



Strålsäkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Rapport

Strålskyddskonsekvenser av radioaktivt nedfall från kärnvapenexplosioner

Bilaga 2 - Nuklidsammansättning

2023:05

Författare: Peder Kock, Anders Axelsson, Jan Johansson,
Jonas Lindgren, Anna Maria Blixt Buhr, Jonas Boson,
Ulf Bäverstam, Simon Karlsson

Datum: Mars 2023

Rapportnummer: 2023:05

ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.ssm.se



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Peder Kock, Anders Axelsson, Jan Johansson, Jonas Lindgren,
Anna Maria Blixt Buhr, Jonas Boson, Ulf Bäverstam, Simon Karlsson

2023:05

Strålskyddskonsekvenser
av radioaktivt nedfall från
kärnvapenexplosioner

Bilaga 2 - Nuklidsammansättning

Datum: Mars 2023

Rapportnummer: 2023:05

ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Innehåll

Innehåll	3
1. Inledning	5
2. Fissionsprodukter	6
2.1. Fissionsreaktioner	6
2.2. Initial enhetsvektor	6
3. Aktiveringsprodukter	8
3.1. Inledning	8
3.2. Metod	8
3.3. Aktiveringsandel	9
3.4. Potentiella aktiveringsprodukter	9
3.5. Fissionsekvivalent aktiveringsnuklidvektor	12
4. Urval av nuklider	14
4.1. Fissionsutbyten	14
4.2. Relativa dosbidrag vid markbeläggning	14
4.3. Aktiveringsprodukter	18
4.4. Maxvektor	19
4.5. Relativa dosbidrag vid inandning	20
4.6. Ytterligare mödrar	23
4.7. Molndos	24
4.8. Ädelgaser	24
4.9. Markörnuklider	25
5. Nuklidvektor	26
Referenser	30
Appendix – Rangordning för U-235	31
Appendix – Rangordning för U-238	33

1. Inledning

I den här bilagan ges en detaljerad redovisning av hur den nuklidvektor som Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) använt i spridnings- och dosberäkningarna och andra analyser inom ramarna för detta arbete tagits fram.

Energien som utvecklas i en kärnvapenexplosion kommer från fission (kärnklyvning) av tunga atomkärnor eller från fusion (sammanslagning) av lätta atomkärnor som deuterium och tritium. För att åstadkomma fusion krävs en primär fissionsladdning. Alla kärnvapenexplosioner har därför en fissionskomponent, medan andelen fusionsenergi kan variera från noll till en relativt hög andel fusion. Nuklider som bildas i fissionen benämns fissionsprodukter. Radioaktiva ämnen kan även bildas i material i och omkring ett exploderande kärnvapen som under explosionen påverkas av höga neutronflöden. Nuklider som då bildas genom neutronreaktioner benämns aktiveringsprodukter, av vilka många är radioaktiva. I detta arbete har aktiveringsprodukterna delats in i två underklasser, beroende på om neutronaktivering sker i vapendelar eller omgivningen.

För de strålskyddskonsekvenser som SSM beaktat i den här rapporten är de viktigaste radioaktiva ämnena antingen fissions- eller aktiveringsprodukter. Nuklidvektorn består därför av en uppsättning fissions- och aktiveringsprodukter med tillhörande aktiviteter vid en viss tidpunkt. Även andra radioaktiva ämnen kan spridas efter en kärnvapenexplosion, t.ex. ofissionerat uran och plutonium. Dessa har dock inte beaktats i den här rapporten.

Radioaktiva ämnen sönderfaller till nya ämnen som i sin tur kan vara radioaktiva. Baserat på nuklidvektorn vid en viss tidpunkt, och med kännedom om de ingående nuklidernas halveringstider och sönderfallsprodukter, kan en ny nuklidvektor beräknas för en godtycklig efterföljande tidpunkt. SSM har i detta arbete tagit fram en nuklidvektor innehållande 129 nuklider vid tiden 10 minuter efter en kärnvapenexplosion enligt huvudscenariot. Denna nuklidvektor beskriver minst 95 % av dosbidraget under tidsintervall mellan det första dygnet till det första året för de exponeringsvägar som studerats i rapporten.

Den här bilagan beskriver steg för steg vilka beräkningar som genomförts och avvägningar som gjorts för att ta fram en representativ nuklidvektor för beräkning av strålskyddskonsekvenser i samband med kärnvapenexplosioner. Inledningsvis beskrivs i Kapitel 2 och 3 hur aktivitet för fissions- och aktiveringsprodukter per kiloton laddningsstyrka uppskattats. Därefter beskrivs i Kapitel 4 hur urvalet av nuklider har skett, från de inledande ca tusen nukliderna som bildas i kärnvapenexplosionen, till de 129 som SSM bedömer behövs för att beräkna stråldoser till människor från de studerade exponeringsvägarna inom det första året. Slutligen redovisas i Kapitel 5 nuklidvektorn för huvudscenariot. Nuklidvektorn redovisas även normerad (per kiloton laddningsstyrka) med hänvisning till vidare läsning kring urvalet för varje ingående nuklid.

2. Fissionsprodukter

2.1. Fissionsreaktioner

I en kärnvapenexplosion bildas stora mängder radioaktiva ämnen där huvuddelen består av fissionsprodukter som bildas i neutroninducerade fissionsreaktioner i olika delar av vapnet. Beroende på vapnets konstruktion kan ett antal olika fissionsreaktioner tänkas förekomma, med olika fissionerande material och olika neutronenergier. Detaljer av detta slag är inte kända, och i vilket fall som helst har SSM strävat efter en generisk analys som är så representativ som möjligt för olika typer av kärnvapen. I föreliggande arbete har SSM därför endast beaktat följande tre fissionsreaktioner: fission av U-235 och Pu-239 med fissionspektrumneutroner (representerade av monoenergetiska neutroner med energin 1 MeV) samt fission av U-238 med högenergetiska neutroner (representerade av monoenergetiska neutroner med energin 14 MeV). De första två reaktionerna antas representera ett fissionsvapen och den senare fission i urandelar i ett fusionsvapen [1].

2.2. Initial enhetsvektor

Den initiala enhetsvektorn, dvs. aktiviteten av fissionsprodukter per kiloton (kt) vid tiden $t = 0$, uppskattades genom den metod som redovisas av FOI i Memo 7177 [2]. Uppskattningen bygger på tre steg. Först beräknas det antal fissionerade atomer N som motsvarar en laddningsstyrka på ett kiloton från fission för respektive fissionsreaktion enligt

$$N = \frac{4,2 \cdot 10^{12} \text{ [J/kt]}}{E \times 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ [J/MeV]}}$$

där E är energin per fission [MeV]. Därefter kan antalet bildade atomer av fissionsprodukterna uppskattas genom att utgå från tabulerade fissionsutbyten y_i för respektive fissionsreaktion. Slutligen erhålls den initiala enhetsaktiviteten, A_i [Bq/kt], för nuklid i genom multiplikation med nuklidens sönderfallskonstant, λ_i [s^{-1}], enligt

$$A_i = N \cdot y_i \cdot \lambda_i$$

Ingående parametrar och referenser sammanfattas i Tabell 1.

Tabell 1. Ingående parametrar, referenser och beräkningsresultat för initiala enhetsvektorer för de tre fissionsreaktionerna.

Fissionsreaktion	Energi per fission, E (MeV)	Atomer per kiloton, N	Total initial aktivitet, A (Bq/kt)
U-235 (fissionsneutroner) *	182,5 **	1,44E+23	5,57E+22
Pu-239 (fissionsneutroner) *	189,2 **	1,39E+23	4,18E+22
U-238 (högenergetiska neutroner) *	183,6 **	1,43E+23	1,17E+23

*) Fissionsutbyten y_i från JEFF 3.1

**) E från ENDF-B-VIII-0

SSM har därefter beräknat sönderfall och inväxt för de initiala enhetsvektorerna under 10 minuter från explosionstillfället för att kunna använda som ingångsvärde i

källbeskrivningen för de vidare spridnings- och dosberäkningarna. De enhetsvektorer som därigenom erhålls kan skalas linjärt för att modellera fissionsprodukter från önskat laddningsutbyte från fission. Exempelvis kan aktiviteter från de fissionsprodukter som skapas i fissionsprocessen för huvudscenariot, 100 kt markexplosion med 50 % fusionsandel, erhållas genom att multiplicera en vald enhetsvektor vid 10 minuter med 50.

I Tabell 2 redovisas den totala aktiviteten under den första timmen för de tre enhetsvektorerna, beroende på typ av fission. Som jämförelse anges i [3] en total aktivitet per kiloton i storleksordningen $1 \cdot 10^{21}$ Bq/kt efter en minut och i [4] $1,67 \cdot 10^{19}$ Bq/kt (450 MCi/kt) efter en timme för en ospecificerad fissionsladdning. Båda uppskattningarna stämmer bra överens med de totalaktiviteter som redovisas i Tabell 2.

Tabell 2. Total aktivitet per kiloton (Bq/kt) vid olika tidpunkter för de tre enhetsvektorerna.

Fissionsreaktion	Total aktivitet i enhetsvektorerna (Bq/kt)		
	t = 1 min	t = 10 min	t = 60 min
U-235	1,10E+21	1,01E+20	1,61E+19
Pu-239	9,68E+20	1,00E+20	1,48E+19
U-238	1,22E+21	1,05E+20	1,56E+19

3. Aktiveringsprodukter

3.1. Inledning

Material i och omkring ett exploderande kärnvapen påverkas under explosionen av höga neutronflöden. Detta leder till att det bildas aktiveringsprodukter, av vilka många är radioaktiva. Vilka aktiveringsprodukter som bildas och i vilken mängd är i ännu högre grad beroende av detaljer kring den specifika explosionen än vad som är fallet med fissionsprodukterna. SSM har trots detta valt att inkludera ett bidrag från aktiveringsprodukter i analysen, baserat i någon mån på empiriska uppgifter och data enligt nedan. Aktiveringsprodukternas bidrag till de totala stråldoserna, och i synnerhet valet av specifika aktiveringsprodukter, är förknippade med stora osäkerheter och innehåller ett större mått av godtycke än när det gäller fissionsprodukterna.

3.2. Metod

Metoden för att ansätta aktiveringsnuklidvektor utgår från publicerade empiriska ”tumregler” och publicerade analyser av observerat nedfall ur dossynpunkt.

- Aktiveringsandel (”*fission equivalent yield*”) enligt nedfallsmodellen *KDFOC3* [5] för olika typer av kärnvapenexplosioner.
- Specifika nuklider som utgör aktiveringsandelen ur Hicks analyser [6] [7] [8] [9] [10], huvudsakligen av nedfall från provsprängningar i Nevada.

Aktivetsbudgeten i *KDFOC3* uttrycks som doshastighet en meter över plan mark en timme efter explosionen givet att allt nedfall sprids ut jämnt över en bestämd yta¹. För att kunna inkludera aktiveringsprodukter i samma algoritm uttrycker *KDFOC3* dosbidraget från aktiveringsprodukterna som *fissionsekvivalent* utbyte (i kiloton). Ett kiloton fissionsekvivalent definieras som ett nedfallsbidrag som under perioden 10 minuter till 50 timmar ger samma gammaenergi som fissionsprodukterna från ett kiloton fissionsutbyte.

I analogi med *KDFOC3*-metoden ansattes därför ett fissionsekvivalent bidrag från fusionsdelen av en viss explosion enligt de empiriska tumreglerna som används i *KDFOC3*. Därefter bestämdes vilka specifika nuklider (aktiveringsprodukter) som skall stå för detta bidrag och vilka deras inbördes proportioner skall vara. Detta uppskattades ur Hicks analyser av nedfall från provsprängningar i Nevada, som inkluderar ett antal aktiveringsprodukter.

Markdosbidraget från den initiala uppsättningen aktiveringsprodukter beräknades med SSM:s mjukvara *DosCalc*² för tidsperioden 10 minuter till 50 timmar tillsammans med markdosbidraget under samma tidsintervall från en nuklidvektor av fissionsprodukter. Som fissionsproduktvektor valdes för detta ändamål fördelningen av fissionsprodukter (utom ädelgaser) från fission av U-235 med monoenergetiska (1 MeV) neutroner, eftersom detta ger den största markdosen av de tre beaktade fissionsreaktionerna i det aktuella tidsintervallet. Slutligen normerades aktiveringsnuklidvektorn så att dess dosbidrag utgör den av *KDFOC3* uppskattade andelen av dosbidraget från den totala nuklidvektorn (fission

¹ Fissionsprodukter från ett kiloton fissionsutbyte utspridda jämnt över en kvadratmile ger expositionsraten 3000 R/h. För extern exponering för gammastrålning, som det här är frågan om, innebär detta en dosrat på 30 Gy/h absorberad dos.

² *DosCalc* v 1.0 (Manual 20-914)

av U-235 plus aktivering). Metoden användes för att definiera två olika aktiverings-nuklidvektorer: en från vapendelar och en från mark (omgivningen), som normeras var för sig.

I det sista steget kortades listan med aktiveringsprodukter så att endast de som ger ett betydande dosbidrag inkluderats. Detta steg inkluderade även en jämförelse med dosbidraget från fissionsprodukterna (se Kapitel 4).

3.3. Aktiveringsandel

KDFOC3 föreslår som tumregler för kärnvapen med betydande fusionsandel (och som inte konstruerats för att särskilt dämpa neutronflöden) och ”standardjord” följande fissionsekvivalenta bidrag från aktivering:

- 0,08 kt fissionsekvivalent per kt fusionsutbyte från markaktivering för explosioner vid markytan
- Ytterligare 0,08 kt fissionsekvivalent per kt fusionsutbyte från markaktivering för nedgrävda explosioner
- 0,02 kt fissionsekvivalent per kt fusionsutbyte från aktivering i vapendelar

För detaljstudier av specifika scenarier (t.ex. avseende vapenkonstruktion eller marktyp) skulle man behöva överväga i vilken mån dessa tumregler är tillämpbara, men i föreliggande arbete har SSM valt att använda sig av dem. För huvudscenariot, en 100 kt markexplosion med 50 % fusionsandel, beräknas enligt denna metod 50 kt fissionsprodukter och $50 \times (0,08 + 0,02) \text{ kt} = 5 \text{ kt}$ fissionsekvivalent bidrag från aktivering av fusionsneutroner (4 kt aktivering i marken och 1 kt aktivering i vapendelar). Tumreglerna i *KDFOC3* räknar inte med något aktiveringsbidrag från laddningar utan fusionskomponent.

3.4. Potentiella aktiveringsprodukter

Det fissionsekvivalenta bidraget från aktivering som ansätts enligt *KDFOC3*-metoden ovan behöver fördelas som aktivitet för ett antal aktiveringsprodukter för att passa i nuklidvektorn, som utgår från aktivitet vid tiden $t = 10$ minuter. SSM har här utgått från Hicks analyser av nedfall utanför provsprängningsområdet i Nevada och anpassat resultaten till en potentiell nuklidvektor med aktiveringsprodukter som kan förväntas med hänsyn till omständigheterna kring proven. De nuklider från neutronaktivering som ingår i Hicks analyser kan indelas i nuklider som är lättare än fissionsprodukterna (”lätta”) och nuklider som är tyngre än fissionsprodukterna (”tunga”). Delvis olika frågor uppstår kring de två grupperna.

3.4.1. Lätta aktiveringsprodukter

De lätta aktiveringsprodukter som ingår i Hicks analyser (plus ytterligare två, se nedan) redovisas i Tabell 3. För varje nuklid kan flera aktiveringsreaktioner vara möjliga, men i tabellen redovisas bara den aktiveringsreaktion med högst sannolikhet som sedan använts vidare i analysen. I Tabell 3 anges även de relativa förekomster som antagits, baserat på Hicks studier. Här har framförallt data från kärnvapenprov vid eller under markytan använts, då dessa kan antas vara mest relevanta för att beskriva möjliga aktiveringsprodukter för det huvudscenario som använts i föreliggande arbete (dvs. en markexplosion). Bland dessa kärnvapenprov har relativ förekomst av aktiveringsprodukter

från *Sedan* (100 kt) och *Schooner* (30 kt) givits särskild vikt då de proven hade ett högt fusionsutbyte, vilket är i linje med huvudscenariot.

Vissa nuklider kan tänkas produceras både i samband med aktivering av vapendelar och omgivning (markaktivering). SSM har därför utrett vilka reaktioner som kan tänkas ge upphov till de av Hicks rapporterade aktiveringsprodukterna. I detta arbete har sedan följande antaganden gjorts för att enkelt kategorisera enskilda nuklider till en viss typ av aktivering:

- Partikelreaktioner såsom (n,p) antas ske på vapendelar eftersom de endast inträffar då neutronenergin överskrider ett tröskelvärde, och neutroner med högst energi kan förväntas närmast källan
- Neutroninfångningsreaktioner såsom (n, γ) på material som är vanliga i mark antas ske i omgivningen
- Övriga infångningsreaktioner antas ske i vapendelar

Tabell 3. Lätta aktiveringsprodukter samt gränssättande reaktioner som beaktats i föreliggande arbete. Relativ förekomst anger antal relativt övriga i samma grupp: vapendelar eller omgivning. Exempelvis antas tio gånger så många atomer av Mn-54 som Co-57 och tio gånger så många atomer av Fe-55 som Na-24, men inte nödvändigtvis tio gånger så många atomer av Mn-54 som Na-24.

Nuklid	Aktivering av	Möjlig reaktion	Relativ förekomst
Be-7 *	Vapendelar	${}^6\text{Li}(d,n)$	10
Na-24	Omgivning	${}^{23}\text{Na}(n,\gamma)$	1
Fe-55	Omgivning	${}^{54}\text{Fe}(n,\gamma)$	10
Fe-59	Omgivning	${}^{58}\text{Fe}(n,\gamma)$	0,1
Mn-54	Vapendelar	${}^{54}\text{Fe}(n,p)$	10
Mn-56	Omgivning	${}^{55}\text{Mn}(n,\gamma)$	1
Co-58	Vapendelar	${}^{58}\text{Ni}(n,p)$	0,5
Co-58m	Vapendelar	${}^{58}\text{Ni}(n,p)$	0,5
Co-57	Vapendelar	${}^{58}\text{Ni}(n,np)$	1
Co-60	Vapendelar	${}^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	1
Cu-64	Vapendelar	${}^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	0,1
Cu-67	Vapendelar	${}^{67}\text{Zn}(n,p)$	1E-6

*) Be-7 betecknas i detta arbete för enkelhets skull som aktiveringsprodukt, även om den dominerande produktionsreaktionen sannolikt sker i fusionsbränslet och inte primärt involverar neutroner.

Två nuklider har lagts till utöver de lätta aktiveringsprodukter som förekommer i Hicks analyser: Mn-56 och Co-58m. Dessa förekommer dock i andra arbeten, exempelvis Kraus och Foster [11], som potentiellt viktiga aktiveringsprodukter. I fallet med Mn-56 är sannolikheten för neutroninfångning på målnukliden Mn-55 en faktor 50 högre än för den neutroninfångning som ger Na-24, men å andra sidan är den genomsnittliga förekomsten av målnukliden Na-23 i jordskorpan ca en faktor 50 högre än förekomsten av Mn-55 vilket gör att den relativa förekomsten för Mn-56 sätts till samma som för Na-24 [12]. Gällande den relativa förekomsten av Co-58m har samma antagande använts som i Kraus och Foster,

dvs. att förekomsten av Co-58m är densamma som av grundtillståndet, Co-58. Dessa båda nuklider har därför antagits dela på utbytet genom att den relativa förekomsten satts till 0,5.

3.4.2. Tunga aktiveringsprodukter

Samma metod som beskrivs ovan för de lätta aktiveringsprodukterna användes för de tunga aktiveringsprodukterna. Den lista med potentiella tunga aktiveringsprodukter, och deras relativa förekomster, som då framträder enligt Hicks redovisas i Tabell 4 tillsammans med möjliga produktionsreaktioner. Samtliga i tabellen ingående nuklider kan antas skapas genom neutronreaktioner i vapendelar. Nukliderna kan grupperas in i fem grupper som beskrivs nedan.

Uran (U) och neptunium (Np)

Hicks redovisar en viss population av Np-isotoper redan vid $t = 0$. Dessa isotoper bildas dock även som sönderfallsdöttrar av uran. Utifrån de redovisade resultaten från provsprängningar kan konstateras att antal atomer av U-239 och U-240 som bildas förväntas överstiga ursprungligt antal atomer för döttrarna Np-239, Np-240 och Np-240m med många storleksordningar. Det ursprungliga bidraget för dessa Np-isotoper kan därför försummas. Istället kommer Np-isotoperna att växa in från respektive U-moder.

De tre uranisotoperna U-237, U-239 och U-240 inkluderas som potentiella tunga aktiveringsprodukter. De relativa förekomsterna av U-237 och U-239 antas vara högre än vad Hicks redovisar för *Sedan*- och *Schooner*-proven. Istället har den relativa förekomsten av dessa nuklider baserats på ett hypotetiskt fall som ingår i Hicks redovisning och som involverar fission av U-238. Motsvarande relativ förekomst för U-240 blir två storleksordningar lägre, i linje med vad Hicks redovisar.

Americium (Am) och curium (Cm)

Aktiniderna Am-241 och Cm-242 kan antas finnas i det fissila materialet genom sönderfall av Pu-241 respektive aktivering av Am-241. Båda nukliderna ger låg gammados i samband med markbeläggning men skulle kunna bidra till inhalationsdoser. En avgränsning i detta arbete har dock varit att ofissionerat fissilt material som Pu-239 inte beaktas, varför inte heller Am-241 och Cm-242 har beaktats vidare som potentiella aktiveringsprodukter.

Volfram (W)

Volframisotoperna kan representera konstruktioner med annat tungt material än uran i vissa centrala konstruktionsdelar där det ofta antas att uran används, möjligen för att minska mängden fissionsprodukter [13]. Hicks redovisar W-aktivering huvudsakligen i prov knutna till *Plowshare*-programmet, där begränsning av mängden fissionsprodukter bör ha varit en viktig parameter³, och framförallt i proven med hög laddningsstyrka och hög andel fusion (*Sedan* och *Schooner*). Det är i så fall inte givet att samma avvägning är typisk för en laddning avsedd att användas i ett kärnvapen. Å andra sidan kan argumenteras för att volfram är ett mycket effektivt material i vissa avseenden, även jämfört med uran [14]. Vilka konstruktionsövervägandena än är tycks slutresultatet bli liknande för denna utredning: används en konstruktion med volfram kan främst W-187 bidra till dos, men i gengäld borde då dosbidraget från fissionsprodukter minska. Sammantaget antas därför att uran snarare än volfram används där valet finns, varför volframisotoperna inte har beaktats vidare som aktiveringsprodukter i föreliggande arbete.

³ *Plowshare* var ett amerikanskt program mellan 1958 och 1975 för att undersöka tekniska och ekonomiska möjligheter att använda kärnladdningar för fredliga ändamål, t.ex. för hamn- och kanalbyggen eller för att stimulera naturgasproduktion.

Guld (Au)

Guldisotoperna förekommer endast i Hicks redovisning från kraterproven, där materialet kan ha används i konstruktionsdetaljer som ersättning för uran, som markör eller som neutronflödesindikator. Eftersom förekomsten är spretig – exempelvis förekommer inte guld alls i Hicks redovisning av luftexplosionerna – har guld inte beaktats vidare som aktiveringsprodukt i föreliggande arbete.

Bly (Pb)

Precis som för volfram redovisas högre förekomster av Pb-203 i *Plowshare*-proven enligt Hicks, med relativa förekomster runt 1. Bly är dock också ett tänkbart material i strålningsinneslutningen för en termonukleär laddning [14]. Till skillnad från volframisotoperna föreslås därför Pb-203 stå kvar som ett rimligt antagande om aktivering från en fusionsladdning.

Tabell 4. Tunga aktiveringsprodukter samt gränssättande reaktioner som beaktats i föreliggande arbete med relativ förekomst utifrån Hicks analyser.

Nuklid	Aktivering av	Möjlig reaktion	Relativ förekomst
W-181	Vapendelar	$^{182}\text{W}(n,2n)$	-
W-185	Vapendelar	$^{184}\text{W}(n,\gamma)$	-
W-187	Vapendelar	$^{186}\text{W}(n,\gamma)$	-
Au-198	Vapendelar	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	-
Au-199	Vapendelar	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^2$	-
Pb-203	Vapendelar	$^{204}\text{Pb}(n,2n)$	1
U-237	Vapendelar	$^{238}\text{U}(n,2n)$	10
U-239	Vapendelar	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	10
Np-239	Vapendelar	^{239}U beta-	-
U-240	Vapendelar	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^2$	0,1
Np-240	Vapendelar	^{240}U beta-	-
Np-240m	Vapendelar	^{240}U beta-	-
Am-241	Vapendelar	Sönderfall av ^{241}Pu	-
Cm-242 *	Vapendelar	$^{241}\text{Am}(n,\gamma)$	-

*) Via Am-242 (16 timmars halveringstid)

Rester av ofissionerat Pu och U kommer att bidra till nedfallsproblematiken, om än inte främst via gammados från marken, men behandlas inte i detta arbete.

3.5. Fissionsekvivalent aktiveringsnuklidvektor

Två aktiveringsnuklidvektorer, en för omgivning och en för vapendelar, beräknades vid $t = 10$ minuter. Aktiveringsnuklidvektorerna normerades till fissionsekvivalent aktivitet enligt ovan så att det totala markdosbidraget i tidsfönstret 10 minuter till 50 timmar är detsamma som motsvarande markdosbidrag från 1 kt fission av Pu-239, U-235 respektive U-238. Resultaten presenteras i Tabell 5 och Tabell 6.

Tabell 5. Fissionsekvivalent aktivitet Bq/kt vid t = 10 minuter från aktivering av omgivningen.

Nuklid	Fissionsekvivalent aktivitet (Bq/kt) efter 10 min		
	Pu-239	U-235	U-238
Na-24	5,48E+17	5,92E+17	5,61E+17
Mn-56	3,06E+18	3,30E+18	3,13E+18
Fe-55	3,44E+15	3,71E+15	3,52E+15
Fe-59	7,74E+14	8,35E+14	7,92E+14
Totalt	3,61E+18	3,90E+18	3,70E+18

Tabell 6. Fissionsekvivalent aktivitet Bq/kt vid t = 10 minuter från aktivering av vapendelar.

Nuklid	Fissionsekvivalent aktivitet (Bq/kt) efter 10 min		
	Pu-239	U-235	U-238
Be-7	2,04E+17	2,20E+17	2,09E+17
Mn-54	3,48E+16	3,76E+16	3,57E+16
Co-57	4,00E+15	4,32E+15	4,09E+15
Co-58	7,77E+15	8,38E+15	7,95E+15
Co-58m	1,45E+18	1,56E+18	1,48E+18
Co-60	5,64E+14	6,09E+14	5,78E+14
Cu-64	2,04E+17	2,20E+17	2,08E+17
Cu-67	4,21E+11	4,54E+11	4,31E+11
Pb-203	5,02E+17	5,41E+17	5,17E+17
U-237	1,61E+18	1,74E+18	1,65E+18
U-239	4,96E+20	5,36E+20	5,08E+20
Np-239 (från U-239)	1,18E+18	1,27E+18	1,21E+18
U-240	1,83E+17	1,98E+17	1,88E+17
Np-240m (från U-240)	1,14E+17	1,23E+17	1,16E+17
Np-240 (från U-240)	7,80E+12	8,42E+12	7,98E+12
Totalt	5,01E+20	5,42E+20	5,14E+20

Aktiveringsnuklidvektorerna för t = 10 minuter från de olika normeringarna är tämligen lika. De skiljer sig inte åt med en exakt skalär faktor eftersom normeringen gjordes vid t = 0, och sönderfallsdynamiken under de första 10 minuterna ändrar sammansättningarna något.

4. Urval av nuklider

Syftet med nuklidvektorn är att få fram en uppsättning nuklider och aktiviteter som på ett representativt sätt beskriver doser inom de tidsintervall och från de exponeringsvägar som ingår i föreliggande studie. Antalet nuklider som bildas i samband med fission är dock mycket omfattande och för att få en hanterlig mängd har ett urval gjorts. Urvalet har skett så att nuklidvektorn kan antas beskriva minst 95 % av dosbidragen från respektive exponeringsväg i alla tidsintervall. Urvalet har bestått av ett antal steg som redovisas i detalj nedan.

4.1. Fissionsutbyten

I det första urvalssteget har SSM utgått från de oberoende fissionsutbyten (JEFF 3.1) för de tre fissionsreaktionerna som beskrivs ovan i avsnitt 2.2. Sammanlagt bildas då:

- 922 nuklider vid fission av Pu-239 med 1 MeV neutroner,
- 801 nuklider vid fission av U-235 med 1 MeV neutroner, och
- 938 nuklider vid fission av U-238 med 14 MeV neutroner.

Utöver dessa bildas även stabila nuklider och nuklider med mycket lång halveringstid i samband med fissionen. Sådana nuklider har sorterats bort i detta steg.

SSM har därefter ansatt en aktivitet vid $t = 0$ per kiloton fission för varje nuklid enligt den metod som beskrivs i avsnitt 2.2. Samtliga nuklider i de tre enhetsvektorerna har därefter fått växa in och sönderfalla under 10 min. De nuklider som förekommer efter 10 min med en aktivitet > 1 kBq/kt har sedan beaktats vidare i urvalet. Efter 10 minuter återstår:

- 463 nuklider för Pu-239,
- 385 nuklider för U-235, och
- 448 nuklider för U-238.

Av dessa är 14 ädelgaser vilka har hanterats separat, se avsnitt 4.8 nedan.

4.2. Relativa dosbidrag vid markbeläggning

I det andra urvalssteget har SSM beräknat respektive nuklids relativa bidrag per kiloton till effektiv dos från markbeläggning. Beräkningarna av relativa bidrag baseras på en vuxen person som står oskyddad på ett oändligt plan där aktiviteten är placerad i det översta jordlagret. Källan har vidare antagits vara oförändrad under de studerade tidsperioderna men hänsyn har tagits till radioaktivt sönderfall och inväxt.

Dosberäkningen genomfördes med *DosCalc* som använder sig av dosfaktorer för mark från *DCFPAK* [15] där aktiviteten antas vara jämt fördelad i den översta 1 cm i marklagret ($\rho=1,6$ g/cm³). Av nukliderna som ingår i nuklidvektorn för Pu-239 är dosfaktorer kända av *DCFPAK/DosCalc* för 363 nuklider (288 kända för U-235 och 332 kända för U-238). För övriga nuklider gjordes en genomgång baserad på aktivitetsnivåer och doskonstanter ($\Gamma_{H^*(10)}$) som anger dosrat per Bq från en punktkälla för en specifik nuklid. Doskonstanter hämtades från *Nucleonica* (JEFF 3.1 respektive ENDF-B-VIII-0) för att identifiera vilka nuklider som kunde förväntas ge ett icke-försumbart bidrag till den effektiva dosen från markbeläggning under något av tidsfönstren nedan. På det sättet identifierades ytterligare 17 nuklider som potentiellt skulle kunna ge ett icke-försumbart dosbidrag för någon av de tre studerade fissionsreaktionerna. Metoden för uppskattning av dosfaktorer för dessa beskrivs i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar). De 17 nukliderna tillfördes *DosCalc*.

4.2.1. Tidsfönster

Dosberäkningarna genomfördes för fyra olika tidsfönster:

- första dygnet (10 min – 24 h 10 min),
- första veckan (24 h 10 min – 7 d 10 min),
- första månaden (7 d 10 min – 30 d 10 min), och
- första året (30 d 10 min – 365 d 10 min).

I dosberäkningarna har källan fått sönderfalla till början för respektive tidsfönster. Effektiva doser från markbeläggningen har därefter beräknats för varje nuklid till slutet av respektive tidsfönster.

4.2.2. Rangordning

Efter komplettering av dosfaktorer kunde det relativa markdosbidraget från nukliderna i de tre fissionsreaktionerna beräknas för varje tidsfönster. Nukliderna rangordnades därefter utifrån sin andel av den totala effektiva dosen. Rangordningen baserades på mödrar så att dos från inväxta döttrar räknats till modernukliden. Nukliderna sorterades sedan utifrån sitt relativa bidrag i de fyra tidsfönstren och den kumulativa andelen av den totala effektiva markdosen beräknades. Totalt beräknades 12 sådana tabeller, en för varje fissionsreaktion (3 st.) och tidsfönster (4 st.). De nuklider som inte behövdes för att nå upp till 95 % av den totala effektiva dosen i något tidsfönster sorterades därefter bort i detta steg. I Tabell 7 och Tabell 8 redovisas rangordningstabeller för Pu-239 för de fyra tidsfönstren. Motsvarande tabeller redovisas för U-235 och U-238 i Appendix – Rangordning för U-235 respektive Appendix – Rangordning för U-238.

I de 12 tabellerna som beräknades förekommer ett stort antal dubletter, det vill säga nuklider som förekommer vid flera fissionsreaktioner eller i flera tidsfönster. Tabell 8 visar exempelvis att endast Nb-95 och Ru-106 är tillkommande nuklider för tidsfönstret dygn 31-365 jämfört med tidsfönstret dygn 8-30. Totalt identifierades 59 unika nuklider (mödrar) som behövs för att beskriva minst 95 % av dosen från markbeläggning vid fission av Pu-239 i de fyra tidsfönstren. Ytterligare tre (U-235) respektive åtta (U-238) unika nuklider tillkommer enligt samma metod för de övriga fissionsreaktioner. Detta ger en uppsättning av totalt 70 unika nuklider (mödrar) för att i varje tidsfönster beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning.

Tabell 7. Rangordningstabell för sortering av nuklider som beskriver dosbidraget från mark i två olika tidsfönster (dygn 1 och dygn 2-7) vid fission av Pu-239 inducerad av 1 MeV neutroner. Beräkningen visar att det behövs 45 nuklider för att beskriva minst 95 % av dosen från markbeläggning under det första dygnet, respektive 16 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 2-7.

Nr.	Nuklid	Effektiv dos dygn 1		Nuklid	Effektiv dos dygn 2-7	
		Andel	Kumulativ andel		Andel	Kumulativ andel
1	Te-134	7,8 %	7,8 %	Te-132	31,1 %	31,1 %
2	Tc-104	7,3 %	15,1 %	Zr-97	18,6 %	49,7 %
3	I-135	6,0 %	21,1 %	Ba-140	10,2 %	59,8 %
4	I-134	5,8 %	26,9 %	I-133	8,7 %	68,6 %
5	Ba-142	5,3 %	32,1 %	Te-131m	4,3 %	72,9 %
6	Mo-101	5,1 %	37,2 %	Mo-99	4,0 %	76,9 %
7	Te-133m	5,0 %	42,2 %	I-135	3,3 %	80,2 %

8	Zr-97	4,9 %	47,1 %	Ce-143	2,9 %	83,1 %
9	Cs-138	4,0 %	51,1 %	La-140	2,2 %	85,3 %
10	La-142	3,9 %	55,0 %	I-131	2,2 %	87,5 %
11	Sb-131	3,7 %	58,7 %	Sr-91	2,1 %	89,6 %
12	Sr-92	3,1 %	61,9 %	Ru-103	1,4 %	91,0 %
13	Sb-130	2,6 %	64,5 %	I-132	1,2 %	92,2 %
14	Sr-93	2,6 %	67,1 %	Rh-105	1,2 %	93,4 %
15	Tc-105	2,5 %	69,5 %	Zr-95	1,0 %	94,4 %
16	Ba-141	2,3 %	71,8 %	Sb-127	0,9 %	95,3 %
17	Y-95	1,8 %	73,6 %	...	...	...
18	Y-94	1,8 %	75,4 %			
19	Rb-89	1,7 %	77,1 %			
20	Ru-105	1,6 %	78,7 %			
21	Sr-91	1,5 %	80,2 %			
22	Ce-146	1,4 %	81,5 %			
23	Te-132	1,4 %	82,9 %			
24	Te-133	1,3 %	84,2 %			
25	Sn-128	1,3 %	85,5 %			
26	Sb-130m	0,8 %	86,3 %			
27	La-143	0,7 %	87,0 %			
28	Cs-139	0,7 %	87,7 %			
29	Sb-129	0,7 %	88,4 %			
30	Pr-146	0,6 %	89,0 %			
31	I-133	0,6 %	89,7 %			
32	Sn-129m	0,6 %	90,2 %			
33	Rh-107	0,5 %	90,7 %			
34	Br-84	0,5 %	91,1 %			
35	Tc-101	0,5 %	91,6 %			
36	I-134m	0,4 %	92,0 %			
37	Mo-102	0,4 %	92,4 %			
38	Sn-127	0,4 %	92,9 %			
39	Pr-147	0,4 %	93,3 %			
40	Te-131m	0,4 %	93,7 %			
41	Sb-129m	0,3 %	94,0 %			
42	Sb-132m	0,3 %	94,3 %			
43	Nd-151	0,3 %	94,6 %			
44	Rb-90m	0,3 %	94,9 %			
45	Sb-128	0,3 %	95,2 %			
			

Tabell 8. Rangordningstabell för sortering av nuklider som beskriver dosbidraget från mark i två olika tidsfönster (dygn 8-30 och dygn 31-365) vid fission av Pu-239 inducerad av 1 MeV neutroner. Beräkningen visar att det behövs 10 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 8-30, respektive 7 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 31-365.

Nr.	Nuklid	Effektiv dos dygn 8-30		Nuklid	Effektiv dos dygn 31-365	
		Andel	Kumulativ andel		Andel	Kumulativ andel
1	Ba-140	43,7 %	43,7 %	Zr-95	42,0 %	42,0 %
2	Te-132	19,6 %	63,3 %	Ba-140	21,7 %	63,7 %
3	La-140	8,4 %	71,7 %	Ru-103	16,6 %	80,3 %
4	Ru-103	7,2 %	78,9 %	Nb-95	6,3 %	86,6 %
5	Zr-95	6,3 %	85,2 %	Ru-106	3,9 %	90,5 %
6	I-131	5,7 %	90,9 %	La-140	3,0 %	93,5 %
7	Mo-99	1,9 %	92,8 %	Ce-141	1,6 %	95,1 %
8	Cs-136	1,0 %	93,7 %	...	...	...
9	Nd-147	0,9 %	94,6 %			
10	Ce-141	0,9 %	95,5 %			
			

4.2.3. Döttrar

Dosberäkningen som ligger till grund för rangordningen som redovisas i avsnitt 4.2.2 gjordes med *DosCalc*, där dosen från inväxta döttrar hänförs till sin moder. Exempelvis kommer ca 75 % av dosen från en markbeläggning av enbart Te-134 under det första dygnet från dottern I-134 som växer in. I-134 är dock redan med i nuklidvektorn med 70 medlemmar som beskrivs ovan. SSM gick därför vidare med att identifiera vilka döttrar som växer in och ger ett icke-försumbart bidrag ($\geq 3\%$) till effektiv dos från markbeläggning som kan hänföras till en viss moder, men som inte redan inkluderas i nuklidvektorn med 70 medlemmar. Sammanlagt 16 döttrar lades till för Pu-239 och ytterligare fem för U-238, totalt 21 döttrar. Inga ytterligare döttrar behövdes då för U-235 eftersom de redan identifierats i övriga fissionsreaktioner. Döttrarna och deras relativa dosbidrag i förhållande till sina mödrar redovisas i Tabell 9.

Tabell 9. Döttrar som lades till på grund av bidrag till effektiv dos från markbeläggning. Dosbidraget redovisas som andel av den totala effektiva dosen från en markbeläggning där endast modern finns initialt.

Nr.	Moder	Dotter	Fissionsreaktion	Dosbidrag	Kommentar
1	Zr-97	Nb-97m	Pu-239	~ 32 % första dygnet	
2		Nb-97	Pu-239	~ 29 % första dygnet	
3	Sb-131	Te-131	Pu-239	~ 15 % första dygnet	
4	Sr-92	Y-92	Pu-239	~ 16 % första dygnet	
5	Sr-93	Y-93m	Pu-239	~ 7 % första dygnet	Moder till Y-93

6		Y-93	Pu-239	~ 3 % första dygnet	
7	Ba-141	La-141	Pu-239	~ 3 % första dygnet	Moder till Ce-141 (inkluderad)
8	Ru-105	Rh-105m	Pu-239	~ 3 % första dygnet	Moder till Rh-105 (inkluderad)
9	Sr-91	Y-91m	Pu-239	~ 30 % första dygnet	Y-91 kan ignoreras
10	Sn-128	Sb-128m	Pu-239	~ 70 % första dygnet	Moder till Sb-128 (inkluderad)
11	Cs-139	Ba-139	Pu-239	~ 13 % första dygnet	
12	Sb-129	Te-129	Pu-239	~ 3 % första dygnet	Se avsnitt 4.6 för Te-129m
13	Mo-102	Tc-102	Pu-239	~ 85 % första dygnet	
14	Nd-151	Pm-151	Pu-239	~ 27 % första veckan	
15	Mo-99	Tc-99m	Pu-239	~ 40 % första veckan	Tc-99 kan ignoreras
16	Ru-106	Rh-106	Pu-239	~ 100 % alla tidsfönster	
17	Cd-117	In-117m	U-238	~ 5 % första dygnet	Moder till In-117
18		In-117	U-238	~ 24 % första dygnet	
19	Pd-112	Ag-112	U-238	~ 100 % alla tidsfönster	
20	Cd-115	In-115m	U-238	~ 44 % första veckan	
21	Ce-144	Pr-144	U-238	~ 70 % första året	Pr-144m kan ignoreras

Nuklidvektorn som behövs för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning för samtliga fissionsreaktioner inom de studerade tidsfönstren bestod i detta steg av 91 nuklider (70 mödrar och 21 döttrar).

4.3. Aktiveringsprodukter

Bland aktiveringsprodukterna identifierades vilka som ger ett icke-försumbart bidrag till effektiv dos från markbeläggning. Ett detaljerat resonemang kring vilka aktiveringsprodukter som ingår i nuklidvektorn och vilka aktiviteter per kiloton som ansåts finns i Kapitel 3. Endast aktiveringsprodukter som förväntas bidra till dosen i något av tidsfönstren enligt metoden ovan tillkom. Aktiveringsprodukterna som lades till i detta steg har inga döttrar som växer in och väsentligt bidrar till markdosen. I Tabell 10 redovisas de aktiveringsprodukter som lades till nuklidvektorn.

De aktiviteter (Bq/kt) som lades till nuklidvektorn är en omräkning av de fissionsekvivalenta aktiviteter per nuklid som presenteras i Tabell 5 och Tabell 6. Omräkningen är enligt den metod som redovisas i Kapitel 3 (för huvudscenariot), dvs. att fissionsekvivalenta aktiviteter för aktiveringsprodukter från vapenmateriel har multiplicerats med en faktor 0,02 och fissionsekvivalenta aktiviteter för aktiveringsprodukter från mark har multiplicerats med en faktor 0,08 för att motsvara ett kiloton från fusion. I samtliga fall har de högsta aktivitetsvärdena från Tabell 5 och Tabell 6, dvs. värden för U-235, använts för att konservativt omhänderta skillnader mellan de tre fissionsreaktionerna. Ett resonemang kring detta förfarande, som även användes för fissionsprodukter, finns i avsnitt 4.4.

Tabell 10. Aktiveringsprodukter från aktivering av mark (omgivning) och vapendelar för huvudscenariot. Aktiviteten anges som Bq per kiloton fusion vid $t = 10$ min.

Nr.	Nuklid	Aktivitet (Bq/kt)	Aktivering av
1	Na-24	4,74E+16	Omgivning
2	Mn-56	2,64E+17	Omgivning
3	Be-7	4,40E+15	Vapendelar
4	Mn-54	7,52E+14	Vapendelar
5	Co-58	1,68E+14	Vapendelar
6	Co-60	1,22E+13	Vapendelar
7	Pb-203	1,08E+16	Vapendelar
8	U-237	3,48E+16	Vapendelar
9	U-239	1,07E+19	Vapendelar
10	Np-239	2,54E+16	Vapendelar

Nuklidvektorn som behövs för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning för samtliga fissionsreaktioner inom de studerade tidsfönstren, tillsammans med aktiveringsprodukter, bestod i detta steg av 101 nuklider (70 mödrar, 21 döttrar och 10 aktiveringsprodukter).

4.4. Maxvektor

Nuklidvektorn ska vara representativ oavsett typ av fission. Vissa saker skiljer sig dock mellan olika fissionsreaktioner som kan förekomma i kärnvapnet. Vid fission av Pu-239 bildas något mer jod per kiloton jämfört med vid fission av U-235 eller U-238 (efter 10 min totalt 2,4 EBq/kt för Pu-239, 2,0 EBq/kt för U-235 och 1,1 EBq/kt för U-238). Vidare ger fissionsprodukterna från U-235 något högre doser från markbeläggning per kiloton än Pu-239 och U-238 i de studerade tidsfönstren. För att hantera de olika fissionsreaktionerna som används för att representera huvudscenariot i denna studie ansattes därför den högsta aktiviteten per nuklid som kan förväntas per kiloton från de någon av de tre fissionsreaktionerna. Samma tillvägagångssätt användes för aktiveringsprodukterna, där U-235 ger högst fissionsekvivalent aktivitet per kiloton och därför varit styrande.

Detta tillvägagångssätt – med en ”maxvektor” – ger en överskattning av aktiviteten per kiloton men har fördelen att någon nuklid som skulle kunna bidra till dos från en viss fissionsreaktion i samband med kärnvapenexplosion inte underskattas. Genom att använda maxvektorn överskattas den effektiva dosen från markbeläggning med c:a 2-15 %, beroende på tidsfönster och fissionsreaktion.

Antalet nuklider där aktiviteten till maxvektorn har hämtats från respektive enhetsvektor för de olika fissionsreaktionerna redovisas i Tabell 11. Totalt var aktiviteten per kiloton efter 10 min högst för 45 nuklider vid fission av U-235, för 29 nuklider högst vid fission av Pu-239 och för resterande 27 nuklider högst vid fission av U-238. I de fall aktiviteterna som producerats per kiloton generellt sett är högst för ett visst grundämne i samband med en viss fissionsreaktion redovisas även dessa grundämnena i Tabell 11. Observera att detta endast gäller nuklider och grundämnena bland de 101 nuklider som omfattas av detta steg

och att aktiveringsprodukterna inte grupperats. I andra fall, såsom för Cs, La och Te varierar den högsta aktiviteten per kiloton väsentligt från isotop till isotop mellan de tre fissionsreaktionerna.

Tabell 11. Antal nuklider i maxvektorn med aktiviteter hämtade från de tre fissionsreaktionerna. Tabellen listar även grundämnen som generellt har nuklider med högst aktivitet per kiloton för en viss fissionsreaktion.

	Fission av Pu-239	Fission av U-235	Fission av U-238	Totalt
Antal nuklider	29	45	27	101
Andel	28,7 %	44,6 %	26,7 %	100,0 %
Grundämne	I, Mo, Rh, Ru, Tc	Ba, Ce, Rb, Sr, Y, Zr	Ag, Br, Cd, In, Sb, Sn	

4.5. Relativa dosbidrag vid inandning

Urvalet som beskrivs ovan har hittills enbart baserats på dos från markbeläggning. I syfte att inte försumma nuklider som skulle kunna bidra väsentligt till effektiv dos genom inandning utreddes samtliga nuklidens förväntade relativa bidrag till inandningsdosen. Samma metod och kriterium som för dos från markbeläggning enligt ovan användes, dvs. att identifiera och rangordna nukliderna utifrån relativa bidrag till effektiv dos. De nuklider som behövs för att beskriva minst 95 % av inandningsdosen ska sedan läggas till nuklidvektorn.

Doskoefficienter för ettårigt barn från ICRP 119 [16] användes för de nuklider som bildas i de tre fissionsreaktionerna och som fanns kvar efter en timme (aktivitet > 0 Bq vid $t = 60$ min). Totalt fanns doskoefficienter tabulerade för:

- 243 av 401 nuklider (61 %) vid fission av Pu-239,
- 192 av 331 nuklider (58 %) vid fission av U-235, och
- 226 av 390 nuklider (58 %) vid fission av U-238,

Det antogs att inandning sker först efter en tid när initialmolnet stabiliserats och de radioaktiva ämnena transporterats en bit utanför det område som påverkats av direktverkan från kärnvapnet. Valet blev därför $t = 60$ minuter, vilket reducerade antalet nuklider som behöver beaktas i analysen.

4.5.1. Komplettering av doskoefficienter

Doskoefficienter för ett antal nuklider som saknas i ICRP 119 hämtades från andra källor, vilket beskrivs i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar). Trots detta återstår ca 40 % av nukliderna, där doskoefficienterna är okända. För att kunna kontrollera om någon av dessa (utan doskoefficient från ICRP eller annan källa) skulle kunna ge ett icke-försumbart bidrag till inandningsdosen uppskattades grova övre gränser för doskoefficienter för sådana nuklider med aktiviteter större än ca 2 PBq per kiloton vid $t = 60$ minuter (ungefär en andel 10^{-4} av den totala aktiviteten av fissionsprodukter plus de utvalda aktiveringsprodukterna vid $t = 60$ minuter). Den övre gränsen för doskoefficienten för nuklid X, D_X (Sv/Bq), uppskattades utifrån en jämförelse av den totala sönderfallsenergin för en mer långlivad referensisotop W_I (W/Bq) med känd doskoefficient D_I (Sv/Bq). Den relativa

sönderfallsenergin $W_R = W_X/W_I$ som producerades under en halveringstid för isotop I multiplicerat med dess doskoefficient D_I kan anses vara en konservativ uppskattning av den okända dosfaktorn, enligt:

$$D_X = W_R \times D_I$$

Om kortlivade döttrar förkom, adderades även deras totala sönderfallsenergi till W_X . Om långlivade döttrar förkom, beräknades bidraget till den totala aktiviteten för de döttrarna. Ingen av de på detta sätt prövade nukliderna utan doskoefficient från ICRP visade sig lämna annat än försumbara bidrag till inandningsdosen.

4.5.2. Rangordning

Utifrån kända doskoefficienter och denna metod kunde bidragen till inandningsdos rangordnas för samtliga nuklider av intresse. I Tabell 12 listas de nuklider som behöver inkluderas i nuklidvektorn för att beskriva 95 % av inandningsdosen till ettårigt barn. Totalt behövs 48 nuklider för att nå detta kriterium för de tre fissionsreaktionerna. Alla dessa ingår redan i nuklidvektorn med 101 medlemmar på grund av sitt bidrag till dos från markbeläggning, utom Pd-109 och Pr-145.

Tabell 12. Nuklider som behövs för att beskriva 95 % av inandningsdosen till ettårigt barn för de tre fissionsreaktionerna, rangordnade enligt sitt relativa dosbidrag.

Nr.	Fission av Pu-239		Fission av U-235		Fission av U-238	
	Nuklid	Kumulativ andel	Nuklid	Kumulativ andel	Nuklid	Kumulativ andel
1	I-133	13,5 %	I-133	11,6 %	I-133	11,7 %
2	I-135	23,2 %	I-135	20,3 %	I-135	20,2 %
3	Zr-97	27,9 %	Sr-92	27,0 %	Zr-97	25,2 %
4	I-134	31,9 %	Zr-97	32,3 %	Sr-92	30,0 %
5	La-142	35,9 %	Y-93	37,1 %	Y-93	34,0 %
6	Sr-92	39,7 %	La-142	41,3 %	Np-239	37,8 %
7	Np-239	43,4 %	I-134	45,3 %	Te-134	41,4 %
8	Y-93	46,7 %	Np-239	48,9 %	I-134	45,0 %
9	Te-133m	49,9 %	Te-134	52,1 %	La-142	48,4 %
10	U-239	53,0 %	Sr-91	55,4 %	U-239	51,6 %
11	Ru-105	56,0 %	La-141	58,6 %	Ba-139	54,3 %
12	La-141	58,9 %	Ba-139	61,7 %	La-141	56,9 %
13	Ba-139	61,7 %	U-239	64,7 %	Te-132	59,4 %
14	Te-132	64,3 %	Te-133m	67,7 %	Sr-91	61,9 %
15	Te-134	66,8 %	Cs-138	70,0 %	U-237	64,3 %
16	U-237	69,1 %	U-237	72,3 %	Te-133m	66,6 %
17	Cs-138	71,3 %	Te-132	74,6 %	I-131	68,6 %

18	I-131	73,2 %	Ce-143	76,3 %	Cs-138	70,5 %
19	Mn-56	74,9 %	Mn-56	78,0 %	Mn-56	72,3 %
20	Sr-91	76,6 %	Pr-145	79,6 %	Ru-105	74,0 %
21	Ce-143	78,1 %	I-131	81,2 %	Ba-141	75,7 %
22	Pr-145	79,5 %	Y-94	82,5 %	Pr-145	77,1 %
23	Tc-104	80,9 %	Y-92	83,6 %	Ce-143	78,5 %
24	Mo-99	82,1 %	Ba-141	84,8 %	Te-131	79,8 %
25	Te-131	83,2 %	Ba-140	85,9 %	Sb-131	81,0 %
26	Ba-140	84,3 %	Mo-99	87,0 %	Mo-99	82,2 %
27	Ba-141	85,3 %	Te-131	88,0 %	Y-94	83,3 %
28	Sb-131	86,3 %	Sb-131	88,9 %	Sb-130	84,3 %
29	Tc-101	87,3 %	Na-24	89,8 %	Sb-129	85,2 %
30	Y-94	88,2 %	Tc-101	90,5 %	Na-24	86,1 %
31	Na-24	89,1 %	Se-83	91,2 %	Tc-101	87,0 %
32	Sb-130	89,8 %	Ru-105	91,8 %	Y-92	87,8 %
33	Sb-129	90,6 %	Sb-130	92,4 %	Sn-128	88,6 %
34	Mo-101	91,3 %	Nd-149	93,0 %	Se-83	89,4 %
35	Nd-149	92,0 %	Sb-129	93,5 %	Nd-149	90,2 %
36	Y-92	92,7 %	Mo-101	94,1 %	Tc-104	91,0 %
37	Te-131m	93,3 %	La-143	94,6 %	Sb-128	91,7 %
38	Sn-128	93,7 %	Tc-104	95,0 %	Mo-101	92,3 %
39	Rh-107	94,2 %	...	...	Br-84	92,9 %
40	Se-83	94,6 %			Ba-142	93,4 %
41	Sb-128	95,0 %			Sn-127	93,8 %
42	...	...			Te-133	94,2 %
43					La-143	94,6 %
44					Cd-117	94,9 %
45					Pd-109	95,2 %
				

En kompletterande undersökning gjordes med rangordning av nukliderna efter bidrag till inandningsdos till en vuxen. Rangordningen blir då snarlik men inte identisk, och ytterligare sju nuklider behöver tillföras (utöver de nuklider som finns i Tabell 12) för att beskriva minst 95 % av inandningsdosen i båda fallen (ettårigt barn och vuxen). De nuklider som tillkommer (Br-84, Ru-103, Rh-107, Sb-127, La-143, Ce-144, Nd-147) ingår redan i nuklidvektorn baserat på dos från markbeläggning.

Med Pd-109 och Pr-145 består nuklidvektorn av totalt 103 nuklider efter att bidrag till inandningsdos beaktats.

4.6. Ytterligare mödrar

Därefter gjordes en genomgång av nuklider som producerats i fission eller aktivering men som inte finns bland de 103 nukliderna i nuklidvektorn enligt föregående steg. Analyssteget syftade till att identifiera mödrar som genom sönderfall väsentligt bidrar till inväxt av en eller flera döttrar som i sin tur redan ingår i nuklidvektorn med 103 medlemmar, dvs. som behövs för att beskriva minst 95 % av dosen från mark eller inandning.

Följande metod användes för att identifiera dessa ytterligare mödrar:

- Moderns och dotterns antal kärnor vid $t = 10$ minuter beräknades för fissions- och aktiveringsprodukterna:

$$N = A \text{ [Bq]} / \lambda \text{ [1/s]}$$

- Andelen moderkärnor (F_M) i förhållande till dotterkärnor erhålls genom kvoten mellan moderns och dotterns kärnor multiplicerat med grenkvoten för sönderfallsvägen från moder till dotter (BR):

$$F_M = BR * N_M / N_D$$

- Om denna andel (F_M) överstiger 5 % lades modern till nuklidvektorn

Metoden ovan applicerades på samtliga nuklider i nuklidvektorn bestående av 103 medlemmar. Totalt identifierades nio mödrar som väsentligt bidrar till dotterns aktivitet och där dottern behövs för att beskriva minst 95 % av dosen från mark eller inandning. Tillagda mödrar och beräknade andel moderkärnor i förhållande till dotterkärnor (F_M) redovisas i Tabell 13. I tabellen redovisas även mödrarnas aktivitet vid $t = 10$ minuter som lades in i nuklidvektorn.

Tabell 13. Ytterligare mödrar som inkluderas i nuklidvektorn p.g.a. inväxt till dotternuklider.

Nr.	Nuklid (moder)	Aktivitet vid 10 min (Bq/kt)	Dotter	Grenkvot	Andel (F_M)
1	Co-58m	3,12E+16	Co-58	1	97 %
2	Nb-95m	5,55E+10	Nb-95	0,944	10 %
			Mo-95 (stabil)	0,056	
3	Ru-107	2,30E+18	Rh-107	1	25 %
4	Ag-115	2,44E+17	Cd-115	0,942	48 %
			Cd-115m *	0,058	
5	Sn-127m	3,48E+17	Sb-127	1	16 %
6	Sn-130	3,70E+17	Sb-130	1	6 %
7	I-132m	2,17E+16	I-132	0,86	67 %
			Xe-132 (stabil)	0,14	
8	Ce-145	2,39E+18	Pr-145	1	13 %

9	Te-129m	3,56E+13	Te-129	0,63	328 %
			I-129 **	0,37	

*) Cd-115m bidrar inte väsentligt till dosen för någon exponeringsväg. Denna gren har därför inte inkluderats i nuklidvektorn.

**) I-129 bidrar inte väsentligt till dosen för någon exponeringsväg. Denna gren har därför inte inkluderats i nuklidvektorn.

Efter att dessa nio mödrar lagts till består nuklidvektorn av 112 nuklider.

4.7. Molndos

I samband med att plymen med radioaktiva ämnen passerar kan en person bli externt exponerad för joniserande strålning från radioaktiva ämnen i plymen (molnet). Eftersom både molndos och dos från markbeläggning kommer från extern exponering från de radioaktiva ämnena i molnet respektive marken antar SSM att de viktigaste nukliderna för molndos är identiska med de viktigaste för dos från markbeläggning. SSM har därför inte genomfört någon ytterligare analys av relativa bidrag till molndos.

Ett undantag finns och det gäller ädelgaserna som beskrivs i nästa avsnitt.

4.8. Ädelgaser

I samband med fission produceras även ädelgaserna krypton (Kr) och xenon (Xe). Nuklider från ädelgaserna är viktiga genom att de bidrar till molndos och sönderfaller till andra radioaktiva ämnen som i sin tur bidrar till inandningsdos eller deponerar på marken och ger dos från markbeläggning. Xenon sönderfaller till jod (I) och cesium (Cs) medan krypton sönderfaller till rubidium (Rb) och strontium (Sr).

Samtliga ädelgasnuklider med en halveringstid längre än en minut har därför inkluderats i nuklidvektorn. Övriga ädelgasnuklider har sönderfallit under de första 10 minuterna, vilket gör deras dosbidrag försumbara. På samma sätt som beskrivs ovan används den högsta aktiviteten för respektive nuklid från de tre fissionsreaktionerna (maxvektorn). De 13 nuklider från ädelgasgruppen som i detta steg inkluderats i nuklidvektorn redovisas i Tabell 14. I tabellen anges även från vilken fissionsreaktion aktiviteten till maxvektorn är hämtad.

Tabell 14. Ädelgaser som inkluderats i nuklidvektorn.

Nr.	Nuklid	Aktivitet vid 10 min (Bq/kt)	Fissionsreaktion
1	Kr-83m	2,64E+15 *	U-238
2	Kr-85	2,83E+10	U-235
3	Kr-85m	7,10E+16	U-235
4	Kr-87	5,40E+17	U-235
5	Kr-88	3,48E+17	U-235
6	Kr-89	2,44E+18	U-235
7	Xe-131m	3,49E+10	Pu-239
8	Xe-133	4,16E+13	Pu-239

9	Xe-133m	1,22E+14	Pu-239
10	Xe-135	2,24E+16	Pu-239
11	Xe-135m	6,41E+17	Pu-239
12	Xe-137	4,34E+18	U-235
13	Xe-138	4,29E+18	U-235

*) I spridnings- och dosberäkningarna användes felaktigt 1,87E+15 från U-235. U-238 ger dock en högre aktivitet per kiloton, varför korrekt värde enligt metoden för urval till maxvektorn redovisas här.

Efter att dessa 13 nuklider lagts till består nuklidvektorn av 125 nuklider.

4.9. Markörnuklider

Slutligen lades tre s.k. *markörnuklider* till: Sr-89, Sr-90 och Cs-137. Dessa behövs inte för att beskriva 95 % av dosbidragen från vare sig inandning eller mark. Det huvudsakliga skälet till att dessa tre nuklider bifogas nuklidvektorn är istället att de bedömdes viktiga för vidare studier av problem på längre sikt kopplat till markbeläggning efter en kärnvapenexplosion, exempelvis för livsmedelsproduktion och sanering. Markörnukliderna med aktivitet per kiloton redovisas i Tabell 15. I tabellen anges även från vilken fissionsreaktion aktiviteten till maxvektorn är hämtad.

Tabell 15. Markörnuklider i nuklidvektorn för långvarig markbeläggning efter en kärnvapenexplosion.

Nr.	Nuklid	Aktivitet vid 10 min (Bq/kt)	Fissionsreaktion
1	Sr-89	2,33E+14	U-235
2	Sr-90	5,02E+12	U-235
3	Cs-137	5,47E+12	Pu-239
4	Ba-137m	2,31E+15	Pu-239

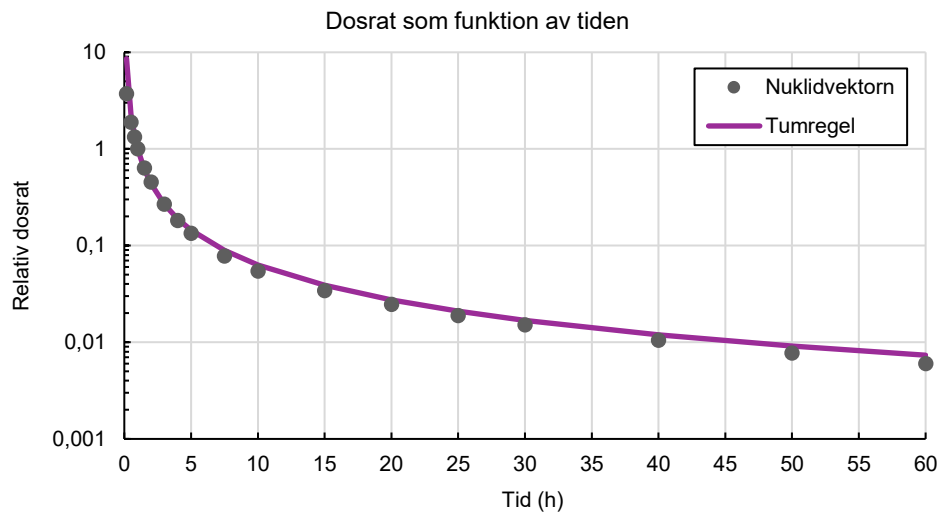
I detta arbete lades även dottern Ba-137m till nuklidvektorn eftersom den implicit inkluderas i spridnings- och dosberäkningarna när modern Cs-137 beaktas. Vid fission bildas Ba-137m med högre aktiviteter än modern Cs-137, men paret förväntas vara i jämvikt inom en timme. Även Sr-90 har en dotter, Y-90, som efter några veckor kan förväntas vara i jämvikt med modern. Y-90 har dock inte tagits med eftersom Sr-90 är tillräcklig som markörnuklid för detta arbete.

Efter detta sista steg med tre markörnuklider och en dotter består nuklidvektorn av 129 nuklider som är representativa för att beskriva doser från de olika exponeringsvägarna för tider mellan 10 minuter och ett år.

5. Nuklidvektor

Den fullständiga nuklidvektorn som använts för kärnvapenfallet i föreliggande studie återges i tabellerna nedan. Nuklidvektorn består av 129 nuklider som valts ut enligt metoden beskriven i Kapitel 4. Nuklidvektorn kan anses vara representativ för att beskriva minst 95 % av dosbidraget från aktiverings- och fissionsprodukter, för de tre fissionsreaktionerna som beaktats i detta arbete. Nuklidvektorn för huvudscenariot återges i Tabell 16. I Tabell 17 återges samma nuklidvektor normerad till aktivitet per kiloton. I Tabell 17 anges även referenser för respektive nuklid.

Efter en kärnvapenexplosion förväntas dosraten från nedfallet avta med tiden t enligt t^{-x} , där x ofta sätts till omkring 1,2 [3]. I Figur 1 visas den relativa dosraten från nuklidvektorn med 129 medlemmar vid olika tidpunkter för tider mellan 10 minuter och 60 timmar, normerat till dosraten vid en timme. Av figuren framgår att dosraten från nuklidvektorn avtar som förväntat enligt tumregeln.



Figur 1. Dosraten från nuklidvektorn för huvudscenariot vid olika tidpunkter mellan 10 minuter och 60 timmar (punkter) relativt dosraten vid 60 minuter. I figuren visas även som en heldragen kurva dosraten enligt $t^{1,2}$.

Tabell 16. Nuklidvektor för huvudscenariot, 100 kt markexplosion med 50 % fusionsandel. Aktiviteter 10 minuter efter explosion.

Nuklid	Aktivitet (Bq)	Nuklid	Aktivitet (Bq)	Nuklid	Aktivitet (Bq)
Be-7	2,20E+17	Ru-103	9,25E+16	I-132	8,45E+17
Na-24	2,37E+18	Ru-105	9,05E+18	I-132m	1,09E+18
Mn-54	3,76E+16	Ru-106	6,15E+15	I-133	1,68E+18
Mn-56	1,32E+19	Ru-107	1,15E+20	I-134	4,98E+19
Co-58	8,40E+15	Rh-105	1,54E+16	I-134m	5,00E+19
Co-58m	1,56E+18	Rh-105m	2,39E+18	I-135	1,25E+19
Co-60	6,10E+14	Rh-106	6,15E+15	Xe-131m	1,74E+12
Se-83	8,55E+18	Rh-107	7,95E+19	Xe-133	2,08E+15
Kr-83m	1,32E+17	Pd-109	1,14E+18	Xe-133m	6,12E+15
Kr-85	1,41E+12	Pd-112	6,90E+17	Xe-135	1,12E+18
Kr-85m	3,55E+18	Ag-112	2,58E+16	Xe-135m	3,21E+19
Kr-87	2,70E+19	Ag-115	1,22E+19	Xe-137	2,17E+20
Kr-88	1,74E+19	Cd-115	1,50E+17	Xe-138	2,14E+20
Kr-89	1,22E+20	Cd-117	3,68E+18	Cs-136	5,40E+15
Br-84	2,71E+19	Cd-117m	8,25E+17	Cs-137	2,74E+14
Rb-89	1,56E+20	In-115m	3,04E+15	Cs-138	6,14E+19
Rb-90	1,11E+20	In-117	1,61E+17	Cs-139	2,83E+20
Rb-90m	5,63E+19	In-117m	1,84E+17	Ba-137m	1,16E+17
Sr-89	1,17E+16	Sb-127	8,20E+16	Ba-139	3,07E+19
Sr-90	2,51E+14	Sb-128	3,68E+17	Ba-140	2,68E+17
Sr-91	7,64E+18	Sb-128m	4,16E+18	Ba-141	1,84E+20
Sr-92	2,87E+19	Sb-129	2,54E+18	Ba-142	2,31E+20
Sr-93	2,67E+20	Sb-129m	1,60E+19	La-140	7,50E+15
Y-91m	5,07E+17	Sb-130	3,00E+19	La-141	6,12E+18
Y-92	9,41E+17	Sb-130m	6,40E+19	La-142	2,43E+19
Y-93	4,95E+18	Sb-131	9,40E+19	La-143	2,02E+20
Y-93m	6,70E+19	Sb-132	5,65E+19	Ce-141	4,62E+14
Y-94	2,00E+20	Sb-132m	6,60E+19	Ce-143	8,71E+17
Y-95	2,70E+20	Sb-133	6,65E+19	Ce-144	1,03E+16
Nb-95	2,80E+12	Sn-127	5,20E+18	Ce-145	1,19E+20
Nb-95m	2,78E+12	Sn-127m	1,74E+19	Ce-146	1,09E+20
Nb-97	5,20E+17	Sn-128	1,76E+19	Pr-144	3,28E+16
Nb-97m	4,71E+18	Sn-129m	4,73E+19	Pr-145	7,70E+18
Zr-95	2,71E+16	Sn-130	1,85E+19	Pr-146	3,44E+19
Zr-97	4,95E+18	Te-129	2,38E+17	Pr-147	8,58E+19
Mo-99	1,19E+18	Te-129m	1,78E+15	Nd-147	4,03E+16
Mo-101	2,28E+20	Te-131	2,63E+19	Nd-149	9,85E+18
Mo-102	2,60E+20	Te-131m	3,99E+17	Nd-151	3,10E+19
Tc-99m	1,73E+16	Te-132	8,10E+17	Pm-151	1,64E+17
Tc-101	1,09E+20	Te-133	1,32E+20	Pb-203	5,40E+17
Tc-102	2,62E+20	Te-133m	4,61E+19	U-237	1,74E+18
Tc-104	2,11E+20	Te-134	9,35E+19	U-239	5,35E+20
Tc-105	2,37E+20	I-131	1,40E+16	Np-239	1,27E+18

Tabell 17. Nuklidvektor för markexplosion med 50 % fusionsandel. Normerade aktiviteter (Bq/kt) 10 min efter explosion. Aktiviteter motsvarande de som redovisas i Tabell 16 erhålls genom multiplikation med 50 eftersom utbytet från fission och fusion är 50 kt vardera för huvudscenariot. Mer allmänt erhålls aktiviteter svarande mot en kärnvapenexplosion vid marken med X kiloton fissionsutbyte och Y kiloton fusionsutbyte genom multiplikation med Y av aktiveringsprodukternas aktiviteter och multiplikation med X av övriga aktiviteter. För varje nuklid anges en referens till urvalet i nuklidvektorn: (M) markdos, se avsnitt 4.2; (I) inandningsdos, avsnitt 4.5; (Y) ytterligare mödrar, avsnitt 4.6; (G) ädelgaser, avsnitt 4.8; samt (L) markörnuklider, avsnitt 4.9. Nuklider som är aktiveringsprodukter (avsnitt 4.3) markeras med (A) efter nuklidnamnet. Övriga nuklider är fissionsprodukter.

Nuklid	Aktivitet (Bq/kt)	Referens	Nuklid	Aktivitet (Bq/kt)	Referens
Be-7 (A)	4,40E+15	M	Sb-129m	3,20E+17	M
Na-24 (A)	4,74E+16	M, I	Sb-130	6,00E+17	M, I
Mn-54 (A)	7,52E+14	M	Sb-130m	1,28E+18	M
Mn-56 (A)	2,64E+17	M, I	Sb-131	1,88E+18	M, I
Co-58 (A)	1,68E+14	M	Sb-132	1,13E+18	M
Co-58m (A)	3,12E+16	Y	Sb-132m	1,32E+18	M
Co-60 (A)	1,22E+13	M	Sb-133	1,33E+18	M
Se-83	1,71E+17	M, I	Sn-127	1,04E+17	M, I
Kr-83m	2,64E+15	G	Sn-127m	3,48E+17	Y
Kr-85	2,83E+10	G	Sn-128	3,51E+17	M, I
Kr-85m	7,10E+16	G	Sn-129m	9,45E+17	M
Kr-87	5,40E+17	G	Sn-130	3,70E+17	Y
Kr-88	3,48E+17	G	Te-129	4,75E+15	M
Kr-89	2,44E+18	G	Te-129m	3,56E+13	Y
Br-84	5,42E+17	M, I	Te-131	5,26E+17	M, I
Rb-89	3,13E+18	M	Te-131m	7,97E+15	M, I
Rb-90	2,22E+18	M	Te-132	1,62E+16	M, I
Rb-90m	1,13E+18	M	Te-133	2,63E+18	M, I
Sr-89	2,33E+14	L	Te-133m	9,22E+17	M, I
Sr-90	5,02E+12	L	Te-134	1,87E+18	M, I
Sr-91	1,53E+17	M, I	I-131	2,80E+14	M, I
Sr-92	5,74E+17	M, I	I-132	1,69E+16	M
Sr-93	5,34E+18	M	I-132m	2,17E+16	Y
Y-91m	1,01E+16	M	I-133	3,35E+16	M, I
Y-92	1,88E+16	M, I	I-134	9,96E+17	M, I
Y-93	9,90E+16	M, I	I-134m	1,00E+18	M
Y-93m	1,34E+18	M	I-135	2,49E+17	M, I
Y-94	4,01E+18	M, I	Xe-131m	3,49E+10	G
Y-95	5,40E+18	M	Xe-133	4,16E+13	G

Nuklid	Aktivitet (Bq/kt)	Referens	Nuklid	Aktivitet (Bq/kt)	Referens
Nb-95	5,60E+10	M	Xe-133m	1,22E+14	G
Nb-95m	5,55E+10	Y	Xe-135	2,24E+16	G
Nb-97	1,04E+16	M	Xe-135m	6,41E+17	G
Nb-97m	9,42E+16	M	Xe-137	4,34E+18	G
Zr-95	5,42E+14	M	Xe-138	4,29E+18	G
Zr-97	9,91E+16	M, I	Cs-136	1,08E+14	M
Mo-99	2,38E+16	M, I	Cs-137	5,47E+12	L
Mo-101	4,56E+18	M, I	Cs-138	1,23E+18	M, I
Mo-102	5,20E+18	M	Cs-139	5,66E+18	M
Tc-99m	3,46E+14	M	Ba-137m	2,31E+15	L
Tc-101	2,17E+18	M, I	Ba-139	6,14E+17	M, I
Tc-102	5,24E+18	M	Ba-140	5,37E+15	M, I
Tc-104	4,22E+18	M, I	Ba-141	3,68E+18	M, I
Tc-105	4,73E+18	M	Ba-142	4,61E+18	M, I
Ru-103	1,85E+15	M, I	La-140	1,50E+14	M
Ru-105	1,81E+17	M, I	La-141	1,22E+17	M, I
Ru-106	1,23E+14	M	La-142	4,86E+17	M, I
Ru-107	2,30E+18	Y	La-143	4,04E+18	M, I
Rh-105	3,07E+14	M	Ce-141	9,24E+12	M
Rh-105m	4,78E+16	M	Ce-143	1,74E+16	M, I
Rh-106	1,23E+14	M	Ce-144	2,07E+14	M, I
Rh-107	1,59E+18	I	Ce-145	2,39E+18	Y
Pd-109	2,27E+16	I	Ce-146	2,18E+18	M
Pd-112	1,38E+16	M	Pr-144	6,55E+14	M
Ag-112	5,16E+14	M	Pr-145	1,54E+17	I
Ag-115	2,44E+17	Y	Pr-146	6,88E+17	M
Cd-115	3,00E+15	M	Pr-147	1,72E+18	M
Cd-117	7,35E+16	M, I	Nd-147	8,07E+14	M, I
Cd-117m	1,65E+16	M	Nd-149	1,97E+17	M, I
In-115m	6,07E+13	M	Nd-151	6,19E+17	M
In-117	3,22E+15	M	Pm-151	3,28E+15	M
In-117m	3,67E+15	M	Pb-203 (A)	1,08E+16	M
Sb-127	1,64E+15	M, I	U-237 (A)	3,48E+16	M, I
Sb-128	7,35E+15	M, I	U-239 (A)	1,07E+19	M, I
Sb-128m	8,31E+16	M	Np-239 (A)	2,54E+16	M
Sb-129	5,08E+16	M, I			

Referenser

- [1] M. Goliath, "Kärnvapenfall för totalförsvarsplaneringen (FOI Memo 6724)," FOI, 2019.
- [2] A. Tovedal, M. Goliath, P. Lagerkvist och T. Nylén, Approximativa källtermer för kärnladdningsexplosioner (FOI Memo 7177), FOI, 2020.
- [3] S. Glasstone och P. J. Dolan, The Effects of Nuclear Weapons (3rd Edition), United States Department of Defense och United States Department of Energy, 1977.
- [4] P. J. Dolan (red.), Capabilities of Nuclear Weapons. Part I Phenomenology (DNA EM-1 Part I Change 1), Defense Nuclear Agency, 1978.
- [5] T. Harvey, F. Serduke, L. Edwards och L. Peters, "KDFOC3: A Nuclear Fallout Assessment Capability," Lawrence Livermore National Laboratory, 1992.
- [6] H. G. Hicks, "Results of Calculations of External Gamma Radiation Exposure Rates from Fallout and the Related Radionuclide Compositions (UCRL-53152, Parts 1, 2, 3, 4, and 8)," Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
- [7] H. G. Hicks, "Calculated nuclide compositions and gamma-ray exposure rates for fallout from the Harry, Smoky and Annie events (UCID-18870)," Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
- [8] H. G. Hicks, "Calculation of the concentration of any radionuclide deposited on the ground by off-site fallout from a nuclear detonation," *Health Phys.*, vol. 42, pp. 585-600, 1982.
- [9] H. G. Hicks, "Results of Calculations of External Gamma Radiation Exposure Rates from Local Fallout and the Related Radionuclide Compositions of Two Hypothetical 1-MT Nuclear Bursts (UCRL-53569)," Lawrence Livermore National Laboratory, 1984.
- [10] H. G. Hicks, "Results of Calculations of External Gamma Radiation Exposure Rates from Fallout and the Related Radionuclide Compositions – the Trinity Event (UCRL-53705)," Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [11] T. Kraus och K. Foster, "Analysis of fission and activation radionuclides produced by a uranium-fueled nuclear detonation and identification of the top dose-producing radionuclides," *Health Phys.*, vol. 107, pp. 150-163, 2014.
- [12] CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97:e upplagan, 14-17 Abundance of Elements in the Earth's Crust and in the Sea, 2016-2017.
- [13] L.-E. De Geer, "Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty: relevant radionuclides," *Kernteknik*, vol. 66, pp. 113-120, 2001.
- [14] C. Sublette, Nuclear Weapons Frequently Asked Questions, <http://nuclearweaponarchive.org>.
- [15] K.F. Eckerman and R.W. Leggett, DCFPAK: Dose Coefficient Data File Package for Sandia National Laboratory. ORNL, TM-13347, 1996.
- [16] Internationella strålskyddskommissionen (ICRP), "Publication 119 - Compendium of Dose Coefficients based on ICRP 60," 2012.

Appendix – Rangordning för U-235

I Tabell 18 och Tabell 19 redovisas de nuklider som behövdes för att nå upp till 95 % av den totala effektiva dosen från markbeläggning i något av de fyra tidsfönstren (dygn 1, dygn 2-7, dygn 8-30 samt dygn 31-365) i samband med fission av U-235 inducerad av 1 MeV neutroner. De tre nuklider som tillkommer för U-235 (Se-83, Rb-90 och Ce-141) har markerats med fet stil i Tabell 18 och Tabell 19.

Tabell 18. Rangordningstabell för sortering av nuklider som beskriver dosbidraget från mark i två olika tidsfönster (dygn 1 och dygn 2-7) vid fission av U-235 inducerad av 1 MeV neutroner. Beräkningen visar att det behövs 39 nuklider för att beskriva minst 95 % av dosen från markbeläggning under det första dygnet, respektive 13 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 2-7.

Nr.	Nuklid	Effektiv dos dygn 1		Nuklid	Effektiv dos dygn 2-7	
		Andel	Kumulativ andel		Andel	Kumulativ andel
1	Te-134	10,6 %	10,6 %	Te-132	29,1 %	29,1 %
2	Ba-142	6,4 %	17,0 %	Zr-97	22,2 %	51,3 %
3	Sr-92	5,7 %	22,8 %	Ba-140	11,3 %	62,6 %
4	Zr-97	5,6 %	28,4 %	I-133	8,2 %	70,8 %
5	I-135	5,5 %	33,9 %	Sr-91	4,2 %	75,1 %
6	Te-133m	4,8 %	38,7 %	Mo-99	3,9 %	79,0 %
7	I-134	4,4 %	43,1 %	Ce-143	3,7 %	82,7 %
8	Rb-89	4,1 %	47,2 %	I-135	3,2 %	85,9 %
9	La-142	4,0 %	51,2 %	Te-131m	2,5 %	88,3 %
10	Sr-93	3,9 %	55,1 %	La-140	2,3 %	90,7 %
11	Mo-101	3,9 %	59,0 %	I-131	1,9 %	92,6 %
12	Cs-138	3,7 %	62,7 %	Zr-95	1,3 %	93,9 %
13	Sb-131	3,5 %	66,2 %	I-132	1,1 %	95,1 %
14	Sr-91	2,9 %	69,1 %	...	...	...
15	Ba-141	2,6 %	71,7 %			
16	Y-94	2,4 %	74,2 %			
17	Tc-104	2,4 %	76,6 %			
18	Y-95	2,4 %	79,0 %			
19	Sb-130	2,1 %	81,1 %			
20	Te-133	1,6 %	82,7 %			
21	Ce-146	1,6 %	84,3 %			
22	Te-132	1,2 %	85,5 %			
23	Br-84	0,9 %	86,4 %			
24	La-143	0,9 %	87,3 %			
25	Cs-139	0,8 %	88,1 %			
26	Sn-128	0,7 %	88,8 %			
27	Pr-146	0,7 %	89,5 %			
28	Sb-130m	0,6 %	90,1 %			

29	Rb-90m	0,6 %	90,7 %
30	Tc-105	0,6 %	91,3 %
31	Sb-129	0,5 %	91,8 %
32	Sn-129m	0,5 %	92,3 %
33	Pr-147	0,4 %	92,8 %
34	Rb-90	0,4 %	93,2 %
35	I-133	0,4 %	93,6 %
36	Sb-132m	0,4 %	94,0 %
37	Se-83	0,4 %	94,4 %
38	Ru-105	0,4 %	94,7 %
39	Tc-101	0,3 %	95,1 %
...

Tabell 19. Rangordningstabell för sortering av nuklider som beskriver dosbidraget från mark i två olika tidsfönster (dygn 8-30 och dygn 31-365) vid fission av U-235 inducerad av 1 MeV neutroner. Beräkningen visar att det behövs 8 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 8-30, respektive 6 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 31-365.

Nr.	Nuklid	Effektiv dos dygn 8-30		Nuklid	Effektiv dos dygn 31-365	
		Andel	Kumulativ andel		Andel	Kumulativ andel
1	Ba-140	48,5 %	48,5 %	Zr-95	52,5 %	52,5 %
2	Te-132	18,3 %	66,9 %	Ba-140	22,4 %	74,9 %
3	La-140	9,3 %	76,2 %	Nb-95	7,9 %	82,9 %
4	Zr-95	8,5 %	84,6 %	Ru-103	7,6 %	90,5 %
5	I-131	4,6 %	89,2 %	La-140	3,1 %	93,6 %
6	Ru-103	3,5 %	92,7 %	Ce-141	1,7 %	95,3 %
7	Mo-99	1,9 %	94,6 %	...	...	...
8	Ce-141	1,0 %	95,6 %			
...			

Appendix – Rangordning för U-238

I Tabell 20 och Tabell 21 redovisas de nuklider som behövdes för att nå upp till 95 % av den totala effektiva dosen från markbeläggning i något av de fyra tidsfönstren (dygn 1, dygn 2-7, dygn 8-30 samt dygn 31-365) i samband med fission av U-238 inducerad av 14 MeV neutroner. De åtta nuklider som tillkommer för U-238 (Pd-112, Cd-115, Cd-117, Cd-117m, Sb-127, Sb-132, Sb-133 och Nd-149) har markerats med fet stil i Tabell 20.


Tabell 20. Rangordningstabell för sortering av nuklider som beskriver dosbidraget från mark i två olika tidsfönster (dygn 1 och dygn 2-7) vid fission av U-238 inducerad av 14 MeV neutroner. Beräkningen visar att det behövs 48 nuklider för att beskriva minst 95 % av dosen från markbeläggning under det första dygnet, respektive 18 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 2-7.

Nr.	Nuklid	Effektiv dos dygn 1		Nuklid	Effektiv dos dygn 2-7	
		Andel	Kumulativ andel		Andel	Kumulativ andel
1	Te-134	11,2 %	11,2 %	Te-132	30,8 %	30,8 %
2	I-135	5,1 %	16,4 %	Zr-97	20,1 %	50,9 %
3	Zr-97	5,1 %	21,4 %	Ba-140	9,2 %	60,1 %
4	Ba-142	4,9 %	26,3 %	I-133	7,5 %	67,5 %
5	Sb-131	4,5 %	30,9 %	Mo-99	4,0 %	71,6 %
6	Mo-101	4,5 %	35,4 %	Sr-91	3,0 %	74,6 %
7	Tc-104	4,0 %	39,4 %	I-135	3,0 %	77,6 %
8	Sr-92	3,9 %	43,3 %	Ce-143	2,7 %	80,3 %
9	Te-133m	3,6 %	46,9 %	Sb-127	2,6 %	82,9 %
10	Sb-130	3,2 %	50,1 %	I-131	2,2 %	85,1 %
11	Sr-93	3,1 %	53,3 %	La-140	1,9 %	87,0 %
12	La-142	3,1 %	56,3 %	Te-131m	1,7 %	88,7 %
13	Cs-138	2,7 %	59,1 %	Pd-112	1,6 %	90,3 %
14	Rb-89	2,7 %	61,8 %	I-132	1,2 %	91,5 %
15	I-134	2,5 %	64,3 %	Zr-95	1,0 %	92,5 %
16	Sn-128	2,2 %	66,6 %	Ru-103	1,0 %	93,5 %
17	Te-133	2,1 %	68,7 %	Cd-115	0,9 %	94,3 %
18	Ba-141	2,1 %	70,8 %	Rh-105	0,7 %	95,1 %
19	Sr-91	2,1 %	72,8 %	...	...	...
20	Y-94	1,9 %	74,8 %			
21	Y-95	1,8 %	76,6 %			
22	Tc-105	1,5 %	78,1 %			
23	Ce-146	1,5 %	79,6 %			
24	Te-132	1,2 %	80,8 %			
25	Br-84	1,2 %	82,0 %			
26	Sn-129m	1,1 %	83,1 %			
27	Sn-127	1,1 %	84,2 %			
28	Ru-105	0,9 %	85,1 %			

29	Sb-130m	0,9 %	86,0 %
30	Sb-129	0,8 %	86,9 %
31	Cs-139	0,7 %	87,6 %
32	Cd-117	0,7 %	88,2 %
33	La-143	0,7 %	88,9 %
34	Sb-132m	0,7 %	89,6 %
35	Pr-146	0,6 %	90,2 %
36	Sb-133	0,6 %	90,8 %
37	Pr-147	0,5 %	91,3 %
38	Sb-128	0,4 %	91,7 %
39	Sb-129m	0,4 %	92,1 %
40	Se-83	0,4 %	92,5 %
41	Tc-101	0,4 %	92,9 %
42	Sb-132	0,4 %	93,3 %
43	Cd-117m	0,4 %	93,7 %
44	I-133	0,3 %	94,0 %
45	Nd-151	0,3 %	94,3 %
46	Nd-149	0,3 %	94,6 %
47	Rb-90	0,3 %	94,9 %
48	Rb-90m	0,3 %	95,2 %
...

Tabell 21. Rangordningstabell för sortering av nuklider som beskriver dosbidraget från mark i två olika tidsfönster (dygn 8-30 och dygn 31-365) vid fission av U-238 inducerad av 14 MeV neutroner. Beräkningen visar att det behövs 10 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 8-30, respektive 8 nuklider för att beskriva minst 95 % av den effektiva dosen från markbeläggning under dygn 31-365.

Nr.	Nuklid	Effektiv dos dygn 8-30		Nuklid	Effektiv dos dygn 31-365	
		Andel	Kumulativ andel		Andel	Kumulativ andel
1	Ba-140	42,4 %	42,4 %	Zr-95	46,0 %	46,0 %
2	Te-132	20,8 %	63,2 %	Ba-140	21,1 %	67,1 %
3	La-140	8,1 %	71,3 %	Ru-103	12,7 %	79,8 %
4	Zr-95	6,9 %	78,2 %	Nb-95	7,0 %	86,7 %
5	I-131	5,5 %	83,7 %	La-140	3,0 %	89,7 %
6	Ru-103	5,4 %	89,1 %	Ru-106	2,7 %	92,4 %
7	Sb-127	2,3 %	91,4 %	Ce-141	1,6 %	94,0 %
8	Mo-99	2,1 %	93,5 %	Ce-144	1,4 %	95,4 %
9	Nd-147	1,1 %	94,6 %	...	...	...
10	Ce-141	0,9 %	95,5 %			
...			



Strålsäkerhetsmyndigheten arbetar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden.

Du kan ladda ner våra publikationer från www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer. Om du behöver alternativa format som exempelvis lättläst, punktskrift eller Daisy, kontaktar du oss på e-post registrator@ssm.se.

Strålsäkerhetsmyndigheten
171 16 Stockholm
08-799 40 00
www.stralsakerhetsmyndigheten.se
registrator@ssm.se

©Strålsäkerhetsmyndigheten