

PLEASE
Do not remove

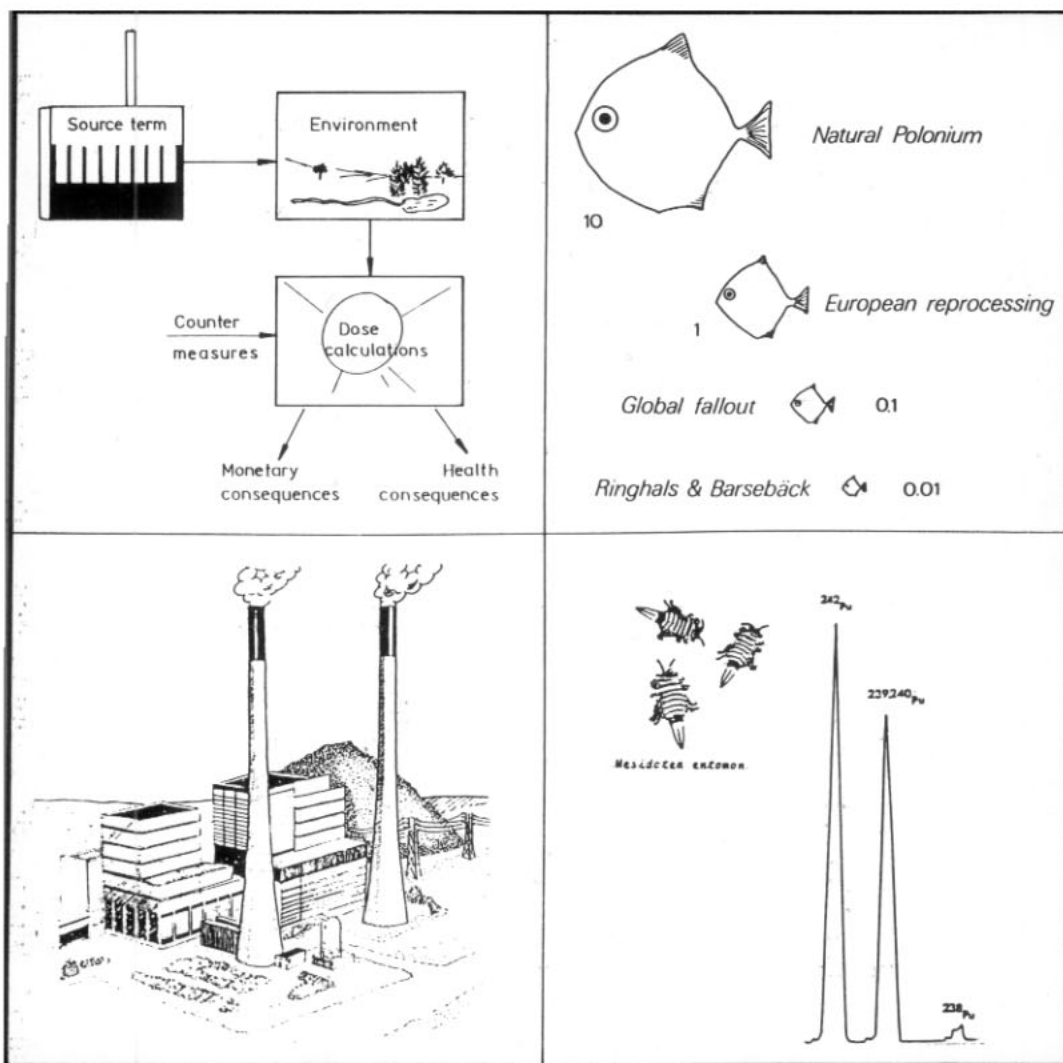
MÅ IKKE FJERNES

NORD

FEBRUARI 1986

NORDISK RADIOEKOLOGI

EN SAMMANFATTNING AV 4 ÅRS NORDISKT SAMARBETE



nka

Nordic
liaison committee for
atomic energy

NORDISK RADIOEKOLOGI

EN SAMMANFATTNING AV 4 ÅRS NORDISKT SAMARBETE

**J. O. SNIHS
STATENS STRÅLSKYDDSinSTITUT
STOCKHOLM**

FEBRUARI 1986

Styrgrupp för nordisk radioekologi NKA, 1981 -85

J O Snihs (ordförande)	Statens strålskyddsinstitut Box 60204 S-104 01 Stockholm
P O Agnedal (sekreterare)	Studsvik Energiteknik AB S-611 82 Nyköping
U Grimås	Statens naturvårdsverk Miljökontrolllaboratoriet Uppsala Sektionen för kustvatten Box 8005 S-750 08 Uppsala
A Salo	STUK (Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety) Box 268 SF-00101 Helsingfors
U Tveten	Institutt for Energiteknikk Postbox 40 N-2007 Kjeller
A Aarkrog	Forsøgsanlaeg Risø Postbox 49 DK-4000 Roskilde
F Marcus	NKA Postbox 49 DK-4000 Roskilde

S O Ericsson (konsult)	Värtaverket Box 39101 100 54 Stockholm

Denna sammanfattningsrapport ingår i det säkerhetsprogram som genomfördes 1981-85 av Nordiska kontaktorganet för atomenergi-frågor. Programmet delfinansierades med medel från Nordiska ministerrådet.

Summary

From 1981 to 1985 Nordic scientists in radioecology have conducted joint research on the distribution and behaviour of radioactive elements in the Nordic countries. The projects have been financed by Nordic funds and national contributions, in total about 9 million Norwegian crowns. The projects have resulted in almost one hundred publications and the results have been discussed in a number of seminars and two large Nordic conferences.

The projects cover four major areas.

"Radioactive elements in Nordic waters" includes studies on fallout from nuclear weapons testing and releases from nuclear installations in Nordic and other countries. Particular interest has been devoted to the properties of organisms that concentrate the radioactive elements (bioindicators). Through this work it has been possible to make bioindicator studies of large geographical distributions of released radioactivity (Gauss expedition and others); collective doses caused by water burden activity have also been assessed. The specially built "biotest basin" intended for research in the Baltic Sea where Forsmark nuclear power station is situated has been used in some of the Nordic projects. The effects of increased water temperature and deposition in sediments have been studied in the basin and outside other nuclear power stations.

"The consequences of reactor accidents" provides improved knowledge on models of dispersion and the effects of protective measures. Factors have also been identified that influence the deposition of particles on dry surfaces. To what extent rain and snow can enhance the removal of radioactivity from contaminated surfaces has been investigated.

"Natural radiation" includes studies on the radioactivity of coal and radiological consequences of burning coal and peat. Radioactive emissions from coal fired plants are comparable to those from nuclear power plants, but the radioactivity is much more difficult to detect due to the high natural background activity. No adverse effects have been found when using coal-ash in building material.

"Comparative measurements" is a project including a number of comparisons of sampling, analysing and measuring methods used in Nordic laboratories. By these comparisons the reliability of the results of individual national laboratories is increased and Nordic measurements can more easily supplement each other.

The Nordic radioecological cooperation will continue.

INIS DESCRIPTORS:

BIOINDICATORS

CALIBRATION STANDARDS

COAL

COORDINATED RESEARCH PROGRAMS

FOSSIL-FUEL POWER PLANTS

RADIOACTIVITY

RADIOECOLOGY

SCANDINAVIA

Innehåll

Inledning	1
Radioaktiva ämnen i nordiska vatten	2
Uppkomst	2
Hälsorisker	3
Undersökningars uppläggning	4
Bioindikatorer	5
Storskaliga undersökningar	9
Biotestsjön	10
Konsekvenser av reaktorolyckor	13
Hur människan bestrålas av ett radioaktivt utsläpp	13
Nedfall av radioaktiva partiklar	14
Rörlighet och borttransport av radioaktiva ämnen	14
Intag av radioaktiva ämnen	16
Matematiska modeller	17
Åtgärdsnivåer	19
Naturlig strålning	19
Radioaktiva ämnen i kol	19
Konsekvenser av koleldning	20
Kolaska i byggnadsmaterial	20
Upptag i växter	21
Jämförande mätningar	21
Slutsats	23
Slutrapporter från NKA/REK-programmet	25

NORDISK RADIOEKOLOGI

En sammanfattning av 4 års
nordiskt samarbete

J. O. Snihs

Inledning

Radioaktiva ämnen förekommer i mark, vatten och luft, i växter, djur och människor. Huvuddelen därav är av naturligt ursprung, en mindre del från tidigare atombombsprover och en ännu mindre del från kärnkraftverksamhet. De radioaktiva ämnena i marken transporteras huvudsakligen via vatten från land till hav och sprids via vattenströmmar eller sedimenterar på havets botten. Under denna transport från land till hav och sediment kan en del av de radioaktiva ämnena genom upptag passera växt- och djurliv inklusive människan och ge upphov till en stråldos. Läran om denna transportprocess och fördelning av radioaktiva ämnen i naturen kallas radioekologi.

Under en 4-årsperiod från 1981 till 1985 har nordiska radioekologer samarbetat i gemensamma forskningsprojekt avseende radioaktiva ämnens förekomst och spridning i Norden. Verksamheten har finansierats genom nordiska (NKA) och nationella bidrag. NKA har under nämnda period

bidragit med ca 4 miljoner NOK och de nationella bidragen har varit minst av samma storlek. Verksamheten har styrts av en styrgrupp, vars medlemmar framgår av appendix. Arbetet har avsett såväl tänkta situationer, t ex reaktorolyckor, som verkliga förhållanden på grund av normaldriftens utsläpp från kärnkraftverk och upparbetningsanläggningar, utsläpp av naturligt radioaktiva ämnen från kolkraftverk och nedfall från tidigare atombombsprover.

Arbetet har resulterat i ett nära hundratal publikationer inklusive 3 doktorsavhandlingar. För varje delområde finns en sammanfattande slutrapport publicerad i NKAs publikationsserie 1985-86.

Huvudförfattare är resp medlem i styrgruppen. Det har varit 2 stora nordiska radioekologiseminarier och ett flertal mindre seminarier om speciella frågor. Det nordiska samarbetet har haft stor betydelse för att upprätthålla och vidga det radioekologiska kunnandet som är nödvändigt för att beräkna och studera omgivningskonsekvenserna av kärnkraftverksamheten inklusive dess avfallsproblem.

Mycket finns ännu att studera och upptäcka som ger bättre bild av konsekvenserna av de verksamheter i och utanför Norden som genom radioaktiva utsläpp påverkar vår livsmiljö i de nordiska länderna. Det nordiska radioekologisamarbetet bör därför fortsätta.

Radioaktiva ämnen i nordiska vatten

Uppkomst

I havsvatten som omger de nordiska länderna finns radioaktiva ämnen av olika slag. En del har ett naturligt ursprung som t.ex uran, kalium, torium, radium m.fl och de har transporterats från vittrad mark via floderna till havet. Det ständiga tillskottet av ämnen motsvaras av en ständig bortförsel genom sedimentering på havsbotten. Dessutom sker en utströmning från innanhav som Östersjön till ytterhav som Nordsjön. Ett flöde av radioaktiva ämnen i vatten sker också i motsatt riktning.

En annan del av havets radioaktivitet beror på olika slag av mänsklig verksamhet. I de tidigare atombombsproven i atmosfären på 50- och 60-talen bildades stora mängder konstgjort radioaktiva ämnen som spreds över hela jordklotet via luften och deponerade torrt eller med regn ned på mark och vatten. Fenomenet kallas fallout, som också är den gemensamma beteckningen på dessa ämnen. De mera långlivade ämnena som t.ex cesium-137 och strontium-90, halveringstid ca 30 år, finns fortfarande i mätbara koncentrationer i hav, på land, i föda och i människan.

Användningen av kärnkraft innebär också vissa utsläpp av konstgjort radioaktiva ämnen till miljön, till luft och vatten. De mer långlivade ämnena som släpps ut i luft och som ej är gasformiga kommer förr eller senare också i havet. Där sprids de till andra hav och/eller sedimenterar. Även kraftverk med annat bränsle än uran t ex kol och torv sprider radioaktiva ämnen i luft och vatten. Då är det fråga om uran, radium, polonium m.fl naturligt radioaktiva ämnen.

Vad händer med dessa radioaktiva ämnen som på olika sätt hamnat i haven? Alla hinner inte sedimentera till havsbotten eller föras ut till de stora haven. En del "dör ut" på grund av radioaktivt sönderfall, vilket är det ofrånkomliga slutet för alla radioaktiva ämnen även de som sedimenterat eller förts bort till andra hav. En del tas upp av växter och djur vilka som födoämnen transporterar de radioaktiva ämnena vidare till människan, där de genom att avge joniserande strålning åstadkommer en stråldos som medför en viss hälsorisk.

Hälsorisker

Denna hälsorisk för individen är med nuvarande strålnivåer mycket liten. Den naturliga strålning kroppen utsätts för medför en oundviklig risk för cancer av storleksordningen 10^{-5} - 10^{-4} per år (en hundra del till en tionde del promille per år eller 1-10 personer av 100.000 personer kan få cancer pga naturlig strålning) och de

konstgjort radioaktiva ämnena kanske en hundradel av detta. Det kan dock finnas variationer på grund av levnadsvanor och lokala förhållanden. Stråldoserna kan också öka på grund av ökade utsläpp t.ex genom flera verksamheter eller på grund av någon olycka.

Även om stråldoserna är låga för varje individ kan de sammantaget för alla berörda människor utgöra en icke försumbar belastning från hälsosynpunkt för samhället. Denna sammanlagda stråldos till många människor kallas kollektivdos (och uttrycks i enheten mansievert (manSv) där "man" står för människa och "sievert" för dos).

Kollektivdosen i en befolkning kan inte mätas utan får beräknas genom att kombinera matematiska modeller och några mätningar i väl valda punkter. Hur dessa mätpunkter bör väljas och hur beräkningarna skall göras är en del av det radioekologiska problemområdet.

Varför behövs kännedom om kollektivdosen? Varje verksamhet bör ju rimligen medföra mer nytta än skada för människorna. Ett mått på skadan är den uppkomna kollektivdosen som således bör vägas mot nyttan. Man kan dock minska de skadliga följderna genom olika skyddsanordningar i den anläggning som ger radioaktiva utsläpp t.ex förbättrade filter. Hur många och sofistikerade filter behövs? Förbättrade skyddsanordningar minskar kollektivdoserna men ökar också kostnaderna. Till sist har man nått en punkt när det inte längre är rimligt att gå längre i skyddet; den resulterande minskningen av kollektivdosen på grund av ytterligare skydd är för liten i förhållande till den extra kostnaden för förbättrat skydd. Man har uppnått ett optimum. Optimering av strålskyddet är en huvudregel i strålskyddsverksamheten och kännedom om utsläppens storlek, deras spridning, resulterande aktivitetsnivåer i omgivningen och stråldoser till människan ger underlag för beräkningar av kollektivdosen, som kan användas i optimeringsanalyser.

Undersökningars uppläggning

Hur utförs de undersökningar och mätningar som kartlägger den radioaktiva miljön i de nordiska vattnen? Fyra faktorer är

väsentliga: provtagning, mät- och analysteknik och samarbete. Med samarbete över gränserna kan lokala mätningar knytas ihop till regionala och ibland globala bilder av de radioaktiva ämnens spridning i miljön. Det nordiska samarbetet inom NKA är ett bra exempel på hur resultaten av små nationers begränsade insatser genom samarbete knyts ihop för att förklara de radioaktiva föroreningarnas regionala konsekvenser.

Undersökningar sker genom provtagningar i Östersjön, de danska farvattnen och Nordsjön längs norska kusten över till Grönlands kustområden. Men de sker också genom experimentella försök i laboratorier eller genom storskaliga undersökningar i kontrollerad miljö som i biotestsjön i Forsmark. Dessa undersökningar kompletteras genom teoretiska modeller som illustrerar i matematiska termer de resultat som fältundersökningar har givit.

Bioindikator

Den radioaktiva miljön är alltid dynamisk till sin karaktär. Ämnena sprids med vattnets rörelser, tas upp av växter och djur, sedimenterar, löses åter upp och avges till vatten osv. I denna växelverkan, som kan beskrivas med matematiska modeller, finns bestämda dock ej alltid kända och konstanta relationer mellan de radioaktiva ämnens upptag och koncentration i olika växter och djur. Ämnena tas upp olika beroende på ämnets karaktär och kemiska sammansättning, vattentemperatur, salthalt i vattnet osv. Vissa havsväxter och djur har egenskapen att ackumulera ämnen i vatten mycket mera än andra. Därigenom kan de utnyttjas för att lättare upptäcka och kontrollera de radioaktiva ämnena i miljön. De kallas för bioindikatorer och två viktiga sådana har identifierats: blåmussla (*Mytilus edulis*) och blåstång (*Fucus vesiculosus*). De ackumulerar 100 till 10.000 gånger dvs koncentrationen av radioaktiva ämnen i blåmussla och blåstång i torkat skick är 100 till 10.000 gånger högre än i omgivande vatten. 1 kg torkad blåstång kan således

innehålla lika mycket som 10 m^3 vatten och ur mätsynpunkt är det naturligtvis mycket lättare att mäta 1 kg än 10 ton.

Denna bioackumulering gör det möjligt att mäta och följa spridningen av även små utsläpp av radioaktiva ämnen i vatten.

Spridning av utsläppta ämnen i havet och upptag i bioindikatorer och andra växter och djur varierar vid olika kärnkraftverk.

Undersökningar har gjorts utanför de finska och svenska kärnkraftverken. Koncentrationen av radioaktiva ämnen utanför kärnkraftverk avtar ju längre bort man kommer från verket något snabbare än omvänt proportionellt mot avståndet. Detta innebär t.ex att koncentrationen på 4 km avstånd är mindre än halva koncentrationen på 2 km. Avståndsberoendet varierar något för olika platser.

Den biologiska ackumulation är också olika på olika platser. Accumulationen i blåstång t.ex kan variera en faktor 50 mellan de olika platserna. Bioackumulationen utanför Barsebäck t.ex är betydligt större än utanför Ringhals. Laboratorieförsök under kontrollerade förhållanden har ej lyckats förklara dessa skillnader men de kan bero på att utsläppen från olika kärnkraftverk har andra föroreningar som kemiskt kan påverka de radioaktiva utsläppens bioackumulation olika.

Det finns också andra faktorer som påverkar bioackumulationen. Ökad salthalt i vattnet minskar upptaget i både blåmussla och blåstång. Upptaget i Nordsjön kan således för ämnen som cesium och zink vara mindre än hälften av upptaget i Östersjön. Andra ämnens upptag som cerium och americium påverkas inte nämnvärt av salthalten. Ökad temperatur kan öka upptagshastigheten av ämnen som cesium, zink och kobolt men ej av cerium, europium, americium och curium. Ökningen kan vara en faktor 2 när temperaturen ökar från 4°C till 20°C (Se mera om detta under "Biotestsjön" nedan). Upptaget i växter kan också påverkas av ljusförhållanden. Upptaget av cerium är t.ex 4 gånger

större när det är ljust än när det är mörkt. För många ämnen har dock ingen ljuseffekt kunnat påvisas.

En radionuklid som upptagits av en bioindikator utsöndras så småningom med en hastighet som beror på årstid, långsammare på vintern än på sommaren, på slag av bioindikator och på slag av radionuklid, t.ex plutonium långsammare än cesium. Den biologiska halveringstiden för radionuklider i en bioindikator är av storleksordningen månader. Genom biomassans tillväxt under året ändras också den massa radionukliden fördelar sig i dvs dess aktivitetskoncentration förändras.

Särskilda modellstudier och mätningar har utförts avseende upptag av radioaktivt kobolt (Co-60) på olika avstånd utanför Barsebäck. Co-60 är en s.k aktiveringsprodukt som bildas inne i reaktorn genom bestrålning av metallpartiklar (crud) i reaktorvattnet. Den totala mängden Co-60 i Kattegatt har beräknats och jämförts med den utsläppta mängden. Därav har medeluppehållstider i Kattegatt kunnat beräknas till 2-3 månader. Stråldosen till en människa som konsumerar 100 kg fisk per år från Kattegatt blev 1982-83 ungefär 10^{-5} mSv/år på grund av Co-60. Detta motsvarar ungefär 0,2% av dosen av Cs-137 som huvudsakligen kommer från upparbetningsanläggningen i Sellafield och 10^{-3} % (en tusendels procent) av den naturliga stråldosen. Stråldosen från andra utsläppta radioaktiva ämnen i vatten från Barsebäck och även Ringhals ligger totalt inom en faktor 2-3 gånger ovannämnda dos.

Med hjälp av samma data kan man också studera tidsvariationer av Co-60 halten i blåstång i relation till variationerna av utsläppen från verket och försöka utarbeta en modell som sedan kan användas för att förutse konsekvenserna av ett utsläpp - och tvärtom, som kontroll av ett utsläpp. Resultat från 1983-84 visas i fig 1.

En bioindikator kan alltså vara ett praktiskt instrument som underlättar mätningarna på grund av att den ackumulerar radioaktiva ämnen. Men den är också känslig för en rad faktorer som nämnts ovan

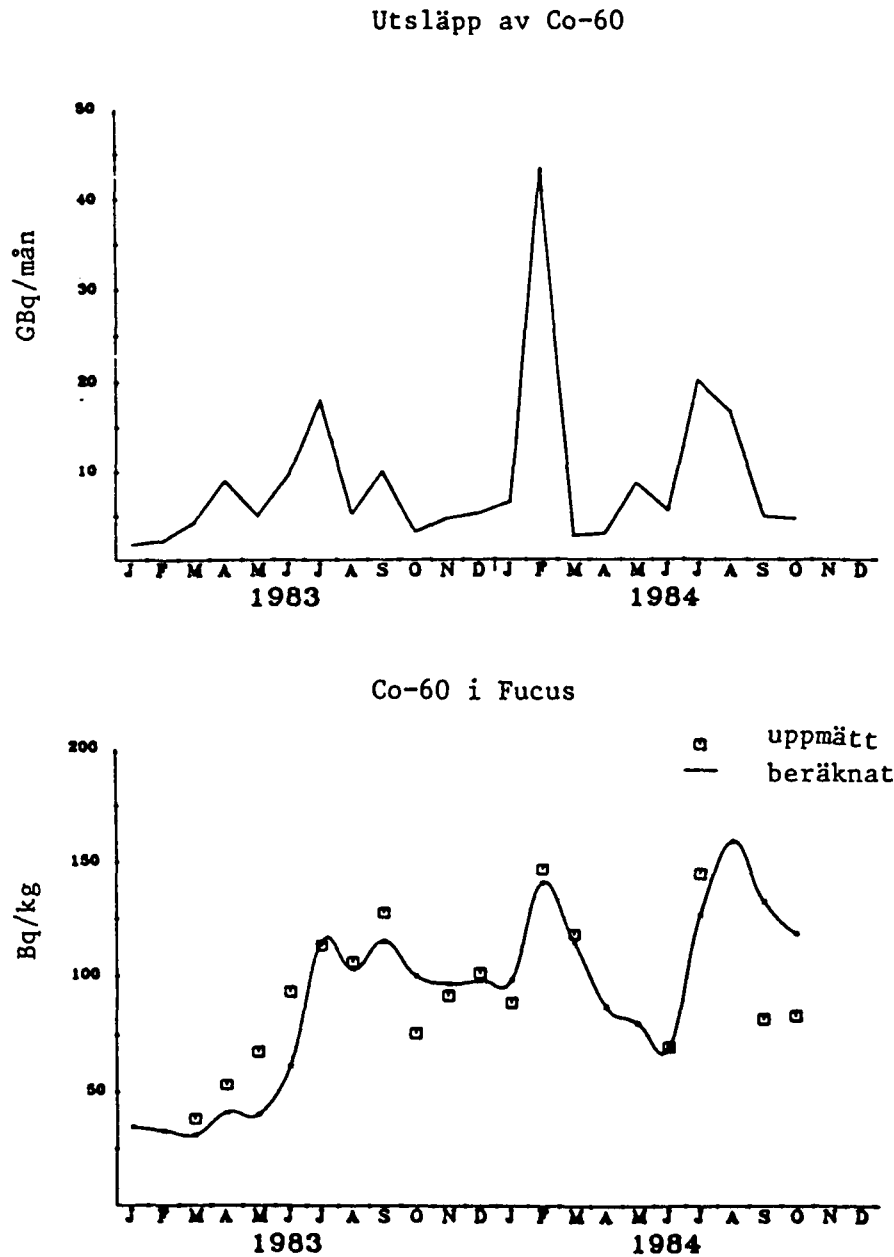


Fig 1. Utsläpp och därav beräknad koncentration av det radioaktiva ämnet Co-60 i Fucus (blåstång) jämfört med uppmätta värden.

och det är därför nödvändigt att känna dess egenskaper. Hittills gjorda undersökningar i ett nordiskt samarbete bör fortsätta för att närmare studera dessa egenskaper och deras eventuella förändringar i framtiden. Med god kännedom därom kan en bioindikator utnyttjas för att följa de radioaktiva utsläppens spridning och konsekvenserna därav från strålskyddssynpunkt. Den kan också användas för att upptäcka och beräkna okända utsläpp t.ex på grund av en olycka.

Storskaliga undersökningar

Flera storskaliga undersökningar har hittills utförts i nordiska havsvatten. Det s.k Panskandinaviska fucusprojektet har syftat till att beskriva spridningen av radioaktiva ämnen i Nordsjön och Nordatlanten. Utsläpp från upparbetningsanläggningen i Sellafield (Windscale) av cesium-137 och teknetium-99 har kunnat följas i avtagande koncentrationer i danska farvatten (ungefär en faktor 100 jämfört med vattnen utanför Sellafield) längs norska kusten över till Grönland och längs dess kuster i ett gigantiskt marinbiologiskt spridningsförlopp, mer än 7.000 km. Plutoniumutsläppen från Sellafield kan bara spåras till de brittiska och irländska kustvattnen. Storleksordningen en procent av utsläppet från Sellafield sprids till Östersjön.

En annan storskalig undersökning var den s.k Gaussexpeditionen. Det var en gemensam tysk-nordisk undersökning av radioaktiva ämnens förekomst i Östersjön i syfte att dels få en "ögonblicksbild" av aktivitetsnivåer över ett större geografiskt område och dels jämföra provtagning och mätteknik. IAEA var också representerat i vissa delar av expeditionen. Halten cesium-137 i *Macoma baltica* (Östersjömussla) var 0.5-3 Bq per kg torr vikt och i crustaceer (kräftdjur) 4-15. Plutoniumhalten var respektive 0.02-0.06 och 0.03-0.38 Bq per kg torr vikt. Halten teknetium-99 i vatten var 0.07-0.1 Bq per m³. Dessa halter härrör huvudsakligen från fallout och kan anses vara normala.

Dessa och andra fältundersökningar speciellt avseende vattnen utanför kärnkraftverken har gjort det möjligt att beräkna totala stråldoser till människor orsakad av fiskkonsumtion. Den fisk som fångas t.ex i Kattegatt innehåller spårmängder av radioaktiva ämnen med olika ursprung: naturligt radioaktiva ämnen, fallout från tidigare atombombsprover, utsläpp från Sellafield och utsläpp från Barsebäck och Ringhals. Stråldoserna därav blir, uttryckta som kollektivdos (summan av alla individdoser) enligt tabell 1.

Källa	Kollektivdos per år (1984)
Barsebäck o Ringhals	0.01 manSv
Fallout	0.1
Sellafield	1
Naturligt polonium-210	10

Tabell 1. Kollektivdoser orsakade av radioaktiva ämnen av olika ursprung i fisk som fångas i Kattegatt och konsumeras.

Den totala naturliga stråldosen ligger ytterligare 10-100 gånger högre än det högsta värdet ovan. Omgivningskonsekvenserna av utsläpp från Barsebäck och Ringhals kan alltså i detta perspektiv sägas vara utomordentligt små.

Biotestsjön

För att bygga matematiska modeller för sambandet mellan radioaktivt vattenutsläpp och resulterande stråldos till människor behövs direkta

mätningar på fisk som kan konsumeras. De uppmätta halterna i fisk kan sedan relateras till andra parametrar, t.ex aktiviteten i det vatten fisken vistas, som i sin tur kan relateras till utsläppet och avståndet osv.

Problemet med denna indirekta beräkning av dosbidrag från fisk på olika avstånd från utsläppen är att fisken rör sig i vatten med varierande halter av radioaktiva ämnen. Ett sätt att få säkrare data till modeller kan vara att finna en direkt korrelation mellan fisk och de gängse använda bioindikatorerna.

Ett viktigt verktyg för att lösa detta problem utgör biotest-anläggningen i Forsmark. Biotestsjön är ett avstängt havsområdet på ca 1 km² dit utsläpp från Forsmark kärnkraftstation leds och där fisk och andra organismer kan utforskas metodiskt. Isoleringen av biotestsjön, t.ex för in- och utvandring av vuxen fisk, är av stort värde. Mätningar på olika fiskarter ger information om den maximalt tänkbara anrikningen av ett känt utsläpp av radionuklider och därmed maximalt tänkbar dos. Med anrikning menas koncentrationen av radioaktiva ämnen i fisk i förhållande till koncentrationen i vatten.

För ett känt utsläpp av radionuklider från Forsmark kraftstation till biotestsjön blir exponeringen känd för alla organismer av intresse i ett ekosystem, inklusive de fiskpopulationer, som levt i biotestsjön i generationer. Härigenom kan man få fram relationer för fisk till de indikatororganismer, som finns även i ett större geografiskt område, t ex Östersjön. De mätresultat man har i sin hand från t.ex blåmussla kan översättas till halterna i fisk.

Koncentrationsfaktorerna som iakttagas för bioindikatororganismer som alger och musslor i biotestsjön är av samma storleksordning som rapporteras från närområdet till andra kärnkraftverk. Däremot är koncentrationsfaktorerna för fisk betydligt högre i biotestsjön än i viltfångad fisk vid utsläppen. Detta beror på att fisk hela tiden varit utsatt för samma exponering som alger och musslor och således

ger oss en maximalt tänkbar anrikning och koncentration även för fisk.

En viktig miljöfaktor, som skiljer närområden för utsläpp från kärnkraftverken från fjärrområden är temperaturen. Närområdet är uppvärmt av kylvattnet, vars temperatur ökar med ca 10°C när det passerar kraftverket. Denna temperaturökning av kylvattnet påverkar upptag, utsöndring och koncentrationsnivåer av radioaktiva ämnen i biota. Ett stort antal experiment och fältundersökningar har genomförts för att beskriva dessa effekter både för stabila och aktiverade metaller. Erfarenheterna visar att såväl upptags- som utsöndringshastigheten fördubblas med en temperaturförhöjning av 10°C . Den biologiska halveringstiden för radioaktiva ämnen, som testats på bl a abborre vid biotestsjön, är således två gånger så lång vid $+5^{\circ}\text{C}$ jämfört med $+15^{\circ}\text{C}$.

Ett annat viktigt område är rörligheten hos de radioaktiva ämnen, som deponerats i sedimenten. Ett flertal fysikaliska och kemiska processer kan återföra dessa ämnen i den biologiska cirkulationen, varvid sedimenten fungerar som en källa vid sidan av de direkta utsläppen. Fältstudier som har bedrivits i kustområden utanför Lovisa kärnkraftverk i Finland, visar att kobolt-60 (Co-60) och silver-110 (Ag-110) har benägenhet att lämna sedimenten vid låga syrgas(oxygen)halter. I bottenarna i biotestsjön, som före invallningen var exponerade och fattiga på fina sediment, ligger nu ca 4% av den totalt utsläppta mängden Co-60 deponerat. Halterna av t ex Co-60 visar god korrelation med halten av organiskt material, vilket gör de radioaktiva ämnena lätt tillgängliga för vidare transporter i näringskedjan och understryker sedimentens roll som sekundär källa för radioaktiva ämnen. Sedimenten kan dock aldrig bli en större källa än summan av alla utsläpp och fallout.

Konsekvenser av reaktorolyckor

Hur människan bestrålas av ett radioaktivt utsläpp

Resultaten av mätningar i nordiska innanhav och på land visar konsekvenserna av kärnkraftens normala utsläpp, utsläppen från upparbetningsanläggningar och från tidigare kärnvapenprover. Men dessa resultat ger också vägledning för uppskattning av konsekvenserna av en reaktorolycka. Det är dock ett flertal faktorer och omständigheter som inverkar på dessa konsekvenser t.ex utsläppets kemiska och radioaktiva sammansättning, om utsläppet sker i luft eller i vatten, meteorologiska förhållanden, årstid, omgivningens utseende och användning m.m.

Det nordiska projektet om konsekvenser av reaktorolyckor har omfattat 12 olika underprojekt som var och en har försökt belysa något delproblem och ge ökade kunskaper på området.

Vid en allvarlig olycka med radioaktivt utsläpp i luften (en radioaktiv plym) kan människor bestrålas genom inandning av radioaktiva ämnen, genom direkt strålning från plymen och genom strålning från de radioaktiva ämnen som fallit ned på marken. Bestrålningen från utsläppet minskar om personen stannar inomhus. Strålningen från plym och mark kan därigenom beroende på byggnadsmaterial och hustyp reduceras en faktor 10-100. Risken för inandning av radioaktiva ämnen minskar också i synnerhet om ventilationen i huset kan stängas av innan plymen når fram och slås på igen när plymen har passerat men även på grund av husets filtrerande effekt. Radioaktiva partiklar fastnar till en del i otätheter och andra passager till huset och luften filtreras med 50% eller mer.

Nedfall av radioaktiva partiklar

Radioaktiva partiklar i plymen fälls ut på mark och byggnader genom torr eller våtdeponering (regn). Den våta deponeringen är ungefär densamma på olika typer av horisontella ytor medan den torra deponeringen kan vara mycket mindre på släta ytor än på skrovliga och bevuxna ytor. För radioaktiva partiklar i normalutsläpp från kärnkraftverk och i fallout är våtdeponeringen helt dominerande, åtminstone i nordiska klimat. Den har studerats genom mätningar på fallout dvs nedfall från kärnvapentester. Om den torra deponeringen vet man också en del speciellt avseende jordbruksområden. Däremot är torrdeponering på hus och vägar mindre känd och har därför studerats i de nordiska projekten. Undersökning och mätningar har avsett cesium-137 (Cs-137) från fallout och det naturligt radioaktiva ämnet beryllium-7 (Be-7). Deponeringshastigheten är liten (av storleksordningen 0.01 cm/sek) och kan vara något högre i landsbygdsmiljö än i stadsmiljö. Den är också beroende på ämnenas kemiska egenskaper. Värdet på den torra deponeringen varierar i olika utredningar men ligger normalt i området 0.01-0.1 cm/sek för partiklar, 0.1-1 för oorganiskt jod och 0.001-0.01 för organiskt jod med större värden för jordbruks- och skogsmiljö och mindre för stadsmiljö.

Rörlighet och borttransport av radioaktiva ämnen

Radioaktiva ämnen som deponerat på hustak tvättas delvis bort av regn och av snösmältning. Denna s.k dekontaminering har studerats i experimentella undersökningar. Det har visat sig att resultaten mycket beror på väderförhållanden och takets egenskaper. Tjärpapptak håller kvar de radioaktiva ämnena bättre än t.ex plåttak. Dekontamineringen kan av dessa skäl variera en faktor 2 till 10 dvs takets aktivitet reduceras ned till ca 50-10% av den ursprungliga aktiviteten.

Radioaktiva ämnen som deponerat på marken kommer att till viss del föras bort av regn och smältvatten till djupare jordlager eller till

bäckar, floder, sjöar och hav. I storskaliga undersökningar på fallout i Finland har tidigare undersökningar visat att ungefär 40% av strontium-90 (Sr-90) och cirka 7% av cesium-137 (Cs-137) förs bort från marken genom nederbörd.

De radioaktiva ämnen som på detta sätt borttransporteras till vattendrag sedimenterar eller förs vidare med floder till havet. Cs-137 sedimenterar lättare, eftersom det ofta är bundet till partiklar, än Sr-90, som ofta föreligger i jonform, och den relativa mängden därav i förhållande till avrinning från land och nedfallet direkt på vattenytan är beroende av antalet och storleken av vattendrag och av vattendragets egenskaper (lägre värden i strid flod än i en lugn insjö t.ex). I totala mängdbalansen är dock normalt åtminstone i ett kortare tidsperspektiv (10 till 100-tals år) sedimenterade mängder radioaktiva ämnen i sjöar och floder av mindre betydelse jämfört med det som fallit ned på marken och det som transporterats och transporteras ut i havet. Sedimenten utgör dock en effektiv fälla för en del av de radioaktiva ämnena och de blir svårtillgängliga i den bioprocess som leder till bestrålning av människor. Men det finns också processer och förhållanden som kan återföra ämnena till vattenfasen igen och därigenom bli tillgängliga för upptag av fiskar o dyl (se ovan under "Biotestsjön"). Det bör framhållas att sedimentation också är en viktig process i havet.

Avrinningen beror på en rad faktorer som t.ex jordlagrets tjocklek och egenskaper, mängd omgivande vattendrag, topografi m.m. och årstid. Vårens snösmältning kan innebära en något effektivare borttransport av radioaktiva ämnen som deponerat på snö och is än regn kan borttransportera radioaktiva ämnen på marken. Under vinterförhållanden kan också marken dekontamineras genom snöröjning. Är marken frusen, täckt med ett islager och däröver snö kan deponerade radioaktiva ämnen elimineras från ett belagt område till nästan 100% om snön tas bort. Töväder och regn kan dock försämrat resultatet om de radioaktiva ämnena hinner genomtränga snö och is och rinna ner i marken.

Människans intag av radioaktiva ämnen via födan beror på ämnenas tillgänglighet i mark och vatten och på djurs och växters upptag av ämnena och på hur mycket man konsumerar av födan i fråga. De två mest studerade ämnena är Sr-90 och Cs-137 från fallout. De har mätts i mark, vatten och olika födoämnen under många år i de nordiska länderna och resultaten därav har nu samlats i en gemensam nordisk databank.

Rörligheten i marken är vanligtvis mycket större för Sr-90 än Cs-137. Nästan allt Cs-137 i mark finns i de översta 15 cm och är efter något år otillgänglig för upptag i växter åtminstone i lerrik jord. Förekomst av organiska ämnen i jorden ökar dock rörligheten och tillgängligheten av Cs-137. Sr-90 är normalt tillgänglig för rotabsorption under många år efter deponeringen men upptaget i växter minskar med ökad halt av organiska ämnen i jorden.

Intag av radioaktiva ämnen

Intag av radioaktiva ämnen via fisk är som regel av mindre betydelse än intag via andra livsmedel, under förutsättning att utsläppet vid en olycka huvudsakligen sker ut i luften. Genom anrikning kan koncentrationen av radioaktiva ämnen vara mycket högre i fisk än i omgivande vatten. Den högre koncentrationen kan dock förekomma i organ, som inte direkt konsumeras t.ex Sr-90 i fiskben, och har alltså mindre betydelse.

Undersökningar avseende fallout har visat hur dosbidraget av Cs-137 i olika födoämnen fördelar sig, se tabell 2. Detta kan ge viss vägledning om de långsiktiga konsekvenserna av ett stort utsläpp av Cs-137 över stora land- och vattenområden.

Födoämne	Procentuellt bidrag till stråldos
Mjölkprodukter	25-41
Kött	13-33
Spannmål	7-25
Insjöfisk	3-15
Saltvattenfisk	1-6
Renkött	5-20
Annat	6-9

Tabell 2. Procentuellt bidrag till årsdos från Cs-137 intag via olika födoämnen. Avser åren 1962-68. Bidraget från dricksvatten är försumbart.

Matematiska modeller

Alla de mätresultat som nu finns dokumenterade och lagrade i den nordiska databanken kan användas för att förbättra de matematiska modeller som finns för att förutse konsekvenserna av radioaktiva utsläpp i naturen t ex på grund av en olycka.

I det nordiska samarbetet har en basmodell använts med insatta värden på uppmätt aktivitet av det radioaktiva nedfallet (fallout), i olika födoämnen, på marken, i vatten osv i Norden. Därigenom har modellvärden förbättrats men har också svagheter och brister påvisats i de olika nationella mätprogrammen. Resultat från de olika nordiska länderna har inte alltid varit möjliga att jämföra på grund av olika provtagningsteknik, lokala variationer m m. Detta har på ett påtagligt sätt illustrerat behovet av kontakt och samarbete i det nordiska radioekologiarbetet.

Olika slags modeller har också testats. Det är modeller med olika grad av komplexitet dvs olika ambitionsnivå att efterlikna vad som egentligen sker med de radioaktiva ämnena i naturen. Det har visat sig att relativt enkla modeller (statiska modeller) kan vara fullt acceptabla för att belysa konsekvenserna sammantaget över en längre tidsperiod t ex ett år medan däremot mera komplexa modeller (dynamiska modeller) behövs för att beskriva aktivitetsnivåerna momentant och deras förändringar.

Det har utarbetats många modeller för beräkningar av konsekvenser av radioaktiva utsläpp vid olyckor. Bara i Norden finns det nära ett 20-tal olika modeller, alla med sina fördelar och nackdelar och med lite olika tillämpningar. De olika modellerna är som regel knutna till viss institution eller t o m person och genom direkt kontakt med dem har olikheter i modellerna kunnat förklaras och svagheter identifieras. Ett exempel är följande. En viktig parameter i konsekvensberäkningar är de åtgärder som lätt kan vidtas för att minska stråldoserna t ex borttagande av radioaktiva ämnen (dekontaminering), avrinning, lagring av livsmedel, skärmning etc. Denna parameter behandlas mycket olika i olika modeller och därvid påverkas naturligtvis slutresultatet.

Som ett resultat av dessa studier har man också i det nordiska samarbetet försökt förbättra en matematisk modell (Crac) för konsekvensberäkningar att bli en generell "idealmodell" som mera realistiskt ska återge konsekvenserna av ett radioaktivt utsläpp. Framför allt har förbättringar gjorts med avseende på beräkningar av spridning i luft och upptag i födoämnen.

Även om förbättringar har gjorts i modellen saknas fortfarande en hel del data och analysarbete för att erhålla den "idealmodell" som kan vara ett önskvärt slutmål.

Åtgärdsnivåer

Vid en reaktorolycka vidtas åtgärder utifrån den givna situationen och de förutbestämda eller förutdiskuterade åtgärdsnivåer och doskriterier som finns t ex att vid en viss strålnivå från marken på grund av nedfall av radioaktiva ämnen evakuera människor från området. Värdet och lämpligheten av sådana åtgärdsnivåer och doskriterier har diskuterats mot bakgrund av regler och erfarenheter nationellt och internationellt, av strålningens biologiska effekter och av kostnader att vidta åtgärder. Flera faktorer påverkar varandra men en del betyder mindre än andra, och detta är viktigt att känna till.

Det kan alltså vara så, om matvaror blivit förorenade med radioaktiva ämnen, att det kan löna sig, dvs få en större dosminskning till en lägre kostnad, att vara mera restriktiv med vissa matvaror än med andra.

Naturlig strålning

Radioaktiva ämnen i kol

Storskalig användning av kol och torv som bränsle i kraft- och värmeverk medför risker för effekter på hälsa och miljö. Under senare år har stora ansträngningar gjorts att med modern teknik minimera dessa risker. I en fullständig dokumentation av dessa energikällors inverkan på miljön ingår även en beskrivning av naturligt radioaktiva ämnen.

Koncentrationen av naturligt radioaktiva ämnen i kol är i allmänhet låg. Eftersom kol utnyttjas i mycket stora kvantiteter kommer trots detta icke obetydliga mängder av naturligt radioaktiva ämnen att föras upp med kolet från geologiska formationer. Huvuddelen återfinns bundet i olika askfraktioner medan en mindre del kan spridas till biosfären. Radiologiska aspekter på denna spridning har under det senaste årtiondet studerats av ett flertal forskare.

Det nordiska samarbetet med naturligt radioaktiva ämnen i kol inleddes med en litteraturstudie. Härvid framkom att kunskapen inom åtskilliga delområden var ofullständig.

Det följande arbetet har berört växters förmåga att ta upp radioaktiva ämnen ur aska, mätnoggrannhet, användning av aska i byggnadsmaterial samt en kritisk genomgång av publicerade beräkningar av stråldoser orsakade av koleldning.

Konsekvenser av koleldning

Genomgången av publicerade dosberäkningar visade att alla realistiska studier kommit fram till att doserna är mycket små och jämförbara med stråldoserna från kärnkraftverk dvs en bråkdel av den naturliga strålningen. Troligen erhålls den största delen av dosen genom inandning av askpartiklar. Det föreligger däremot ingen enighet mellan de olika studierna om vilken eller vilka radioaktiva ämnen från kol som ger det största bidraget till stråldoserna. Detta måste ses som en stark indikation på att kvantifieringarna av samband mellan utsläpp och därav följande stråldoser är baserade på ofullständig kunskap och mycket osäkra. Detta förhållande är en naturlig följd av att det är mycket svårt att följa utsläppt aktivitet i miljön. Varje bidrag, även från anläggningar med mycket dålig rening och ovanligt hög aktivitet i kolet, är mycket litet jämfört med den naturliga bakgrundsförekomsten av motsvarande radioaktiva ämnen. Tillskottet från koleldade anläggningar är alltid mindre än noggrannheten även hos de mest förfinade analyser och lokala naturliga variationer. Antagna spridningsvägar och upptagsfaktorer kan därför, till skillnad från situationen med konstgjort radioaktiva ämnen, ej verifieras med mätningar under realistiska betingelser.

Kolaska i byggnadsmaterial

Eftersom askhalten i kol är ca 10% kommer koncentrationen av de radioaktiva ämnena att vara tio gånger högre i askan än i kolet. Normal koncentration i aska är ett par gånger högre än

koncentrationen i normala berg- och jordarter och byggnadsmaterial. Detta gäller t ex radium som är moderämnet till den radioaktiva gasen radon. Oberoende undersökningar i Danmark, Finland, Norge och Sverige tyder dock på att inblandning av kolaska i betong leder till minskad eller oförändrad avgång av radon. Orsaken är ej helt klarlagd men kan vara att radonet är relativt hårt bundet i kolpartiklar och att kolaskan i betongen dessutom binder radon som bildas i betongmaterialet. Det finns därför ingen anledning att med hänvisning till askans innehåll av naturligt radioaktiva ämnen avstå från att använda den i byggnadsmaterial. Denna slutsats stöds även av motsvarande undersökningar i Nederländerna och USA.

Upptag i växter

En av de vägar varmed radioaktiva ämnen i kol kan ge stråldoser till människor är via upptag av växter och eventuell anrikning i animaliska livsmedel. Med anledning härav har olika grödor odlats på jord med varierande tillsats av kol- eller torvaska. I Danmark odlades spannmål på jord som blandats med stor andel kolaska. Det var inte möjligt att se något samband mellan andelen aska i jorden och innehållet av radioaktiva ämnen i grödan. I Finland pågår en undersökning där torvaska tillsätts torvjord. Preliminära resultat tyder på att detta ej ger någon mätbar effekt på grödans innehåll av radioaktiva ämnen.

Jämförande mätningar

En förutsättning för ett meningsfullt radioekologiskt samarbete mellan olika arbetsgrupper, institutioner och länder är att de mäter på ett sådant sätt att resultaten är jämförbara. Av det skälet har det utförts ett antal jämförande provtagningar och mätningar, s k interkalibreringar, och metodikbeskrivningar avseende analys- och mätteknik.

Som ett resultat därav har det publicerats en systematisk genomgång av de metoder, som används för omgivningsmätningar i de nordiska

laboratorierna. Rapporten beskriver hur provtagning planeras och utförs och hur proverna förbehandlas. För olika provtyper, som luft, regnvatten, jord, mjölk och andra livsmedel, land- och vattenburna sk bioindikatorer, havsvatten, fisk och sediment anges detaljerade behandlings- och analysmetoder för olika radioaktiva ämnen. Resultatanalys och hur resultat bör presenteras diskuteras också.

Interkalibreringsövningar har utförts avseende gammamätning av luftprover, extern gammastrålning samt helkroppsmätningar. I dessa övningar har deltagit 4 - 14 laboratorier beroende på övningen, och resultaten har publicerats separat för varje övning. Dessa övningar har praktiskt demonstrerat möjligheten och nyttan av nordiskt samarbete i dessa frågor. Genom detta samarbete har de nordiska laboratorierna fått kontakter och mät- och analystekniskt närmat sig varandra och nordiska resultat kan lättare jämföras och komplettera varandra.

I form av seminarium i anknytning till interkalibrering har forskarna kunnat kartlägga gemensamma problem samt ta del av andras erfarenheter att lösa dem. I syfte att åstadkomma utbytesbestämmare för analyser av plutonium och americium i omgivningsprover har Pu-242 och Am-243 lösningar anskaffats för gemensam nordisk användning. För att jämföra de olika laboratoriernas alfaspektrometri har kalibreringsmätningar utförts.

Tillförlitligheten i mätningar av förekomsten av naturligt radioaktiva ämnen i kol och kolaska studerades i det nordiska samarbetet genom att identiska prov sändes till olika laboratorier i Norden. Åtta laboratorier sände in resultat. Det visade sig att bestämningar som kan göras med gammaspektrometri visade god samstämmighet. Detta var väntat eftersom denna analysmetod redan tidigare varit föremål för jämförande mätningar. Bestämningar som kräver radiokemisk separation och anrikning och mätning med alfaspektrometri utfördes endast av ett fåtal laboratorier och resultaten visade stora avvikelser. Orsaken till detta är att en

varierande andel av de radioaktiva ämnena är mycket hårt bundna och svåra att laka ut kvantitativt ur askan.

Jämförelser av detta slag ger en utmärkt bas för fortsatt samarbete mellan de nordiska laboratorierna som sysslar med omgivningsmätningar. Kvalitén av de flesta analys- och mätmetoder för artificiellt radioaktiva ämnen i omgivningen var hög. Erfarenheterna har visat att det är viktigt att även i framtiden inkludera interkalibreringsprogram i de projekt, som omfattar analyser och mätningar i olika laboratorier. I synnerhet bör provtagnings- och förbehandlingsmetoder ingå i interkalibreringsövningarna.

Slutsats

Resultatet av det nordiska samarbetet inom radioekologin har lett till bättre teknik för provtagning, mätning och analys av radioaktiva ämnens förekomst i nordisk miljö, speciellt i nordiska vatten. Genom samarbetet har gemensamma resurser kunnat användas för att kartlägga och förklara den radioaktiva miljön. Beredskapen mot kärnkraftolyckor har förbättrats genom ökade kunskaper om konsekvenser och lämpliga motåtgärder. Kunskaperna har också ökat genom kontakter och seminarieverksamhet. Resultaten har publicerats i stort antal vetenskapliga rapporter. Genom denna ökade kunskap kan kärnkraftens konsekvenser bättre bestämmas och beräknas och därmed inkluderas också konsekvenserna i Norden av utomnordiska länders kärnkraftverksamhet.

Men brister i kunskap har också identifierats. Vad som sker med de radioaktiva ämnena i längre tidsperspektiv är av fortsatt intresse. Det nordiska radioekologisamarbetet är effektivt och ändamålsenligt och bör därför fortsätta.

Slutrapporter från NKA/REK-programmet

Titel

Beställes från

Towards more realistic assessment
of reactor accident consequences.

Institut for Energiteknikk
Postbox 40
N-2007 Kjeller

The sampling and analysing methods
of radionuclides used in the Nordic
countries for environmental samples.

STUK
PB 268
SF-00101 Helsingfors

Radiological implications of coal
and peat utilization in the Nordic
countries.

Statens strålskyddsinstitut
Box 60204
S-104 01 Stockholm

Radioecological methods.

Statens naturvårdsverk
Informationsenheten
Box 1302
S-171 25 Solna

Bioindicator studies in Nordic waters.

Forskningscenter Risø
Postboks 49
DK-4000 Roskilde

Denna sammanfattningsrapport.

Statens strålskyddsinstitut
Informationsenheten
Box 60204
S-104 01 Stockholm

