



Mineralmarknaden 2015

Tema: energimetaller

SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Periodiska publikationer 2016:2

© Sveriges geologiska undersökning

Omslagsbild: Ståltunna med så kallad "Yellow cake" från urangruvan Rabbit Lake i Kanada. Yellow cake är ett sorts handelsnamn för den uranoxid som utvinns från uranmalm med olika lakningsprocesser. Yellow cake består huvudsakligen av uranoxiden U_3O_8 men kan också innehålla andra uranoxider och salter innehållande uranyljoner. Eftersom ståltunnan innehåller oxider eller salter av rent uran utan några sönderfallsprodukter så är materialet måttligt radioaktivt och således inte så farligt ur strålningssynpunkt. Foto: Cameco.

ISSN 0283-2038

Tryck: TMG Tabergs AB
Layout: Rebecca Litzell, SGU

FÖRORD

Detta är SGUs fyrtionionde rapport om mineralmarknaden. Rapportserien mineralmarknaden behandlar ett urval av metaller och mineralprodukter som har ekonomisk betydelse för Sverige. Denna utgåva har temat energimetaller.

Rapportserien riktar sig till myndigheter, företag, organisationer, studerande och enskilda som har ett intresse av att följa utvecklingen på mineralmarknaderna samt att få en fördjupning kring olika metaller som är viktiga i vårt samhälle. Arbetet är ett led i SGUs uppgift att bland annat följa mineralhanteringen och att informera om utvecklingen.

Tema energimetaller hanterar uran och torium, två viktiga metaller för kärnkraft och kärnforskning. Rapporten går igenom ett flertal aspekter av metallerna, bland annat geologi och malmbildning, tillgångar och efterfrågan i Sverige och världen, samt miljö- och hälsoaspekter av brytning av metallerna. Flera exempel på nutida brytning i världen tas upp, men även historisk brytning i Sverige.

I Sveriges berggrund finns stora urantillgångar, några av de största i världen. En stor majoritet av tillgången är dock i form av alunskifferar, vilka klassas som en okonventionell källa, det vill säga ej ekonomiskt brytvärd i dagsläget. Då ingen brytning av uran sker i Sverige idag är metallen en viktig importvara för Sverige eftersom kärnkraft, driven av uran, stod för omkring en tredjedel av Sveriges elproduktion år 2015, enligt Energimyndigheten. De svenska kärnkraftverken använder omkring 1 500–2 000 ton uran varje år.

Rapporten har utarbetats av Lars Norlin, Anders Hallberg, Berndt Pettersson, Pontus Westrin, Peter Åkerhammar, Jan-Olof Arnbom och Cecilia Jelinek.

Lena Söderberg
Generaldirektör

Erika Ingvald
Enhetschef

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Inledning	5
<i>Introduction</i>	
 Grundämnet uran	6
<i>The element uranium</i>	
Kemiska egenskaper	6
Kärnfysiska egenskaper	6
Historik	7
Geologi och malmtypen	7
Genetisk klassificering av uranmineraliseringar	12
Havsvatten	15
 Uran i världen	16
<i>Uranium in the world</i>	
Metoder för att beskriva urantillgångar	16
Världens urantillgångar	20
Prospektering i världen	25
Produktionsteknik	26
Produktion	31
Användning	31
Uranpriset	33
Efterfrågan	34
 Uran i Sverige	38
<i>Uranium in Sweden</i>	
Tillgångar och Geologi	38
Historisk brytning	38
Prospektering i Sverige	41
Import och handel	49
 Framtida utveckling och torium	51
<i>Future development and thorium</i>	
Dagens och framtidens kärnreaktorer	51
Torium	52
 Hälso- och miljöproblematik	56
<i>Health and environmental issues</i>	

Miljö- och hälsopåverkan vid uranbrytning.....	56
Miljö- och hälsoproblem vid tillverkning av kärnbränsle.....	62
Miljö- och hälsopåverkan vid brytning och användning av torium	62
Biologiska effekter av strålning, uran och torium	63
Uran	65
Torium.....	66
Slutförvaring – metoder och utveckling	67
<i>Disposal of radioactive waste – methods and development</i>	
Referenser	69
<i>References</i>	

Inledning

Introduction

Uran och torium är två metaller som är viktiga för kärnkraft och kärnforskning. Med början efter andra världskriget har det forskats mycket på dessa grundämnen och deras förmåga att fungera som energimetaller – metaller som bidrar med bränsle i kärnkraftsreaktorer.

Kärnkraft finns idag i ett 30-tal länder och utgör omkring tolv procent av världens elproduktion. Som bränsle används den klyvbara isotopen uran-235, en isotop som har förmågan att underhålla en kontinuerlig kärnklyvning, en kedjereaktion. När kärnklyvningen sker frigörs energi i form av värme som i sin tur kan driva generatorer och producera el. I processen bildas kärnbränsleavfall, ett avfall som har mycket hög radioaktivitet och som måste förvaras säkert för att inte skada vår hälsa och miljö. 2015 stod kärnkraft för omkring en tredjedel av Sveriges elproduktion.

Några av världens största tillgångar av uran finns i Sverige, bland annat i Ranstad (Billingen), Myrviken (Viken) och Häggån. Majoriteten av tillgångarna är dock i form av låghaltiga, men väldigt stora, mineraliseringar som bedöms som okonventionella, det vill säga icke ekonomiskt lönsamma att bryta idag. Brytning av uranmalm sker idag i ett 20-tal länder där Kazakstan, Kanada och Australien tillsammans står för cirka 60 procent av produktionen. I Sverige sker ingen brytning av uranmalm, men brytning har tidigare skett i Ranstad. Där utvanns omkring 215 ton uran ur alunskiffer under 1960-talet. Idag importerar Sverige 1 500–2 000 ton uran varje år från Kanada, Australien, Ryssland, Namibia och Kazakstan.

Torium är en metall som det forskats mycket om, i syfte att användas för kärnkraft. Torium-232 kan transmuteras till uran-233, en isotop som inte finns naturligt men som är klyvbar på samma sätt som uran-235. Det finns omkring 3–4 gånger mer torium än uran i jordskorpan och en stor del av utvinningen skulle kunna

ske som biprodukt vid utvinning av sällsynta jordartsmetaller. Många länder driver på forskningen av toriumreaktorer, bland annat Indien, som har betydande toriumtillgångar.

Läsanvisning

Första kapitlet, *Grundämnet uran*, berättar om uranets olika egenskaper, ämnets historik och går igenom de malmtyper som innehåller uran.

I nästa kapitel, *Uran i världen*, finns information om var världens tillgångar på uran finns, samt några exempel på hur brytningen och uranutvinning sker i olika delar av världen. Dessutom kan du läsa mer om hur produktion av kärnbränsle sker samt hur priser och efterfrågan ser ut för uran.

Kapitlet *Uran i Sverige* berättar om Sveriges tillgångar och den historiska brytningen som skett här. Här finner du även information om nutida och historisk prospektering efter uran i Sverige, samt statistik över handel med uran och kärnbränsle.

I kapitlet om *Framtida utveckling och torium* kan du läsa om framtidens reaktorer samt om torium. Här finns även information om toriumproduktion och toriumtillgångar i världen.

I kapitlet *Hälsa- och miljöproblematik* finns information om vilka konsekvenser brytning av uran och torium har för vår hälsa och miljö. Det finns exempel från både historisk och nutida brytning i olika delar av världen. Dessutom finns fakta om vilka biologiska effekter uran, torium och strålning har.

I det sista kapitlet, *Slutförvar – metoder och utveckling*, finns mer information om hur använt kärnbränsle är tänkt att förvaras på lång sikt i vår berggrund.

På de sista sidorna finner du referenser och förslag på vidare läsning.

Grundämnet uran

The element uranium

KEMISKA EGENSKAPER

Uran är en silvervit radioaktiv metall med atomnummer 92 som tillhör aktiniderna i det periodiska systemets grupp 3. Smältpunkten är 1 132°C och kokpunkten 3 745°C. Densiteten är 18,95 kg per dm³, vilket innebär att uran är ett av de tyngsta grundämnena.

Uran förekommer i oxidationstillstånd från +3 till +6 där oxidationstalen +4 och +6 är de vanligast förekommande. I de vanligaste uranoxiderna varierar oxidationstalen från +4 i UO₂ till en kombination av +4 och +5 i U₄O₉ och en kombination av +5 och +6 i U₃O₈. Den stora variationen i oxidationstal och dess snabba byte av oxidationstal i kemiska reaktioner gör att uranoxider har katalytiska egenskaper, det vill säga att de kan påskynda en kemisk reaktion utan att själv förbrukas. Uran i vattenlösning består vanligtvis av uranyljoner, UO₂²⁺ där uran har oxidationstalet +6.

Uranyljoner har generellt god löslighet i syrerikt vatten och kan transporteras långa sträckor tills de möter en mer reducerande miljö där uranjonen reduceras till oxidationstalen +5 eller +4 och bildar joner med betydligt lägre löslighet. Denna förändring i löslighet vid förändrade oxidationstal är grunden till bildning av de flesta uranmalmer och även grunden till utvinning av uran ur uranmalmer.

KÄRNFYSISKA EGENSKAPER

Ett flertal av de grundämnena som finns listade i det periodiska systemet har en eller flera isotoper som spontant sönderfaller till andra grundämnena och sänder ut energi i form av strålning vid sönderfallet. Hastigheten på sönderfallet brukar anges som den tid det tar för att hälften av ämnet att sönderfalla, den så kallade halveringstiden. Det finns isotoper av grund-

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La–Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac–Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	UUb	UUt	UUq	UUp	UUh	UUs	UUo
Lantaniderna:			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Aktiniderna:			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Figur 1. Periodiska systemet, med uran och torium markerade i rött.
The periodic system, with uranium and thorium marked in red.

Malm

Överallt i jordskorpan finns metaller bundna i mineral. På vissa platser finns de i högre halter, så kallade mineraliseringsringar eller fyndigheter. Ordet malm är ett ekonomiskt begrepp. Det beskriver en mineralisering som är ekonomiskt brytvärd utifrån hur mycket den kostar att utvinna med avseende på brytning, energiåtgång, transporter med mera.

ämnen som har halveringstider på tusentals miljarder år, andra har halveringstider på miljarddelar av en sekund. Naturligt uran består av tre isotoper: uran-238 (99,28 procent av allt uran), uran-235 (0,71 procent) och uran-234 (0,0058 procent). Uran har mycket långa halveringstider, det dröjer 710 miljoner år innan en viss mängd uran-235 har sönderfallit till halva mängden, för uran-238 tar det 4,51 miljarder år. Isotopen uran-234, som har en halveringstid på 247 000 år, nybildas ständigt som en produkt av sönderfallande uran-238. Uran-238 och uran-235 sönderfaller genom sina sönderfallsserier till bly-206 och bly-207, som båda är stabila (fig. 2). Övriga isotoper i sönderfallsserierna har halveringstider på mellan 247 000 år och 0,0000164 sekunder. Generellt gäller att ju snabbare sönderfall och ju kortare halveringstid en isotop har, desto mer strålning avges, men vilken typ av sönderfall som sker och hur energirik strålningen är har också betydelse för hur mycket strålning som avges. Isotoperna uran-238 och uran-235 fanns när jordklotet bildades för 4,54 miljarder år sedan, men i betydligt högre halter. Eftersom jordens ålder och halveringstiden för uran-238 är ungefär lika långa går det lätt att räkna ut att det fanns dubbelt så mycket uran i det nybildade jordklotet som det finns idag och flera gånger mer uran-235. De mycket långa halveringstiderna för naturligt förekommande uran gör att rent uran i form av metall, oxid eller någon annan förening inte har så hög radioaktivitet utan kan förvaras och transporteras i vanliga ståltunnor, se framsidesbilden. Att ett grundämne sönderfaller spontant räcker inte för att det ska vara användbart som kärnbränsle i ett kärnkraftverk eller som råvara till kärnvapen, det måste dessutom vara klyvbart. Att en isotop är klyvbar innebär att den kan underhålla en kontinuerlig kärnklyvning, en kedjereaktion. Det finns ett flertal isotoper som är klyvbara, men det är enbart

uran-235 som förekommer naturligt i större mängder. Andra klyvbara isotoper är uran-233 som kan produceras genom neutronbestrålning av torium (torium-232) och plutoniumisotopen plutonium-239 som bildas i vissa kärnreaktorer genom neutronbestrålning av uran-238. De flesta kommersiella kärnkraftverk, och alla i Sverige, använder uran-235 som klyvbart material, men ungefär fem procent av världens kärnkraftverk använder så kallat MOX-bränsle som består av återvunnet kärnbränsle som också innehåller plutonium-239. I eventuella framtida toriumreaktorer kan torium-232 bestrålas med energirika neutroner för att skapa uran-233 som är klyvbart på samma sätt som uran-235.

HISTORIK

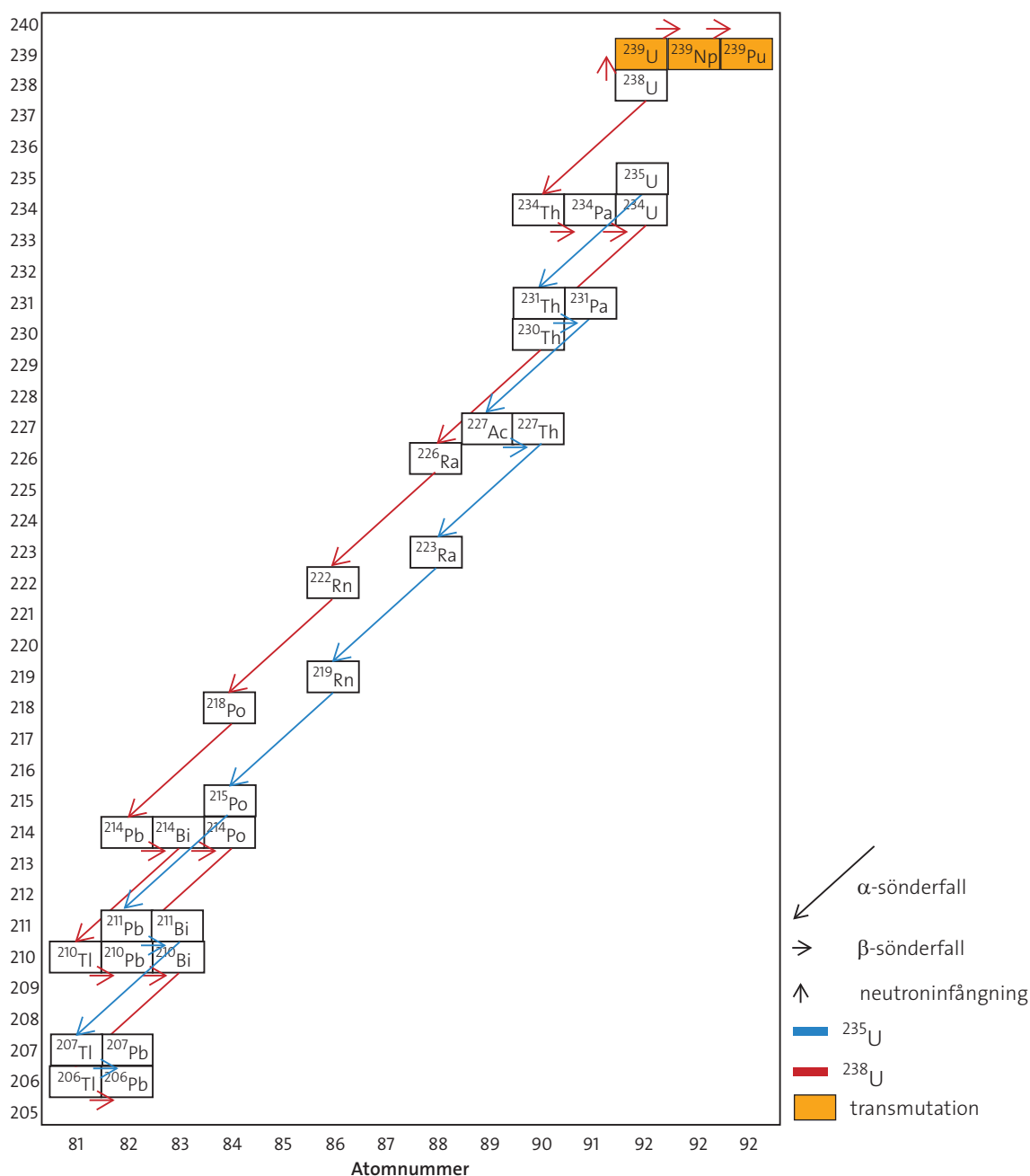
År 1789 upptäckte den tyske kemisten Martin Heinrich Klaproth uran i mineralet pechblände, även kallat uraninit (U_3O_8), från kobolt-vismutgångar i nuvarande Jáchymov i Tjeckien, dåvarande Sankt Joakimsthal. Metallen fick sitt namn efter planeten Uranus som hade upptäckts några år tidigare. Från 1850-talet bröt man den uranförande malmen och framställde uransalter. Den rena metallen framställdes av kemisten Eugène-Melchior Péligot år 1841 genom reduktion med kalium. Dess radioaktiva egenskaper upptäcktes 1896 av fysikern Henri Becquerel. Uran har tidigt använts för att färga glas ljusgult till orangerött. Glas med en uranhalt på omkring en procent har hittats från romartiden. Den forskning som utfördes av fysikern Enrico Fermi med flera strax före och under andra världskriget ledde till den första kontrollerade kärnreaktionen i en reaktor i Chicago och till den första okontrollerade kärnreaktionen i form av en atombomb som sprängdes i Nevada 1944.

Den fredliga och den militära kärnkraften baserad på uran utvecklades efter andra världskriget och i dagsläget finns 440 kärnreaktorer som genererar elektricitet i drift i världen, samt ytterligare 65 som är under byggnad (WNA, 2016). I Sverige finns idag 9 elproducerande reaktorer som genererar ungefär en tredjedel av Sveriges elproduktion, totalt 54 TWh (Energimyndigheten, 2016).

GEOLOGI OCH MALMTYPER

Metallmalmer bildas nästan undantagslöst genom att malmelement lakas ut från ursprungsbergarter, transporteras i lösning, ibland över långa avstånd, för att till

Masstal



Figur 2. Det naturliga sönderfallet av naturligt förekommande uran, uran-235 och uran-238, till bly-207 och bly-206, som är stabila och inte sönderfaller. Halveringstiden för uran-235 är 0,71 miljarder år och för uran-238 4,51 miljarder år. Övriga isotoper i sönderfallsserierna har halveringstider på mellan 247 000 år och 0,0000164 sekunder.

The natural decay of naturally occurring uranium, uranium-235 and uranium-238, to lead-207 and lead-206, that are stable and doesn't decay. The half life of uranium-235 is 0.71 billion years and uranium-238 4.51 billion years. Other isotopes in the decay series have half-lives between 247,000 years and 0.0000164 seconds.



Förekomster av uranmineralet pechblände rapporterades redan under tidigt 1700-tal från gruvor i Erzegebirge på gränsen mellan Tyskland och Tjeckien. Gruvorna i Jáchymov i nordvästra Tjeckien, även kända under sitt tyska namn Joachimsthal, var de första i världen med systematisk brytning av radioaktiva mineral. Annars är gruvområdet mest känt för sina silvergruvor, samt att ursprunget till ordet dollar och dalers kommer från dalen där gruvbrytningen pågick. Bilden visar huvudgatan i Jáchymov. Foto: Ondrej Konicek.

Occurrences of the uranium mineral pitchblende was reported already in the early 1700s from mines in Erzegebirge on the border between Germany and the Czech Republic. The mines in Jáchymov in the northwestern Czech Republic, also known under its German name Joachimsthal, was the first in the world with the systematic mining of radioactive minerals. The mining area is best known for its silver mines, and that the origin of the word dollars and dalers coming from the valley where mining was going on. The picture shows the main street in Jáchymov.

sist hamna i en miljö där lösligheten drastiskt minskar och malmelementen fälls ut. Kunskapen om olika malmelementers löslighet i olika medium och under olika fysiska och kemiska förhållanden spelar därför en mycket stor roll för att förstå hur malmerna har bildats och för att kunna identifiera miljöer där nya malmer kan hittas.

För många metaller gynnas lösligheten av reducerande förhållanden och de fälls i mer oxiderande miljöer. Uran har ett i stora drag omvänt beteende, med störst löslighet under oxiderande förhållanden. Andra faktorer som ökar lösligheten av uran är högre temperatur, närvaro av joner som kan bilda komplex med uranjoner, till exempel fluorid (F^-), klorid (Cl^-), karbonat (CO_3^{2-}), sulfat (SO_4^{2-}) och fosfat (PO_4^{3-}), samt starkt

basiska eller starkt sura förhållanden. I vanligt vatten vid normal temperatur, neutral pH och låg halt av komplexbildande joner är urans löslighet måttlig. I naturliga system förekommer uranjoner med fyrvärda, femvärda och sexvärda oxidationstal (U^{4+} , U^{5+} och U^{6+}) där U^{6+} , i form av uranyljonen UO_2^{2+} har högst löslighet. Torium förekommer nästan uteslutande med fyrvärdigt oxidationstal (Th^{4+}).

Uran och även torium löser sig i silikatsmältor som bildas till exempel vid partiell smältning av äldre bergarter. Lösligheten gynnas av höga halter natrium, kalium och kalcium i smältan och även av höga innehåll av fluoridjoner (F^-). Under fraktionerad kristallisation av sura kiselrika djupbergarter, då kristaller succes-

Tabell 1. Uranmineraliseringar indelade efter geologisk miljö enligt OECD-NEA och IAEA (2014).

Uranium mineralizations categorized by geological environment according to OECD-NEA and IAEA.

Nr	Fyndighetstyp	Type of deposit	Andel, procent
1	Uranförekomster i sandsten	Sandstone deposits	35,7
2	Proterozoiska diskordansfyndigheter	Proterozoic unconformity deposits	16,0
3	Polymetalliska järnoxid–brecciakomplex	Polymetallic Fe-oxide breccia complex deposits	15,8
4	Metasomatiska	Metasomatic deposits	8,9
5	Kvartskonglomerat	Paleo-quartz-pebble conglomerate deposits	5,6
6	Vulkanitrelaterade	Volcanic-related deposits	3,6
7	Intrusiva	Intrusive deposits	3,5
8	Fosfatfyndigheter	Phosphate deposits	3,1
9	Ytnära	Surficial deposits	2,4
10	Granitrelaterade	Granite-related	1,8
11	Metamorfa	Metamorphite	0,1
12	Brunkol–kolfyndigheter	Lignite and coal	0,6
13	Kollapsbreccior	Collapse breccia-type deposits	0,4
14	Karbonatrelaterade	Carbonate deposits	-
15	Svartskiffrar	Black shale	-

sivt fälls ur smältan, föredrar uran och torium att gå i lösning i den silikatsmälta som utgör restlösning och anrikas där. För att en uranmineralisering ska bildas när dessa restlösningar till sist kristalliserar krävs dock att smältan från början innehöll anomalt mycket uran och torium. På samma vis är det en fördel om den partiellt smälta bergarten innehöll anomalt höga halter av uran och torium.

Det stora antalet fysikaliska och kemiska faktorer som kan inverka på lösligheten och utfällning av uran och uranmalmsbildning medför att de finns ett flertal olika typer av uranmineraliseringar i ett flertal olika geologiska miljöer och åldrar. Torium, som inte har samma variation i löslighet som uran, har bara ett fåtal malmtyper.

IAEA och OECD-NEAs klassificering av uranmineraliseringar

International Atomic Energy Association (IAEA) och Organisation for Economic Co-operation and Development-Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) har delat in världens kända uranmineraliseringar i 15 olika kategorier, en indelning som huvudsakligen är baserad

på mineraliseringarnas värdbergarter. Dessa kategorier har ändrats flera gånger, de senaste redovisas här (från 2013), och är rangordnade efter ekonomisk betydelse. Ett mer modernt klassificeringssystem baserat på uranmineraliseringarnas bildningssätt har föreslagits av Michel Cuney i den vetenskapliga tidskriften för ekonomisk geologi *Mineralium Deposita* (2009). Cuneys föreslagna klassificering, tillsammans med ett försök att jämföra de två systemen, redovisas senare i detta kapitel.

Uranförekomster i sandsten

Dessa mineraliseringar förekommer i medel- till grovkornig sandsten som avsatts i rinnande vatten eller i kustnära marin miljö. Uran har fällts ut när förhållandena har blivit reducerande och uranets löslighet har minskat. Dessa reducerande förhållanden kan ha orsakats av förekomst av organiskt material, sulfider, kolväten, bakteriell aktivitet eller liknande. Uranmineraliseringarna i Kazakstan, varifrån Sverige får en del av sitt uran, är av denna typ. Några svenska exempel är inte kända. Ungefär 35 procent av världens kända och brytvärda urantillgångar är av denna typ.

Proterozoiska diskordansmineraliseringar

Dessa mineraliseringar finns under och över en kontakt mellan urberg av arkeisk (4,54–2,5 miljarder år) till proterozoisk ålder (2,5 miljarder–541 miljoner år) och överliggande yngre sedimentär berggrund. Mineraliseringen har bildats när uranhaltiga lösningar från de underliggande bergarterna har strömmat upp via sprickor i den mer permeabla överliggande sandstenen och där fällts ut. Uranmineralisering finns oftast i den överliggande bergarten, men den förekommer också i den underliggande, äldre bergarten. Mineraliseringarna kännetecknas av mycket kraftig leromvandling och ofta mycket höga uranhalter. De största och mest kända förekomsterna av denna typ förekommer i Athabasca Basin i Kanada, där gruvan McArthur River är den största. Figur 3 illustrerar en annan gruva i Athabasca Basin av denna typ: Cigar Lake. Gruvan vid Cigar Lake kom i produktion 2015.

Polymetalliska järnoxid-brecciakomplex

Malmtypen järnoxid-koppar-guld (Iron Oxide Copper Gold, IOCG) innehåller ibland betydande mängder uran och även sällsynta jordartsmetaller, bland annat skandium, som kan utvinnas som en biprodukt vid utvinning av andra metaller. Den största och mest kända förekomsten av denna typ är Olympic Dam i Australien. Ett svenskt exempel skulle kunna vara koppar-guldfyndigheten Pahtohavare i Kiruna. Hur denna typ av mineralisering har bildats är fortfarande föremål för diskussion. Olympic Dam står för merparten av världens kända och brytvärda urantillgångar av denna typ.

Metasomatiska uranfyndigheter

I prekambrika sköldområden med intensiv kalium- eller natriumomvandling av bergarter återfinns denna typ av uranmineralisering. Omvandlingen kallas metasomatos, en form av metamorfos, och innebär att en kemisk förändring sker, ofta på grund av att hydrotermala lösningar kommer i kontakt med bergarten. Värdbergarter varierar stort, från graniter till karbonatbergarter. Uranmineraliseringarna i Arjeplogsområdet har nämnts som svenska exempel.

Kvartskonglomerat

I mycket gamla konglomerat som avlagrats i floder för 2 400–2 300 miljoner år sedan anrikades guld och

andra mineral med hög densitet, däribland uranmineral. Uran från dessa förekomster utvinns som en biprodukt vid guldutvinning. Det mest kända exemplet är Witwatersrand i Sydafrika. Möjligen är de uranförande tungmineralanrikningarna i Västervikskvartsiterna en yngre, svensk variant av denna malmtyp.

Vulkanitrelaterade mineraliseringar

Dessa mineraliseringar återfinns i eller nära vulkaniska kalderor (instörtade vulkaner) som är fyllda med extrusiva bergarter (bergarter som kristalliserats vid ytan). Mineraliseringarna uppträder som gångar och gångsystem och är ofta associerade med molybdenförande mineral samt arsenik, vismut, etc.

Intrusiva mineraliseringar

Denna typ av uranmineralisering finns i intrusiva bergarter (bergarter som kristalliserats djupt nere i skorpan) av flera olika sammansättningar och former såsom graniter, pegmatiter, alkalina intrusioner, karbonatiter etc. Uranmineraliseringarna vid Rössing i Namibia, varifrån Sverige får en del uran, hör till denna typ.

Fosfatmineraliseringar

Fosforiter är fosfatförande sedimentära bergarter som avsatts i en marin, strandnära miljö. Dessa bergarter kan ibland innehålla uran och även sällsynta jordartsmetaller. Denna mineraliseringstyp utgör ofta mycket stora urantillgångar, men är också kännetecknade av ett lågt uraninnehåll på 0,005–0,015 procent uran. En stor del av USAs tidiga uranutvinning kom från sådana förekomster i Florida. Fosforitmineraliseringarna i Tåsjö är svenska exempel.

Ytnära mineraliseringar

De flesta av denna typ av mineraliseringar förekommer i unga sediment och jordar, ofta sådana som ligger över bergarter med högre uranhalt än vanligt, där ytnära processer har anrikat uranet. Även uranmineraliseringar i torvmossar hör till denna typ. Uranmineraliseringarna vid gruvan Langer Heinrich i Namibia är ett exempel.

Granitrelaterade fyndigheter

Till denna kategori av uranmineraliseringar hör dels gångförekomster i graniter och intilliggande metasediment, dels finfördelad uranmineralisering i granit.

Tabell 2. Uranmineraliseringar indelade efter bildningsmiljö enligt Cuney (2009). Motsvarande fyndighetstyper enligt OECD-NEA och IAEAs klassificering har, där det varit möjligt, lagts till i tabellen.

Uranium mineralizations categorized according to Cuney (2009). The corresponding deposit types according to the OECD-NEA and IAEA classification has, where possible, been added to the table

Fyndighetstyp	Type of deposit	Jämförbar enl. IAEAs indelning
Ytnära processer	Surface processes	Kollapsbreccior, kvartskonglomerat
Synsedimentära processer	Synsedimentary	Svartskiffrar, fosfatfyndigheter
Hydrotermala processer	Hydrothermal processes	Proterozoiska diskordansfyndigheter, uranförekomster i sandsten, polymetalliska, järnoxid brecciaskomplex, metasomatiska
Gångförekomster	Vein-type	Granitrelaterade, Intrusiva
Partiell uppsmältning	Partial melting	-
Fraktionering	Crystal fractionation	-

Möjligen kan en del uranmineraliseringar i Västerbotten och Norrbotten (figur 14) höra till denna typ. Både storlek på mineraliseringarna och uraninnehåll varierar stort inom denna kategori.

Metamorfa uranmineraliseringar

Gångar och finfördelade mineraliseringar i metamorfa bergarter av olika åldrar definierar denna typ av uranmineralisering. Stor variation i storlek och uraninnehåll.

Brunkol–kolmineraliseringar

Brunkol- och kolmineraliseringar kan ibland innehålla förhöjda uranhalter och uran kan utvinnas ur askan efter förbränning.

Kollapsbreccior

En kollapsbreccia är en vertikal, rörformad struktur fylld med nedrasade fragment bestående av rester av omvandlat och nedbrutet sidoberg. Uranmineralisering kan förekomma i fragmentens mellanmassa. Tillgångarna är ofta små och med måttliga till höga uranhalter.

Karbonatförekomster

Den gemensamma nämnaren för denna typ av uranmineralisering är att den förekommer i någon form av karbonatbergart, ibland parallellt med övriga bergartslager, ibland i karbonatbreccia (krossad bergart) eller som gångar i karbonatbergarter.

Svartskiffrar

Svartskiffrar är sedimentära bergarter rika på organiskt material. Vid avsättningen av sedimenten har uran adsor-

berats på det organiska materialet. Alunskiffrarna i Sverige och Estland är av den här typen. Exempel på mineraliseringar i Sverige är Billingen och Kinnekulle i Västergötland, samt Häggån och Viken (Myrviken) i Jämtlands län. Dessa mineraliseringar karaktäriseras av att vara mycket stora och således ha stora tillgångar på uran, trots mycket låga halter. De betraktas inte som lönsamma att bryta idag på grund av de låga halterna, men det finns förslag från företag att använda storskalig bioläkning och det kan sänka brytkostnaderna betydligt.

GENETISK KLASSIFICERING AV URANMINERALISERINGAR

I publikationen *The extreme diversity of uranium deposits* (Cuney 2009) argumenterar Michel Cuney för en klassificering av uranmineraliseringar och uranmalmer baserad på deras bildningssätt och bildningsmiljö, en klassificering där kunskap om urans löslighet i olika miljöer spelar stor roll.

Nedan följer kortare beskrivningar av de olika bildningsmiljöerna enligt Cuney (2009), där även IAEAs fyndighetstyper har placerats i respektive grupp.

Uranmineraliseringar relaterade till ytnära processer

Till denna grupp hör alla uranmineraliserande processer som sker på eller nära markytan, utan inverkan av värme eller lösningar från magmatiska processer.

Äldst är de så kallade tungmineralanrikningarna (placer deposits) där de tunga uranmineralen, vanligen uraninit (pechblände), anrikats i vaskavlagringar på samma sätt som guld kan göra. Vaskavlagringar av

uran är kända från 3 100 miljoner år gamla bergarter i Sydafrika. Uranhalterna i dessa mineraliseringar är mycket låga, men eftersom de utvinns som biprodukt från guldframställningen utgör denna kategori ändå en stor uranproducent. Möjligen hör en del av uranmineraliseringarna i kvartsit i Västerviksområdet till denna grupp. IAEA kallar denna typ för *Quartz-pebble conglomerate deposits*.

Bland de yngsta uranmineraliseringar som är relaterade till ytnära processer är de mineraliseringar som bildas i öken- till halvökenområden där nederbörden är mindre än avdunstningen från markytan. I sådana områden stiger grundvatten mot markytan och vid avdunstningen kvarlämnas de lösta salterna, ofta karbonater, i marken som en hård krusta. När dessa lösningar är rika på uran, ofta för att berggrunden i området är rik på uran, kan krustan innehålla så mycket uran att den är ekonomiskt lönsam att bryta. Uranmalmen vid Langer Heinrich i Namibia (24,5 miljoner ton malm med 0,07 procent U_3O_8) som öppnades 2007 är ett exempel på en brytvärd fyndighet av denna typ. Denna typ kallas av IAEA för Surficial uranium deposit.

En tredje typ är de uranackumulationer som bildas när oxiderande lösningar möter reducerande miljöer i syrefria sjöbottnar eller i kanten på torvmossar och uran faller ut. Det finns inga kända brytvärda mineraliseringar av denna typ, men det är väl känt att aska från förbränning av torv från vissa torvmossar i Sverige kan innehålla höga halter uran, något som bland annat Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) har uppmärksammat.

Synsedimentära uranmineraliseringar

Dessa uranmineraliseringar bildas genom sedimentationen i de grunda innanhav som en gång täckte stora delar av kontinenterna under perioder med höga havsnivåer. I dessa gamla innanhav fälldes uran ut i fosforiter (fosfatrika sediment) eller i svartskiffrar (skiffrar rika på organiskt material). I båda fallen hjälper organisk aktivitet till att skapa reducerande bottenförhållanden som minskar uranets löslighet. Östersjön, Svarta havet och Kaspiska havet är några exempel på de få innanhav som finns idag, och där uran möjligen kan fällas ut på detta sätt.

Den största kända perioden av fosforitbildning skedde vid södra delen av Tethyshavet, som var ett hav som sträckte sig från Indien över Turkiet, Nordafrika

och vidare över Atlanten till Colombia och Venezuela. Uranmineraliseringarna bildades under krita till eocen (145–40 miljoner år sedan) då Tethyshavet låg nära ekvatorn. Marocko har tre fjärdedelar av världens resurser av denna typ av uranmineraliseringar. Huvuddelen av uranproduktion från fosforiter kommer dock från yngre (miocena till pliocena, 20–2 miljoner år gamla) fosforiter i Florida. Uranmineraliserade fosforiter är kända från den svenska fjällkedjan, exempelvis i Tåsjöområdet på gränsen mellan Jämtlands och Västerbottens län. IAEA kallar denna typ för *Phosphorite deposits*.

Stora kända svenska förekomster av uran utfällt i svartskiffrar är de kambriska till ordoviciska (540–440 miljoner år) skiffrarna i Billingen (Ranstad) i Västergötland, som också är den enda platsen i Sverige där uranbrytning förekommit. Större mängd uran har producerats från siluriska graptolitskiffrar i Tyskland eftersom de har högre uranhalt, sannolikt beroende på senare processer som har uppgraderat halterna. I IAEA-nomenklatur kallas dessa förekomster för *Black shale*.

Hydrotermala uranmineraliseringar

Gemensamt för det otal olika typer av mineraliseringar i denna genetiska grupp är att uran har lakats ut och transporterats av hydrotermala lösningar (heta eller varma vattenlösningar) och sedan fällts ut i en värdbergart där lösligheten för uran drastiskt har förändrats. De olika miljöer som uranmineraliseringarna sitter i, och de olika (hydrotermala) processer som antas ha varit verksamma, illustrerar väl den mängd faktorer som påverkar urans löslighet. Hydrotermala uranmineraliseringarna är epigenetiska, det vill säga de har inte bildats samtidigt med värdbergarten utan kommit på plats senare, till exempel som gångar eller impregnationer.

Lågtempererade hydrotermala uranmineraliseringar

Lågtempererade hydrotermala lösningar som strömmar genom relativt grova och vattengenomsläppliga sediment kan falla ut sitt uraninnehåll, särskilt om lösningarna strömmar genom sediment med reducerande material som organiskt kol eller reducerande svavel-föreningar. Ibland bildas en front i sedimenten där de oxiderande lösningarna möter en reducerande miljö och anrikningen av uran blir extra kraftig. I vissa lågtemperaturmiljöer styrs vattenflödet snarare av sprickor och

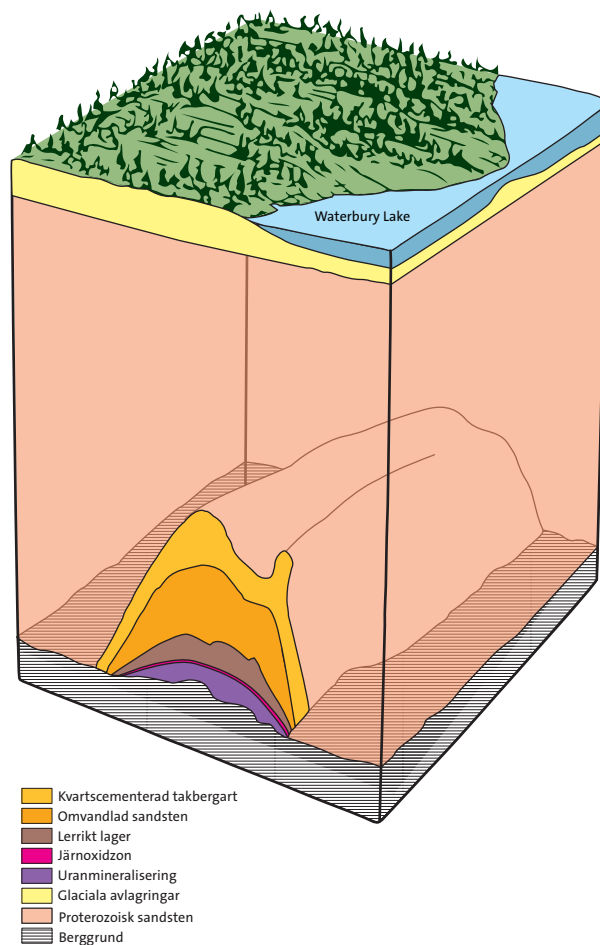
förkastningar och när flödet av vatten möter en reducerande miljö kan en uranmineralisering bildas. IAEA sammanfattar dessa mineraliseringar som Sandstone uranium deposits. Det kanadensisk-australiensiska prospekteringsbolaget Mawson Resources rapporterade nyligen att de hittat uranmineraliseringar som tolkas som sandstone uranium-förekomster i Tossåsenområdet i Bergs kommun i Jämtland.

En speciell typ, som sannolikt också bildas i en lågtemperaturmiljö, är *unconformity-type* som även den utgör en grupp i IAEAs klassificering. Unconformity kan översättas till svenska som inkonformitet eller diskordans och är en geologisk miljö där äldre deformerade och metamorfoserade bergarter är täckta av yngre sedimentära bergarter. Det är just gränsområdet mellan äldre och yngre bergarter som utgör inkonformiteten, bergarterna är inte konforma med varandra. Uranmineraliseringarna förekommer utefter inkonformiteten eller i bergarterna runt den och bildas sannolikt av lösningar från de underliggande bergarterna som fälls ut i de överlagrande sedimentära bergarterna eller i och utefter sprickor i dessa. Det ekonomiskt värdefulla uranmineralet är vanligen uraninit. Några av världens uranrikaste malmer finns i Kanada och hör till denna typ. De kan ha uranhalter på 20 procent och mer. Några uranmineraliseringar av denna typ är inte kända från Sverige.

Högt tempererade hydrotermala uranmineraliseringar

När bergarter värms upp av inträngande magma eller andra värmekällor sker en omkristallisation av bergarten. En av effekterna är att vatten drivs ut ur bergarten och kan ibland transportera metaller. De mest effektiva malmbildande miljöerna är när sediment, som ofta är vattenrika, utsätts för metamorfos. Som oftast när det gäller uranmineraliseringar är det en förutsättning att ursprungsbergarterna utsätts för oxiderande metamorfa lösningar, att dessa transporteras till reducerande miljöer samt att ursprungsbergarterna redan hade ett anomal uraninnehåll. Ofta orsakar lösningarna typiska natrium- och kaliumomvandlingar, så kallad metasomatos.

Om metamorfosen av bergarter går tillräckligt långt kommer vissa lättsmälta mineral i bergarterna att börja smälta och bilda intrusioner. Vid partiell smältning bildas graniter som i vissa fall, framförallt om ursprungsbergarterna var uranrika, kan innehålla brytvärda uran-



Figur 3. Uranfyndigheten Cigar Lake är av typen "Proterozoisk diskordansfyndighet" enligt OECD-NEA/IAEAs klassificering, men skulle kallas "Hydrotermal" i den genetiska klassificeringen som föreslagits av Cuney (2009). Dessa mineraliseringar bildas i geologiska miljöer där en äldre berggrund överlagras av yngre sedimentär berggrund och där sprickor och förkastningar leder uranförande lösningar till kontakten mellan bergartstyperna där de fälls ut. Källa: SKB

The uranium mineralization in Cigar Lake is of the type "Proterozoic unconformity deposit" according to OECD-NEA/IAEA, but would with Cuneys (2009) classification be in the category called "Hydrothermal processes". These mineralizations are formed in geological environments where older bedrock is covered by younger sedimentary bedrock with cracks and faults leading uranium bearing solutions to the contact between the rock types where they precipitate. The mine at Cigar Lake went into production in 2015.

malmer. Malmen som bryts i gruvan Rössing i Namibia, som bland annat exporterar sitt uran till svenska kärnkraftverk, är en uranrik granitisk bergart som anses ha bildats genom partiell smältning.

Restlösningar från intrusioner, vanligtvis graniter, kan bilda gångar och impregnationer som är uranrika när dessa oxiderande lösningar möter mera reducerande lösningar från ytan. Det finns även exempel på uranmineraliseringar som bildas i instörtade vulkaner, så kallade kalderor, företrädesvis med sura vulkaniter.

Intrusioner som ursprungligen består av en flytande bergartssmälta stelnar successivt genom att olika mineral kristalliserar och faller ut ur smältan. Under den processen föredrar uran att stanna kvar i smältan istället för att bilda mineral, och den sista smältan kommer att anrikas på uran. Förekomsten av joner som kan bilda stabila komplex med uran hjälper till att anrika uran i restsmältan. Så småningom kommer även restlösningen att kristallisera och bilda en bergart och denna bergart kan vara så uranrik att den kan brytas som uranmalm.

Beroende på geologisk miljö har IAEA flera beteckningar för dessa högtempererade metamorfos- och granitrelaterade uranmineraliseringar: *Intrusive deposits*, *Metasomatic deposits*, *Breccia complex deposits*, etc. Det finns

ett flertal svenska uranmineraliseringar, huvudsakligen i norra Sverige, som antas vara relaterad till metamorfos och graniter, exempelvis Pleutajokk i Norrbotten.

Världens största kända uranresurs, tillika en av världens största uranproducenter idag, är Olympic Dam i Australien. Där utvinns uran som biprodukt vid kopparutvinning. Hur denna jättelika koppar-guld-uranmalm bildats är fortfarande föremål för forskning, men det tycks som att den på något sätt är relaterad till graniter i omgivningen. Möjligen är den nedlagda koppar-guld gruvan Pahtohavare en mycket liten svensk analog till Olympic Dam.

HAVSVATTEN

Havsvatten innehåller bara 3 miljarddelar uran vilket är betydligt mindre än vad de flesta bergarter innehåller, men eftersom uranet redan är i lösning slipper man kostnader för att bryta malm. Japanska forskare som har utvecklat processer för att utvinna uran ur havsvatten räknar med att en sådan process skulle bli lönsam vid ett uranpris över 300 amerikanska dollar (USD) per kilo uran. Idag ligger uranpriset på ungefär 66 USD/kg uran (september 2016).

Uran i världen

Uranium in the world

METODER FÖR ATT BESKRIVA URANTILLGÅNGAR

Mineraltillgångar och mineralreserver för de flesta metaller rapporteras vanligtvis enligt internationellt accepterade rapporteringssystem. Det finns ett flertal sådana rapporteringssystem: de som utvecklats av Australasian Joint Ore Reserves Committee (JORC-code), av Canadian Securities Administration och som tillämpas av Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) genom National Instrument (NI) 43-101, de som utvecklats av SveMin i samarbete med motsvarande organisationer i Norge och Finland genom Fennoscandian Review Board (FRB) etc. Det kan skilja i detaljerna mellan de olika systemen, men den övergripande metoden för rapporteringen med indelning i tillgångar och reserver är likartad. Mineraltillgångar rapporteras efter ökande kunskap om tillgångens geologi, innehåll, utbredning etc. i antagen, indikerad och känd mineraltillgång. Indikerade och kända mineraltillgångar kan sedan överföras till mineralreserver genom

att ekonomisk beräkning visar att tillgången kan brytas med ekonomisk vinning. (En mer utförlig beskrivning av de olika kategorierna finns på SveMins webbplats, http://www.svemin.se/etiska_regler_sv/fennoscandian-review-board/redovisningsregler). Resultaten från modern uranprospektering i världen och Sverige följer detta system med hur tillgångar och reserver rapporteras, men även prospekteringsresultat från tiden innan moderna rapporteringssystem började användas går att foga in i dessa system. I tabellen över Sveriges urantillgångar (tabell 9) anges vilket rapporteringssystem som respektive rapport refererar till, för äldre prospekteringsresultat som publicerats innan något internationellt accepterat system fanns tillgängligt anges historisk.

När ett lands urantillgångar rapporteras till internationella organ som OECDs Nuclear Energy Agency och IAEA används dock ett annat system. Rapporterade tillgångar klassificeras i två kategorier: rimligt säkerställda tillgångar (*reasonably assured resources*) eller

Tabell 3. Tillgångar enligt OECDs Nuclear Energy Agency och IAEA.
Resources categorized by OECD-NEA and IAEA.

Identifierade tillgångar Tillräckligt väl undersökt för att genomföra en lönsamhetsstudie	Identified resources Sufficient direct measurement to conduct pre-feasibility and sometimes feasibility studies
Rimligt säkerställda tillgångar Säkerheten i halt och tonnage-beräkning är i allmänhet jämförbar med vad som krävs för beslut om gruvbrytning.	Reasonably assured resources (RAR) Confidence in estimates of grade and tonnage are generally compatible with mining decisionmaking standards
Antagna tillgångar Inte tillräckligt hög grad av säkerhet och kräver i allmänhet ytterligare undersökningar innan beslut om gruvbrytning	Inferred resources Not defined with such a high degree of confidence and generally require further direct measurement prior to making a decision to mine
Oupptäckta tillgångar Tillgång som förväntas existera baserat på geologisk kunskap om tidigare upptäckta fyndigheter och regional geologisk kartering	Undiscovered Resources Resources that are expected to exist based on geological knowledge of previously discovered deposits and regional geological mapping
Prognostiserade Tillgångar som förväntas finnas i kända uranprovinser och som i allmänhet stöds av direkta bevis	Prognosticated Resources expected to exist in known uranium provinces, generally supported by some direct evidence
Spekulativa Tillgångar som förväntas finnas i geologiska provinser som kan innehålla uranfyndigheter	Speculative Refer to those expected to exist in geological provinces that may host uranium deposits

antagna tillgångar (*inferred resources*), där den förstnämnda anger att mineraliseringen är väl känd och kunskapen kan räcka till för att göra en förstudie (*feasibility study*), det vill säga en analys av om lönsam brytning skulle vara möjlig, och den senare kategorin kräver mer information för att en sådan analys ska kunna utföras. Utöver dessa kategorier anges ibland oupptäckta tillgångar där prognostiserade tillgångar är tillgångar man tror ska finnas i ett område baserat på kunskap om tidigare funna uranförekomster i området, och spekulativa tillgångar är tillgångar man tror kan finnas i en geologisk provins utan att man tidigare funnit uranförekomster där. Var och en av dessa kategorier delas sedan upp i fyra kostnadsintervall som anger den förväntade kostnaden för att utvinna uran ur dem.

Det går inte att göra direkta jämförelser mellan urantillgångar i moderna system för rapportering av tillgångar och reserver (JORC-code, FRB, NI 43-101 etc.) och det system som används av IAEA och OECD. För att ändå i någon mån kunna jämföra de svenska urantillgångarna rapporterade enligt modern standard, med världens urantillgångar rapporterade enligt IAEA och OECD-systemet, har vi valt att jämföra kategorierna kända, indikerade och antagna mineraltillgångar enligt modern standard med kategorierna rimligt säkerställd tillgång och antagen tillgång i kostnadsintervallen 40–130 USD/kg uran enligt IAEA och OECDs system.

En jämförelse mellan Sveriges och världens urantillgångar kräver också en diskussion om vilka typer av mineraliseringar som ingår i respektive sammanställning. IAEA och OECD inkluderar enbart så kallade konventionella tillgångar (*conventional resources*) och de definieras som tillgångar varifrån uran utvinns som primär produkt eller viktig biprodukt. I okonventionella tillgångar (*unconventional resources*) utvinns uran som en underordnad biprodukt och till denna grupp räknas svartskifferar (inklusive alunskifferar) och fosforiter. Eftersom huvuddelen av Sveriges kända urantillgångar är just från alunskifferar och fosforiter (Viken, Häggån, Billingen samt Tåsjö) är de redovisade separat i översikten över Sveriges urantillgångar (tabell 9). Det ska tilläggas att IAEA inte har rapporterat okonventionella tillgångar eftersom de tidigare betraktades som icke brytvärda, men stigande uranpris runt 2010–2011 och möjligheten av billigare utvinningsmetoder i form av biolagningsanläggningar (*bio-heap leaching*) har gjort att även okonventionella tillgångar kan vara potentiellt brytvärda.

I början av 2016 låg uranpriset på cirka 33,50 USD/lb U_3O_8 , vilket motsvarar 87 USD/kg uran. Det betyder att det i dagsläget enbart är de urantillgångar inom brytkostnads kategorier under 90 USD/kg uran som kan vara lönsamma att bryta. Under åren 2011–2012 låg uranpriset över 130 USD/kg uran, vilket ökade intresset även för urantillgångar som var mer kostsamma att bryta.



Trummor med yellowcake. Foto: Cameco.
Drums with yellowcake. Photo courtesy of Cameco.

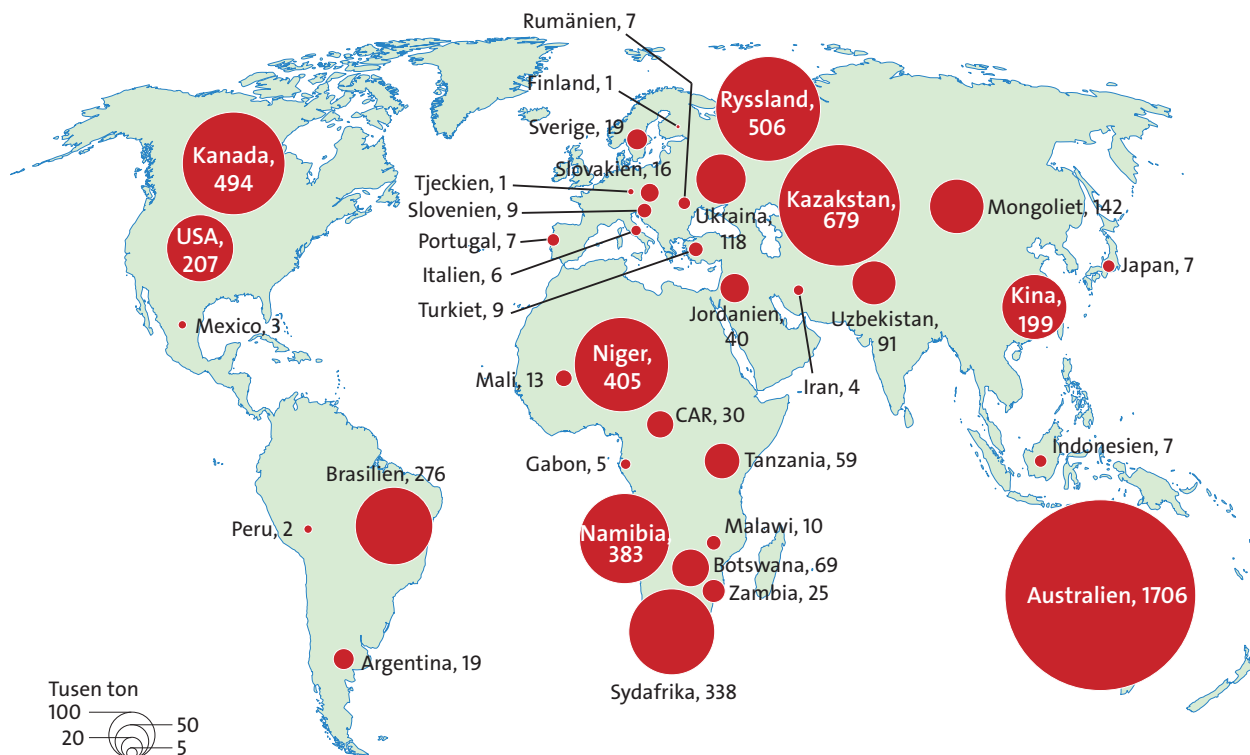
Tabell 4. Världens urantillgångar uppdelade i Rimligt säkra tillgångar (eng. *Reasonably assured resources*, RAR), Antagna tillgångar (eng. *Inferred resources*, IR) och Okonventionella tillgångar, per januari 2013 i ton uran.
The worlds uranium resources categorized to Reasonably assured resources (RAR) and Inferred resources (IR) and Unconventional resources, as per January 2013, in tonnes Uranium.

Land	Rimligt säkerställda tillgångar				Antagna tillgångar				Totalt C+C	Okonventionella tillgångar				
	Kategori				Kategori					Kategori				
	A	B	C	D	A	B	C	D		fosfat	icke-järn-malm	karbonatiter	svartskiffer, brun-kol–kol	Totalt
Algeriet				19 500										0
Argentina		5 100	8 600	8 600	2 400		4 000	9 900	11 000					18 500
Australien			1 174 000	1 208 000				532 100	590 300					1 706 100
Botswana			12 800	12 800				56 000	56 000					68 800
Brasilien	137 300	155 100	155 100	155 100		73 600	121 000	121 000	121 000	84 400	2 000	13 000		99 400
Centralafrikanska republiken			32 000	32 000										32 000
Chile				600					900		7 200	4 500		11 700
Colombia											20 000			20 000
Egypten									1 900		35 000			35 000
Finland			1 200	1 200							1 000	25 000	22 000	48 000
Gabon			4 800	4 800					1 000					
Grekland				1 000					6 000		500			500
Grönland								221 200						0
Indien				97 800					22 100		17 000	6 600	4 000	27 600
Indonesien		1 500	6 300	6 300					1 700					6 300
Iran			1 000	1 000				3 400	3 400					4 400
Italien		4 800	4 800	4 800		1 300	1 300	1 300	1 300					6 100
Japan			6 600	6 600										6 600
Jordanien								40 000	40 000		60 000			60 000
Kanada	256 200	318 900	357 500	454 500	65 600	99 400	136 400	196 000	493 900		58 000			58 000
Kazakhstan	20 400	199 700	285 600	373 000	68 900	316 000	393 700	502 500	679 300					
Kina	51 800	93 800	120 000	120 000	13 900	54 800	79 100	79 100	199 100					
Kongo				1 400					1 300					0
Malawi			8 200	10 400			2 300	4 600	10 500					
Mali			8 500	8 500			4 500	4 500	13 000					
Marocco										6 526 000				6 526 000
Mexico			2 900	2 900						240 000	1 000			241 000
Mongoliet	108 100		108 100	108 100		33 400	33 400	33 400	141 500					
Namibia			248 200	296 500			134 600	159 100	382 800					
Niger	14 800		325 000	325 000		600	79 900	79 900	404 900					

Fortsättning, tabell 4.

Land	Rimligt säkerställda tillgångar				Antagna tillgångar				Totalt C+C	Okonventionella tillgångar				
	Kategori				Kategori					Kategori				
	A	B	C	D	A	B	C	D		fosfat	icke-järn-malm	karbonatiter	svartskiffer, brun-kol	Totalt
Peru		1 400	1 400	1 400	1 400	1 500	1 500	1 500	2 900	21 600	140			21 740
Portugal		4 500	6 000	6 000	6 000	1 000	1 000	1 000	7 000					
Rumänien			3 100	3 100	3 100		3 600	3 600	6 700					
Ryssland		11 800	216 500	261 900	30 500	289 400	427 300	427 300	505 900					
Slovakien		8 800	8 800	8 800	3 900	6 700	6 700	6 700	15 500					
Slovenien		1 700	1 700	1 700	3 800	7 500	7 500	7 500	9 200					
Somalia				5 000				2 600	0					
Spanien				14 000					0					
Sverige			4 900	4 900			4 700	4 700	9 600	42 300			967 600	1 009 900
Sydafrika		113 000	175 300	233 700	69 300	162 800	217 100	217 100	338 100				77 000	77 000
Syrien										60 000				60 000
Tanzania		38 300	40 400	40 400		8 500	17 700	17 700	58 100					
Tchad								2 400	0					
Thailand										500				500
Tjeckien			1 300	51 000			100	68 300	1 400					
Turket		6 800	6 800	6 800		1 900	1 900	1 900	8 700					
Tyskland				3 000				4 000	0					
Ukraina		42 700	84 800	141 400		16 900	32 900	81 300	117 700					
Ungern								13 500	0					
USA		39 100	207 400	472 100					207 400	140 000	1 800			141 800
Uzbekistan	41 700	41 700	59 400	59 400	24 700	24 700	31 900	31 900	91 300					
Venezuela										42 000				42 000
Vietnam				900				2 100	0				500	500
Zambia			9 900	9 900			14 700	14 700	24 600					
Zimbabwe				1 400					0					
Total	507 400	1 211 600	3 698 900	4 587 200	175 500	745 100	2 204 000	3 048 000	5 902 900	5 902 900	175 500	6648 000	2 379 500	9 696 000

Kategorier
A <40 USD /kg uran
B <80 USD /kg uran
C <130 USD /kg uran
D <260 USD /kg uran



Figur 4. Urantillgångar enligt IAEA/OECD-NEA. Rimligt säkra tillgångar samt antagna tillgångar. SGU har räknat upp IAEAs beräkningar av Sveriges tillgångar utifrån antagandet att de som klassificeras enligt NI 43-101 borde vara jämförbara med OECD-NEAs och IAEAs system.

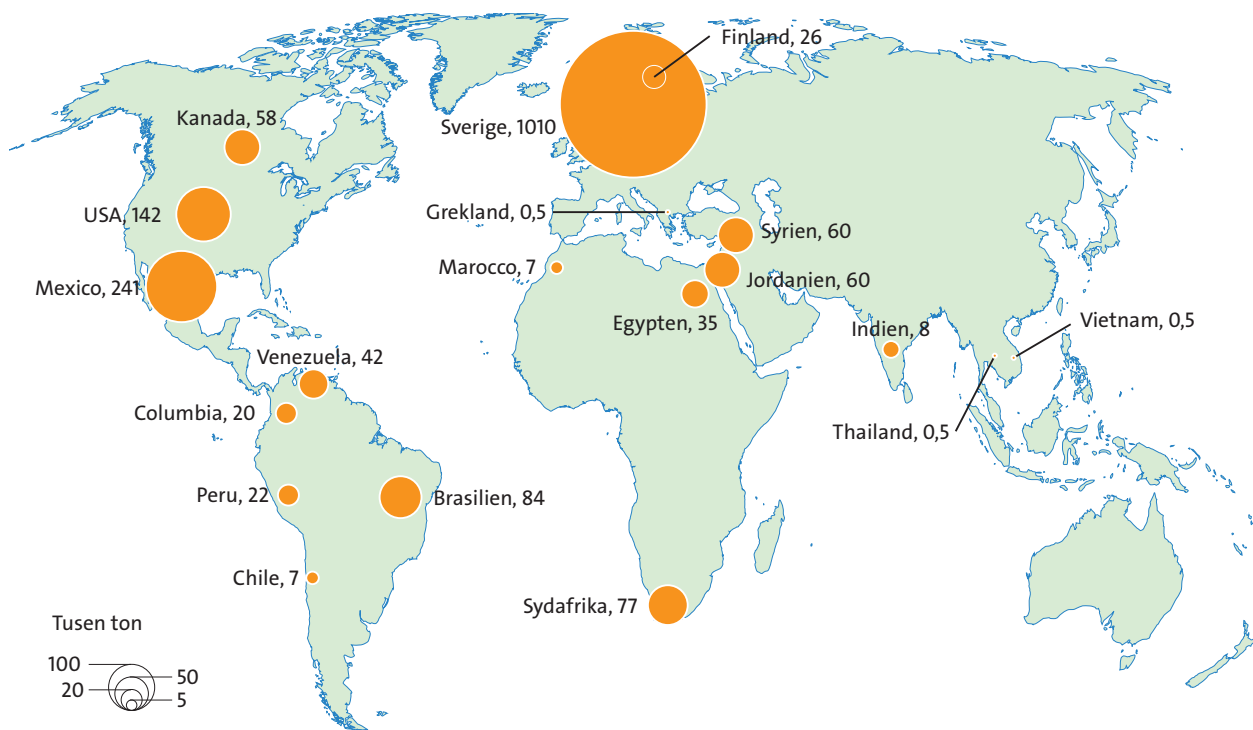
Uranium resources in the world, both reasonably assured resources and inferred resources. SGU has listed the IAEA calculations of Swedish resources on the assumption that the classification NI 43-101 should be comparable to the OECD-NEA and IAEA's systems.

VÄRLDENS URANTILLGÅNGAR

Världens kända, brytvärda urantillgångar var år 2013, enligt World Nuclear Association (WNA), motsvarande nästan sex miljoner ton rent uran. Dessa tillgångar inkluderar rimligt säkerställda samt antagna tillgångar där utvinningskostnaden för ett kg uran var mindre än 130 USD (tabell 4), men inte tillgångar som kostar mer än 130 USD/kg att bryta. Med en årlig produktion och konsumtion av uran på 56 250 ton (2014) skulle dessa tillgångar räcka i drygt hundra år. Australien har de största tillgångarna inom dessa kategorier med cirka 1,7 miljoner ton, men i en utvinningskostnadskategori som skulle göra dem oekonomiska med dagens uranpris på cirka 87 USD/kg uran (mars 2016). Betydligt intres-

santare är de urantillgångar som finns i Kazakstan, Ryssland och Kanada som har 0,4–0,7 miljoner ton uran med betydligt attraktivare utvinningskostnader.

Världens urantillgångar som kostar 130–260 USD/kg uran att utvinna utgör ytterligare 1,7 miljoner ton uran, och så kallade okonventionella tillgångar, tillgångar som har beräknats vara ännu dyrare att utvinna och som inkluderar uran i fattiga malmer, karbonatiter, fosforitbergarter och svartskiffrar, utgör 1,9 miljoner ton uran. Sverige har världens största rapporterade tillgångar av uran i form av svartskiffrar (underkategorin alunskiffrar), vilket är att betrakta som okonventionella tillgångar.

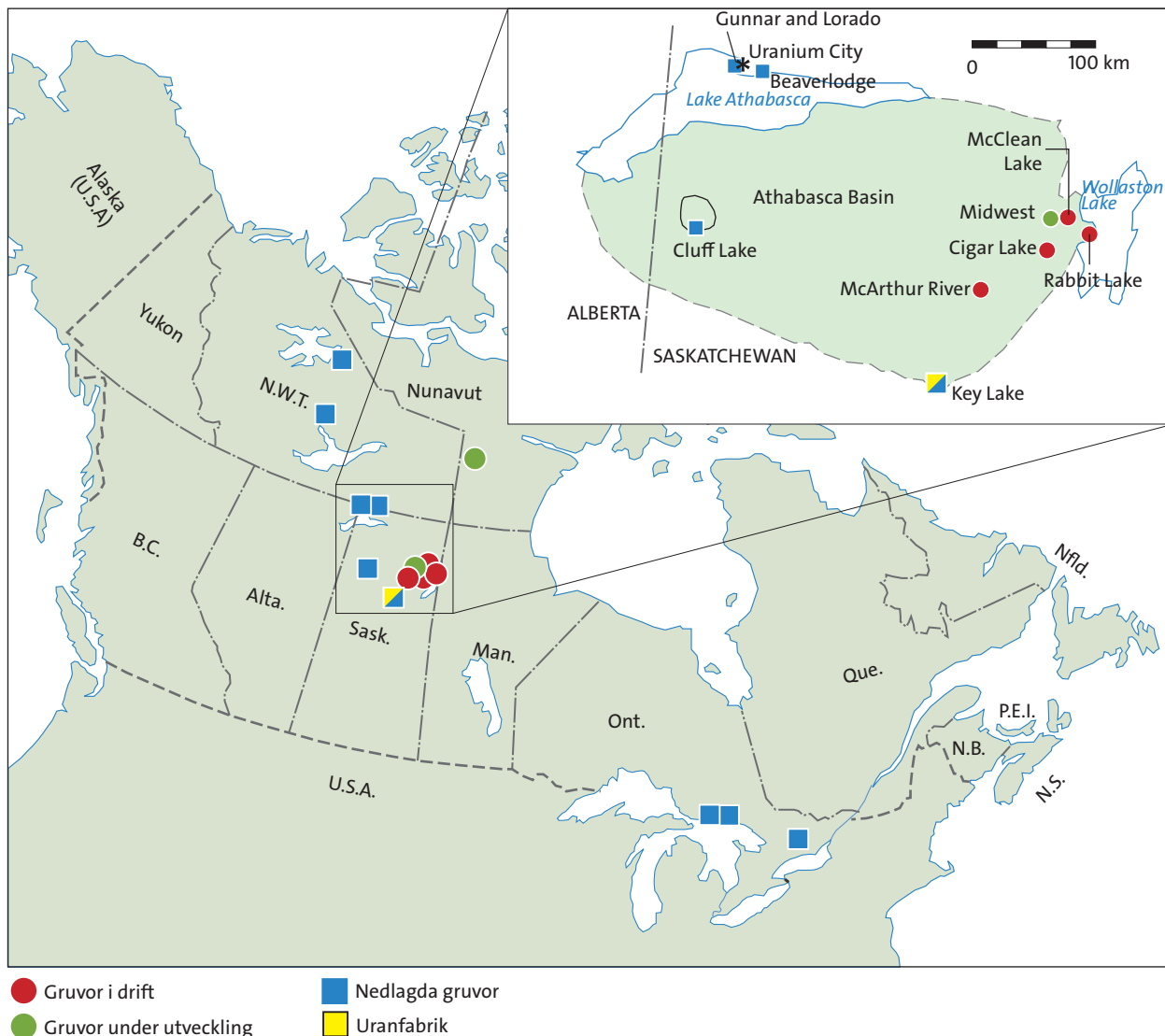


Figur 5. Världens större okonventionella tillgångar. Uran i fosforiter, icke-järnmalm, karbonatiter, svartskifferar (alunskiffer) och brunkol. *Unconventional uranium resources in the world. Uranium in phosphorites, non-ferrous ores, carbonatites, black shales (including alum shales) and brown coal.*



McArthur River är beläget i Athabasca Basin och är världens största urangruva. Foto: Cameco.

McArthur River is located in the Athabasca Basin and is the world's largest uranium mine. Photo courtesy of Cameco.



Figur 6. Athabasca Basin. Källa: Uranium and Radioactive Waste Division, Natural Resources Canada.

Athabasca Basin. Source: Uranium and Radioactive Waste Division, Natural Resources Canada.

De tre största uranproducerande områdena

Athabasca Basin, Kanada

I de norra delarna av de kanadensiska provinserna Saskatchewan och Alberta ligger den jättelika, 100 000 kvadratkilometer stora bergartsformationen Athabasca Basin. Den består av sediment som avsattes för 1,7–1,6 miljarder år sedan på ett underlag av betydligt äldre bergarter.

Hydrotermala gångmineraliseringar med uran har varit kända från området sedan 1950-talet, men i slutet av 1960-talet hittades en helt ny, betydligt större och framför allt mycket rikare uranmalm vid Rabbit Lake. Rabbit Lake gick i produktion 1975 och har till dags dato producerat drygt 81 000 ton uran. Sedan dess har ett flertal stora och rika uranmalmer hittats i området. Tjugo år efter upptäckten av Rabbit Lake hittades uran-



Olympic Dam från luften. Gruvan, som är en underjordsgruva, ligger i den australiensiska delstaten South Australia.

Foto: Google Maps

Olympic dam from the sky. The mine, which is an underground mine, is located in South Australia.

fyndigheten McArthur River och elva år senare, 1999, gick den i produktion. McArthur River är idag en av världens största urangruvor, med en årlig produktion av mer än 6000 ton uran. Urangruvan Cigar Lake, en malm med halter och reserver i nivå med McArthur River, har nyligen kommit i produktion.

Uranmalmen i Athabasca Basin är av Unconformity-type som uppstår i och runt gränsskiktet mellan äldre bergarter och betydligt yngre överlagrande sediment. Malmtypen finns beskriven ovan och i figur 3. Förekomsterna kännetecknas av att de ofta är mycket uranrika, medelhalten i Cigar Lake ligger på omkring 15 procent uran med vissa zoner som håller över 40 procent uran. Detta kan jämföras med alunskiffern i Ransstad i Västergötland som håller 300 ppm eller 0,03 procent uran eller med Olympic Dam i Australien med 0,05 procent uran.

Olympic Dam, Australien

Den jättelika koppar-guld-uranfyndigheten Olympic Dam i Australien har beskrivits i tidigare temanummer om guld (SGU, 2009 resp. SGU, 2003). Detta för

att Olympic Dam inte bara är en av världens största uranproducenter, den är dessutom världens fjärde största kopparproducent och den femte största guldproducenten. Uran är en biprodukt vid koppar- och guldframställningen och utbytet är inte det bästa, runt 70 procent. Det betyder att ungefär 30 procent av det uran som finns i malmen hamnar som restprodukt i sanddammarna efter anrikningen (WNA). Olympic Dam har världens största kända reserver och tillgångar på uran.

Malmen i Olympic Dam består av en hematitrik breccierad granit som täcks av ett 300 meter tjockt lager av sedimentära bergarter. Den centrala delen består av en hematit-kvarts-breccia utan någon mineralisering; huvuddelen av mineraliseringen finns istället i kilometerbredda zoner som sträcker sig flera kilometer i nordväst-sydöstlig riktning. Bildningssättet är fortfarande, efter många års forskning, till stora delar osäkert. Förutom koppar, guld och uran har Olympic Dam också ansevärda halter av silver, sällsynta jordartsmetaller (*rare earth elements*, REE) och flusspat.

BHP Billiton, som äger och driver gruvan, har iden-



Vid Inkai i Kazakstan utvinns uran från berggrunden med in situ-laking. Bilden visar borrhningar för att pumpa ner lösningsmedel och för att pumpa upp uranhaltiga lösningar. Foto publicerat med tillstånd av Cameco

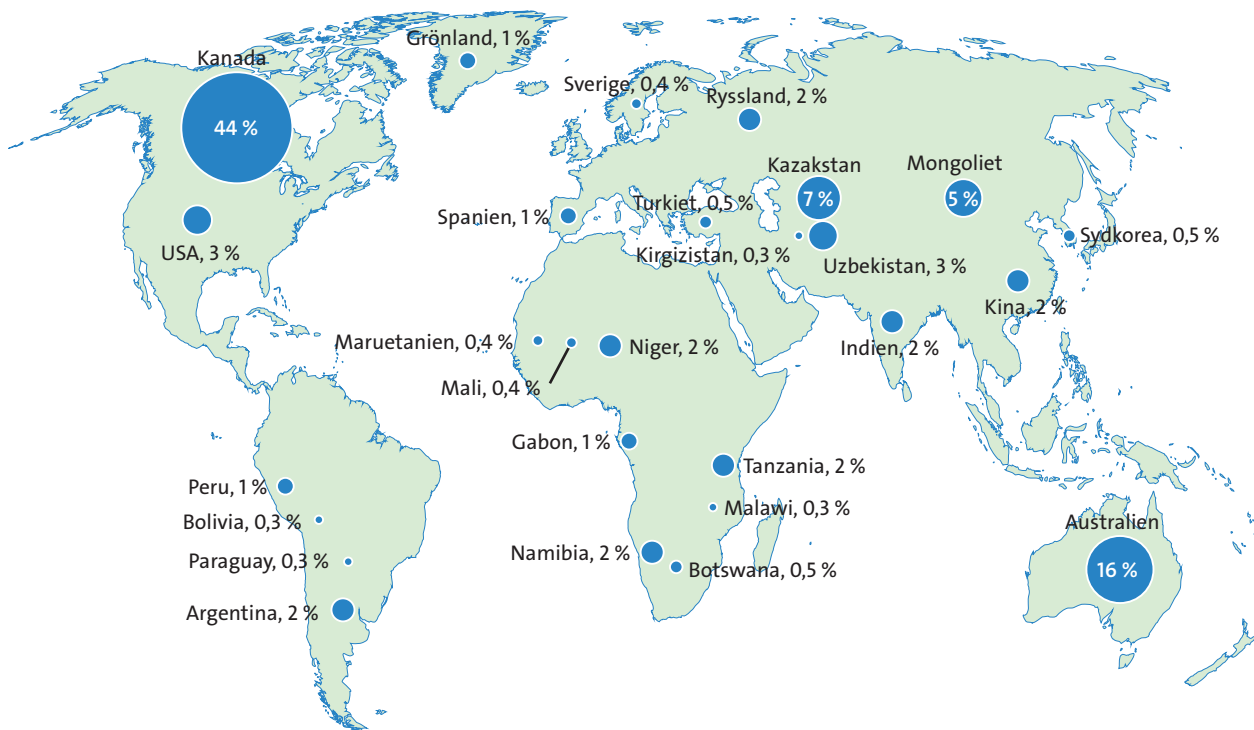
Uranium is extracted from the rock with in-situ leaching at Inkai in Kazakhstan. The picture shows drilling to pump down the solvent and to pump up uranium bearing solutions. Photo courtesy of Cameco.

tifierat ytterligare malm i gruvan och planerar att öka produktionen inom några år. En av planerna har varit att bryta malmen i ett jättelikt dagbrott, denna plan har dock lagts på is. Istället väntar ytterligare brytning under jord efter framför allt koppar, men även biprodukterna guld och uran. Gruvan håller även på att utforska möjligheterna att utvinna metallerna ur malmen med *heap leaching*, där stora högar av malm sprinklas av kemikalier för att laka ur metaller.

Kazakstan

Uranprospekteringen i Kazakstan började i slutskedet av andra världskriget, och 1951 hittades landets första uranfyndighet. Produktionen startade 1957 som dagbrottsbrytning vid Kurdai i södra Kazakstan. Senare prospektering har hittat ett flertal stora uranminerali-

seringar, majoriteten är av sandstenstyp. Eftersom de flesta av dessa mineraliseringar förekommer i porösa sandstenar är det möjligt att laka bergarten, in situ-lakning (*in situ*, latin för på plats), utan att behöva bryta berg, något som gör uranproduktionen billig. Vid in situ-lakningen används svavelsyra eller andra lösningar som pumpas ner i de porösa och permeabla bergarterna och lakar ut uranet. Lösningen pumpas sedan upp och uranet fälls med olika tekniker ut ur lösningen. Uranhalten på mineraliseringarna i Kazakstan är generellt mycket låga, men är på sätt och vis ointressanta med tanke på utvinningstekniken. Beräkningar visar att de kända brytbara tillgångarna i Kazakstan uppgår till nära 690 000 ton uran. Den första in situ-lakningen startade 1978 och sedan dess har Kazakstan utvecklats till att idag vara världens största uranproducent med



Figur 7. Prospektering av uran i världen. Procent av världens prospekteringskostnader.
 Mineral exploration of uranium in the world. Percentage of world exploration costs.

ungefär 40 procent av världsproduktionen, eller drygt 23 000 ton uran (2014). Huvuddelen av produktionen kommer från in situ-lakning av förekomster i sandsten.

PROSPEKTERING I VÄRLDEN

Siffror från marknadsanalysen SNL Corporate Exploration Strategies visar att prospektering efter uran utgör cirka 3,8 procent av världens totala prospektering av icke-järnmetaller. Detta motsvarar 334 miljoner USD av de 8,8 miljarder USD som investerades inom prospektering totalt under 2015. Det är en minskning med 19 procent från 2014, då uranprospekteringen stod för 4,7 procent av de totala prospekteringsinvesteringarna i världen (exklusive järnmalmsprospektering), motsvarande 504 miljoner USD. Antalet prospekterande bolag har också gått ned, från 135 år 2014 till 112 år 2015. Kanada ligger överst på listan över uranprospekteringsinsatser med 44 procent av de totala kostnaderna i världen. Trots att insatserna faller något (19 miljoner USD) från föregående år så ökar uran-

prospekteringen från 11 till 12 procent av Kanadas totala prospekteringskostnader 2015.

Australien har andraplatsen med 16 procent av världens totala prospekteringsinsatser för uran. Här faller uranprospekteringsinvesteringarna som mest, från 108 miljoner USD år 2014 till 52 miljoner USD år 2015, en minskning på mer än 50 procent. Uranprospekteringen har 5 procent av Australiens totala prospekteringsbudget.

Kazakstan kommer trea med 7 procent av världens uranprospekteringsinsatser, följt av Mongoliet (5 procent), Uzbekistan (3 procent) och USA (3 procent). I Kazakstan, som är världens största producent av uran, faller uranprospekteringsbudgeten med omkring 18 procent, motsvarande 5,3 miljoner USD. I USA faller uranprospekteringen procentuellt sett stort med 56 procent, från 19 miljoner USD till 8,3 miljoner USD.

Som världsdel har Afrika haft den största minskningen av uranprospektering de senaste åren, där uran-

gått från den tredje mest prospekterade metallen till en sistaplats. Uranprospekteringen i Afrika ligger på den lägsta nivån på tio år, bara 29 miljoner USD.

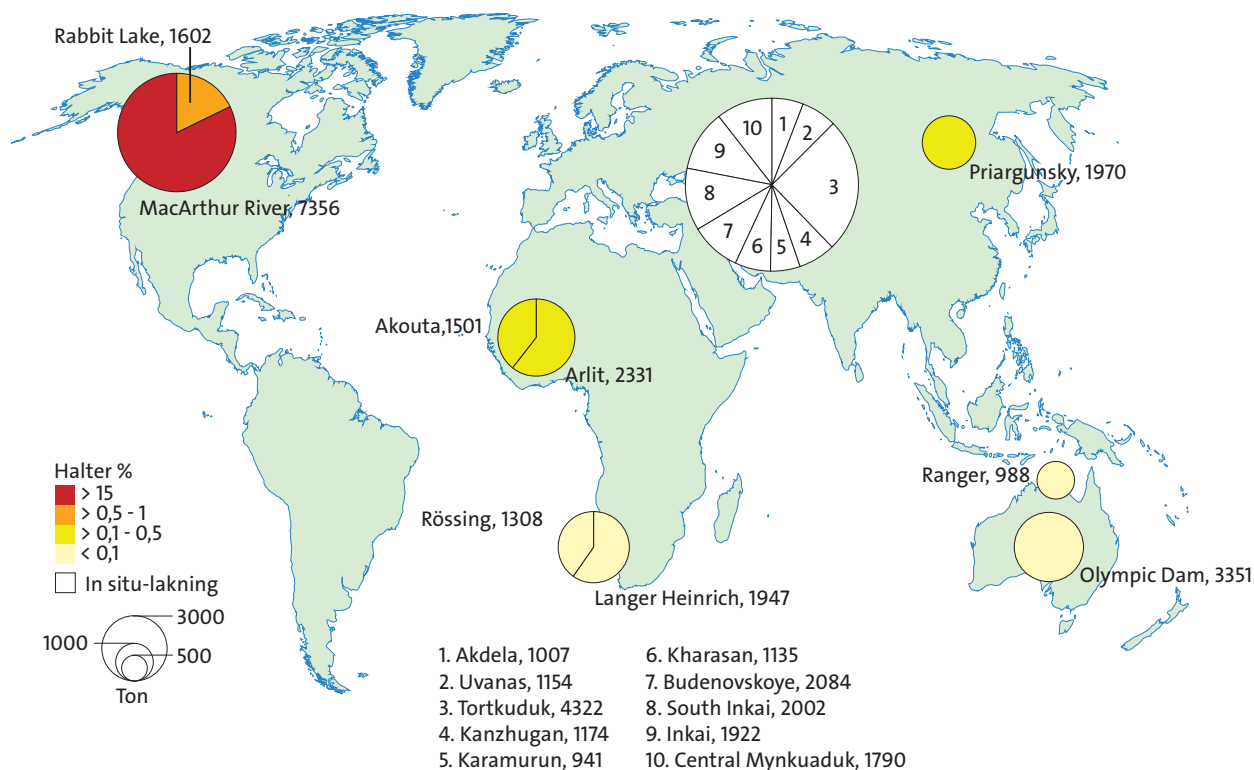
PRODUKTIONSTEKNIK

Liksom de flesta andra metaller bryts och utvinns uran med konventionella metoder i dagbrott eller i underjordsgruvor. Dagbrottsbrytning förekommer när malmkropparna ligger relativt ytligt. De har i regel lägre uranhalter, men oftast stora volymer. Den dyrare underjordsbrytningen kräver att uranhalterna är högre eller att uranet bryts som en biprodukt. I vissa gruvor med höga uranhalter i till exempel Kanada förekommer automatiserad eller fjärrstyrd brytning.

Uran utvinns dessutom genom så kallad in situ-lakning (*in situ leach*, ISL), där lösningar som kan laka ut

uran, vanligtvis svavelsyra (eller alkalilösningar beroende på omgivande berggrund), pumpas ner i uranförande bergarter och sedan pumpas upp en bit därifrån varpå uranet utvinns ur lösningen. Metoden kräver att den uranförande bergarten är genomsläpplig för laklösningarna, till exempel grov sandsten, samt att den omges av tät bergarter, till exempel skifferar, som inte släpper igenom laklösningarna. Denna utvinningsmetod ställer stora krav på operatören så att lösningarna, med eller utan uraninnehåll, inte slipper ut i grundvatten och vattendrag eller på annat sätt förorenar miljön.

In situ-lakning är vanlig i Kazakstan, USA (där metoden benämns *in situ recovery*, ISR) och i Uzbekistan, men finns även i Australien (ISR) och Ryssland. Nästan hälften av världens uran utvinns idag genom in situ-lakning.



Figur 8. De 20 största urangruvorna i världen. Uranet från gruvorna i Kazakstan utvinns genom in situ-lakning och uranhalterna är därför inte jämförbara med traditionell gruvbrytning.

The 20 biggest uranium mines in the world. The uranium from mines in Kazakhstan are mined by in situ leaching and uranium concentrations are therefore not comparable with traditional mining.

Tabell 5. Andel klyvbar isotop (uran-235) uttryckt i procent av hela uraninnehållet.

Amount of fissile isotopes (uranium-235) in percent of the whole uranium content.

Uran	uran-235 i procent av hela uraninnehållet
Utarmat uran	0,25–0,35
Okloreaktorn	0,45
Naturligt uran (och yellowcake)	0,72
Något anrikat uran	0,2–2
Uran i svenska reaktorer	3–5
Låganrikat uran	< 20
Höganrikat uran	> 20
Uran för kärnvapen	> 85

Framställning av uranslig (yellowcake)

Uranmalmen från underjordsbrytning eller dagbrott krossas och mals till lämplig storlek och därefter lakas uraninnehållet ut med svavelsyra. I vissa fall används andra lösningar. Därefter utvinns uran ur lösningen genom jonbyttarteknik eller vätske-vätske extraktion. Vid in situ-lakning behövs inte krossning och malning av malmerna, utan lösningarna går direkt till extraktionsstegen. Slutprodukten kallas *yellowcake* och motsvarar slig eller koncentrat vid exempelvis en koppar- eller järngruva. Denna produkt behöver sedan renas ytterligare (anrikas) för att kunna användas som kärnbränsle.

Isotopanrikning (konvertering)

För att framställa ett kärnbränsle som kan underhålla en kontrollerad kärnklyvningsprocess i en kärnkraftsreaktor, eller för den delen en okontrollerad kärnklyvningsprocess i ett kärnvapen, måste man anrika den klyvbara isotopen. Det uran som finns i naturen består av 99,284 procent uran-238, 0,711 procent uran-235 samt en försvinnande liten del uran-234 (0,0055 procent). Den klyvbara isotopen är uran-235, men vid så låga koncentrationer som i naturen kan inte kärnklyvningsprocessen hållas igång. För det krävs uran-235-halter på några procent upp till 20 procent, för kärnvapen måste uran-235-halten vara 85 procent eller högre.

Att anrika isotoper är mycket svårt att göra med van-

liga kemiska separationsmetoder eftersom de olika isotoperna har nästan identiska kemiska egenskaper. Det enda som skiljer dem är en liten skillnad i atommassan, där uran-238 väger 1,3 procent mer än uran-235. Destillation, kristallisation, extraktion, kromatografi eller andra separationsmetoder fungerar därför inte. Tidigare användes gasdiffusion för att separera isotoperna. Om uranoxiden får reagera med fluorväte bildas gasformig uranhexafluorid (UF_6), ett vitt fast ämne som förångas vid 56 °C).

Vid gasdiffusion trycks uran i gasform, vanligen som UF_6 , genom ett halvgenomträngligt membran. Den lättare isotopen, uran-235, kommer att passera genom membranet snabbare än uran-238. Separationen blir inte så stor, men genom att seriekoppla flera membran går det att skapa en gas som är anrikad på uran-235.

Metoden med gasdiffusion används inte numer utan har ersatts med centrifugalmeter. Den metoden utnyttjar den lilla skillnaden i massa mellan isotoperna i en centrifug, där den tyngre isotopen samlas mot centrifugens väggar och den lättare vid centrifugens centrum. Anrikningen kräver att flera centrifuger seriekopplas, där varje centrifug i serien ökar andelen uran-235 något för att till sist nå halter som går att använda i en reaktor. Det är sådana centrifuger som förekommer i diskussionerna om Irans kärnkraftsprogram – hur många centrifuger har de seriekopplat: tillräckligt många för att producera kärnbränsle, eller hela vägen till kärnvapenmaterial?

Nya metoder för att separera isotoper använder lasertechnik där en ytterst fininställd laser joniserar den ena isotopen men inte den andra. När bara den ena isotopen är joniserad går det lätt att med konventionell kemiteknik separera isotoperna.

Fraktionen med högre halt uran-235 kallas anrikat uran, och den med lägre utarmat uran (0,25–0,35 procent uran-235, depleted uranium, DU). Om andelen uran-235 är lägre än 20 procent i slutprodukten kallas det låganrikat uran (low enriched uranium, LEU), om det är högre kallas det höganrikat uran (High Enriched Uranium, HEU).

Kärnbränsletillverkning

Råvaran för kärnbränsleelement (stavar) utgörs av uranhexafluorid där uran-235-halten ligger under 20 procent. Uranhexafluoriden omvandlas till ett urandioxid-

Tabell 6. Världens uranproduktion 2004–2014. Se tabell 1 för förklaring av typerna.
The world's uranium production 2004–2014. See table 1 for more on the types.

Land	Gruva eller produktionsområde	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Typ
Australien		8 982	9 516	7 593	8 611	8 430	7 982	5 900	5 983	6 991	6 548	5 231	
	Olympic Dam										3 399	3 351	3
	Ranger no. 3										2 510	988	2.
	Beverly/Pepegoona/Pannikan										345	21	1
	Four Mile										0	640	
	Honeymoon/East Kalkaroo										95	0	1
Brasilien		300	110	190	299	330	345	148	265	231	198	231	
	Caetite-Lagoa Real												4
Frankrike		7	7	0	4	5	8	7	6	3	0	3	
Indien		230	230	230	270	271	290	400	400	385	400	385	
	Jaduguda												
	Bhatin												
	Narwapahar												
	Bagjata												
	Turamidh												
	Banduhurang												
	Mohuldih												
	Tummalapalle												
Iran											40		
	Gachin												
Kanada		11 597	11 628	9 862	9 476	9 000	10 173	9 873	9 145	8 998	9 334	9 134	
	McArthur River										7 746	7 356	2
	CigarLake										0	132	2
	Rabbit Lake										1 587	1 602	2
	McClean Lake										0	43	2
Kazakhstan		3 719	4 357	5 279	6 637	8 521	14 020	17 803	19 451	21 317	22 451	23 127	
	Tortkuduk, Moinkum (northern)										3 558	4 322	1
	Southern Moinkum, Kanzhugan										1 129	1 174	1
	Uvanas, Eastern Mynkuduk										1 192	1 154	1
	Central Mynkuduk										1 800	1 790	1
	Western Mynkuduk										998	870	1
	Inkai-1, 2, 3										2 047	1 922	1
	Inkai-4 (South Inkai)										2 030	2 002	1

Fortsättning, tabell 6.

Land	Gruva eller produktionsområde	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Typ
	Akdala										1 020	1 007	1
	Budyonovskoye 1, 3										1 499	1 594	1
	Budyonovskoye 2										2 115	2 084	1
	North and South Karamurun										1 000	941	1
	Irkol (Semizbai-U)										750	700	1
	Kharasan 1 (Kyzylkum)										752	858	1
	Kharasan 2 (Baiken-U)										888	1 135	1
	Zarechnoye (Zarechnoye)										931	876	1
	Semizbay (Semizbai-U)										411	400	1
	RU-1 (Vostok, Zvezdnoye)										331	298	1
Kina		750	750	750	712	769	750	827	885	1 500	1 450	1 450	
	Yining											380	1
	Lantian											100	
	Benxi											120	10
	Qinglong											100	
	Fushou											350	
	Chongyi											200	
	Shaoguan											200	
Malawi		0	0	0	0	0	104	670	846	1 101	1 132	369	
	Kayelekera												1
	Kanyika												7
Namibia		3 038	3 147	3 077	2 879	4 366	4 626	4 496	3 258	4 495	4 327	3 255	
	Rössing										2 043	1 308	7
	Langer Heinrich										2 098	1 947	14
	Trekkopje										186		
Niger		3 282	3 093	3 434	3 135	3 032	3 243	4 198	4 351	4 667	1 450	4 057	
	Tamou-Artois-Tamgak (Arlit)										2 730	2 331	1
	Akouta-Akola-Ebba										1 508	1 501	1
	Azelik-Teguidda-Abokurum										290	225	1
	Imoutaren												1
Pakistan		45	45	45	45	45	50	45	45	45	41	45	
Rumänien		90	90	90	77	77	75	77	77	90	80	77	
Ryssland		3 200	3 431	3 430	3 413	3 521	3 564	3 562	2 993	2 872	3 135	2 990	
	Antei, Streltsovskoe, Oktjabrskoe (Priargunsky)										2 133	1 970	6
	Dalmatovskoe, Khokhlovskoe (Dalur)										562	578	1

Fortsättning, tabell 6.

Land	Gruva eller produktionsområde	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Typ
Sydafrika	Khiagda, Vershinnoe (Khi- agda)										440	442	1
	Ezulwini-Cooke	755	674	534	539	655	563	583	582	465	531	573	
	Vaal River										0	69	5
Tjeckien											531	504	5
	Dolni Rozinka	412	408	359	306	263	258	254	229	228	225	193	
	Straz pod Ralskem												
Tyskland		77	94	65	41	0	0	0	52	50	27	33	
Ukraina		800	800	800	846	800	840	850	890	960	922	926	4
	Ingulskiy, Michyrinskiy, Centralniy												
	Smolinskiy, Vatutinskiy												4
	Novokonstanti-novskiy												4
	Safonovskiy												1
	Severinskiy Podgaytsevskiy												4
USA	Zheltye Vody mill										922	926	
		878	1 039	1 692	1 654	1 430	1 453	1 660	1 537	1 596	1 719	1 909	
	Crow Butte och North Trend										272	227	1
	Smith Ranch Highland										646	815	1
	White Mesa Mill										388	362	1
	Palangana												1
	Alta Mesa												1
	Willow Creek										362	217	1
	Lost Creek										51	211	1
	Nichols Ranch and Hank										0	77	1
Uzbekistan		2 016	2 300	2 270	2 320	2 338	2 429	2 400	3 000	2 400	2 400	2 400	
Total		40 178	41 179	39 670	41 282	43 853	50 772	53 663	53 494	58 344	59 673	56 252	

pulver som pressas och sintras, vanligen till små (1 cm³) cylinderformade kutsar som stoppas i rör av en zirkoniumlegering. Zirkonium används för att det är genomsläppligt för neutroner. Rören fylls med helium för att öka värmeledningsförmågan och förseglas i ändarna. Därefter sammanfogas de i paket om ett hundratal i varje och bildar på så sätt bränsleelement som förs in i reaktorerna. Vissa av dessa bränsleelement har utrymme för neutronabsorberande stavar som kan reglera och stoppa reaktorn. I Västerås finns Sveriges, och norra Europas, enda tillverkare av bränsleelement. Fabriken ägs av Westinghouse Electric Sweden (f.d. Asea Atom).

PRODUKTION

År 2014 täckte världsproduktionen av uran från gruvor (så kallad primär produktion) ungefär 85 procent av den totala efterfrågan om cirka 65 900 ton (enligt siffror från World Nuclear Association, WNA). Resterande togs från sekundära källor. Den största delen av den sekundära tillförseln utgörs av höganrikat uran (HEU) från den internationella nedrustningen av kärnvapen. Andra sekundära källor är återanvändning av plutonium och uran från använt kärnbränsle eller avvecklade kärnvapen (så kallat MOX-bränsle, *mixed oxide*), samt återanrikat utarmat uran och uran från civila lager.

WNA beräknar att det finns cirka 1 500 ton höganrikat uran i amerikanska och ryska kärnvapen samt i andra militära lager. Detta motsvarar ungefär sju gånger den årliga gruvproduktionen av uran. WNA uppskattar att det sedan 1940-talet har producerats cirka 1,3 miljoner ton utarmat uran som avfall från både militär och civil anrikning av uran och som innehåller 0,25–0,35 procent uran-235. Cirka 200 ton MOX-bränsle konsumeras varje år, vilket motsvarar cirka 1 700 ton primärt uran.

Uran bryts i omkring 20 länder och den globala gruvproduktionen uppgick 2014 till 56 252 ton. Mer än hälften av världens gruvproduktion av uran kommer dock från enbart tio gruvor i sex länder (se tabell 6). Dessa sex länder står för mer än 85 procent av den globala gruvproduktionen av uran. Kazakstan är världens ledande gruvproducent av uran och stod för 41 procent av världsproduktionen 2014. Tillsammans med Kanada och Australien står Kazakstan för två tredjedelar av den globala gruvproduktionen av uran. Andra stora producentländer är Namibia, Niger, Ryssland och Uzbekistan. Den största urangruvan är McArthur River i den

kanadensiska provinsen Saskatchewan, 600 km norr om Saskatoon. Denna fyndighet är även den rikaste som bryts i världen, med genomsnittliga halter omkring 20 procent uran.

I tabell 6 framgår världens gruvproduktion av uran under 10-årsperioden 2005–2014.

ANVÄNDNING

Till en början och under lång tid användes uran enbart för att ge färg åt keramisk glasyr. Först i och med den militära kärntekniska forskningen före, under och efter andra världskriget producerades resultat som kunde utnyttjas för den fredliga användningen av kärnkraft. De första reaktorerna som byggdes var relativt små och användes för forskningsändamål. Relativt snart utvecklades större reaktorer som kunde användas för både civila och militära ändamål. Till den senare kategorin hör reaktorerna som huvudsakligen används i fartyg. Det finns enstaka exempel på civila tillämpningar för kärnkraften inom sjöfarten, till exempel ryska isbrytare.

Utarmat uran (*depleted uranium*, DU) är väldigt tungt (ungefär 70 procent högre densitet än bly) och har ett lågt pris på marknaden. Det används till bland annat strålskyddscontainrar, motvikter i flygplan, pansar och pansarbrytande ammunition.

Uran används också för att framställa andra radioaktiva ämnen, vilket vanligtvis sker i små forskningsreaktorer. Dessa ämnen kan användas som strålningskälla inom medicinen, till exempel för behandling av tumörer eller för att spåra sjukdomstecken i kroppen som exempelvis har med cirkulationen att göra. Ämnena används även för materialkontroll, i brandvarnare eller för att spåra läckage i rörledningar. Den största mängden uran används emellertid i reaktorer för energiframställning (se nedan).

Uran som kärnbränsle

När uran ska användas för energiframställning sker det med hjälp av en kärnkraftsreaktor. I denna upphettas vatten till vattenånga av kärnprocesserna i reaktorhärden. Vattenången driver sedan ångturbiner som driver generatorer. Dessa alstrar ström som matas ut på elkraftsnät.

I en reaktor sker klyvning av atomkärnor med hjälp av neutroner. När atomkärnan klyvs frigörs neutroner, fissionsprodukter i form av nya atomkärnor bildas och energi frigörs. Neutronflödet styrs så att de ger upphov till nya klyvningar i en önskad takt. Den samman-

Tabell 7. Uranpriset (spotpriset) angivet i olika enheter.

Price of uranium (spot price) in different units.

Datum	USD/lb U ₃ O ₈	USD/kg U ₃ O ₈	USD/kg U
5 september 2016	25,5	56,22	66,29
januari 2016	34,7	76,50	90,21
januari 2015	37	81,57	96,19
januari 2014	35,45	78,15	92,16
januari 2013	43,88	96,74	114,08
januari 2012	52,13	114,93	135,52



Figur 9. Priset för U₃O₈, från januari 2006 till september 2016.

Price of U₃O₈, from January 2006 to September 2016.

lagda massan av fissionsprodukterna är lägre än den ursprungliga massan av den klyvbara isotopen; skillnaden frigörs i form av energi enligt den klassiska formeln $E=mc^2$ (energin=massan $\times$ ljushastigheten i kvadrat). Den utvecklade energin från klyvningsprocessen är huvudsakligen rörelseenergi hos klyvningsprodukterna, som rusar ifrån varandra med stor hastighet. Efter hand bromsas de i moderatormaterialet, som ofta är vatten, och rörelseenergin övergår i värme. Även den utsända strålningen bidrar till energiproduktionen.

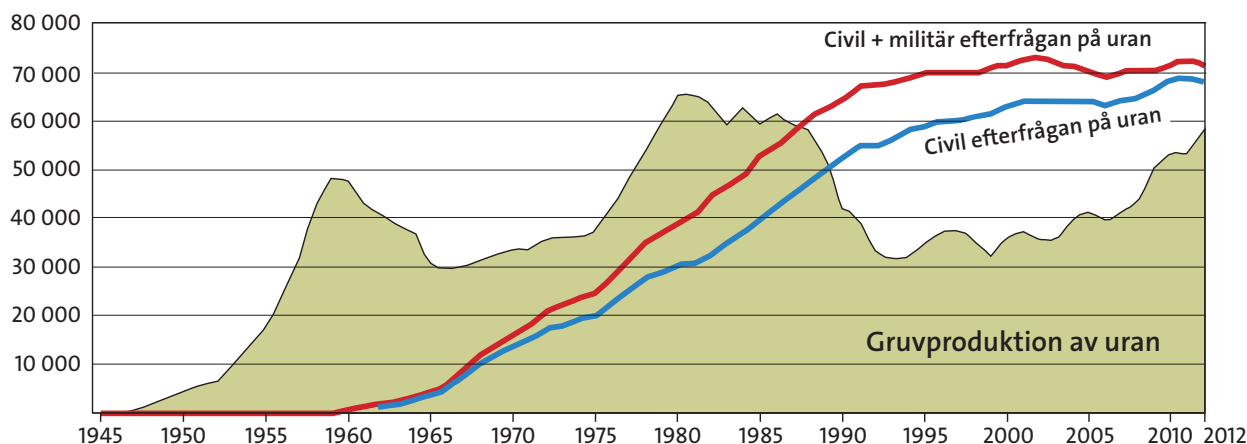
Styrning av en reaktor sker genom reglering av neutronflödet. Det måste finnas en neutronkälla, till exempel uran-235, som klyvs spontant och ger upphov till neutroner, och en styranordning som kan absorbera neutroner, samt en moderator som kan styra farten på neutronerna.

Det finns ett antal olika typer av reaktorer och indelningen kan göras med avseende på moderatorn (tryckvattenreaktor, kokvattenreaktor, grafitreaktor och

tungvattenreaktor), med avseende på användningen (forskningsreaktor eller energiproducerande reaktor) eller med avseende på neutronenergin (termisk reaktor eller snabb reaktor).

Reaktorer som använder vanligt vatten som moderator och kylmedel finns av två slag. Det är tryckvattenreaktorer (*pressurised water reactor*, PWR) och kokvattenreaktorer (*boiling water reactor*, BWR). Gemensamt namn är lättvattenreaktorer. Dessa använder anrikat uran som bränsle i form av urandioxid (omkring 3–5 procent uran-235). Grafitreaktor är en typ av kokvattenreaktor, med grafit som moderator. Om tungt vatten (där väteets atomkärna består av en proton och en neutron istället för endast en proton), används som moderator kallas det för en tungvattenreaktor. Tungvattenreaktorer (*heavy-water reactor*, HWR) eller trycktungvattenreaktorer (*pressurised heavy-water reactor*, PHWR) använder uranbränsle av oanrikad urandioxid.

Ton uran



Figur 10. Uranproduktion och efterfrågan 1945–2013. Källa: WNA.
 Uranium production and demand 1945–2013. Source: WNA.

I kokvattenreaktorer strömmar vatten genom reaktorkärnan så att det börjar koka av kedjereaktionen. Ångan avskiljs i reaktorkärlet och leds genom rör till en ångturbin som står i förbindelse med axeln på en generator. Ångan kondenseras därefter till vatten i en kondensor och pumpas tillbaka in i reaktorkärlet.

Tryckvattenreaktorer innehåller ett primärt och ett sekundärt kylsystem. De kan därför arbeta vid högre temperaturer än kokvattenreaktorer. I primärsystemet cirkuleras vatten i en sluten slinga under tryck för att det inte ska koka. I reaktorkärlet hettas vattnet upp till cirka 325 °C vid ett tryck på cirka 15 MPa (megapascal) och går sedan till en värmeväxlare där det avger värme till det sekundära kylsystemet. Där finns vatten vid normalt tryck som förångas när värme tillförs. Ångan driver sedan ånggeneratorer som kan vara kopplade till elektriska generatorer eller direkt till propelleraxeln på fartyg. Tryckvattenreaktorn för civilt bruk är utvecklad ur de reaktorer som ursprungligen användes i ubåtar.

Den vanligast förekommande reaktortypen i världen är tryckvattenreaktorn, kokvattenreaktorn kommer närmast. I Sverige är reaktorerna Ringhals 2–4 av tryckvattentyp, medan Ringhals 1 och de i Oskarshamn och Forsmark är kokvattenreaktorer. Reaktorerna Ringhals 2–4 har byggts av Westinghouse (USA), och de övriga av AB Asea-Atom (Västerås).

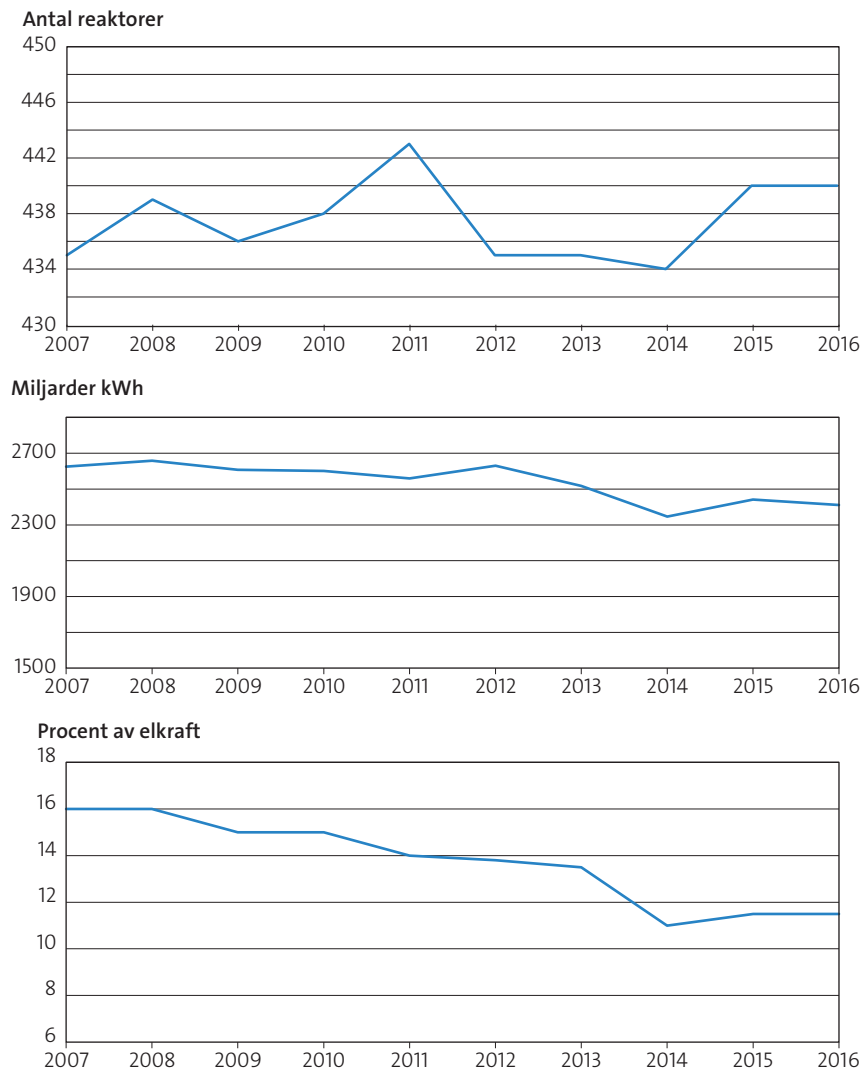
URANPRISET

Den kemiskt mest stabila uranoxiden är uraninit, med den generella kemiska beteckningen U_3O_8 . Det är i den formen som uran handlas med och priset på uran sätts oftast på denna oxid och inte på det rena grundämnet (U). Handelsvaran *yellowcake* består huvudsakligen av U_3O_8 tillsammans med en mindre mängd av uranoxider och uransalter. Pris per kg uran används bland annat i bedömning av olika tillgångar som finns redovisat i tabell 4.

Spotpriserna som gäller för den dagliga marginalhandeln har de senaste åren utgjort cirka en fjärdedel av handeln. Det mesta av handeln sker via 3–15-årskontrakt, där producenterna säljer direkt till användarna. Priset i dessa kontrakt är dock ofta relaterat till spotpriset vid tidpunkten för leveransen. Eftersom produktionen har ökat mycket snabbare än efterfrågan skrivs nu allt färre långsiktiga kontrakt.

Den kraftiga prisökningen under 2000-talet, som tilltog 2005 och kulminerade 2007, berodde på att ett flertal länder med Kina och Indien i spetsen offentliggjorde planer på att bygga fler kärnkraftverk. Prisökningen kom att stimulera en ökning av utbudet vilket sedermera resulterade i ett prisfall. Gruvproduktionens ökning skedde främst i Australien och Kazakstan. Den markanta upp- och nedgången förstärktes också av

Figur 11. Antal kärnkraftreaktorer i drift i världen och energiproduktionen 2007–2016. Källa: WNA.
The amount of nuclear reactors in the world and the energy production 2007–2016. Source: WNA.



omfattande handel av fonder som köpte uran i spekulationssyfte. Det bedömdes att fonderna stod för ungefär hälften av handeln. Prisuppgången 2010–2011 förklaras återigen med en kraftig expansion av kinesisk kärnkraft. Kärnkraftsolyckan i Fukushima 2011 ledde initialt till ett kraftigt prisfall, som sedan långsamt planade ut och under 2014 nåddes 2005-års prisnivå. Ökad efterfrågan främst i Kina ledde till att priserna steg under hösten 2014, men sedan dess har de legat stilla.

EFTERFRÅGAN

Uranproduktionen översteg efterfrågan fram till mitten 1980-talet. Den tidiga produktionen gick främst till militära lager och först i början av 1980-talet började civila lager fyllas på. Det är när efterfrågan på militärt uran drastiskt minskar som den totala gruvproduktionen går ned. Gruvproduktionen har hållits nere under 1990-talet och 2000-talet på grund av kontinuerlig tillförsel från sekundära leveranser, vilket till

Tabell 8. Antalet reaktorer i drift, reaktorer under konstruktion, planerade reaktorer och föreslagna reaktorer i januari 2016 samt uranbehovet under 2016 för de aktiva reaktorerna. Källa: WNA.

The number of operating reactors, reactors under construction, planned and proposed reactors reactors in January 2016 as well as uranium demand in 2016 for the active reactors. Source: WNA.

Land	reaktorer i drift	reaktorer under konstruktion	planerade reaktorer	föreslagna reaktorer	uranbehovet 2016 (ton U)
Argentina	3	1	2	2	217
Armenien	1	0	1		88
Bangladesh	0	0	2	0	0
Belgien	7	0	0	0	1 015
Brasilien	2	1	0	4	332
Bulgarien	2	0	1	0	327
Chile	0	0	0	4	0
Egypten	0	0	2	2	0
Finland	4	1	1	1	1 126
Frankrike	58	1	0	1	9 211
Förenade Arabemiraten	0	4	0	10	0
Indien	21	6	24	36	1 077
Indonesien	0	0	1	4	0
Iran	1	0	2	7	178
Israel	0	0	0	1	0
Italien	0	0	0	0	0
Japan	43	3	9	3	1 728
Jordanien	0	0	2		0
Kanada	19	0	2	3	1 730
Kazakstan	0	0	2	2	0
Kina	30	24	42	136	6 072
Litauen	0	0	1	0	0
Malaysia	0	0	0	2	0
Mexico	2	0	0	2	282
Nederländerna	1	0	0	1	102
Nordkorea	0	0	0	1	0
Pakistan	3	2	2	0	273
Polen	0	0	6	0	0
Rumänien	2	0	2	1	179
Ryssland	35	8	25	23	6 416
Saudiarabien	0	0	0	16	0
Schweiz	5	0	0	3	521
Slovakien	4	2	0	1	905
Slovenien	1	0	0	1	137
Spanien	7	0	0	0	1 271
Sverige	9	0	0	0	1 471
Sydafrika	2	0	0	8	308
Sydkorea	25	3	8	0	4 926
Thailand	0	0	0	5	0
Tjeckien	6	0	2	1	567
Turkiet	0	0	4	4	0
Tyskland	8	0	0	0	1 689
Ukraina	15	0	2	11	1 985
Ungern	4	0	2	0	356
United Kingdom	15	0	4	9	1 734

Fortsättning, tabell 8.

Land	reaktorer i drift	reaktorer under konstruktion	planerade reaktorer	föreslagna reaktorer	uranbehovet 2016 (ton U)
USA	99	5	18	24	18 214
Vietnam	0	0	4	6	0
Vitryssland	0	2	0	2	0
Totalt i världen	440	65	173	337	65 220

Totalt i världen inkluderar sex kärnkraftverk i Taiwan.

Källa: WNA, April 2016, hämtad från <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>

största delen var uran från nedmonterade kärnvapen. Först på 2000-talet började produktionen åter öka för att 2012 närma sig 1980-talets nivå.

Under den senaste tioårsperioden har antalet kärnkraftverk ökat något, från 435 reaktorer i drift 2007 till 440 i maj 2016, enligt WNA. Samtidigt har den totala energiproduktionen från världens kärnkraftverk sjunkit med cirka 8 procent från toppåret 2008, då 2 658 TWh producerades, till 2015 års produktion på 2 441 TWh. Kärnkraftens andel av världens elektricitetsproduktion har de senaste tio åren sjunkit från 16 procent 2005 till 11,5 procent 2015, delvis beroende på sjunkande produktion från kärnkraftverken och delvis beroende på att andra energikällor som kol och naturgas har ökat.

Som en jämförelse utgjorde år 2012 kärnkraft 11 procent, kol 40,3 procent, naturgas 22,4 procent, vattenkraft 16,5 procent, olja 5 procent, och andra energislag 5 procent av världens totala elproduktion på 22 000 TWh.

Dagens 440 reaktorer har en sammanlagd kapacitet på över 384 GW. Dessa reaktorer behöver varje år cirka 78 000 ton uran i form av oxidkoncentrat. För det behövs årligen cirka 65 000 ton uran från gruvor eller sekundära källor. Efterfrågan på kärnbränsle har ökat genom åren, men ökningen har motverkats av kärnkraftsverkens ökande effektivitet, vilket motsvaras av en minskad efterfrågan av uran med 25 procent per producerad kWh, enligt WNA.

Kärnkraftverken finns i huvudsak i den industrialiserade delen av världen. Behovet av uran för energiproduktion är störst i Europa och USA, följt av Ryssland, Kina och Sydkorea. Indien, med nästan 1 300 miljoner

invånare, ligger på ungefär samma nivå som Sverige med 10 miljoner invånare.

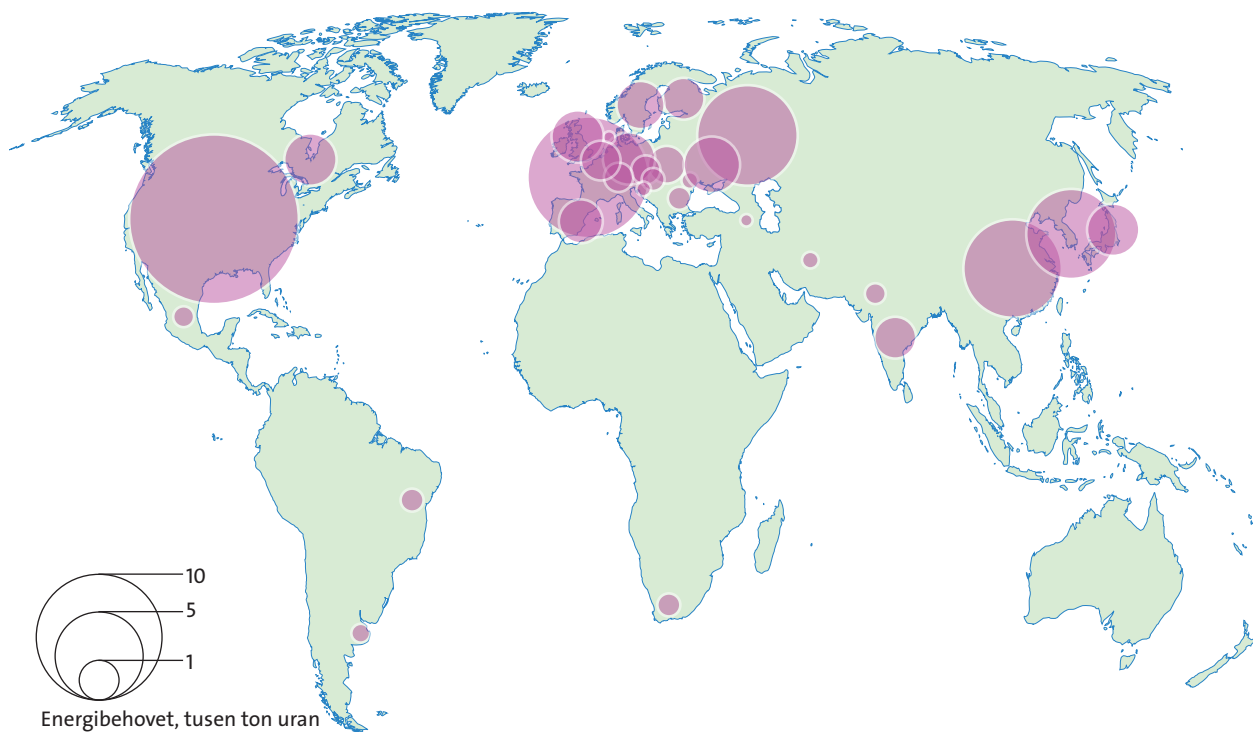
Prognostiserad efterfrågan

Projections on the supply and demand of uranium

Det finns en stor osäkerhet över utvecklingen av efterfrågan på kärnkraftsel och den tillförande gruvproduktionen av uran. IAEA har ett spann på en årlig ökning på 0,4–3,8 procent fram till 2030 (se svart streckad linje i figur 13). WNAs produktionsprognos har ett ännu större spann (den lila och gröna utbudskurvan i figur 13).

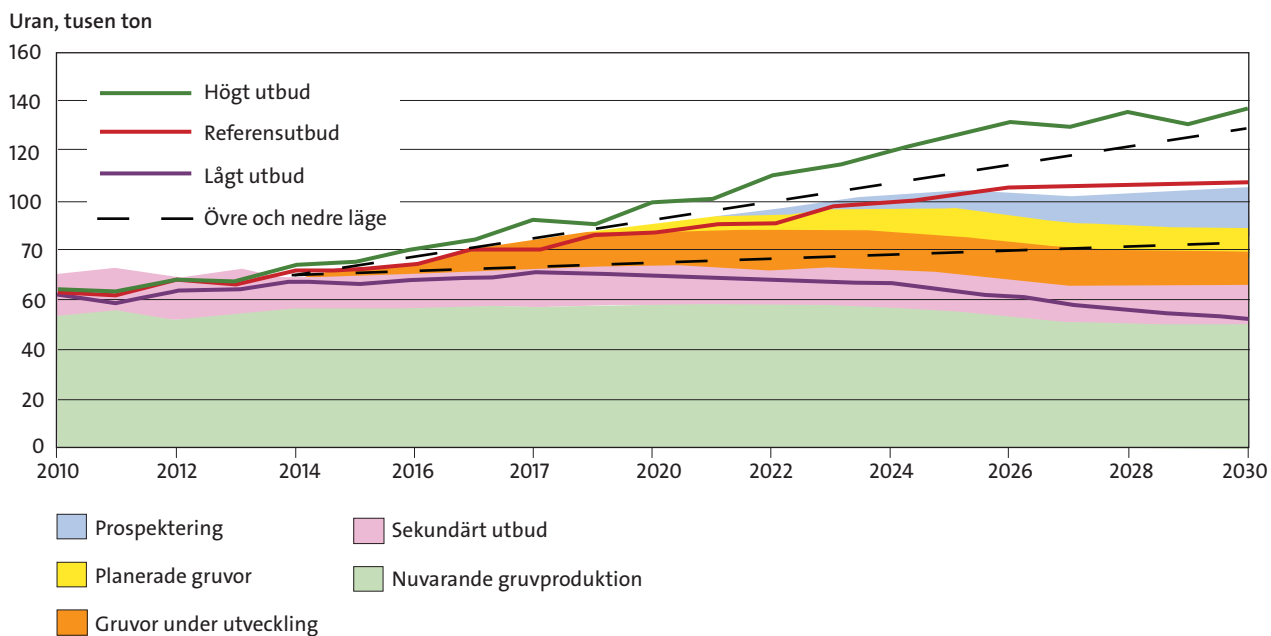
Om prognosen slår in för det som WNA kallar referensutbudet (röd linje) behöver, förutom gruvor under utveckling, planerade gruvor och projekt i prospekteringsstadiet kunna tas i drift och producera cirka 20 000 ton per år under perioden 2022–2030. Ifall det högre läget för IAEAs prognos slår in behövs det dubbla, cirka 40 000 ton per år. Totalt krävs 100 000–200 000 ton uran från tillgångarna. De rimligt säkerställda tillgångar av uran som är minst kostsamma att bryta uppgår till cirka 500 000 ton (kostnad < 40 USD/kg U). Totalt är världens kända tillgångar enligt IAEA nästan 6 miljoner ton (tabell 4). Se avsnittet Världens urantillgångar.

Ytterligare en prognos (som inte syns i figur 13) är Internationella energirådets (*International Energy Agency*, IEA) *World Energy Outlook 2014*, som prognostiserar att den globala kärnkraftskapaciteten ska öka med mer än 60 procent, från 378 GW till över 620 GW i 2040. Kina står för 45 procent av ökningen medan Indien, Sydkorea och Ryssland tillsammans står för 30 procent.



Figur 12. Behovet av uran för energiproduktion 2016. Källa: WNA.

The need for uranium in the world 2016. Source: WNA



Figur 13. Prognoser på utbud och efterfrågan av uran. Källa: WNA, IAEA.

Projections on the supply and demand of uranium. Source: WNA, IAEA.

Uran i Sverige

Uranium in Sweden

TILLGÅNGAR OCH GEOLOGI

Genom den omfattande uranprospektering som periodvis har pågått i Sverige har vi relativt god kännedom om våra urantillgångar, även om det idag inte finns någon urangruva i landet. Figur 14 visar läget för kända uranförekomster i Sverige.

Resultaten av uranprospekteringen är ett antal kända uranmineraliseringar med rapporterade tillgångar. De svenska urantillgångarna kan delas in i två huvudgrupper, den ena är de jättelika men låghaltiga tillgångarna som finns i alunskifferar och fosforiter i Västra Götalands län (Ranstad på Billingen och Kinnekulle), i skolor i fjällkedjan och utefter fjällranden (bland annat Myrviken, Häggån och Tåsjö) och i Skåne och på södra Öland. Mindre tillgångar finns i kambriska till ordoviciska (avsatta för 541–443 miljoner år sedan) alunskifferar i Motalatrakten och i Örebro-Kumlatrakten (Kvarntorp). Den andra huvudtypen utgörs av mindre men uranrikare mineraliseringar, ofta gångförekomster, exempelvis Pleutajokk.

Tillgångarna i svartskiffergruppen räknas av IAEA som okonventionella uranmineraliseringar som tidigare betraktades som olönsamma att bryta, men med dagens något högre uranpris samt nya utvinningsmetoder (bioläkning) kan de vara brytvärda. Dessa tillgångar uppgår till mer än två och en halv miljoner ton uran. Tillgångarna i den andra gruppen är de som idag rapporteras som brytvärda förekomster; OECD-NEA (2014) anger 9 600 ton, men en sammanfattning från prospekteringsrapporter (tabell 9) visar att den korrekta siffran på tillgångarna är cirka 20 000 ton. De svenska kärnkraftverken förbrukar ungefär 1 500–2 000 ton uran per år, vilket främst kommer från Kanada, Australien, Namibia och Kazakstan. Läs mer om Sveriges import i avsnittet Import och handel.

HISTORISK BRYTNING

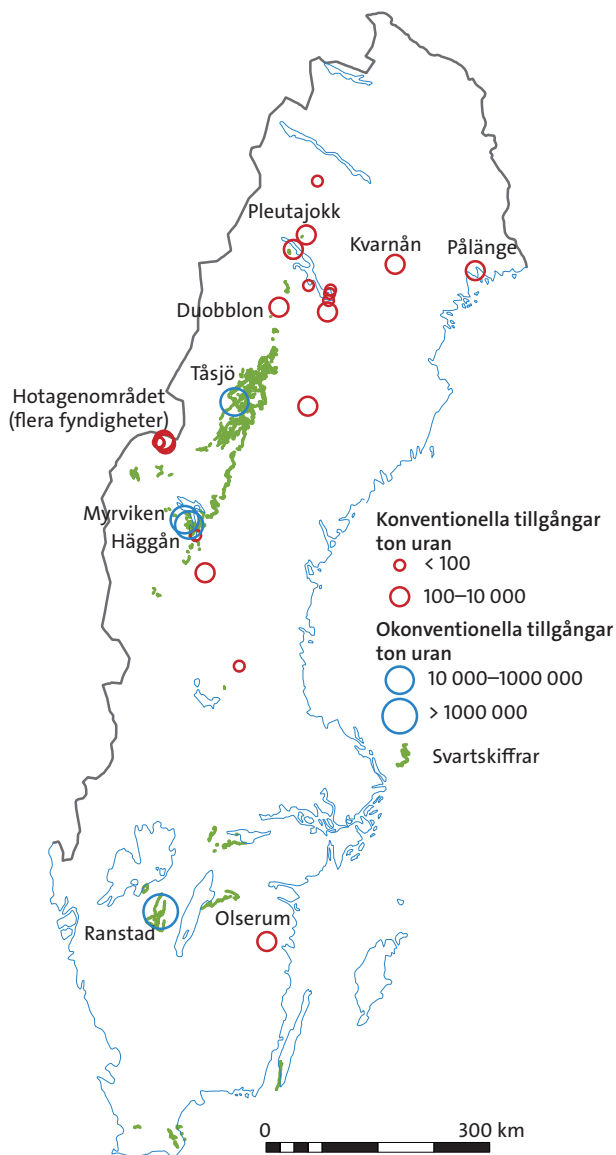
Då de första kärnreaktorerna började byggas i Sverige under 1950-talet så fanns även planer på att bli självförsörjande på uran i Sverige. Historisk brytning av uran har framför allt skett i Ranstad, men fler platser har

varit intressanta att bryta på. Idag finns ingen brytning av uran i Sverige. Fler uranförekomster i Sverige finns beskrivna i Mineralmarknaden Tema: uran (SGU, 2003).

Ranstad i Skövde kommun

Uranfyndigheten Ranstad ligger i det bergartspaket med paleozoiska bergarter som bygger upp Billingen. Billingen består av en mer än 150 meter tjock lagerföljd av olika typer av sandsten, skiffer och kalksten som avsattes i kambrisk till silurisk tid (för 541–419 miljoner år sedan) som täcks av en skiva diabas som trängt in betydligt senare. Det översta lagret med diabas har skyddat de mjuka bergarterna från erosion. Uranmineraliserat berg förekommer i ett 20–25 meter tjockt lager av alunskifferar (en underkategori till det som internationellt benämns svartskiffer, *black shale*) med oljeförande kalkstenar (orsten) och kolrika konkretioner (kolm), och sträcker sig tidsmässigt från övre kambrium till understa ordovicium (500–430 miljoner år sedan). Själva uranmineraliseringen, där halterna överstiger 300 gram uran/ton, är dock bara 3,6 meter tjock. Äldre beräkningar uppskattar det totala uraninnehållet till en miljon ton uran varav 300 000 ton ansågs vara brytvärt, andra uppgifter tyder på att den totala urantillgången är över 1 500 miljoner ton. Uranhalterna i alunskiffern i Ranstad är mycket låga, men det enorma tonnaget gör ändå fyndigheten intressant som en framtida tillgång. Under de år när uranpriset har varit högt har prospekteringsbolag visat intresse för området, men inga nya siffror har publicerats. Uranbrytning i Ranstad är antagligen inte ekonomiskt försvarbar idag.

Ranstad Skifferaktiebolag startades av AB Atomenergi 1962–1965 som en anläggning för storskalig uranproduktion ur alunskiffern i Billingen. Provbrytning i Ranstad har skett i två omgångar. Åren 1965–1966 och 1967–1969 bearbetades cirka en och en halv miljoner ton alunskiffer och cirka 215 ton uran framställdes, men de låga uranpriserna gjorde att projektet avslutades. Därefter har Ranstad Skifferaktiebolag bedrivit ett omfattande utvecklingsarbete i avsikt att finna processer som mer fullständigt skulle ta tillvara alunskifferns



Figur 14. Kända uranförekomster i Sverige. Gröna områden visar utbredningen av svartskeffrar (inklusive alunskifferar) i Sverige.

Known uranium mineralizations in Sweden. Green parts show the extent of black shales (including alun shales) in Sweden.

alla värdefulla beståndsdelar. Sedan 1978 ägdes Ranstad Skifferaktiebolag av LKAB (50 procent), Boliden (30 procent) och Studsvik Energiteknik (20 procent), med AB Svensk Alunskifferutveckling (ASA) som moderbolag. 1978 beviljade regeringen medel för fortsatt forskning kring fullutvinning ur skiffern, samt för

förberedelser för att återuppta driften, men arbetet lades snart ner igen. En slutlig efterbehandling av Ranstadområdet aktualiserades i samband med att Ranstad Skifferaktiebolags brytningskoncession för alunskiffer upphörde årsskiftet 1984–1985.

Kvarntorp i Kumla kommun

Ett beslut att starta ett uranextraktionsverk i Kvarntorp togs av AB Atomenergis styrelse år 1950. Samma år beslutade styrelsen även att bygga Sveriges första reaktor. Uranextraktionsverket färdigställdes 1953. För att 1954 kunna starta Sveriges första forskningsreaktor, R1, i ett bergtrum under KTH i Stockholm, hade Sverige inlett ett samarbete med franska CEA (då *Le Commissariat à l'énergie atomiques*, kommissionen för atomenergi). Den inhemska uranproduktionen hade inte maktat med att producera tillräckliga mängder uran i tid, så reaktorn kom därför att använda naturligt uran (det vill säga icke anrikat på uran-235) som man lånat från Frankrike, samt tungt vatten producerat i norska Rjukananläggningen, som man mot svenskt uran bytt till sig från Norge. Det är oklart hur länge och hur mycket uran som producerades i Kvarntorp.

Historisk brytning av alunskiffer

Redan innan man utvann uran ur alunskiffer hade skiffern använts för andra ändamål, bland annat för garvning, textilberedning och färgframställning. Tillverkningen av alun kan karaktäriseras som vår första kemiska storindustri och alun var länge en av våra mest betydande exportprodukter. Under aluntillverkningens glansperiod från 1700-talet till tidigare delen av 1800-talet fanns åtta alunbruk i Sverige. Det kända bruket i Andrarum i Skåne lades ner 1912, efter att ha varit i produktion sedan 1637.

Först under senare delen av 1800-talet började man undersöka möjligheten att tillgodogöra sig skiffers energiinnehåll genom utvinning av olja eller gas. 1927 blev en industriell anläggning för framställning av skifferolja färdig vid Kinne-Kleva på Kinnekulle. Anläggningen köptes 1932 av staten för framställning av olja och bensin. Under andra världskriget ströps oljetillförseln till Sverige och våren 1940 tillsatte regeringen en kommitté för att börja utreda möjligheterna för utvinning av olja ur den oljeskiffer som fanns vid Kvarntorp i Närke. Under hösten samma år bildades

Tabell 9a. Svenska tillgångar på uran. Indikerad och antagen mineraltillgång (NI 43-101 och historiska uppgifter).

Swedish uranium mineralizations. Indicated and inferred resources (NI 43-101 and historic data.

Namn	Uran (ton)	Malm (tusen ton)	Uran (%)
Olserum SV	3 900	7 800	0,050
Duobblon	3 307	13 780	0,024
Pleutajokk	2 025	1 930	0,105
Lilljuthatten	1 834	922	0,199
Pålänge	1 800	6 000	0,030
Kvarnån	1 418	1 940	0,073
Björkråmyran	1 330	1 334	0,100
Kläppibäcken	832	1 280	0,065
Skåpie	696	978	0,071
Nöjdfället SO	692	680	0,102
Nöjdfället	441	756	0,058
Sågtjärnen	438	756	0,058
Björklund centrala	200	133	0,150
Labbas (1)	117	70	0,170
Stensjödalen	73	80	0,087
Långträsk	64	130	0,050
Stensjöfället	45	90	0,050
Rävaberget	28	40	0,070
Virka	25	40	0,060
Manak S	20	25	0,080
Tresjöarna	20	15	0,130
Stugberget	12	24	0,050
Staverberget	5	0	1,400
Norr Döttern (2)	4	0	3,000
Höksjön	1	1	0,220
Summa	19 327	38 804	

Tabell 9b. Okonventionella urantillgångar

Namn	Uran (ton)	Malm (tusen ton)	Uran (%)
Ranstad	1 722 000	8 200 000	0,021
Myrviken (Viken)	447 305	3 062 000	0,015
Häggån	308 884	2 350 000	0,013
Tåsjö	40 000	200 000	0,020
Summa	2 518 189	13 812 000	

Svenska Skifferoljeaktiebolaget, SSOAB. Två år senare, i april 1942, framställdes den första oljan. Produktionen pågick till 1966. Totalt bröts närmare 50 miljoner ton alunskiffer. Årsproduktionen av olja i Kvarntorp var som mest ungefär 100 000 kubikmeter. Produkterna var gasol, bensen och eldningsolja. Den utbrända alunskiffern lades på den så kallade Kvarntorpshögen, som i takt med utvinningen av olja växte till imponerande dimen-

sioner. En del av restprodukterna, så kallad rödfyr, har används som underlag på idrottsplatser, löparbanor och tennisbanor.

Alunskiffer har också använts till kalkbränning och tillverkning av lättbetong (blåbetong) som använts som byggnadsmaterial. Innehållet av uran i blåbetongen innebär emellertid att den avger gammastrålning och gasen radon som bildas när uranet sönderfaller. När

man började undersöka radonhalter i bostäder på 1970-talet insåg man att blåbetong inte var lämpligt som byggnadsmaterial. Tillverkningen upphörde år 1975.

Uran i de mellansvenska järnmalmerna

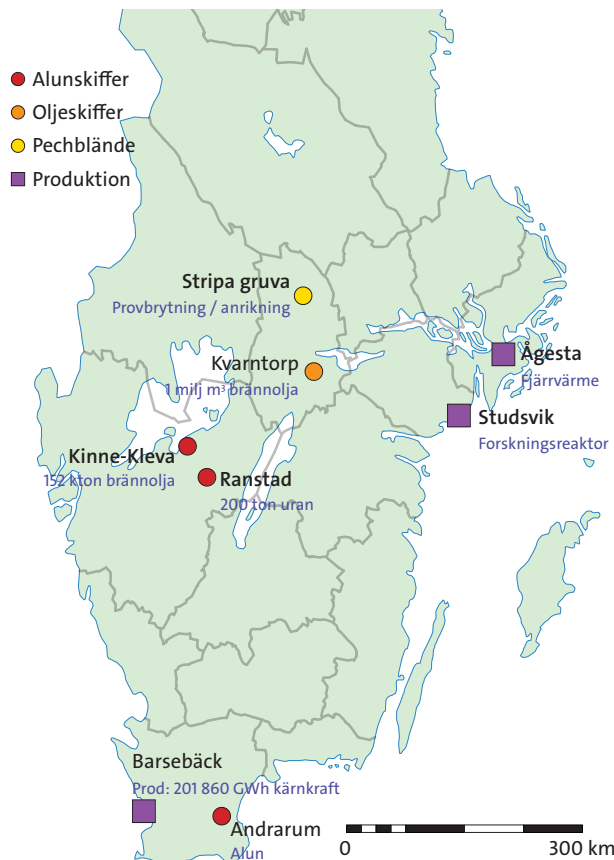
De mellansvenska järnmalmerna innehåller ibland pechblände (även kallat uraninit). Uran i form av pechblände har noterats vid många gruvor och flertalet uranmineraliserade gruvor har undersökts av SGU på slutet av 1970- och början av 1980-talet.

I Stripa järnmalmgruva, med anor från 1400-talet, lokaliserades 1956 ett antal sprickor som konstaterades innehålla det radioaktiva mineralet pechblände. Ett omfattande karteringsarbete gjordes i orter på olika nivåer i gruvan för att bedöma hur stor mängd av pechblände det fanns. Det gjordes därefter försök med selektiv brytning och sovring med hjälp av handburna geigermätare för att för hand skilja ur pechbländet. Det experimenterades också med att försöka automatisera sovringen med hjälp av detektorer vid plockband. Emellertid visade det sig att pechbländet inte var brytvärt med denna teknik. Hela projektet har beskrivits i en omfattande rapport från 1958: "Uranmineralisation i Stripa". Gruvan lades ner 1977.

I Vilhelmsgruvan inom gruvfältet Mariedamms gruvor (mer känt som Håkantorpsfältet) i Askersunds kommun innehåller järnmalmerna pechblände. AB Atomenergi rensade den gamla järnmalmgruvan, reste ny lave och provbröt uran. Figur 16 visar radioaktivitetsdagblad, en slags strålningskarta, över Mariedamms gruvor, där strålning är förhöjd vid röda områden.

PROSPEKTERING I SVERIGE

Uranprospektering i Sverige kan sägas ha startat efter andra världskriget, då kunskapen om såväl kärnenergi som kärnvapen blev tillgänglig. Statliga AB Atomenergi bildades 1947 med syftet att utveckla, bygga och driva kärnkraftsanläggningar, men även för att bedriva uranprospekteringen. Under 1950–1970-talet koncentrerades intresset till alunskifferna i Närke och Västergötland. Så småningom överfördes den statligt finansierade uranprospekteringen till SGU och det är genom det arbetet som de flesta av de idag kända uranmineraliseringarna har hittats. Under framför allt 1970-talet genomförde SGU omfattande prospektering efter uran i urberget, till större delen i den norra halvan av Sverige. I



Figur 15. Historiska platser med anknytning till uran.
Historical places in Sweden with relations to uranium.



Alunskiffer i svenska fjällkedjan, Olden, Jämtlands län.
Foto: Berndt Pettersson
Alum shales in the Swedish mountains, Olden, Jämtlands county.



Kvarntorpshögen består av restmaterial från utvinningen av olja, men den innehåller också stora mängder av olika metaller, däribland uran. Resterna av kol och olja brinner, vilket gör att temperaturen inuti högen är uppemot 700 grader.

Kvarntorpshögen consists of residue from the extraction of oil, but it also contains large amounts of various metals, including uranium. The remains of coal and oil is burning, causing the temperature inside the pile to reach up to 700 degrees Celsius.

början av 1980-talet fasades den statligt finansierade uranprospekteringen ut. Mot bakgrund av kärnkraftsolyckan i Harrisburg 1979 höll Sverige 1980 en folkomröstning om kärnkraften i Sverige. Väljarna fick tre alternativ, vilka alla var nej-alternativ men med olika avvecklingstakt av kärnkraften. Det alternativ som fick flest röster innebar bland annat att en successiv avveckling skulle ske med hänsyn till behovet av elektrisk kraft för upprätthållande av sysselsättning och välfärd, samt att kärnkraftverk och andra framtida anläggningar för produktion av elektrisk kraft av betydelse skulle ägas av stat och kommun. Utfallet av folkomröstningen torde också ha bidragit till att uranprospekteringen fasades ut.

De flygradiometrisk mätningar som SGU har utfört påbörjades med testflygningar 1967 och redan 1968 skedde markuppföljningar med handburna scintillometrar, geologiska undersökningar och provtagningar (figur 17) av de anomalier som framkom av flygmätningarna. Uranprospekteringen intensifierades därefter både i regional och i lokal skala. Förutom flygmätningar omfattade de regionala arbetena geo-

kemisk provtagning av vatten och bäcksediment samt radiometrisk blockletning. Ett antal intressanta fynd gjordes över i stort sett hela landet, från Småland i söder och norrut. Dessa fynd undersöktes mer detaljerat och den lokala prospekteringen innefattade bland annat geologiska detaljkarteringar, geofysiska markmätningar, provtagningar för kemisk analys samt borrhningar. Parallellt med ren uranprospektering utförde SGU flygmätning och uppföljning för andra ändamål (till exempel geologisk kartering) och för framtagning av gammastrålningens intensitet i berggrund och lösa avlagringar orsakade av de naturliga radioaktiva isotoperna kalium, torium och uran. Denna dokumentation av det naturliga radioaktiva fältet har varit till stor nytta vid all berggrundskartering, för beräkning av det radiogeniska värmeflödet, samt vid bedömning av strålskyddsfrågor. Idag har cirka 85 procent av Sveriges yta kartlagts av flygmätningar (figur 18). Framför allt i fjällkedjan och dess närhet saknas fortfarande mätningar.

1977 blev ett år av förändringar för SGUs uranprospekteringsverksamhet. Förutom prospekteringen

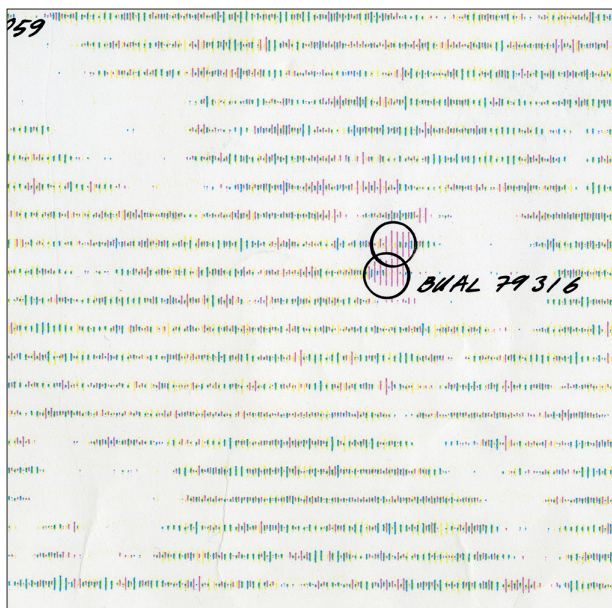


Figur 16. Radioaktivitetsdagblad över Mariedamms gruvor upprättad 1964 efter avslutade mätningar 1958. Radioaktivitetsmätningar ($\mu\text{R/h}$) visar förhöjd strålning inom röda områden. På många håll har uranförande järnmalm påträffats och bland några gamla kända gruvområden kan nämnas till exempel Persbergs Odalfält (Filipstads kommun) och Bispbergsfältet (Säters kommun).

Radioactivity map over Mariedamms mines established in 1964 after completing measurements 1958. Radioactivity measurements ($\mu\text{R/h}$) shows elevated radiation in the red areas. Uranium-bearing iron ore was found in many places and among some old known mining areas including for example Persbergs Odalfält (Filipstad Municipality) and Bispbergsfältet (Säter Municipality).

med statliga anslag, inleddes ett femårigt prospekteringsprogram i södra Norrland som beställdes av SKBF (Svensk kärnbränsleförsörjning AB). SKBF ägdes av de tre svenska kärnkraftsproducenterna Statens vattenfallsverk, Oskarshamnsverkets kraftgrupp AB samt Sydsvenska kraft AB och svarade bland annat för inköp av uran. SGUs uranprospektering hade under det föregående decenniet visat att Sverige är ett relativt gynnat land vad beträffar tillgången på uran. Mot den bak-

grunden var det naturligt att SKBF försökte utveckla en inhemsk produktion av uran genom att bland annat finansiera prospektering. SGU utarbetade på SKBFs uppdrag ett omfattande program för uranprospektering i en zon i södra Norrland (figur 19) att utföras under en femårsperiod. Hela området täcktes med flygmätningar (registrering av de radiometrisk-, magnetiska- samt elektromagnetiska fälten) och i delar av området gjordes även bäcktorvprovtagning. Området valdes på grund av

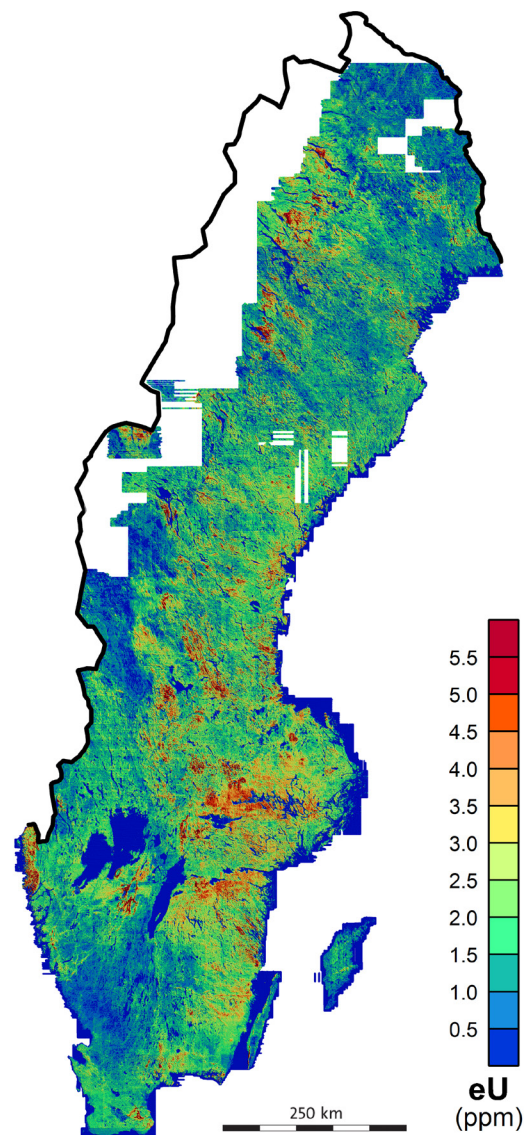


Figur 17. Utsnitt ur en flyganomalikarta, så kallad trekomponent-karta. De tre naturliga radioaktiva isotoperna registrerades längs flyglinjerna: uran = röd, torium = blå, kalium-40 = gul. Den markerade anomalin är orsakad av förhöjda uranhalter i varphögar vid en sulfidmalmsgruva.

Section of a flight anomaly map, called three component map. The three natural radioactive isotopes were recorded along the routes: uranium = red, thorium = blue, potassium-40 = yellow. The marked anomaly is caused by elevated uranium levels in slag heaps at a mine.

Figur 18. Idag har cirka 85 procent av Sveriges yta kartlagts av radiometrisk flygmätningar. Kartan visar strålning av uran.

Around 85 percent of Sweden's area have been mapped by radiometric measurements as of today. The map shows the radiation of uranium.



redan kända uranfynd (Hotagen-, Bodsjö- och Stugunområdet) samt förekomster av markanta geokemiska anomalier. Under slutet av 1984 och början av 1985 utfördes de sista prospekteringsuppdragen, som främst bestod av dokumentation och avrapportering. SKBF heter idag SKB (Svensk kärnbränslehantering AB) och har nu enbart hand om kärnavfallshanteringen.

Ett antal prospekteringsrapporter har genom åren producerats av SGU och det statliga bolaget SGAB (Sve-

riges Geologiska AB), som bildades av delar av SGU 1982. På SGUs mineralinformationskontor i Malå finns dessa rapporter med resultat av regionala och lokala undersökningar, samt övrig data från den statliga uranprospekteringen. Rapporterna, som också finns som pdf-dokument, kan hämtas från SGUs hemsida via söktjänsten Prospekteringsrapporter (som hittas under Produkter).

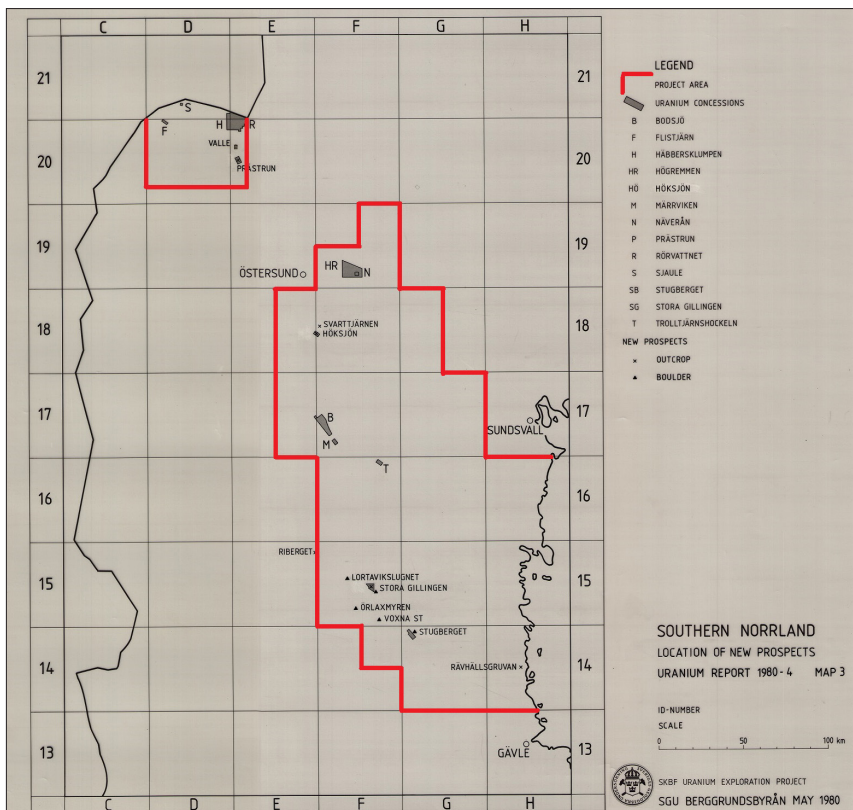
I början av 1990-talet ändrades mineralagstiftningen, vilket bidrog till ett rejält uppsving för prospek-



Flygmätning i linjer med 200 m mellanrum och ca 30 m flyghöjd (60 m höjd efter 1994).

Foto: Anders Dammberg.

Airborne geophysics. Flight lines every 200 m and altitude about 30 m (60 m elevation after 1994).



Figur 19. Uranprospektering på uppdrag av SKBF (flygmätningar och geokemisk provtagning).

Uranium exploration on behalf of SKBF (aerial surveys and geochemical sampling).



Kärnborrning (diamantborrning).
Foto: Berndt Pettersson.
Core drilling (diamond drilling).

teringen i Sverige. I takt med stigande uranpriser 2005–2007, fick uranprospektering i Sverige en ökning. Under 2005 beviljades de första undersökningstillstånden för uran enligt den nya minerallagstiftningen.

Antalet aktiva undersökningstillstånd som gäller uran har sedermera minskat kraftigt, framför allt från och med år 2011. Orsaken är i huvudsak sjunkande metallpriser. All prospektering är högriskverksamhet avseende att få tillbaka investerade pengar och med låga metallpriser minskar också investeringsviljan.

I januari 2016 var antalet undersökningstillstånd för uran och uran som biprodukt totalt 42. Undersökningstillstånden täcker områden med redan kända uranmineraliseringar, som har upptäckts med de tidigare statligt finansierade flygmätningarna och anomaliuppföljningarna. Följande bolag innehade i början av 2016 undersökningstillstånd för uran och uran som biprodukt:

- Continental Precious Minerals, Kanada (12 tillstånd)
- Aura Energy, Australien (6 tillstånd)

- Svenska Skifferoljeaktiebolaget (SSOAB), ägs av URU Metals, Kanada (4 tillstånd)
- Mawson Resources Limited, Kanada (5 tillstånd)
- European Mineral Exploration AB, Sverige (15 tillstånd)

Av dessa avser 21 undersökningstillstånd specifikt uran. Bolaget European Mineral Exploration AB har merparten av dessa (i urberget) på spridda platser i Dalarnas och Gävleborgs län. Mawson AB har sina tillstånd (också i urberget) i Norrbottens och nordvästra Jämtlands län.

Övriga undersökningstillstånd är koncentrerade till alunskifferområden, av vilka ett av Continental Precious Minerals tillstånd anges för bland annat uran i Ovikenområdet i Jämtland. Eftersom alunskiffer är multimetallförekomster, med förhöjda halter av fler grundämnen (bland annat vanadin, molybden, nickel och zink), är oftast andra metaller än uran angivna för dessa undersökningstillstånd. För några befintliga till-



Scintillometer på
alundskiffer.
Foto: Berndt Pettersson.
Scintillometer on alum slate.



Prospektering efter gas på
Östgötaslätten.
Foto: Berndt Pettersson.
*Exploration for gas on Öst-
götaslätten.*

Tillståndprocess vid uranbrytning

Innan gruvdrift kan ske i Sverige måste företaget som vill bryta malm gå genom en tillståndprocess. Tillståndprocessen för att bryta uran innehåller fler steg än för annan brytning, eftersom det enligt svensk lag (1984:3) räknas som kärnteknisk verksamhet. Eftersom ansökan om att bryta uran aldrig har gjorts är ärendet oprövat och ingen hänvisning kan göras till hur ärenden har sett ut förut. Tillståndprocessen ska enligt lag gå till på följande vis, med viss reservation för ordningen på prövningarna:

1. Ett företag ansöker om undersökningstillstånd (ensamrätt att få undersöka) för ett område där malm kan finnas.
 - **Bergmästaren** på Bergsstaten beslutar om undersökningstillståndet beviljas eller avslås.
 - **Strålsäkerhetsmyndigheten** prövar tillståndet och sätter krav på hur avfallet ska hanteras. Särskilt tillstånd krävs enligt strålskyddslagen om uranhalten överskrider 80 g/ton.
 - Undersökningsarbete får inte ske i strid mot skydd för miljö eller andra allmänna intressen. **Länsstyrelsen** m.fl. tar ställning.
 - **Markägarna** får ta ställning till arbetsplanen. Undersökningsarbete får endast ske i enlighet med en sådan.
2. Om företaget bedömer att fyndigheten är ekonomiskt brytvärd skickar de in en ansökan om bearbetningskon-

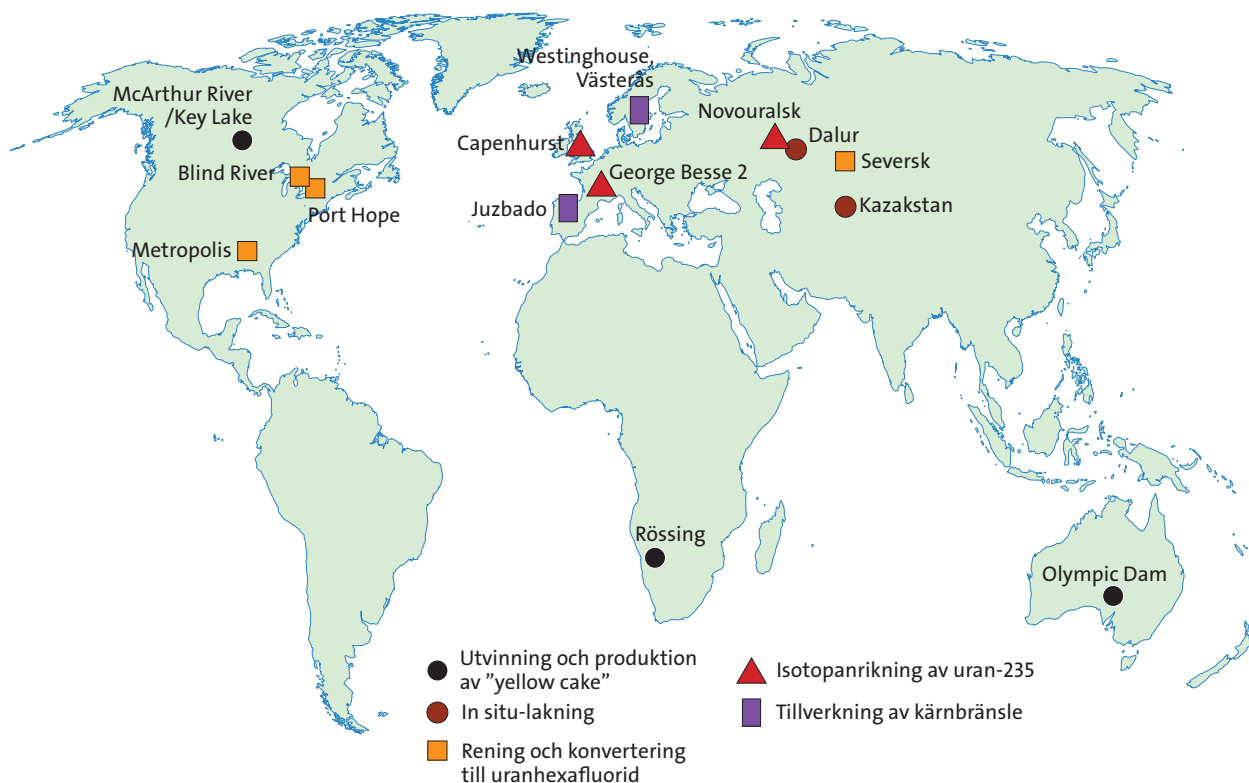
sation, tillsammans med en miljökonsekvensbeskrivning till Bergmästaren på Bergsstaten. En prövning enligt miljöbalkens kapitel 3–4 görs. **Bergmästaren**, i samråd med **Länsstyrelsen**, beslutar. **Regeringen** är beslutande i ärenden som är särskilt betydelsefulla från allmän synpunkt eller vid oenighet mellan Bergsstaten och Länsstyrelsen.

3. Tillståndet prövas enligt miljöbalkens kapitel 9, med tillåtlighetsprövning av **Regeringen** (17 kapitlet, 1 §). Prövningen sker i **Mark- och miljödomstolen**. **Kommunfullmäktiges** tillstyrkande krävs för tillåtlighet (17 kapitlet, 6 §). Kommunen har veto i frågan. Även ett beslut om ekonomisk säkerhet för efterbehandling av området fattas.
4. **Regeringen** prövar tillståndet enligt minerallagen.
5. Eftersom uranbrytning klassas som kärnteknisk verksamhet måste ärendet prövas mot lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet. **Strålsäkerhetsmyndigheten** bereder ärendet som prövas av **Regeringen**. Detta gäller både gruva och anrikningsverk.
6. Tillträde till den mark som behövs måste ges. **Markägaren** svarar. **Bergmästaren** med gode män beslutar om överenskommelse inte nås.
7. Bygglov m.m. enligt plan- och bygglagen prövas. **Kommunen** beslutar.
8. Utvinning av malmen kan påbörjas.

stånd är koncessionsmineralet alunskiffer. Alunskiffer är sedan augusti 2014 utmönstrat från minerallagen, så sedan dess utfärdas inga nya undersökningstillstånd för alunskiffer. Detta eftersom alunskiffer inte längre är ett koncessionsmaterial, utan undersökningstillstånd ges ut för det ämne eller ämnen som företaget avser bryta ur värdbergarten (alunskiffern), exempelvis uran, nickel, molybden, gas eller olja. Undersökningstillstånden för Continental Precious Minerals och Aura Energy Sweden AB är samtliga belägna väster om södra Storsjön i Jämtlands län. Här är alunskiffern särskilt mäktig (ca 200 m) och ytnära, och fler metaller än uran är tänkta att kunna utvinnas i dagbrott och med hjälp av biolakning (*bioheap leaching*). Det är också i detta område som prospekteringsverksamheten har varit särskilt aktiv på senare år. I Närke, där det historiskt har utvunnits olja ur skiffern, prospekterar nu SSOAB med inriktning på metallinnehållet i alunskiffer.

Förutom alunskiffernas förhöjda metallhalter och

oljeinnehåll i delar av landet prospekteras det för närvarande också med avseende på dess innehåll av gas. Att gas förekommer inom vissa områden är känt sedan tidigare och gas påträffas vid borrhning av privata brunnar samt genom naturlig avgång av gas till markytan genom sprickzoner. I januari 2016 hade det svenska bolaget Gripen Gas AB totalt 17 gällande undersökningstillstånd. Tolv ligger i Motala, Vadstena, Mjölby och Linköpings kommuner, Östergötlands län. Restande fem ligger i Borgholms och Mörbylånga kommuner på Öland. Ett nytt svenskt bolag som bildades 2013, Big Rock Exploration AB, har ett gällande undersökningstillstånd för olja och gas i Falköpings kommun, Västergötlands län. Det finns även en gällande bearbetningskoncession (tillstånd att praktiskt utvinna gas) som avser gas i alunskiffer. Denna koncession (kallad Tornby K nr 2) innehavs sedan 2008 av Tekniska verken i Linköping, och ligger i Mjölby och Motala kommuner, Östergötlands län.



Figur 20. Import till svenska kärnkraftsanläggningar. Källa: Vattenfall, Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity, Energimyndigheten, Energianvändning och energitillförsel och OKG.

Imports into the Swedish nuclear power plants. Source: Vattenfall, Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity, Energimyndigheten, Energianvändning och energitillförsel och OKG.

På SGUs och Bergsstatens webbplatser finns kartvisare där alla gällande undersökningstillstånd och bearbetningskoncessioner visas. Den uppdateras med jämna mellanrum. Genom att klicka på de enskilda tillstånden får man information om tillståndets namn, innehavare, koncessionsmineral och giltighetstid.

IMPORT OCH HANDEL

Svenska kärnkraftverks förbrukning av uran uppgår till cirka 1500–2000 ton per år. Kartan (fig. 20) täcker merparten av importen till svenska kärnkraftverk i förädlingskedjan: uranråvaran, anrikning och tillverkning av kärnbränsle. Anrikningstjänsterna till det svenska reaktorbränslet köps på världsmarknaden, i första hand från Ryssland, Frankrike, Storbritannien och Nederländerna. Kärnbränslet köps från Westing-

house i Västerås och GNF i Juzbado, Spanien. Mindre mängder kärnbränsle levereras från Frankrike och Ryssland. Det uran som importeras till Sverige kommer ursprungligen från Kanada, Australien, Ryssland, Namibia och Kazakstan, men har ofta anrikats i annat land. Andelen för respektive produktionsländer (land där uranet anrikas) och ursprungsländer (land där uranet bryts) varierar över tid. Hälften av det uran som bryts i Kazakstan anrikas i Ryssland.

Import av uran sker dels av anrikat uran för framställning av kärnbränsle i Sverige, dels av färdiga kärnbränslelement. Anrikat uran kommer främst från Ryssland, Frankrike, Storbritannien och USA. Värdet på den importen är 5–7 miljarder kronor per år. Importen av färdiga kärnbränsleelement sker nästan helt från Spanien, Ryssland och Tyskland till ett värde av totalt

Tabell 10. Import av anrikat uran, ton.

Imports of enriched uranium, tonne.

Land	2010	2011	2012	2013	2014
Frankrike	126	33	464	13	135
Kazakstan	0	2	0	0	0
Nederländerna	102	31	0	38	57
Ryssland	452	455	400	182	221
Storbritannien och Nordirland	7	20	161	257	69
Tyskland	20	27	77	22	42
USA	36	27	167	27	18
Totalt	742	595	1 268	539	542

Källa: Statistikdatabasen. SCB. Import efter varugrupp enligt KN, handelspartner, tabellinnehåll och år.

Tabell 11a. Import av kärnbränsleelement, ton.

Import of nuclear fuel elements, tonne.

Land	2010	2011	2012	2013	2014
Ryssland			30	30	31
Spanienv	31	56	74	98	99
Storbritannien					
Tyskland	219	46	36	34	34
USA	2			2	7
Totalt	253	102	140	164	170
USA	36	27	167	27	18
Totalt	742	595	1 268	539	542

Källa: Statistikdatabasen. SCB. Import och export efter varugrupp enligt KN, handelspartner, tabellinnehåll och år.

Tabell 11b. Export av kärnbränsleelement.

Import and export of nuclear fuel elements, tonne.

Land	2010	2011	2012	2013	2014
Brasilien					1
Finland	35	32	35	32	33
Frankrike	402	363	357	373	335
Schweiz		38	77	38	30
Spanien		25		33	
Sydafrika		42		48	42
Tyskland	7	41	167	220	106
Ukraina		106	37		35
USA	40	38	41	38	35
Totalt	485	685	713	783	617

Källa: Statistikdatabasen. SCB. Import och export efter varugrupp enligt KN, handelspartner, tabellinnehåll och år.

nästan 1,5 miljarder kronor. Det exporteras också kärnbränsleelement från Sverige, 600–700 ton, till ett värde av 6 miljarder kronor.

Kärnkraftsverken i Forsmark och Ringhals, där Vattenfall är huvudägare, köper in kärnbränslet via systembolaget Vattenfall Nuclear Fuel AB. I dagsläget står i huvudsak fem länder (Kanada, Australien, Ryssland, Namibia och Kazakstan) för uranförsörjningen till Vattenfall. Bränsleförsörjningen baseras på affärsmässiga grunder och kraftverken har därmed ett naturligt incitament att minska risken i sin bränsleportfölj genom att ha spridning på flera leverantörer.

Kärnkraftverket i Oskarshamn, där Eon och Fortum är huvudägare, köper in kärnbränslet genom driftbolaget OKG. För närvarande kommer uranet främst från Kanada, men mindre mängder importeras från Ryssland. Bränsleförsörjningen baseras på geopolitiska grunder. Man eftersträvar inköp från företag med högt kreditbetyg och en diversifierad portfölj med avseende på gruvor, fabriker och i vilka länder dessa finns.

Framtida utveckling och torium

Future development and thorium

DAGENS OCH FRAMTIDENS KÄRNREAKTORER

Den kärnkraft vi har idag började utvecklas efter andra världskriget och har därefter vidareutvecklats, framför allt med avseende på säkerhet. Kärnreaktorer brukar delas in i generationer, baserat på vilka system de används och när de tillverkats.

- Generation 1: De första forskningsreaktorerna på 1950–1960-talet. Dessa reaktorer har tagits ur drift.
- Generation 2: De äldsta kommersiella reaktorerna, till exempel de svenska kärnkraftverken (dessa har dock uppgraderats säkerhetsmässigt).
- Generation 3: Modernare anläggningar med bättre säkerhet. Beteckningen Generation 3+ avser de modernaste reaktorerna idag, med passiva säkerhetssystem och effektivare bränsleanvändning. Den nya reaktor som just nu byggs i Olkiluoto kärnkraftverk i Finland, är av denna typ.
- Generation 4: Framtidens kärnreaktorer. Den fjärde generationens reaktorer är fortfarande i forsknings och utvecklingsstadiet. De planeras utnyttja bränslet upp till 100 gånger effektivare än dagens reaktorer, vilket minskar avfallets långlivade komponenter och därmed lagringstiden. Reactorer som drivs med torium som bränsle omnämns ibland som generation 4-reaktorer.

Kärnkraft finns idag i ett 30-tal länder. I april 2016 fanns sammanlagt 440 kärnreaktorer drift i världen utgörande cirka 12 procent av världens elproduktion. Enligt World Nuclear Association (WNA) är 65 nya kärnreaktorer under uppbyggnad (april 2016). Kina har beslutat om en satsning på kärnkraft, med fokus på fjärde generationens kärnkraftverk, och planerar att till år 2050 ha en elkapacitet som är fem gånger högre än idag.

Majoriteten av dagens kärnkraft använder uran-235 som bränsle för kärnreaktionerna. Kvar efter klyvningsprocessen blir andra radioaktiva ämnen som plutonium, americium och curium. Detta radioaktiva avfall måste lagras någonstans, och kan fortsätta att stråla i uppemot 100 000 år.

Uranbränslet är mycket energirikt, men bara en bråkdel av energin kan utnyttjas idag. Det är här de så kallade fjärde generationens reaktorer kommer in i bilden. Fjärde generationens kärnkraftverk innebär en helt ny typ av reaktorkonstruktion, där man inte bromsar de neutroner som frigörs i klyvningsprocessen, utan låter dem fortsätta klyvningsprocessen i de nya ämnen som bildas. Kärnbränslet ska då kunna utnyttjas 100 gånger mer effektivt genom att det återanvänds gång på gång. Även uttjänt kärnbränsle från dagens reaktorer ska kunna användas. Det avfall som till sist återstår bedöms vara ofarligt efter 1000 års slutförvar.

Genom fjärde generationens reaktorer hoppas forskare kunna utnyttja kvarvarande energi i det uranbränsle som dagens lättvattenreaktorer lämnar som avfall, och samtidigt ta om hand plutonium från bland annat kärnkraftsavfall och avvecklade kärnvapen. Kärnkraften skulle då kunna användas i samma omfattning som idag i 5 000 år utan att något nytt uran skulle behöva brytas.

Men det finns även nackdelar och problem som forskningen ännu inte hittat alla lösningar på. För att kunna använda svårklivet kärnbränsle duger inte vatten som kylmedium, det krävs istället ämnen som natrium, helium eller bly. För att klara höga temperaturer, korrosiva miljöer och nötning krävs nya konstruktionsmaterial som tål dessa tuffa förhållanden. Dagens stålmaterial i pumpar och komponenter är inte tillräckligt hållbara vid de höga temperaturer som är aktuella för blykylda reaktorer, eftersom tekniken bygger på passiv kylning med naturlig cirkulation av flytande bly (smältpunkt 328 °C). Natriumkylning är en industriellt mogen teknik och det har forskats betydligt mer om natriumkylda reaktorer än blykylda. En nackdel är dock att natrium är explosivt om det kommer i kontakt med vatten.

Tankeförbudet om kärnkraft

Efter Tjernobyolyckan införde riksdagen i lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet en paragraf som gällde från 1 februari 1987. Den lød:

”Ingen får utarbeta konstruktionsritningar, beräkna kostnader, beställa utrustning eller vidta andra sådana förberedande åtgärder i syfte att inom landet uppföra en kärnkraftsreaktor.”

Att utveckla för export fungerade dock. Exempelvis utvecklade Asea–ABB (idag Westinghouse) kokvattenreaktorn BWR90+ för detta ändamål långt efter lagens införande. BWR90+ utfor-

mades så att många av de risker för till exempel härdsmläta och explosioner som återfinns hos de äldre generationernas reaktorer kunde minimeras.

År 2006 beslutade riksdagen att paragrafen skulle avvecklas efter en proposition (2005/2006:76) där den dåvarande regeringen konstaterade att det aldrig rått något tankeförbud, men att den ”felaktiga uppfattningen om bestämmelsens innebörd är väl etablerad” och att lagen hade hämmat forskning för bättre kärnsäkerhet i Sverige. Ytterligare ett argument var att lagen uppfattades som tveksam ur ett demokratiskt perspektiv.

Forskningen kring fjärde generationens kärnkraft pågår i samarbete mellan länder som använder kärnkraft. Målet är billigare och säkrare kärnreaktorer, minskad mängd långlivat avfall (dels genom att mindre mängd nytt avfall skapas, dels genom att befintligt avfall återanvänds) och minimerad risk för spridning av material för kärnvapenbruk. Målet är dessutom att reaktorerna ska kunna serieproduceras och därmed bli billigare; frågan är dock hur kostnadseffektiv tekniken blir. För att den nya generationens kärnkraftverk ska kunna tas i bruk kring 2050 krävs mer forskning, och politiska beslut.

Sveriges reaktorer tillhör de äldsta i världen och rangerar redan sin tekniska livslängd, som är omkring 40 år. I september 2015 beslutade Ringhals AB att ta två av fyra reaktorer ur drift i förtid, senast 2020, på grund av att det skulle bli för dyrt att reparera dem och de därmed inte längre skulle vara ekonomiskt lönsamma. En månad senare beslutade Oskarshamnsverket att av samma skäl stänga två av sina tre reaktorer. Den modernisering som då genomfördes av reaktor 2 avbröts och reaktorn kommer inte att återstartas. Stängningen av reaktor 1 ska påbörjas vid halvårsskiftet 2017.

TORIUM

Möjligheten att använda torium som källa för kärnkraft studerades redan 1946 i Oak Ridge National Laboratory i Tennessee, USA. Flera testreaktorer har sedan byggts och det har visats att det är teknisk möjligt att utnyttja torium som kärnbränsle, men tekniken har inte använts kommersiellt. Torium är inte klyvbart på samma sätt som uran-235 eller plutonium, men genom att bestråla

torium-232 med neutroner transmuterar toriumet till uran-233, en uranisotop som inte finns naturligt men som är klyvbar och som kan användas som kärnbränsle och till kärnvapen. Principen är densamma som för reaktorer som laddas med uran-238 och där uran transmuterar till plutonium. Dessa kärnreaktorer som omvandlar icke-klyvbara isotoper, som uran-238 och torium-232, till klyvbara isotoper brukar kallas brid- eller breederreaktorer, eftersom de skapar sitt eget bränsle (från engelskans breed = fööka sig). Försöksreaktorer som använder sig av torium som bränsle finns i Tyskland, Storbritannien, USA, Kanada och Indien.

Grundämnet torium

Torium (Th) är en silvervit metall med atomnummer 90. Smältpunkten är 1750 °C, kokpunkten omkring 4 500 °C och densiteten 11,7 kg per dm³. Rent torium är mjukt och mycket lätt att bearbeta exempelvis genom kallvalsning. Torium upptäcktes i form av sin oxid (ThO₂) av kemisten J. J. Berzelius i ett mineral från Norge år 1828 och fick sitt namn efter guden Tor. Torium fördes tidigare till grundämnena i grupp IV i det periodiska systemet, men anses nu vara det andra grundämnet i aktinidserien. I kemiska föreningar har torium oxidationstalet (+IV). Torium angrips långsamt av vatten och löses bara med svårighet i de flesta syror, undantaget saltsyra. Toriumhydroxid (Th(OH)₄) är svärlösligt, liksom toriumperoxid, och detta kan utnyttjas för att fälla ut torium från andra joner i en vattenlösning.

Naturligt torium finns i mycket små mängder i nästan alla naturliga material (berg, jord, vatten, växter

Tabell 12. Torium- och uranhalter i svenska bergarter.
Thorium and uranium levels in Swedish rocks.

Bergartstyp	Th (g/t)	U (g/t)
Basiska bergarter (400 analyser)	3,1	1,3
Sura bergarter (1500 analyser)	17,1	5,4

Källa: SGU.

och djur). Svenska basiska bergarter (gabbro, basalt, diabas etc.) innehåller ungefär 3 g torium/ton, men sura bergarter (granit, pegmatit, ryolit, dacit etc.) innehåller i medel 17 g torium/ton. I båda fallen är toriumhalten ungefär tre gånger så hög som uranhalten. Mycket höga toriumhalter har uppmätts i bergarter associerade med de alkalina bergarterna på Alnön utanför Sundsvall.

Naturligt förekommande torium innehåller huvudsakligen torium-232, en isotop med halveringstiden 14,05 miljarder år. Vid sönderfallet frigörs bland annat alfapartiklar (fig. 21) och den stabila isotopen i slutet av sönderfallsserien är bly-208. Sönderfallet går bland annat via radon-220.

Toriumoxid har hög smältpunkt, strax över 3 000 °C, och oxiden har använts för framställning av högeldfast material, exempelvis till laboratoriedeglar. Den österrikiske kemisten Auer von Welsbach framställde på 1800-talet en så kallad glödstrumpa som ökade ljusutbytet från en gas- eller fotogenlåga. Den bestod av en fast lösning av ceriumoxid i toriumoxid. Torium används även bland annat som legeringsmetall med magnesium för att förbättra metallens styrka vid högre temperaturer. Som fluoridsalt (ThF_4) används torium som antireflexmaterial inom optiken. I högkvalitativt optiskt glas, till exempel till kameranlinser, gör en tillsats av torium att glaset får högre brytningsindex. Toriums katalytiska egenskaper utnyttjas inom oljeraffinaderier och vid framsällning av svavel- och salpetersyra. Oro för toriums radioaktivitet gör dock att alltför tillämpningar av torium där det är möjligt ersätts med

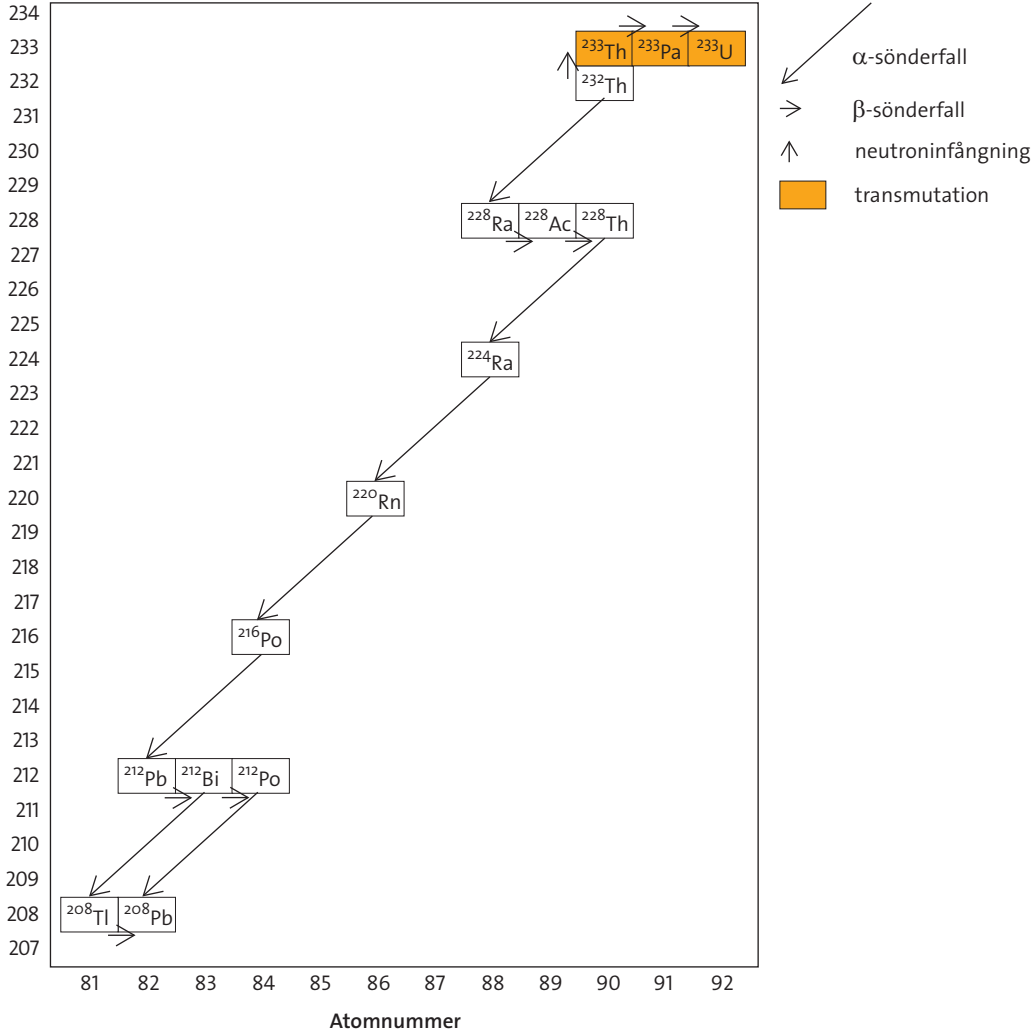
icke-radioaktiva material, exempelvis med sällsynta jordartsmetaller (skandium, yttrium och lantanoiderna), en grupp metaller med bland annat användbara optiska egenskaper.

På grund av sin extrema svårlöslighet utgör torium normalt inte någon kemisk hälsorisk, men genom sin radioaktivitet utgör grundämnet och dess föreningar en radiologisk hälsorisk, framför allt genom att radon bildas i sönderfallskedjan. Den radonisotop (radon-220) som bildas i sönderfallskedjan för torium-232 har dock en halveringstid på bara 55 sekunder, och detta radon hinner ofta inte transporteras någon längre sträcka innan det sönderfaller. I dagsläget ses radon-220 främst som en potentiell risk i underjordsgruvor och andra underjordsmiljöer.

Produktion och tillgångar

På grund av låg efterfrågan är mängden torium som utvinns årligen relativt liten. Huvuddelen av världens toriumproduktion är en biprodukt vid framställning av sällsynta jordartsmetaller från mineralet monazit, som innehåller 7–8 procent torium. Detta medför att det är produktionen av monazit som styr produktionen av torium, inte efterfrågan på torium. I själva verket är efterfrågan på sällsynta jordartsmetaller från monazit idag större än efterfrågan på torium så det sker en överproduktion av torium, något som snabbt kan ändras om toriumreaktorer blir kommersiellt gångbara. År 2013 producerades 6 990 ton monazitkoncentrat, den allra största delen i Indien där monazit utvinns ur tungsandsavlagringar. Uppskattningar av världens toriumtillgångar visar att det finns cirka 6 300 000 ton torium, men någon indelning i olika kategorier med avseende på brytbarhet och kostnadsbild som för uran finns inte för torium. I vårt närområde har Norge och Grönland stora toriumtillgångar på 87 000 respektive 86 000 ton torium. IAEA och OECD-NEA rapporterar att Sverige har tillgångar på 50 000 ton torium, men det är inte känt vad dessa uppskattningar baseras på.

Masstal



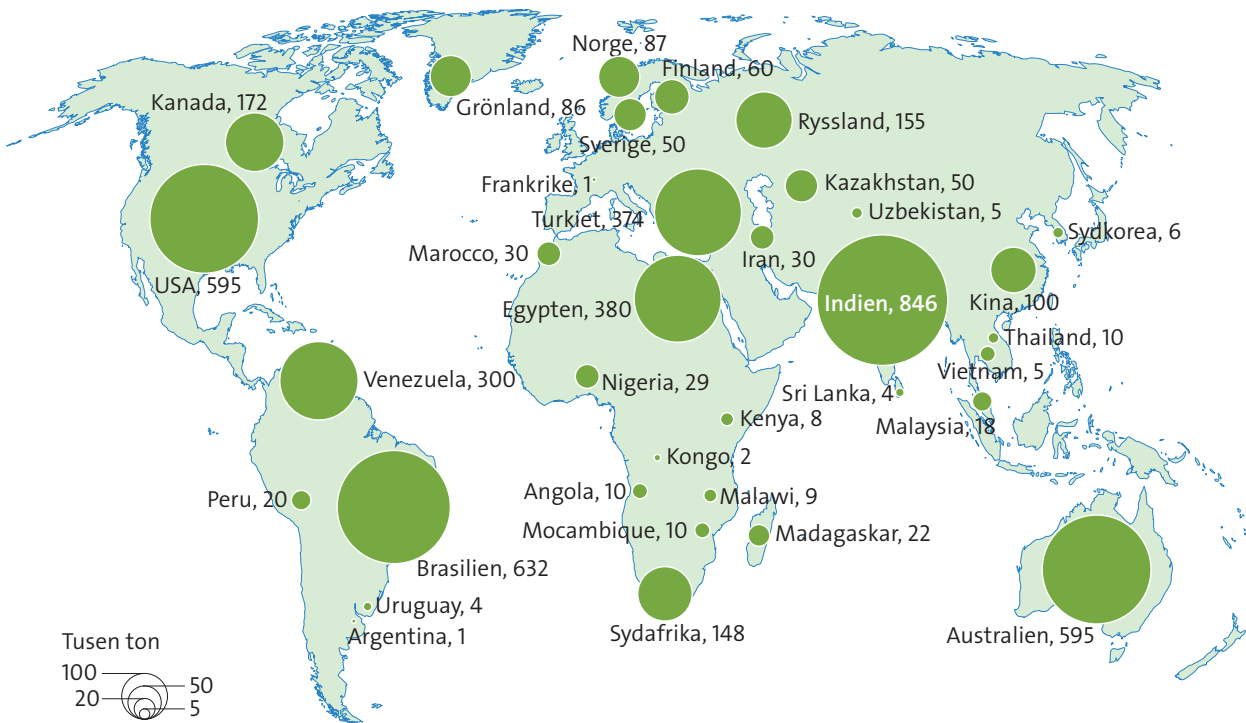
Figur 21. Det naturliga sönderfallet av naturligt förekommande torium (torium-232) till bly (bly-208). Halveringstiden för torium-232 är 14,1 miljarder år. Övriga isotoper i sönderfallsserien har halveringstider på mellan 6,7 år och 0,000000304 sekunder. De orange färgade rutorna visar de isotoper som bildas vid transmutering av torium-232 då det utsätts för bestrålning av neutroner. Efter några mellanstadier bildas uran-233, som är en klyvbar isotop som kan användas i kärnreaktorer eller som kärnvapen.

The natural decay of naturally occurring thorium (thorium-232) to lead (lead-208). The half life of thorium-232 is 14.1 billion years. Other isotopes in the decay series have half-lives between 6.7 years and 0.000000304 seconds. The orange squares show isotopes formed by transmutation of thorium-232 when exposed to neutron radiation. After a few steps uranium-233 is formed, a fissionable isotope that can be used in nuclear reactors or nuclear weapons.

Tabell 13. Tillgångar av torium. Källa: IAEA och OECD-NEA.

Thorium resources. Source: IAEA and OECD-NEA.

Land	Kända toriumtillgångar (ton torium)	Land	Kända toriumtillgångar (ton torium)	Land	Kända toriumtillgångar (ton torium)
Angola	10 000	Kongo	2 500	Sydafrika	148 000
Argentina	1 300	Korea	6 000	Thailand	10 000
Australien	595 000	Madagaskar	22 000	Turkiet	374 000
Brasilien	632 000	Malawi	9 000	Uruguay	3 000
Egypten	380 000	Malaysia	18 000	USA	595 000
Finland	60 000	Marocco	30 000	Venezuela	300 000
Frankrike	1 000	Mocambique	10 000	Vietnam	5 000
Grönland	86 000	Nigeria	29 000	Oberoende staters samväld (utom Ryssland)	1 500 000
Indien	846 500	Norge	87 000	Total	6 299 300
Iran	30 000	Peru	20 000		
Kanada	172 000	Ryssland	155 000		
Kenya	8 000	Sri Lanka	4 000		
Kina	100 000	Sverige	50 000		



Figur 22. Tillgångar av torium i världen. Källa: IAEA och OECD-NEA 2014.

Thorium resources in the world. Source: IAEA and OECD-NEA 2014.

Hälso- och miljöproblematik

Health and environmental issues

MILJÖ- OCH HÄLSOPÅVERKAN VID URANBRYTNING

Liksom all gruvbrytning kan brytning av uran påverka vår miljö och hälsa på flera sätt. Påverkan kan delas in i fem huvudområden: gruvbrytning, gruvavfall, arbetsmiljö, allmänhet samt vattenkvalitet.

Dessa kategorier har olika betydelse vid olika sorters brytning av uran. För att få en översikt kan tabell 14 tas till hjälp, där ställs den relativa betydelsen av kategorierna mot varandra. Tabellen har tagits fram av OECD-NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency, 2014), där Sverige är medlem sedan 1958. Tabellen kan tas som extra hjälp vid miljökonsekvensbeskrivningar i samband med start av urangruvor. Gruvtyperna in situ-lakning (ISL), dagbrott och underjordsgruvor (UG) utgör majoriteten av produktionen av uran.

Gruvbrytning

Gruvbrytning kan delas in i tre huvudtyper – dagbrott, underjordsgruva och in situ-lakning. De geologiska förutsättningarna för in situ-lakning finns inte i Sverige, och på grund av de stora miljöriskerna för grund- och ytvatten skulle denna utvinningsteknik troligen inte komma till stånd i Sverige ändå.

En av de mest uppenbara miljöeffekterna av uran-

brytning är landskapspåverkan. Inom gruvbrytning finns ett samband mellan halten av den ekonomiskt intressanta metallen i berggrunden och landskapspåverkan. Lägre halter leder till att större volymer berg måste brytas, vilket skapar större tomma utrymmen och större mängder material som inte innehåller den eftersökta metallen. Dagbrott ger en större landskapspåverkan än underjordsgruvor.

Uranbrytning skiljer sig inte från annan gruvbrytning i denna bemärkelse. Idag finns stora kunskaper om efterbehandling och företag planerar och genomför den successivt under en gruvas livstid så att effekterna kan minimeras.

Gruvavfall

Gruvavfall omfattar både gråberg från brytningsprocessen och anrikningssand (lakrester, *tailings*) från anrikningsprocessen.

Gråberg är det berg som bryts för att göra malmen åtkomlig. Mängden, sammansättningen och hur gråberget hanteras är viktiga faktorer för att bestämma miljökonsekvensen av uranbrytningen. Gråberg med en låg halt av skadliga ämnen, rent gråberg, kan i vissa fall användas som ballast eller som fyllning av gruvområdet vid slutet av gruvdriften. Om halten av farliga ämnen, till exempel metaller som bly och uran, är hög kan dock

Tabell 14. Vid uranbrytning finns ett antal miljöaspekter att ta hänsyn till. Beroende på fas och typ av uranbrytning varierar deras betydelse. Tabellen redogör för den relativa vikten av dessa aspekter vid olika förutsättningar (OECD-NEA 2014).

There are several environmental aspects when mining Uranium. Depending on phase and type, their relative importance varies. The table shows the relative importance of these aspects in different conditions.

Miljöaspekt	Under produktion			Under efterbehandling		
	ISL	Dagbrott	UG	ISL	Dagbrott	UG
Arbetsmiljö (strålning)	Låg	Medel	Kritisk	Väldigt låg	Låg	Medel
Allmänhet (strålning)	Låg	Medel	Låg	Väldigt låg	Kritisk	Hög
Ytvatten	Låg	Hög	Låg	Låg	Hög	Medel
Grundvatten	Kritisk	Medel	Medel	Kritisk	Medel	Medel
Gråberg	Väldigt låg	Hög	Medel	Väldigt låg	Kritisk	Medel
Lakrester/anrikningssand	Ej tillämplig	Hög	Hög	Ej tillämplig	Hög	Hög

åtgärder behövas för att skydda miljön. Hanteringen av gråberg vid uranbrytning skiljer sig inte särskilt mycket från annan gruvdrift, dock finns risken att gråberget innehåller en högre halt av radioaktiva ämnen.

Gråberg med en högre halt farliga ämnen kan vara problematiskt. Vid stora mängder gråberg, exempelvis vid brytning i dagbrott, kan separering av rent och problematiskt gråberg göras. Detta har gjorts med framgång i McClean Lake, Kanada, där man bryter uran i dagbrott (OECD-NEA 2014). Separeringen görs i samband med brytningen genom skanning av borrhål och sprängzoner, samt extra skanningar nära problematiskt berg. Rent berg läggs på markytan, men skannas varje dag för att säkerställa att inget problematiskt berg lagts fel. Vid McClean Lake lyckades man med dessa metoder separera 15 procent av den totala brutna mängden gråberg som potentiellt problematiskt. Detta material placerades i utgrävda deponier för att hindra oxidation och spridning av farliga ämnen till naturen via luft och ytvatten. Rent gråberg kan användas för övertäckning av det problematiska materialet.

W Anrikningssand (lakrester) är det som blir kvar av malmen efter att den behandlats på olika sätt för att utvinna metallen. För att utvinna uran ur malm används ofta lakning med syror eller alkalilösningar, beroende på sammansättningen i malmen. Det som blir kvar (anrikningssanden) innehåller dock alltid en viss del uran (allt kan inte utvinnas), samt andra potentiellt skadliga ämnen. In situ-lakning innebär att man lakar ut uranet direkt från berggrunden, vilket inte lämnar efter sig anrikningssand på samma sätt som vid traditionell brytning i dagbrott och underjordsgruvor. Däremot kan det innebära risker för spridning av både syror och metaller till grundvatten, om de geologiska förhållandena inte lämpar sig för sådan hantering.

Vid all hantering av anrikningssand i samband med gruvdrift vill man hindra miljöfarliga ämnen (exempelvis bly, kadmium, arsenik och uran) från att spridas i naturen. Där skiljer sig inte hanteringen av uranmalm från hanteringen av exempelvis vissa sulfidmalmer. Uranmalm innehåller dock även ökade halter av uranets sönderfallsprodukter (exempelvis torium, radium och polonium), och därmed kan risken öka för spridning av radioaktiva ämnen. Det är uran, radium och deras döttrar (sönderfallsprodukter) som står för majoriteten av strålningen i gruvavfallet. Hur mycket strålning som

finns i avfallet beror främst på halten av malmen, det vill säga hur mycket radioaktiva ämnen som finns per mängdenhet malm.

Vid lakningen separeras det mesta av uranet, medan andra radioaktiva ämnen som radium och torium är kvar i anrikningssanden. Generellt finns 85 procent av radioaktiviteten i malmen kvar i anrikningssanden, detta varierar dock med malmens totala halt av radioaktiva ämnen. Av den radioaktivitet som finns kvar i avfallet försvinner cirka tolv procent de första månaderna genom sönderfall, till en nivå som är stabil i tiotusentals år (OECD-NEA 2014). Radioaktivitet i olika material kopplade till uran finns i tabell 15.

Anrikningssand kan placeras på olika vis: i högar, diken, utgrävda dagbrott, bergtrum eller i specifika anläggningar gjorda för detta avfall. I de flesta fall används specifika anläggningar, så kallade sandmagasin, för avfallslagring eftersom de enkelt kan konstrueras under produktionstiden och kan ge bra skydd för miljön. Sandmagasinen täcks med vatten för att hindra vittring och damning, men också för att hindra radon från att spridas. Avrinnande vatten kontrolleras och renas kontinuerligt. Dagbrott kan användas för deponering av gruvavfall på ett mycket bra sätt, men hindrar då vidare exploatering av platsen. I samband med efterbehandling täcks gruvavfallet av tillräckliga mängder lera och jord för att hålla gammastrålning och utsläpp av radon och radondöttrar på nivåer nära naturliga marknivåer.

Om avfallet innehåller sulfidmineral, såsom pyrit, finns risk för ökad spridning av miljöfarliga ämnen i vatten. Sulfidmineralen, som innehåller mycket svavel, kan oxideras i kontakt med luft och bilda sulfat. Sulfatet bildar i sin tur svavelsyra i kontakt med vatten, vilket sänker pH-värdet. Många metaller, bland annat uran, har generellt en högre löslighet vid lägre pH (Závodská 2012). Detta kan ge upphov till att sura, metallhaltiga dräneringsvatten (*Acid Mine Drainage*, AMD) bildas. Det är därför viktigt att gruvavfallet kontrolleras innan det läggs på slutförvar. I vissa fall kan neutralisering av avfallet vara nödvändigt. Detta kan till exempel göras genom inlagring av kalk i avfallet, vilket höjer pH-värdet.

I en studie av Chambers m.fl. (2001) undersöktes hur radonutsläpp från uranavfallsanläggningar påverkade allmänheten. Parametrar som vägdes in i bedömningen var bland annat avfallsmängd, malmgrad, produktions-

takt, avvecklingsplaner och befolkningstäthet. De data som samlades var representativa för omkring två tredjedelar av världens uranproduktion 1997, varav en stor del fortfarande är aktiv idag. Studien drog slutsatsen att radonutsläpp relaterade till gruvavfall är extremt små i både relativ (jämfört med bakgrunds nivåer) och absolut (doser och risker) nivå. Cancerrisken för allmänheten relaterad till radon från gruvavfall från urangruvor bedömdes som obetydlig.

Arbetsmiljö

Hälsorisker från strålning är ett av de områden som är mest studerade inom medicinen. Organisationer som IAEA (International Atomic Energy Agency) och International Commission on Radiological Protection (ICRP) ställer höga krav på arbete med förhöjd risk för strålningsexponering. Stora framgångar har gjorts sedan uranbrytning tog fart för nästan 100 år sedan. Sedan 1940-talet har gruvarbetare exponering för radon och radondöttrar minskat med omkring 1000 gånger (AREVA 2011, CNSC 2011, OECD-NEA 2014).

Personal inom gruvverksamheten eller anrikningslinjen är de som kommer i närmast kontakt med både malmen och gruvavfallet, som i sin tur innehåller olika radioaktiva isotoper. Hälsopåverkan hos arbetare kan delas upp i exponering av luftburna partiklar och direkt gammastrålning från olika källor.

Inandning av damm från brytning kan innebära att luftburna partiklar tar sig in i lungorna och ger upphov till intern exponering av joniserande strålning, men även att kemiskt giftiga ämnen tar sig in i kroppen. Från lungorna kan partiklarna sedan röra sig vidare i kroppen eller komma ut ur kroppen, beroende på bland annat partikelns eller ämnets storlek och löslighet. Vilket ämne som andats in, mängden partiklar samt hur länge och var de stannar i kroppen inbestämmer graden av exponering för individen. Luftburna partiklar innehållande radioaktiva ämnen är dock inte unikt för uranbrytning. Det kan även förekomma vid annan brytning eftersom jord och berggrund ofta innehåller små mängder uran, radium, torium och andra radioaktiva ämnen. Däremot finns en större risk att antalet radioaktiva ämnen är högre i en uranmalm. För att minska damm från att spridas kan exempelvis vatten eller speciella medel sprutas på bergväggar och vägar.

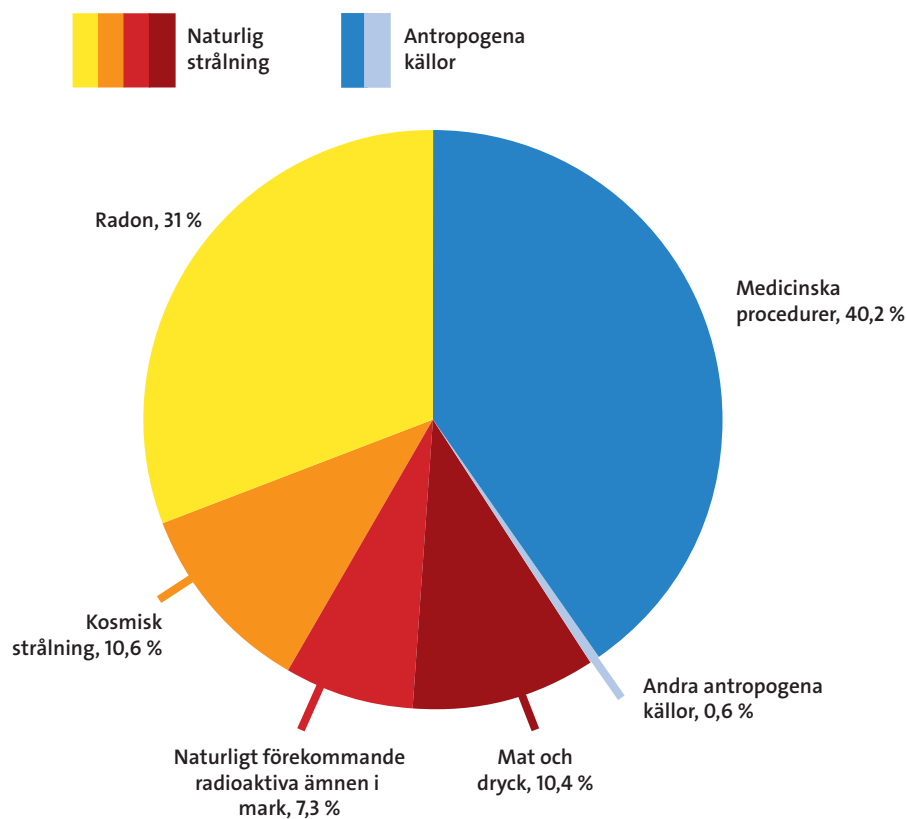
Radon bildas naturligt i sönderfallskedjan av uran

och förekommer alltid där det finns uran. Radon är en ädelgas som kan ta sig in i kroppen via luft eller vatten. Det är sönderfallsprodukterna av radon (radondöttrar) som är särskilt farliga för både djur och människor. Skyddsutrustning, övervakning, kontroll och ventiler inom produktionen är viktigt för att undvika skadlig exponering. I vanliga fall är exponeringen av radon och radondöttrar för arbetare i samband med uranbrytning lika låg som exponeringen för naturligt radon i atmosfären. Vid brytning av höghaltig malm kan dock större exponering ske.

Generellt innebär underjordsgruvor högre risk för strålning än andra typer av gruvor, på grund av ventilationssvårigheter i trånga utrymmen och på stora djup. Underjordsgruvan Olympic Dam i Australien, en av världens största urangruvor, jobbar med att sänka exponeringen av strålning i gruvan. För att göra detta används instrument och centrala datorprogram för att mäta radon och radondöttrar i de aktiva gruvgångarna. Genom mätare på varje gruvarbetare kan ett strålningsvärde på varje person räknas ut och sedan redovisas varje kvartal. Gränsvärdet från ICRP (1991) är 100 mSv för en femårsperiod. I Olympic Dam uppnådde man för perioden 2005–2010 ett maxvärde på 32,4 mSv för en individ, medan medelvärdet var så lågt som 14,8 mSv; det var en sänkning från 16,6 mSv perioden 2003–2008 (OECD-NEA 2014).

Allmänhet

Damning från urangruvverksamhet kan medföra att både radondöttrar och mer långlivade alfastrålade partiklar tar sig in i luftvägar och orsakar strålning. För modern gruvdrift har flera studier visat att dosen är mycket låg, endast en fraktion av gränsvärdet för exponering för allmänhet, som ligger på 1 mSv/år (Nuclear Regulatory Commission 2009). I en studie från Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC 2013) visas att exponeringen av strålning från ”andra konstgjorda faktorer” (uranbrytning och kärnkraftverk inkluderade) uppgår till omkring 0,6 procent av den totala strålningen för en genomsnittlig vuxen person i Kanada, ett land som är en av de största uranproducenterna. I en studie (Tripathi m.fl. 2010 & 2011) kring uranbrytning i Jaduguda, Indien, kom man fram till att befolkningen fick en årlig total dos på 2,5 mSv (inkluderat naturlig strålning). Det är omkring 0,1 mSv mer än medelvärdet



Figur 23. Exponering av strålning för en genomsnittlig vuxen i Kanada. Källa: Canadian Nuclear Safety Commission.

Radiation exposure for the average adult in Canada.

i världen (UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Skillnaden kan bero på de uranmineraliseringar som förekommer naturligt i området, på gruvdriften eller andra faktorer. Små skillnader kan alltså förekomma vid modern gruvdrift, men räknas ofta som försumbara.

Vid historisk gruvdrift i bland annat Kirgizistan har betydligt högre strålvärden påträffats hos människor, upp till 10–30 mSv per år. De höga siffrorna kan bero på att mat odlas på förorenad mark (Vandenhove m.fl. 2006).

Vattenkvalitet

Olika typer av brytning ger upphov till olika grad av påverkan på både grundvatten och ytvatten. Ytvattens kvalitet kan försämrats om damm från brytningen sprids, av lakvatten från gråberg och malmupplag, samt från dammar med anrikningssand. Grundvatten påverkas på samma sätt av det ytvatten som tränger ner.

När utvinningsmetoden in situ-lakning används ställs höga krav på operatören eftersom risken tillkommer att miljöfarliga ämnen når grundvattnet när syresatta och sura eller basiska lösningar pumpas ned i berget. Om vattnets väg genom berget inte kan kontrolleras av det system av pumpar och brunnar som installeras kan förorenat vatten spridas till grundvattnet utanför malmen, eventuellt till andra brunnar och även till ytvatten. In situ-lakning, som är vanligt vid uranbrytning, kan innebära en avsevärt större inverkan på grundvattnet än dagbrott eller underjordsgruvor.

Ett problem som kan uppstå under brytning, men särskilt efter brytning, är att surt, metallhaltigt dräneringsvatten (*Acid Mine Drainage*, AMD) kan spridas i naturen. Eftersom uran är både radiotoxiskt och kemiskt toxiskt kan ämnet komma att skada både flora och fauna. Uran har visats ha liknande kemiskt toxiska effekter som den giftiga metallen bly på både människor och djur

(läs mer i avsnittet om giftpåverkan). Uran kan skada kroppens vävnader och DNA och på så sätt orsaka en högre risk för cancer. Hos djur har uran visat bland annat reproduktiva defekter (Závodská m.fl. 2008).

För att skydda både ytvatten och grundvatten är det viktigt att en omfattande miljökonsekvensbeskrivning tas fram innan en urangruva, eller annan gruva, går i drift. Brytning av höghaltig uranmalm kan innebära att risk finns att fler radioaktiva ämnen sprids, men detta kan kontrolleras med moderna tekniker.

Miljö- och hälsopåverkan vid brytning av uran i olika delar av världen

Brytning av uran sker idag i ett 20-tal länder. Skillnaderna mellan gruvorna är allt från malmtyp (exempelvis en låghaltig eller höghaltig malm), gruvtyp (som in situ-lakning eller dagbrott), tillståndsprcess och tillsyns-verksamhet i landet eller klimatet kring gruvan. Dessa olika förutsättningar har stor inverkan på hur gruvan kommer påverka miljön. Nedan följer tre moderna exempel ifrån olika världsdelar och ett historiskt exempel ifrån Sverige.

Talvivaara, Finland

I Talvivaaragruvan bryts sedan 2009 svartskiffer för utvinning av nickel och zink. Metallhalterna i malmen är alltför låga för att kunna motivera vanliga anrikningsprocesser med krossning, malning och anrikning. Istället läggs den grovt krossade malmen i högar (heaps), högarna sprinklas med vatten och sedan sköter naturligt förekommande bakterier om oxidationen av sulfidmineral till svavelsyra. Svavelsyran lakar ut metaller från malmen på samma vis som i varphögar med sulfidmineral, och från den metallförande svavelsyralösningen utvinns nickel och zink. Metoden kallas på engelska för *bioheap leaching*. Processen lakar även ut uran från malmen och trots att uranhalten i malmen är låg, 15–20 g/ton, så gör de stora volymerna malm att stora mängder av uran frigörs och utvinningen blir lönsam. Som jämförelse innehåller svenska bergarter vanligtvis mindre än 10 g uran/ton och alunskifferna 100–300 g/ton.

Talvivaaragruvan har under flera år orsakat stora miljöproblem, främst på grund av läckande lakvatten från sandmagasin. Orsaken tros bland annat vara att fel avfall lags i fel sandmagasin, men även dålig konstruktion och kontroll av sandmagasinen. Detta har gjort att

metallhaltigt lakvatten har runnit ut i närliggande vattendrag och sjöar, vilket höjt metallhalterna till farliga nivåer för levande organismer. Talvivaaragruvan har nu gått i konkurs, dömts för miljöbrott och ska läggas ned.

Rössing, Namibia

Urangruvan Rössing (ägs till största delen av gruvbolaget Rio Tinto) har i år varit i drift i fyrtio år och är en av Afrikas största gruvor. Fram till slutet av 2015 hade Rössing producerat 128 650 ton uranoxid vilket motsvarar cirka 110 000 ton uran. Malmen i Rössing är låghaltig, omkring 300 g/ton. Gruvan drivs som ett dagbrott där stora mängder berg måste tas bort för att uranmalmen ska kunna brytas, något som genererar stora mängder gruvavfall i form av gråberg.

Klimatet är väldigt torrt kring Rössing, vilket medför en del problem. Gruvavfall som inte hålls täckt av vatten eller jord löper stor risk att spridas med vind. Den franska icke-statliga organisationen Commission for Independent Research and Information about Radiation (CRIIRAD) har hittat höga halter av radioaktiva ämnen i övre jordlager kring gruvan. Även nedströms i Khan river, som går förbi Rössing, har höga halter av främst uran uppmätts, upp till 2 155 gånger högre än uppströms gruvan. De rapporterade nivåerna är långt över de gränsvärden för dricksvatten som är fastställda av World Health Organization (WHO). Rio Tintos egna analyser kring gruvan har däremot visat på godkända nivåer. Viktigt att notera är att SGU inte har hittat någon oberoende statlig namibisk myndighet eller internationell organisation som tagit prover eller skrivit en rapport över miljöläget i Rössinggruvan, vilket skapar en stor lucka i miljöinformationen. Rössing har genom åren drabbats av många olyckor, bland annat dammbrott, syratankar som brustit och arbetsolyckor.

Arbetsmiljön i Rössing har länge varit kritiserad. Bland annat har Earthlife Namibia, Labour Resource and Research Institute (LaRRI) och The Guardian skrivit om arbetsförhållandena som har rätt, eller råder, vid Rössing. Intervjuer från The Guardian visar att flera som arbetat länge vid gruvan får cancer eller oidentifierade sjukdomar, troligen på grund av låg kvalitet på arbetsmiljön och sjukvården i området, där många lever i fattigdom. En anledning till sjukdomarna har varit att gruvarbetare arbetat i samma kläder som de gått hem i, och på så sätt tagit med sig damm till hemmiljön. Detta

har senare åtgärdats av Rio Tinto genom obligatoriska klädesbyten på arbetsplatsen. Chamber of Mines Namibia har också i samverkan med gruvorna (Rössing och Langer Heinrich) och gruvfacket i området byggt en vårdcentral där screening utförs av de anställda. Damm, vilket vanligtvis åtgärdas genom att spruta vatten på vägar och bergväggar, är svårhanterligt i det torra, varma klimatet.

Uranproduktionen i Namibia förväntas bli tre gånger så stor 2017 jämfört med 2015, bland annat genom att nya gruvor öppnas och befintliga expanderar, enligt analyser av African Research Bulletin.

Uranbrytning i Kanada

Kanada är en av världens största producenter av uran och står för omkring 16 procent av världsproduktionen, varav 13 från en enda gruva, McArthur River. Kanadas fyra urangruvor ligger i Athabasca Basin i norra delen av regionen Saskatchewan, men tidigare gruvbrytning av uran har skett på andra platser. Kanada har ett av världens modernaste regelverk för uranbrytning, som förvaltas av den statliga myndigheten CNSC. CNSC genomför mätningar kring producerande och nedlagda gruvor och fabriker i avseende att skydda arbetsmiljön, allmänheten och naturen. Rapporter från CNSC (2012) visar att urangruvor i Kanada inte har någon mätbar påverkan på radonnivåer och att nivåerna av uran, radium-226, bly-210 och polonium-210 i fiskar ofta är under detektionsgränsen. När de kan mätas visar de resultat som inte skiljer sig från referensmät punkter som ligger långt ifrån gruvdrift. Medelvärdet på strålningsdoser för arbetare inom urangruvor och fabriker var så lågt som 1 mSv 2007, långt under det statliga gränsvärdet på 50 mSv/år som gäller för arbetare inom gruvindustrin. Surt lakvatten (*Acid Mine Drainage*, AMD) är hårt övervakat och lakrester och anrikningssand placeras primärt i dagbrott som förstärks för att hålla kvar skadliga ämnen säkert. Damning från gruvverksamheten kan hållas nere med hjälp av vatten och medel som sprutas på bland annat bergväggar och vägar.

Innan en gruva kan startas måste projektet gå genom en omfattande miljöanalys, med likheter med hur processen går till i Sverige. En informationsbank om hur processen går till, läget i Kanadas urangruvor, samt information om nedlagda gruvor och fabriker finns att hämta via CNSCs hemsida (nuclearsafety.gc.ca).

Athabasca Working Group (AWG) bildades 1993 och innefattar majoriteten av de samhällen som finns kring gruvorna i norra Saskatchewan samt de två största uranproducenterna i världen, Cameco och AREVA, som äger urangruvorna i Kanada. AWG jobbar bland annat med miljöfrågor genom ett program som startades år 2000 för att öka den oberoende miljömätningssatsningen. Genom programmet kan allmänheten få utbildning och utrustning för att utföra miljömätningar på bland annat luft, vatten, fiskar, djur och sjösediment. Resultat från programmet har visat att halterna av miljöfarliga ämnen ligger långt under de statliga gränsvärdena.

Ranstad, Sverige

Under 1960-talet utvanns omkring 200 ton uran i Ranstad i Skövde kommun. Uranet kom från en stor mineralisering av alunsulfider med låga halter av uran. Omkring två miljoner ton alunsulfider bröts i Ranstad. Under slutet av 1980-talet påbörjades en slutlig efterbehandling av Ranstadsområdet med avseende på både industriområdet, dagbrottet och lakresthögen. Lakresthögen uppmäter omkring 25 hektar. Dagbrottet, en 100 m bred, två kilometer lång sänka med ett djup på 10–15 m, omvandlades till en sjö vid namn Tranebärssjön.

Från 1990-talet till idag har ett omfattande mättningsprogram pågått samtidigt med efterbehandlingen. Programmen är ledda av SVAFO, ett icke-vinstdrivande aktiebolag ägt av kraftbolagen Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB och OKG AB, och under tillsyn av Strålsäkerhetsmyndigheten. Finansieringen sker i enlighet med Studsvikslagen (1988:1597), som fastställdes i slutet av 1980-talet. Studsvikslagen gör det obligatoriskt för kärnkraftsbolag som drivs i Sverige att betala in medel till Studsviksfonden för att hantera äldre kärnteknisk verksamhet. 0,3 öre per producerad kWh kärnkraftsel ska bolagen betala av till fonden. I arbetet ingår att efterbehandla historiskt avfall, som i Ranstad, och att avveckla och riva äldre anläggningar, inklusive forskningsreaktorerna i Studsvik. Studsvikslagen var planerad att upphöra 2012, men förlängdes på begäran av regeringen till 2017. Strålsäkerhetsmyndigheten har under senare år begärt att lagen förlängs tills vidare, och att ett en ökning till 0,4 öre/kWh läggs till för att klara av kostnaden av verksamheterna.

Efterbehandlingen i Ranstad har pågått länge

och situationen bedöms som stabil med endast vissa förhöjda föroreningar till området. Risken för människor och djur bedöms som låg. I en miljörapport från 2005 från konsultfirman WSP bedöms det att lakrestområdet bidrar i små, men signifikanta, tillskott av framför allt uran och nickel till sjöar och vattendrag i området. Sulfat och metaller så som uran, nickel, kobolt, krom, molybden, koppar och zink har rapporterats vara högre i vattendrag ut från området än in. Jämfört med referensvärden för södra Sverige är halterna höga. Halter av metaller i grundvatten överskrider inte dricksvattenkriterierna, men vissa ytvatten har högre värden än riktlinjerna. Riktvärdet för uranhalt i dricksvatten för djur och sjöfågel överskrids i Tranebärssjön, men inte på andra platser, och bedöms inte som en stor risk så länge vattnet inte är den enda dricksvattenkällan för djuren. Vattnet från Tranebärssjön, men även nedströms från ån Pösan och Hornborgaån, bör inte användas regelbundet inom jordbruk eftersom detta skulle kunna utgöra en risk för grödor på lång sikt. Fisk som föda bedöms vara av låg risk vid normalt intag, men större månadsintag av fisk från den anlagda Blackesjön, som via Marbäcken får in farliga ämnen från lakrestdeponin, kan innebära risk för högt intag av arsenik.

Vittring av sulfidmineral i Tranebärssjön förväntas avta med tiden, vilket skulle innebära en lägre halt sulfater och sänkt mobilitet hos metaller. Om grundvattennivån sjunker kan dock sulfidmineral syresättas och bilda sulfat i ökad takt. Detta i sig skulle öka mobiliteten i metaller och möjligen öka föroreningar till vattendrag.

Länsstyrelsen Västra Götalands län vill göra området kring lakresthögen till ett miljöriskområde för att skydda marken från framtida ingrepp så att täckmaterial förblir intakt och ökad oxidering av sulfidmineral undviks. Byggnationer skulle förbjudas i området och skogsbruk då skulle ske med större försiktighet.

MILJÖ- OCH HÄLSOPROBLEM VID TILLVERKNING AV KÄRNBRÄNSLE

Produkten som tas fram vid uranutvinning är vanligtvis så kallad *yellowcake*. Yellowcake är ett mineralkoncentrat i form av ett flertal uranoxider. Detta måste förädlas till en viss procent uran-235 (normalt kring 3–4 procent) för att kunna användas som kärnbränsle. I detta steg erhålls restprodukten utarmat uran (*depleted uranium*, DU). Ammunition innehållande DU som

kolliderar med andra material utsöndrar oxider som kan andas in och skapa inre skada. DU har lägre strålning än naturligt uran och på grund av dess långa halveringstid är alfastrålningen relativt låg. Soldater och människor i krigszoner är en riskgrupp för DU.

Eftersom tillverkningen av kärnbränsle är en mindre industri än själva brytningen kan den hållas mer isolerad, vilket skapar bättre säkerhet för arbetare och allmänhet. Fabriker avger radioaktivitet under naturliga mängder och deras påverkan på omgivningen skiljer sig inte från annan industri. Exponering av låga doser av joniserande strålning under lång tid har visat olika resultat och är ett område där mer forskning behövs. Resultat från långtidsstudier har dock visat ökad grad av lungcancer hos arbetare inom urantillverkning. Idag är säkrare metoder, med andningsskydd och bättre hantering av till exempel arbetskläder, viktigt för att minska riskerna i såväl gruv- som i kärnbränsleproduktionen.

MILJÖ- OCH HÄLSOPÅVERKAN VID BRYTNING OCH ANVÄNDNING AV TORIUM

Det har länge varit känt att torium skulle kunna ha ett kommersiellt användningsområde inom kärnkraft. Fördelarna som förespråkas jämfört med att använda uran har mycket att göra med vår miljö och därmed även för vår hälsa. Toriumreaktorer är fortfarande i en forskningsfas, och det är osäkert om torium kommer vara framtidens bränsle eller inte.

Det finns omkring 3–4 gånger mer torium än uran tillgängligt i jordskorpan (Dekusar m.fl. 2012, Baker Schaffer 2013, NNL 2012). Möjligheten att använda torium skulle innebära att vi enklare kan bryta metallen i vår närhet och minska importen, både ur lokal och global synvinkel. Stora mineraliseringar finns bland annat i Indien, USA och Norge. Det kan även finnas potential att ta torium från befintliga gruvor, exempelvis i Australien, där metallen mest ses som ett problem på grund av dess miljöfarliga aspekter. Ett exempel är gruvor där mineralet monazit bryts för sällsynta jordartsmetaller. Torium förekommer då ofta tillsammans med fosfat.

Vid brytning av torium kan spridning ske till människor och djur genom damm och vatten. Då torium inte har något kommersiellt värde i dagsläget bryts det inte aktivt, det är därför svårt att bedöma miljö- och hälsoaspekter av toriumbrytning. Det kan bedömas ungefär likvärdigt med uran, då det har liknande strålningseffek-

ter (läs mer ovan samt i avsnittet om biologiska effekter).

Torium sägs ofta kunna sänka behovet av långtidslagring av kärnavfall. Kärnavfall från en reaktor driven av torium (exempelvis av molten salt-typ) förväntas skapa färre transuraner (radioaktiva grundämnen över atomnummer 92), men fortfarande innehålla vissa radionuklider med långa halveringstider, exempelvis protaktinium (Pa-231) (Thorium Report Committee, Norwegian Ministry of Petroleum and Energy 2008). Toriums bränslekedja avger också uran-232, vilket har många sönderfallsprodukter med hög gammastrålning. En stor mängd av avfallet sönderfaller till stabila nivåer på några få hundra år, men det finns fortfarande en viss mängd som innehåller långlivade radionuklider.

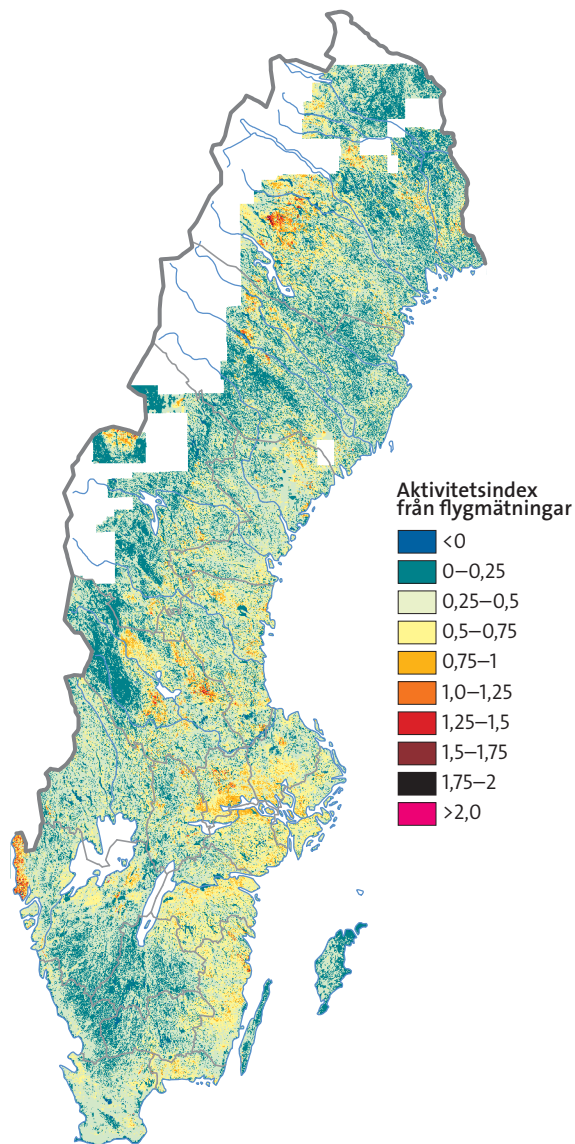
Vid transmutering av torium-232 bildas uran-233 vilket kan användas till kärnvapen. Det har visats av IAEA att åtta kilogram uran-233 behövs för att skapa en atombomb. Det har dock även visats att det uran-233 som bildas i transmuteringen är förorenat av uran-232, och de två isotoperna är svåra att separera från varandra. Att använda torium som bränsle utesluter inte risken för kärnvapenspridning, men på grund av föroreningen av uran-232 är spridningsrisken mindre. Plutonium-239, vilket bildas i kärnreaktorer drivna av uran, har högre potential i tillverkning av kärnvapen.

BIOLOGISKA EFFEKTER AV STRÅLNING, URAN OCH TORIUM

Uran och torium kan ge biologiska effekter på två sätt: dels genom att de ger ifrån sig radioaktiv strålning när de sönderfaller, dels genom direkt giftpåverkan. De största stråldoserna till allmänheten i Sverige kommer ifrån naturligt förekommande radondöttrar i sönderfallsserien från uran-238 och torium-232 (se figur 2 och figur 21).

Strålning

De radioaktiva grundämnena har en instabil atomkärna som sönderfaller spontant och då bildar nya grundämnen. De partiklar, (protoner, neutroner och elektroner) i det sönderfallande grundämnet som inte behövs för det nya grundämnet avges som strålning (alfa- och betastrålning). Ofta avges dessutom extra energi i form av fotoner (gammastrålning). Alfastrålning utgörs av en heliumkärna (två protoner och två neutroner). Partikeln är stor och tung och har mycket kort räckvidd. Beta-



Figur 24. Aktivitetsindex i markytan beräknat från SGUs flygmätningar av gammastrålning 1969–2014. Aktivitetsindex är en sammanvägning av den strålning som orsakas av innehållet av uran, torium och den radioaktiva isotopen kalium-40 i ett material. En uppskattning är att om man bor i ett hus med golv, väggar och tak byggda av ett material med aktivitetsindex 1 så ger detta en stråldos på 1 mSv/år.

Activity index at groundlevel calculated from SGU's airborne measurements of gamma radiation from 1969 to 2014. The Activity Index is summary of the radiation caused by the content of uranium, thorium and the radioactive isotope potassium-40 in a material. One estimate is that if you live in a house with floors, walls and ceilings constructed of a material with activity index 1 this provides a radiation dose of 1mSv / year.

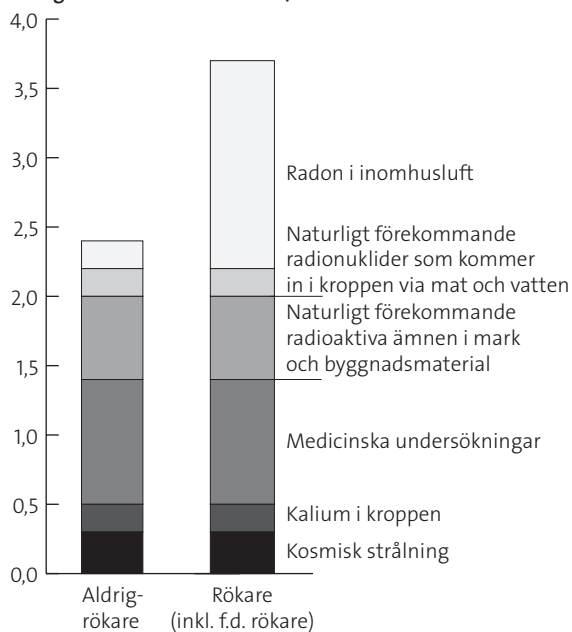
strålningen utgörs av elektroner eller positroner. Den har längre räckvidd än alfastrålningen, men betydligt kortare än gammastrålningen. Gammastrålningen är elektromagnetisk strålning av samma typ som röntgenstrålning och synligt ljus. Gammastrålningen har dock kortare våglängder och blir därmed energirikare och betydligt mer genomträngande än synligt ljus. Räckvidden i luft är flera hundra meter, i sten eller betong cirka 50 cm. Alfa-, beta- och gammastrålning är alla exempel på så kallad joniserande strålning. Det innebär att de är tillräckligt energirika för att kunna jonisera, det vill säga slå loss elektroner ifrån atomer eller molekyler som träffas av strålningen (WNA 2016).

Intensiteten hos strålningen från en radioaktiv strålkälla beror på hur många atomkärnor som sönderfaller varje sekund. Detta anges som aktivitet, A, och har enheten becquerel (1 Bq = 1 sönderfall per sekund). Aktiviteten är beroende dels på mängden (massan), dels hur ämnet sönderfaller. Olika radioaktiva ämnen sönderfaller olika fort. Halveringstiden ($t_{1/2}$) anger hur lång tid det tar innan antalet atomer av en viss radionuklid minskat till hälften (IRCP 2007).

Människan utsätts ständigt för joniserande strålning. Allmänhetens exponering av strålning kommer framför allt dels från naturlig strålning från rymden, marken och atmosfären, dels från mat och dryck, samt dels från exempelvis röntgen och cancerbehandlingar där kroppen utsätts mer intensivt. Nedanstående diagram visar grovt källorna till de stråldoser som svenskar exponeras för varje år. Bidraget från marken härrör i huvudsak från sönderfallen av de naturligt förekommande radioaktiva isotoperna av kalium, uran och torium. Halterna av dessa ämnen varierar i berggrunden och jordlagren, vilket medför att strålningen varierar från plats till plats.

När en organism utsätts för joniserande strålning överförs energin helt eller delvis till de berörda cellerna. Detta kan ge upphov till skador. Graden av skada är beroende av strålningstyp. Gammastrålning har stor genomträngningsförmåga, men ger i gengäld upphov till ett begränsat antal skador per längdenhet. Alfapartikeln går inte genom hudens yttre lager av döda celler om källan finns utanför kroppen, men om en radon-dotter befinner sig inuti luftvägarna kan alfapartikeln orsaka skada (WNA 2016). Eftersom en alfapartikel på egen hand kan orsaka genetisk skada i en cell är det

Genomsnittlig årlig stråldos till aldrig-rökare och rökare i mSv/år



Figur 25. Genomsnittlig stråldos till aldrig-rökare och rökare. Källa: Strålsäkerhetsmyndigheten 2007.

Average radiation dose to never-smokers and smokers. Source: Strålsäkerhetsmyndigheten 2007.

möjligt att radonrelaterad DNA-skada kan inträffa även vid låga radonhalter.

Strålskador kan delas in i flera kategorier. En huvudindelning är i akuta och sena effekter. Akuta effekter ger sig till känna direkt eller inom en tidsrymd på veckor och orsakas bara av höga stråldoser.

När stråldoserna sjunker blir effekterna allt mindre dramatiska och för riktigt låga stråldoser kan skadorna, om de alls förekommer, ge sig till känna först efter flera decennier eller efter flera generationer. Till de sena effekterna av strålning hör framförallt cancer och genetiska effekter. Eftersom tiden mellan exponering och symptom kan vara så lång är det svårt att koppla skadan till bestrålningen. Cancer är dessutom en vanlig sjukdom som i de många fall orsakas av andra saker än strålning (WHO).

Bland de som råkat ut för kraftig strålning finns arbetare i radioaktiva miljöer, strålbbehandlade inom medicinen, befolkning kring kärnkraftsolyckor och

befolkningen i Hiroshima och Nagasaki vid atombombsfällningarna 1945. Höga stråldoser leder bevisligen till en större risk att få främst cancer. Joniserande strålning orsakar främst fyra typer av cancer: leukemi, bröstcancer, lungcancer och sköldkörtelcancer. Efter bomberna över Japan har signifikant ökade förekomster av dessa cancer-typer noterats (WNA, UNSCEAR 2010).

Vid lägre stråldoser finns inga allmänt vedertagna bevis på ett samband mellan strålning och cancer (WNA 2016). Undantaget är radonrisk; man har gjort ett flertal kontrollstudier där man samlat fakta om personer som drabbats av lungcancer, och jämfört dessa med kontrollpersoner som inte drabbats. Man har kommit fram till att det finns ett starkt samband mellan radonexponering inomhus och ökad risk för lungcancer, att den radonrelaterade lungcancer-risken är i proportion till radonhalten i bostaden (även vid halter under 200 Bq/m³), och att lungcancer-risken från radonexponering är multiplikativ, det vill säga riskökningen ökar i proportion till lungcancer-risken från andra källor som till exempel rökning. Samma radonexponering ger en rökare cirka 25 gånger högre risk jämfört med en person som aldrig rökt (SSM 2016, EPA 2016).

Erfarenheter från strålstudier visar att en dos mottagen vid ett enda tillfälle som regel är mer skadlig än om samma dos fås under längre tid eller vid flera tillfällen. Människors känslighet för strålning varierar. Tröskeldoser för olika människor skiljer sig kraftigt. Känsligheten beror på individuella faktorer och cancer-risken från joniserande strålning är relaterad till hälsa, diet, bostadsort, yrke, livsstil och särskilt till åldern. Yngre är i regel, men inte generellt, mer känsliga för strålning än äldre (UNSCEAR 2006).

Den naturliga bakgrundsstrålningen i Sverige ligger på cirka 1 mSv per år. Enligt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) är sannolikheten att den naturliga bakgrundsstrålningen ger upphov till cancer hos en individ mycket liten, 1 på 20 000. Sannolikheten att få cancer av strålning antas öka med stråldosen. Varje tillskott av strålning ger en liten ökning av cancer-risken. För den enskilde individen är cancer-risken från normal bakgrundsstrålning försumbar (Strålsäkerhetsmyndigheten 2016, WNA 2016).

För att begränsa risken att människor utsätts för förhöjd stråldos på grund av gammastrålning föreskrivs i Boverkets byggregler att strålningsdosen i nya byggnader inte får vara högre än 0,3 µSv/h (ungefär 2,6 mSv/år).

URAN

Uran är en giftig tungmetall. Uran är även radioaktivt, men har förhållandevis låg aktivitet, på grund av sin långa halveringstid. Uran finns i små mängder nästan överallt, i berg, jord och vatten. Förhöjda nivåer av uran i bland annat vatten kan vara farligt eftersom uran framför allt kan påverka njurarnas funktion (Livsmedelsverket). Uran tas upp i växter i mycket varierande grad. I vissa växter stannar det i främst i rotsystemet, i andra går uranet upp i bladen. Mindre mängder lagras in i kött. En del uran får man alltså i sig vid maten. Ofta är dock intag av uran från vatten större. Om man arbetar med till exempel uranbrytning eller anrikning kan exponeringen bli större, om man andas in damm som innehåller uran (OECD-NEA 2014, Závodská 2012).

Det mesta av det uran som kommer in i kroppen åker ut igen relativt snabbt. En liten del kan dock lagras. Uran i vatten tas upp i mag-tarmkanalen, distribueras till blodkroppar, njurar och skelett, samt troligen också till hår, och utsöndras i urinen. I skelettet är halveringstiden i storleksordningen år. Eftersom uran frisätts från skelettet i samband med att skelettet ombildas kommer halten i njurarna att ansamlas under motsvarande tid (NCBI 2013).

Livsmedelsverket har gett ut rekommendationer om att begränsa uranhalten i dricksvatten till 30 µg/l, vilket är WHO:s provisoriska riktvärde. Detta grundar sig på effekterna av de toxiska egenskaperna hos uran, inte strålningsegenskaperna. Höga uranhalter i dricksvatten finns på många ställen i Sverige, på grund av att uran förekommer naturligt i våra jordarter och bergarter.

All slags hantering av radioaktiva ämnen anses som verksamhet med strålning enligt strålskyddslagen. Överstiger radioaktiviteten i proverna 1 kBq/kg (80 ppm uran) är verksamheten dessutom som huvudregel tillståndspliktig (SSM).

Radioaktivitet i olika material kopplat till uran kan ses i tabell 15.

Radon och radondöttrar

I sönderfallskedjorna för uran och torium bildas radon. Det är den enda gasen i sönderfallskedjan och är dessutom en ädelgas. De ämnen som följer närmast efter radon i sönderfallskedjan kallas radondöttrar. Dessa är isotoper av polonium, vismut, tallium och bly. Radongas kan sippra från berggrund och mark ut i atmosfären

Tabell 15. Radioaktivitet i olika material kopplat till uran.
Radioactivity in different materials related to uranium.

Olika material kopplade till uran	Radioaktivitet (GBq)
1 ton av naturligt uran (0,7% uran-235)	250
1 ton av anrikat uran (3,5% uran-235)	810
1 ton av utarmat uran (0,2% uran-235)	140
1 ton av höghaltig uranmalm (15% naturligt uran)	27
1 ton av låghaltig uranmalm (0,1% naturligt uran)	0,18
1 ton av lakrester från höghaltig uranmalm (15%) efter 1 år	19
1 ton av lakrester från låghaltig uranmalm (0,1%) efter 1 år	0,13
1 ton av använt kärnbränsle	100 000 000

Källa: www.wise-uranium.org/rup.html

Ewing, R.C. 2008, "Nuclear Fuel Cycle: Environmental Impact", MRS Bulletin, vol. 33, no. 4, pp. 338-340.

och via vatten, eller direkt in i hus. Väl inne i husen sönderfaller radongasen till radondöttrar som snabbt fäster på luftpartiklar (aerosolpartiklar). Luften kommer att innehålla en andel partiklar som bär på de radioaktiva radondöttrarna. Partiklarna följer med inandningsluften och fastnar i luftvägarna, där radondöttrarna avger strålning. Radongas kan även andas in och sönderfalla i lungorna (SSM).

Radon är näst efter rökning den vanligaste orsaken till lungcancer, och den vanligaste orsaken till lungcancer hos personer som aldrig rökt. Strålsäkerhetsmyndigheten har bedömt att omkring 500 lungcancerfall per år orsakas av radon i bostäder. De allra flesta av de som drabbas är rökare. Världshälsoorganisationen (WHO) har 2009 uppskattat att 3–14 procent av lungcancerfallen globalt orsakas av radon. Radon i inomhusluft ger i genomsnitt en årlig stråldos av cirka 0,2 mSv för aldrig-rökare. För rökare är siffran över sju gånger högre (fig. 25).

För att minska riskerna med radon i inomhusluft finns rikt- och gränsvärden. För nybyggda bostäder är Boverkets gränsvärde 200 Bq/m³, och för befintliga bostäder har Folkhälsomyndigheten satt ett riktvärde på samma halt. För vanliga arbetsplatser gäller Arbetsmiljöverkets gränsvärde på 0,36 MBq h/m³, vilket motsvarar 200 Bq/m³, räknat på 1 800 arbetstimmar per år. För arbetsplatser under jord finns istället gränsvärdet 2,1 MBq h/m³, vilket motsvarar en radonhalt på 1 300 Bq/m³ räknat på 1 600 arbetstimmar per år. Strål-

skyddslagstiftningen ställer krav på övervakning och registrering om en arbetstagare riskerar att få dos över 6 mSv/år, oavsett om dosen kommer från gammastrålning eller radon. Läs mer om riktvärden och gränsvärden för radon på Strålsäkerhetsmyndighetens webbplats www.stralsakerhetsmyndigheten.se under fliken Radon.

TORIUM

Naturligt torium finns i mycket små mängder i nästan alla naturliga material (berg, jord, vatten, växter och djur) (WNA, 2016). De naturligt förekommande toriumföreningarna är extremt svårlösliga, vilket gör att torium inte har någon biologisk funktion.

Om torium andas in som damm kan det stanna i lungorna under lång tid. Om man istället sväljer det går det mesta ut igen via urin och avföring. En liten del hamnar i blodet och deponeras sedan i skelettet, där det kan bli kvar i många år. Fyrvärt torium har samma jonradie som kalcium och kan därför ersätta detta ämne i biologiska system, speciellt i benvävnad. Torium kan möjligen också absorberas genom huden (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR 1990).

Amerikanska studier av arbetare vid toriumfabriker har visat att arbetare som andats in toriumdamm har en ökat risk för cancer i lunga och bukspottkörtel, under många år efter exponering. Genetiska förändringar förekom också. Det är dock svårt att bedöma hur mycket de påverkade arbetarna fått i sig, eftersom torium är både smak- och luktfritt. Hos personer som injicerats med toriumpreparat (Thorotrast) inför medicinska undersökningar (röntgen) har man sett påverkan på blod och lever, liksom olika typer av cancer. Denna typ av behandling pågick framför allt under 1930-talet till en bit in på 1950-talet (ATSDR 1990).

Djurstudier har visat på metallförgiftning vid intag av stora mängder torium.

På grund av sin extrema svårlöslighet utgör torium normalt inte någon kemisk hälsorisk, men genom sin radioaktivitet utgör grundämnet och dess föreningar en radiologisk hälsorisk, framför allt genom att radon bildas i sönderfallskedjan. Den radonisotop (Rn-220) som bildas i sönderfallskedjan för torium-232 har dock en halveringstid på bara 55 sekunder, och detta radon hinner ofta inte transporteras någon längre bit innan det sönderfaller.

Slutförvaring – metoder och utveckling

Disposal of radioactive waste – methods and development

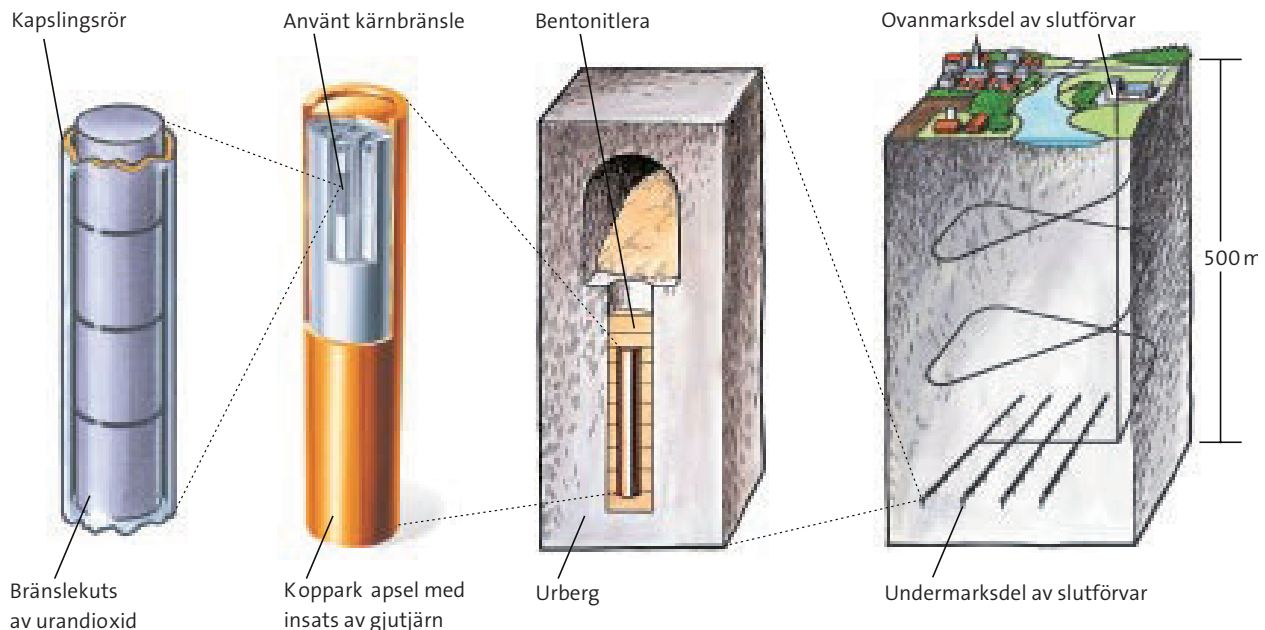
Radioaktivt avfall måste förvaras på ett säkert sätt för att hindra att radioaktiva ämnen, men också giftiga metaller, tar sig ut i naturen. Avfallet måste även kapslas in så att alfa, beta och gammastrålning begränsas. Radioaktivt avfall kan delas in i tre kategorier beroende på hur hög strålning de avger och hur länge avfallet måste förvaras: lågaktivt, medelaktivt och högaktivt avfall.

Låg- och medelaktivt avfall behöver inte förvaras lika länge som det högaktiva avfallet. I Forsmark finns SKBs (Svensk Kärnbränslehantering AB) anläggning Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR). SFR består av bergrum under Forsmarks kärnkraftverk, cirka 50 meter under Östersjöns botten. Det låg- och medelaktiva avfallet som läggs här behöver isoleras i omkring 500 år för att sedan vara säkert. Avfallet kommer från kärnkraftverken i form av filter, skyddskläder och verktyg, men också från annan industri och sjukvård och forskning. SFR hade sin driftstart 1988 och var

då det första i sitt slag i världen (SKB 2016).

Använt kärnbränsle utgör kategorin högaktivt avfall. Idag finns omkring 6 300 ton högaktivt avfall i Sverige, vilket är omkring fem procent av Sveriges totala avfall (låg, medel och hög). Trots den lilla volymen står det högaktiva avfallet för 99 procent av strålningen från det totala avfallet (SKB 2016, Vattenfall 2016). Ett ton av använt kärnbränsle strålar med omkring 100 000 000 miljarder Bq (Becquerel, en Bq är lika med ett sönderfall per sekund). Se tabell 15 för jämförelser.

Idag finns det högaktiva avfallet förvarat i SKB:s mellanlager, Clab, i Oskarshamn. Här läggs avfallet ner i djupa vattenbassänger, försänkta i berget. Åtta meter vatten skyddar omgivningen från strålningen samtidigt som det kyler ner det använda bränslet. Mellanlagret övervakas hela tiden och ständig kontroll sker för att skydda omgivningen. Idag har mellanlagret tillstånd att lagra 8 000 ton högaktivt avfall, men ansökningar om att



Figur 26. Slutförvarsmetoden KBS-3. Källa: SKB.

The KBS-3 technology for disposal of radioactive waste.

få lagra upp till 11 000 ton har skickats in (SKB 2016).

För att säkra att avfallet förblir skyddat på lång sikt, minst 100 000 år, krävs ett passivt slutförvar, det vill säga ett som inte behöver samma kontroll och övervakningsprogram som i Clab. Det planerade kärnbränsleförvaret är ett geologiskt slutförvar som kommer att byggas cirka 500 meter ner i 1,9 miljarder år gammalt berg i Forsmark. På detta djup ska kärnbränslet förvaras i ett system av tunnlar och bergrum enligt metoden KBS-3 (se nedan). Strålsäkerhetsmyndigheten har i juni 2016 tillstyrkt SKBs ansökan om att bygga kärnbränsleförvaret, men regeringen och kommunerna som berörs måste även de lämna sina svar. SKB hoppas på att bygget kan börja i början på 2020-talet, det kommer sedan att ta omkring tio år innan slutförvaret kan driftsättas. Utbyggnad kommer sedan att ske till 2080-talet, då slutförvaret förväntas kunna vara färdigbyggt och rymma omkring 12 000 ton använt kärnbränsle (SKB 2016).

För att skydda kärnbränsleavfallet från yttre faktorer, så som oxidation, vatten och annan skada som skulle kunna sprida det uttjänta kärnbränslet vidare, krävs en säker metod. Det huvudalternativ som SKB har kallas KBS-3. Där innefattas avfallet i en kapsel av koppar och gjutjärn med en buffert av bentonitlera som skyddar mot korrosionsangrepp och sväller in i eventuella sprickor uppkomna av mekanisk skada mot kapseln. Kapslarna förvaras i bergrum i slutförvaret som stängs och återfylls med grundvatten när de är fyllda. Berget är den sista barriären. Om en kapsel skulle spricka och radioaktiva ämnen tar sig ut i grundvattnet och rör sig vidare i bergets spricksystem så skulle de fastna mot sprickytor och sprickmineral samt i bergets mikroporer (SKB 2016).

KBS-3 är den huvudmetod som har accepterats av regeringen, men andra metoder har studerats och

diskuterats under åren. Bland annat har djupa borrhål diskuterats, där kapslar med använt kärnbränsle skulle deponeras i 3–5 kilometer djupa borrhål i stabilt berg. På detta djup finns salt grundvatten som rör sig mycket sakta och inte har varit i kontakt med biosfären på miljontals år. Genom att hålen försluts försvårar det även att kapslarna plockas upp igen, vilket minskar risken för spridning av plutonium, som kan användas i kärnvapen. Det finns dock många frågetecken med denna metod, exempelvis hur grundvattnets utbyte verkligen sker och hur förvaret klarar sig på mycket lång sikt. Det krävs även mer forskning kring borrhåll, buffert, deponering och förslutning (Kärnavfallsrådet, 2016).

Fler metoder som diskuterats är långa tunnlar under Östersjön, WP-cave-metoden (deponering i bergrum med buffert runt rummet) och DRD-metoden (deponering i självdränerande bergrum). Dessa går att läsa om på Kärnavfallsrådets hemsida (www.karnavfallsradet.se). Transmutation har även diskuterats som ett alternativ, där radioaktiva isotoper som har lång halveringstid transmuteras (omvandlas) till isotoper som har kortare halveringstid eller är stabila. På detta sätt sjunker behovet att lagra avfallet lång tid. Vidare forskning i ämnet krävs dock, och anläggningar blir troligen mycket dyra. Idag finns nationella forskningsprogram i bland annat Frankrike, USA och Japan. Det forskas även på att återanvända uttjänt kärnbränsle i fjärde generationens reaktorer, dels för att få ut mer energi, dels för att sänka radioaktiviteten i avfallet, se kapitlet om framtida utveckling.

Övriga alternativ, som att helt enkelt dumpa avfallet i djuphavssediment, i inlandsis eller i havet, har avfärdats eftersom internationella konventioner förbjuder detta på grund av stora miljörisker. Att dumpa avfallet i rymden har även det avfärdats bland annat eftersom det skulle bli mycket dyrt (Kärnavfallsrådet 2016).

Referenser

References

- Africa Research Bulletin: Economic, Financial and Technical Series, 2016: Uranium: Namibia, Africa Research Bulletin: Economic, Financial and Technical Series, Volym 53, Nummer 3.
- Andersson, A., Dahlman, B., Gee, D. & Snäll, S., 1985: The Scandinavian alum shales, Utgåva 56 av Avhandlingar och uppsatser i 4:o: Serie Ca, 50 s.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2015: Toxicological Profile for Uranium [www]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Hämtad från <<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/TP.asp?id=440&tid=77>> 12 september 2016.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2015: Toxicological Profile for Thorium [www]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Hämtad från <<http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=660&tid=121>> 12 september 2016.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2015: Toxicological Profile for Radon [www]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Hämtad från <<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=407&tid=71>> 12 september 2016.
- Baker Schaffer, M., 2013: Abundant thorium as an alternative nuclear fuel. Important waste disposal and weapon proliferation advantages, *Energy Policy*, volym 60. 4–12 s.
- Boekhout, F., Gérard, M., Kanzari, A., Michel, A., Déjeant, A., Galois, L., Calas & G., Descostes, M., 2015: Uranium migration and retention during weathering of a granitic waste rock pile, *Applied Geochemistry*, volym 58. 123–135 s.
- Smodiš, B., Štok, M. & Černe, M. 2014: Radioecology around a closed uranium mine, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, volym 299. 765–771 s.
- Canadian Nuclear Safety Commission, 2016: Uranium mines and mills [www]. Canadian Nuclear Safety Commission. Hämtad från <<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/uranium/mines-and-mills/index.cfm>> 12 september 2016.
- Canadian Nuclear Safety Commission, 2016: Uranium mines and mills waste [www]. Canadian Nuclear Safety Commission. Hämtad från <<http://nuclearsaf>
- fety.gc.ca/eng/waste/uranium-mines-and-mills-waste/index.cfm> 12 september 2016.
- Cecilia Jelinek och Thomas Eliasson, 2015: Strålning i bergmaterial, *SGU-rapport 2015:34*. Sveriges geologiska undersökning.
- Chambers, D.B., Lowe L.M. & Stager, R.H., 2001: Long-term population dose due to radon (Ra-222) released from uranium mill tailings. Impact of new environmental and safety regulations on uranium exploration, mining, milling and management of its waste, IAEA-TECDOC-1244, *Proceedings from an IAEA Technical Meeting, 14-17 September 1998, Vienna*.
- Chareyron, B., 2014: Radiological Impact of Rössing Rio Tinto Uranium Mine. *EJOLT & CRIIRAD Report*.
- Cuney, M., 2009: The extreme diversity of uranium deposits, *Mineralium Deposita*, volym 44, sid. 3–9.
- Energimyndigheten, 2016: 2015 var ett år med stor elproduktion och rekordstor export av el [www]. Energimyndigheten. Hämtad från <<http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2016/2015-var-ett-ar-med-stor-elproduktion-och-rekordstor-export-av-el/>> 12 september 2016.
- Ewing, R.C., 2008: Nuclear Fuel Cycle: Environmental Impact, *MRS Bulletin*, volym 33, sid. 338–340.
- Frybort, J., 2014: Comparison of the radiological hazard of thorium and uranium spent fuels from VVER-1000reactor. *Radiation Physics and Chemistry*, volym 104, sid. 408–413.
- Fuertig, P., 1958: Uranmineralisation i Stripa. Bergsinjenjör Stållbergsbolagen, Stripa 1958, intern rapport i Lindesbergs Museums arkiv genom Bergskraft.
- Government of Saskatchewan Geological Survey, 2016: Resource Map of Saskatchewan, 2016 Edition. Sask. Ministry of the Economy, Saskatchewan Geological Survey.
- International Energy Agency, 2015: World Energy Outlook 2015 [www]. International Energy Agency. Hämtad från <https://www.iea.org/bookshop/700-World_Energy_Outlook_2015/> 12 september 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Nuclear

- research [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/nuclear-research>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Workers [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/workers>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Public [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/public>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Environment [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/environmentc>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Radioactive waste and spent fuel management [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/radioactive-waste-and-spent-fuel-management>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Energy [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/energy>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Factsheets [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/publications/factsheets>> 10 oktober 2016.
- International Atomic Energy Agency, 2016: Addressing Environmental Issues [www]. International Atomic Energy Agency. Hämtad från <<https://www.iaea.org/topics/addressing-environmental-issues>> 10 oktober 2016.
- International commission on radiological protection, 2007: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP publication 103, *Annals of the ICRP, volym 37*.
- Khaled, S. Md., Azam, S., 2014: Depositional characteristics of uranium tailings from Saskatchewan, Canada, *Environmental Earth Sciences, volym 72*, sid. 4393–4400.
- Kärnavfallsrådet, 2016: Långa tunnlar och WP-cave [www]. Kärnavfallsrådet Hämtad från <<http://www.karnavfallsradet.se/karnavfall-och-slutforvaring/hanteringsmetoder-for-karnavfall/langa-tunnlar-och-wp-cave>> 12 september 2016.
- Kärnavfallsrådet, 2016: Dry Rock Deposit (DRD)-metoden [www]. Kärnavfallsrådet Hämtad från <<http://www.karnavfallsradet.se/karnavfall-och-slutforvaring/hanteringsmetoder-for-karnavfall/dry-rock-deposit-drd-metoden>> 12 september 2016.
- Kärnavfallsrådet, 2016: Transmutation [www]. Kärnavfallsrådet Hämtad från <<http://www.karnavfallsradet.se/karnavfall-och-slutforvaring/hanteringsmetoder-for-karnavfall/transmutation>> 12 september 2016.
- Kärnavfallsrådet, 2016: Övriga alternativ [www]. Kärnavfallsrådet Hämtad från <<http://www.karnavfallsradet.se/karnavfall-och-slutforvaring/hanteringsmetoder-for-karnavfall/ovriga-alternativ>> 12 september 2016.
- Livsmedelsverket, 2016: Uran [www]. Livsmedelsverket. Hämtad från <<http://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/metaller/uran/>> 12 september 2016.
- Länsstyrelsen Västra götaland, 2016: Ranstad [www]. Länsstyrelsen Västra götaland. Hämtad från <<http://www.lansstyrelsen.se/VastraGotaland/Sv/miljo-och-klimat/verksamheter-med-miljopaverkan/forenade-omraden/efterbehandlingsprojekt/Pages/Ranstad.aspx>> 12 september 2016.
- Merkel, B., Hasche-Berger, A., 2006: *Uranium in the Environment: Mining Impact and Consequences. 1st edn*, Springer, New York, Berlin.
- Mining Technology, 2016: Olympic Dam Copper-Uranium Mine, Adelaide, Australia [www]. Mining Technology. Hämtad från <<http://www.mining-technology.com/projects/olympic-dam/>> 12 september 2016.
- National Center for Biotechnology Information, 2013: Toxicological Profile for Uranium [www]. National Center for Biotechnology Information. Hämtad från <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158798/>> 12 september 2016.
- National Nuclear Laboratory, 2012: Comparison of thorium and uranium fuel cycles, *NNL (11) 11593 Issue 5*.
- OECD-NEA/IAEA, 2014: Uranium 2014: *Resources, Production and Demand (Red Book)*. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency.
- OECD-NEA, 2014: *Managing Environmental and*

- Health Impacts of Uranium Mining.*
- RCN, OED, 2008: *Thorium as an Energy Source – Opportunities for Norway.*
- SNL Metals & Mining, 2015: *SNL Corporate Exploration Strategies 2015.*
- SveMin, FinnMin & Norsk Bergindustri, 2012: *Rekom-menderade regler för publik information i Sverige, Finland och Norge om prospekteringsresultat, under-sökningar, lönsamhetsstudier och värderingar av mine-raltillgångar och mineralreserver.*
- Svensk Kärnbränslehantering AB, 2016: Slutförvaret SFR [www]. Svensk Kärnbränslehantering AB. Hämtad från <<http://www.skb.se/anlaggningar-i-drift/slutforvaret-sfr-2/>> 12 september 2016.
- Svensk Kärnbränslehantering AB, 2016: Vår metod för slutförvaring [www]. Svensk Kärnbränslehantering AB. Hämtad från <<http://www.skb.se/projekt-for-framtiden/karnbransleforvaret/var-metod/>> 12 sep-tember 2016
- Svensk Kärnbränslehantering AB, 2016: Cigar Lake – naturens eget slutförvar [www]. Svensk Kärn-bränslehantering AB. Hämtad från <www.skb.se/forskning-och-teknik/temasidor/naturliga-analogier/cigar-lake-naturens-eget-slutforvar/> 12 september 2016
- Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009: *Slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark - underlag och motiv för platsval.*
- SGU, 2003: Mineralmarknaden, Tema uran. *Periodiska publikationer 2003:3.* Sveriges geologiska undersök-ning.
- SGU, 2003: Mineralmarknaden, Tema koppar. *Perio-diska publikationer 2003:5.* Sveriges geologiska undersökning.
- SGU, 2009: Mineralmarknaden, Tema guld. *Periodiska publikationer 2009:4.* Sveriges geologiska undersök-ning.
- Strålsäkerhetsmyndigheten, 2014: Hälsorisker med radon [www]. Strålsäkerhetsmyndigheten. Hämtad från <<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/Radon/Halsorisker-med-radon/>> 12 september 2016.
- Strålsäkerhetsmyndigheten, 2014: Frågor och svar om strålning [www]. Strålsäkerhetsmyndigheten. Hämtad från <<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Om-myndigheten/Aktuellt--Bilagor/Fragor-och-svar-om-stralning/>> 12 september 2016.
- Andersson, P., Carlsson, M., Falk, R., Hubbard, L., Leitz, W., Mjönes, L., Möre, H., Nyblom, L., Söderman, A-L., Yuen Lasson, K., Åkerblom G., & Öhlén E, 2007: Strålmiljön i Sverige, SSI Rapport 2007:02, Statens strålskyddsinstitut.
- Tripathi, R.M., Sahoo, S.K., Jha, V.N., Kumar, R., Shukla, A.K., Puranik, V.D. & Kushwaha, H.S., 2011: Radiation dose to members of public residing around uranium mining complex, Jaduguda, Jharkhand, India, *Radiation Protection Dosimetry, volym 147*, sid. 565–572.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2010: *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010.*
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2006: *Effects of ionizing radiation.*
- US Environmental Protection Agency, 2016: Radionuclide Basics: Radium [www]. US Environmental Protection Agency. Hämtad från <<https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-radium>> 10 oktober 2016.
- US Environmental Protection Agency, 2016: Health Risk of Radon [www]. US Environmental Protection Agency. Hämtad från <<https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>> 10 oktober 2016.
- Vandenhove, H., Sweeck, L., Mallants, D., Vanmarcke, H., Aitkulov, A., Sadyrov, O., Savosin, M., Tolongutov, B., Mirzachev, M., Clerc, J.J., Quarch, H. & Aitaliev, A. 2006: Assessment of radiation exposure in the uranium mining and milling area of Mailuu Suu, Kyrgyzstan, *Journal of Environmental Radioactivity*, volym 88, sid. 118–139.
- Vattenfall, 2016: Slutförvar av kärnavfall [www]. Vattenfall. Hämtad från <<https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/karnkraft/slutforvar-av-karnavfall/>> 12 september 2016.
- World Health Organization, 2015: Cancer [www]. World Health Organization. Hämtad från <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs297/en/>> 12 september 2016.
- World Nuclear Association, 2016: What is radiation? [www]. World Nuclear Association. Hämtad från <<http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/what->

- is-radiation.aspx> 12 september 2016.
- World Nuclear Association, 2016: Nuclear Radiation and Health Effects [www]. World Nuclear Association. Hämtad från <<http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx>> 12 september 2016.
- World Nuclear Association, 2016: Thorium [www]. World Nuclear Association. Hämtad från <<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>> 12 september 2016.
- World Nuclear Association, 2016: World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements [www]. World Nuclear Association. Hämtad från <<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>> 12 september 2016.
- World Nuclear Association, 2016: The Nuclear Fuel Report [www]. World Nuclear Association. Hämtad från <<http://www.world-nuclear.org/our-association/publications/publications-for-sale/nuclear-fuel-report.aspx>> 12 september 2016.
- WISE Uranium Project, 2016: New Uranium Mining Projects – Finland [www]. Hämtad från <<http://www.wise-uranium.org/upfi.html>> 12 september 2016.
- WISE Uranium Project, 2016: Uranium Radiation Properties [www]. Hämtad från <<http://www.wise-uranium.org/rup.html>> 12 september 2016.
- WSP, 2005: Ranstad: miljö- och hälsoriskbedömning av Tranebärssjön och lakrestområdet, Rapport (Kund: AB SVAFO) *Uppdragsnummer 10054177*.
- Zavodska, L., Kosorinova, E., Scerbakova, L. & Lesny, J., 2008: Environmental chemistry of uranium, *Hungarian Electronic Journal of Sciences*, sid. 1–19.

SGUs periodiska publikationer

1987:1	Grus och sand m m. Produktion och tillgångar 1985	1998:3	Järnmalmnsrevy 1997
1987:2	Bergverksstatistik 1978-1984	1998:4	Industriella mineral och bergarter – en branschutredning
1987:3	Berg och malm i Örebro län	1999:1	Bergverksstatistik 1998
1987:5	Grus och sand m m. Produktion och tillgångar 1986	1999:2	Mineralmarknaden, juni 1999 (Tema Titan)
1988:1	Järnmalmnsrevy 1987	1999:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 1998.
1988:2	Mineralmarknaden, maj 1988	1999:4	Mineralmarknaden, december 1999 (Tema Silver)
1988:3	Bergverksstatistik 1986	2000:1	Bergverksstatistik 1999
1988:4	Mineralmarknaden, september 1988	2000:2	Naturgrus eller morän
1988:5	Grus och sand m m. Produktion och tillgångar 1987	2000:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 1999
1989:1	Mineralmarknaden, januari 1989 (Tema Platina)	2000:4	Mineralmarknaden, december 2000 (Tema Magnesium)
1989:2	Bergverksstatistik 1987	2001:1	Bergverksstatistik 2000
1989:3	Järnmalmnsrevy 1988	2001:2	Mineralmarknaden, juni 2001 (Tema Platinametallerna)
1989:4	Mineralmarknaden, maj 1989 (Tema Diamanter)	2001:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2000
1989:5	Mineralmarknaden, september 1989 (Tema Wolfram)	2001:4	Mineralmarknaden, december 2001
1990:1	Grus och sand m m. Produktion och tillgångar 1988	2002:1	Mineralmarknaden, april 2002 (Tema Järnmalm)
1990:2	Mineralmarknaden, februari 1990 (Tema Sällsynta Jordartsmetaller)	2002:2	Bergverksstatistik 2001
1990:3	Mineralmarknaden, juni 1990 (Tema Litium)	2002:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2001.
1990:4	Bergverksstatistik 1988 och 1989	2002:4	Mineralmarknaden, november 2002 (Tema Stål)
1990:5	Grus och sand m m. Produktion och tillgångar 1989	2003:1	Bergverksstatistik 2002
1990:6	Mineralmarknaden, november 1990 (Tema: Irak/Kuwait; Kina)	2003:2	Mineralmarknaden, juni 2003 (Tema Indium, gallium & germanium)
1991:1	Mineralmarknaden, februari 1991 (Tema Krom)	2003:3	Mineralmarknaden, september 2003 (Tema Uran)
1991:2	Mineralmarknaden, juni 1991 (Tema Kvicksilver)	2003:4	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2002
1991:3	Bergverksstatistik 1990	2003:5	Mineralmarknaden, december 2003 (Tema Koppar)
1991:4	Järnmalmnsrevy 1989-1990	2004:1	Bergverksstatistik 2003
1991:5	Mineralmarknaden, september 1991 (Tema Tenn)	2004:2	Mineralmarknaden, juni 2004
1991:6	Grus och sand m m. Produktion och tillgångar 1990	2004:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2003
1992:1	Mineralmarknaden, februari 1992 (Tema Kobolt)	2004:4	Mineralmarknaden, oktober 2004
1992:2	Järnmalmnsrevy 1991	2004:5	Mineralmarknaden, december 2004 (Tema Zink)
1992:3	Mineralmarknaden, juni 1992 (Tema Mangan)	2005:1	Mineralmarknaden, april 2005 (Tema Aluminium)
1992:4	Bergverksstatistik 1991	2005:2	Bergverksstatistik 2004
1992:5	Grus, sand och industrimineral. Produktion och tillgångar 1991	2005:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2004
1992:6	Mineralmarknaden, december 1992 (Tema Industrimineral)	2005:4	Mineralmarknaden, oktober 2005 (Tema Arsenik)
1993:1	Mineralmarknaden, maj 1993 (Tema Zink)	2006:1	Mineralmarknaden, maj 2006 (Tema Bly)
1993:2	Järnmalmnsrevy 1992	2006:2	Bergverksstatistik 2005
1993:3	Mineralmarknaden, november 1993 (Tema Nickel)	2006:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2005
1994:1	Mineralmarknaden, mars 1994 (Tema Molybden)	2006:4	Mineralmarknaden, dec 2006 (Tema Niob och tantal)
1994:2	Järnmalmnsrevy 1993	2007:1	Mineralmarknaden, april 2007 (Tema Nickel)
1994:3	Bergverksstatistik 1992	2007:2	Bergverksstatistik 2006
1994:4	Mineralmarknaden, juni 1994 (Tema Koppar)	2008:1	Mineralmarknaden, mars 2008 (Tema Wolfram)
1994:5	Grus, sand och industrimineral. Produktion och tillgångar 1992	2008:2	Bergverksstatistik 2007
1994:6	Bergverksstatistik 1993	2008:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2007
1994:7	Grus, sand och industrimineral. Produktion och tillgångar 1993	2008:4	Mineralmarknaden, december 2008 (Tema: Molybden)
1994:8	Mineralmarknaden, december 1994 (Tema Aluminium)	2009:1	Bergverksstatistik 2008
1995:1	Mineralmarknaden, mars 1995 (Tema Zirkonium)	2009:2	Mineralmarknaden, juni 2009 (Tema Litium)
1995:2	Bergverksstatistik 1994	2009:3	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 2008
1995:3	Järnmalmnsrevy 1994	2009:4	Mineralmarknaden, december 2009 (Tema: Guld)
1995:4	Grus, sand och industrimineral. Produktion och tillgångar 1994	2010:1	Bergverksstatistik 2009
1995:5	Mineralmarknaden, oktober 1995 (Tema Bly)	2010:2	Grus, sand och krossberg 2009
1995:6	Mineralmarknaden, december 1995 (Tema Selen och Tellur)	2011:1	Mineralmarknaden, april 2011 (Tema: Specialmetaller)
1996:1	Mineralmarknaden, mars 1996 (Tema Diamanter)	2011:2	Bergverksstatistik 2010
1996:2	Bergverksstatistik 1995	2012:2	Bergverksstatistik 2011
1996:3	Grus, sand och industrimineral. Produktion och tillgångar 1995	2013:1	Grus, sand och krossberg 2011
1996:4	Mineralmarknaden, juni 1996 (Tema Diamanter del II)	2013:2	Bergverksstatistik 2012
1996:5	Järnmalmnsrevy 1995	2014:1	Grus, sand och krossberg 2012
1997:1	Mineralmarknaden, januari 1997 (Tema Guld)	2014:2	Bergverksstatistik 2013
1997:2	Bergverksstatistik 1996	2014:3	Grus, sand och krossberg 2013
1997:3	Grus, sand och industrimineral. Produktion och tillgångar 1996	2015:1	Bergverksstatistik 2014
1997:4	Järnmalmnsrevy 1996	2015:2	Grus, sand och krossberg 2014
1998:1	Bergverksstatistik 1997	2016:1	Bergverksstatistik 2015
1998:2	Grus, sand och krossberg. Produktion och tillgångar 1997		

SGUs periodiska publikationer kan fås från SGUs kundtjänst, tel: 018-17 92 00.



Oklo – naturens egen kärnreaktor

I Oklogruvan i Gabon finns uran med en annorlunda isotopsammansättning än vad som är vanligt på andra håll i världen. Malmen innehåller nämligen betydligt lägre andel av isotopen uran-235. Förklaringen är att isotopen har förbrukats i en kärnklyvningsprocess, som av allt att döma påbörjades redan för två miljarder år sedan, dvs. innan huvuddelen av Sveriges berggrund bildades. Närmare undersökningar har visat att det finns flera naturliga kärnreaktorer i Oklo-området där en kedjereaktion har startat och stannat flera gånger. Vatten har fungerat som moderator vid processen. När vatten rann till startade processen genom att neutronerna fick lämplig inbromsning. När reaktorn blev för varm kokade vattnet bort och reaktorn stannade tills den svalnat så att vatten kunde rinna till på nytt.

Idag går det inte att skapa en naturlig reaktor som Oklo eftersom halten av den klyvbara isotopen uran-235 i naturligt förekommande uran har sjunkit så lågt att en kedjereaktion inte går att hålla igång. Det är därför man kan packa *yellow cake* i tunnor utan att något händer (se framsidan). För två miljarder år sedan hade det varit farligt. Foto: SKB.



Sveriges geologiska undersökning www.sgu.se

Huvudkontor:
Villavägen 18
Box 670
751 28 Uppsala
018-17 90 00

Övriga kontor:
Guldhedsgatan 5A
413 20 Göteborg
018-17 90 00

Rosenlundsgatan 60
Box 17155
104 62 Stockholm
018-17 90 00

Kiliansgatan 10
223 50 Lund
018-17 90 00

Skolgatan 11
930 70 Malå
0953-346 00
minko@sgu.se

Varvsgatan 41
972 32 Luleå
0920-23 79 00
mineinspect@bergsstaten.se