

## WERKMATERIAAL

Gevolgen voor het milieu  
van het Tsjernobyl Ongeluk  
en het Herstel:  
Twintig Jaar Ervaring

Rapport van de Deskundigengroep “Milieu” (EGE)  
van het UN Tsjernobyl Forum

Augustus 2005

## VOORWOORD

De explosie die op 26 april 1986 plaatsvond in de Tsjernobyl kernenergiecentrale, op nauwelijks 100 km afstand van de stad Kyiv in de voormalige Sovjet Unie, tegenwoordig Oekraïne en de daarop volgende periode van tien dagen brand in de reactor, leidde tot een ongeëvenaarde uitstoot van straling en tot niet te voorspellen negatieve gevolgen voor het publiek en het milieu. Het Internationaal Atoomagentschap, IAEA, heeft de gebeurtenis inderdaad gekenschetst als de “eerste kernramp in de geschiedenis van de mensheid” en de “grootste regionale uitstoot van radionucliden in de atmosfeer”.

De massale radioactieve besmetting dwong in 1986 tot de evacuatie van meer dan 100.000 mensen vanuit het getroffen gebied en tot de herplaatsing van nog eens 200.000 mensen na 1986 vanuit Belarus, de Russische Federatie en Oekraïne. Vijf miljoen mensen wonen naar schatting nog steeds in de door het ongeluk getroffen gebieden en moeten leven met de gevolgen voor het leefmilieu en de gezondheid alsmede de sociale en economische gevolgen. De nationale overheden van de drie getroffen landen hebben, ondersteund door internationale organisaties, hebben kostbare inspanningen geleverd om de besmetting te verhelpen, te voorzien in medische dienstverlening en om het sociale en economische welzijn van de regio te herstellen.

De gevolgen van het ongeluk bleven niet beperkt tot de grenzen van Belarus, Rusland en Oekraïne maar leidden tot aanzienlijke grensoverschrijdende verplaatsing in de atmosfeer met als gevolg de besmetting van talloze landen in Europa, die daardoor problemen ondervonden met de bescherming tegen straling van hun bevolking. In mindere mate echter dan in de drie meer getroffen landen.

Ondanks dat het ongeluk bijna 20 jaar geleden plaatsvond, worden de gevolgen van de kernramp nog altijd omgeven door tegenstrijdigheden. Daarom heeft het IAEA in 2003 het Tsjernobyl Forum ingesteld, in samenwerking met de Voedsel en Landbouworganisatie (FAO), het Ontwikkelingsprogramma van de Verenigde Naties (UNDP), het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP), het Bureau van de Verenigde Naties voor de Coördinatie van Humanitaire Zaken (UNOCHA), De Wetenschappelijke Raad van de Verenigde Naties inzake de Effecten van Radioactieve Straling (UNSCEAR), de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) en de Wereldbank en met de bekwame autoriteiten van Belarus, de Russische Federatie en Oekraïne. De opdracht aan het Forum was om door middel van een reeks van bestuurlijke vergaderingen en vergaderingen van deskundigen, “gezaghebbende eensluidende verklaringen” op te stellen over de gevolgen voor het milieu en de effecten op de gezondheid, die toe te schrijven zijn aan de blootstelling aan straling als gevolg van het ongeluk en om van advies te dienen inzake het herstel van het milieu en inzake speciale programma's voor de gezondheidszorg, alsmede om terreinen aan te geven waar verder onderzoek noodzakelijk is. Het Forum werd in het leven geroepen als bijdrage aan de ‘tien jaren’ strategie van de Verenigde Naties voor Tsjernobyl. Met de publicatie van ‘De Gevolgen voor de Mens van het Tsjernobyl Kernongeluk – Een Strategie voor Herstel’ werd de strategie in 2002 gelanceerd.

Twee groepen van deskundigen uit twaalf landen, inclusief Belarus, Rusland en Oekraïne, en van de ter zake doende organisaties hebben in 2003-2004 de gevolgen ingeschat van het ongeluk op het milieu en de gezondheid. Vroeg in 2005 hebben de groep “Milieu”, gecoördineerd door het IAEA, en de groep “Gezondheid”, gecoördineerd door de WHO, hun rapporten ter beoordeling van het Forum gepresenteerd. Beide rapporten werden beoordeeld en tijdens de vergadering van het Forum van 18-20 April 2005 goedgekeurd. Deze vergadering besloot onder andere ook om ‘de goedgekeurde rapporten te beschouwen als het gemeenschappelijke standpunt van de leden van het Forum, d.w.z van de acht organisaties van de Verenigde Naties en van de drie meest getroffen landen inzake de gevolgen voor het milieu en de gezondheid van het Tsjernobyl ongeluk en tevens als aanbeveling voor toekomstige maatregelen, d.w.z als overeenstemming binnen het systeem van de Verenigde naties’.

Dit rapport geeft de bevindingen en aanbevelingen weer van het Tsjernobyl Forum betreffende de gevolgen voor het milieu van het Tsjernobyl ongeluk. Het rapport van het Forum over de gevolgen voor de gezondheid is in voorbereiding om, onder de verantwoordelijkheid van de WHO, gepubliceerd te worden.

De deskundigengroep “Milieu” stond onder voorzitterschap van Dr. Lynn Anspaugh van de Universiteit van Utah, USA. De wetenschappelijke secretaris van deze groep en voor het totaal aan activiteiten van het Tsjernobyl Forum was Dr. Mikhail Balonov van de Afdeling Straling, Vervoer en Veiligheid inzake Afval, IAEA. In alle gevallen zijn de wetenschappers van de organisaties van de verenigde Naties, van de internationale gemeenschap en van de drie meest getroffen landen in staat gebleken om overeenstemming te bereiken over de opstelling van hun respectieve documenten. Het resultaat daarvan is het onderhavige rapport, nadat goedkeuring was verkregen door de leden van het Forum.

## **INHOUDSOPGAVE**

TOONAANGEVENDE SAMENVATTING	2
INLEIDING	2
RADIOACTIEVE BESMETTING VAN HET MILIEU	4
MILIEUTECHNISCHE TEGENMAATREGELEN EN HERSTEL	11
BLOOTSTELLING VAN DE MENS	18
DOOR STRALING VEROORZAAKTE EFFECTEN OP PLANTEN EN DIEREN	22
MILIEUASPECTEN SAMENHANGEND MET DE ONTMANTELING VAN DE AFSCHERMKAP EN MET DE BEHEERSING VAN RADIOACTIEF AFVAL	25

## **TOONAANGEVENDE SAMENVATTING**

### **INLEIDING**

Het doel van dit rapport is om een evaluatie te verschaffen, die met de laatste gegevens is bijgewerkt, van de effecten op het milieu als gevolg van het ongeluk met de Tsjernobyl Kernenergiecentrale, dat op 26 april 1986 plaatsvond. Ondanks dat er inmiddels bijna 20 jaar zijn verstreken na het ongeluk en aanzienlijke bedragen aan dergelijke evaluaties zijn uitgegeven, zijn er nog steeds veel tegenstrijdige rapporten en geruchten in omloop. Dit gezamenlijke rapport is opgesteld met de volledige samenwerking van het geheel aan ter zake doende organisaties van de Verenigde Naties en in samenwerking met de politieke vertegenwoordigers van de drie meest getroffen landen: Oekraïne, Belarus en de Russische Federatie. Daar komt bij, dat erkende wetenschappelijke deskundigen van de drie landen en andere internationale deskundigen de basis hebben gelegd voor het opstellen van rapporten ter beoordeling van de zittende leden van het Tsjernobyl Forum.

Het Tsjernobyl Forum is een politiek forum op hoog niveau, in het leven geroepen op aanraden van het Internationale Atoom Energie Agentschap (IAEA) in samenwerking met de Voedsel en Landbouworganisatie (FAO), het Verenigde Naties Agentschap voor de Coördinatie van Humanitaire Zaken (OCHA), de Ontwikkelingshulporganisatie van de Verenigde Naties (UNDP), het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP), de Wetenschappelijke Raad van de Verenigde Naties inzake de Effecten van Radioactieve Straling (UNSCEAR), de Wereld Gezondheidsorganisatie (WHO) en de Wereldbank, alsmede met de bekwame autoriteiten van Belarus, de Russische Federatie en Oekraïne. De oprichtingsvergadering van het Tsjernobyl Forum werd gehouden van 3-5 februari 2003.

Tijdens die vergadering is men tot het besluit gekomen om het Forum in te stellen als een altijd aanwezig aanspreekpunt voor de bovengenoemde organisaties. Als uitvloeisel daarvan besloot de oprichtingsvergadering van het Forum om het Tsjernobyl Forum op te zetten als een reeks van bestuurlijke vergaderingen, vergaderingen van deskundigen en openbare vergaderingen met het doel om gezaghebbende, eensluidende verklaringen op te stellen ten aanzien van de effecten op de gezondheid, die kunnen worden toegeschreven aan blootstelling aan straling als gevolg van het ongeluk en ten aanzien van de gevolgen voor het milieu als gevolg van de vrijgekomen radioactieve stoffen. Tevens zijn deze vergaderingen bedoeld om van advies te dienen voor herstel en voor speciale programma's voor de gezondheidszorg alsmede om terreinen aan te geven waar verder onderzoek noodzakelijk is en tenslotte om het navolgende referentiekader van het Forum te aanvaarden.

De doelstellingen van het Tsjernobyl Forum werden als volgt omschreven:

1. De huidige, gangbare wetenschappelijke inschattingen van de gevolgen op de gezondheid en het milieu van het Tsjernobyl ongeluk op lange termijn te onderzoeken en te verbeteren, met het oogmerk om gezaghebbende, eensluidende verklaringen te formuleren, die gericht zijn op:
  - de effecten op de gezondheid, die toe te schrijven zijn aan blootstelling aan straling ten gevolge van het ongeluk,
  - de gevolgen voor het milieu veroorzaakt door de bij het ongeluk vrijgekomen radioactieve stoffen, bijv. de besmetting van voedingsmiddelen en tevens
  - het aanpakken van die gevolgen die toe te schrijven zijn aan het ongeluk, maar niet het directe gevolg zijn van blootstelling aan straling of van radioactieve besmetting.
2. Lacunes te identificeren in het wetenschappelijk onderzoek met betrekking tot gevolgen van het ongeluk op gezondheid en milieu als gevolg van straling of radioactieve besmetting en terreinen aan te geven waar verder werk noodzakelijk is, uitgaande van een inschatting van het werk dat in het verleden al gedaan is en met inachtneming van de lopende activiteiten en projecten.
3. Het van advies dienen en het ondersteunen van wetenschappelijk betrouwbare programma's met betrekking tot het verlichten van de gevolgen van het ongeluk, inclusief het ondernemen van mogelijke gezamenlijke acties van de organisaties die deelnemen aan Forum, zoals:
  - herstel van besmette grond met het doel om het geschikt te maken voor een normaal en veilig gebruik als landbouwgrond en voor een veilig economisch en sociaal leven,
  - speciale zorg voor de gezondheid van de getroffen bevolking,
  - het meten van de lange termijn blootstelling van de mens aan straling en het aanpakken van de milieuaspecten die voortkomen uit het buiten bedrijf stellen van de afschermkap, alsmede
  - de controle op radioactief afval afkomstig van het Tsjernobyl ongeluk.

Het Tsjernobyl Forum zelf is doorgedaan als een organisatie op hoog niveau van leidinggevende functionarissen van UN agentschappen en van de drie meest getroffen landen. De werkelijke uitvoering van werkzaamheden is tot stand gebracht door twee groepen van deskundigen: een deskundigengroep "Milieu" (EGE) en een deskundigengroep "Gezondheid" (EGH). Elk van deze twee groepen bestond uit leden van erkende internationale wetenschappers, inclusief wetenschappers van de drie meest getroffen landen. Binnen deze twee groepen en de daarbinnen gevormde werkgroepen werden, ter ondersteuning van dit rapport, ontwerpdocumenten gemaakt, ter beoordeling van de leden van het Forum. De EGE werd gecoördineerd door het IAEA terwijl de EGH gecoördineerd werd door de WHO.

In alle gevallen zijn de wetenschappers van de UN organisaties, van de internationale gemeenschap en van de getroffen landen in staat geweest om overeenstemming te bereiken over de voorbereiding van hun respectievelijke ontwerpdocumenten. Na goedkeuring door de leden van het Forum en na een eindredactie van de ontwerpdocumenten, is het resultaat daarvan het onderhavige rapport met betrekking tot de gevolgen voor het milieu van het Tsjernobyl ongeluk. Een gelijksoortig rapport met betrekking tot de effecten op de gezondheid, die toe te schrijven zijn aan blootstelling aan straling als gevolg van het ongeluk, is door de deskundigengroep “Gezondheid” opgesteld ter beoordeling en goedkeuring van de leden van het Forum.

## **RADIOACTIEVE BESMETTING VAN HET MILIEU**

De betekenis van het Tsjernobyl ongeluk als de eerste kernramp in de geschiedenis van de mens wordt bepaald door de grootste regionale uitstoot van radionucliden in de atmosfeer en de daaropvolgende radioactieve besmetting van het milieu. Een aantal Europese landen kreeg te maken met verschillende hoeveelheden radioactieve besmetting. Onder deze landen waren de republieken van de voormalige Sovjetunie, nu Belarus, Rusland en Oekraïne. Voor al deze landen geldt, dat de Tsjernobyl Kernenergiecentrale is gelegen in de buurt van de gemeenschappelijke grens met die landen.

De neergekomen radionucliden ontleedden geleidelijk en verplaatsten zich binnen de atmosfeer, het waterig milieu, over land en in het stedelijke milieu. Dit deel beschrijft genoemde processen, die het patroon en de regelmaat van stralingseffecten bepalen, zowel bij de mens als bij de niet tot het menselijke geslacht behorende soorten.

### **Conclusies**

Uitstoot en neerslag / bezinking van radionucliden.

Gedurende tien dagen vond er vanuit Unit 4 een aanzienlijke uitstoot plaats, die radioactieve gassen, gecondenseerde drijfgassen en een grote hoeveelheid brandstofdeeltjes bevatte. De totale uitstoot van radioactieve stoffen bedroeg ongeveer 14 Ebq (status op 26 april 1986), onder meer bestaande uit 1,8 Ebq van het isotoop  $^{131}\text{I}$  (Jodium), 0,085 Ebq van het isotoop  $^{137}\text{Cs}$  (Cesium), overige isotopen van Cesium, 0,01 Ebq van het isotoop  $^{90}\text{Sr}$  (Strontium) en 0,003 Ebq aan radioactieve isotopen van Plutonium. De edele gassen maakten ongeveer 50 % uit van de totale uitstoot.

Ter toelichting: 11 Ebq = 1018 Bq (Becquerel; 1 Bq = verval van één radioactief atoom per seconde).

Grote delen van Europa werden tot op zekere hoogte getroffen door de uitstoot bij Tsjernobyl. Een totale oppervlakte in Europa van meer dan tweeduizend vierkante kilometer werd besmet met radioactief Cesium (meer dan 0,04 MBq van het isotoop  $^{137}\text{Cs}$  per vierkante meter), waarvan 71% in de drie meest getroffen landen, Belarus, Rusland en Oekraïne. De neerslag was buitengewoon heterogeen en werd sterk beïnvloed door het al dan niet regenen tijdens het passeren van de besmette luchtmassa's. Het isotoop  $^{137}\text{Cs}$  werd gekozen voor het in kaart brengen van de neerslag omdat dit makkelijk is te meten en vanwege de radiologische betekenis.

Het grootste deel van de radioactieve isotopen van Strontium en Plutonium kwam dichtbij de reactor neer (op minder dan 100 km afstand) omdat deze isotopen zich in grotere deeltjes bevonden.

Veel van de belangrijkere radionucliden in de uitstoot hadden een korte fysische halfwaardetijd, terwijl de radionucliden met een lange halfwaardetijd in kleinere hoeveelheden werden uitgestoten. Daarom zijn de meeste van de bij het ongeluk uitgestoten nucliden reeds lang ontleed (vervallen). De uitstoot van radioactieve isotopen van Jodium gaf direct na het ongeluk aanleiding tot zorg. Vanwege de noodsituatie en de korte halfwaardetijd van  $^{131}\text{I}$  waren er slechts enkele betrouwbare metingen beschikbaar met betrekking tot de ruimtelijke verdeling van radioactief jodium, die belangrijk is voor het bepalen van de schildklierdosissen. De huidige meting van  $^{129}\text{I}$  kan helpen bij het beter inschatten van de uitstoot van  $^{131}\text{I}$  en daarmee het reconstrueren van de schildklierdosis verbeteren. Daarna en voor de decennia die voor ons liggen, zal het isotoop  $^{137}\text{Cs}$  van het grootste belang blijven, met in tweede instantie  $^{90}\text{Sr}$ . Het isotoop  $^{134}\text{Cs}$  was voor de eerste jaren ook van belang. Op de langere termijn (honderden tot duizenden jaren) worden de isotopen van Plutonium en  $^{241}\text{Am}$  (Americium) beschouwd als de enige radionucliden die nog van belang blijven.

### **Stedelijk milieu**

Open oppervlaktes in stedelijke gebieden, zoals grasvelden, parken, straten, wegen, pleinen, daken van gebouwen en muren raakten besmet met radionucliden. Bomen, struikgewas, grasvelden en daken onder droge omstandigheden raakten meer besmet. Horizontale oppervlaktes, zoals stukken grond, grasvelden etc., raakten meer besmet onder vochtige omstandigheden. In het bijzonder werden hoge actieve concentraties van  $^{137}\text{Cs}$  gevonden rondom huizen waar de regen de radioactiviteit had verplaatst van de daken naar de begane grond. De neerslag in stedelijke gebieden in de dichtstbij gelegen stad Pripjat en de omliggende vestigingsplaatsen had aanvankelijk aanleiding kunnen zijn tot een aanzienlijke externe dosis, die gedeeltelijk werd afgewend door het evacueren van de bevolking. De neerslag van radioactieve materialen in andere stedelijke gebieden heeft aanleiding gegeven tot verscheidene bijdragen aan de dosis in de daaropvolgende jaren en blijft dat doen. Door regen en wind en door menselijke activiteiten, waaronder verkeer, wassen en schoonmaken van straten, is besmetting met radioactief materiaal gedurende 1986 en daarna aanzienlijk afgenomen in bewoonde en recreatieve gebieden. Deze processen hebben onder andere geleid tot besmetting in tweede instantie van rioleringsystemen en tot opslag van de besmetting in modder/slijk. Tegenwoordig is de verplaatsingssnelheid van lucht in de meeste plaatsen, die door radioactieve besmetting werden getroffen, terug op het achtergrondniveau van voor het ongeluk. De verhoogde verplaatsingssnelheid van lucht blijft vooral gehandhaafd boven onbewerkte grond in tuinen, moestuinen en parken.

### **Landbouwkundig milieu**

In de beginfase werd de besmetting van landbouwkundige beplanting en van dieren, die de nucliden nuttigden, beheerst door de neerslag van veel verschillende radionucliden direct aan de oppervlakte. De uitstoot van radioactieve isotopen van Jodium veroorzaakte onmiddellijk de grootste zorg, maar het probleem bleef beperkt tot de eerste twee maanden als gevolg van de korte fysische halfwaardetijd van acht dagen van het belangrijkste isotoop van Jodium,  $^{131}\text{I}$ .

Het radioactieve Jodium werd in rap tempo opgenomen in de melk in Rusland, Oekraïne en Belarus, met aanzienlijke schildklierdosissen tot gevolg, in het bijzonder bij kinderen. De gevolgen van het ongeluk in de rest van Europa varieerden, afhankelijk van het seizoen. Verhoogde concentraties van radioactief Jodium in melk werden waargenomen in sommige besmette, zuidelijk gelegen gebieden, waar het melkvee al buiten was.

Verschillende soorten gewassen, in het bijzonder groene groentes, waren tot op zekere hoogte al besmet met een mengsel van radionucliden, afhankelijk van de hoeveelheid neerslag en van de tijd van het groeiseizoen. De direct op planten gevormde neerslag was voor een periode van ongeveer twee maanden een bron van zorg.

De opname van radionucliden door de wortels van planten vanuit de ondergrond werd, na het vroege stadium van directe besmetting, steeds belangrijker en vertoonde een sterke afhankelijkheid van de tijd. De radio-isotopen van Cesium ( $^{137}\text{Cs}$  en  $^{134}\text{Cs}$ ) waren de nucliden die de grootste problemen veroorzaakten. Het isotoop  $^{137}\text{Cs}$  vormde, na het verval van  $^{134}\text{Cs}$ , nog altijd een probleem in sommige delen van Belarus, Rusland en Oekraïne. Daar komt bij, dat  $^{90}\text{Sr}$  voor problemen kon zorgen in het nabijgelegen gebied. Maar op grotere afstand van de reactor waren de hoeveelheden neerslag van  $^{90}\text{Sr}$  te laag. De hoeveelheid in de neerslag dan wel de aanwezigheid van andere radionucliden, zoals isotopen van plutonium en  $^{241}\text{Am}$ , waren te laag om door opname ervan door wortels voor werkelijke problemen voor de landbouw te zorgen.

Zoals kon worden verwacht, heeft zich in de beginfase over het algemeen een aanzienlijke afname voorgedaan in de opname van radionucliden door planten en dieren als gevolg van de weersomstandigheden, het fysisch verval, het doordringen van radionucliden in de grond en de afname van goede biologische condities in de grond. In het bijzonder in besmette, intensief bewerkte landbouwkundige systemen, doorgaans in de voormalige Sovjet Unie, heeft zich een aanzienlijke afname voorgedaan in het opnemen van  $^{137}\text{Cs}$  door planten en dieren, voornamelijk gedurende de eerste jaren. Gedurende de laatste tien jaar echter is een duidelijk waarneembare daling zeer gering geweest en was het moeilijk om halfwaardetijden die op lange termijn actief zijn, met precisie te bepalen.

De concentratie aan radioactief Cesium in voedingsmiddelen werd in de beginfase niet alleen beïnvloed door de hoeveelheden neerslag maar ook door de soorten grond, bestuurlijke praktijken en het soort ecosysteem. De grootste en hardnekkigste problemen in de getroffen gebieden doen zich voor in uitgestrekte landbouwkundige systemen met grondsoorten die een hoog gehalte aan organische componenten bevatten en met dieren die grazen in niet opgewerkte weilanden, die niet zijn omgeploegd of bemest. Dit heeft in het bijzonder gevolgen voor de bewoners van het platteland in de voormalige Sovjet Unie, die gewoonlijk als boer hun bestaan vinden en eigen melkkoeien bezitten.

Op de lange termijn blijft  $^{137}\text{Cs}$  in vlees en melk en in mindere mate in plantaardige voeding de belangrijkste bijdrage leveren aan de interne dosis voor de mens. Omdat de actieve concentratie van  $^{137}\text{Cs}$  in plantaardig zowel als in dierlijk voedsel langzaam is blijven afnemen gedurende de afgelopen tien jaar (3 tot 7 % per jaar), zal de bijdrage van  $^{137}\text{Cs}$  de dosis nog voor tientallen jaren blijven beheersen. Het belang van andere radionucliden met een lange halfwaardetijd,  $^{90}\text{Sr}$ , isotopen van Plutonium en  $^{241}\text{Am}$ , zal voor de dosis van de mens van geen betekenis blijven.

## **Bossen en bosachtig milieu**

Volgend op het Tsjernobyl ongeluk hebben planten en dieren in bossen en in bergachtige gebieden een hoge opname getoond van radioactief Cesium, waarbij de hoogst gemeten actieve concentratie aan  $^{137}\text{Cs}$  is gevonden in bosproducten als gevolg van het hardnekkig circuleren van radioactief Cesium in de ecosystemen van de bossen. Buitengewoon hoge concentraties aan  $^{137}\text{Cs}$  zijn aangetroffen in champignons, bessen en bij wild. Deze hoge concentraties hebben zich gedurende vele jaren gehandhaafd. Hoewel een algemene afname heeft plaatsgevonden in de mate van blootstelling via landbouwproducten, zijn hoge niveaus van besmetting blijven bestaan, via voedsel uit bosproducten, die in vele landen nog altijd de grenzen voor het nemen van maatregelen overschrijden. Het is te verwachten dat dit nog voor tientallen jaren het geval zal zijn. Daarom is het betrekkelijke belang van bossen in de bijdrage aan radiologische blootstelling van bevolkingsgroepen van verschillende getroffen landen toegenomen met de tijd. Het zal vooral de combinatie zijn van de naar beneden gerichte indringing in de aarde en het fysische verval van  $^{137}\text{Cs}$ , die zal bijdragen aan verdere, langzame, vermindering op lange termijn van de besmetting van voedsel uit bosproducten.

De hoge verplaatsing van radioactief Cesium naar korstmos op paden, naar vlees van rendieren en naar mensen is, na het Tsjernobyl ongeluk, opnieuw aangetoond in de poolgebieden en noordelijke gebieden van Europa. Het Tsjernobyl ongeluk leidde tot aanzienlijke besmetting van rendiervlees in Finland, Noorwegen, Rusland en Zweden en veroorzaakte grote problemen voor de Sami bevolking.

Hoewel het houtas hoge gehalten aan  $^{137}\text{Cs}$  kan bevatten en het as mogelijk aanleiding zou kunnen zijn voor hogere dosissen dan andere gebruiksmogelijkheden van hout, draagt het gebruik van hout en aanverwante producten slechts weinig bij aan de blootstelling van het gewone publiek. Het element  $^{137}\text{Cs}$  in hout is van ondergeschikt belang. Desondanks dienen dosissen in de houtpulpindustrie niet onderschat te worden.

Hoewel niet in hoge mate, leidden bosbranden in 1992 tot verhoogde actieve luchtconcentraties. De mogelijke radiologische gevolgen van bosbranden zijn veelvuldig besproken. Men verwacht echter niet dat deze leiden tot enig probleem met betrekking tot het verplaatsen van radionucliden vanuit besmette bossen, behalve mogelijk in de directe omgeving van de brand.

## **Water en waterig milieu**

De radioactiviteit van Tsjernobyl besmette niet alleen oppervlaktewateren dichtbij de locatie maar ook in veel andere delen van Europa. De aanvankelijke besmetting van water was hoofdzakelijk te wijten aan de directe neerslag van radionucliden op het oppervlak van rivieren en meren en werd beheerst door radionucliden met een korte halfwaardetijd (belangrijkste element  $^{131}\text{I}$ ). Gedurende de eerste weken na het ongeluk gaven actieve concentraties in het drinkwater van het Kyiv reservoir aanleiding tot grote zorg.

Gedurende de weken na de neerslag nam de besmetting van watersystemen snel af door verdunning, fysisch verval en absorptie van radioactiviteit door neerslagaarde. Het uitzakken van gesuspendeerde deeltjes naar het bodembezinksel speelde bij meren en reservoirs ook een belangrijke rol in het verminderen van de concentraties in water.

De aanvankelijke opname van radioactief Jodium door vissen was snel, maar de actieve concentraties namen spoedig af, hoofdzakelijk door fysisch verval. De bio-ophoping van radioactief Cesium in de watervoedselketen leidde tot aanzienlijke concentraties in vissen in de meest getroffen gebieden en in sommige meren tot in Scandinavië en Duitsland. Vanwege de in het algemeen lagere neerslag en lagere bio-ophoping waren de actieve concentraties van  $^{90}\text{Sr}$  in vis niet van betekenis voor de menselijke dosissen in vergelijking met radioactief Cesium. Dit is met name het geval omdat  $^{90}\text{Sr}$  zich ophoopt in het beenderstelsel en niet zozeer in eetbare spieren.

Op de langere termijn gaat de besmetting in tweede instantie door (op een veel lager niveau) tot op de dag van vandaag als gevolg van uitwassing van de elementen met een lange halfwaardetijd,  $^{137}\text{Cs}$  en  $^{90}\text{Sr}$ , uit besmette grond en het opwerken van bodembezinksels. Neerslaggebieden met een hoog organisch gehalte (veengrond) stoten meer radioactief Cesium uit naar oppervlaktewateren dan de gebieden met anorganische (minerale) grond. Vandaag de dag zijn de actieve concentraties in oppervlaktewateren laag. Daarom wordt bevloeiing met oppervlaktewater niet meer als een probleem gezien.

Brandstofdeeltjes die zijn neergeslagen in de bezinksels van rivieren en meren in de buurt van de Tsjernobyl kernenergiecentrale vertonen belangrijk lagere verwerkingssnelheden dan dezelfde deeltjes in aardegrond. De halfwaardetijd van deze deeltjes is bij benadering gelijk aan de fysische halfwaardetijd van de radionucliden  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{137}\text{Cs}$ .

Hoewel de actieve concentraties van  $^{137}\text{Cs}$  en  $^{90}\text{Sr}$  in water en vissen in rivieren, open meren en reservoirs tegenwoordig laag zijn, zijn de meren in Oekraïne, Belarus en Rusland met beperkte in- en uitgaande stromen ('gesloten' meren) de ergst besmette meren. Bovendien verkeren deze meren in een slechte staat met betrekking tot minerale voeding. Actieve concentraties van  $^{137}\text{Cs}$  in de vissen van sommige van deze meren zal tot ver in de toekomst besmetting blijven geven. Het eten van vis door de bevolking dichtbij een "gesloten" meer (bijv. het Kozhanovskoe Meer in Rusland) heeft bij sommige mensen de totale opname in het voedsel van  $^{137}\text{Cs}$  beheerst.

Als gevolg van de grote afstand tussen Tsjernobyl en de Zwarte en Baltische Zee en het verdunningseffect in deze zeeën, waren de actieve concentraties in zeewater veel lager dan in zoet water. De lage concentratie van radionucliden in water in combinatie met de lage bio-ophoping van radioactief Cesium in de levende organismen in zee, heeft geresulteerd in actieve concentraties in zeevis die geen zorgen baarden.

## **Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek en meting**

### **Algemene aanbevelingen.**

Gedurende de jaren na Tsjernobyl zijn de verschillende ecosystemen die het huidige rapport in ogenschouw neemt, intensief gecontroleerd en bestudeerd. Het mechanisme van verplaatsing / overbrenging en bio-ophoping van de meest belangrijke langdurig besmettende elementen,  $^{137}\text{Cs}$  en  $^{90}\text{Sr}$ , wordt nu over het algemeen goed begrepen. Er is daarom geen urgente noodzaak voor grootschalige, nieuwe onderzoeksprogramma's naar radioactiviteit. Er is echter een noodzaak voor een voortdurende, meer beperkte en taakgerichte controle op het milieu en voor verder onderzoek op sommige specifieke terreinen, zoals onderstaand omschreven.

Controle op lange termijn en registratie van radionucliden (in het bijzonder  $^{137}\text{Cs}$  en  $^{90}\text{Sr}$ ) in de diverse onderdelen van het milieu zijn vereist om te voldoen aan de navolgende algemeen praktische en wetenschappelijke eisen:

**Praktisch:**

- Het beoordelen van de huidige en het voorspellen van de toekomstige mate van blootstelling van de mens en van de besmetting van het voedsel, met het doel om maatregelen tot herstel en langetermijntegenmaatregelen te rechtvaardigen;
- Het informeren van het gewone publiek in de getroffen gebieden over de hardnekkigheid van radioactieve besmetting in voedingsproducten en over de seizoensgebonden en jaarlijkse variatie ervan in de door het publiek zelf vergaarde natuurlijke voedingsmiddelen (zoals champignons, wild, zoetwatervis uit ‘gesloten’ meren, bessen, etc.) alsmede het van advies dienen met betrekking tot diëten en mogelijkheden van voedselbereiding, teneinde de inname van radionucliden door de mens te verminderen.
- Het informeren van het gewone publiek in aangetaste gebieden over de veranderingen van de radiologische omstandigheden teneinde de zorgen bij het publiek te verlichten.

**Wetenschappelijk:**

- Het vaststellen van kenmerkende grootheden voor de verplaatsing op lange termijn van radionucliden naar de diverse ecosystemen en van de natuurlijke omstandigheden met het doel om voorspellende modellen te specificeren, zowel voor de gebieden die door Tsjernobyl zijn getroffen als voor mogelijk toekomstige radioactieve uitstoot,
- Het bepalen van de mechanismen van het gedrag van radionucliden in minder bestudeerde ecosystemen (bijv. de rol van schimmels in het bos) teneinde de hardnekkigheid van radionucliden te verklaren en mogelijkheden tot herstel te onderzoeken, met speciale aandacht voor processen die van belang zijn voor de bijdrage aan de dosissen voor de mens en biota (flora en fauna).

Omdat de actieve concentraties in de onderdelen van het milieu nu in schijnbaar evenwicht verkeren en langzaam veranderen, kunnen het aantal en de frequentie van bemonstering en metingen, die binnen het kader van de controle en onderzoeksprogramma's worden uitgevoerd, aanmerkelijk worden verminderd in vergelijking met de eerste jaren na het Tsjernobyl ongeluk.

De neerslag van  $^{137}\text{Cs}$  en van een aantal andere radionucliden met een lange halfwaardetijd binnen een straal van 30 km dient gebruikt te worden voor radio-ecologische studies binnen de diverse ecosystemen, die aanwezig zijn binnen dit zeer hoog besmette gebied. Dergelijke studies zijn anders niet mogelijk of moeilijk uitvoerbaar, met uitzondering van experimenten op zeer kleine schaal.

## Specifieke aanbevelingen

De in kaart gebrachte neerslag van  $^{137}\text{Cs}$  in Albanië, Bulgarije en Georgië behoort te worden bijgewerkt met het doel om de studie naar de post-Tsjernobyl besmetting in Europa af te ronden.

Een verbeterde manier om  $^{131}\text{I}$  in kaart te brengen zou de onzekerheid verminderen omtrent het reconstrueren van de schildklierdosis, die nodig is voor de bepaling van stralingsrisico's. Dit dient gebaseerd te worden op historische metingen in het milieu, uitgevoerd in 1986, als op recente metingen van  $^{129}\text{I}$  in grondmonsters in gebieden waar een verhoogd voorkomen van schildklierkanker is geconstateerd na het Tsjernobyl ongeluk.

Met hetzelfde doel als boven omschreven zouden, gedurende de komende tientallen jaren en binnen het kader van de beperkte taakgerichte onderzoeksprogramma's op geselecteerde locaties, langetermijncontroles en registratie moeten worden uitgevoerd van de actieve concentraties aan  $^{137}\text{Cs}$  en  $^{90}\text{Sr}$  in plantaardige en dierlijke producten, die worden voortgebracht in gebieden met wisselende bodemgesteldheid en klimaatomstandigheden en verschillende landbouwkundige werkwijzen.

Bestudering van de verdeling van  $^{137}\text{Cs}$  en van radionucliden van Plutonium in het stedelijk milieu (Pripyat, Tsjernobyl en enkele andere besmette steden) over ver in de toekomst gelegen tijdperiodes, zou het maken van een model verbeteren met betrekking tot de externe blootstelling van de mens en het inademen van radionucliden bij een kernramp of een radiologisch ongeluk dan wel bij een actie met kwade opzet.

Voortdurende langetermijncontrole en registratie van specifieke bosproducten, zoals champignons, bessen en wild, dient te worden uitgevoerd in die gebieden waar de bossen substantieel besmet werden en waar de bevolking in het wild groeiend voedsel consumeert. De resultaten van dergelijke controles en registraties worden gebruikt door de bevoegde autoriteiten van de getroffen landen met het doel om het gewone publiek van advies te dienen omtrent het voortdurend gebruik van de bossen voor recreatie en voor het verzamelen van in het wild groeiend voedsel.

Naast de algemene controle en registratie van bosproducten, die nodig zijn voor stralingsbescherming, is een meer gedetailleerde, wetenschappelijk onderbouwde, langetermijncontrole en registratie vereist van specifieke boslocaties om te komen tot een groeiend en verbeterd begrip van de mechanismen, de langetermijndynamiek en de hardnekkigheid van de besmetting door radioactief Cesium en de variatie daarin. Het is wenselijk om verder onderzoek te verrichten naar de organismen die een sleutelrol vervullen, bijvoorbeeld schimmels, en naar hun rol in de mobiliteit van radioactief Cesium alsmede hun langetermijngedrag in ecosystemen van bossen. Dergelijke programma's van controle en registratie worden uitgevoerd in de zwaarder getroffen landen zoals Belarus en Rusland. Als men tot een vermindering van de huidige onzekerheden in de voorspellingen op lange termijn wil komen, is het van belang dat deze programma's doorgang blijven vinden in de voorzienbare toekomst.

Waterige systemen zijn intensief gecontroleerd en bestudeerd gedurende de jaren na het Tsjernobyl ongeluk met als resultaat dat de verplaatsing en bio-ophoping van de belangrijkste besmettingshaarden op lange termijn,  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{137}\text{Cs}$ , nu goed begrepen worden. Er is echter een noodzaak voor een voortdurende (maar mogelijk meer beperkte) controle op het water en waterig milieu en voor verder onderzoek op sommige specifieke terreinen, zoals onderstaand omschreven.

Hoewel er momenteel geen noodzaak is voor grootschalige, nieuwe onderzoeksprogramma's naar de radioactiviteit in waterige systemen, zouden de voorspellingen van toekomstige besmetting van waterige systemen door  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{137}\text{Cs}$  verbeterd kunnen worden door een voortdurende controle en registratie van de radioactiviteit van sleutelsystemen (het Pripjat-Dnieper systeem, de zeeën en geselecteerde rivieren en meren in de ergst getroffen gebieden en in West Europa). Dat zou continuïteit geven aan de uitstekende reeks van periodieke metingen als functie van de tijd van de actieve concentraties in water, in bezinksels en in vis en zou de voorspellende modellen voor deze radionucliden verfijnen.

Hoewel momenteel van ondergeschikt radiologisch belang in vergelijking met  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{137}\text{Cs}$ , zou verdere bestudering van trans-urane elementen in het gebied rond Tsjernobyl de voorspellingen verbeteren van de milieubesmetting op de zeer lange termijn (honderden - duizenden jaren). Het is onwaarschijnlijk dat verdere empirische studies van trans-urane radionucliden en  $^{99}\text{Tc}$  (Technetium) directe gevolgtrekkingen opleveren voor de radiologische bescherming van de gebieden die getroffen zijn door het Tsjernobyl ongeluk, maar zij zouden onze kennis vergroten van het milieugedrag van deze radionucliden met lange halfwaardetijden.

Toekomstige plannen om het waterniveau te verlagen in de koelvijver van Tsjernobyl zullen belangrijke gevolgen hebben voor de ecologie van de vijver en voor het gedrag van radionuclides / brandstofdeeltjes in de bezinksels die voor het eerst worden blootgelegd. Specifieke studies van de koelvijver dienen door te gaan. In het bijzonder zou verdere bestudering van de oplosnelheden van brandstofdeeltjes in waterige systemen, zoals de koelvijver, de kennis van hun gedrag verbeteren.

## **MILIEUTECHNISCHE TEGENMAATREGELLEN EN HERSTEL**

Met het doorvoeren van een reeks van korte - en lange termijn milieutechnische tegenmaatregelen om de negatieve gevolgen te verminderen, leidde het Tsjernobyl ongeluk tot uitgebreide maatregelen door de USSR autoriteiten. Bij deze tegenmaatregelen was een groot aantal menselijke, economische en wetenschappelijke bronnen betrokken. Helaas was er niet altijd openheid en transparantie naar het publiek en werd informatie achtergehouden. Dit kan deels sommige van de later ondervonden problemen verklaren in de communicatie met het publiek en het wantrouwen van de bekwame autoriteiten. Deze informatiecrisis leidde ook in vele andere landen buiten Rusland, Belarus en Oekraïne tot het wantrouwen van de autoriteiten, hetgeen in vele landen heeft geleid tot onderzoek naar de wijze waarop open en transparant kan worden omgegaan met zulke grote ongelukken en naar de wijze waarop de getroffen bevolking deel kan hebben in de besluitvormingsprocessen.

De unieke ervaring van de toepassing van tegenmaatregelen na het Tsjernobyl ongeluk is reeds op grote schaal gebruikt, zowel nationaal als internationaal teneinde beter voorbereid te zijn op toekomstige nucleaire en radiologische noodsituaties. Er zou echter meer gedaan moeten worden om volledig lering te trekken uit de positieve en negatieve lessen van Tsjernobyl.

De milieutechnische tegenmaatregelen richtten zich zowel op de vermindering van de externe blootstelling en blootstelling door inslikken als in enkele gevallen ook op blootstelling als gevolg van inademen. De evacuatie van de bevolking uit het gebied rond de reactor, gold in de beginfase als een zeer belangrijke tegenmaatregel.

## **Conclusies**

### **Radiologische criteria**

Ten tijde van het Tsjernobyl ongeluk was zeer uitgebreide internationale en nationale begeleiding voorhanden ten aanzien van algemene bescherming van de bevolking tegen straling en ten aanzien van specifieke begeleiding die van toepassing is bij grootschalige nucleaire noodsituaties. De basismethode van begeleiding die de voormalige USSR gebruikte, verschilde van het internationale systeem, maar inhoudelijk waren de veiligheidsstandaards inzake straling vergelijkbaar. De internationale en nationale standaards die destijds beschikbaar waren, werden op grote schaal toegepast voor de bescherming van bevolkingsgroepen van Europese landen die getroffen waren door het ongeluk.

De ongekende schaal en de langetermijngevolgen van het Tsjernobyl ongeluk vereisten uitbreiding van sommige extra veiligheidsstandaards inzake straling, die ontwikkeld waren na veranderingen in de stralingsomstandigheden en die de overeenstemming van standaards wereldwijd bevorderden.

### **Tegenmaatregelen in stedelijke gebieden**

Gedurende de eerste jaren na het Tsjernobyl ongeluk werd ontsmetting van bezinkingen op grote schaal toegepast in radioactief besmette gebieden in de USSR als een middel om de externe blootstelling van het publiek te verminderen en als middel tegen het inademen van opnieuw in suspensie gebrachte radioactieve stoffen.

Ontsmetting werkte kostenbesparend met betrekking tot het verminderen van de externe dosis indien de planning en uitvoering ervan vooraf werden gegaan door een inschatting van het herstel, gebaseerd op een kostenbaten analyse en externe meetgegevens van dosissen.

Besmetting in tweede instantie op de langere termijn met radionucliden van schoongemaakte plaatsen is niet waargenomen nadat de gebieden schoongemaakt waren.

De ontsmetting van het stedelijk milieu heeft een aanzienlijke hoeveelheid laag radioactief afval voortgebracht dat op haar beurt leidde tot een probleem met betrekking tot het opruimen van het afval.

Na het Tsjernobyl ongeluk zijn talloze experimentele studies uitgevoerd en zijn daartoe geschikte modellen gebruikt als wetenschappelijke basis voor het opstellen van verbeterde aanbevelingen ten aanzien van ontsmetting van het stedelijk milieu in geval van grootschalige radioactieve besmetting.

### **Landbouwkundige tegenmaatregelen**

Vanwege het ontbreken van tijdige informatie over het ongeluk en de aanbevolen acties, in het bijzonder voor particuliere boeren, waren de tegenmaatregelen in de beginfase na het Tsjernobyl ongeluk maar voor een deel effectief met betrekking tot het verminderen van het binnenkrijgen van radioactief Jodium via melk. Dit leidde bij sommige mensen in de getroffen landen tot aanzienlijke blootstelling aan radioactief Jodium.

De meest effectieve tegenmaatregelen in de beginfase waren het uitsluiten van besmette weilanden van het dierlijke dieet en het weigeren van melk (voor verdere behandeling), gebaseerd op meetgegevens van straling. Het voederen van beesten met “schoon, onbesmet” veevoer werd met succes uitgevoerd in sommige van de getroffen landen. Deze tegenmaatregel werd echter niet wijd verbreid toegepast in de USSR vanwege een gebrek aan onbesmet veevoer. Radiologisch gezien was het slachten van vee onterecht en leidde tot grote hygiënische, praktische en economische problemen.

Verscheidene maanden na het ongeluk werden langetermijnmaatregelen tegen radioactief Cesium en radioactief Strontium effectief doorgevoerd in alle besmette gebieden zowel voor het plantaardig als het dierlijk leven, inclusief het voederen van dieren met “schoon, onbesmet” veevoer en het verplicht behandelen van melk. Dit bewerkstelligde dat de meeste boeren bedrijvigheden in getroffen gebieden door konden gaan en resulteerde in een aanzienlijke vermindering van de dosis. De belangrijkste voorwaarde was het meten van straling van landbouwgrond, van voer en voedingsmiddelen, inclusief het meten van de actieve concentratie aan Cesium in het levende spierweefsel van vee.

Het grootste probleem voor de lange termijn was de besmetting van melk en vlees met radioactief Cesium. Dit is in de USSR en later in de onafhankelijke landen aangepakt door het land te bewerken dat gebruikt werd voor het oogsten van veevoer, door het gebruik van onbesmet veevoer en door het toepassen van bindmiddelen voor Cesium bij dieren. Het gebruik van onbesmet veevoer is een van de belangrijkste en effectieve maatregelen en wordt uitgebreid toegepast in landen waar dierlijke producten een actieve concentratie aan  $^{137}\text{Cs}$  hebben, die de norm voor het nemen van maatregelen overschrijdt. Terwijl de stralingsomstandigheden in het milieu op de lange termijn langzaam veranderen, wordt er ook van uitgegaan dat de doelmatigheid van de milieutechnische tegenmaatregelen stabiel blijft.

Als gevolg van economische problemen is het toepassen van milieutechnische maatregelen in de drie meest getroffen landen sedert het midden van de jaren negentig aanzienlijk verminderd. In korte tijd resulteerde dit in een toename van het gehalte aan radionucliden in plantaardige en dierlijke landbouwproducten.

Er zijn nog altijd landbouwkundige gebieden in de drie landen, die buiten gebruik zijn gesteld. Na toepassing van geschikte herstellmethoden kan dit land echter gebruikt worden. De technologieën zijn daar tegenwoordig voor beschikbaar. Huidige wettelijke, economische en sociale beperkingen kunnen dit echter bemoeilijken.

Indien tijdens de planning en toepassing van tegenmaatregelen rekening wordt gehouden met economische en sociale factoren, tezamen met de radiologische factoren, wordt een betere aanvaarding van deze factoren door het publiek bereikt.

Als gevolg van de hoge en voortdurende verplaatsing van radioactief Cesium naar de getroffen uitgestrekte systemen, is in West Europa nog steeds een reeks van tegenmaatregelen van kracht voor dierlijke producten van hooggelegen gebieden en van bossen.

Voor het eerst werden in de wereld praktische, langetermijn landbouwkundige tegenmaatregelen op grote schaal ontwikkeld, getest en doorgevoerd inclusief een drastische verbetering van grasland, het voeren met onbesmet veevoer voorafgaand aan de slacht, het toepassen van bindmiddelen voor cesium en van bodembehandeling en veredeling. De invoering daarvan voor meer dan 3 biljoen\* hectare landbouwgrond maakte het mogelijk, dat in alle drie de landen de producten met een actieve concentratie aan radionucliden boven de norm voor het nemen van maatregelen tot een minimum werden beperkt.

\* 1 billion UK = 1 biljoen NI = 1.000.000.000.000 , terwijl 1 billion USA = 1 miljard NI = 1.000.000.000]

### **Tegenmaatregelen voor bossen**

De voornaamste tegenmaatregelen die voor de bossen werden genomen na het Tsjernobyl ongeluk waren bestuurlijke (beperkingen van de diverse activiteiten die onder normale omstandigheden in bossen worden uitgevoerd) en technologische maatregelen.

Beperkingen die uitgebreid zijn toegepast in de drie meest getroffen landen en deels in Scandinavië waren onder meer de navolgende acties, die de blootstelling van de mens als gevolg van de aanwezigheid van radioactief besmette bossen en het gebruik van bosproducten hebben verminderd:

- Toegangsbeperkingen voor het publiek en bosarbeiders als maatregel tegen uitwendige blootstelling.
- Beperkingen in het verzamelen van voedingsproducten door de bevolking, zoals wild, bessen en champignons, droegen bij aan de vermindering van de interne dosissen. In de drie meest getroffen landen worden als regel champignons geconsumeerd. Daarom is in het bijzonder deze beperking belangrijk geweest.
- Beperkingen in het verzamelen van brandhout door de bevolking om blootstelling binnenshuis en in de tuin te voorkomen bij de verbranding van hout, waarbij de as wordt afgevoerd of gebruikt als meststof.

- Het wijzigen van de gangbare manier van jagen, gericht op het voorkomen van het nuttigen van vlees met een hoog gehalte aan seizoensgebonden concentraties aan radioactief Cesium, en
- Het voorkomen van brand, met name in gebieden waar neerslag van radionucliden op grote schaal heeft plaatsgevonden, gericht op het vermijden van besmetting van het milieu.

De ervaring in de drie meest getroffen landen heeft echter geleerd, dat zulke beperkingen ook grote negatieve sociale gevolgen kunnen hebben, met mogelijk als gevolg dat de adviezen van de autoriteiten aan het gewone publiek genegeerd worden. Deze situatie kan worden gecompenseerd door het instellen van geschikte, lokaal gerichte, opleidingsprogramma's, om het belang te onderstrepen van de voorgestelde veranderingen in het gebruik van sommige bosgebieden.

Het is onwaarschijnlijk dat technologische tegenmaatregelen, zoals het gebruik van machines en / of chemische behandelingsmethoden om de verdeling en het transport van radioactief Cesium in de bossen te veranderen, op grote schaal praktisch uitvoerbaar zullen zijn.

### **Tegenmaatregelen voor water en waterig milieu**

In de maanden en jaren die volgden op het ongeluk werden talloze tegenmaatregelen getroffen om watersystemen te beschermen tegen de overdracht van radioactiviteit vanuit besmette grond. Deze maatregelen bleken in het algemeen niet effectief en duur te zijn, met als gevolg betrekkelijk hoge blootstellingen van de arbeiders die de tegenmaatregelen ten uitvoer brachten.

De meest effectieve tegenmaatregel was het in een zeer vroeg stadium beperken van het onttrekken van drinkwater en het overgaan op alternatieve voorzieningen van drinkwater. Beperkingen in het consumeren van zoetwatervis zijn ook effectief gebleken in Scandinavië en Duitsland, terwijl men zich in Belarus, Rusland en Oekraïne niet altijd aan die beperkingen heeft gehouden.

Het is onwaarschijnlijk dat enige toekomstige tegenmaatregel ter bescherming van het oppervlaktewater te rechtvaardigen zal zijn op grond van de economische kosten per eenheid van vermindering van de dosis. Naar verwachting zullen in enkele gevallen de beperkingen op het consumeren van vis (voor de zogenaamde "gesloten meren") nog enkele tientallen jaren gehandhaafd blijven.

Toekomstige inspanningen op dit gebied zullen gericht moeten zijn op het informeren van het publiek, omdat er bij het publiek nog altijd misvattingen bestaan met betrekking tot de waargenomen risico's voor de gezondheid als gevolg van de radioactieve besmetting van watersystemen en vis.

## **Aanbevelingen**

### **Door het Tsjernobyl ongeluk getroffen landen**

Indien radiologisch gerechtvaardigd, dienen allerlei lange termijn herstelmaatregelen en vaste tegenmaatregelen op het gebied van besmetting met radionucliden te worden getroffen en geoptimaliseerd. Bij het optimaliseren van tegenmaatregelen dient, naast formele kostenbaten analyses, rekening te worden gehouden met sociale en economische factoren, met het doel om aanvaarding van tegenmaatregelen bij de bevolking te bereiken.

Naast de autoriteiten dient het algemene publiek in het bijzonder geïnformeerd te worden over de bestaande factoren met betrekking tot het stralingsrisico en de technologische mogelijkheden om deze op de lange termijn te verminderen door middel van herstel- en vaste tegenmaatregelen, en dient het betrokken te worden bij de discussie en de besluitvorming.

Herstelmaatregelen en vaste tegenmaatregelen blijven op de lange termijn na het Tsjernobyl ongeluk effectief en gerechtvaardigd, voornamelijk in landbouwgebieden met verarmde (zand en veen) gronden waar een hoge overdracht van radionucliden naar planten kan plaatsvinden.

Bijzondere aandacht dient te worden besteed aan de productie van het op honderden plaatsen uitgeoefende boerenbedrijf om in eigen onderhoud te voorzien en aan ongeveer 50 beroepsmatig bedreven boerenbedrijven in Belarus, Rusland en Oekraïne, waar concentraties radionucliden in melk nog altijd hoger zijn dan de nationale norm voor het nemen van maatregelen.

Als onderdeel van de lange termijn herstelmaatregelen zijn zowel de drastische verbetering van weilanden en grasvelden als het afwateren van vochtige veengebieden zeer effectief. De meest effectieve vaste tegenmaatregelen op landbouwkundig gebied zijn het geven van vooraf geslacht, schoon (onbesmet) voer aan dieren vergezeld van metingen bij de levende dieren, het toepassen van Pruisisch (Berlijns) blauw bij vee en een verbeterd gebruik van minerale (anorganische) meststoffen bij plantengroei.

Het is mogelijk noodzakelijk om het vergaren door de bevolking van in het wild levende voedselproducten, als wild, bessen, champignons en vis uit 'gesloten meren', te beperken in gebieden waar de actieve concentraties de norm voor het nemen van maatregelen overschrijden.

Een belangrijke tegenmaatregel in het verminderen van de interne blootstelling is nog altijd het geven van dieetadviezen met het doel om de consumptie van zeer besmette, wilde voedselproducten terug te dringen en van eenvoudige kookregels om radioactief Cesium te verwijderen.

Het is noodzakelijk duurzame manieren te vinden om gebruik te maken van de meest getroffen gebieden. Deze manieren dienen het stralingsgevaar aan te geven en tevens de economische mogelijkheden voor de gemeenschap nieuw leven in te blazen.

## **Wereldwijd**

De unieke ervaring met het toepassen van tegenmaatregelen na het Tsjernobyl ongeluk dient zorgvuldig gedocumenteerd te worden en dient gebruikt te worden voor het opstellen van internationale en nationale richtlijnen voor de autoriteiten en voor de deskundigen, die verantwoordelijk zijn voor bescherming van de bevolking en het milieu tegen straling.

Nagenoeg alle lange termijn tegenmaatregelen, die op landbouwkundig gebied op grote schaal zijn doorgevoerd voor besmette gebieden in de drie meest getroffen landen, kunnen voor gebruik worden aanbevolen in geval van een ongeluk in de toekomst. De effectiviteit van tegenmaatregelen voor de bodem wisselt echter per locatie. Daarom is onderzoek naar de eigenschappen van de bodem en naar de landbouwkundige gewoontes en toepassingen van groot belang voordat de tegenmaatregelen worden toegepast.

Vanwege het aanwezige gevaar van aanzienlijke radioactieve uitstoot, dienen de aanbevelingen voor de ontsmetting van het stedelijk milieu bij radioactieve besmetting op grote schaal gestuurd te worden naar de directies van nucleaire bedrijven, (kernenergiecentrales en opwerkingsfabrieken) en naar de autoriteiten van de aangrenzende gebieden.

## **Onderzoek**

Algemene, fysische en chemische processen die ten grondslag liggen aan de milieutechnische tegenmaatregelen en aan de technologieën voor herstel, zowel van mechanische aard (verwijdering van radionucliden, vermenging met aarde, etc.) als van chemische aard (verkalken van de grond, bemesting, etc.) of een combinatie van de twee, zijn goed genoeg bekend om in een model gesimuleerd te worden en om wereldwijd te worden toegepast in vergelijkbare omstandigheden. Veel minder is bekend over de biologische processen die zouden kunnen worden gebruikt voor het herstel van het milieu, bijv. het opnieuw karakteriseren van landbouwproducten, bioherstel, etc. Deze processen vereisen meer onderzoek.

Een belangrijk punt dat meer sociologisch onderzoek behoeft, vormen de opvattingen van het publiek ten aanzien van de invoering, de prestatie (het effect) en het intrekken van tegenmaatregelen in noodsituaties alsmede de ontwikkeling van sociale maatregelen die gericht zijn op het in elk stadium betrekken van het publiek bij deze processen, te beginnen bij de besluitvorming.

Er bestaat nog altijd een aanzienlijke verscheidenheid in internationale en nationale radiologische maatstaven en veiligheidsstandaards, die van toepassing zijn op het herstel van de getroffen gebieden bij besmetting van het milieu met radionucliden. De ervaring met radiologische bescherming van het publiek na het Tsjernobyl ongeluk heeft duidelijk de noodzaak aangetoond om te komen tot verdere internationale overeenstemming betreffende de geschikte radiologische maatstaven en veiligheidsstandaards.

## BLOOTSTELLING VAN DE MENS

Na het Tsjernobyl ongeluk werden zowel de werknemers als de bevolking getroffen door straling, die de gezondheid negatief beïnvloedde of kan beïnvloeden. In dit document wordt voornamelijk gekeken naar de manieren waarop het algemene publiek werd blootgesteld als gevolg van de uitstoot van radionucliden naar het milieu. Met het oog op de navolgende doelstellingen, die betrekking hebben op de gezondheid, is informatie nodig over de dosis die de bevolking heeft binnengekregen, zowel van degenen die geëvacueerd zijn als van degenen die permanent in de met radioactiviteit besmette gebieden wonen.

- Het verwezenlijken van tegenmaatregelen en herstelprogramma's;
- Het voorspellen van te verwachten negatieve effecten op de gezondheid en rechtvaardiging van daarmee samenhangende maatregelen ter bescherming van de gezondheid;
- Verschaffing van informatie aan de bevolking en aan de autoriteiten; en
- Bestudering van epidemische ziekten en het uitvoeren van andere medische studies naar de negatieve effecten op de gezondheid door straling.

De resultaten van de metingen die na het ongeluk aan het milieu zijn uitgevoerd, geven aan dat Belarus, Oekraïne en Rusland de meest getroffen landen zijn. Veel van de informatie over de dosis als gevolg van het Tsjernobyl ongeluk is gericht op de drie landen, die het eerst besmet werden. Er waren vier mechanismen voor het overbrengen van een dosis naar de bevolking: externe dosis vanuit overtrekkende bewolking, interne dosis door inademing vanuit de bewolking en van opnieuw in suspensie gebrachte materialen, externe dosis vanuit radioactieve stoffen die zijn neergeslagen op de grond en andere oppervlakken en interne dosis bij het doorslikken van voedselproducten en water. Buitengewone omstandigheden daargelaten, waren de laatste twee mechanismen het belangrijkste. De externe en de interne dosis bleken bij benadering even belangrijk te zijn, hoewel deze algemene conclusie onderhevig was aan grote afwijkingen vanwege de afscherming door sommige typen gebouwen en de grond waarop gewassen groeiden.

Schattingen van dosissen, opgenomen door individuele leden van bevolkingsgroepen, berustten letterlijk op miljoenen metingen van concentraties van radioactieve stoffen in de lucht, in de bodem, in voedsel, in water, in schildklieren bij mensen en het gehele menselijk lichaam. Daarnaast waren vele metingen beschikbaar van de snelheid van blootstelling aan gamma straling boven onontgonnen en ontgonnen velden terwijl externe dosissen bij mensen werden gemeten door middel van individuele thermo-luminescerende dosimeters. De schattingen van de dosissen zijn derhalve stevig onderbouwd met metingen en zijn eerder realistisch dan conservatief.

Aangezien een verhoogd voorkomen van schildklierkanker bij kinderen en pubers het belangrijkste effect was van Tsjernobyl op de gezondheid van het algemene publiek, werd veel aandacht besteed aan de wijze van meten van de schildklierdosis. De inschatting van de schildklierdosissen als gevolg van het innemen van  $^{131}\text{I}$ , is gebaseerd op de resultaten van 350.000 metingen bij mensen en op enkele duizenden metingen van  $^{131}\text{I}$  in melk, binnen een paar weken na het ongeluk uitgevoerd in Belarus, Rusland en Oekraïne.

Door het nemen van een aantal tegenmaatregelen werden de dosissen van mensen aanzienlijk verminderd. Formele tegenmaatregelen behelsden de evacuatie en verplaatsing van personen, het blokkeren van besmette voedselvoorzieningen, het verwijderen van besmette grond, de behandeling van bouwland om het opnemen van radionucliden te verminderen, het vervangen van voedingsmiddelen en het verbieden van het nuttigen van “wild” voedsel. Onofficiële tegenmaatregelen waren het op eigen initiatief vermijden van voedingsmiddelen die geacht werden besmet te zijn.

## Conclusies

De gezamenlijke effectieve dosis (waarin niet begrepen de schildklierdosis) die gedurende de periode 1986 – 1995 is binnengekomen door ongeveer vijf miljoen bewoners van de gebieden in Belarus, Rusland en Oekraïne, die besmet werden door het Tsjernobyl ongeluk ( $^{137}\text{Cs}$  neerslag op de grond  $> 37 \text{ kBq per m}^2$ ), bedroeg bij benadering 40.000 man-Sievert. De groepen personen die in elk van de landen afzonderlijk werden blootgesteld, kregen bij benadering dezelfde gezamenlijke dosis binnen. De extra hoeveelheid van de gezamenlijke effectieve dosis, die voorzien wordt voor de periode 1996 tot 2006, bedraagt ongeveer 9000 man-Sv.

De gezamenlijke schildklierdosis bedroeg ongeveer 2 miljoen man-Gray, waarvan bijna de helft werd binnengekomen door personen die in Oekraïne werden blootgesteld.

Blootstelling aan op de grond neergeslagen radionucliden en het doorslikken van besmette plantaardige voedselproducten waren de voornaamste wegen die leidden tot blootstelling van de mens. Inademing en het doorslikken van drinkwater, vis en producten, die besmet waren met bevoeiingswater, behoorden tot de minder belangrijke besmettingswegen.

Het bereik van de schildklierdosis op verschillende plaatsen en binnen alle leeftijdsgroepen, ongeacht het geslacht, is breed en bevindt zich tussen ‘minder dan 0,1 Gy (Gray)’ en ‘meer dan 10 Gy’. Bij sommige groepen, in het bijzonder bij jongere kinderen, waren de dosissen hoog genoeg om zowel korte termijn veranderingen in de functie van de schildklier te veroorzaken als lange termijn effecten zoals schildklierkanker bij sommige individuen.

De interne dosis naar de schildklier van  $^{131}\text{I}$  werd hoofdzakelijk veroorzaakt door de consumptie van verse koemelk en in mindere mate van groene groenten. Vanwege de lage massa van de schildklier bij kinderen en vanwege consumptie van verse koemelk die vergelijkbaar is met die van volwassenen, kregen kinderen een gemiddelde dosis binnen die veel groter was dan bij volwassenen.

De bijdrage van kortlevende radioactieve isotopen van Jodium,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$  en  $^{135}\text{I}$ , aan de schildklierdosis was gering voor bevolkingsgroepen die permanent wonen in besmette gebieden en voornamelijk door inslikken werden blootgesteld. De bijdrage bedroeg ongeveer 1% van de schildklierdosis van  $^{131}\text{I}$  en was gering omdat gedurende het verplaatsen van radioactieve jodiumisotopen in de voedselketens kortlevende radioactieve isotopen van Jodium uiteenvielen. De grootste relatieve bijdrage (20 tot 50%) van kortlevende radionucliden aan de schildklierdosissen bij het publiek werd ingenomen door de bewoners van Pripjat, die geëvacueerd werden voordat besmet voedsel genuttigd kon worden.

Volgens metingen en gegevens van simulaties, is de stedelijke bevolking blootgesteld aan een 1,5 – 2 keer lagere externe dosis in vergelijking met de bevolking op het platteland, die woont in gebieden met vergelijkbare niveaus aan radioactieve besmetting. Dit is te danken aan een betere afschermingeigenschappen van gebouwen en andere beroepsgewoontes. Bovendien, omdat de stedelijke bevolking minder afhankelijk is van lokale landbouwproducten en wild voedsel, zijn de effectieve dosissen en de interne schildklierdosissen, hoofdzakelijk veroorzaakt door inslikken, een factor twee tot drie lager bij de stedelijke bevolkingsgroepen in vergelijking met bevolkingsgroepen op het platteland.

De hoge blootstellinggraad in het begin nam snel af als gevolg van het verval van kortlevende radionucliden en de binnendringing van radioactieve cesiumisotopen in het bodemprofiel. Dat laatste leidde tot een afname in de hoeveelheid externe dosis als gevolg van een betere afscherming. Daar komt bij, dat het cesium zich bindt aan deeltjes aarde naarmate het dieper doordringt in de bodem, hetgeen de beschikbaarheid van cesium voor de beplanting verminderde.

De grote meerderheid van de dosis van het ongeluk is reeds verzameld.

Personen die twee tot drie keer het gemiddelde van de effectieve dosis binnenkregen (niet inbegrepen de schildklierdosis) waren degenen die op het platteland leefden in benedenhuizen en die grote hoeveelheden “wild” voedsel aten, zoals vlees van wild, champignons en bessen.

De langetermijndosissen naar bewoners van vestigingsplaatsen op het platteland hangen sterk af van eigenschappen van de grond. In gebieden met lichtgekleurde, zanderige grond zijn de bijdragen als gevolg van interne en externe blootstelling vergelijkbaar, terwijl in gebieden met voornamelijk zwarte grond de bijdrage van de interne blootstelling aan het totaal (externe en interne blootstelling) de 10% niet overschrijdt. Ongeacht de natuurlijke omstandigheden, is de bijdrage van <sup>90</sup>Sr aan de interne dosis doorgaans minder dan 5%.

De lange termijn dosissen bij kinderen, veroorzaakt door het inslikken van voedsel waarin radioactieve nucliden aanwezig waren, zijn doorgaans ongeveer 1,1 tot 1,5 keer lager dan bij volwassenen en pubers.

Zowel de verzamelde als de voorspelde gemiddelde dosissen bij bewoners van vestigingsplaatsen variëren binnen een bandbreedte van twee ordes van grootte, afhankelijk van de radioactieve besmetting van het gebied, de overheersende soort grond en de aard van de plaats van vestiging. In de periode 1986 – 2000 liep de cumulatieve bandbreedte van de dosis van 2 mSv (milliSievert), in steden die in gebieden lagen met zwarte grond, tot 300 mSv in dorpen die in gebieden lagen met ‘podzol’ zandgronden. De dosissen die voorzien worden voor de periode 2001 – 2056 zijn aanzienlijk lager dan de reeds ontvangen dosissen, n.l. binnen een bandbreedte van 1 tot 100 mSv.

Als geen tegenmaatregelen waren genomen, had de bevolking van sommige meer besmette dorpen levenslang (70 jaren) werkzame dosissen tot 400 mSv binnen kunnen krijgen. De grondige toepassing van tegenmaatregelen, zoals ontsmetting van vestigingsplaatsen en landbouwkundige tegenmaatregelen, heeft de dosis aanzienlijk verminderd. Ter vergelijking, een wereldwijd gemiddelde voor de levenslange dosis van de natuurlijke achtergrondstraling bedraagt ongeveer 170 mSv, met een kenmerkende bandbreedte van 70 tot 700 mSv in verschillende gebieden.

De overgrote meerderheid van de huidige bevolking van vijf miljoen in de besmette gebieden van Belarus, Rusland en Oekraïne, d.w.z in het begin van de 21<sup>ste</sup> eeuw, krijgt een werkzame dosis binnen van minder dan 1 mSv op jaarbasis (gelijk aan de nationale niveaus in de drie landen voor het nemen van maatregelen). Ter vergelijking, een wereldwijd gemiddelde van de jaarlijkse dosis aan natuurlijke achtergrondstraling bedraagt ongeveer 2,4 mSv met een kenmerkende bandbreedte van 1 tot 10 mSv in diverse gebieden.

Het aantal bewoners dat tegenwoordig meer dan 1 mSv binnenkrijgt op jaarbasis in de besmette gebieden van de drie meest getroffen landen, kan ruwweg op ongeveer 100.000 personen worden geschat. Terwijl de toekomstige vermindering van zowel de externe toedieningsnelheid als van de actieve concentraties aan radionucliden (hoofdzakelijk <sup>137</sup>Cs) in voedsel tamelijk langzaam verloopt, wordt de vermindering van blootstellingsniveaus voor de mens eveneens verwacht langzaam te gaan, d.w.z. ongeveer 3 tot 5 % per jaar op basis van de huidige tegenmaatregelen.

Het blijkt dat, op basis van de beschikbare informatie, de dosissen die toegeschreven worden aan “hete deeltjes” niet van betekenis zijn geweest.

De inschatting van de deskundigen die werkzaam zijn in het Tsjernobyl Forum, komt overeen met die van de deskundigen van UNSCEAR (2000) voor wat betreft de dosis die is binnengekomen door de bevolking van de drie meest getroffen landen: Belarus, Oekraïne en de Russische Federatie.

### **Aanbevelingen**

Grootschalige metingen in voedingsmiddelen, tellingen over het gehele lichaam bij individuele personen en het leveren van thermo-luminescente detectoren aan vertegenwoordigers van de gewone bevolking zijn niet langer noodzakelijk. Kritische groepen in gebieden met een hoge besmetting en / of een hoge verplaatsing van radioactief Cesium naar voedsel zijn bekend.

In de meer besmette gebieden zouden controlepersonen kunnen worden aangewezen, die niet voor verder herstel in aanmerking komen, met het doel om doorlopende periodieke tellingen en metingen in het gehele lichaam van de externe dosis uit te voeren. De doelstelling zou moeten zijn om de voortdurende afname die verwacht kan worden in de externe en interne dosis te volgen en om vast te stellen of zulke verminderingen slechts het gevolg zijn van radioactief verval of het gevolg zijn van verdere ecologische uitschakeling.

### **DOOR STRALING VEROORZAAKTE EFFECTEN OP PLANTEN EN DIEREN**

De biologische effecten van straling op planten en dieren zijn voor wetenschappers lange tijd interessant geweest. Veel van de informatie over de effecten op de mens is in feite voortgekomen uit proefondervindelijke studies over planten en dieren. Als bijkomend effect volgde verder onderzoek de ontwikkelingen van kernenergie en de zorgen omtrent de mogelijke gevolgen van radioactieve uitstoot op de aarde en het waterige milieu. In het midden van de jaren zeventig van de vorige eeuw was er voldoende informatie verzameld over de effecten van ioniserende straling op planten en dieren, inclusief de gegevens van toevallige uitstoten van radionucliden bij de productie van kernwapens en van testlocaties.

Het Tsjernobyl ongeluk echter, dat plaatsvond in het voorjaar van 1986 in een gebied met een gematigd klimaat en een bloeiende flora en fauna en niet in een woestijn of op een oceaan, resulteerde in talloze negatieve gevolgen op de niet menselijke soorten in de biota. In de getroffen gebieden hebben zich zowel acute gevolgen voorgedaan (dode planten en dieren als gevolg van straling, het verlies van het vermogen tot voortplanting, etc.) als lange termijn gevolgen (veranderingen in de biologische verscheidenheid, erfelijke celafwijkingen, etc.). De biota die aanwezig was in het gebied dat het dichtst bij de bron van uitstoot van radioactiviteit lag, de zogeheten 30 km zone of het Tsjernobyl uitsluitinggebied waaruit de bevolking vanwege het gevaar van straling snel geëvacueerd werd, werd het meest door natuurlijke oorzaken getroffen. Met als gevolg dat de biota in dit gebied effecten ondervond van bevolking en ecosystemen, die enerzijds veroorzaakt werden door hoge stralingsniveaus en anderzijds door vernieuwde plantengroei en migratie van dieren als gevolg van specifieke onderlinge competitie en specifieke wedijver binnen de soort.

De omstandigheden voor planten en dieren binnen de 30 km zone rond de Tsjernobyl kernenergiecentrale veranderden snel gedurende de eerste maanden en jaren na het ongeluk en bereikte een quasi stationair evenwicht in een later stadium. Sporen van negatieve gevolgen van straling op de biota zijn tegenwoordig nauwelijks aantoonbaar in de nabijheid van de stralingsbron (een paar kilometer van de beschadigde reactor) terwijl in de rest van het gebied zowel wilde planten als dieren floreren vanwege de verwijdering van de mens als belangrijkste natuurlijke bron van spanning.

## Conclusies

De straling van radionucliden die werden uitgestoten bij het Tsjernobyl ongeluk, had talloze acute negatieve gevolgen op de biota die aanwezig was in de gebieden die de meeste blootstelling ondervonden, d.w.z. tot een afstand van enkele tientallen kilometers van het punt van uitstoot. Buiten het uitsluitingsgebied zijn geen acute gevolgen van straling op de biota gerapporteerd.

De reactie van het milieu op het Tsjernobyl ongeluk was een ingewikkelde wisselwerking tussen de stralingsdosis, doseersnelheid en de daarbij behorende tijdelijke en ruimtelijke veranderingen alsmede de gevoeligheid voor radioactiviteit van de verschillende systemen. De gevolgen van het afsterven van cellen als gevolg van straling op zowel het individu als op de populatie, zijn bij planten en dieren als volgt waargenomen:

- Verhoogde afsterving van kegeldragende planten (conifeerachtige), ongewervelde dieren in de grond en zoogdieren;
- Verlies van het vermogen tot voortplanting bij planten en dieren; en
- Een chronisch stralingssyndroom bij dieren (zoogdieren, vogels, etc.).

Geen negatieve gevolgen van straling zijn gerapporteerd voor planten en dieren die in de eerste maand na de uitstoot van radionucliden werden blootgesteld aan een dosis van minder dan 0,3 Gy.

Na de natuurlijke vermindering van de blootstellingniveaus als gevolg van het verval en de migratie van radionucliden, hebben bevolkingsgroepen zich hersteld van de acute gevolgen van straling. Ten tijde van het nieuwe groeiseizoen heeft de levensvatbaarheid voor populaties van planten en dieren zich aanzienlijk hersteld als resultaat van de gecombineerde effecten van voortplanting en migratie. Planten en dieren hadden enkele jaren nodig om te herstellen van de ergste negatieve gevolgen van de radioactieve straling.

De acute radiobiologische gevolgen die werden waargenomen in het gebied van het Tsjernobyl ongeluk zijn verenigbaar met de radiobiologische gegevens die verkregen zijn uit proefondervindelijke studies, uitgevoerd onder natuurlijke omstandigheden in andere door ioniserende straling getroffen gebieden. Daaruit bleek dat overwegend zich snel ontwikkelende celsystemen, zoals meeldraden bij planten en insectenlarven, werden getroffen door straling. Op het niveau van organismen is gebleken, dat jonge planten en dieren het meest gevoelig zijn voor de acute gevolgen van straling.

Gedurende de eerste jaren na het Tsjernobyl ongeluk zijn bij lichaamscellen en bij kiemcellen van planten en dieren binnen het uitsluitingsgebied genetische gevolgen van straling waargenomen. Verschillende genetische afwijkingen bij cellen, die toe te schrijven zijn aan straling, worden nog steeds gerapporteerd als uitkomst van proefondervindelijke studies bij planten en dieren, zowel binnen als buiten het uitsluitingsgebied. Het is niet bekend of de genetische afwijkingen bij cellen, van enige nadelige biologische betekenis zijn.

Het herstel van de getroffen biota binnen het uitsluitingsgebied is verbijsterend geweest door de alles overheersende reactie op het opheffen van menselijke activiteiten, bijv. het beëindigen van landbouw en industriële activiteiten en de daarmee gepaard gaande vervuiling van het milieu in de ergst getroffen gebieden. Met als resultaat dat populaties van veel planten en dieren zich uiteindelijk hebben uitgebreid en dat de huidige omstandigheden van het milieu positief hebben gewerkt op de biota binnen het uitsluitingsgebied.

### **Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek**

De lange termijn gevolgen voor populaties van planten en dieren binnen het uitsluitingsgebied van het Tsjernobyl ongeluk dienen verder onderzocht te worden, teneinde verdere systemen te ontwikkelen voor de bescherming van het milieu tegen straling. Dit is wereldwijd gezien een uniek gebied voor radio-ecologisch en radiobiologisch onderzoek in een overigens natuurlijke omgeving.

In het bijzonder, de bestudering van de laatste radiobiologische verschijnselen van erfelijke onstabieleit en van de gevolgen van straling op de genetische structuur bij populaties van planten en dieren bij meerdere generaties, kan fundamenteel nieuwe wetenschappelijke kennis opleveren.

Er bestaat een noodzaak om standaardmethodes te ontwikkelen voor de reconstructie van de biota-dosis, bijv. in de vorm van een uniform protocol voor de meetmethode van de dosis.

### **Aanbevelingen inzake tegenmaatregelen en herstel**

Om voorbereid te zijn op een nucleaire ramp of radiologische noodsituatie, dienen internationaal eensluidende beschermingsmaatregelen te worden ontwikkeld voor fokdieren, gebaseerd op moderne radiobiologische gegevens, inclusief de ervaring die is opgedaan binnen het Tsjernobyl uitsluitingsgebied.

Het is onwaarschijnlijk dat enige op technologie gebaseerde herstelmaatregel, gericht op het verbeteren van de radiologische omstandigheden voor planten en dieren binnen het uitsluitingsgebied van de Tsjernobyl kernenergiecentrale, geen negatieve effecten zou hebben op de biota.

## **MILIEUASPECTEN SAMENHANGEND MET DE ONTMANTELING VAN DE AFSCHERMKAP EN MET DE BEHEERSING VAN RADIOACTIEF AFVAL**

### **Conclusies**

De toevallige verwoesting van de reactor in Unit 4 van de Tsjernobyl kernenergiecentrale leidde tot het vrijkomen van uitgebreide radioactieve besmetting en grote hoeveelheden radioactief afval in de Unit, op de locatie van de Tsjernobyl kernenergiecentrale en in het omliggende gebied (uitsluitingsgebied). De constructie van de afschermkap tussen mei en november 1986, bedoeld om de onmiddellijke omgeving van de beschadigde reactor af te schermen, verminderde de stralingsniveaus op de locatie en voorkwam verdere uitstoot van radionucliden buiten de locatie.

De zeer korte tijd waarin de afschermkap werd opgezet, onder omstandigheden waarbij het personeel aan zware straling werd blootgesteld en waarbij maatregelen werden genomen om tijd en kosten te besparen gedurende de constructie en de hoge snelheid binnen de structuur van inname van dosissen, leidden tot onvolkomenheden in de nieuw gebouwde afschermkap en tot het ontbreken van uitgebreide gegevens met betrekking tot de stabiliteit van de beschadigde structuren in Unit 4. Naast het bestaan van onzekerheden over de stabiliteit op het moment van constructie, verzwakten onderdelen van de structuur van de afschermkap als gevolg van corrosie door vocht gedurende de bijna twintig jaren die verstreken zijn sinds het opzetten van de afschermkap. De grootste dreiging voor de afschermkap is de mogelijkheid van het bezwijken van de bovenkant van de constructie en de uitstoot van radioactief stof naar het milieu.

Om mogelijk instorten van de afschermkap in de toekomst te voorkomen, zijn maatregelen voorzien om de onstabiele structuren van de afschermkap te versterken. Om de bestaande afschermkap af te dekken zal bovendien, volgens plan, een nieuwe veilige afschermconstructie (NSC) worden gebouwd als lange termijn oplossing, met een werkbare periode van meer dan 100 jaren. Met de constructie van de NSC wordt aangenomen dat de bestaande afschermkap kan worden ontmanteld, dat de zeer radioactieve brandstofmassa (FCM) uit Unit 4 kan worden verwijderd en dat uiteindelijk de beschadigde reactor buiten bedrijf kan worden gesteld.

Tijdens de uitvoering van herstelmaatregelen na het ongeluk kwamen grote volumes aan radioactief afval vrij op de locatie van de Tsjernobyl kernenergiecentrale en in de directe omgeving daarvan. Dit was het gevolg van het schoonmaken van besmette gebieden. Het afval werd verzameld in tijdelijke afvalopslag dicht aan de oppervlakte en in afvoervoorzieningen. Om het verspreiden van stof te vermijden, de niveaus aan radioactiviteit te verminderen en betere arbeidsomstandigheden te bewerkstelligen in en om Unit 4, werden tussen 1986 en 1987 binnen het uitsluitingsgebied diverse soorten voorzieningen gerealiseerd voor het graven van greppels en het terugvullen van grond op een afstand van 0,5 tot 15 km van de locatie van de kernenergiecentrale. Deze voorzieningen voldoen niet aan de tegenwoordige veiligheidseisen voor de verwerking van afval en werden tot stand gebracht zonder behoorlijke ontwerpdocumentatie, zonder het bouwen van barrières of het uitvoeren van hydrageologische onderzoeken.

Gedurende de jaren die volgden op het ongeluk werden veel middelen aangewend om te voorzien in een systematische analyse en in een aanvaardbare strategie voor de beheersing van het aanwezige radioactieve afval. Een breed geaccepteerde strategie is vandaag de dag echter nog niet ontwikkeld voor de beheersing van radioactief afval op de locatie van de Tsjernobyl kernenergiecentrale en binnen het uitsluitingsgebied, in het bijzonder voor de beheersing van hoogwaardig en langlevend afval. Enkele redenen daarvoor zijn het grote aantal plaatsen en gebieden die bestemd zijn voor de opslag voor radioactief afval en de afvoervoorzieningen, waarvan slechts de helft goed bestudeerd en in kaart gebracht is. Dit leidt tot grote onzekerheden betreffende de in kaart gebrachte hoeveelheden radioactief afval.

Voor de nabije toekomst wordt rekening gehouden met de mogelijkheid van meer radioactief afval, dat vrij zal komen tijdens de bouw van de nieuwe, veilige afschermconstructie (NSC), tijdens de mogelijke ontmanteling van de beschermkap, de verwijdering van de brandstofmassa (FCM) en tijdens het buiten bedrijfstellen van Unit 4. Dit afval van onderling verschillende aard, dient naar behoren te worden afgevoerd.

Volgens het nationale programma van Oekraïne met betrekking tot de beheersing van radioactief afval bestaan er verschillende keuzemogelijkheden voor de diverse soorten afval. De voorziene keuzemogelijkheden voor afval met een lage radioactiviteit zijn het indelen en mogelijk ontsmetten van het afval in overeenstemming met de fysische eigenschappen (bijv. aarde, beton, metaal) en / of het opwerken van het afval voor zinnig hergebruik (hergebruik van aarde voor de fundering van de NSC, smelten van stukken metaal) dan wel afvoeren voor vernietiging.

Het is de bedoeling om het afval dat langdurig actief blijft, te verzamelen in een tussenopslag. Verschillende keuzemogelijkheden voor opslag worden overwogen. Een besluit is nog niet genomen. Men gaat ervan uit dat de ontmanteling van de afschermkap en de daaropvolgende verwijdering van de brandstofmassa (FCM) zal plaatsvinden na de bouw van de nieuwe veilige afschermconstructie (NSC) en na het buiten bedrijfstellen van de voorzieningen rond de afschermkap. Het is de bedoeling om hoogwaardig radioactief afval ter plaatse gedeeltelijk te behandelen en vervolgens tijdelijk op te slaan tot een geologische afvoerlocatie op grote diepte beschikbaar is voor definitieve verwijdering.

Een dergelijke strategische benadering wordt voorzien in het uitgebreide programma voor de beheersing van radioactief afval dat in 1996 werd goedgekeurd en in 2004 werd ondertekend door de regering van Oekraïne. In overeenstemming daarmee wordt het redelijk geacht om een specifiek onderzoek te starten naar het verkennen van de meest geschikte geologische locatie in dit gebied in 2006. De constructie van een diep gelegen geologische afvoervoorziening zou daaropvolgend voor 2035 – 2040 gerealiseerd kunnen zijn.

De toekomstige ontwikkeling van het uitsluitingsgebied als industriegebied of als natuureservaat hangt af van de toekomstige strategie voor het ombouwen van Unit 4 in een ecologisch veilig systeem, d.w.z. de ontwikkeling van een nieuwe veilige afschermconstructie, de ontmanteling van de huidige afschermkap, de verwijdering van de brandstofmassa en het uiteindelijk buiten bedrijfstellen van de reactorlocatie in Unit 4.

Units 1, 2 en 3 (1000 MW RBMK reactoren) zijn momenteel gesloten met als doel buiten bedrijfstelling, terwijl twee extra reactoren (units 5 en 6) die bijna gereed waren, na het ongeluk in 1986 werden opgegeven.

Er bestaan tegenwoordig onzekerheden over de aard en hoeveelheid radioactief materiaal in de beschermkap en ook over de afvalopslag en afvoerlocaties binnen het uitsluitingsgebied. Dit heeft behalve gevolgen voor de inschattingen van de veiligheid en de effecten op het milieu, ook gevolgen voor het ontwikkelen van herstelmaatregelen en normen voor nieuwe voorzieningen.

### **Aanbevelingen voor toekomstige maatregelen**

Met het oog op de voortdurende inspanning ter verbetering van de veiligheid en de hiervoor genoemde onzekerheden, worden de volgende belangrijke aanbevelingen gedaan ten aanzien van de ontmanteling van de afschermkap en de beheersing van het radioactieve afval, dat is vrijgekomen als gevolg van het ongeluk:

Omdat op zichzelf staande inschattingen ten aanzien van de veiligheid en het milieu alleen zijn gedaan voor bepaalde voorzieningen in en rond de Tsjernobyl kernenergiecentrale, dient een uitgebreide inschatting van de effecten op veiligheid en milieu te worden gedaan in overeenstemming met internationale standaards en met aanbevelingen die alle maatregelen binnen het gehele uitsluitingsgebied omvatten.

Gedurende de voorbereidingen en de constructie van de NSC en de verwijdering van grond, wordt ervan uitgegaan dat bepaalde meetbronnen zullen worden verwoest. Daarom is het belangrijk, met het oog op de veranderende hydrageologische omstandigheden bij de afschermkap en de mogelijke blootstellingkanalen (bijv. via grondwater), om milieutechnische meetstrategieën, meetmethoden en meetapparatuur te handhaven en te verbeteren alsmede gekwalificeerde medewerkers aan te houden, die nodig zijn voor een adequate uitvoering van het meten van de omstandigheden op de locatie van de Tsjernobyl kernenergiecentrale en in het uitsluitingsgebied.

Het pas na lange tijd ontmantelen van de afschermkap (ongeveer 50 jaren) lijkt geen levensvatbare keuzemogelijkheid te zijn vanwege de noodzaak van lange termijn onderhoud ten behoeve van de stabiliteit en integriteit van de structuur en het onderhouden van hulpbronnen en kennis. In de lange termijn strategie werden zorgen geuit met betrekking tot het verlies van de meest ervaren personeelsleden op de Tsjernobyl kernenergiecentrale en met betrekking tot het handhaven van een stabiel niveau aan mankracht, dat nodig is voor het veilig bedrijven van de NSC.

Het is redelijk om spoedig na de ontmanteling van onstabiele structuren van de beschermkap, een begin te maken met het terugwinnen van de brandstofmassa (FCM) in plaats van te wachten op de beschikbaarheid van een geologische afvoervoorziening. Tijdens het optimaliseren van de ontmanteling van de afschermkap dient echter speciale aandacht te worden besteed aan de dosissen die op verschillende tijden door werknemers kunnen worden opgenomen.

Om zeker te stellen dat constante inspectiemethoden consequent worden toegepast en dat voldoende capaciteit beschikbaar is voor voorzieningen voor alle soorten afval, is het nodig om een integraal programma ten aanzien van de beheersing van afval te ontwikkelen voor de beschermkap, de Tsjernobyl kernenergiecentrale en het uitsluitingsgebied.

Van alle maatregelen voor herstel en voor buiten bedrijfstelling, dient speciale nadruk te worden gelegd op de noodzaak om afval (in het bijzonder afval met transurane componenten) te karakteriseren en te rubriceren en op het tot stand brengen van een infrastructuur die beantwoordt aan het doel van veilige, lange termijn beheersing van hoogwaardig en langdurig actief afval. Daarom is de ontwikkeling vereist van de nodige infrastructuur voor de beheersing van afval met het doel om voldoende capaciteit voor de verwerking van afval te waarborgen. De huidige infrastructuur belemmert de snelheid en continuïteit van herstelmaatregelen op de locatie van de Tsjernobyl kernenergiecentrale en in het uitsluitingsgebied.

Een samenhangende en uitgebreide strategie voor het in ere herstellen van het uitsluitingsgebied is nodig, waarbij speciale aandacht dient te worden besteed aan het verbeteren van de veiligheid van de bestaande afvalopslag en verwijderingvoorzieningen. Dit zal de ontwikkeling vereisen van een methode die prioriteiten stelt voor het herstel van locaties. De methode dient gebaseerd te zijn op de resultaten van veiligheidsinschattingen en zich te richten op besluitvorming ten aanzien van locaties, waar afval wordt teruggewonnen en verwijderd en waar het is toegestaan dat afval ter plaatse ontleedt wordt.