



Uranet räcker som reaktorbränsle i tusentals år - mycket längre än kol, olja och gas
- dessutom utan några koldioxidutsläpp

Uran - en uthållig energikälla

Uran är ett av de vanligaste mineralen i jordskorpan och i havsvattnet. Uranet är det tyngsta – i fråga om atommassan – av de naturligt förekommande grundämnena och har atomnumret 92 i det periodiska systemet. Uranmalm bryts kommersiellt i mer än 15 länder, både i dagbrott och i underjordsgruvor. Uran används numera huvudsakligen som bränsle i kärnkraftverk.

Kärnenergin frigörs genom förändringar i atomens innersta kärna medan alla andra tillgängliga energikällor utnyttjar förändringar i molekylerna (rörelseenergin alstrar vatten- respektive vindkraft) eller i atomens yttre skal (förbränning av kol, olja, gas eller biobränsle). Per atom räknat är energiutbytet mer än en miljard gånger större vid en kärnklyvning än vid en förändring i det yttre elektronskalet. Kärnkraften är därför i alla avseenden en koncentrerad energikälla.

Uran är inte en förnybar energikälla som vind- och vattenkraften men tvärtom vad många hävdar tillhör uran kategorin uthållig energikälla till skillnad mot kol, olja och naturgas. Viktiga orsaker till detta är att koldioxid inte släpps ut vid kärnkraftproduktionen och att tillgångarna på uran är mycket stora i förhållande till användningen.

Med utgångspunkt från världens nuvarande kärnkraftproduktion skulle kända lättillgängliga urantillgångar räcka i uppåt 100 år. Tidigare har kärnkraftindustrin angett 50 år men med de prishöjningar på uran som skett de senaste åren har uthålligheten ökat. Med en fördubbling av uranpriset (motsvarar en ökning av bränslekostnaden med 1 öre/kWh och av elkostnaden med 5 %) blir kända tillgångar av uran uppåt 10 gånger större. Dessutom utvecklas nya typer av kärnreaktorer som kommer att utnyttja uranet cirka 50 gånger effektivare än dagens. I det perspektivet har kärnkraften en uthållighet på tusentals år.

Innehåll

Uranmarknaden

Behov

Tillgångar

Nya fyndigheter?

Svård till plogbillar

Från uranmalm till kärnbränsle

Miljön

Miljöcertifiering

Kärnkraftens kostnader

Andra användningar av uran

Ekonomisk och ekologisk uthållighet

Slutsatser

Faktasidor

- Kärnklyvning, kedjereaktion...

- Uranbrytning i Ranstad

- Urananrikning

- Uranets historia i korthet

Uranmarknaden

Behov

FN:s atomenergiorgan IAEA har på sin hemsida (Ref. 2) en löpande uppföljning av världens kärnkraftverk.

I slutet av januari 2005 fanns 441 kärnkraftaggregat i drift i världen i 30 länder. USA har flest reaktorer i drift, 104 stycken. Från juli 2005 finns 10 i Sverige.

Den totalt installerade eleffekten var 367 000 MW (9 500 MW i Sverige). 16 % av all världens elproduktion sker i kärnkraftverk.

Enligt IAEA är 25 aggregat under byggnad.

Den totala elproduktionen i världens

kärnkraftverk var 2 600 TWh (i Sverige 65 TWh) år 2003. Störst andel kärnkraftproduktion (2003) har Litauen (80 %) och Frankrike (78 %). Sveriges andel år 2003 var 50 %.

Intresset för nya kärnkraftanläggningar tycks vara försiktigt på väg upp efter en lång period av stiltje, nya kärnkraftverk planeras och beställs nu också i västvärlden.

Allt tyder på att världens kärnkraftproduktion återigen kommer att öka, men med tanke på de långa byggtiderna kommer vändningen att ske långsamt (Ref. 3).

Men redan nu syns en tydlig uppgång i uranefterfrågan på grund av ökad kraftproduktion vid redan byggda kärnkraftverk. Orsaken är ökad tillgänglighet och höjningar av reaktoreffekten.

Som exempel kan nämnas att effekten vid de svenska kärnkraftverken kommer att höjas med 15 % under de närmaste åren fram till 2012.

Det årliga behovet av natururan för att driva världens alla kärnkraftverk är ungefär 65 000 ton.

I Sverige behövs cirka 2 000 ton uran per år.

Tillgångar

Uranet är vanligt förekommande och finns nästan överallt på jorden och i världshaven.

Ämnet är ungefär lika vanligt som tenn och ca 500 gånger vanligare än guld.

De flesta berg- och jordarter innehåller uran men ofta i låga koncentrationer.

I Sverige finns de största sammanhängande uranfyndigheterna i Billingen i Västergötland med en genomsnittlig halt på 300 gram uran per ton malm, dvs 0,03 %.

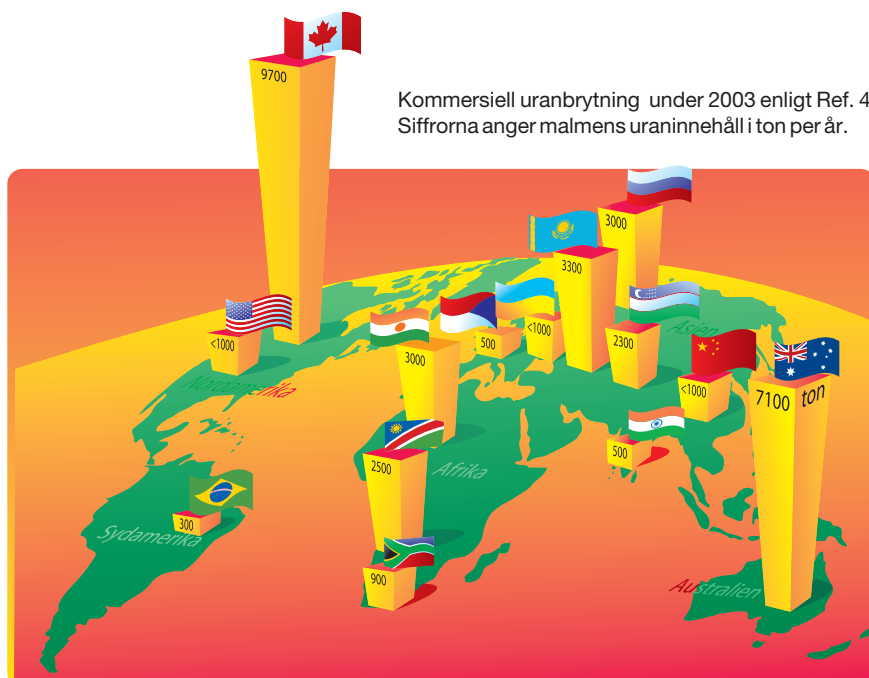
Granit innehåller normalt 0,0004 % uran. Halten i havsvattnet är cirka 1 000 gånger lägre.

För närvarande betraktas fyndigheter med en halt på minst 0,1 % uran som ekonomiskt intressanta att bryta.

OECD-NEA (Nuclear Energy Agency) och IAEA ger varje år ut en detaljerad genomgång av världens samlade tillgångar av uranfyndigheter och av efterfrågan på uran (Ref. 4).

Kärnkraftindustrins internationella branschorgan World Nuclear Association har på sin hemsida (Ref. 5) en fyllig rapportering om uranmarknaden och om hur uranet behandlas i olika processer innan det används som kärnbränsle.

I den internationella sammanställningen om uran används dels tre olika kostnadsområden, dels två nivåer på hur väl kända fyndigheterna är.



Kommersiell uranbrytning under 2003 enligt Ref. 4. Siffrorna anger malmens uraninnehåll i ton per år.

I januari 2003 anges nedanstående kända tillgångar ("Known Conventional Resources").

Dessutom finns det uppskattningsvis 20 000 000 ton uran i låga koncentrationer i vissa fosfatfyndigheter med en brytningskostnad på drygt 100 USD/kg U.

I havsvattnet finns stora mängder uran, uppskattningsvis 4 000 000 000 ton uran, men i mycket låga koncentrationer.

Pilotförsök indikerar att uranet skulle kunna utvinnas ur havsvattnet för en kostnad på nivån 300 USD/kg U.

Som vanligt när det gäller oprövad teknik är denna uppskattning troligen i underkant.

Brytningskostnad USD/kg U	Rimligt säkra tillgångar (ton)	Uppskattade ytterligare tillgångar (ton)	Summa (ton)
80-130	662 000	321 000	983 000
40-80	575 000	275 000	850 000
< 40	1 730 000	793 000	2 523 000

Nya fyndigheter?

Prospektering efter nya uranfyndigheter pågår ständigt. Under de senaste åren har denna verksamhet dock hållits tillbaka på grund av det låga världsmarknadspriset.

En ökning av prospekteringstakten kan väntas under de närmaste åren eftersom lagren håller på att tömmas och priset är på väg upp.

År 2002 bröts uran i ett 20-tal länder och den totala världspridktionen var 36 000 ton, dvs ungefär hälften av den årliga förbrukningen.

Handeln med uran påverkas också av lagerhållning av tidigare bruten och bearbetat uran inom både den civila industrin och försvaret.

Det finns för närvarande civila lager med cirka 70 000 ton natururan, vilket ungefär motsvarar en årsförbrukning i världens kärnkraftverk.

Dessutom finns ytterligare ett års förbrukning av uran i ”pipe line” från gruvan till levererade bränsleelement som är färdiga att sättas in i reaktorerna.

Svärd till plogbillar

I februari 1993 tecknade USA och dåvarande Sovjetunionen ett avtal om att omvandla 500 ton höganriktat uran (mer än 90 % uran-235) från kärnstridsspetsar (material från 7 000 stridsspetsar) till låganriktat uran (cirka 4 % uran-235) för användning som bränsle i kommersiella kraftreaktorer.

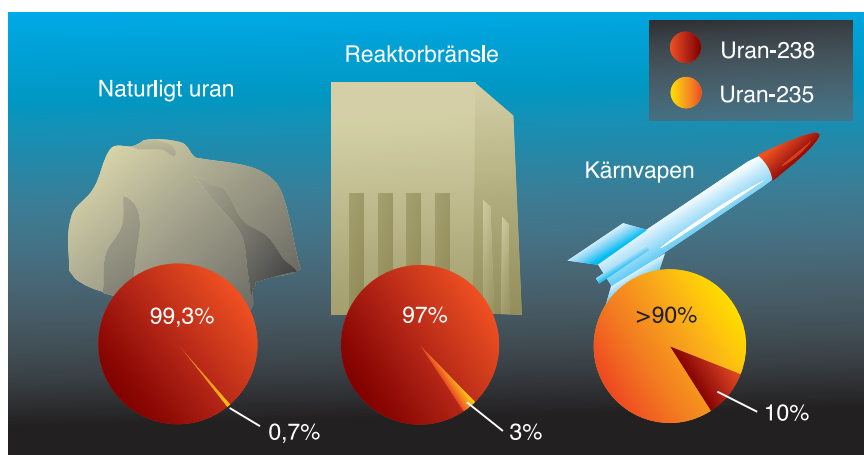
Höganriktat uran blandas med naturligt eller utarmat uran för att få ner halten uran-235 till cirka 4 %. (Se avsnittet om urananrikning för förklaring av begreppen utarmat och anriktat uran).

Detta motsvarade drygt 150 000 ton naturligt uran eller två årsförbrukningar i världens kärnkraftverk.

Överenskommelsen innebär att detta projekt skall pågå till 2013 med överföring av klyvbart material motsvarande 9 000 ton natururan per år. En förlängning och utökning av avtalet efter 2013 är trolig.

Utökad uranbehov i sikte

Dessa extraordinära tillskott till uranbränslemarknaden, ibland benämnd ett program för ”att smida plogbillar



Halten av den klyvbara isotopen uran -235 vid olika användningar av uran

svärd”, har naturligtvis stört den kommersiella gruvdriften och medfört ett lägre uttag från existerande gruvor under lång tid.

Programmet har också lett till att prospekteringen blivit eftersatt och under flera år legat på en låg nivå. Intresset för expansion av urangruvindustrin har varit låg också därför att det länge rått en osäkerhet om hur kärnkraftproduktionen kommer att utvecklas på längre sikt.

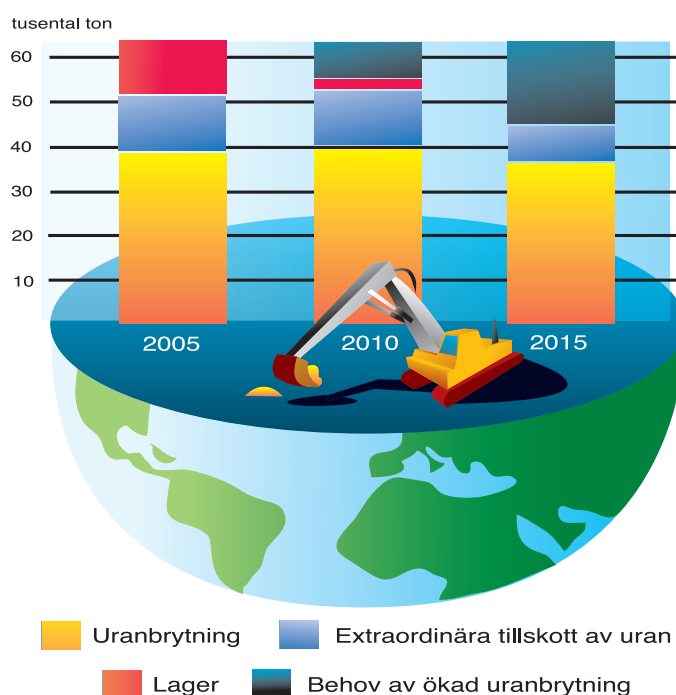
Den osäkerheten har minskat de senaste åren och en långsiktig försiktig uppgång anses nu som en säker prognos.

Uranbehovet kommer dock inte att öka nämnvärt under de närmaste 10

åren dels för att det tar lång tid innan beställda reaktorer sätts i produktion, dels för att det finns en utveckling att utnyttja uranbränslet mera effektivt även i existerande reaktorer.

Men redan före 2010 uppstår uranbrist i världen om inga nya gruvor öppnas. De viktigaste skälen är att lagren minskar och att tillförseln från vapenmateriallagren successivt reduceras.

Situationen till 2015 visas i nedanstående stapeldiagram (mängderna anges i 1 000 ton uran). Uranpriset har varit på väg uppåt under de senaste åren och det anses nu lönsamt att starta helt nya gruvor.



Från uranmalm till kärnbränsle

I detta avsnitt beskrivs bränslecykeln för den typen av reaktorer som används i Sverige.

Vi avstår dock från att behandla frågan om hantering av kärnavfall eftersom den beskrivs i ett stort antal skrifter utgivna av Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB (Ref. 7).

Uranet bryts antingen i dagbrott (28 % av världproduktionen 2003), i underjordsgruvor (41 %) eller genom urläkning under jord *in situ* (20 %). 11 % av uranet erhålls som en biprodukt vid framtagning av andra mineral, i huvudsak från underjordsgruvor.

Efter brytningen krossas malmen och behandlas med utspädd svavelsyra, som löser ut uranet från malmen. Därefter fällt uranet ut från den sura lösningen som en uranoxid med den kemiska be-

teckningen U_3O_8 . I denna form säljs uranet från gruvan.

I en del gruvor är det möjligt att lösa upp uranet genom att pumpa utspädd svavelsyra genom malmen där den ligger i berget. Metoden som också används vid annan metallutvinning kallas *in situ*. Syran med det lösta uranet pumpas tillbaka upp till ytan och behandlas där på samma sätt som i en konventionell gruva.

I nästa steg konverteras uranoxiden till en gas, uranhexafluorid, UF_6 . I denna form anrikas (se faktaruta om uran-anrikning) det naturliga uranet så att halten av uran-235 ökas från 0,71 % till mellan 3 och 5 %.

Efter anrikningen konverteras uranhexafluorid till urandioxid, UO_2 , som kan pressas och sintras till ett keramiskt

material. I en bränslefabrik pressas urandioxiden till fingertjocka kutsar med en densitet (täthet) på ca 10 g/cm^3 . Kutsarna förs in i kapslingsrör oftast bestående av en legering som heter zircalloy och som till 90 % består av metallen zirkonium. De uranfyllda rören monteras i mekaniska strukturer till drygt fyra meter långa kärnbränsleelement.

En av världens största tillverkare av kapslingsrör i zircalloy för kärnbränsle är det svenska företaget Sandvik, som redan på 1960-talet började tillverkning av denna specialitet.

I Västerås finns en bränslefabrik som tillverkar färdiga kärnbränsleelement för svenska och utländska reaktorer. Den ägs av Westinghouse Electric Sweden, tidigare med namnen Asea Atom respektive ABB Atom.

Miljön

Utsläppen av koldioxid från hela kärnbränslecykeln är mycket små. Driften av kärnkraftverken samt bränsletillverkningen och gruvsdriften är praktiskt taget koldioxidfri.

Om den el som behövs i anrikningsprocessen produceras enbart i koldade kraftverk blir det ett visst tillskott av koldioxid från kärnbränslecykeln.

Totalt ger då kärnkraften en tusendel av de koldioxidutsläpp som kommer från ett kolkraftverk med motsvarande elproduktion. Detta om anrikningen sker med centrifugmetoden som är den dominerande tekniken för det uran som används i svenska reaktorer.

Vindkraften ger upphov till större utsläpp av koldioxid per producerad kWh än kärnkraft. Orsaken är den koldioxid som släpps ut vid tillverkning och byggande av kraftverket (Ref. 8).

Miljön vid urangruvorna har diskuterats i Sverige under lång tid (Ref. 9).

All gruvbrytning ger lokala miljöeffekter, en urangruva skiljer sig därvid inte nämnvärt från andra typer av gruvor, t.ex. svenska järnmalmgruvor.

Då uranmalm har högre strålningsnivåer än andra malmer, måste särskilda

åtgärder vidtas mot bl.a. radon i luften, radium i vattnet och mot direktstrålningen.

Det uran som bröts på 1940-talet var uteslutande avsett för det högprioriterade kärnvapenprogrammet. Ventilationen och övriga miljöfrågor kom då i sista hand i de gruvor som sattes igång under stor tidspress varför radonhalterna blev höga. En del gruvarbetare drabbades därför av lungcancer.

Numera är ventilationen i alla kommersiella urangruvor sådan att högsta tillåtna intag av radon för gruvarbetarna ligger på samma nivå som nu gäller för svenska bostäder. Någon förhöjd lungcancerfrekvens som kan relateras till radoninandning bland gruvarbetare kan inte längre spåras.

Den direkta strålningen – gammastrålningen – avläses på en liten personlig dosimeter som alla anställda bär. Strikta värden på maximalt tillåten dos finns vid alla kommersiella gruvor precis som vid de svenska kärnkraftverken.

Om uranhalten i malmen är hög, 2 % eller mer, kan den direkta strålningen från uranets radioaktiva sönderfallsprodukter ge så höga stråldoser att spe-

ciella strålskärmar måste installeras på maskinerna för att skydda gruvarbetarna. Med lägre halter kan brytningen ske på samma sätt som i alla andra typer av gruvor.

Vid lakningsprocessen förbrukas nästan allt av den tillförda utspädda svavelsyran. Rester av svavelsyran finns dock kvar i avloppsvattnet, som därför måste neutraliseras och även renas från radium som bildas vid uranets sönderfall. Vattnet neutraliseras först med kalk, därefter tillförs bariumklorid så att radium fällt ut och sedimenterar.

Det som blir kvar av malmen efter utlösning av uranet samt utfällningen från reningen av avloppsvattnet utgör avfall. Detta kan i vissa gruvor läggas tillbaka där bryningen skett men oftast läggs det i stora täta dammar. När avfallet torkat täcks det med tätande material, t.ex. morän.

Vid flera gruvor har återställning av marken skett på ungefär på samma sätt som vid den svenska Ranstadsgruvan (se detta avsnitt).

Kanada

Kanadensiska miljöaktivister drev 1984 en omfattande kampanj om miljön vid

de kanadensiska urangruvorna. Svenska massmedia publicerade skrämmande uppgifter. Industridepartementet beordrade en granskning av uppgifterna.

Svenska myndigheters kontakter med motsvarande i Kanada visade emellertid att anklagelserna var ogrundade. Det fanns inga tecken på ökad cancerförekomst och heller ingen skogsdöd. Enligt de kanadensiska myndigheterna skedde gruvbrytningen på ett från miljö- och hälsosynpunkt acceptabelt sätt.

Ryssland

En liknande aktion gjordes av svenska **Greenpeace** 1994 om förhållandena vid den ryska urangruvan **Krasnokamensk** i östra Sibirien. Greenpeace påstod att cancerfrekvensen i Krasnokamensk var två till tre gånger större än i övriga Ryssland.

Denna gång anordnade Statens Strålskyddsinstitut en resa till Ryssland och besökte såväl de ryska myndigheterna i Moskva som gruvan och de lokala miljömyndigheterna i Sibirien.

Det man fann (Ref. 10) var att cancerfrekvensen i Krasnokamensk var lägre än genomsnittet i Ryssland och faktiskt väsentligt lägre än i Sverige. Dock var ökningstakten högre än i Ryssland.

Förklaringen till dessa uppgifter är att cancer är en åldersrelaterad sjukdom och att medelåldern i Krasnokamensk var lägre än i Ryssland (och i Sverige) samt att en stor del av befolkningen i Krasnokamensk hade en ålder på 50 till 60 år eftersom en stor inflyttning skedde på 1960-talet.

Det är i den åldern cancerfrekvensen börjar öka i alla befolkningar.

Ovanstående kan förefalla innehålla en motsättning. Där påstås dels att medelåldern var låg dels att en stor del av befolkningen hade en ålder på 50 till 60 år.

Den enkla förklaringen är att befolkningen i Krasnokamensk består dels av dem som flyttade dit under 1960-talet dels av deras barn.

Statens Strålskyddsinstitut kunde således visa att Greenpeaceangreppen på arbets- och boendemiljön vid en urangruva var grundade på felaktiga tolkningar av tillgänglig sjukdomsstatistik.

Miljöcertifiering

Svensk kraftindustri köper uran direkt från ett antal gruvor.

Bara gruvor som har miljöcertifierats av respektive kraftföretag kan komma ifråga som leverantörer.

Detsamma gäller anläggningar för anrikning av uran.

Externa kostnader

EU-kommissionen genomförde under 1990-talet ett stort projekt, kallat **ExternE** för att utvärdera miljö- och hälsorisker för olika energislag.

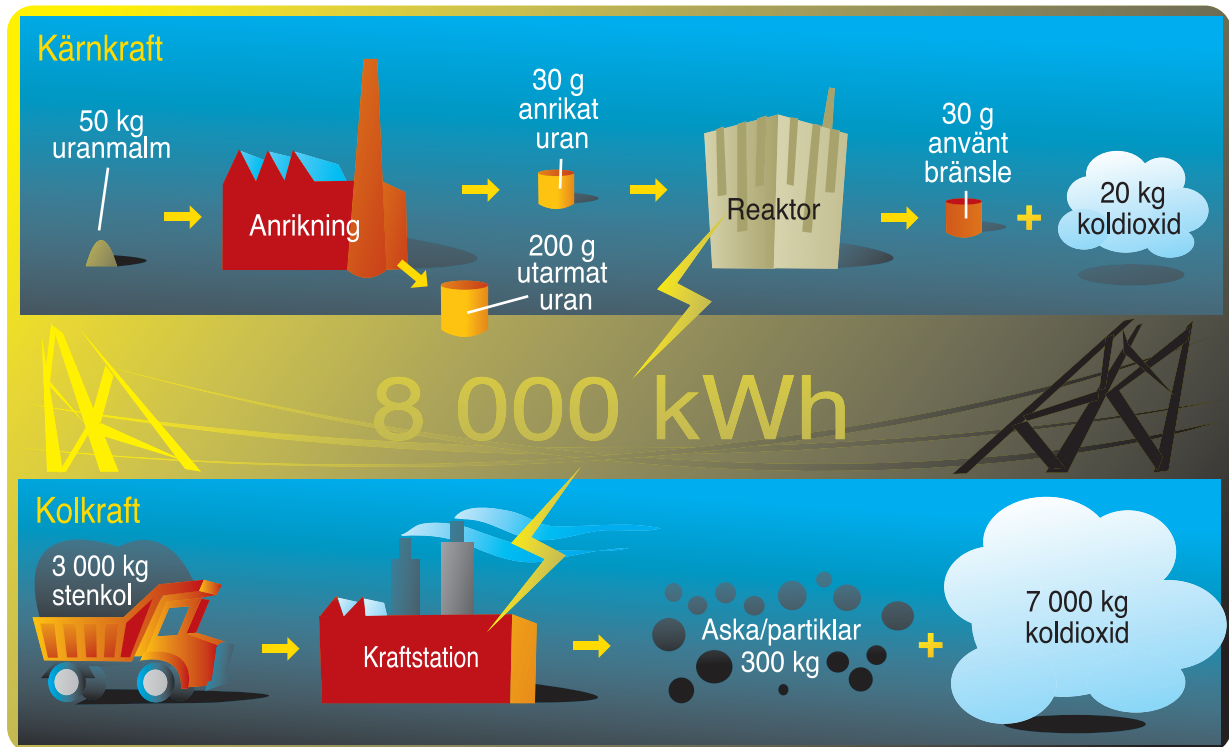
Slutresultatet redovisas i form av s.k. externkostnader. Dessa omfattar alla led i bränslecykeln, från gruvan till avfallsförvaringen, och alla led från verkets tillverkning till demontering.

Kort kan man beskriva resultatet som att för kolkraft i Europa ligger externkostnaden vid de renaste anläggningarna på nivån 10 öre/kWh om man inte räknar med effekterna av koldioxidutsläppen (Ref. 11). För naturgas är nivån några ören/kWh och för kärnkraft är den under 1 öre/kWh.

Bara en mycket liten del av externkostnaden för kärnkraft relateras till gruvbrytningen.

Om man inkluderar de troliga skadorna av koldioxidutsläppen ökar kolkraftens externa kostnad till cirka 40 öre/kWh och gaskraftverkens till 20 öre/kWh.

Kärnkraftens externkostnader för koldioxidutsläpp är försumbara.



Viktiga delar av bränslecykeln för kärnkraft och kolkraft

Kärnkraftens kostnader

Svensk kärnkraft kostar 15-18 öre/kWh att producera. I denna siffra inkluderar kostnader för kapital, förnyelsekostnader, drift och underhåll, bränsle- och avfallskostnader samt skatter och avgifter.

Svensk kärnkraft svarar idag för alla sina egna kostnader, inklusive framtida avfallskostnader, och är helt utan statliga subventioner.

Kärnkraften är liksom vattenkraft och vindkraft kapitalintensiv och har på samma sätt som dessa kraftslag låga rörliga kostnader.

Motsatsen gäller för i första hand kraftproduktion baserad på naturgas, vars kostnad helt domineras av kostnaden för bränslet.

Samma inriktning, men i mindre grad gäller för övriga fossila kraftslag,

olja och kol, samt för bioenergi.

Kärnkraftens rörliga kostnad är 3,5 öre/kWh, varav knappt 3 öre för bränslet och knappt 1 öre för framtida avfallskostnader.

Bränslekostnaderna består av tre ungefär lika stora delar.

Uran, anrikning och bränsletillverkning kostar vardera ungefär 1 öre/kWh.

Andra användningar av uran

Uranets användning i kärnvapen

Det naturliga uranet är råvara för höganrikat uran och plutonium vid tillverkningen av kärnvapenmaterial.

Denna typ av tillverkning har nu i praktiken upphört helt. I själva verket skrotas en del vapenmaterial (se tidigare avsnitt) för att i stället användas som bränsle i kommersiella kärnkraftverk.

Redan under 40- och 50-talen identifierades uran som ett strategiskt material. 1953 gjorde president Eisenhower sitt utspel om Atoms for Peace, där han föreslog bl.a. att FN skulle inrätta International Atomic Energy Authority, IAEA, med kontroll av klyvbart material som en huvuduppgift (Ref. 12).

IAEA startade sin verksamhet 1957 och har sedan dess byggt upp ett världsomspännande system för kontroll av användningen av klyvbart material.

IAEA:s system täcker hela kärnbränslecykeln, från gruvan till slutförvaret av det använda bränslet. Systemet anses vara vattentätt och varje signifikant avvikelse kan identifieras i rimlig tid.

Atoms for Peace och IAEA:s kontrollsystem grundar sig på att det finns ett positivt intresse för många länder att utnyttja kärnkraften kommersiellt.

Därför finns en bred acceptans av en detaljerad internationell kontroll. Kärnkraftutbyggnaden har således varit en viktig förutsättning för möjligheterna att kontrollera bruket av det klyvbbara materialet.

Utän kärnkraften skulle systemet vara väsentligt mindre accepterat och mindre effektivt. En omfattande avveckling av kärnkraften i många länder skulle därför på sikt innebära en risk för försämring av IAEA:s internationella övervakning.

Alternativ användning av uran

Historiskt har uran använts på en rad olika sätt. Fortfarande används urannitrat som fotografisk toner och uranacetat i kemiska analyser. Uransalter ger gult glas och gul keramisk glasyr.

Dessutom utnyttjas uranets egenskap som tung metall (densitet 19 g/cm³) i t.ex. gyrokompasser, motvikter i flygplans kontrollsystem, som ballast i missiler och som skyddsmaterial.

På senare tid har användningen av utarmat uran i pansarbrytande projektiler i Gulfkriget och i Balkan uppmärksamats. (Beträffande påstådda hälsoeffekter av utarmat uran, se (Ref. 18)).

Inom alla dessa användningsområden för uranet är förbrukningen liten och det är lätt att finna likartade material med samma egenskaper.

Ekonomisk och ekologisk uthållighet

Sedan några årtionden finns det en medveten långsiktig inriktning i miljö- och energipolitiken, både nationellt och internationellt, att prioritera s.k. uthålliga energikällor.

I den svenska debatten tycks man därmed mena enbart förnybara energikällor som sol (inklusive bioenergi), vind och vatten, dvs energikällor som är en del av naturens kretslopp och som därför anses outtömliga om än med begränsad total kapacitet.

Grunden till denna nya syn på behovet av uthålliga energikällor finns i ett numera allmänt välkänt faktum att de

råvaror vi nu använder, t.ex. mineraler och fossila bränslen, har en begränsad livslängd och inom en överskådlig framtid kan de vara helt uttömda.

Till samma bild hör också att atmosfärens och havens tålighet mot utsläpp är begränsad.

"Sustainable development" enligt Brundtland

Begreppet sustainable development - hållbar utveckling - användes första gången i ett större sammanhang vid FN:s första miljöpolitiska konferens, Stockholmskonferensen 1972.

Den första väl genomtänkta och numera klassiska definitionen av begreppet hållbar utveckling formulerades av Gro Harlem Brundtland, som var ordförande i Världskommissionen för miljö och utveckling, i slutrapporten "Our Common Future" 1987 (Ref. 13):

"Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

Redan i Brundtlandrapporten fanns

klara ställningstaganden till att en hållbar utveckling i världen förutsätter en god teknisk och ekonomisk utveckling framförallt i utvecklingsländerna men också i nuvarande industriländer.

Detta tema har sedan ytterligare förstärkts vid senare internationella konferenserna i FN:s regi, bl.a. Rio 1992 och Johannesburg 2002.

Uranet är ett uthålligt bränsle

Till att börja med kan konstateras att kärnkraften inte i någon del av bränslecykeln släpper ut nämnvärda mängder koldioxid.

Vidare finns klart definierade och väl genomtänkta metoder för att långsiktigt ta hand om allt avfall från kärnbränslecykeln på ett säkert sätt. Dessutom betalar nuvarande generation alla kommande kostnader för den framtida avfallsförvaringen.

Volymerna avfall som generas vid kärnkraftdriften är mycket små och fordrar synnerligen små förvaringsvolym (allt avfall från den planerade svenska kärnkraftproduktionen skulle rymmas i mindre än hälften av idrottsarenan Globens volym).

Kärnkraftens användning lämnar således inte efter sig några problem för kommande generationer.

Uran är den enda bränsleråvaran för kärnkraften och uran har ingen annan viktig användning vare sig nu eller under överskådlig tid framöver.

Dessutom återcyklas och förbränns kärnvapenmaterial i kommersiella reaktorer så att framtida kärnvapen-användning försvåras.

Därmed uppfyller uranet Brundtland-rapportens krav på en hållbar energikälla. Men det återstår några viktiga frågor om kärnkraftens hållbarhet:

- Hur länge räcker uranet?
- Är kärnkraften en teknologi som är långsiktigt hållbar?

Det enkla men ofullständiga svaret på den första frågan är att kända uranfyndigheter brytbara med nuvarande kostnadsläge räcker för världens nuvarande kärnkraft i uppåt 100 år.

Detta svar måste kompletteras med hjälp av den analys om kärnkraftens kostnader som finns i ett tidigare avsnitt.

- Om kostnaden för natururan ökar till det dubbla, dvs från 1 öre/kWh till 2 öre/kWh ökar kärnkraftens totala kostnad från 18 öre till 19 öre/kWh, dvs med 5 %.

- Om priset på gas ökar till det dubbla blir kostnaden för gaskraften 60 % högre. Prisrelationen är liknande men inte så extrem för olja och i viss mån för kol. Gas, olja och kol tål således inte några stora prisökningar på en kommersiell marknad, i varje fall inte om råvaran skall brännas i kraftverk.

- Om priset på uran ökar till det dubbla någon gång i framtiden så blir 10 gånger fler av de nu kända uranfyndigheter ekonomiskt brytvärda.

Dessutom ökar incitamentet till en kraftigt ökad prospektering efter ytterligare nu okända fyndigheter. Uranet skulle då räcka till nuvarande kärnkraftverk med nuvarande teknik i hundratals år.

På sikt, inte om 10 år men kanske om 30 till 40 år, är det med utgångspunkt från nuvarande kunskapsläge troligt att helt nya typer av reaktorer kan bli kommersiellt användbara (Ref. 14). Det gäller dels brytreaktorer, dels acceleratordrivna transmutationsreaktorer.

Det som är speciellt intressant med dessa är att de utnyttjar uranbränslet 50 gånger mer effektivt än nuvarande typer av reaktorer.

Det ursprungliga uranpriset kan då öka ytterligare utan att nämnvärt påverka den slutgiltiga kostnaden att producera el.

I transmutationsreaktorerna är det dessutom möjligt att använda redan använt kärnbränsle för ny elproduktion samtidigt som radioaktiviteten i det nya avfallet blir mycket mera kortlivat än i det gamla.

Det finns naturligtvis en rad osäkerheter när det gäller ekonomin för vissa framtida typer av reaktorer. Det är, emellertid, redan nu klart att det finns en stor potential för att vidareutveckla kärnkrafttekniken utefter flera olika linjer så att bränsleråvaran kan användas mycket mer effektivt än i nuvarande reaktorgenerationer.

Det finns därför grund för påståendet att världens urantillgångar kan räcka för en utökad kärnkraftproduktion i flera tusentals år.

I USA, Sverige och på flera andra håll i världen har man inom kraftindustrin dragit slutsatsen att de flesta av de kärnkraftverk som nu är i drift kan användas med god ekonomi och hög säkerhet i ca 60 år, i några fall kortare tid och i andra fall mer än 60 år (Ref. 3).

De svenska verken skulle således kunna vara i kommersiell drift till någon gång på 2030- eller -40 talen.

Nya, förbättrade och mer bränsle-effektiva kärnkraftanläggningar kommer säkert att finnas kommersiellt tillgängliga långt innan dess.

Risken för olyckor kan innebära att allmänhetens förtroende för kärnkraften minskar eller i värsta fall försvinner. Denna situation är inte unik för kärnkraften utan den delas med t.ex. kolkraften (stora kolgruveolyckor), vattenkraften, passagerarflyget och passagerarbåttrafiken.

När det gäller kärnkraften har den typ av reaktorer som används i Sverige en mycket hög säkerhetsnivå. Om världens alla reaktorer hade denna säkerhetsnivå kan risken för en härdskada vid någon av världens drygt 500 reaktorer beräknas till en gång på 200 år.

Den härdskada som inträffade i Harrisburg i USA 1979 ledde inte till utsläpp av skadliga mängder radioaktiva ämnen (Ref. 15).

Därmed finns saklig grund för att påstå att kärnkraften som den fungerar idag och som den kan väntas utvecklas är en uthållig energikälla, såväl fysiskt som miljömässigt, så som detta begrepp definieras i den internationella energi- och miljödebatten.

En annan grundsyn på uranet och dess användning presenteras på en kärnkraftkritisk hemsida publicerad av WISE, World Information Service on Energy (Ref. 16).

Den innehåller en mängd användbart faktamaterial.

Slutsatser

Kärnkraften är en koncentrerad kraftkälla, en egenskap på gott och ont. I jämförelse med kol, olja, solenergi och vindkraft kan den utnyttjas på ett sätt som innebär att små områden berörs per producerad kWh.

Detta gäller även om hela bränslekedjan från urangruvan via reaktordriften till avfallsbehandlingen inkluderas i jämförelsen.

Å andra sidan fordrar hanteringen av denne energikälla en omfattande och djupgående teknisk kompetens och väl utvecklad teknik.

Frågor som har med kärnkraftens säkerhet, miljö och hälsa blir därför komplicerade och svåra att förklara för allmänheten.

Västerländsk kärnkraftteknik har hittills motsvarat högt ställda förväntningarna när det gäller säkerhet, miljö och hälsa.

Den långa goda erfarenheten i dessa avseenden tycks innebära ett gradvis ökande förtroende för verksamheten i internationellt perspektiv.

Därmed finns en grund för en långsiktig användning och utveckling av kärnkraften, åtminstone i industriellt väl utvecklade länder (Ref. 17).

Bränslekostnaderna utgör redan nu en liten del av kärnkraftens kostnader, vilket gör att totalekonomin är relativt okänslig mot även stora förändringar av kostnaderna för uran.

I framtida reaktorkonstruktioner blir denna okänslighet än mer markerad. Därmed kan världens samlade urantillgångar, även de som finns i låga koncentrationer, bli en energikälla som kan användas i tusentals år.

Med den internationellt använda definitionen av hållbar utveckling, så som den uttrycks bland annat i Brundtland-

rapporten, kan uranet betraktas som en långsiktigt hållbar energikälla.

Detta innebär naturligtvis inte att kärnkraften långsiktigt skulle bli en dominerande energikälla. Däremot finns det anledning för samhället att nu acceptera kärnkraften som en av flera energikällor som uppfyller följande viktiga kriterier:

- Rimlig nivå på produktionskostnaderna
- God långsiktig tillgång på bränsle
- Fri från koldioxidutsläpp

Innehållet i denna skrift har faktagranskats av specialister inom svensk kärnkraftindustri och av Analysgruppens specialister.

Carl-Erik Wikdahl
cew@energiforum.se

Illustrationer *Lasse Widlund*

Referenser

1. Kärnenergin 50 år. Skrift utgiven av IVA och Tekniska Museet 1992
2. IAEA:s hemsida, www.iaea.org/programmes/a2/index.html
3. Kärnkraften i världen. Utveckling eller avveckling? Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU, nr 1, november 2002.
4. Uranium 2003: Resources, Production and Demand. A joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency.
5. World Nuclear Association's hemsida www.world-nuclear.org
6. Ranstad. En uppföljning av efterbehandlingen av dagbrottet och lakrestområdet. AB SVAFO, PM 99-03
7. Det svenska avfallsprogrammet, SKB 2000 och Djupförvar för använt kärnbränsle, SKB 2003.
8. Livscykelanalys. Vattenfall 2005.
9. Miljöfrågor vid uranutvinning. Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU, nr 1, februari 1989
10. En bedömning av hälso- och miljösituationen i Krasnokamensk, Östra Sibirien Ryssland. Rapport SSI 1995-20
11. Hälsorisker vid elproduktion. Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU, nr 1, mars 2001.
12. Atomer för fred. Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU, nr 2, maj 2004-10-24.
13. Our Common Future. The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press 1987
14. Kärnkraftens utvecklingsmöjligheter. Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU, nr 1 mars 1999
15. Är kärnkraften säker? Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU. Nr 1, maj 2004.
16. Uranium Project inom WISE har en innehållsrik hemsida www.antenna.nl/wise/uranium
17. Planer på ny kärnkraft i USA. Faktablad utgivet av Analysgruppen vid KSU, nr 37, januari 2005.
18. Utarmat uran och dess risker. Rapport av Evelyn Sokolowski utgiven av Analysgruppen vid KSU, april 2001.

Kärnklyvning - kedjereaktion - bildning av plutonium

Naturligt uran består av två typer av urankärnor. Uran-238 är helt dominerande – mer än 99 %. Resten, ca 0,7 %, är uran-235. Det är bara uran-235 som kan klyvas så att kärnenergi frigörs.

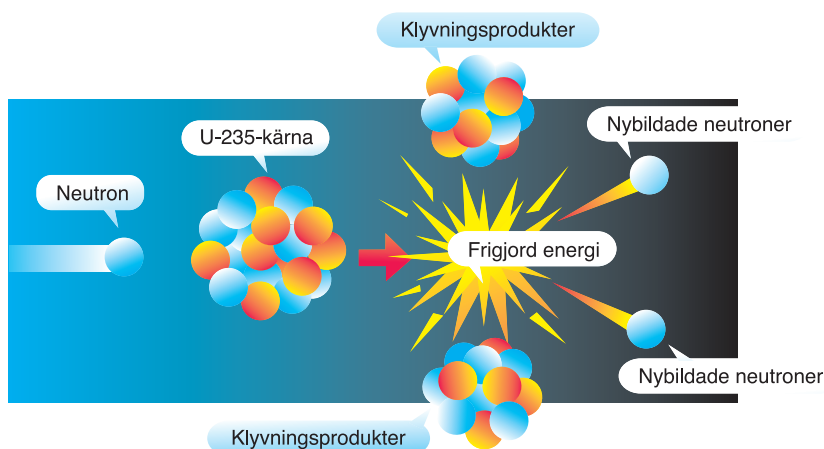
Naturligt uran innehåller för låg halt av den klyvbara kärnan uran-235 för att direkt kunna användas som bränsle i en modern kärnkraftreaktor. Därför anrikas (se faktasidan om anrikning) natururanet så att halten uran-235 ökar från 0,7 % till närmare 5 %.

Kärnklyvning

I en kärnreaktor klyvs uran-235 kärnor av fria neutroner så att två nya atomkärnor bildas.

Vid kärnklyvningen (också kallad fission) frigörs dessutom stora mängder energi och några nya neutroner som tidigare har varit bundna i urankärnorna.

Energien från en enorm mängd



kärnklyvningar värmer reaktorns kylvatten vars energi via en ångturbin omvandlas till elenergi i en elgenerator.

Klyvningsprodukterna, dvs de nya atomkärnor som uppstår vid klyvningen av uran-235, ger upphov till helt nya kemiska ämnen med en atomvikt som är ungefär hälften av uranets.

Dessa nybildade ämnen är radioaktiva och är huvudbeståndsdelen i det kärnavfall som så småningom tas om hand i form av använt kärnbränsle (Ref. 7). Ett bränsleelement används i genomsnitt upp till fem år i en kärnreaktor.

Kedjereaktion

Bildningen av fria neutroner vid kärnklyvningarna är grunden till att man i en reaktor kan få en självunderhållande kedjereaktion. En del av de nybildade neutronerna träffar nya uran-235-kärnor med nya kärnklyvningar som följd osv i en lång rad av generationer. En del neutroner fångas in av klyvningsprodukter och går förlorade för kedjereaktionen.

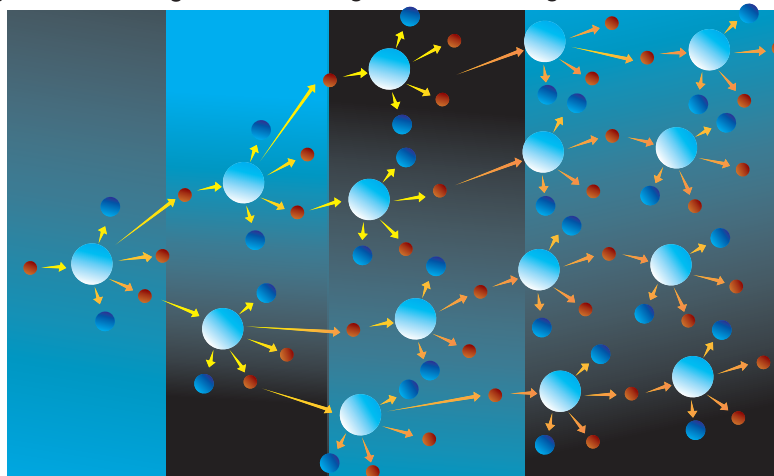
För att hålla reaktorns effektutveckling konstant räcker det med att i genomsnitt en av de nybildade neutronerna träffar en ny uran-235-kärna som klyvs.

Bildning av plutonium

En liten del av de fria neutronerna infångas av uran-238-kärnor. Då sker ingen klyvning utan i stället bildas plutonium-239.

Dessa kärnor har samma egenskaper som uran-235 och kan klyvas så småningom. I själva verket kommer närmare en tredjedel av reaktorns energi från klyvning av plutonium-239-kärnor, som tidigare nybildats i samma bränsle.

1:a generationen 2:a generationen 3:e generationen 4:e generationen osv.



● Neutron ● Uran 235 ● Klyvningsprodukt

Det plutonium som finns kvar då det använda bränslet tagits ut ur reaktorn kan renframställas i en kemisk process som kallas upparbetning.

Det finns reaktorer som byggts enbart för att producera det man kallar för vapenplutonium. Driftcykeln i dessa militära reaktorer är kort, storleksordningen några månader, för att det nybildade plutonet skall bestå av i stort sett rent plutonium-239.

I civila reaktorer är driftcykeln 3 till 5 år. Det plutonium som finns kvar i använt kommersiellt reaktorbränsle är "smutsigt" och är praktiskt taget helt omöjligt att använda för vapenändamål.

Skälet är att det också innehåller plutonium-240 och plutonium-241 som spontant frigör neutroner.

Dessa skulle på ett avgörande sätt omöjliggöra bombfunktionen.

Uranbrytning i Ranstad

I Sverige finns kända uranförekomster dels i granitbergarter i Jämtland och Norrbotten, dels i alunskifferar som finns i Västergötland och Närke.

Kring Ranstad i Västergötland finns ett område med alunskifferar med ca 300 gram uran per ton skiffer.

Under tiden 1965 till 1969 drevs en urangruva i Ranstad, Västergötland, med en kapacitet på ca 200 ton uran per år (Ref. 6).

Den kördes vid nära hälften av full kapacitet och under de 3-4 åren grävdes 1,5 miljoner ton alunskiffer upp i dagbrott och av detta tillverkades 215 ton uran.



Dagbrottet i Ranstad under pågående efterbehandling

Naturen återskapas

1980 gjordes en utvärdering av en effektiviserad urangruva i Ranstad med en kapacitet på 470 ton uran per år.

I 1980 års penningvärde beräknades produktionskostnaden till nära 500 SEK/kg uran.

Det internationella uranpriset låg då på cirka 380 SEK/kg uran. Det hade varit högre dessförinnan och var snabbt på väg ner.

Dagens uranpris (dvs 25 år senare) är mindre än USD 60/kg uran, ett pris som med dagens dollarkurs motsvarar ungefär 400 SEK/kg.

Den ekonomiska utredningen ledde så småningom till att Ranstad lades ner 1982 och sedan dess har ingen uranbrytning skett i Sverige.

Utvecklingen av världsmarknadspri-set på uran därefter har bekräftat att nerläggningsbeslutet var klokt.

Ranstadsmiljön i dag

Under åren 1988 till 1993 genomfördes i Ranstad ett projekt med målet att helt återställa gruvområdet till en levande landsbygdsmiljö.



En ny sjö har vuxit fram i det gamla dagbrottsområdet

Dagbrottet upptog en yta på ungefär 400 hektar med ett djup på 15 meter och lakresterna några få hektar.

Återställningen har inneburit anläggandet av en helt ny sjö, kallad Trane-

bärssjön, våtmarker, torrängar, betesvallar, åkermark och skogsplanteringar.

Urananrikning

Att skilja olika kemiska ämnen åt har man kunnat göra sedan långt tillbaka i tiden. Det är betydligt besvärligare att separera atomer tillhörande samma kemiska ämnen.

Olika isotoper av samma kemiska grundämne har samma kemiska egenskaper och kan därför inte separeras i en kemisk process. I stället använder man sig av skillnader i fysiskt avseende mellan isotoperna.

Naturligt uran består av 99,3 % uran-238 och 0,7 % uran-235. Ett antal olika metoder att öka, anrika, halten uran-235 har demonstrerats i laboratorier under årens lopp, men bara två huvudtyper, gasdiffusion och centrifuger, har kommit till användning i kommersiell skala.

I båda dessa processer tillförs uranet i form av gasen uranhexafluorid, UF_6 . Molekyler av UF_6 bestående av uran-235 är ungefär en procent lättare än motsvarande med uran-238.

Det är denna lilla skillnad i massa som utnyttjas i båda processerna.

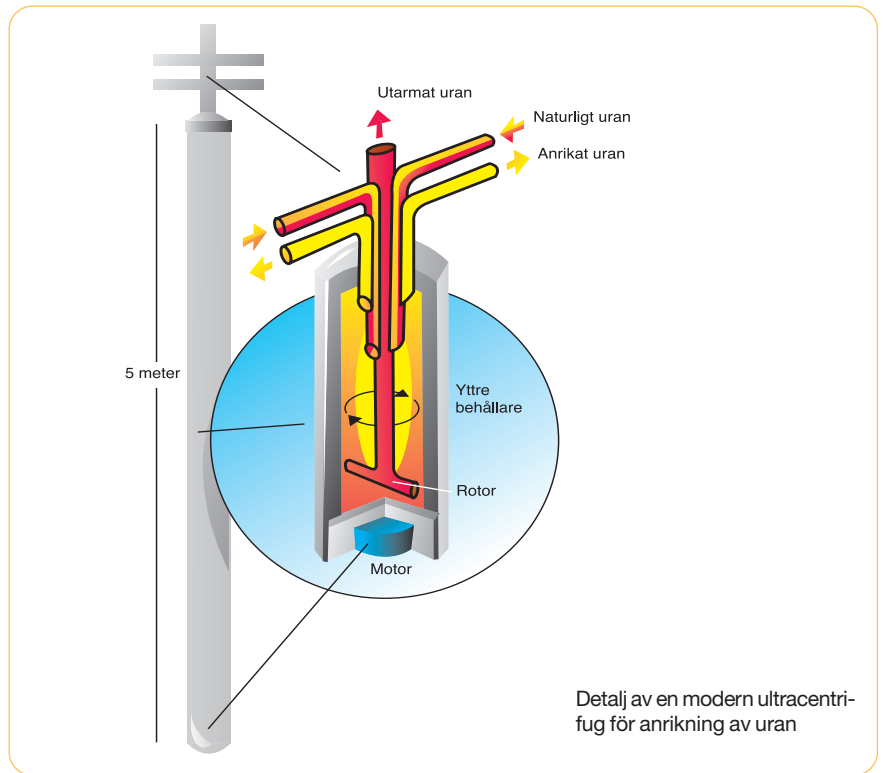
I diffusionsprocessen tvingas gasen under högt tryck genom en serie av porösa membran. Eftersom molekylerna med uran-235 är lättare än molekylerna med uran-238 rör de sig en aning snabbare och har därmed en aning större chans att passera genom membranets små porer.

Den gas som passerat genom membranet har därför anrikats på uran-235 medan gasen som inte passerar genom membranet har utarmats på uran-235.

Processen upprepas många gånger i en lång serie av diffusionssteg kopplade i en kaskadkoppling. Totalt används ungefär 1400 steg för att öka andelen uran 235 från 0,7 % till 3 à 5 %.

Detta låganrikade uran kan sedan användas som bränsle i kärnkraftverk. Restprodukten består av utarmat uran som innehåller mer än 99 % uran-238 och cirka 0,2 % uran-235.

För att framställa vapenuran drivs anrikningsprocessen väsentligt längre så att slutprodukten blir höganrikat uran innehållande mer än 90 % uran-235.



Detalj av en modern ultracentrifug för anrikning av uran

I centrifugprocessen leds gasen in i en serie av centrifuger. En sådan består av en cirka 5 meter hög cylinder med en diameter på 15-20 cm. Varje cylinder arbetar i vakuum och innehåller en rotor som snurrar med 50 000 varv per minut.

Rotationen ger en centrifugalkraft som leder till att koncentrationen av den tyngre molekylerna med uran-238 ökar utefter cylinderns vägg. I centrum av cylindern är koncentrationen högre av uran-235. (Se figuren ovan.)

Varje steg består av flera centrifuger placerade parallellt med varandra och stegen förenas sedan i en kaskadkoppling. Anrikningen per steg är mycket högre i centrifugerna än i diffusionsmembranen. Därför behövs här bara ca 20 steg för att anrika till 3 à 5 % uran-235.

Diffusionsmetoden är tekniskt sett enklare än centrifugerna men betydligt mera energikrävande. I den behövs 50 gånger mer energi för motsvarande anrikningsarbete än i en gascentrifug.

För närvarande görs cirka 40 % av anrikningen med diffusionsmetoden, företrädesvis i relativt gamla anläggningar.

Tendensen är att senast år 2010 ersätta dessa med nya som alla kommer att bygga på centrifugmetoden. I den anläggning som nu planeras i USA kommer de nya centrifugrören att vara cirka 20 meter långa.

Stora kommersiella anrikningsanläggningar är i drift i Frankrike, Tyskland, Nederländerna, Storbritannien, USA och Ryssland. Mindre anläggningar finns i några andra länder.

Huvuddelen av uranet till svenska reaktorer anrikas med gascentrifuger i europeiska anläggningar.

Den energi som behövs för anrikning i en centrifuganläggning av den mängd uran som används under ett års drift av en 1000 MW reaktor är ungefär 5 miljoner kWh eller 0,005 TWh.

En sådan reaktor producerar närmare 8 TWh el per år, dvs tusen gånger mer än vad som behövs för anrikningen.

Anrikningen svarar för ungefär en tredjedel av kostnaden för det färdiga reaktorbränslet, dvs närmare 1 öre/kWh.

Uranets historia i korthet

- För några miljarder år sedan pågick under hundratusentals år kärnklyvningar i rika uranmalmer i en naturlig kärnreaktor i ett område som numera heter Oklo i Gabon i västra Afrika (Ref. 1)
- I början av 1500-talet öppnas silvergruvor i Böhmen med biprodukten pechblände som bl.a. används för att färga glas
- 1789 identifierar den tyske kemisten **Martin Klaproth** ett nytt ämne i mineralet pechblände. Han ger det namnet uran efter den nyupptäckta planeten Uranus
- 1841 isoleras metallen uran av den franske kemisten **Eugène-Melchoir Peligot**
- 1896 upptäcker **Henri Becquerel** att uran avger s.k. becquerelstrålar med samma egenskaper som de strax innan upptäckta röntgenstrålarna
- 1898 finner **Marie Curie** att flera ämnen, bland annat radium, strålar på samma sätt som uran och präglar termen radioaktivitet
- 1932 upptäcker engelsmannen **James Chadwick** neutronen och visar att den är en av atomkärnans beståndsdelar
- I december 1938 visar tyskarna **Otto Hahn** och **Fritz Strassman** att fria neutroner kunde påverka urankärnor. Redan vid jultid kan hans kolleger **Lise Meitner** och **Otto Frisch** förklara fenomenet som kärnklyvningar eller fission
- 1942 visar den italienske fysikern **Enrico Fermi**, verksam i Chicago, i en ordnad stapel av grafit och naturligt uran att en självunderhållande kedjereaktion av klyvningar av urankärnor var möjlig. Det var den första av människan konstruerade kärnreaktorn
- 1945 provsprängs i USA den första atombomben och en knapp månad senare fälls bomberna över Hiroshima och Nagasaki
- 1949 provsprängs den första atombomben i forna Sovjetunionen
- 1954 startar den första kraftproducerande kärnreaktorn i Obninsk, strax söder om Moskva
- 1954 startar den första svenska försöksreaktorn R1 i Stockholm
- 1956 startar Calder Hall i England, det första kärnkraftverket avsett för kommersiell kraftproduktion
- 1963 levereras den första elen producerad vid en svensk kärnreaktor i Ågesta som också försörjde förorten Farsta utanför Stockholm med fjärrvärme
- 1972 kan man genom noggranna analyser påvisa i urangruvan Oklo i Gabon att en eller flera naturliga reaktorer varit i drift under hundratusentals år för ett par miljarder år sedan
- 1972 startar Sveriges första kommersiella kärnkraftverk, Oskarshamn1