

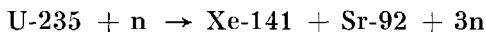
Om radioaktiv forurening af landbrugsjord og kulturplanter

Af lic. agro. A. ANDERSEN

afdelingen for landbrugsforsøg,
atomenergikommissionens forsøgsanlæg, Risø

I de seneste år har plantefysiologer og agrikulturkemikere i stigende grad interesseret sig for en række grundstoffer, hvis forhold i jord, planter og dyr man ikke tidligere har skænket større opmærksomhed. Disse stoffer omfatter forskellige radioaktive isotoper, der dannes ved atomkernespaltninger i atombomber og -reaktorer.

Ved atomkernespaltning, fission, af tunge atomkerner, sprænges atomet i to fragmenter, hvis masse almindeligvis er ulige. For eksempel ved fission af uran-235 kan der ske følgende:



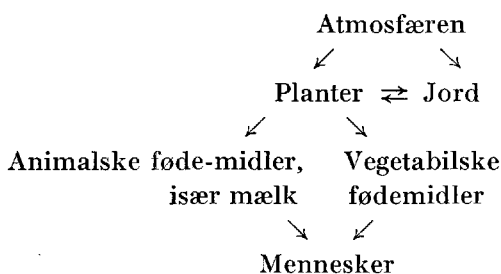
Men det er ikke altid, at der ved fission af uran opstår de samme to fragmenter. Det mest sandsynlige resultat er fissionsprodukter med massetal omkring 136 og 95, men samtlige stoffer med massetal mellem 72 og 161 er påvist efter fission af uran-235 (9).

Ved atombombesprængninger frigøres en lang række radioaktive fissionsprodukter, som alt efter arten og størrelsen af bomben i større eller mindre grad spredes i atmosfæren og senere når jordoverfladen og vegetationen som radioaktivt nedfald i form af støvpartikler eller med regnvandet.

De processer, der sker i en atomreaktor, er i princippet de samme, som sker i en atombombe, blot har man i reaktorerne kontrol over kernespaltningen; men hvis denne kontrol trods alle forsigtighedsforanstaltninger svigter, kan reaktoren løbe løbsk med fare for radioaktiv forurening af området omkring reaktoren.

Den fare, der er forbundet med det radioaktive nedfald, afhænger af: 1) hvor stor en del der gennem atmosfære, jord, planter og dyr når vore fødemidler, 2) hvordan de radioaktive stoffer fordeles og tilbageholdes i den menneskelige organisme og 3) halveringstiden og den stråling, der udsendes. Langt de fleste af de ca. 200 fissionsprodukter, der dannes ved spaltning af tunge atomkerner, har en meget kort halveringstid og deltager kun i ringe grad i de biologiske processer, hvorfor de ikke skal omtales nærmere her. Men tilbage bliver tre stoffer, nemlig radioaktive isotoper af jod, cæsium og strontium, der deltager i forskellige biologiske processer, og som på grund af radioaktiviteten kan virke skadelig på mennesker.

De veje, hvoraf disse stoffer overføres til vore fødemidler, kan anskueliggøres ved følgende diagram (30):



De radioaktive stoffer, som spredes i atmosfæren, kan som nævnt stamme fra atombombesprængninger eller reaktoruheld, og mængden vil afhænge af, hvor store aktivitetsmængder der frigøres i hvert enkelt tilfælde, medens spredningsområdet i det væsentlige vil afhænge af partikelstørrelsen og vejrforholdene. Større partikler vil ret hurtigt falde til jorden og resultere i en lokal belægning, medens de finere partikler føres længere bort med vinden og spredes over meget store områder.

Sker aktivitetsfrigørelsen i vækstperioden, vil en del af de radioaktive stoffer falde direkte på planterne og dels forårsage en overfladisk kontaminering dels en optagelse i planterne gennem bladene. Fra planterne kan de radioaktive stoffer bringes videre til den menneskelige organisme enten ved direkte fortæring af

planteprodukter eller via animalske fødemidler fra dyr, der er fodret med kontamineret foder.

En del af de radioaktive stoffer falder direkte på jorden og blandes ved bearbejdningen i de øverste lag, hvorfra de kan optages af planterne og derfra igen finde vej til den menneskelige organisme.

For at kunne bedømme faren ved en eventuel stor stigning i radioaktivt nedfald i fremtiden er det af stor betydning, at vi lærer at kende de nævnte radioisotopers forhold i jord, planter, dyr og mennesker. Der er da også i de seneste år udført talrige forsøg til belysning af disse forhold, og i det følgende skal kort omtales nogle resultater fra sådanne undersøgelser.

Radioaktivt jod

Ved fissionsprocesserne dannes en række radioaktive isotoper af jod (I), hvoraf dog kun I-131 (halveringstid 8 dage) og måske I-133 (halveringstid 22 timer) har nogen betydning ved radioaktiv forurening af fødemidler. Jod er som bekendt et nødvendigt næringsstof for dyr og mennesker. Det koncentrerer især i skjoldbruskkirtlen og indgår i det her dannede hormon, thyroxin. Indtages radioaktivt jod med føden, vil det følge alm. jod i organismen og derfor også ophobes i skjoldbruskkirtlen, hvis funktion kan tage varig skade af strålingen.

Radioaktivt jod er især aktuelt i forbindelse med reaktoruheld, idet dets kogepunkt er relativt lavt, og det derfor lettere slipper ud i atmosfæren, hvis reaktoren løber løbsk og bliver overophedet. Ved det i dagspressen meget omtalte reaktoruheld i Windscale i efteråret 1957 var det især radioaktivt jod, der gennem kølesystemet slap ud i atmosfæren, og med vind og regn førtes til afgrøderne i egnen omkring reaktoren.

Fra afgrøderne kan det radioaktive jod optages i den menneskelige organisme direkte ved fortæring af grøntsager, men nok så vigtigt er det, at køer, der græsser på kontaminerede græsarealer, optager ret betydelige mængder jod, og forsøg har vist, at de udskiller ca. 5 % af indtaget jod i mælken (31). Især kan dette betyde en fare for børn, hvis diæt overvejende består af mælk. For voksne vil faren være betydeligt mindre, og fremstil-

ling af ost, smør og andre mejeriprodukter af mælken vil mindske faren betydeligt både på grund af radioaktivt jods korte halveringstid, og fordi meget af jodet ikke bliver overført til disse produkter.

Radioaktivt cæsium

Cæsium (Cs) hører i det periodiske system hjemme i alkali-metallernes gruppe og ligner i kemiske egenskaber de øvrige alkalimetaller (kalium og natrium). Ved fissionsprocesserne dannes forskellige isotoper af Cs, men især Cs-137, der udsender både beta- og gammastråler og har en halveringstid på 33 år, har interesse i forbindelse med radioaktivt nedfald.

Cs optages ikke i bestemte organer i det menneskelige legeme. Dets biologiske halveringstid er kun 35 dage, hvilket bevirker, at indholdet i det menneskelige legeme relativt hurtigt kommer i ligevægt med omgivelserne.

Cs optages let af planterne gennem bladene, hvorfra det transporteres rundt i hele planten. Ved forsøg med tilførsel af forskellige fissionsprodukter (Sr-90, Ru-106, Cs-137 og Ce-144) til blade af solsikke og snittebønner fandt GULIAKIN og YUDINTSEVA (10), at Cs transporteredes til planternes øvrige organer i mængder, der var ca. 100 gange så store som mængderne af de øvrige isotoper. I karforsøg med forskellige afgrøder sprøjtet med radioaktiv Cs-opløsning fandt MIDDLETON (17) i hvede fra 3 til 9 % af tilført Cs i kernerne, i kartofler fandtes ca. 25 % i knoldene, medens der kun fandtes ca. 5 % i roden af sukkerroer og turnips. Resultaterne er opgivet som % af tilført aktivitet, men den mængde, der optages gennem bladene, vil sikkert variere fra planteart til planteart afhængig af bladenes opbygning (behåring, kutikula og vokslag) og tidspunktet i vækstperioden.

Også gennem planternes rødder optages Cs let. I vandkultur-forsøg (10) med varierende reaktion optog hvede og ærter de største Cs-mængder ved pH 6,5–7,0. Ved stigende tilførsel af kalium (K) til næringsopløsningen fandtes en faldende optagelse af Cs. MENZEL og HEALD (14) undersøgte optagelsen af K og Cs og udtrykte resultaterne ved fordelingsfaktoren:

$$\text{fordelingsfaktoren} = \frac{\left(\frac{\text{Cs-137}}{\text{K}}\right) \text{ i planterne}}{\left(\frac{\text{Cs-137}}{\text{K}}\right) \text{ i næringsopløsningen}}$$

For de fem plantearter — hirse, havre, boghvede, sødkløver og solsikke — varierede fordelingsfaktoren fra 0,16—0,29, hvilket vil sige, at planterne optager K lettere end de optager Cs.

Tilførsel af kalcium (Ca) bevirkede ligeledes et fald i hvedens optagelse af Cs, medens havre og ærter optog større mængder ved stigende tilførsel af Ca (10).

Planternes optagelse af Cs fra jorden er undersøgt af adskillige forskere (6, 8, 10, 11, 12, 20, 21, 27). Optagelsen er normalt ret ringe på grund af, at Cs fastlægges i uombytlig form i jorden, men afhænger bl.a. af jordtypen — arten og mængden af lerminerale — og indholdet af ombytlig K i jorden. NISHITA et al. (21) undersøgte virkningen af K og stabilt Cs på planternes optagelse af Cs-137 fra tre forskellige jordtyper og fandt, at tilførsel af K til jorder med et relativt højt indhold af K ikke reducerede planternes optagelse af Cs-137. Men efter at planterne havde udpint jorden for K, steg optagelsen af Cs-137, og tilførtes derefter K, fik man en reduktion i optagelsen af Cs-137. Tilførsel af stabilt Cs til jorden resulterede i en stigende optagelse af Cs-137, hvilket formentlig skyldes, at de meget små koncentrationer af Cs-137 bindes fast til lerkolloiderne, og ved tilførsel af relativt store koncentrationer af stabilt Cs indstiller der sig en ligevægt mellem de to isotoper, hvorved en større del af Cs-137 bliver tilgængelig for planterne.

Ved tilførsel af Cs fandt FREDERIKSSON og ERIKSSON (6), afhængig af jordtypen, en stigning i optagelsen af Cs-137, medens GULIAKIN og YUDINTSEVA (8) fandt en reduktion i optagelsen ved kalkning af sure jorder. Også med hensyn til kvælstofgødskningens indvirkning på Cs-optagelsen er der uoverensstemmelser (10, 8). Derimod synes fosfor at nedsætte planternes optagelse, og tilføres kvælstof sammen med K fås ligeledes en reduceret optagelse af Cs-137.

Selv om der i de seneste år er udført en række undersøgelser, er kendskabet til Cs's forhold i jord og planter endnu ret begrænset. Vor nuværende viden bygger udelukkende på udenlandske undersøgelser, og da der som nævnt er nogen uoverensstemmelse mellem disse forsøgsresultater, kan man ikke uden videre drage slutninger, der vil gælde under vore klima- og jordbundsforhold.

Radioaktivt strontium

Ved fissionsprocesserne dannes forskellige isotoper af strontium (Sr), og af disse er det især Sr-89 (halveringstid 51 dage) og Sr-90 (halveringstid 28 år), der har interesse i forbindelse med radioaktivt nedfald. Sr hører hjemme i kalciumgruppen i det periodiske system og ligner Cs meget i kemiske egenskaber. Det følger Ca i biologiske processer. Hos dyr og mennesker aflejres Sr i knoglevævet, og som følge deraf kan tilstedeværelse af radioaktivt Sr i fødemidlerne forårsage knoglekræft og leukæmi. Det er derfor af overordentlig stor betydning at undersøge, i hvor stor udstrækning radioaktivt Sr, gennem atmosfære, jord, planter og dyr, når vore fødemidler og aflejres i det menneskelige skelet. Ved talrige forsøg, der de senere år er udført til belysning af faren ved radioaktivt nedfald, er der lagt megen vægt på at belyse problemerne i forbindelse med radioaktivt Sr, og inden for plantedyrkingen er der især lagt vægt på at undersøge, i hvor høj grad man kan reducere planternes optagelse af Sr-90.

Planternes optagelse af strontium

Den første tid efter en større aktivitetsfrigørelse vil mængden af radioaktivt Sr, der overføres til vore fødemidler, afhænge af, hvor meget der aflejres på og optages gennem bladene. Men efterhånden vil regnen skylle en del af radioaktiviteten af planterne ned på jordoverfladen, og ved jordbearbejdningen blandes Sr-90 i de øverste lag, hvorfra det kan optages gennem planternes rødder.

Den mængde radioaktivt støv, der aflejres på planternes overflade, vil som nævnt afhænge af partikelstørrelsen og vejrforholdene samt naturligvis af plantearten og tidspunkt i vækstperioden.

En del af det aflejrede Sr vil opløses i vand — regn og dug — og optages gennem bladene, men translokationen synes at være ringe (2, 10, 11, 17).

I karforsøg tilførte MIDDLETON (17) 25—75 μC^1 Sr-89 pr. m^2 og fandt ca. 1 % af tilført Sr-89 i hvedekerner, når sprøjtningen foretoges en uges tid eller mere efter skridning, men sprøjtedes før skridningen, fandtes mindre end 0,1 % i de modne kerner. I kartofler og roer, der sprøjtedes 2—3 måneder før optagning, fandtes ca. 0,5 % af tilført Sr-89 i kartoffelknoldene og ca. 1 % i roden af sukkerroer og turnips. Ved sammenligning af bladoptagelse og translokation af Ca-45 og Sr-89 i bønneplanter fandt BUKOVAC og WITWER (2), at både optagelsehastigheden, totaloptagelsen og translokationen var større for Ca-45 end for Sr-89.

Den mængde Sr-90, planterne optager gennem rødderne, afhænger af flere faktorer: jordens reaktion og kalkningstilstand, gødskning, jordtypen, Sr-90's fordeling i jordprofilen, klimatiske forhold samt planteart og tidspunkt i vækstperioden.

Den mest nærliggende forholdsregel til begrænsning af planternes optagelse af Sr-90 ville være at fortynde med stabilt Sr. Men i den forbindelse må det erindres, at selv store aktivitetsmængder af carrierfri Sr-90 kun repræsenterer en uhyre lav ionkoncentration — 1 g carrierfri Sr-90 = 200 curie; til sammenligning kan nævnes, at den totale akkumulerede mængde Sr-90 i det radioaktive nedfald efter prøvesprængninger af atombomber anslås til ca. 15 millicurie pr. km^2 —. Det er sandsynligt, at en stor del af Sr-90 vil være bundet til jordkolloiderne og ikke kunne optages af planterne. En tilsætning af stabilt Sr ændrer ligevægtskoncentrationen af Sr i jordvædsken og ved ionbytningen kan der muligvis frigøres en del radioaktivt Sr, som ellers ikke var tilgængeligt for planterne. Forsøgsresultaterne til belysning af dette spørgsmål er ikke helt overensstemmende. FREDERIKSSON et al. (6) fandt noget nedsat optagelse af Sr-90 i byg og rødkløver, medens spinat optog større mængder Sr-90, når der samtidig tilførtes stabilt Sr. ROMMY et al. (28) fandt stigende optagelse af Sr-90 ved tilførsel af stabilt Sr. Først ved meget store tilførsler opnås en effektiv isotopfortynding.

1. μC = mikrocurie; den mængde af en radioisotop, der undergår 37000 atomkerneomdannelse pr. sek. 1 μC carrierfri Sr-89 = ca. 3.5×10^{-11} g.

Vekselvirkningen mellem Sr og Ca har været genstand for talrige undersøgelser. Resultatet fra vandkulturforsøg tyder på, at planterne optager Sr og Ca på samme måde. COLLANDER (3) anfører således på grundlag af analyse af hele planter fra vandkulturforsøg, at planterne ikke kan »skelne« mellem Sr og Ca, men optager de to ioner i samme forhold, som de forekommer i næringsopløsningen. Selv ved meget store variationer i koncentrationen af Sr i forhold til Ca fandt Collander:

$$(Sr/Ca) \text{ i planter} = (Sr/Ca) \text{ i næringsopløsningen}$$

Disse resultater bekræftes af nyere undersøgelser (1, 14). Derimod synes planterne at kunne diskriminere mellem de to ioner ved translokationen, hvor Ca transporteres lettere end Sr-90 (14, 25, 32).

Forholdene i forbindelse med optagelsen af Sr-90 fra jorden er betydelig mere komplicerede. Forudsat at Sr-90 tilføres i opløselig tilstand, vil det reagere med jordkolloiderne og deltage i kationbygningen i lighed med andre kationer. Dets tilgængelighed for planterne varierer fra jordtype til jordtype afhængig af arten og mængden af jordkolloider samt basemætningsgraden og den relative tilgængelighed af andre kationer, især Ca.

Optagelsen af Sr fra forskellige jordtyper er undersøgt i karforsøg af adskillige forskere (1, 8, 11, 15, 27, 29, 40). Størst mængde optages fra lette sandjorder med et lavt reaktionstal og mindst fra kalkrige jorder. Kalkning af sure jorder reducerer optagelsen af Sr-90.

I tabel 1 er gengivet resultater fra et karforsøg med en sur, sandblandet lerjord, der blev tilført Ca i henholdsvis kalciumkarbonat og gips, hvorefter der blev dyrket ladino kløver over en længere periode.

Det ses, at Sr-90-optagelsen reduceres betydeligt ved tilsætning af Ca til denne jord. Men ved tilførsel af Ca til neutrale og basiske jorder opnåedes ingen reduktion i optagelsen af Sr-90. Det er kun det ombyttelige — tilgængelige — Ca, der er virksom ved fortynding af Sr-90.

Forskellige plantearter optager vidt forskellige mængder Sr-90 (6, 8, 15, 27, 37, 40), men forholdet mellem Sr-90 og Ca i for-

Tabel 1. Virkningen af kalciumkarbonat og gibs på optagelsen af Sr-90 i ladino kløver (29)

Milliækv. Ca pr. 100 g jord	Radioaktivitet* pr. g tørstof efter dyrkning i følgende antal dage:					
	252	304	329	423	551	610
CaCO₃						
1.0	5400	6010	5662	5712	4680	4663
5.0	2515	2318	2556	2670	2514	2184
10.0	1814	1676	1791	1646	1676	1536
CaSO₄						
1.0	2747	2545	3204	2810	—	—
5.0	1222	1782	1552	1177	—	—
10.0	1097	1455	1214	1302	—	—

* Disintegrationer pr. sekund.

skellige planter dyrket under ensartede betingelser i samme jord varierer kun lidt. FREDERIKSSON et al. (6) sammenlignede 17 forskellige plantearters optagelse af Sr-90 og Ca fra samme jord, tilført forskellige mængder Ca, og beregnede OR-værdien (observed ratio (6)).

$$OR_{\text{planter-jord}} = \frac{(\text{Sr}^{90}/\text{Ca}) \text{ i planter}}{(\text{Sr}^{90}/\text{Ca}) \text{ i jorden}}$$

I tabel 2 er gengivet resultaterne fra denne undersøgelse. Det ses, at OR-værdien for de sytten plantearter er af samme størrelsesorden og næsten uafhængig af Ca-tilførslen, indtil basebytningskomplekset er mættet med Ca.

Tilførsel af større mængder Ca end 100 %'s mætning resulterer i en større OR-værdi antagelig på grund af, at kun det ombyttelige Ca er tilgængeligt for planterne. At OR-værdien er mindre end 1, når jorden ikke er mættet med Ca, tyder på, at der diskrimineres mod Sr-90. Denne diskrimination behøver imidlertid ikke at ske ved selve optagelsen, men kan dels skyldes forskelle i translokationen af de to kationer, idet det kun er en del af planterne, der er analyseret, og dels at den kemiske bestemmelse af Ca ikke nøjagtigt angiver den plantetilgængelige mængde.

Tabel 2. $OR_{\text{planter-jord}}$ i forskellige plantearter (6)

Afrøde	% af kationbytningskapaciteten mættet med Ca				
	12.5	25.0	50.0	100	200
Havre.....	0.64	0.70	0.74	0.84	1.26
Byg.....	0.80	0.71	0.55	0.64	1.09
Ærter.....	0.76	0.80	0.79	0.76	1.81
Rødkløver, diploid.....	0.79	0.77	0.71	0.63	1.22
Rødkløver, tetraploid.....	0.75	0.70	0.69	0.60	1.13
Timothe.....	0.71	0.79	0.65	0.95	1.60
Enggræs.....	0.72	0.87	0.98	1.14	2.18
Gul sennep, diploid.....	0.67	0.74	0.84	0.68	1.10
Gul sennep, tetraploid.....	0.70	0.75	0.76	0.67	1.10
Kartofler.....	0.58	0.46	0.49	0.51	0.87
Sukkerroer.....	—	0.74	0.68	0.58	1.00
Gulerødder.....	0.60	0.67	0.63	0.51	0.84
Radiser.....	0.87	0.77	0.71	0.65	0.97
Salat.....	0.65	0.69	0.56	0.57	1.00
Spinat.....	—	0.75	0.67	0.87	1.07
Hvidkål.....	0.65	0.72	0.64	0.48	0.88
Blomkål.....	0.60	0.56	0.54	0.56	0.99

Bestemmelse af ombyttelige kationer i jorden foretages som bekendt ved rystning af jordprøven i en neutral saltopløsning — oftest ammoniumacetat — og bestemmelse af forskellige kationer i filtratet. Denne metode angiver imidlertid ikke noget om den relative tilgængelighed for planterne, men kun mængden af ombyttelige, labile kationer i jorden. Den relative tilgængelighed af Sr og Ca i jorden kan antagelig bedre bestemmes ved hjælp af en metode, der er beskrevet af SCOTT RUSSEL, SCHOFIELD og NEWBOULD (34) og består i rystning af jordprøven i en kalciumkloridopløsning, som er »mærket« med Ca-45 og Sr-89. Efter rystningen bestemmes, hvor meget Ca-45 og Sr-89 der er fjernet fra opløsningen, og på grundlag af disse målinger beregnes de to ioners relative deltagelse i kationbytningen. En sammenligning af denne analysemetode med planternes optagelse fra forskellige jorder viste bedre overensstemmelse end de konventionelle metoder til bestemmelse af tilgængeligt Sr og Ca i jorden.

Oplysninger om gødsknings indflydelse på planternes optagelse af radioaktivt Sr er ret sparsomme. Russiske undersøgelser (8, 11) viste, at gødskning med kvælstof, kalium og fosfor reduce-

rede planternes relative indhold af Sr-90. Tilførsel af organisk stof — grøngødning og staldgødning — resulterede ligeledes i en reduktion i planternes indhold. NISHITA et al. (23, 24) fandt en stigende optagelse ved tilførsel af små mængder organisk stof; først ved tilførsel af meget store mængder opnåedes en væsentlig reduktion i afgrødens indhold af Sr-90. Virkningen afhang af arten af organisk stof og jordtypen.

De hidtil omtalte resultater stammer fra karforsøg, hvor det radioaktive Sr har været blandet i hele jordmængden, men i praksis vil Sr-90 — i hvert fald i første omgang — fortrinsvis være til stede i jordprofilens øverste lag, og den mængde, der optages af planterne, vil derfor være afhængig af Sr's bevægelighed, jordbearbejdningen og planternes rodvirksomhed. I ubearbejdede jorder vil størsteparten af Sr-90 blive tilbageholdt i de øverste få cm (6, 10), og planter med et »overfladisk« rodsystem vil optage en forholdsvis stor del sammenlignet med planter, der optager næring fra dybere liggende lag.

Et særligt forhold gør sig gældende for vedvarende græsmarker, hvor der ofte umiddelbart på jordens overflade findes et lag af delvis omsat plantemateriale. Dette lag vil være stærkt udvasket for baser, og Sr-90 vil derfor ikke blive fortyndet med Ca, som det er tilfældet i jorden. Dette medfører, at en forholdsvis stor part af det radioaktive Sr bliver optaget i planterne, og forholdet mellem Sr og Ca bliver højere i afgrøder fra vedvarende græsmarker end i andre afgrøder. Denne optagelse gennem græssernes »overfladiske« rødder og basale stængeldele er af Scott Russel (35) kaldt »stem-base«-optagelse og forklarer det højere indhold af Sr-90, man har fundet i vedvarende græsmarker i England, sammenlignet med indholdet i sædskiftegræsmarkerne.

I markforsøg undersøgte MILLBURN, ELLIS & SCOTT RUSSEL (36) forskellige landbrugsplanters optagelse af Sr-89, der udsprøjtedes på jorden, som enten i forvejen var tilsået eller efter kontamineringen underkastedes forskellige bearbejdninger — harvning eller pløjning til forskellig dybde (ca. 30 og 15 cm). Rajgræs optog større mængde Sr-89, når kontamineringen skete 2—3 dage efter såningen, end når det ved harvning eller pløjning blev blandet i de øverste lag. Derimod syntes jordbearbejdningen ikke at påvirke korn, sukkerroer og kartoflers optagelse af Sr-89. De for-

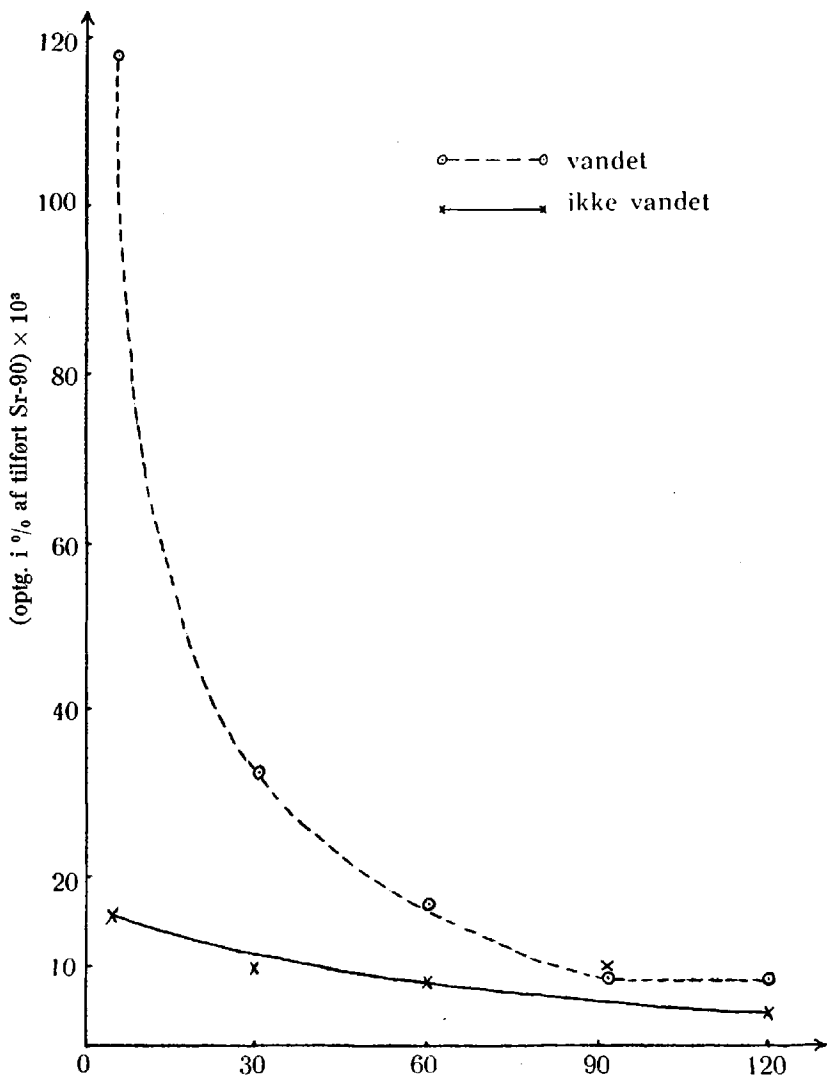


Fig. 1. Byggenes optagelse af Sr-90 fra forskellige dybder. Lysimeterforsøg med og uden vanding, (19).

skellige afgrøder optog vidt forskellige mængder af tilført Sr-89; sukkerroer (rod og top) optog gennemsnitlig mest, 0,95 % af tilført; medens korn og kartofler (knoldene) optog meget små

mængder henholdsvis 0,26 og 0,009 % af tilført, og i tre slet af græsset blev optaget ialt ca. 0,66 % af tilført, men disse gennemsnitstal dækker over store variationer mellem bearbejdning og jordtyper.

Optagelse af Sr-90 placeret i forskellige dybder er undersøgt af MØBERG (19) ved hjælp af lysimeterforsøg med byg. I fig. 1 er gengivet 2 kurver fra denne undersøgelse.

Forsøget er udført i et varmt og tørt klima (Californien) og omfattede forsøgsled, der belyser vandingens indflydelse på optagelsen af Sr-90. Optagelsen i % af tilført Sr-90 var langt den største i de forsøgsled, der blev vandet, og den største mængde blev optaget, hvor det var placeret i de øverste jordlag. Fra 5 cm dybde er optaget ca. 4 gange så meget som fra 30 cm dybde; men en dybere placering end 60—70 cm under jordoverfladen gav ingen yderligere reduktion i optagelsen. I forsøgsleddene uden vanding var optagelsen meget mindre, hvilket skyldes et meget lavere udbytte, idet Sr-90 pr. gram tørstof var højest i disse forsøgsled. Optagelsen fra større dybder end 60—70 cm var i begge tilfælde kun ca. 0,01 % af tilført, og hvis disse resultater gælder under markforhold, må man antage, at en dybpløjning af kontaminerede arealer vil være en effektiv foranstaltning til begrænsning af planternes optagelse af Sr-90.

Dekontaminering af landbrugsjord

Hvis landbrugsarealer pludselig bliver kontaminerede med større mængder radioaktivt nedfald, især Sr-90, kan det blive nødvendigt at gribe til drastiske forholdsregler for at undgå for store mængder radioaktivitet i vore fødemidler.

Er jorden ved aktivitetsfrigørelsen dækket af en afgrøde, vil en del af det radioaktive nedfald blive tilbageholdt på afgrøden, og hvis denne fjernes, før de radioaktive stoffer af regnen skylles ned på jorden, kan dette bidrage til at mindske kontamineringen af jorden.

Effektiviteten af denne forholdsregel afhænger af plantearten og størrelsen af de radioaktive partikler. Amerikanske forsøg (20) i forbindelse med prøvesprængninger af atombomber viste, at

hvede og rødkløver i en afstand af 7 miles fra sprængningsstedet kun tilbageholdt fra 0,1 til 0,2 % af totalnedfaldet. I en afstand af 48 miles tilbageholdtes fra 1 til 5 % og i en afstand af 106 miles blev tilbageholdt helt op til 25 % af totalnedfaldet pr. arealenhed. Denne stigning med afstanden skyldes sikkert partikelstørrelsen, idet hovedparten af de på planterne aflejrede partikler havde en diameter mindre end 44 mikron, og denne fraktion udgjorde en relativ lille del af totalnedfaldet i nærheden af sprængningsstedet. En dekontaminering ved fjernelse af afgrøden vil derfor afhænge af forholdene ved aktivitetsfrigørelsen og formentlig sjældent være tilstrækkelig effektiv forholdsregel.

En dekontaminering ved dyrkning og fjernelse af en række afgrøder eller flere slet af samme afgrøde er en meget langsom proces. Som nævnt er planternes optagelse af Sr fra jorden af størrelsesordenen 1 % af indholdet, og selv om der på lette sandjorder kan optages betydeligt større mængder (8), vil der som regel gå lang tid, før der på denne måde er fjernet en væsentlig del af aktiviteten.

Dekontaminering ved nedvaskning af radioaktiviteten til jordlagene under rodzonen er en mulighed, som sikkert ikke lader sig anvende i praksis. Carrierfri Sr-90 bindes til jordkolloiderne i ombyttelig form (10, 11, 26, 38, 39) og kan frigøres ved almindelig kationbytning, men denne proces er langsom og kræver store mængder salt- eller syreopløsninger for at være effektiv. Yderligere indebærer denne metode, at en række plantenæringsstoffer udvaskes sammen med det radioaktive Sr, så jorden bliver uanvendelig til dyrkning, med mindre man ved gødskning kompenserer for de udvaskede plantenæringsstoffer.

En effektiv dekontaminering kan opnås ved at fjerne de øverste ca. 5 cm af jorden. Men effektiviteten afhænger bl.a. af, hvor jævn jordoverfladen er og kan variere fra ca. 60 % på nyplojet jord til næsten 100 %'s dekontaminering på jævn jord (26). Denne fremgangsmåde indebærer imidlertid problemer med opbevaring af store mængder kontamineret jord, som ikke kan benyttes til dyrkning af landbrugsafgrøder.

Dekontaminering ved udsprøjtning og efterfølgende afskrabning af et klæbemiddel — f.eks. en asfalemulsion —, der binder

det radioaktive nedfald, bliver for tiden afprøvet i amerikanske forsøg (5), men en effektiv metode til anvendelse i større målestok er endnu ikke udarbejdet.

Dekontaminering af fødemidler

Som nævnt når Sr-90 den menneskelige organisme gennem vegetabiliske og animalske fødemidler, især mælk.

En stor del af den radioaktivitet, der er aflejret på planternes overflade, kan fjernes ved at afvaske med vand, fortyndet saltsyre eller versenatopløsning (20). Den sidst nævnte opløsning var mest effektiv, idet den fjernede fra 54 til 98 % af hængig af plantarten. I kornarterne findes den største del af Sr-90 i de vegetative dele af planten og kun en ringe del i kernen. Denne del bliver yderligere reduceret ved fremstilling af mel, idet størsteparten af Sr-90 bliver skilt fra i klidet (13), og melfabrikationen virker derfor som en ret effektiv dekontaminering.

Ved passage af Sr og Ca fra køernes foder til mælken sker der en ret betydelig diskrimination mod Sr, men der overføres dog en del Sr-90 til mælken. En effektiv dekontaminering af mælken er endnu ikke mulig i større stil, men der arbejdes med problemet (18), og det kan nævnes, at det er muligt at fjerne en stor del — op til 84 % — af mælkens indhold af Sr-90 ved hjælp af en kationbytter.

LITTERATURLISTE

1. *Bowen, H.J.M. and Dymond, J.A.*: The Uptake of Calcium and Strontium by Plants from Soils and Nutrient Solutions. Journ. of Expt. Botany, 7 p. 264—72, 1956.
2. *Bukovac, M. J. and Wittwer*: Absorption and Mobility of Foliar Applied Nutrients. Plant Physiology, 32 p. 428, 1957.
3. *Collander, R.*: Selective Absorption of Cations by Higher Plants. Plant Physiology, 16 p. 691, 1941.
4. *Comar, C. L., Russel, R. Scott and Wassermann, R. H.*: Strontium — Calcium Movement from Soil to Man, Science, 126 p. 485—92, 1957.
5. *Dunham, Charles L.*: Radioaktive Fallout — A Two-Year Summary Report. TID-5550, 1959.
6. *Frederiksson, L., Eriksson, B., Rasmusson, B., Gahne, Bo*: Studies on Soil-Plant-Animal Interrelationships to Fission Products, Sec. U.N. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, A/Conf. 15/P/177, 1958.

7. *Frederiksson, Lars*: Tilførslen av radioaktiva ämnen ur atmosfären. Nordiske Jordbrf. Kongress, Oslo, 1959.
8. *Gulyakin, I. V. and Yudinseva, E. V.*: Uptake of Strontium, Cesium and Some Other Fission Products by Plants and Their Accumulation in Crops. Sec. U.N. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, A/Conf. 15/P/2311. 1958.
9. *Katcoff, Seymour*: Fission-Product Yields from U, Th and Pu. *Nucleonics*, 16, 1958.
10. *Klechkovsky, V. M.*: On the Behaviour of Fission Products in Soil. EAC-TR 2867, 1957.
11. *Klechkovsky, V. M. and Guliakin, I. V.*: Behaviour of Tracer Amounts of Strontium, Caesium, Ruthenium and Zirconium in Soils and Plants According to the Data of Investigations with Radioactive Isotopes of These Elements, Radioisotopes in Scientific Research UNESCO, 4 p. 150—72, 1957.
12. *Kornberg, H. A.*: On the Passage of Pairs of Elements Through Food Chains. AEC Research and Development Report HW-60127, 1959.
13. *Lee, C. C.*: Distribution of Radioactivity in Wheat Plants Grown in the Presence, of Strontium-90. *Science*, 129 p. 1280, 1959.
14. *Menzel, R. G. and Heald, W. R.*: Distribution of Potassium, Rubidium, Cesium Calcium and Strontium within Plants Grown in Nutrient Solution. *Soil Science*, 80 p. 287—93, 1955.
15. *Menzel, R. G. and Heald, W. R.*: Strontium and Calcium Contents of Crop Plants in Relation to Exchangeable Sr and Ca in the Soil. *Soil Science Soc. Am. Proc.*, p. 110—12, 1959.
16. *Menzel, R. G. and James, P. R.*: How Soils are Decontaminated, *Plant Food Review*, p. 5, 1959.
17. *Middleton, L. J.*: Absorption and Translocation of Strontium and Cesium by Plants from Foliar Sprays. *Nature*, 181 p. 1300—1303, 1958.
18. *Migicovsky, B. B.*: Removal of Strontium and Cesium from Milk. *Nature*, 184 p. 374, 1959.
19. *Moberg, J. P.*: Uptake of Sr-90 by Barley in Lysimeter. Thesis for the degree of: Master of Science in Soil Science, University of California, 1958.
20. *Nishita, H. and Larson, K. H.*: Summary of Certain Trends in Soil-Plant Relationships Studies of the Biological Availability of Fall-out Debris, UCLA-401, 1957.
21. *Nishita, H., Romney, E. M. m.fl.*: The Influence of K and Cs on the Release of Cs-137 from Three Soils. UCLA-437, 1959.
22. *Nishita, H., Steen, A. J. and Larson, K. H.*: Release of Sr-90 and Cs-137 from Vina Loam upon Prolonged Cropping. *Soil Science*, 86 p. 195—201, 1958.
23. *Nishita, H., Kowalewsky, B.W. and Larson, K. H.*: Influence of Soil Organic Matter on Mineral Uptake by Barley Seedlings. *Soil Science*, 82 p. 307—18, 1956.
24. *Nishita, H., Kowalewsky, B.W. and Larson, K. H.*: Influence of Soil Organic Matter on Mineral Uptake by Tomato Plants. *Soil Science*, 82 p. 401—07, 1956.
25. *Redishe, J. H. and Selders, A. A.*: The Absorption and Translocation of Strontium by Plants. *Plant Physiology*, 28 p. 594—605, 1953.

26. *Reitemeier, R. F. and Menzel, R. G.*: Effects of Nuclear Attack on Soils and Crops. TID-5562 p. 1—10, 1959.
27. *Romney, E. M., Neel, J. W., Nishita, H., Olafson, J. H. and Larson, K. H.*: Plant Uptake of Sr-90, Y-91, Ru-106, Cs-137 and Ce-144 from Soils. *Soil Science*, 83 p. 369—76, 1957.
28. *Romney, E. M. et al.*: Influence of Stable Sr on Plant Uptake of Sr-90 from Soil. *Soil Science*, 87 p. 42—45, 1959.
29. *Romney, E. M. et al.*: Influence of Calcium on Plant Uptake of Sr-90 and Stable Strontium. *Soil Science*, 87 p. 160—63, 1959.
30. *Russel, R. Scott*: Agricultural Aspects of Contamination Arising from the Use of Atomic Energy. EPA/OEEC Meeting on the Application of Atomic Science in Agriculture and Food, 1958.
31. *Russel, R. Scott*: The Entry of Fission Products into the Human Diet. FAO Seminar, Cambridge, Sept. 1959.
32. *Russel, R. Scott and Squire, Helm M.*: The Absorption and Distribution of Strontium in Plants. 1. Preliminary Studies in Water Culture. *Journ. Expt. Botany*, 9 p. 262—76, 1958.
33. *Russel, R. Scott*: Uptake of Strontium by Pasture Plants and Its Possible Significance in Relation to the Fall-out of Strontium-90. *Nature*, 183 p. 1806—07, 1959.
34. *Russel, R. Scott, Schofield, K. and Newbould, P.*: The Availability to Plants of Divalent Cations in the Soils. Sec. U.N. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, A/Conf. 15/P/287, 1958.
35. *Russel, R. Scott*: Deposition of Strontium-90 and Its Content in Vegetation and in Human Diet in the United Kingdom. *Nature*, 182 p. 834—39, 1958.
36. *Russel, R. Scott and Millbourn, G. M.*: Rate of Entry of Radioactive Strontium into Plants from Soil. *Nature*, 180 p. 322—24, 1957.
37. *Scheffer, F. and Ludwig, F.*: Gefäsversuche über die Aufnahme von Radiostrontium aus dem Boden. *Zeitschrift f. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 85/3 p. 244—49, 1959.
38. *Schulz, R. K., Overstreet, Roy and Babcook, K. L.*: On the Soil Chemistry of Radio-Strontium, *Hilgardia*, 27 p. 333—42, 1958.
39. *Spitsyn, V. I. et al.*: A Study of the Migration of Radioelements in Soils. Sec. U.N. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, A/Conf. 15/P/2207, 1958.
40. *Vose, P. B. and Koontz, H. V.*: Uptake of Strontium by Pasture Plants and Its Possible Significance in Relation to the Fallout of Strontium-90. *Nature*, 183 p. 1447—48, 1959.