd av ökade spänningar mellan Väst och Iran eller svåra orkansäsonger i mexikanska gulfen är några exempel på hur internationella händelser kan påverka den svenska energisektorn. Internationella beslut och överenskommelser kan också komma att spela viktig roll för den svenska energisektorn, vilket kan exemplifieras via Kyotoprotokollet eller andra avtal.

En betydande aktör på den globala energiscenen är Ryssland och ryskt agerande ger återklang för omvärlden på grund av Rysslands viktiga roll som energiexportör. Den ryska energistrategin fram till 2030 präglas av försök till exportdiversifiering [1]. I dagsläget upptar EU cirka 75 % av Rysslands exportmarknad och det finns önsknings om att styra om exportflöden österut. Det färskgasavtalet som skrevs mellan Kina och Ryssland tidigare i år är helt i linje med denna strategi och det finns även rysk oro över EU:s tillförlitlighet som långsiktig kund.

EU för egen del driver en agenda som präglas av energisäkerhet [2], speciellt nu efter händelserna i Ukraina. Att diversifiera försörjningen av naturgas ses som viktigt och speciellt då att minska de 40 % av importen som härstammar från Ryssland. Några av medlen för att nå detta mål är att uppmuntra exploateringen av skiffergas inom EU samt uppmuntra energieffektivisering.

Referenser:

[1] Global and Russian energy outlook to 2040, http://www.eriras.ru/files/2014/forecast_2040_en.pdf 30

[2] European Energy Security Strategy 2014, http://ec.europa.eu/energy/security_of_supply_en.htm 31

1 Utsläppsvärden är för CO₂ endast och inkluderar inte exempelvis metan som i enheten CO₂-ekv. En detaljerad diskussion av livscykelanalyser med utsläppsvärden elproduktionsslag i enheten CO₂-ekv för olika elproduktionsslag finns i ref. [3].

Appendix 4

Tre europeiska länder

Professor Stephan Pomp, tillämpad kärnfysik

I tabell 1 visas några nyckeltal för elproduktionen i Sverige och tre andra europeiska länder. Data för elproduktionen är från ref. [1] och data för CO₂ utsläppen¹ från ref. [2].

1 Utsläppsvärden är för CO₂ endast och inkluderar inte exempelvis metan som i enheten CO₂-ekv. En detaljerad diskussion av livscykelanalyser med utsläppsvärden elproduktionsslag i enheten CO₂-ekv för olika elproduktionsslag finns i ref. [3].

Land	gCO ₂ /kWh (medelvärde 2009-2011)	Elproduktion 2011 (TWh)	Andel fossilkraft (%)	Andel kärnkraft (%)	Andel vattenkraft (%)	Andel vindkraft (%)
Sverige	21	150	2,9	40,2	44,3	4,0
Frankrike	71	562	8,5	78,7	8,9	2,2
Storbritannien	450	368	70,8	18,8	2,3	4,2
Tyskland	470	609	59,5	17,7	3,9	8,0

Tabell 1: Nyckeltal för elproduktion och CO₂-utsläpp per kWh el för olika länder.

Som framgår från tabellen så finns ett tydligt samband mellan låg andel fossil elproduktion och låga CO₂-utsläpp. Sverige med hög andel kärn- och vattenkraft i elmixen orsakar därvid mycket små CO₂-utsläpp per producerat kWh el.

Storbritannien och Tyskland orsakar stora utsläpp via sin elproduktion på grund av en stor andel elproduktion från fossila källor (läs sten- och brunkol samt gas). Se ref. [3] för livscykelanalyser för olika elproduktionssätt.

Tabellen och värden från ref. [3] gör tydligt att det globala behovet att radikalt minska utsläpp av växthusgaser inte är ett giltigt argument *mot* kärnkraft utan snarare ett argument *för* kärnkraft.

Vi ska nu, kortfattat, redogöra för tre olika europeiska länders energipolitik.

Tyskland

Under 2010 producerade Tyskland 633 TWh el [4], varav 140,6 TWh (22,2%) från kärnkraft och 360,9 TWh (57,0%) från fossila källor. År 2013 har elproduktionen från kärnkraft minskat till 97,3 TWh (15,4%) och från fossila källor var den nästan oförändrat på 359,2 TWh

(56,7%). Bland de fossila energikällorna har kolkraftsandelen ökat från 72,8% till 79,6% medan gasandelen har minskat i motsvarande grad (se även tabell 1 med data från IEA.org för år 2011).

Enligt *Bundesverbandes der deutschen Energie - und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW)* orsakade elproduktionen under år 2012 utsläpp av 0,52 kg CO₂/kWh vilket var en ökning med ca 2 % jämfört med året innan [5].

Redan veckan efter olyckan i Fukushima genomförde den tyska regeringen en helomvändning av den tidigare kärnkraftspolitiken. Istället för den drifttidsförlängning man hade beslutat hösten 2010 skulle nu reaktorerna stängas snarast möjligt. Under juni 2011 beslutades att åtta reaktorer skulle stängas redan samma år (6 augusti 2011) och de resterande skulle gradvis tas ur drift så att det sista kärnkraftverket i Tyskland planeras att stängas 2022. I sammanhanget är det värt att notera förbundskansler Merkel's uttalande rörande tysk fossilkraft som rapporterades i Washington Post 2011-06-10: "At least 10, more likely 20, additional gigawatts have to be built in the next 10 years".

Omställningen till förnybara energikällor stöds genom *Erneuerbare-Energien-Gesetz* (EEG lagen). Elpriserna har sedan år 2000 mer än fördubblats: det genomsnittliga elpriset för en familj med tre personer var 13,94 €ct år 2000 och 28,84 €ct år 2013 [6]. Kostnaderna för EEG har gradvis stigit och enligt preliminära siffror belastas konsumenterna år 2013 med 20,36 miljarder Euro och år 2014 med 23,59 miljarder Euro (se ref. [6],)

Anmärkningsvärt är att, enligt ett utlåtande från *Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)* 2014, EEG lagen och subventionerna för förnybara energikällor inte leder till minskade CO₂-utsläpp. Lagen

kritiseras vidare därför att subventioner inte leder till det nödvändiga innovationstrycket [7].

Under våren 2014 har så en reform av EEG lagen diskuterats och en lagändring som ska träda i kraft den 1 augusti 2014 har aviserats, se t.ex. ref. [8].

Frankrike

Frankrike har med ca 75 % en hög andel kärnkraft i elmixen och andel fossila källor för elproduktionen ligger på under 9 % (se tabell 1). Därmed hör Frankrike, tillsammans med Sverige, till det handfull länder i Europa som orsakar mindre än 100 g CO₂-utsläpp per kWh el [2].

Efter valet av president François Hollande våren 2012 planeras stängningen av två reaktorer i Fessenheim till slutet av 2016. De två reaktorer i Fessenheim togs i drift 1977 och är därmed de två äldsta franska reaktorerna. Reaktorerna i Fessenheim kritiserats (särskild efter Fukushima) även därför att de ligger i ett seismiskt aktivt område i Rhendalen.

Man annonserade under våren 2012 även att andelen kärnkraftsel skulle minska från nuvarande nivå till ca 50 %. Under november 2013 ändrades planerna dock:

"The French government is not planning to close any nuclear power plants after the two Fessenheim reactors, planned for shutdown at the end of 2016, a government spokeswoman said Tuesday [12 november 2013], confirming earlier comments made by industry minister Arnaud Montebourg. This indicates a major shift in energy policy for President Francois Hollande's Socialist government, which made a pre-election pledge in 2012 to phase out nuclear power from 75% of generation to

50% by 2025, while accelerating growth in renewable power. This pledge was interpreted as a plan to close around 20 reactors and it helped establish an alliance between the green party and his Socialist party.” [9].

Storbritannien

Ett intressant exempel i Europa är Storbritannien som vill radikalt minska sina CO₂-utsläpp med 80 % (relativt 1990) till 2050. En lag om detta (*Climate Change Act*) beslutades 2008 (Se t.ex. ref. [10]).

Liksom i Tyskland produceras den övervägande andelen el från fossila källor. Andelen fossil kraftproduktion var för år 2011 ca 70 % (se tabell 1). Detta förklarar varför, jämfört med Frankrike och Sverige, både Tyskland och Storbritannien orsakar höga utsläpp av CO₂ per kWh el (se tabell 1).

I motsats till Tyskland väljer dock Storbritannien en annan energipolitisk väg. Istället för en lagstiftning om kärnkraftens avveckling som i Tyskland, infördes i Storbritannien lagligt bindande mål för minskning av CO₂-utsläppen. Denna målsättning ledde till beslut om utbyggnad av kärnkraft och en jämte förnybara energikällor positiv särbehandling av kärnkraft gentemot fossila källor:

“Investments in low-carbon generation technologies such as renewables, nuclear and carbon capture and storage will in future be underpinned by the new long-term, legally binding Contracts for Difference (CfDs).” [11]

Det man kommit överens om är så kallade *strike prices* för olika elproduktionssätt. Detta är garanterade ersättningsnivåer per MWh. Skillnaden mellan *strike price* för ett visst elproduktionssätt och

marknadspriset ersätts av staten om marknadspriset är lägre men måste även betalas tillbaka av leverantören om marknadspriset ligger över det garanterade priset [12].

EDF har blivit garanterade ett pris på £92,5 per MWh för el som produceras vid kärnkraftverket som just nu byggs vid Hinkley Point i Somerset. Garanterade priser för havsbaserad vindkraft ligger på £155 under åren 2015-16 och kommer att sänkas till £140 under perioden fram till år 2019. Landbaserad vindkraft ersätts med ett garanterat pris av £95 fram till 2016 och med £90 under perioden 2017 till 2019 [13].

34

Referenser

- [1] IEA, <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/> (t ex <http://tinyurl.com/lvbsfmz> för Tyskland).
- [2] IEA, “CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION Highlights (2013 Edition)”, <http://tinyurl.com/kwt923j> (även IPCC <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/Tables/t0305.pdf>).
- [3] Analysgruppen vid KSU, ”Analysera för att agera -- En skrift om livscykelanalyser och miljödeklarationer”, Bakgrund Nr 1, juni 2014.
- [4] AG Energiebilanzen e.V., “Energieverbrauch in Deutschland in Jahr 2013“, mars 2014, speciellt sida 28 (<http://www.ag-energiebilanzen.de/>).
- [5] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V, “Entwicklung der Energieversorgung 2012“, mars 2013 (<http://tinyurl.com/ojzgebc>).
- [6] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V, “Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2014)“, <http://tinyurl.com/lvhgnzk>.
- [7] Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), “Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit

Deutschlands 2014“, februari 2014 (<http://tinyurl.com/omao8ga>), speciellt sida 52.

[8] FAZ, 8.4.2014, “Im EEG-Staat“, <http://tinyurl.com/qgfwofs>.

[9] Platts.com, “French nuclear reactor closures to be limited to Fessenheim: report”, November 12, 2013 (<http://tinyurl.com/mofkxq7>).

[10] Department of Energy & Climate Change, “Reducing the UK’s greenhouse gas emissions by 80% by 2050”, <http://tinyurl.com/q7rtqkp>.

[11] H M Treasury, “National Infrastructure Plan 2013”, december 2013, <http://tinyurl.com/kss5x6t>.

[12] BBC News Business, “Q&A: Nuclear strike price”, 21 oktober 2013, <http://www.bbc.com/news/business-22772441>.

[13] Financial Times, “Offshore wind gains in UK shake-up of renewables subsidies”, 4 december 2013, <http://tinyurl.com/ohmmsmb>. 35

Appendix 5

Vad är kärnkraft?

Professor Ane Håkansson och Tekn. Dr. Mattias Lantz, tillämpad kärnfysik

Implementeringen av kärnkraft är en betydligt större teknisk utmaning jämfört med de flesta andra använda teknologier för att producera elektricitet. Delvis på grund av detta men även genom att de processer som utnyttjas är något vi inte förnimmer till vardags (Appendix 1) omges kärnkraften av en mytbildning som ofta ger upphov till antingen en oproportionerligt stor förväntan på tekniken eller en opropor-

tionerlig oro för den. I det här avsnittet ska vi något beskriva hur kärnkraft fungerar och vad som kan hända när den inte fungerar på avsett sätt.

I kärnkraften söker man utnyttja som nämns i Appendix 1 krafter som håller ihop atomkärnorna. Man kan särskilja två distinkta tekniker som bygger på två helt olika kärnreaktioner, nämligen fission och fusion. I fissionsreaktionen klyvs tunga atomkärnor som t.ex. uran i typiskt två delar under utsändande av energi. Fusionsreaktionen är raka motsatsen där lätta atomkärnor som t.ex. väte smälter samman till tyngre kärnor under utsändande av energi. Fusionsbaserad teknik är fortfarande på experimentstadiet men beskrivs övergripande nedan som en intressant möjlighet för framtiden. Fissionsbaserad teknik har funnits sedan 1940-talet och är idag en väl beprövad teknik som spridits över stora delar av den industrialiserade delen av världen.

I begynnelsen

Man kan fråga sig varför just uran och somliga andra tunga grundämnen lämpar sig för kärnkraft. Svaret ligger i hur dessa grundämnen bildades en gång i tiden. De processer som får stjärnor att lysa (fusion) utgår från att väte sammansmälter (fusionerar) och bildar helium. Helium i sin tur kan fusionera med andra atomkärnor och på så sätt byggs allt tyngre grundämnen succesivt upp. Naturen är nu så inrättad att det tyngsta grundämne som kan bildas i fusionsprocessen är järn, så varifrån kommer de grundämnen som är tyngre som guld, uran osv? När en stjärnas bränsle tagit slut kan mycket massiva stjärnor sluta sina liv genom att de kollapsar i vad som kallas supernovor. I en supernova utsätts materien för så extrema förhållanden att till och med järn kan smälta samman med lättare grundämnen och bilda exempelvis uran. Genom denna bildningsprocess får tunga grundämnen ett ”överskott” av energi som kan manifesteras sig i sönderfall genom radio-

aktivitet och, i vissa fall, atomkärnor som är så instabila att de kan klyvas eller fissionera genom en yttre störning.

Varje grundämne i naturen uppträder i varianter eller s.k. isotoper. Exempelvis finns tre isotoper av väte: vanligt väte (H) där atomkärnan består av en proton, deuterium (H-2 eller D) där kärnan består av en proton och en neutron samt tritium (H-3 eller T) med en proton och två neutroner. På liknande sätt finns ett antal isotoper av uran där de vanligast förekommande är uran-238 och uran-235 (härefter angivna som U-238 och U-235). Den senare uppträder naturligt i koncentrationer om i medeltal 0,7 procent och är den isotop som används som bränsle i dagens kommersiella kärnreaktorer.

Kärnreaktorer

I den tekniska tillämpningen av fissionsreaktionen låter man neutroner träffa exempelvis uran-235 som då kan fissionera dvs. klyvas. När en urankärna fissionerar frigörs den energi som finns tillgänglig i urankärnan i form rörelseenergi hos fissionsfragmenten. I reaktionen frigörs även 2-3 neutroner. Dessa neutroner kan i sin tur starta nya fissionsreaktioner vilket leder till en kedjereaktion. Genom att styra denna kedjereaktion i en reaktor kan energi tappas av i önskad takt. I de flesta av dagens kommersiella reaktorer används vatten (lättvattenreaktorer) för att kyla bränslet. Fissionsfragmenten bromsas upp av omgivande materia i bränslet och omvandlar därmed sin rörelseenergi till värmeenergi som gör att vattnet hettas upp. Med hjälp av det heta vattnet produceras ånga för att driva turbiner som i sin tur driver elgeneratorer.

Vattnet i dagens lättvattenreaktorer har även funktionen som moderator dvs. för att bromsa upp (moderera) de snabba neutronerna som bildas i varje fissionsreaktion. På så sätt ökar sannolikheten för att

dessa ska starta nya fissionsreaktioner i bränslet. Eftersom neutronerna efter inbromsning får en rörelseenergi som svarar mot vattnets värmeenergi eller termiska energi, brukar man även tala om termiska reaktorer. I kommande avsnitt går vi igenom en alternativ teknologi som bygger på att neutronerna inte bromsas upp, s.k. snabbreaktorteknologi vilken är en komponent i fjärde generationens kärnkraftssystem.

Vatten har som moderator en mycket attraktiv egenskap; ju varmare reaktorbränslet blir desto sämre modererande verkan får vattnet vilket minskar antalet fissioner. Detta sänker bränsletemperaturen och därmed värmningen av vattnet, som åter ger bättre modererande verkan. Denna mekanism (negativ återkoppling) gör lättvattenreaktorerna självreglerande. Detta är en avgörande fördel då den typ av haverier som drabbade reaktor fyra i Tjernobyl (som var grafitmodererad) inte kan drabba lättvattenreaktorer.

En viktig säkerhetsaspekt för kärnreaktorer är att bränslet i härden alltid måste kunna kylas. Fissionsprocessen stoppas när reaktorn stängs av, exempelvis med hjälp av styrstavar, men det finns en annan process som frigör energi. De klyvningsprodukter som bildas vid fission är radioaktiva och sönderfaller i flera steg mot mer stabila tillstånd. Varje sönderfall innebär att energi frigörs och denna energi värmer bränslet. För att undvika bränsleskador, och i värsta fall en härdsmläta, måste kylmedel (vatten) alltid kunna tillföras härden. Värmeutvecklingen avtar med tiden men trots detta måste använt bränsle från en reaktorhård kylas i flera årtionden.

Bränslet i civila kärnkraftverk utgörs av ca 5 procent U-235 och resterande delen av U-238. Skälet till denna ordning är dels att man inte vill ha höggradig U-235 i civil drift då detta material är en utgångspunkt för kärnvapenproduktion och dels utnyttjas U-238 indirekt som bräns-

le. Det senare bygger på att U-238 har egenskapen att den kan fånga in neutroner och bilda plutoniumisotopen Pu-239. Denna isotop har liknande egenskaper som U-235 och kan klyvas i reaktorn och därmed kan bränslet utnyttjas i fem till sex år innan det är utbränt och måste bytas. Om man inte gjorde på detta sätt skulle bränslet behöva bytas med endast några månaders mellanrum. Allt bildat plutonium kan dock inte utnyttjas utan det blir en rest om ca en procent i det utbrända bränslet. Denna rest är en starkt bidragande orsak till att det utbrända bränslet måste slutförvaras under mycket lång tid (se avsnitt Bränslecykeln).

Det finns två huvudtyper av lättvattenreaktorer. Den ena typen, kokvattenreaktorer, bygger på att ångan som bildas i reaktorhärden används direkt för att driva turbiner. Den andra typen kallas för tryckvattenreaktorer och har en primärkrets där vatten pga. högt tryck inte kokar. Vattnet har en temperatur om ca 315 °C och avger sitt värme i en värmeväxlare till en sekundärkrets där ångbildning sker. I Sverige finns idag tre kokvattenreaktorer vardera i Forsmark och Oskarshamn samt en i Ringhals (de två nedlagda reaktorerna i Barsebäck var också av denna typ). De tre tryckvattenreaktorerna i Sverige är alla förlagda till Ringhalsverket.

Oavsett typ bygger teknologin på samma grundläggande mekanismer och det som skiljer dem åt är främst olika sätt att kontrollera reaktorerna samt att skillnaderna i konstruktion medför olika strategier för underhåll.

De uppgraderingar som utfördes på de svenska reaktorerna mellan åren 2008-2012 innebar att reaktorernas effekt har höjts. I siffror innebär det att t.ex. Forsmark 3 idag genererar 3300 MW värme och 1200 MW elektricitet, mot tidigare 1050 MW elektricitet.

Reaktorhaverier och deras konsekvenser

Att bemästra de enorma effekter som en reaktor utvecklar är en teknisk utmaning men tekniken har fungerat mycket väl genom åren. Faktum är att den totala drifttiden för världens kraftreaktorer idag är ca 15 000 år och under den tiden har endast tre större haverier inträffat. Men kärnkraftens stora fördel att kontinuerligt kunna generera stora mängder energi kan, vid haverisituationer, även vara till nackdel. Vi ska nu titta på konsekvenserna av tre berömda haverier. Framställningen är endast mycket kortfattad och för en mer genomgripande beskrivning hänvisas till referenserna.

Three Mile Island 1979

Kärnkraftolyckan vid kraftverket Three Mile Island (TMI) utanför Harrisburg blev den direkta orsaken till att vi i Sverige hade en folkomröstning om kärnkraftens framtid.

Själva olycksförloppet började med att en pump för kylvatten till härden stannade, vilket ledde till att hela reaktorn snabbstoppades. Två reservsystem skulle ha kopplats in automatiskt men så skedde inte eftersom personalen glömt att öppna deras ventiler efter ett tidigare underhållsarbete. Bristen på kylning ledde till kraftig ångbildning och ett övertryck i reaktortanken. En säkerhetsventil öppnades automatiskt och släppte ut ånga tills normalt tryck uppnåts, men ventilen fastnade i öppet läge och kylvatten fortsatte att läcka ut, något som personalen inte såg från sin instrumentering. Det nödkylsystem som automatiskt aktiverades misstolkades av personalen som då felaktigt stängde av det. Detta ledde till att reaktorhårdens kylvatten kokade bort och och bränsleskador uppstod. Efter omkring två timmar upptäcktes den fallerande säkerhetsventilen och felet åtgärdades, men härdskadorna hade redan blivit så pass omfattande att det tog ytterligare 16 timmar

innan man lyckades återställa kylningen till härden. Vid det efterföljande saneringsarbetet, som avslutades 1991, visade det sig att mer än halva härden hade drabbats av härdsmälta och delvis fallit ned på botten av reaktortanken [1].

Analysen av olyckan påvisar att ett antal mänskliga felgrepp hade skett, både före och under olycksförloppet. Till detta kom viktiga lärdomar kring design av instrumentering, larmsystem och interaktionen mellan människa och teknik. Säkerhetsanalyser var redan etablerade verktyg inom kärnkraftindustrin men blev ännu viktigare efter olyckan, liksom så kallade MTO-studier (Människa-Teknik-Organisation) där man studerar och förbättrar arbetsmiljön och organisationsformen i syfte att öka säkerheten.

De negativa konsekvenserna i form av utsläpp från detta haveri var synnerligen måttliga. Inga nämnvärda radioaktiva utsläpp skedde och därmed inte heller några strålningsrelaterade hälsoeffekter [2]. Däremot ledde det utdragna olycksförloppet med bristfällig information, samt ryktesspridning, till svår stress för många närboende. Haveriet fick dock två tydliga positiva konsekvenser:

- o Det blev uppenbart att en lättvattenreaktor reagerade på ett sätt som var hanterbart trots att den befann sig i en tekniskt mycket allvarlig situation.

- o Haveriet visade på behovet av förstärkning av de konsekvenslindrande systemen. Detta ledde till att alla reaktorer i Sverige och vissa andra länder förseddes med tryckavlastning och filteranordningar som, i händelse av haveri, minimerar utsläppen av radioaktivt material till försumbara nivåer.

Tjernobyl 1986

Olyckan i Tjernobyl skedde den 26 april 1986 men var okänd för omvärlden till morgonen den 28 april då man vid Forsmarks kärnkraftverk uppmätte förhöjda nivåer av radioaktivitet på området. Det konstaterades snabbt att nedfallet hade sitt ursprung från annat håll och man vände blicken österut, samma kväll bekräftade Sovjetunionen att en olycka skett. Det var ett experiment i syfte att höja säkerheten på reaktortypen RBMK som ledde till olycksförloppet. Experimentet utfördes på ett regelvidrigt sätt där flera säkerhetssystem sattes ur funktion. En fördröjning av experimentet på grund av behov av fortsatt elproduktion förvärrade situationen ytterligare eftersom man inte beaktade vissa fysikaliska fenomen, så kallad xenoneffekt, som sker när man ändrar effektnivån på en kärnreaktor. Utan förståelse för dessa fenomen fortsatte man experimentet och försatte reaktorn i ytterligare ett farligt läge, vilket till slut ledde till en kraftig effektutveckling med två massiva explosioner som följde [3]. Explosionerna förstörde en stor del av reaktorbyggnaden och frigjorde stora mängder radioaktivitet till omgivningen.

Detta haveri måste betecknas som det värsta i kärnkraftens historia och detta av flera skäl:

- o Tekniskt så var det en grafitmodererad reaktor i full effekt som havererade vilket fick till följd att stora delar av reaktorhärden förångades upp i atmosfären. Till skillnad mot västerländska lättvattenreaktorer saknade denna inneslutning vilket förvärrade förloppet avsevärt.

- o Det samhällsklimat som då rådde skapade inte goda förutsättningar för en adekvat ledningsfunktion. Detta gav sannolikt upphov till de

inledande missgreppen som sedan utvecklades till ett fullskaligt haveri.

Vad blev konsekvenserna av detta haveri? Helt klart är att ett stort område i Europa påverkades i mer eller mindre grad. För svensk del handlade diskussionen i stor utsträckning om kontaminerat livsmedel och särskilt renkött, vilt, svamp och bär [4]. I närområdet evakuerades omkring 120 000 personer inom en zon med 30 km radie, däribland samtliga innevånare i staden Pripjat. Senare fick ytterligare 230 000 människor flytta till områden med lägre mängder nedfall. För närvarande pågår byggandet av en sarkofag runt den drabbade reaktorn för att minska genomströmning av regnvatten och för att på sikt möjliggöra en rivning av kärnkraftverket.

Det har gjorts ett antal utredningar genom åren om hur många omkomna som haveriet egentligen orsakade. Det är en stor spridning i resultaten vilket illustrerar svårigheten att dels kunna isolera orsakssammanhanget mellan stråldos och dödsfall och dels att dokumentationen är bristfällig. Den mest konkreta hälsoeffekten, förutom psykosomatiska effekter på grund av rädsla, är det stora antalet barn och ungdomar som drabbats av sköldkörtelcancer. Fram till 2005 har drygt 6000 fall upptäckts, varav 15 har avlidit [5]. Världshälsoorganisationen WHO hävdar att 37 av de 134 räddningsarbetare som drabbades av akuta strålskador har avlidit fram till år 2004 [6]. Till detta prognosticeras enligt de antagna riskmodellerna att ca 4000 människor i närområdet kan komma att dö av cancer som en konsekvens av strålning från haveriet, ytterligare 5000 människor i övriga Ryssland, Ukraina och Vitryssland [7], samt några tusen till globalt. Osäkerheten i uppskattningarna är stora, inte minst på grund av att det inte går att uppmäta dessa dödsfall när hundratusentals människor i området ändå kommer att avlida i cancer som uppkommit

av andra orsaker. En annan svårighet i bedömningarna är också att Sovjetunionens sammanbrott ledde till drastiskt försämrad levnadsstandard med kortare medellivslängd och andra hälsoeffekter som följd.

Fukushima Daiichi 2011

Den 11 mars 2011 drabbades Japan av den största jordbävningen i landets historia. Jordbävningen med magnitud 9,0 på Richterskalan skedde ute i havet och orsakade en serie tsunamier som slog in över den japanska östkusten. Städer, industrier och annan infrastruktur sveptes med av vattenmassorna och antalet döda och saknade uppgår till nästan 20 000 personer, samt över 200 000 människor som förlorat sina hem.

Flera kärnkraftverk längs östkusten snabbstoppades vid jordbävningen. Kraftverket i Fukushima Daiichi hade förlorat kontakten med det yttre elnätet och reaktorernas kylning försörjdes med el från reservdieslar. När tsunamin slog in vid kraftverket dränktes dieslar och reservbatterier, vilket ledde till totalt elbortfall vid tre av de sex reaktorerna. Svårigheterna med att återupprätta kylningen av reaktorerna var enorma på grund av den kombinerade skadegörelsen från jordbävningen och tsunamin, och inom några dagar hade tre reaktorer drabbats av härdsmälta och vätgasexplosioner som orsakade ytterligare förödelse på området [8].

Utsläppen av radioaktivitet från reaktorhårdarna var de största efter Tjernobyl och ledde till att över 100 000 personer i närområdet fick evakueras, många av dem kommer inte kunna återvända till sina hem inom överskådlig tid. Ett saneringsarbete pågår och man reducerar gradvis omfattningen av de evakuerade zonerna så att återflytt blir möjlig. Enligt en rapport från UNSCEAR kommer man inte

kunna uppmäta någon ökning i cancerstatistiken bland allmänheten som en följd av olyckan, men man kan inte utesluta en märkbar ökning av antalet fall av sköldkörtelcancer [9]. Därför genomför man systematiska sköldkörtelundersökningar av alla barn i området, i syfte att kunna följa och hantera situationen. Bland räddningsarbetarna vid kraftverket har ett hundratal fått relativt stora stråldoser men det kommer att bli svårt att koppla några cancerfall i den gruppen till olyckan. Vid evakuering av äldreboenden och sjukhus avled drygt 50 personer av umbäranden, och man uppskattar att omkring 1600 personer har avlidit på grund av usla levnadsförhållanden och psykologiska effekter [10].

Det kan noteras att de Japanska reaktorerna inte var försedda med de ovan nämnda filteranordningarna som skulle möjliggjort att släppa ut den bildade vätgasen innan den hann samlas och antändas. Haveriet skulle således fått ett helt annat förlopp om dessa system varit installerade. Det finns också andra säkerhetsförbättringar som genomförts på motsvarande reaktorer i USA men som inte implementerades i Japan. En parlamentarisk utredning har kommit fram till att olyckan var ”an accident made in Japan” där kulturella och organisatoriska förhållanden förvärrade situationen. En omorganisation av tillsynsmyndigheterna pågår för att bryta den intima kopplingen mellan regering, myndigheter och kärnkraftindustrin.

I debatten förekommer ofta våldsamt överdrivna uppgifter om konsekvenserna av ett reaktorhaveri. Siffror som att över en miljon människor ska ha dött som en konsekvens av strålning efter haveriet i Tjernobyl figurerar [11] och kritiken av dessa studier belyser flera problem med trovärdighet och bristande metodik [12]. Men som framgått av framställningen ovan har konsekvenserna av de tre stora reaktorhaverierna varit relativt sett små, räknat i mängd radioaktivt

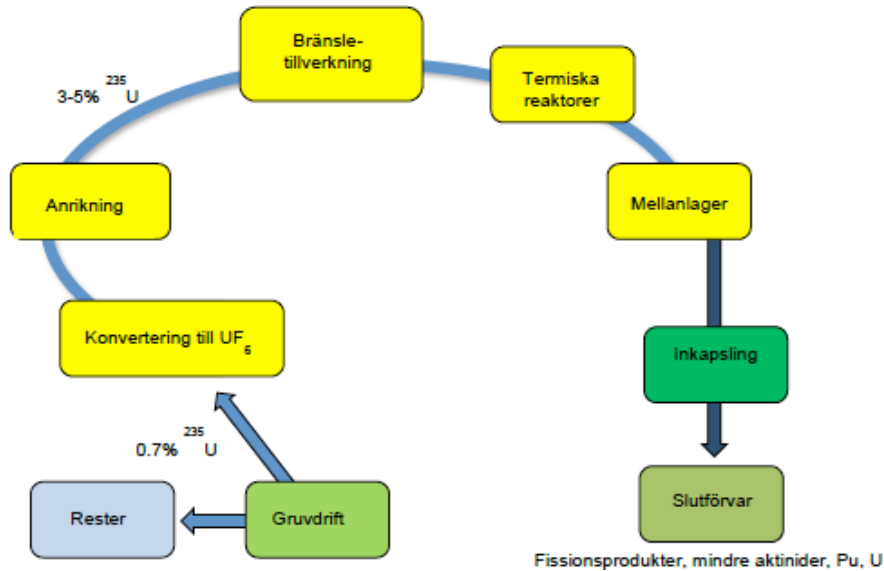
utsläpp och antal döda. Räknat per total drifttid för världens reaktorer finner man att kärnkraften hittills har stått för mindre än ett dödsfall per år globalt. Den betydelsefulla konsekvensen av ett reaktorhaveri är alltså snarare av socioekonomisk än av radiologisk natur.

Ett haveri orsakar stora kostnader för samhället i form av utebliven produktion och att människor drabbas av psykosomatiska tillstånd [13]. Andra indirekta effekter är t.ex. att Japan har tvingats avsäga sina åtagande i Kyotoprotokollet genom att man tvingats att importera stora mängder fossila bränslen för att ersätta de stoppade reaktorerna. 2012 var den direkta kostnaden för detta 289 miljarder dollar per år eller närmare fem miljarder kr per dygn [14]. Den indirekta kostnaden för Japan på grund av konsekvenserna av försämrad handelsbalans, minskad produktion, drastiskt ökade luftföroreningar och utsläpp av stora mängder koldioxid har vi ännu inte sett.

Bränslecykeln

Bränslecykeln är det sammanfattande namnet på hela kedjan som leder fram till elproduktion med kärnkraft. I figur 1 visas schematiskt en variant på bränslecykeln, den s.k. ”öppna” bränslecykeln vilken Sverige hittills har anammat.

I korthet ser bränslecykeln ut på följande vis. På flera håll i världen bryts uranmalm och denna malm förädlas till något som kallas uranhexafluorid. Detta är råmaterialet för den vidare hanteringen som innefattar att höja halten U-235 från 0,7 procent till mellan 3 och 5 procent i s.k. anrikningsanläggningar.



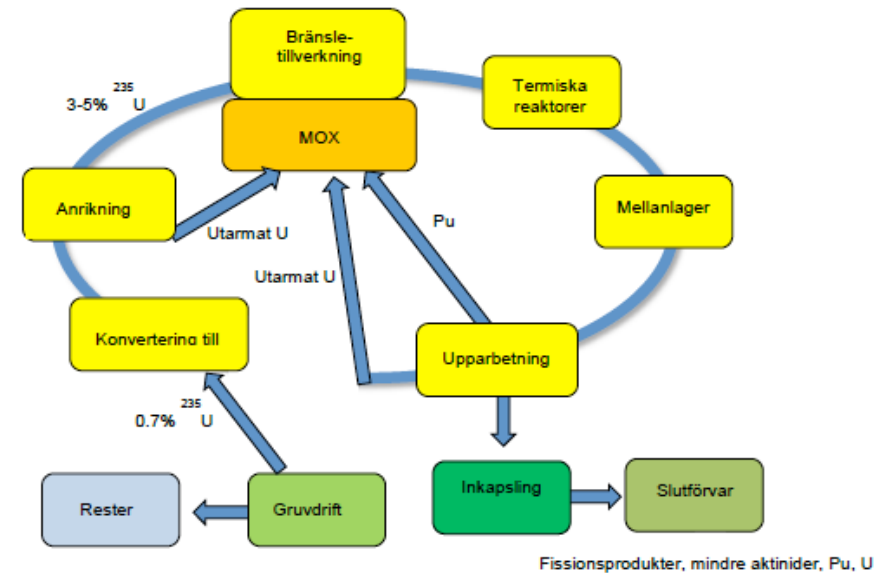
Figur 1. Den öppna bränslecykeln.

Materialet skeppas därefter ut till världens bränsletillverkare (t.ex. Westinghouse i Västerås) där bränslet sammansätts till bränsleelement. Bränslet forslas sedan till kärnreaktorer där de utnyttjas i fem till sex år för att därefter ersättas med nytt bränsle. Det använda bränslet låter man svalna under ca ett års tid i bassänger på kärnkraftverket.

Sverige har en väl utbyggd logistik för det använda bränslet i och med att bränslet efter kylning transporteras med båt till mellanförvaringsanläggningen Clab i Oskarshamn. I Clab kyls den kvarvarande värmen i bränslet till stora delar bort under trettio till fyrtio år. Enligt den s.k. KBS-3 metoden ska bränslet därefter transporteras till inkapsling och slutligen placeras i ett slutförvar [15].

Som framgår av figur 1 innehåller det använda bränslet relativt kortlivade fissionsprodukter samt tyngre och i allmänhet betydligt mer

långlivade grundämnen såsom rester av det plutonium som inte utnyttjats i reaktorn, curium och americium bara för att nämna några. De senare grundämnena och i synnerhet plutoniumet är de främsta skälen till att man vill isolera bränslet i så lång tid som 100 000 år. I länder där man av tekniskt-ekonomiska skäl vill minska volymen på det utbrända bränslet upparbetar man materialet genom att sluta bränslecykeln som figur 2 visar.



Figur 2. Den slutna bränslecykeln.

Fördelen med den slutna bränslecykeln är att man åstadkommer en bättre utnyttjandegrad av bränslet med 20-30 procent. Nackdelen är att reaktorplutonium förekommer i fri form i processen vilket utgör en potentiell grund för kärnvapenproduktion. Av det skälet har upparbetningsanläggningar uppförts endast i kärnvapenstater. En anläggning i

Rokkasho i Japan förväntas dock komma i drift under 2014 och där har massiva kontrollåtgärder införts för att världssamfundet ska kunna övertyga sig om att anläggningen drivs i civilt syfte. Med dagens reaktorteknologi upparbetas bränslet en gång eftersom vinsten att upparbeta flera gånger drastiskt minskar.

En tredje variant av bränslecykel är den som hör till fjärde generationens kärnkraftssystem som främst kännetecknas av en kontinuerlig upparbetning eller återvinning som det här kallas. Denna bränslecykel presenteras i Appendix 6.

-

Referenser

1. Analysgruppen vid KSU, "Tio år efter Harrisburg", Bakgrund Nr 2, mars 1989. <http://www.analys.se/lankar/Bakgrunder/1989/Bkg%202-89.pdf>
2. U.S. Nuclear Regulatory Agency, "Backgrounder on the Three Mile Island Accident", February 2013. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>
3. Per Persson, "Haverier och händelser som påverkat säkerhetsarbetet inom kärnkraften", kursmaterial, Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB, 1987.
4. Leif Moberg, "Kärnkraftsolyckan i Tjernobyli . En sammanfattning femton år efter olyckan", SSI rapport: 2001:07, april 2001, ISSN 0282-4434. <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Publikationer/Rapport/Stralskydd/2001/200107-Karnkraftsolyckan-i-Tjernobyli-En-sammanfattning-femton-ar-efter-olyckan/>
5. UNSCEAR, "Sources and effects of ionizing radiation, Volume II – Scientific Annexes C, D and E", United Nations, 2011, ISBN-13: 978-92-1-142280-1. http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_2.html
6. World Health Organization, "Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes", eds. B. Bennet et al., Geneva, 2006, ISBN 92 4 159417 9. http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/en/
7. Elisabeth Cardis et al., "Estimates of the Cancer Burden in Europe from Radioactive Fallout from the Chernobyl Accident", Int. J. Cancer 119 (2006) 1224-1235. <http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2006/pr168.html>
8. INPO, "Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", Institute of Nuclear Power Operations , INPO 11-005 , december 2012. http://hps.org/documents/INPO_Fukushima_Special_Report.pdf
9. UNSCEAR, "Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami", Geneva, 2013, ISBN 978-92-1-142291-7. <http://www.unscear.org/unscear/en/fukushima.html>
10. Reconstruction Promotion Committee, "FY2012 Interim Report", Reconstruction Agency, December 2012, sid 8. http://www.reconstruction.go.jp/english/topics/20121228_FAINAL_CHUKAN.pdf
11. Alexey V. Yablokov et al., "Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment", New York Academy of Sciences, Vol 1181, 2009.
12. M. I. Balonov, "On protecting the inexperienced reader from Chernobyl myths ", J. Radiol. Prot. 32 (2012) 181–189.
13. Geoff Brumfiel, "Fallout of fear", Nature Vol. 493 (2013) 290-293. <http://www.nature.com/news/fukushima-fallout-of-fear-1.12194>
14. Ross McCracken, "The burden that Japan is facing in its higher energy costs", Energy Economist, 24 januari, 2014.
15. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, http://www.skb.se/Templates/Standard_14883.aspx

Appendix 6

Fjärde generationens kärnkraftssystem

Professor Ane Håkansson, tillämpad kärnfysik

Under ett par decennier har ett samordnat internationellt forsknings- och utvecklingsarbete pågått syftande till att lösa de faktiska och upplevda problemen med dagens kärnkraftsteknik. Detta arbete har Generation IV International Forum, GIF [1] som en viktig plattform. GIF startade 2000 och består idag av tolv medlemsstater samt EU. Inom GIF har man kommit överens om ett antal målområden som arbetet inom fjärde generationens kärnkraftssystem (Gen IV) ska uppmärksamma:

- o Uthållighet
- o Ekonomi
- o Säkerhet och pålitlighet
- o Motstånd mot avledning av klyvbart material

Det är naturligtvis underförstått att Gen IV ska överträffa dagens teknologi i all dessa avseenden. Det skulle i det här sammanhanget föra för långt att i detalj gå igenom varje mål så vi ska istället ta oss en titt på hur bränslecykeln för ett Gen IV system kan se ut och hur denna samverkar med målområdena. Men först något om bakgrunden.

En fundamental del i ett Gen IV system är återvinning. Detta eftersom dagens kärnkraftssystem utnyttjar naturresurserna dåligt. Visserligen får man ut mängder av nyttig energi men bara 0.6 procent av natururanet utnyttjas och det skapar ett antal problem som måste hanteras. Ett sådant är att det genereras stora mängder utarmat uran som man i dagsläget har svårt att få användning för (till för ett par decennier sedan användes utarmat uran som ballast i segelbåtar, för att ta ett exempel).

Dagens kärnkraftsteknik förutsätter också att uranet anrikas och denna process kan missutnyttjas för kärnvapentillverkning. Denna aspekt har i dagsläget kanske mindre betydelse då anrikning sker i kärnvapenstaterna men som exemplet Iran visar tekniken skapa osäkerhet om landets egentliga syfte med anrikningsverksamheten.

Alltså, om vi kan finna en teknologi som utnyttjar hela energiinnehållet i natururanet slipper vi dels anrikningen och dels hushåller vi avsevärt mycket bättre med naturens resurser. För att kunna göra det måste vi: 1) utveckla en teknik för att återvinna det klyvbara innehållet i avfallet från reaktorerna och 2) använda så kallade ”snabbreaktorer”.

En viktig del i Gen IV systemet är alltså återvinning av utbränt bränsle. Som nämnts i Appendix 5 sker idag kommersiell upparbetning av utbränt bränsle. Främst i kärnvapenstaterna, dock inte i USA för närvarande. Den vanligaste tekniken för upparbetning kallas för PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction) som är mycket effektiv. Problemet med den är att plutonium förekommer i fri form i processen och därmed är denna teknik inte lämplig att implementera i alla delar av världen. Här ska det sägas att så kallat reaktorplutonium inte är ett lämpligt material att utgå från om man vill tillverka kärnvapen men det kan, om stora resurser ställs till förfogande, omformas till användbart material.

Ett annat problem med PUREX i ett Gen IV perspektiv är att ämnen som benämns mindre aktinider, som t.ex. americium, inte separeras utan hamnar i avfallsströmmen. Utan att gå in på detaljer vore det ur såväl energi- som ur avfallsynpunkt mycket önskvärt att även dessa ämnen kunde separeras och användas som bränsle.

Av det skälet studeras numera ett antal olika teknologier som dels separerar mindre aktinider och dels ser till att plutonium inte uppträder

i fri form. Syftet är att separera ut allt material som inte går att utvinna nyttig energi ur och som därmed blir avfall i ordets rätta bemärkelse. Detta material som idealt består av fissionsprodukter, är relativt kortlivade vilket innebär att avfallet ur radiologisk synpunkt behöver slutförvaras i endast några hundra till tusen år istället för hundratusen år.

Forsknings- och utvecklingsarbetet med återvinningsprocesserna pågår utmed två spår där det ena innebär att man genom speciell elektrolys (s.k. pyroprocessning) separerar ut material som kan användas till nytt bränsle och det andra spåret att man utnyttjar kemiska metoder liknande PUREX. Det förra spåret utreds framförallt av USA och Sydkorea under det att det senare utvecklas främst i Europa. Genom att allt klyvbart material separeras ut och används brukar processningen av det använda bränslet kallas för ”återvinning” till skillnad mot dagens ”upparbetning”.

En snabbreaktor använder inget modererande medium (se Appendix 5), tvärtom vill man att neutronerna ska bromsas in så lite som möjligt av kylmediet, därav benämningen snabbreaktor. Lämpliga kylmedier är smält metall som t.ex. bly eller natrium och till och med kvicksilver. Andra kylmedier man har studerat är gaser av olika slag. Snabbreaktorer tillhör som koncept några av de första som utvecklades där t.ex. Clementine i USA startade redan 1946 (se tabell 1). Sedan dess har en stor mängd snabbreaktorer startats i framförallt USA, Frankrike och Ryssland. De flesta av dessa var experiment- och demonstrationsreaktorer men några har också varit i kommersiell drift som t.ex. Superphenix i Frankrike (1985-98). Tekniken kan i många avseende sägas vara mogen men fortfarande krävs utvecklingsarbete för att reaktorerna dels ska uppfylla dagens mycket högt ställda säkerhetskrav och dels ska kunna anpassas till olika krav och önskemål.

Tabell 1. Några snabbreaktorer i historien.

Reaktor	Land	Kritisk	Kylmedel	Effekt [MW _e]
Clementine	USA	1946	Hg	0.023
EBR-1	USA	1951	Na/K	1.4
BN-2	Ryssland	1956	Hg	0.1-1
BR-5/BR-10	Ryssland	1958	Na	5/8
DFR	UK	1959	Na/K	60
Fermi	USA	1963	Na	200
EBR-II	USA	1963	Na	62.5
Rapsodie	Frankrike	1967	Na	40
BOR-60	Ryssland	1968	Na	55
SEFOR	USA	1969	Na	20
KNK-II	Tyskland	1972	Na	58
BN-350	Kazakstan	1972	Na	750
Phenix	Frankrike	1973	Na	563
PFR	UK	1974	Na	650
FFTF	USA	1980	Na	400
BN-600	Ryssland	1980	Na	1470
JOYO	Japan	1982	Na	140
FBTR	Indien	1985	Na	40
Super-Phenix	Frankrike	1985	Na	3000
MONJU	Japan	1995	Na	714

Reaktor	Land	Kritisk	Kylmedel	Effekt [MW _e]
PFBR	Indien	2014?	Na	500
BN-800	Ryssland	2014?	Na	880
BN-1200	Ryssland	2018?	Na	1200
Toshiba 4S	Japan	2020?	Na (Pb?)	10
KALIMER	Sydkorea	2030?	Na	600
ASTRID	Frankrike	2027	Na	600
ALFRED	EU	?	Pb	125
ALLEGRO	EU	?	He	75 (t)
SSTAR	USA	?	Pb (Bi)	10-100 (t)
BREST-300	Ryssland	?	Pb	300
SVBR-100	Ryssland	2017?	Pb (Bi)	100

Tabell 2. Nu aktuella snabbreaktorprojekt i världen.

För närvarande byggs ett antal snabbreaktorer i olika delar av världen. Dessa är sammanställda i tabell 2. Värt att notera är det franska ASTRID-projektet där Sverige deltar i forskningen genom att främst doktorander arbetar med olika aspekter av reaktorn.

I figur 1 visas schematiskt hur bränslecykeln för Gen IV kan se ut. Det använda bränslet från dagens reaktorer går efter mellanförvaring till återvinning där alla fissionsprodukter separeras och går till slutförvar. Plutonet separeras i en ström tillsammans med mindre aktinider och uran.

Denna blandning är oattraktiv att göra kärnvapen av och man bygger



Figur 1. Bränslecykeln för fjärde generationens kärnkraftssystem.

på så sätt in ett motstånd för olovlig avledning av klyvbart material. Materialet blandas sedan upp med utarmat uran och nytt bränsle tillverkas. Detta bränsle används sedan i snabbreaktorer som har egenskapen att kunna utvinna energi ur denna blandning av material, något som dagens reaktorer inte klarar av.

Utvecklingsarbetet med återvinningen koncentreras nu på att få tekniken kommersiellt gångbar. En viktig del är därför att maximera separationseffektiviteten d.v.s. att det genererade avfallet är så fritt som möjligt från klyvbart material. Även om forskarna i princip vet hur detta ska göras behövs mer arbete framöver för att åstadkomma en praktiskt och därmed en industriell användbar teknik.

I nedanstående punkter sammanfattas fördelarna med fjärde generationens kärnkraftssystem:

- o Hundra gånger bättre utnyttjande av naturresurserna än dagens teknik. Detta innebär att om vi idag får ut ca 100 000 gånger mer energi per kg kärnbränsle än vi får av motsvarande mängd brännolja så kan fjärde generationens kärnkraftssystem öka denna faktor till 10 000 000 gånger.
- o Använt bränsle kan användas. Exempelvis: Sveriges använda kärnbränsle kan ge lika mycket energi som dagens kärnkraft i tusentals år.
- o Uthålligheten ingen praktisk fråga.
- o Väsentligt mindre volym av långlivat avfall.
- o Avfallets effektiva halveringstid väsentligt kortare.
- o Nya tekniker för återvinning leder till ökad säkerhet mot spridning av klyvbart material.
- o Ingen gruvbrytning under överskådlig tid.
- o Ingen anrikning nödvändig.

Ytterligare information om aktuell utveckling inom detta område redovisas i ref. [2]

Camilla Odhnoff: "Avfall är vad som är kvar när fantasin tagit slut"

Referenser

1. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
2. <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/>

Appendix 7

Kärnämneskontroll för framtida kärnkraftssystem

Fil Dr. Sophie Grape, tillämpad kärnfysik

I debatten framhålls stundom att det finns band mellan civil kärnkraft och kärnvapen. Somliga debattörer [se t.ex. Eva Moberg i UNT] hävdar att civil kärnkraft är så sammanflätad med kärnvapen att den måste läggas ned omedelbart. Delar av kärnbränslecykeln kan missutnyttjas och av det skälet har världssamfundet infört ett omfattande kontrollsystem syftande till att allt klyvbart material i världen skall vara bokfört och att kärnkraftverken drivs på ett sätt som är förenligt med civil verksamhet. I detta avsnitt diskuterar vi hur denna s.k. kärnämneskontroll kan utformas i ett framtida kärnkraftssystem.

Kopplingen kärnvapen och kärnkraft

Den civila kärnkraften, som utnyttjas för att producera elektricitet, växte fram under 1950- och 1960-talet som ett fredligt sätt att utnyttja teknologin som först togs fram i syfte att tillverka kärnvapen under slutet av andra världskriget. Kärnkraften kom således först *efter* framställningen av kärnvapen. Kunskapen om hur fissionsprocessen fungerar är varken ond eller god, utan just en kunskap, och fissionsprocessen i sig sker naturligt såväl som kontrollerat. Kärnkraft är inte heller en förutsättning för kärnvapen, vilket vissa oroar sig för, utan snarare visar historien att kärnvapenframställningen banade väg för kärnkraften. Och oavsett om vi i Sverige använder teknologin för elproduktion eller inte, kommer risken för missbruk av kunskapen, och teknologin,

alltid att finnas. Av just denna anledning har den sk *kärnämneskontrollen* för verifikation av teknologins fredliga användande tagits fram. Detta skedde i slutet av 1950-talet i samband med etablerandet av FN-organet IAEA (Internationella Atomenergiorganet).

Vad är kärnämneskontroll?

Då kärnkraften är förknippad med risken att teknologin kan missbrukas i syfte att framställa kärnvapen, innebär en eventuell kärnkraftexpansion ett kraftigt ökat fokus på det fält som kallas *kärnämneskontroll*. Detta område beskriver aktiviteter som syftar till att kontrollera och begränsa risken att känsliga material och teknologier används i syfte att framställa kärnvapen. Rent konkret innebär det i dagsläget i stor utsträckning att begränsa tillgången på material (kärnämne) och teknologier som på ett fredligt vis används inom kärnkraftsområdet, att noggrant bokföra, dokumentera och övervaka hanteringen av kärnämne samt att inspektera kärntekniska anläggningar. Utan civil kärnkraft skulle vi inte ha någon kärnämneskontroll, och således helt sakna möjlighet att verifiera att dessa kärntekniska aktiviteter och anläggningar inte missbrukas.

Vi som forskar inom området förespråkar i samband med introduktionen av framtida kärnkraftssystem ett omtag av kärnämneskontrollen, där vi för första gången har möjlighet att designa kärnämneskontrollsystemet *innan* kärnkraftsystemen i detalj tas fram eller implementeras, vilket möjliggör både bättre, effektivare, mer väldesignad och dessutom billigare kärnämneskontroll.

Möjligheter och utmaningar för den framtida kärnämneskontrollen

Framtidens kärnkraftssystem rör i stor utsträckning så kallade Generation IV system (Gen IV), som syftar till att vara ekonomiskt fördelaktiga, långsiktigt hållbara, generera minimalt med avfall och minimera risken att de missbrukas för icke-fredliga ändamål. Som namnet antyder ingår själva reaktorn i ett *system*, som till skillnad från dagens kärnkraft bygger på återvinning av det använda kärnbränslet. Detta i sig förutsätter en storskalig utbyggnad av bränsleåtervinningsanläggningar och bränslefabriker, där den första är mycket känslig ur ett icke-spridningsperspektiv. Antingen kan sådana anläggningar bli respektive kärnkraftslands angelägenhet, eller så kan man försöka centralisera sådana anläggningar vilket kan få ökade transporter av känsligt material till följd.

Framtida kärnkraftssystem, och speciellt Gen IV-system, erbjuder samtidigt stora fördelar ur ett kärnämneskontrollsperspektiv, givet att man redan från början designar systemen med kärnämneskontrollsbehoven i åtanke. Fördelarna med Gen IV systemen rör sig huvudsakligen om följande aspekter:

- 1) genom att kontrollera och även minska materialmängder som vi i dagens kärnkraftcykel betraktar som avfall och som vi planerar att slutförvara under hundratusentals år,
- 2) genom att korta ner lagringstiden för det material som riskerar att hamna i händerna på människor eller organisationer som missbrukar det,

3) genom att erbjuda ett sätt att minska både civila och militära lager av plutonium och höganrikat uran innehållandes material kan användas för kärnvapenframställning, samt

4) genom att på sikt och vid ett utbrett implementerade av Gen IV-reaktorer som är i stort sett självförsörjande på bränsle eliminera behovet att anrikningsanläggningar, vilka har identifierats som mycket känsliga ur ett (icke-)spridningsperspektiv.

Punkt 1) har att göra med att Gen IV-reaktorerna kan drivas i både sk "breeder" och "burner" läge. Det förstnämnda innebär att man skapar nytt bränsle under drift och därmed i större utsträckning göra reaktorerna självförsörjande på bränsle, och det sistnämnda att man kan mata reaktorerna med sådant vi idag betraktar som kärnavfall (använt kärnbränsle) för att "bränna upp det" genom att använda det som bränsle för elproduktion.

Punkt 2) möjliggörs genom den teknik som redogörs för i Appendix 6. Detta gäller speciellt den grupp av grundämnen som kallas aktinider såsom t.ex. plutonium, curium och americium och som dikterar den långa förvaringstid vi ser framför oss för slutförvaret.

Punkt 3) i listan har att göra med att de framtida reaktorerna där kärnklyvning sker mha neutroner med höga energier är det enda sätt som finns att faktiska göra sig av med klyvbart material, såsom plutonium, vilket kan användas för kärnvapenframställning. Det finns i dagsläget inga andra alternativ, utom att förvara det under överskådlig tid.

Den sista punkten kopplar till punkt 1) som beskrev att reaktorerna kan drivas i ett nästintill självförsörjande läge. Detta läge innebär att de

första gången laddas med t ex plutonium för att få igång kedjeprocessen av kärnklyvning, men att de i fortsättningen kan fyllas på med t.ex. naturligt eller utarmat uran. Detta kan i sin tur medföra ett på sikt eliminerat behov av urananrikningsanläggningar, vilka idag betraktas som en av de allra känsligaste i kärnbränslecykeln.

Ovan nämnda fördelar uppnås genom en medveten satsning på att bara främja och marknadsföra sådana kärnkraftssystem som har ett inbyggt motstånd mot att missbrukas för vapenändamål. Detta kräver i sin tur dedikerade satsningar på olika bränsleåtervinningstekniker som i största möjliga utsträckning gör materialen oattraktiva för vapensyften, på reaktordesigner som inte lätt kan anpassas från civilt till militärt bruk, samt på materialhanterings- och transportfrågor inom och mellan stater. Dessa aspekter, och fler därtill, brukar innefattas i det som kallas *Safeguards-by-design*, där man införlivar kärnämneskontrollen på tidigast möjliga utvecklingsstadium för nya kärnkraftssystem, i syfte att öka dess effektivitet, acceptansen i samhället och samtidigt minska kostnader

Appendix 8

Kärnkraft, opinion och rädsla

Tekn. Dr. Mattias Lantz

Kärnkraften är ett utan tvekan ett kontroversiellt ämne, både politiskt och som middags-konversation. Den som följer debatten och medias rapportering kan notera två påståenden som ibland upprepas: att kärnkraften inte diskuteras tillräckligt vare sig politiskt, i media eller bland allmänheten, och att media ger en vinklad bild av kärnkraften. Intres

sant nog hörs dessa påståenden såväl från anhängare som från motståndare till kärnkraft. En naturlig tolkning av detta är att vardera sidan anser att det är just deras frågor som inte kommer fram i debatten eller i mediarapporteringen.

Som exempel kan nämnas tidningen Filters reportage (mars 2014) om transporter av ämnet uranhexafluorid [1] som används vid tillverkning av kärnbränsle. Den som är positivt inställd till kärnkraft upplever att artikeln, och den efterföljande mediarapporteringen, överdriver riskerna och inte nämner att andra ämnen med potentiellt större konsekvenser transporteras på liknande sätt enligt samma regelverk. En kärnkraftmotståndare kan av samma rapportering uppröras över att medias intresse så snabbt mattades av, att frågan inte kom upp på det politiska planet, och att transporterna får fortsätta. Båda sidor kan med visst fog hävda att rapporteringen varit osaklig och att inte lett till ökad kunskap hos allmänheten, som av båda parter anses vara alltför okunnig om dessa frågor.

Vad tycker då svenska folket om kärnkraften, och vad vill de göra med den? Vilka är det som står för motståndet respektive stödet för kärnkraft? Vad är det man är rädd för kring kärnkraften?

Opinionsundersökningar

Sedan 1970-talet, då kärnkraften dök upp i den politiska diskussionen på allvar, har opinionsundersökningar genomförts av olika aktörer. Ofta har undersökningarna genomförts vid enstaka tillfällen med frågeställningar som avpassats för en aktuell situation. Två aktörer genomför dock upprepade opinionsundersökningar där samma eller likartade frågor används flera år i följd:

- o SOM-institutet vid Göteborgs universitet har sedan 1986 genomfört en årligen återkommande opinionsundersökning, där det tillfrågade

personerna får en via posten hemskickad enkät att fylla i. Enkäten innehåller ett stort antal samhällsfrågor, inklusive några om inställningen till kärnkraft och andra energislag. Förutom rapportering till media publiceras resultaten i form av rapporter och böcker [2].

- o Analysgruppen vid Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB i Studsvik har sedan 1997 låtit etablerade opinionsinstitut, f.n. Novus, genomföra telefon- och webbintervjuer där de tillfrågade får svara på olika frågor kring kärnkraft. Undersökningarna genomförs ungefärligen halvårsvis och rapporteras till media samt publiceras på Analysgruppens websida [3].

I båda undersökningarna ställs en fråga med innebörden ”vad tycker du att Sverige ska göra med sin kärnkraft”, följt av några svarsalternativ. Svartsalternativen har ändrats något i ordalydelse genom åren, och ibland har antalet alternativ ändrats, men i grova drag följer svartsalternativen de tre linjerna vid folkomröstningen 1980, så som de allmänt uppfattades. Inom parentes ges resultatet för de olika svartsalternativen i folkomröstningen:

- o använd och vid behov utveckla den kärnkraft vi har idag (Linje 1: 18,9 %)

- o använd de kärnkraftverk vi har idag men bygg inte nya (Linje 2: 39,1 %)

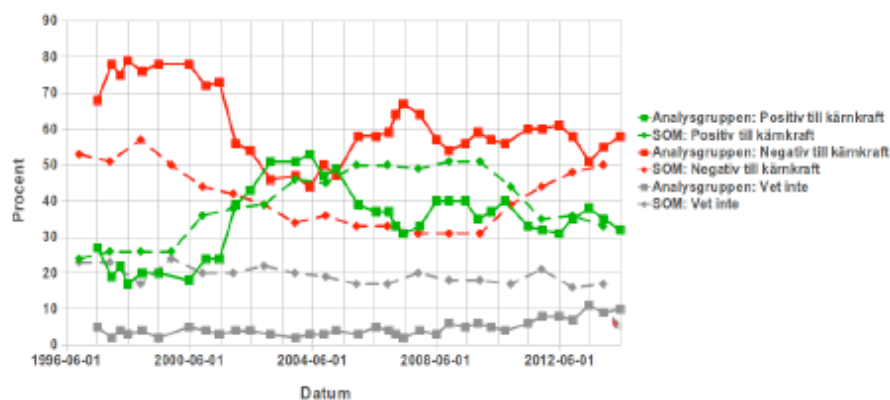
- o avveckla kärnkraften nu/snarast möjligt (Linje 3: 38,7 %)

Notervärt är att små variationer i svartsalternativens formulering ger olika fördelning i resultaten, och skillnaden i intervjumetod (telefonintervju, webbintervju eller postenkät) påverkar också resultaten.

Bland annat är det fler som svarar ”vet inte” i webbintervjuer och postenkäter när man har tid att tänka efter.

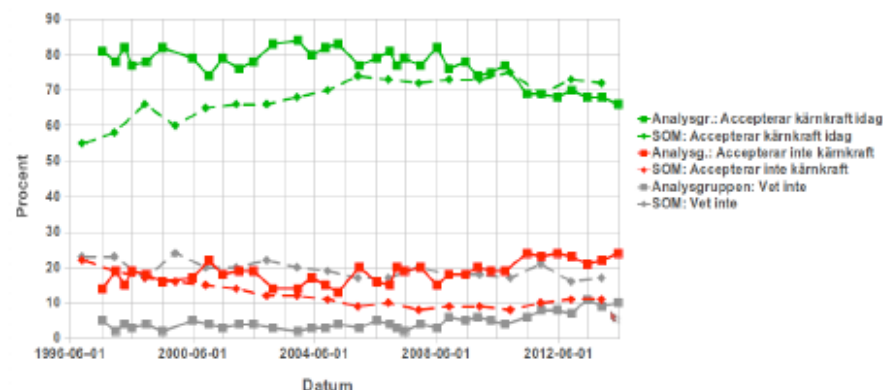
Figur 1 visar fördelningen av svarsalternativen från de båda undersökningarna sedan år 1996 om man lägger ihop alternativen förtida avveckling och avveckling när dagens kraftverk tjänat ut (negativa till kärnkraft) och jämför med de som vill ha fortsatt användning av kärnkraften (positiva till kärnkraft). Man kan också lägga ihop de två första alternativen och beteckna dessa som ”acceptans”, dvs. att man de facto accepterar den kärnkraft vi har idag, se Figur 2.

Positiv eller negativ till kärnkraft: Analysgruppen vs SOM 1996-2014



Figur 1. Jämförelse av SOM-institutets och Analysgruppens opinionsundersökningar om svenska folkets inställning till kärnkraft vid sammanslagning av olika svarsalternativ. Här jämförs de sammanslagna alternativ som indikerar positiv eller negativ inställning till svensk kärnkraft.

Acceptans eller negativ till kärnkraft: Analysgruppen vs SOM 1996-2014



Figur 2. Jämförelse av SOM-institutets och Analysgruppens opinionsundersökningar om svenska folkets inställning till kärnkraft vid sammanslagning av olika svarsalternativ. Här jämförs de sammanslagna alternativ som indikerar acceptans eller icke acceptans för den kärnkraft vi har idag.

För båda alternativen kan för de senaste tio åren skönjas ett långsamt ökande kärnkraftmotstånd, med några intressanta slutsatser:

- o Fördelningen kring olika svarsalternativ och tidstrender är i stora drag snarlika mellan de två undersökningarna, även om individuella skillnader kan göra sig rejält gällande vissa tidsperioder.

- o Olyckorna i Tjernobyli och Fukushima har påverkat opinionen något i negativ riktning men inte så mycket. Den kraftiga opinionen mot kärnkraften direkt efter Tjernobyliolyckan mattades av väldigt snabbt.

- o Andelen av befolkningen som accepterar att vi har kärnkraft idag är omkring 70 % och har varit så under många år, det är omkring 20 %

som förespråkar förtida nedläggning. Detta är i kontrast till fördelningen av opinionen bland riksdagens ledamöter, där en större andel är emot kärnkraft.

Man kan med andra ord konstatera att den svenska allmänheten har ett ganska avspänt förhållande till kärnkraften. Många vill bli av med den på sikt, men det är endast 20 % av befolkningen som vill ha en förtida avveckling innan reaktorerna har tjänat ut. Detta ska jämföras med resultatet från folkomröstningen där 38,7 % röstade för Linje 3. Omvänt är det bara en tredjedel av befolkningen som är uttalat positiv till fortsatt användning av kärnkraften, men det är mer än de 19 % som röstade på Linje 1 vid folkomröstningen.

Kärnkraften som politisk fråga

Politiskt var diskussionen om kärnkraftens vara eller icke vara till en början en fråga om huruvida Sverige skulle ha atombomber eller inte. Kärnkraft för elproduktion var tämligen okontroversiellt även om det förekom heta diskussioner om vilken slags kärnkraft som var lämpligast. Det kunde finnas lokalt motstånd mot att ha kärntekniska anläggningar just i sin närhet, men det var sällan fråga om ett principiellt motstånd mot själva kraftformen [4]. Detta ska också ses i ljuset av att man inte ville bygga ut fler älvar med vattenkraft, kärnkraften framstod då som ett miljövänligt alternativ.

År 1971 fick riksdagsledamoten Birgitta Hambreus (C), i uppdrag från sitt parti att utreda kärnkraftens risker. Hon uppmärksammade de långa tidsaspekterna kring förvaring av det använda bränslet, en fråga som fram tills dess knappt hade diskuterats alls. Hambreus kom i kontakt med nobelpristagaren Hannes Alfvén och sammanförde honom med partiledaren Torbjörn Fälldin, vilket påverkade dennes uppfattning om kärnkraften. Från att på 1960-talet ha varit drivande på flera orter om

att kärntekniska anläggningar skulle ligga i just deras kommun, vände centerpartiet i frågan och blev motståndare till kärnkraften. Den andra halvan av 1970-talen blev en intensiv sifferexercis kring hur många reaktorer som skulle få byggas och hur många som skulle få tillstånd att starta, varvat med debatt kring den så kallade villkorlagen och efterföljande regeringskris för den borgerliga koalitionen.

Förslag fanns om en folkomröstning men socialdemokraterna under Olof Palme hade motsatt sig detta. Så inträffade olyckan i Three Mile Island, vilket fick Palme att ändra åsikt och en folkomröstning med tre alternativ hölls i mars 1980. Politiskt har frågan därefter varit het, med perioder av låsningar varvat med försök till blocköverskridande överenskommelser. Bland dagens riksdagspartier har C, Mp, S, och V inskrivet i sina partiprogram att kärnkraften ska avvecklas, medan Fp, Kd, M, och Sd är uttalat kärnkraftpositiva.

Kärnkraften och folkrörelser

Folkkampanjen mot kärnkraft-kärnvapen (FmKK) bildades 1980 för att organisera motståndet inför folkomröstningen om kärnkraften 1980. Föreningen drog initialt många medlemmar och involverade välkända personer inom politik och kulturliv, det organiserades ett antal uppmärksammade stormöten och manifestationer. Efter folkomröstningen har man haft en långsamt borttynande tillvaro men en ökad aktivitet noteras på senare år. Bland andra organisationer som är uttalat kärnkraftkritiska märks Svenska Naturskyddsföreningen (SNF) och Jordens Vänner. Dessa tre, tillsammans med några mindre organisationer, deltar i samrådsprocessen kring slutförvarsfrågan genom sina gemensamma medlemsorganisationer MILKAS och MKG. Greenpeace är en organisation som får mycket uppmärksamhet för sina aktioner men är de facto ingen ideell folkrörelse.

Att hitta ideella organisationer med kärnkraftspositiv agenda är svårare. Där finns främst Miljövänner för kärnkraft (MFK) som bildades 1988. Sveriges kärntekniska sällskap (SKS) är en intresseförening för fredlig användning av kärnteknik men deltar sällan eller aldrig i debatten.

Dess medlemmar är till stor del arbetande i eller i anslutning till kärnkraftsindustrin eller med annan form av kärnteknik. I övrigt hittar man enstaka bloggar och websidor med uttalat positiv inställning till kärnkraft, men någon folkrörelse liknande de som finns på den kärnkraftskritiska sidan, med manifestationer och stormöten, står inte att finna. Detta är inte så märkligt då det är lättare att organisera sig mot ett upplevt hot än att bilda en stödförening för något som de facto är en industriell verksamhet. Det är få som uttalat ser sig som anhängare av kärnkraften, men som i valet mellan flera alternativ väljer det som man uppfattar har minst negativa effekter [5].

Inte på min bakgård?

De kommuner som har kärnkraftverk tenderar att ha en kärnkraftspositiv befolkning, något som faller sig naturligt då det är en stor arbetsgivare och man är van med verksamheten.

Förutom Barsebäcksmarscherna 1975-1977 har det inte förekommit några större protester i samband med byggnationen. I frågan om geologiskt slutförvar av använt kärnbränsle har motståndet varit desto större, notervärda är protesterna i samband med SKB:s provborrningar i Voxnadalen 1981 och Almunge 1985, samt den 20 år långa ockupationen av Kynnefjäll. På senare år har det ökade industriella intresset för prospektering och provtagning i syfte att anlägga urangruvor mötts av protester bland lokalbefolkning, miljöorganisationer och på det politiska planet. Det bör påpekas att protesterna ofta rör all form av nyetablering av gruvor, men brytning av uran anses vara mer kontro-

versiellt än för övriga malmer trots att den inte nödvändigtvis har större miljöpåverkan. I dagsläget sker ingen brytning av uran i Sverige.

Vad är det man är emot, vad är man rädd för?

Den joniserande strålningen är givetvis den främsta orsaken till att det finns en allmänt utspridd rädsla för kärnkraften. Dessutom blandas de fruktansvärda följderna av bomberna över Hiroshima och Nagasaki ihop med den fredliga kärnkraften, något som givetvis är svårt att komma ifrån eftersom de brukar samma råvara. Att joniserande strålning är en relativt svag cancerogen spelar mindre roll eftersom man inte kan se den, och att den är så pass lätt att uppmäta med instrument även vid extremt låga nivåer tenderar att skapa mer oro istället för att lugna. Förklaringar att det är låga nivåer bemöts ofta med skepsis där allt som inte är noll ses som något onaturligt och farligt, och de flesta människor vet inte att vi naturligt har radioaktivitet i våra kroppar. Radioaktivitet syns inte och luktar inte, men trots att detta också gäller åtskilliga farliga kemikalier och luftföroreningar så har risken för utsläpp från kärnkraftverk en särställning i människors medvetande [6].

Trots att kärnkraften över sin livscykel ger relativt små hälsoeffekter och orsakar färre dödsfall än andra kraftslag [7, 8] så lever uppfattningen att den är mer farlig än andra energiformer. En bidragande orsak är att de haverier som skett har varit spektakulära och orsakat mycket mediauppmärksamhet. Det faktum att man relativt enkelt kan uppmäta ytterst små utsläpp av radioaktivitet bidrar också till rädslan. Som exempel kan nämnas det radioaktiva jod som spreds från reaktorerna i Fukushima i mars 2011. Det totala mängd som spreds över världen är mindre än ett kilo, och trots att de mängder som nådde

Sverige var ytterst små såldes det slut på jodtabletter vid flera av landets apotek [9].

Svårigheterna att förklara riskerna och korrekt mäta effekterna påverkar de som oroas. Att det är så pass långa tidsspänn, upp till 40 år, mellan exponering och eventuell cancer är också något som påverkar uppfattningen om riskerna. Det är lättare att hantera en skada som sker i direkt anslutning till en olycka, än att bära på en oro över hälsoeffekter som eventuellt manifesteras flera årtionden senare [10].

I Analysgruppens opinionsundersökning ställs frågan om de tillfrågade upplever en oro för kärnkraften och i så fall vad det är som oroar. Drygt en tredjedel svarar att de känner någon form av oro och hälften av dessa uppfattar sin oro som djup. Det som skrämmer mest är risken för en olycka och dess konsekvenser, följt av en oro för avfallshanteringen. Omkring tio procent av de som uttrycker oro nämner effekter på miljön och ansvaret för avfallet inför framtida generationer [11].

I kärnkraftsdebatten hörs ibland argument där man motsätter sig storskalig energiproduktion och hellre vill se småskaliga alternativ och lokal produktion. Förnybara källor anses då passa bättre in i det samhälle man vill ha. Som nämns i huvudtexten har Sverige bättre möjlighet än många andra länder att välja denna väg, om än med konsekvenser. Huruvida detta vägval och dess konsekvenser stöds av en majoritet av det svenska folket går utanför denna rapports syfte, men frågeställningarna bör givetvis diskuteras ingående, såväl på det politiska planet som bland allmänheten.

Referenser

1. Jan Malmborg och Michael Stenberg, "Hex i lasten", Filter #37, april-maj 2014, s 64. <http://magasinetfilter.se/magasin/2014/37>
2. SOM-institutets webbsida: <http://www.som.gu.se/>, klicka på "Publicerat".
3. Analysgruppens webbsida: <http://www.analys.se/>, klicka på "Opinion".
4. Sigfrid Leijonhufvud, "(parentes? En historia om svensk kärnkraft", ABB Atom, 1994. ISBN 91-630-2976-6.
5. Jörgen Westerståhl och Folke Johansson, "Vad har hänt med kärnkraftsopinionen?", SNS Förlag, 1990, ISBN 91-7150-385-4.
6. Håkan Hagwall, "Kärnspöken – Om energi, rädsla och myter", Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU), 2003, ISBN 91-631-3817-4. <http://www.analys.se/lankar/rapporter/Hagwall.pdf>
7. European Commission, "ExternE: Externalities of Energy. Methodology 2005 Update", eds. Peter Bickel and Rainer Friedrich, 2005, ISBN 92-79-00423-9. https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/kina_en.pdf
8. Nils Starfelt och Carl-Erik Wikdahl, "Hälsorisker vid elproduktion", Analysgruppen vid KSU, Bakgrund Nr 1, mars 2001. <http://www.analys.se/lankar/Bakgrunder/2001/Bkg%201-01.pdf>
9. Svenska Dagbladet, "Slut på jodtabletter i Sverige", 17 mars 2011. http://www.svd.se/nyheter/inrikes/slut-pa-jodtabletter-i-sverige_6018241.svd
10. Peter M. Sandman, "Responding to Community Outrage: Strategies for effective risk communication", the American Industrial Hygiene Association, 2012. <http://www.psandman.com/book.htm>
11. Analysgruppen vid KSU, "Novus undersökning: Allmänheten om kärnkraft", 4 juni 2014. <http://www.analys.se/lankar/opinion/Novus%20Analysgruppen%20Allm%20E4nheten%20om%20k%20E4rnkraft%20Maj%202014%20RAPPORT.pdf>

Appendix 9

Kort historik över svensk kärnkraft

Professor Ane Håkansson, tillämpad kärnfysik

Sverige var internationellt sett tidigt ute att elektrifiera samhället för såväl industrins, hushållens som samfärdsmedlens behov.

I början av sextioalet intensifierades den politiska diskussionen om de kvarvarande norrlandsälvarna skulle tas i anspråk för att understödja ökad industriproduktion och samtidigt något lindra beroendet av omvärlden för landets energiförsörjning. Utvecklingen av kärnkraften hade dock kommit så långt att den politiska processen istället resulterade i att skydda älvarna mot fortsatt utbyggnad och istället rikta uppmärksamheten mot den nya kärnkrafttekniken. Denna strategi grundades i stor utsträckning av de lyckade försöken med experimentreaktorn R1 och senare Ågestareaktorn som producerade såväl elektricitet som hetvatten för fjärrvärme.

Med bildandet av Asea-Atom 1969 inleddes en verksamhet som, tillsammans med svenska lärosäten och stålindustri, utgjorde kärnan i det svenska kärnkraftsprogrammet. I och med detta såg man också möjligheter att skapa en värdefull exportindustri för landet. Som kurios kan här nämnas att Sverige är det enda land som konstruerat och producerat kärnreaktorer utan utnyttjande av amerikanska licenser.

För att ytterligare minska importberoendet formulerades tanken att utnyttja de svenska urantillgångarna, främst i västgötabergen. Någon nämnvärd uranbrytning i Sverige inleddes dock inte. Däremot byggdes en bränslefabrik i Västerås som med importerat råmaterial än idag förser svenska och utländska reaktorer med bränsle.

Med kärnkraften blev det praktiskt möjligt att stödja en ökad industriproduktion och samtidigt minska fossilbränsleimporten till att, som idag, i allt väsentligt omfatta endast transportsektorns behov. Det svenska kärnkraftsprogrammet mellan 1975 och 1986 innebar att ca 700 kWh elektricitet per år och person tillfördes det svenska elnätet så att ungefär hälften av elproduktionen kom från kärnkraft och den andra hälften från vattenkraften. I huvudtextens avsnitt: "Det globala perspektivet" beskrivs närmare vad denna utbyggnadstakt skulle kunna innebära för nutidens insatser för att drastiskt minska CO₂-utsläppen globalt.

Från mitten av sjuttioalet till dags dato har kärnkraften ifrågasatts. Från början var retoriken inriktad mot kärnkraftens "storskalighet". Evert Vedung, professor i statsvetenskap vid Uppsala universitet uttryckte 1979 saken som så: "motpolerna på den nya konfliktlinjen kan beskrivas med termer som ekonomisk tillväxt, industrialism, kärnkraft, storskalig teknologi och centralism å ena sidan och ekologisk balans, lokalsamhälle, småskalighet och flödande energikällor å den andra. Genom uppkomsten av denna tillväxt-ekologidimension blev det svenska partisystemet tvådimensionellt" [1].

Om det röntes framgång i denna kärnkraftskritiska retorik kan man betvivla och det är symptomatiskt att retoriken i och med haveriet i Three Mile Island 1979 istället inriktades på att kärnkraften var farlig. Den efterföljande politiska debatten mynnade ut i en folkomröstning 1980 vars resultat var att kärnkraften skulle "avvecklas i den takt som är möjlig med hänsyn till behovet av elektrisk kraft för upprätthållande av sysselsättning och välfärd". Ett resultat av debatten var även att statsmakten under åttiotalet intensifierade insatserna inom ramen för det statliga energiforskningsprogrammet syftandes till att minska eller helt bli av med beroendet av kärnkraften [2].

Riksdagen beslöt 1985 att kärnkraften skulle vara borta ur det svenska elsystemet senast 2010. En konsekvens av detta var formulerandet av paragraf 6 i lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet som innebar att: *"Ingen får utarbeta konstruktionsritningar, beräkna kostnader, beställa utrustning eller vidta andra sådana förberedande åtgärder i syfte att inom landet uppföra en kärnkraftsreaktor."*

Betydelsen av "tankeförbudslagen" är omtvistad men det står klart att den signalerade att forskning och utveckling inom kärntekniken på landets lärosäten inte skulle finansieras av statsmedel. Resultatet av detta blev att utbildning av kärnkraftingenjörer och utveckling av kärnkrafttekniken höll på att helt försvinna vilket skapade problem då allt fler av kärnkraftspionjärerna började gå i pension. En delkonsekvens av beslutet att lägga ned kärnkraften till 2010 var även att Barsebäck 1 och 2 stängdes 1999 respektive 2005.

Den svenska elproduktionen kännetecknas i dagsläget av följande:

- 1) Den är till 97 procent producerad med låga koldioxidutsläpp och uppvisar därmed mycket goda klimatprestanda,
- 2) vattenkraftens andel ca 45 procent,
- 3) kärnkraften har genom uppgraderingar de senaste sex åren ungefär samma kapacitet som innan nedläggningen av de två reaktorerna i Barsebäck. Tio reaktorer står i dagsläget för ca 45 procent av elproduktionen,
- 4) en pågående utbyggnad av vindkraften motsvarande i nuläget en andel om ca 5 procent. Resterande elproduktion kommer från kraftvärmeverk.

Referenser

1. Vedung, E. (1979) "Kärnkraften ger ny blockbildning i politiken". Tvärsnitt nr. 1, 42-48.
2. SOU 1986:31

Appendix 10

Framtida kärnkraftscenario för ett klimatneutralt Sverige

Tekn. Dr. Carl Hellesen och Fil Dr. Staffan Qvist, tillämpad kärnfysik

Moderna kommersiella Gen-IV reaktorer av typen som erbjuds av till exempel GE-Hitachi är designade för att laddas med avfallet från dagens kärnkraft som bränsle. I standardkonfiguration återvinner dessa system sedan eget aktivt bränsle i samma takt som det förbränns, vilket innebär att mängden bränsle inte förändras. Dagens reaktorer förbränner ungefär 0,6% av det uran som grävs upp, Gen-IV system höjer denna siffra till över 99 %. En övergång till Gen-IV system innebär därför att varken ny uranbrytning eller anrikning av uran behövs för att tillgodose svenska energibehov under överskådlig framtid. Avfallet består sedan nästan enbart av klyvningsprodukter, som eftersom de är radioaktiva måste hållas isolerade från naturen i runt 300 år. Detta kan jämföras med de tiotals tusen år som dagens svenska slutförvar för radioaktivt avfall är designat för.

Gen-IVreaktorer laddas med cirka 6 ton av dagens reaktorerers avfall av högre aktinider (mestadels plutonium) per gigawatt av kontinuerlig elektrisk effekt. Det svenska kärnavfallet består idag av ungefär 50 ton sådant material, en siffra som förväntas växa ytterligare innan den sista reaktorn i den nuvarande flottan pensioneras. Avfallet som då finns tillgängligt kan återanvändas i Gen-IVreaktorer för att ge en kontinuerlig effekt på ca 11 GWe, utan att mängden långlivat högaktivt avfall i landet ökar. Sverige har i dagsläget (2014) en teoretisk max-effekt i kärnkraften på 9,5 GWe.

En introduktion av Gen-IV system ger även ett slags gas och broms-pedal på både mängd och möjlig energiproduktion från plutonium. Dessa reaktorer kan konfigureras till att antingen hålla mängden bränsle konstant ("återvinning"), förbränna bränsle ("brännare") eller producera mer aktivt bränsle ("självförsörjande"). En reaktor inställd för att förbränna bränsle kan maximalt konsumera ungefär 1 ton bränsle per GWe per år. Annorlunda konfigurerad kan samma reaktor istället producera runt 300 kg nytt bränsle per GWe per år. Dessa egenskaper, som saknas i dagens system, möjliggör för en stor frihet att skraddarsy energiproduktionen, och detta utan att använda sig av annat material än det som finns tillgängligt i dagens kärnkraftscykels avfall. Denna frihet blir möjlig även med en väldigt defensiv och långsiktig introduktion av Gen-IV teknologi.

Sveriges nyaste reaktor, Oskarshamn 3 (O3), kommer att pensioneras under 2045. Ett scenario som ger Sverige över 30 år att planera för Gen-IV är att ett antal av de övriga 9 reaktorerna ersätts av nyare reaktorer av samma grundtyp (Gen-3+) och O3 ersätts år 2045 av ett helt nytt Gen-IV system.

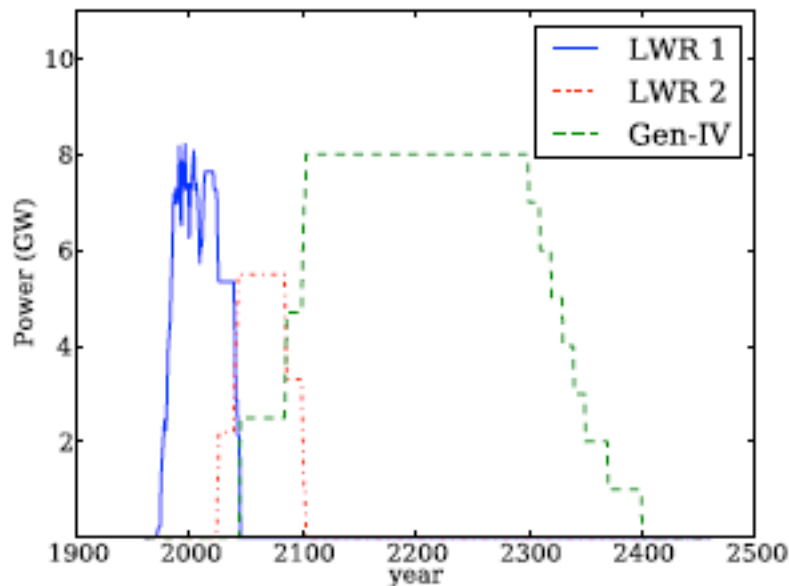
En långsiktigt hållbar kärnkraft för Sverige, slutförvaret

Idag förser kärnkraften Sverige med knappt hälften av elbehovet, eller runt 65 TWh / år fördelat på 10 reaktorer. Kärnkraften resulterar inte i några signifikanta utsläpp av växthusgaser, men det kommer en miljökostnad för att ta om hand det radioaktiva avfallet som måste hållas åtskilt från naturen i 100 000 år. Strategin för att ta hand om avfallet från dagens 10 reaktorer är ett slutförvar 500 meter under Östersjöns botten strax utanför Forsmark.

Även om den nuvarande strategin erbjuder en robust och säker förvaring av avfallet från dagens reaktorer kan den inte anses långsiktigt hållbar. Antag att vi i Sverige vill behålla samma nivå av kärnkraftsproduktionen under lång sikt. Då kommer det uppstå ett behov ett nytt slutförvar av samma storlek var 50:e år. Även om det teoretiskt skulle gå att finna lämplig berggrund för dessa är det inte rimligt att tro att allmänheten skulle acceptera det. Av den anledningen har man i t.ex. Frankrike klassat slutförvar av kärnbränsle som en begränsad nationell resurs som måste utnyttjas så effektivt som möjligt.

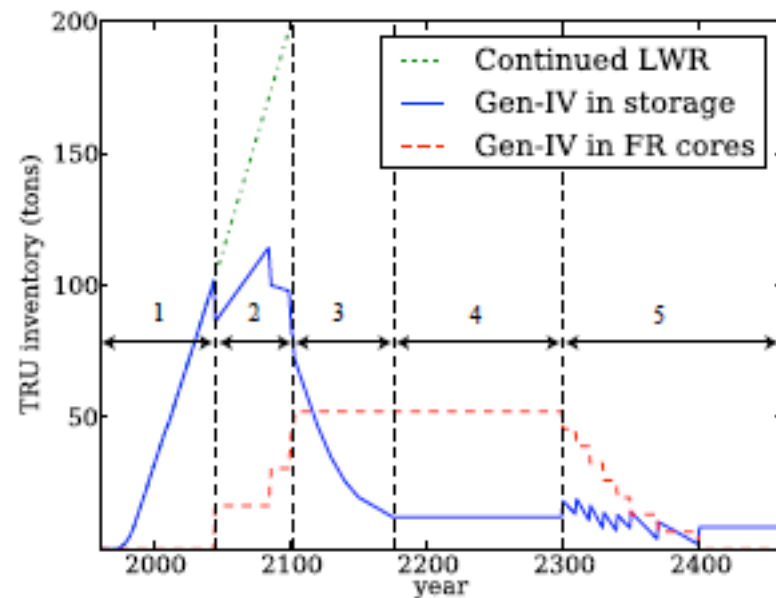
I den här studien presenterar vi ett scenario för Sverige, som genom en succesiv introduktion av ett kärnkraftssystem av fjärde generationen (Gen IV), möjliggör för ett långsiktigt utnyttjande av kärnkraft på samma nivå som idag. Målet är att kunna utnyttja kärnkraft under mycket lång tid framöver, men det slutförvar som planeras idag skall ha kapacitet att ta emot allt samlat kärnavfall, även om kärnkraften skulle producera el på nuvarande nivå i 100-tals eller 1000-tals år framöver. Scenariot bygger på användandet av snabba reaktorer som växelvis körs i brännarkonfiguration och självförsörjande konfiguration. Som brännare förbrukar de den fissila delen av dagens avfall som bränsle, och som självförsörjande behöver de ingen tillförsel alls av fissilt material.

I figur 1 visas den genomsnittliga effekten från samtliga reaktorer under de studerade åren. I blått visas dagens lättvattenreaktorer. De äldsta (O1, O2, R1 och R2) antas ha 50 års drifttid och skulle då stängas strax efter 2020. De yngre (R3, R4, F1, F2 och F3 och O3) antas ha 60 års drifttid, och den sista skulle stängas 2045.



Figur 1 Genomsnittlig effekt från kärnkraft i studien. Dagens lättvattenreaktorer visas i blått, nästa generation lättvattenreaktorer i rött och snabba reaktorer av Gen IV-typ i grönt.

Vid stängandet av de 8 första reaktorerna ersätts dessa med sammanlagt 5 lättvattenreaktorer med en genomsnittlig effekt på 1.1 GWe vardera. Introduktion av dessa sker runt 2025 samt 2040 och visas i röd linje. När de yngsta av dagens reaktorer stängs (O3 och F3) 2045 ersätts de med de första Gen IV- reaktorerna. Efter det året byggs inte längre några lättvattenreaktorer utan alla nya reaktorer är av Gen IV-typ vilka illustreras i grön linje.



Figur 2 Uppbyggnad av långlivat avfall (transuraner) vid de 3 studerade scenarierna för framtida kärnkraftsutnyttjande i Sverige.

Vi kan identifiera fem viktiga faser i det här scenariot. Dessa illustreras i figur 2 som visar det totala inventariet av transuraner, främst plutonium, som byggs upp av lättvattenreaktorerna.

o Den första fasen sträcker sig till 2045 och bygger på drift av endast lättvattenreaktorer. Under den tiden byggs inventariet av transuraner (TRU) upp i snabb takt, drygt 2 ton / år.

o Den andra fasen sträcker sig mellan 2045 och 2102 och produktionen utgörs nu av kombinerad drift av lättvattenreaktorer och Gen IV-reaktorer. De senare är här konfigurerade som brännare, varför den

totala mängden transuraner då hålls konstant. Det mesta som byggs upp i lättvattenreaktorerna förbränns i Gen IV-reaktorerna. Det kan även noteras att en del av TRU-inventariet nu ligger i Gen IV-reaktorernas härdar (röd linje).

o Den tredje fasen tar drygt 50 år och det finns då endast Gen IV-reaktorer kvar vilka fortfarande körs som brännare. I den fasen förbränns de kvarvarande transuranerna och mot slutet av fasen konfigureras Gen IV-reaktorerna succesivt om till självförsörjande.

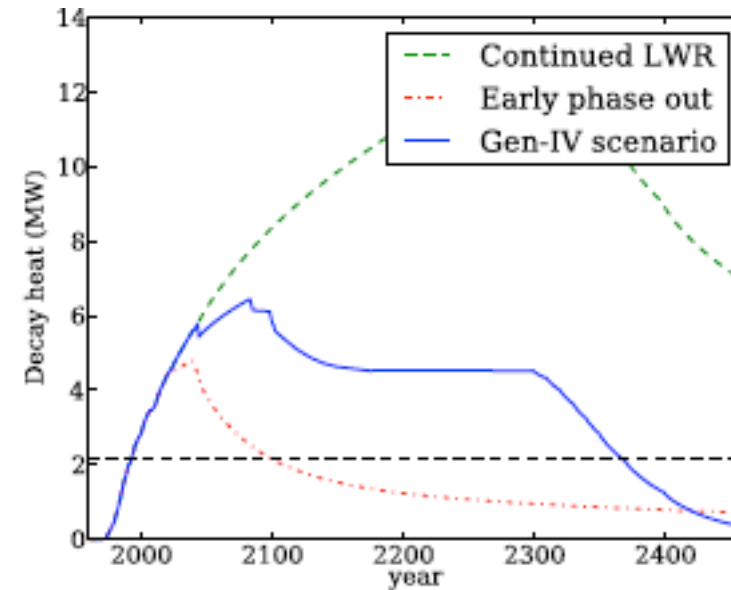
o I den fjärde fasen är alla reaktorer konfigurerade som självförsörjande. I det läget förbrukas varken transuraner från lättvattenreaktorernas avfallen eller anrikat uran utan endast fertilt uran behöver tillföras. Det finns tillräckligt med fertilt uran i dagens avfall för att förse ett svenskt Gen IV-system med bränsle i 10 000 år.

o I den femte fasen antas man ha löst energiförsörjningen på andra sätt, och man vill då avveckla kärnkraften för gott. Gen IV-reaktorerna stängs då succesivt ner och de kvarvarande reaktorerna bränner de transuraner som fanns i de avstängda reaktorernas härdar. Fasen tar mellan 50 och 100 år beroende på hur långt man vill bränna de kvarvarande härdarnas transuraner.

I scenariot som visas i det här dokumentet inleds avvecklingen runt år 2300. Det kan dock noteras att årtalet kan skjutas båda framåt och bakåt i tiden. Viktigast är att Gen IV-scenariot vi studerar har möjlighet att på ett uthålligt sätt, vad beträffar bränsletillgångar och avfall, förse Sverige med kärnkraftsel på samma nivå som idag under en i praktiken obegränsad tid.

Vad som är viktigast för kapaciteten på slutförvaret är dock inte mängden avfall i ton räknat, utan den värmeutveckling som avfallet

alstrar genom dess resteffekt. Temperaturen på en kapsel får inte överstiga 100 grader, och det är det som sätter en gräns på hur tätt man kan packa avfallet i slutförvaret.



Figur 3. Värmeutveckling för det använda kärnbränslet vid de tre olika studerade scenarierna.

I figur 3 visas den totala värmeutvecklingen hos avfallet. Den röda linjen visar avfallet från dagens 10 reaktorer plus de två redan stängda i Barsebäck (B1 och B2). Antagandet är att de 10 kvarvarande fasas ut som beskrivet ovan, men inga nya reaktorer byggs därefter. All svensk kärnkraft skulle då vara avvecklad 2045. Det slutförvar som planeras idag är dimensionerat för att ta om hand detta avfall, och beräknas kunna förslutas runt 2100. Vi sätter därför värmeutveckling vid det årtalet som en indikativ gräns för dess kapacitet.

Den gröna linjen visar värmeutvecklingen i avfallet för en tänkt fortsatt drift av lättvattenreaktorer på samma nivå som idag. Men precis som i det studerade Gen IV-scenariot har man löst energiförsörjningen på annat sätt runt år 2300, och då stängs dessa ner. Vi ser att den totala värmeutvecklingen 50 år senare ligger på en fem gånger högre nivå än referens-scenariot. Det skulle med andra ord behövas ett slutförvar med 5 gånger högre kapacitet än dagens planerade, alternativt skulle man behöva 5 olika slutförvar. Vad som är viktigt att påpeka här är också att om man önskar fortsätta använda kärnkraft under en längre tid än fram till 2300 kommer behovet av slutförvar bara fortsätta öka om det sker med lättvattenreaktorer. Om slutförvar är att betrakta som en begränsad resurs är detta inte ett långsiktigt hållbart alternativ.

Slutligen visas i blått den totala resteffekten från Gen IV-scenariot. Här är alltså avfallet från båda generationerna lättvattenreaktorer samt Gen IV-reaktorerna i figur 1 inräknat. Eftersom det mesta av transuranerna kontinuerligt förbränns i Gen IV-scenariot kommer resteffekten till största delen komma från fissionsprodukterna. Då de relevanta isotoperna i det här avseendet har en relativt kort halveringstid, runt 30 år, nås snart en jämvikt då resteffekten byggs upp i samma takt som den försvinner genom sönderfall.

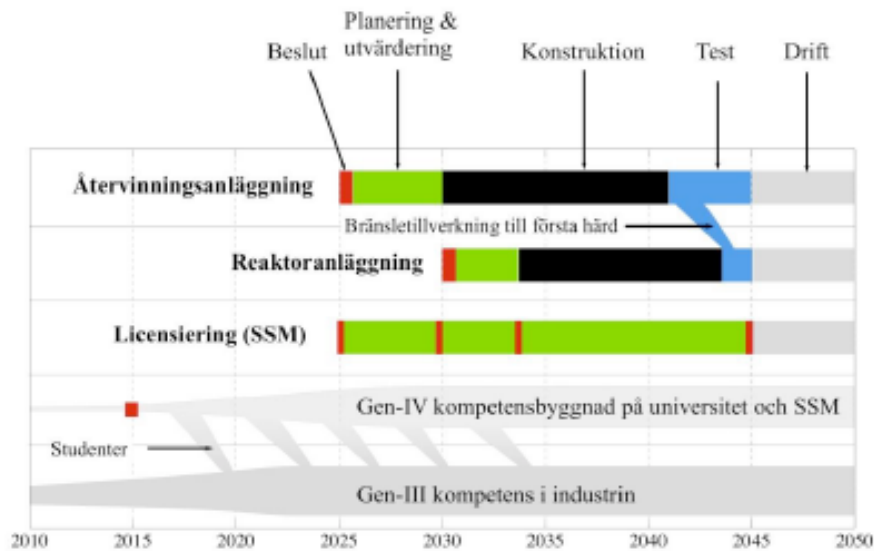
Processen att välja ut och kapsla in använt bränsle för slutförvar är förvisso långt mer komplicerad än vad som illustreras här. Framför allt är det tiden som det använda bränslet ligger i mellanlagring som har stor betydelse. Resultaten i figur 3 skall därför främst jämföras relativt varandra och endast ses som indikativa för de tre studerade scenarierna. De möjligheter som ett Gen IV-system erbjuder för långsiktigt utnyttjande av kärnkraft i Sverige framgår dock tydligt.

Kompetensbyggnad för att hålla dörren för modern kärnkraft öppen

Sverige var tidigt ute med kärnkraft och byggde upp en inhemsk industri som under en tid innehöll både stor kapacitet och expertis inom alla delar av den nukleära bränslecykeln. Än finns i Sverige stor kompetens inom kärnkraft, och vi är ett av de länder som producerar mest kärnkraftsel per person i världen. Majoriteten av svensk expertis på området närmar sig dock pensionsålder, eftersom statlig finansiering för utbildning inom kärntekniska ämnen 1980-2006 var i det närmaste obefintlig.

För att Sverige i framtiden ska kunna hålla dörren öppen för ny och modern kärnkraft av den typ som beskrivits i denna rapport behövs en uppbyggnad av ny kompetens på universitet, myndigheter och i industrin. Detta gäller oavsett om de nya systemen ska utvecklas inom landet eller (troligare) köpas in utifrån. Figur 4 visar ett förslag till en tidsplan för en introduktion av ett generation-IV reaktorsystem med tillhörande återvinningsanläggning som går i drift under 2045.

Kompetensbyggnaden startar vid universiteten och sprids sedan genom utexaminerade studenter vidare till både myndighet och industri. Tidigast 2025 behövs ett skarpt beslut tas om byggnation av en återvinningsanläggning, och senast några år efter det bör beslut fattas om reaktorplaneringen. Vid detta tillfälle måste det finnas kompetens i landet för att konstruera, licensiera och driva sådana system, även om teknologin till stor del sannolikt köps in av en utländsk kommersiell aktör.



Figur 4. Förslag till en övergripande tidsplan för hur fjärde generationens kärnkraftssystem skulle kunna implementeras i Sverige.

För att Sverige ska kunna stå redo för det scenario som skisseras ovan krävs att statsmakten skapar såväl finansiella som politiska incitament för landets lärosäten att redan nu börja formera sig och skapa kapacitet för forskning, utveckling och utbildning inom kärnteknikområdet. Sådana incitament bör föregå en nationell handlingsplan som i sin tur måste bygga på långsiktiga blocköverskridande överenskommelser. En strategi av det här slaget skulle dessutom mycket väl gagna kompetensuppbyggnaden inför de nybyggnationer av reaktorer som sannolikt måste till för att Sverige inte ska hamna i en effektbrist i mitten av 2020-talet då nuvarande reaktorflotta börjar avvecklas på allvar.