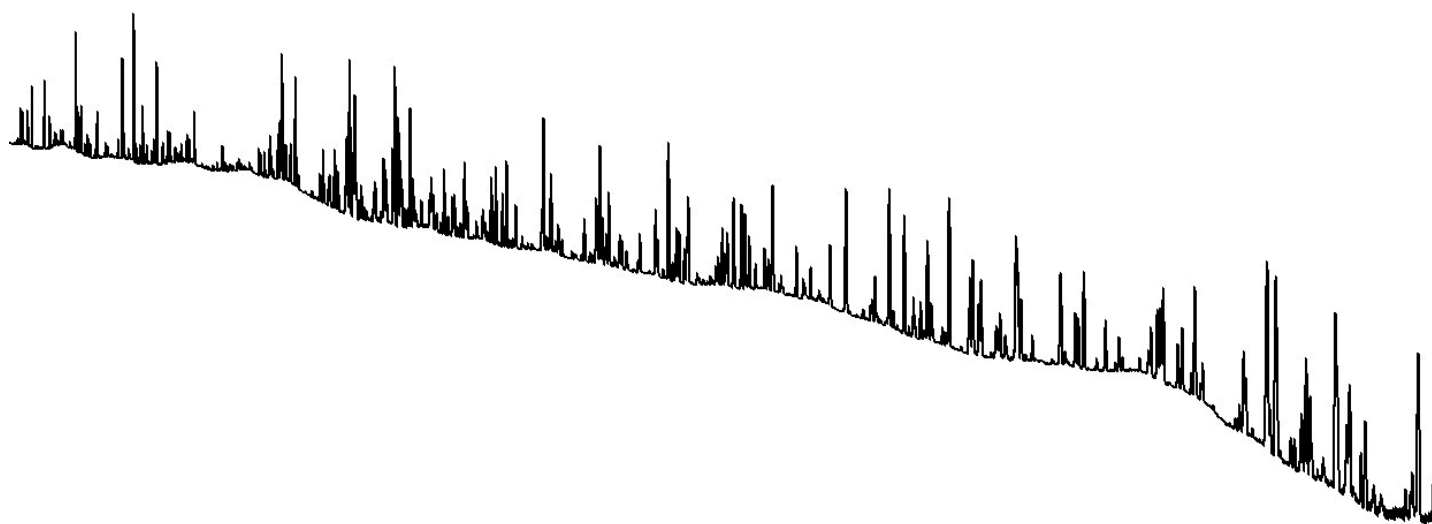


Generering och utvärdering av komplexa gammaspektra

HENRIK RAMEBÄCK



Henrik Ramebäck

Generering och utvärdering av komplexa gammaspektra

Titel	Generering och utvärdering av komplexa gammaspektra
Title	Simulation and evaluation of gamma spectra with a high degree of complexity
Rapportnr/Report no	FOI-R--5319--SE
Månad/Month	Oktober
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	44
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsdepartementet
Forskningsområde	CBRN-frågor
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	A400322
Godkänd av/Approved by	Niklas Brännström
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet

Bild/Cover: FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Syftet med det här arbetet var att påbörja utvecklingen av en förmåga att utvärdera gammaspektra med en större komplexitet rörande antalet gammastrålande radionuklider som finns i ett prov. Källor med fissionsprodukter vid sex olika tidpunkter, 1-365 dygn efter snabbfission av ^{235}U skapades. För de olika tidpunkterna genererades sedan spektra med en högren germaniumdetektor (HPGe, *High Purity Germanium*). Därefter testades utvärdering av de olika spektrumen med mjukvaran Gammavision, med fokus på gammastrålande radionuklider som utifrån ett stråldosperspektiv är mest nödvändiga att erhålla ett mätresultat för vid respektive tidpunkt. Tre olika vägar för stråldosbidrag beaktades: externbestrålning, intag via lungor och intag via föda.

Nyckelord: fission; fissionsprodukter, ^{235}U , gammaspektrum, gammaspektrometri

Summary

The aim of this work was to start the development of a capability to evaluate gamma spectrometric measurements of a higher complexity for a high number of gamma emitting radionuclides present in a sample. Sources containing fission products at different times, 1-365 days, after fast fission of ^{235}U were created. At these times spectra were generated with a high purity germanium detector (HPGe). Thereafter, evaluation of the spectra was tested using the software Gammavision, with a focus on receiving results from the gamma emitting radionuclides that contribute most to the radiation dose. Exposure from external radiation and internal radiation *via* food and inhalation were considered.

Keywords: fission; fission products, ^{235}U , gamma spectrum, gamma spectrometry

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Generering av källor och gammaspektra	8
2.1	Generering av källor	8
2.2	Generering av gammaspektra	8
2.2.1	Begränsningar med Gamma Spectrum Generator Pro++	9
2.3	Kalibreringsspektrum	9
3	Utvärdering	12
3.1	Utvärderingskriterier	12
3.2	Radionuklider	12
3.3	Radionuklidbibliotek	13
3.4	Utvärderingsinställningar	14
4	Resultat och diskussion	15
4.1	Problem	15
4.2	Utvärderingsmotor i Gammavision	18
4.3	Metod för verkliga mätningar	18
5	Fortsatt arbete	19
6	Referenser	20
	Bilaga A: Radionuklidbiotek	21

1 Inledning

Mätning av radionuklider i exempelvis omgivningsprover efter deposition från kärnladdningsexplosioner eller reaktorolyckor är viktigt för att erhålla data för att kunna skatta stråldoser, och därefter fatta beslut om eventuella åtgärder i syfte att minska stråldoser. En av de vanligaste mätmetoderna för mätning av radionuklider är högupplösande gammaspektrometri. I normalfallet, som en del gånger kan vara nog så utmanande, är spektra från mätningar av prover relativt okomplicerade med avseende på antalet toppar. Dessutom är interferenser relativt ovanliga. De stora svårigheterna ligger, i de fallen, i att kunna genomföra korrekationer för eventuella systematiska effekter p.g.a. skillnader mellan kalibreringsstandard och prov samt sönderfallssättet för vissa radionuklider.

Vid fission av exempelvis ^{235}U bildas hundratals radionuklider varav fler än hundra av dem har en halveringstid längre än 1 timme. Av dessa emitterar flertalet gammastrålning i sitt sönderfall. Lägg därtill att många radionuklider även ger upphov till flera toppar i spektrumet. Dessutom kommer det finnas toppar från gammastrålande aktiveringsprodukter. Resultatet blir att spektra från gammaspektrometriska mätningar av prover efter ett färskt nedfall kommer innehålla *många* toppar. Ett angreppssätt för att utvärdera sådana mätningar kan då vara att primärt fokusera på de radionuklider som är viktigast att mäta. Utifrån ett riskperspektiv skulle man då kunna fokusera på de radionuklider som bidrar till huvuddelen av stråldosen, i vårt fall de som bidrar till $> 95\%$. Detta minskar i någon mening komplexiteten i en utvärdering genom att man inte har som målsättning att varken identifiera alla toppar eller att aktivitetsbestämma alla radionuklider. Utifrån tidigare arbeten [Lid 2022] har det framkommit att det är viktigt att erhålla mätresultat för runt 30 gammastrålande radionuklider, vid tidpunkter mellan 1 till 365 dygn efter fission.

Det här arbetet beskriver hur källor med fissionsprodukter och spektra tagits fram samt resultatet från testutvärderingar. De framtagna spektrumen är tänkta att kunna användas i övningssyfte för att påbörja uppbyggnaden av en förmåga att analysera mer komplexa spektra. Denna förmåga skulle kunna vara av stort värde för de aktörer inom totalförsvaret som kan komma att behöva genomföra gammaspektrometriska mätningar. Dessa aktörer finns både inom det militära såväl som det civila försvaret. Det skulle innebära en utökad förmåga för att bl.a. förstå vad som hänt eller bekräfta andra observationer. De radionuklider som är svåra, eller omöjliga att vid vissa tidpunkter aktivitetsbestämma genom mätning av gammalinjer redovisas, samt om möjligt hur de radionukliderna istället kan aktivitetsbestämmas.

2 Generering av källor och gammaspektra

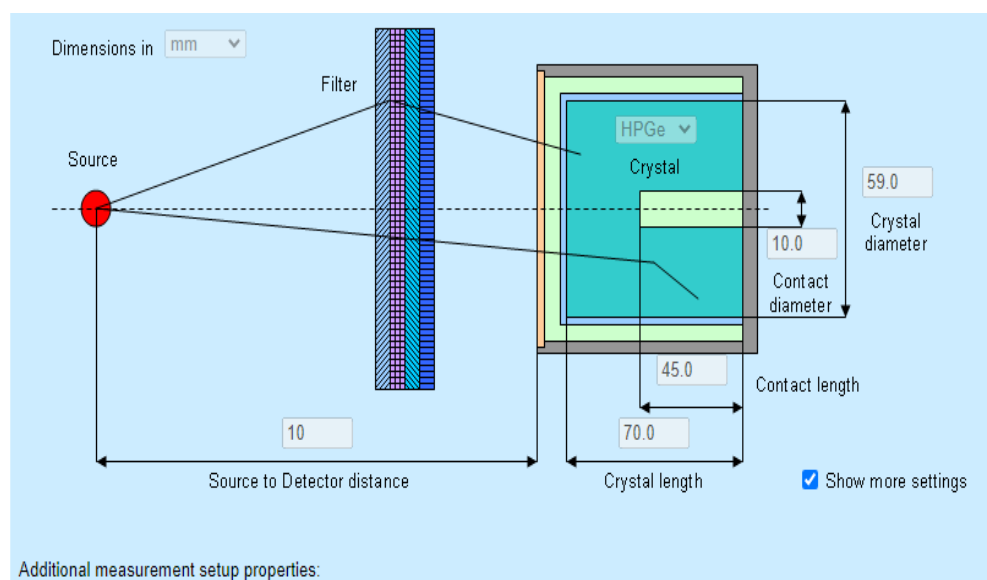
För generering av källor och gammaspektra användes Nucleonica [Nuc 2021]. Med moduler i Nucleonica kan man dels skapa en källa med fissionsprodukter efter fission, dels låta denna källa klinga av till olika tidpunkter, samt generera gammaspektra vid respektive tidpunkt.

2.1 Generering av källor

En källa vid $t = 0$ efter fission av ^{235}U med snabba neutroner skapades med Nucleonica-applikationen *Fission Yields*. Masstal som beaktades var $A = 65$ -170 (isobarutbytet för $A = 65$ är $5,2 \cdot 10^{-9} \%$ och för $A = 170$ $1,5 \cdot 10^{-9} \%$). För fissionsdata användes JEFF-3.1¹. Därefter fick källan vid $t = 0$ klinga av till tidpunkterna 1 d, 3 d, 10 d, 30 d, 100 d och 365 d. För detta användes Nucleonica-applikationen *Decay Engine*, som beaktar succesivt radioaktivt sönderfall, dvs. sönderfallskedjor. Stabila nuklider och radionuklider med en aktivitet mindre än 1 mBq togs bort ur källorna. Kvar blev 153 radionuklider i källan efter 1 dygn avklingningstid, 129 efter 3 d, 100 efter 10 d, 70 efter 30 d, 54 efter 100 d och 40 efter 365 d.

2.2 Generering av gammaspektra

För källorna, efter respektive avklingningstid, genererades gammaspektra med Nucleonica-applikationen *Gamma Spectrum Generator Pro++*. Mättiden för varje spektrum var 300 sekunder. Figur 1 visar detektorn som användes för att simulera gammaspektra.



Figur 1. Detektorn som användes för generering av gammaspektra.

Parametrar för detektorn som användes i simuleringarna ges i tabell 1.

¹ Joint Evaluated Fission and Fusion (JEFF) nuclear data library [JEFF].

Tabell 1. Parametrar för HPGe-detektorn.

Detektor:	p-typ HPGe
Kristalldiameter:	59 mm
Kristalllängd:	70 mm
Håldiameter:	10 mm
Hållängd:	45 mm
Dödlagertjocklek:	0,5 mm
Endcapmaterial:	0,5 mm aluminium

2.2.1 Begränsningar med Gamma Spectrum Generator Pro++

Applikationen för simulering av gammaspektra i Nucleonica har följande begränsningar:

- Enbart 20 radionuklider kan finnas i källan vid varje simulering. För varje avklingningstid delades därför källorna upp i delkällor om max 20 i varje. När spektra tagits fram för alla delkällor vid en tidpunkt summerades dessa.
- Slumpmässig summation, dvs. summation av två gammalinjer då *två* radionuklider sönderfaller inom detektorns tidsupplösning, inkluderas inte. Slumpmässig summation uppstår då ett prov innehåller exempelvis en radionuklid med mycket hög aktivitet. Sannolikheten att två radionuklider sönderfaller inom tidsupplösningen för ett mätsystem är då inte försumbar.
- Summation av två olika gammalinjer från ett sönderfall av en radionuklid (koincidenssummation) är inte inkluderat. Ett exempel är ^{60}Co som i sitt sönderfall emitterar gammalinjer med olika energi. Om ett prov befinner sig nära detektorn (stor effektiv rymdvinkel) kan båda gammafotonerna interagera samtidigt i detektorn, inom detektorns tidsupplösning. Detta resulterar i förluster av händelser vid respektive fotonenergi. Det resulterar också i en topp vid energin som motsvarar summan av de två komponenterna.
- Endast punktkällor kan användas i simuleringarna.

Bromsstrålning inkluderades inte i simuleringen av spektra eftersom det ger väldigt långa simuleringstider. Bakgrund inkluderades inte heller. Detta skulle kunna läggas till senare genom att addera exempelvis ett spektrum från en mätning av sand och/eller jord.

2.3 Kalibreringsspektrum

Ett kalibreringsspektrum togs fram för samma detektor och geometri som användes för att generera provspektra för att kunna kalibrera detektorn och därefter utvärdera aktiviteter.

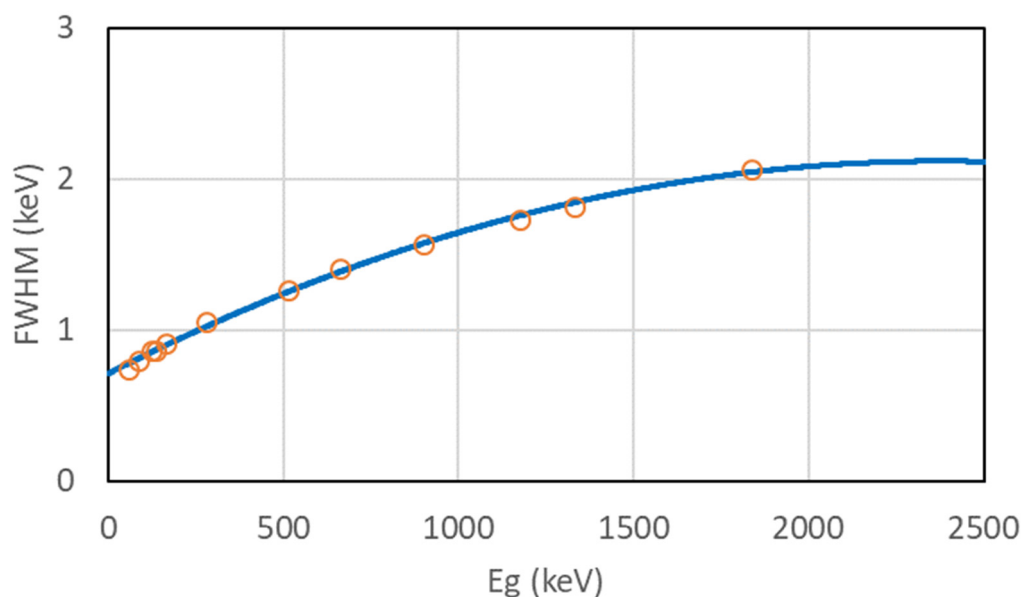
Radionuklider och aktiviteter i kalibreringsobjektet (punktkälla) ges av tabell 2.

Referenstidpunkten för kalibreringsspektrum är tiden som framgår i kalibreringsspektrum.

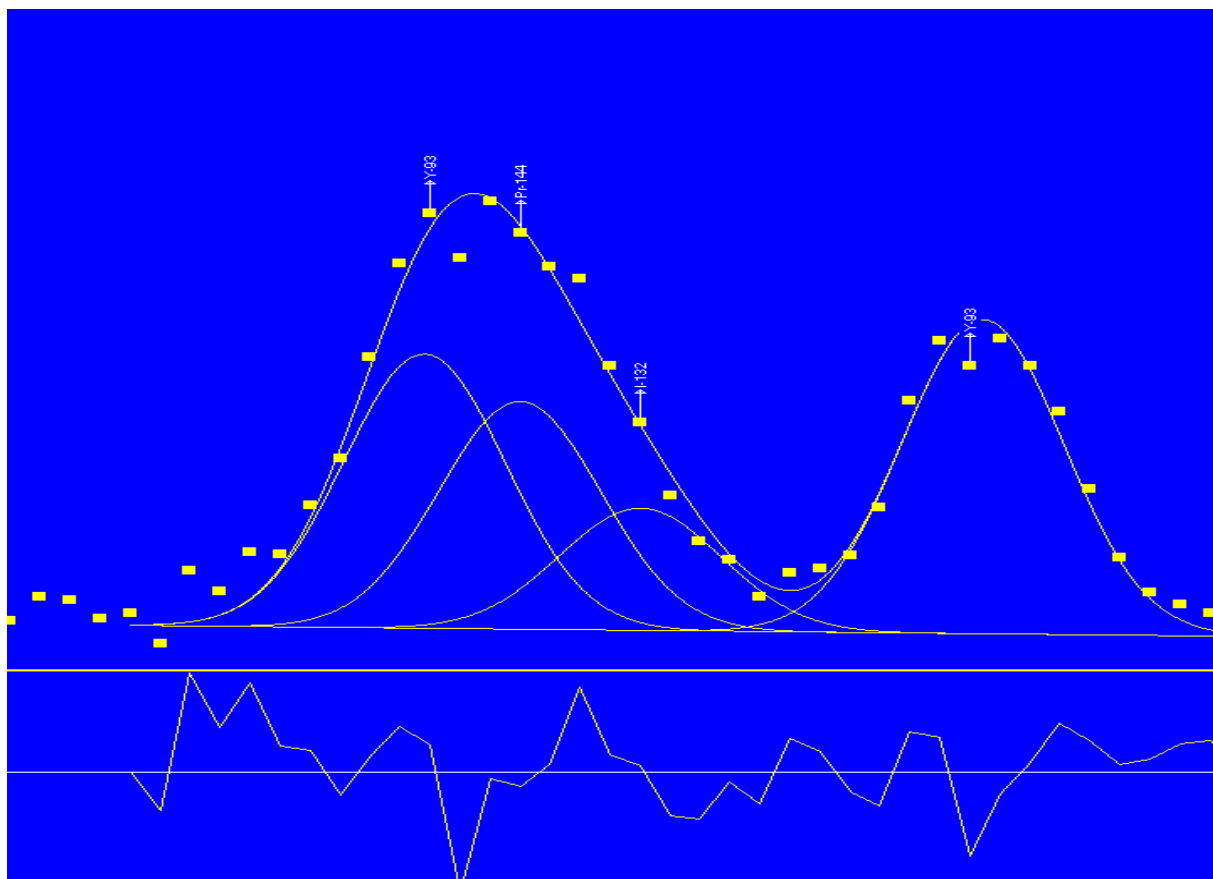
Tabell 2. Virtuetllt certifikat för kalibreringen.

Radionuklid	E_γ (keV)	I_γ	A (Bq)	u_A (%), $k=1$
^{241}Am	59,54	0,3592	1000	1
^{109}Cd	88,04	0,0366	10000	1
^{57}Co	122,07	0,8549	1000	1
^{139}Ce	165,85	0,799	1000	1
^{203}Hg	279,17	0,8148	1000	1
^{85}Sr	514	0,985	1000	1
^{137}Cs	661,62	0,8499	1000	1
^{88}Y	898,02	0,937	1000	1
^{60}Co	1173,23	0,9985	1000	1
^{60}Co	1332,5	0,99983	1000	1
^{88}Y	1836,01	0,99346	1000	1

Kalibrering genomfördes därefter i Gammavision (version 8, Ortec). Figur 2 visar FWHM-kalibreringen (*Full Width at Half Maximum*).

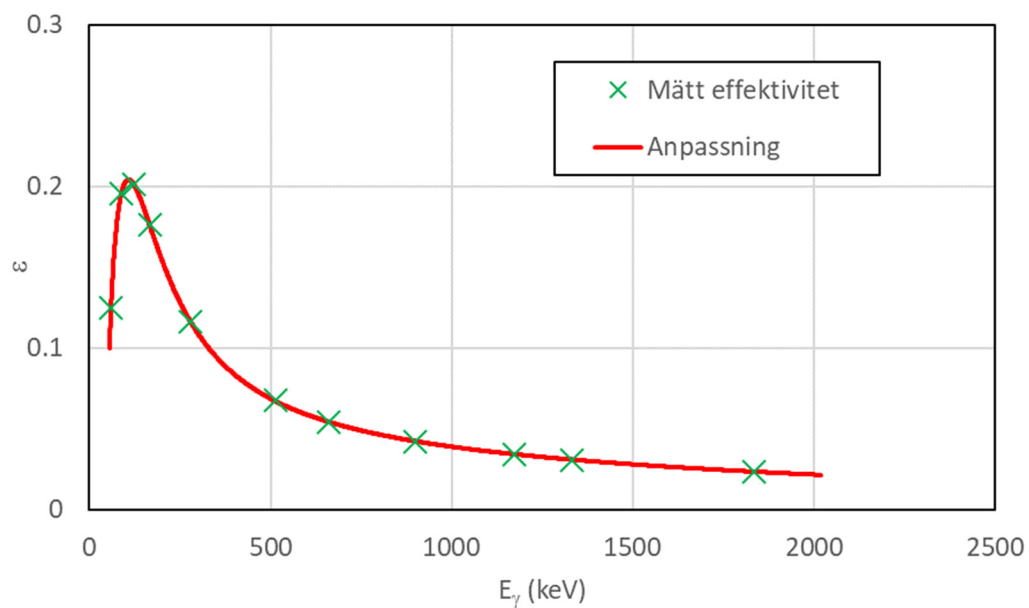
**Figur 2.** FWHM-karaktäristik för detektorn.

FWHM-kalibreringen är central för att automatisk utvärdering ska kunna genomföras eftersom dekonvolering av toppar bygger på att mjukvaran känner till hur bred en singeltopp ska vara vid en viss energi. Om en topp i spektrum är bredare än vad en singeltopp ska vara, inom en viss tolerans, dekonvulerar mjukvaran toppen i ett antal komponenter med en minsta-kvadrat-anpassning, se figur 3.



Figur 3. Ett exempel på dekonvulering med Gammavision. Här var syftet att kunna mäta ^{144}Ce via dess dotternuklid ^{144}Pr .

För att kunna mäta aktiviteten av en radionuklid i ett prov krävs en effektivitetskalibrering, vilket görs med känd(a) aktivitet(er) av radionuklid(er) för den geometri man vill kalibrera en detektor. Figur 4 visar resultatet för effektivitetskalibreringen av Nucleonica-detektorn genomförd med Gammavision.



Figur 4. Effektivitet som funktion av energi för detektorn.

3 Utvärdering

Aktivitetsutvärdering vid de olika tidpunkterna genomfördes på en aktivitetssammansättning av fissionsprodukter som enbart ändrats *via* radioaktivt sönderfall. Andra kemisk-fysikaliska processer som skulle kunna inverka på aktivitetssammansättningen i ett prov vid de olika tidpunkterna har inte beaktats. Vidare har inte begränsningar i aktivitet av de olika radionukliderna beaktats. Framförallt vid de kortare tidpunkterna, 1-30 dygn, skulle aktivitetsnivåerna i källorna för att generera gammaspektra kunna vara orealistiskt höga. Arbetet ska dock mer ses som ett test om utvärdering av aktiviteter går att göra i ett idealfall.

3.1 Utvärderingskriterier

Kriterierna för utvärderingen som sattes upp på förhand var:

- Endast stråldosrelevanta gammastrålande radionuklider vid de olika tidpunkterna utvärderades.
- Avvikelse i aktivitetsbestämning fick maximalt vara $\pm 20\%$. Om den relativa avvikelsen var större än 20% men inte signifikant p.g.a. statistisk osäkerhet, $k=2$, accepterades dock resultatet.
- Om inget resultat, eller ett resultat med för stor avvikelse, ges för en radionuklid men dess aktivitet kan ges *via* exempelvis dess moder- eller dotternuklid kan den radionukliden beräknas *via* mätningar av modern eller dottern. Detta förutsätter att radioaktiv jämvikt ställt in sig vid tidpunkten. Exempel i det här arbetet är ^{144}Ce som vid vissa tidpunkter kan aktivitetsbestämmas av dess dotternuklid ^{144}Pr , samt $^{97\text{m}}\text{Nb}$ som vid vissa tidpunkter kan bestämmas *via* dess modernuklid ^{97}Zr .
- Spektrumutvärdering skulle göras med mjukvaran Gammavision.

3.2 Radionuklider

Målsättningen med arbetet har inte varit att erhålla acceptabla resultat för alla gammastrålande radionuklider som bidrar till toppar i spektra, utan för de som är relevanta utifrån ett stråldosperspektiv [Lid 2022]. De gammastrålande fissionsprodukterna som beaktats i arbetet ges i tabell 3. Dessa radionuklider kommer att bidra till $> 90 - 95\%$ av stråldosen från gammastrålande radionuklider.

Tabell 3. Gammastrålande fissionsprodukter som ger signifikanta stråldosbidrag via föda, inhalation och externbestrålning efter 1-365 dygn, eller som mäts för att kunna utvärdera en moder- eller dotternuklid som är relevant ur ett stråldosperspektiv men som är svår att mäta med gammaspektrometri generellt eller p.g.a. interferens(er) vid en given tidpunkt.

$t_{\text{decay}}=1$ d	$t_{\text{decay}}=3$ d	$t_{\text{decay}}=10$ d	$t_{\text{decay}}=30$ d	$t_{\text{decay}}=100$ d	$t_{\text{decay}}=365$ d
Sr-91	Y-91	Y-91	Y-91	Y-91	Y-91
Ba-140	Ba-140	Ba-140	Ba-140	Ba-140	Ce-141
Ce-141	Ce-141	Ce-141	Ce-141	Ce-141	Ce-144
Ce-143	Ce-143	Ce-143	Ce-144	Ce-144	Cs-137
Ce-144	Ce-144	Ce-144	Cs-137	Cs-137	Nb-95
I-131	I-131	Cs-137	I-131	I-131	Pr-144
I-132	I-132	I-131	La-140	La-140	Ru-103
I-133	I-133	I-132	Nb-95	Nb-95	Ru-106
I-135	La-140	La-140	Nd-147	Nd-147	Sb-125
Mo-99	Mo-99	Mo-99	Pr-144	Pr-144	Zr-95
Nb-97	Nb-97	Nb-95	Ru-103	Ru-103	
Nb-97m	Nb-97m	Nd-147	Ru-106	Ru-106	
Nd-147	Nd-147	Pm-149	Zr-95	Zr-95	
Pm-149	Pm-149	Ru-103			
Ru-103	Ru-103	Ru-106			
Sb-128	Sb-127	Sb-127			
Te-131m	Tc-99m	Tc-99m			
Te-132	Te-129m	Te-129m			
Y-91	Te-131m	Te-132			
Y-91m	Te-132	Zr-95			
Y-93	Zr-95	Pr-144			
Zr-97	Zr-97	Te-129			
Xe-135	Xe-135				
Y-92	Pr-144				
Pr-144					

I tabellen ovan återfinns exempelvis ^{144}Pr vid tidpunkterna 1, 3 och 10 d trots att den vid dessa tidpunkter inte bidrar signifikant till stråldosen. Anledningen till detta är att det inte gick att utvärdera ^{144}Ce vid dessa tidpunkter. Samma sak gäller för ^{129}Te , som kan mätas för att aktivitetsbestämma $^{129\text{m}}\text{Te}$ då jämvikt ställt in sig.

3.3 Radionuklidbibliotek

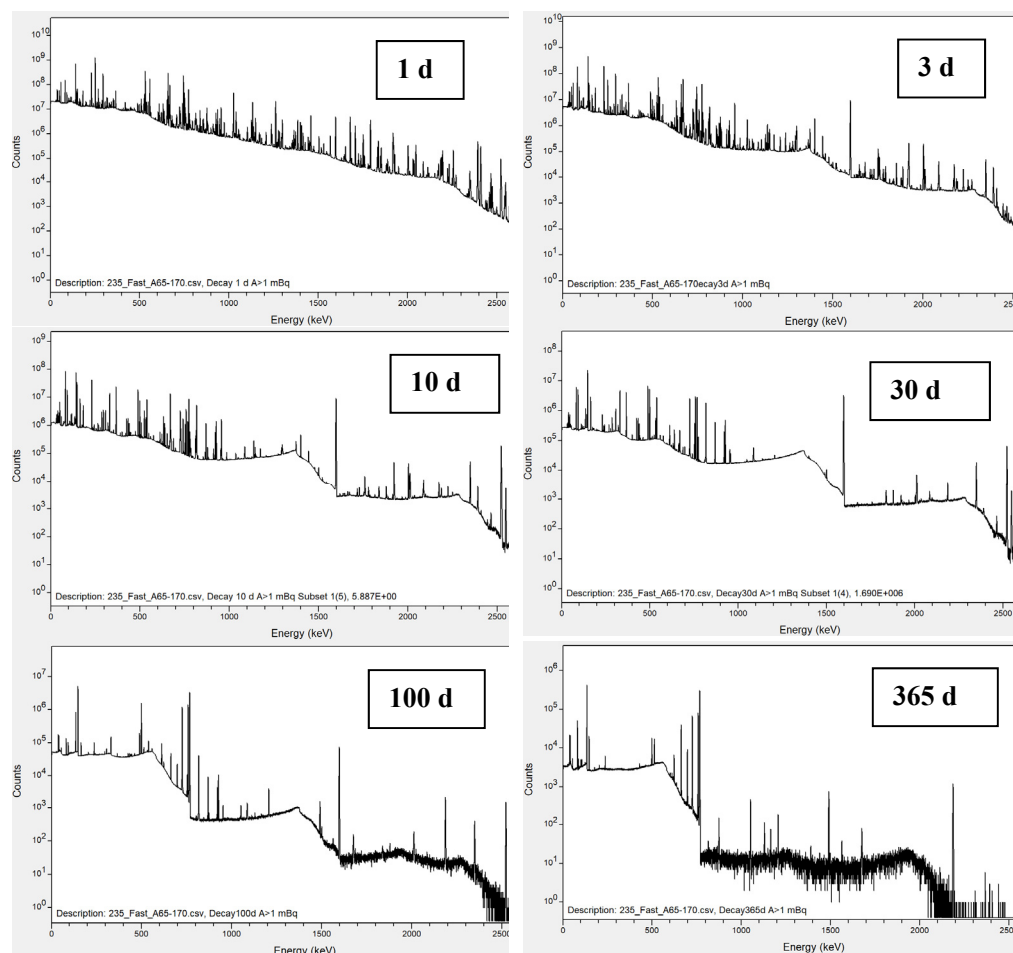
Baserat på de stråldosbidragande gammastrålande radionukliderna gjordes ett radionuklidbibliotek i Gammavision. Databasen som användes för detta var PC_NUDAT.mdb i Nuclide Navigator (Ortec, USA). Fysikaliska data kontrollerades inte mot någon annan databas, men erfarenheten är att Pc Nudat generellt är en bra källa till data [Kin 1996]. Radionuklidbiblioteket återfinns i bilaga A. I biblioteket återfinns även några radionuklider som inte bidrar signifikant till stråldosen men som finns för att Gammavision ska kunna genomföra korrekationer p.g.a. interferenser. I övrigt har förändringar av biblioteket varit minimalt.

3.4 Utvärderingsinställningar

Standardinställningar användes i *Sample Description File* i Gammavision bortsett *Background type* där inställningen sattes till AUTO. De tre utvärderingsmotorerna WAN32, ENV32 och NPP32 fungerar på lite olika sätt [Gam 2017]. Därför testades alla tre. Ingen sönderfallskorrektion tillämpades, utan aktiviteterna utvärderades vid tidpunkten för start av mätning. Sönderfallskorrektion till en referenstidpunkt ska användas med försiktighet eftersom alla radioaktiva jämvikter inte hunnit ställa in sig vid de relativt korta avklingningstiderna som tillämpats i det här arbetet.

4 Resultat och diskussion

Det här arbetet ska ses som ett första steg för att bygga upp en förmåga att utvärdera gammaspektra med en högre komplexitet. Det ska inte ses som en färdig förmåga eftersom spektrum som testats inte innehåller alla spektrala komponenter man kan förvänta sig. Tidigare nämndes att det finns ett antal begränsningar i simuleringsfunktionen i Nucleonica, se 2.2.1, vilka bör beaktas för mätningar i ett verkligt fall. Vidare har, som också nämnts tidigare, målsättningen inte varit att aktivitetsbestämma alla gammastrålande radionuklider som ger bidrag till toppar i spektrum vid varje tidpunkt, utan enbart de som ger dominerande stråldosbidrag. Spektra vid de sex olika tidpunkterna visas i figur 5.



Figur 5. Simulerade spektra vid de olika tidpunkterna.

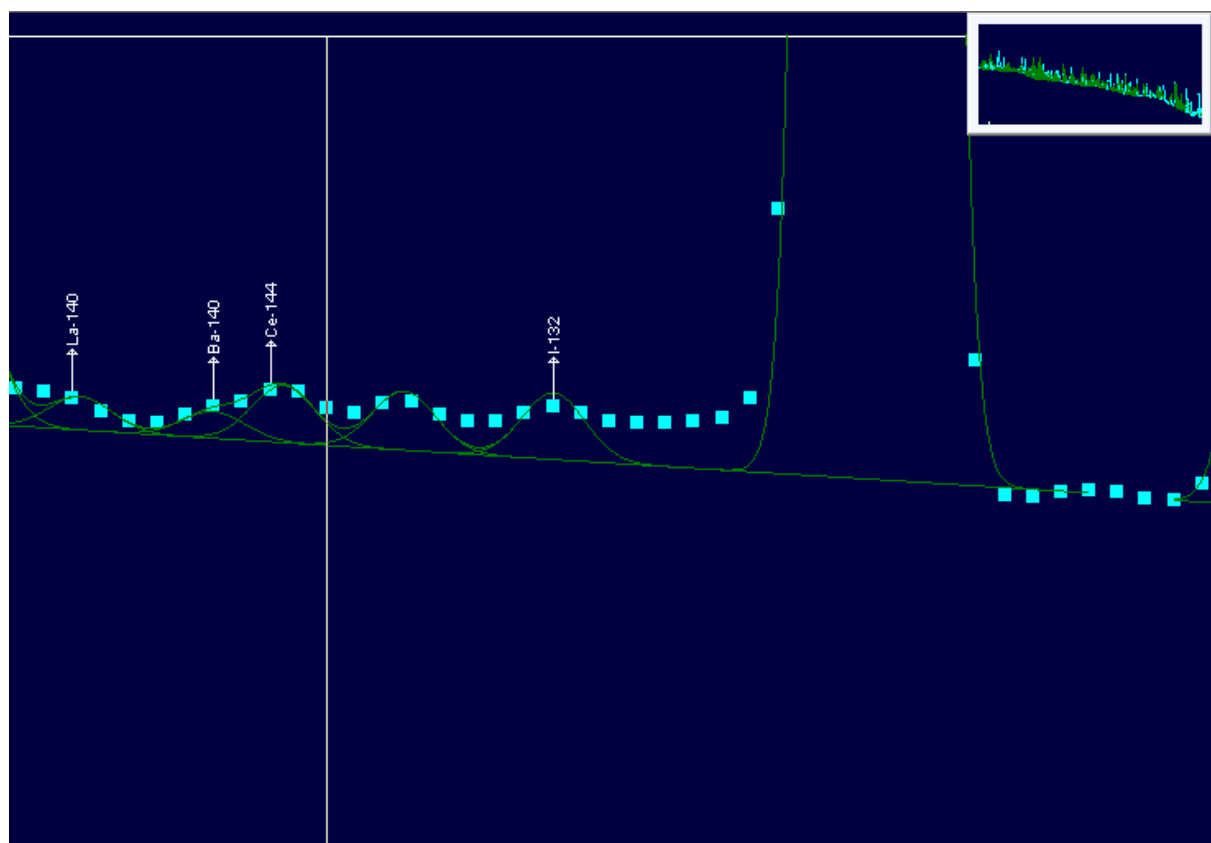
4.1 Analys av identifierade utvärderingsproblem

De gammastrålande radionuklider som inte klarade kriteriet för maximal relativ avvikelse, eller där programvaran inte gav någon aktivitet vid utvärderingen var:

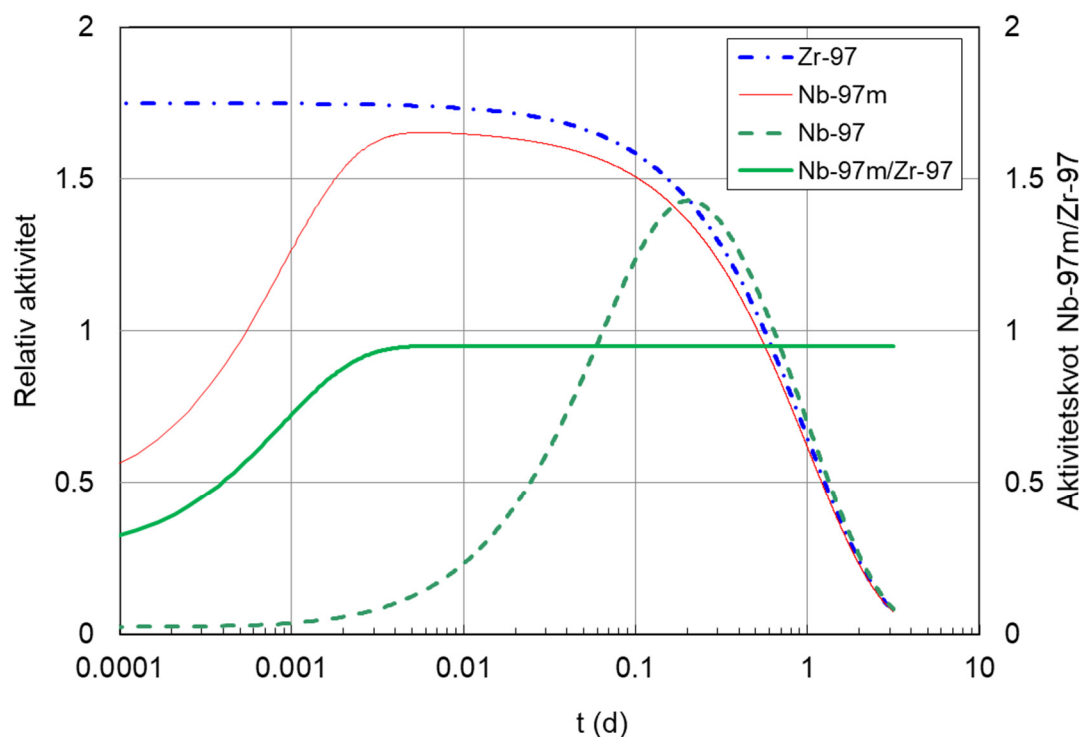
- ^{144}Ce efter 1 och 3 dygn. Dock kan man efter 3 dygn istället mäta ^{144}Pr , dotternukliden till ^{144}Ce , som kommer vara i radioaktiv jämvikt. I källan efter snabbfission av ^{235}U är aktivitetskvoten $^{144}\text{Pr}/^{144}\text{Ce}$ i princip ett (1) redan efter 0,1 dygn. Orsaken till att Gammavision inte korrekt kunde aktivitetsbestämma ^{144}Ce efter 1 och 3 dygn berodde på att det fanns en stor topp med högre energi, i huvudsak $^{99\text{m}}\text{Tc}$ vid 140,5 keV, som genom Compton-spridning (*small angle scattering* [Toi 2018]) orsakar ett steg nedanför den stora toppen. Då Gammavision enbart kan anpassa linjära bakgrunder kan det uppstå problem vid utvärdering av en topp strax nedanför den stora toppen, se figur 6.

- ^{91}Y efter 1 och 3 dygn. ^{91}Y emitterar enbart en mätbar gammafoton med energin 1205 keV som har ett fotonutbyte på 0,3 %. Dess bidrag i toppen blir då litet vid sidan av större bidrag från andra radionuklider vid samma energi ($^{131\text{m}}\text{Te}$ efter 3 dygn och $^{131\text{m}}\text{Te}$ plus ^{93}Y efter 1 dygn).
- $^{97\text{m}}\text{Nd}$ efter 1 och 3 dygn. Denna radionuklid kan dock aktivitetsbestämmas *via* modern ^{97}Zr (jämvikt). Aktivitetskvoten vid jämvikt är 0,95, vilket har ställt in sig redan före 0,01 dygn, se figur 7.
- $^{129\text{m}}\text{Te}$ efter 3 och 10 dygn. Efter 3 dygn är stråldosbidraget från $^{129\text{m}}\text{Te}$ dock litet, < 1 % *via* inhalation. Efter 10 dygn kan aktiviteten av $^{129\text{m}}\text{Te}$ bestämmas via dottern ^{129}Te som kommer vara i radioaktiv jämvikt. Hänsyn måste tas till att endast 63 % av sönderfallen av $^{129\text{m}}\text{Te}$ går till ^{129}Te [Lar 2022], dvs. aktiviteten av ^{129}Te ska multipliceras med $1/0,630 = 1,59$ för att erhålla aktiviteten av $^{129\text{m}}\text{Te}$, se figur 8.
- ^{106}Ru (*via* ^{106}Rh) efter 10 och 30 d. Bidraget till toppen vid 622 keV från ^{106}Rh är bara ca 3,5% efter 10 d. Det dominerande bidraget till toppen kommer vid den tidpunkten från ^{132}I .

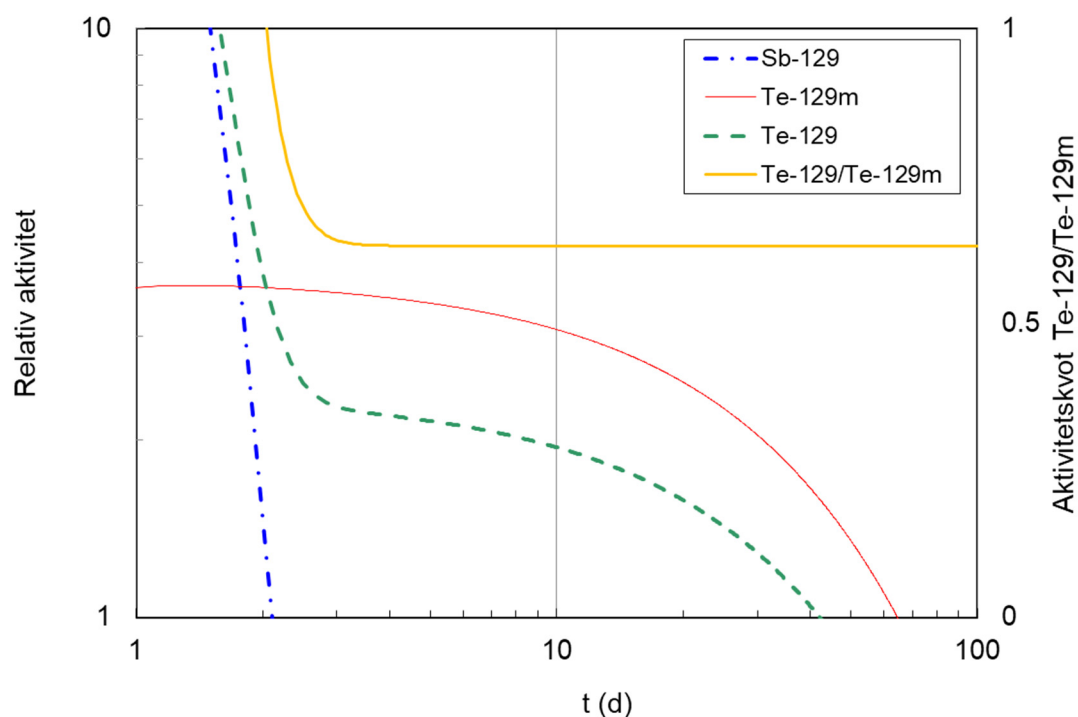
Efter 100 och 365 dygn kunde alla stråldosrelevanta gammastrålande radionuklider aktivitetsbestämmas.



Figur 6. Problemet att utvärdera ^{144}Ce efter 1 dygn orsakat av Gammavisions begränsning i hur bakgrunden kan anpassas. Den stora toppen har sitt ursprung från i huvudsak $^{99\text{m}}\text{Tc}$ vid 140,5 keV. Begränsning i hur bakgrunden kan anpassas resulterar här i en överskattad aktivitet.



Figur 7. Dynamiken i isobaren 97. Figuren visar att ^{97m}Nb är i jämvikt med ^{97}Zr med jämviktsaktivitetskvoten 0,95 redan innan 0,01 dygn.



Figur 8. Dynamiken i isobaren 129. Figuren visar att ^{129}Te är i jämvikt med ^{129m}Te med jämviktsaktivitetskvoten 0,63 efter drygt 3 dygn.

Sammanfattningsvis var det svårt att i det här arbetet erhålla en korrekt aktivitetsbestämning av ^{144}Ce efter 1 dygn; ^{91}Y efter 1, 3 och 10 dygn; ^{129m}Te efter 3 dygn;

och ^{106}Ru efter 10 och 30 dygn. Av dessa bidrar ^{91}Y mest till stråldos², ca 3 % via inhalation efter 1 d, ca 6 % *via* föda eller inhalation efter 3 dygn, och ca 10 % *via* föda eller inhalation efter 10 dygn. $^{129\text{m}}\text{Te}$ bidrar med < 1 % *via* inhalation efter 3 dygn, och ^{106}Ru med ca 1 % *via* inhalation efter 10 dygn och med ca 4 % *via* föda efter 30 dygn. Sammantaget kan alltså > 90 % av stråldosbidraget från gammastrålande radionuklider aktivitetsbestämmas i spektra innehållande fissionsprodukter efter de olika tidpunkterna. Återigen ska det påpekas att de testade spektrumen inte innehöll alla spektrala komponenter som man kan förvänta sig i ett verkligt fall.

4.2 Utvärderingsmotor i Gammavision

Utvärderingar med Gammavision genomfördes med de tre utvärderingsmotorerna WAN32, ENV32 och NPP32 vilka analyserar ett spektrum med något olika ansatser [Gam 2017]. I det här arbetet visade det sig att NPP32 gav flest accepterade resultat. Det går dock inte att säga att den skulle vara den bästa utvärderingsmotorn i ett verkligt fall.

4.3 Metod för verkliga mätningar

För att minska problemen i mätningar av prover från ett verkligt nedfall bör toppar från sekundära processer minimeras. Exempel på sekundära processer som kan ge bidrag till toppar i spektrum är koincidanssummation och slumpmässig summation. Om dessa processer faktiskt ger interferenser i utvärderingstopparna för de radionuklider som behöver aktivitetsbestämmas är inte utrett i det här arbetet eftersom simuleringsrutinen inte hanterar de processerna. Vidare har enbart fissionsprodukter beaktats. I ett verkligt fall kommer även aktiveringsprodukter att ge bidrag till ett spektrum. Det måste då utredas om dessa kommer att orsaka interferenser för de fissionsprodukter som det är viktigt att aktivitetsbestämma.

² Med stråldosbidrag här avses relativt gammastrålande radionuklider, dvs. ”rena” bestrålare ingår inte i beräkning av relativa bidrag.

5 Fortsatt arbete

I ett fortsatt arbete rekommenderas att inverkan av aktiveringsprodukter och eventuell koincidanssummation samt slumpmässig summation inkluderas. Vidare hade det varit intressant att mäta och utvärdera spektra från verklig fission av ^{235}U . Aviv *et al.* [Avi 2020] jämförde simulerade spektra vid olika tidpunkter, 1-31 dygn, efter fission av ^{235}U med mätningar på reaktorbestrålad ^{235}U . Resultatet av deras studie visade på god överensstämmelse mellan simulerade och verkliga spektra. De tillämpade dock andra metoder för generering av källor vid olika tidpunkter och därefter generering av spektra vid de olika tidpunkterna. Vidare skulle ett övningsmaterial kunna tas fram efter att åtminstone inverkan av aktiveringsprodukter inkluderats. Ett sådant övningsmaterial skulle kunna innefatta spektrum vid specifika tidpunkter, och eventuellt platser, radionuklidsammansättningen vid de olika tidpunkterna samt ett förslag till radionuklidbibliotek för att kunna öva på spektrumanalys.

6 Referenser

- Avi 2020 O. Aviv, A. Lipshat, S. Vaintraub, T. Makmal, *A code for simulating a high-resolution gamma-ray spectrum of a fission sample*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A968, 2020 (Artikelnummer 163949)
- Gam 2017 GammaVision. Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulator for Microsoft Windows 7, 8.1, and 10 Professional. Manual
- JEFF *Joint Evaluated Fission and Fusion (JEFF) nuclear data library*, <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/>
- Kin 1996 R.R. Kinsey, C.L. Dunford, J.K. Tuli, T.W. Burrows, *The NUDAT/PCNUDAT program for nuclear data*, USA, 1996. The NUDAT/PCNUDAT program for nuclear data (Conference) | OSTI.GOV
- Lar 2022 <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>
- Lid 2022 K. Lidström, *Relativa dosbidrag till människa från fissionsprodukter av ²³⁵U*, FOI-rapport under författande
- Nuc 2022 Nucleonica.com
- Toi 2018 H. Toivonen, H. Ramebäck, M. Granström, S. Ihantola, G. Jönsson, K. Ilkov, M. Kilkki, *Activity estimation of shielded or hidden radionuclides in emergency conditions: Impact of environmental conditions*, NKS-414, 2018

Bilaga A: Radionuklidbibliotek

Radionuklider med gammaenergier och fotonutbyten i biblioteket som användes för utvärdering.

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
91.11	27.9	Nd147
91.70	0.006	Pm151
92.97	0.034	Pm151
95.00	0.003947	Te131m
96.40	0.00592	Te131m
98.05	0.36	Pm151
98.30	0.014	Te131m
98.74	0.059	Pm151
99.96	0.04	Ce144
100.00	0.075	Te131m
100.02	2.54	Pm151
100.60	0.012	Pm151
101.60	0.174	Te131m
101.93	1.28	Pm151
102.06	8.1	Te131m
102.70	0.032	Pm151
102.80	0.4	Sb128
103.30	0.047	Te131m
104.84	3.5	Pm151
105.00	0.028	Te131m
105.31	21.2	Eu155
105.50	0.147	Te129m
107.60	0.0002	Eu155
109.40	0.036	Te131m
109.40	0.062	Te131
109.42	0.219	La140
109.56	0.086	Pm151
109.68	0.21	Cs136
111.60	0.065	Zr97
111.76	1.74	Te132
111.90	0.032	Te131m
112.80	0.013	I135
113.10	0.009675	Pm151
113.20	0.007	I135
113.50	0.012	Te131m
113.51	0.0161	Ba140
116.30	1.96	Te132
116.95	0.284	Sb125
118.40	0.6	Sb128
118.50	0.073	Sr91
118.84	0.061	Ba140
120.48	0.4	Nd147
121.77	0.09	Pm151
123.70	0.003947	Te131m
125.20	0.009	Te131m
125.20	0.006	Pm151
125.20	0.01215	Pm151
126.10	0.006	Te131m
126.80	0.002925	Pm151
127.40	0.024	Te131m
130.43	0.068	Pm151
130.50	0.071	Te131m
131.12	0.467	La140

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
132.20	0.005	Te131m
132.69	0.202	Ba140
133.51	11.09	Ce144
134.22	0.02025	Pm151
134.86	0.72	Te131m
134.90	0.00405	Pm151
136.70	0.04	I132
137.60	0.08	Te131m
138.38	0.041	Pm151
138.70	0.007857	Eu156
138.90	0.027	Pm151
139.28	0.5	Pm151
139.74	0.077	Ce143
140.51	89.06	Tc99m
141.20	0.028	Te131
141.70	0.01	Pm151
142.63	0.0187	Tc99m
143.17	0.214	Pm151
143.20	0.01	Pm151
145.44	48.2	Ce141
146.06	0.052	Eu155
146.20	0.017	Pm151
147.40	0.237	I132
147.53	0.153	Pm151
148.50	0.054	Pm151
149.30	0.079	Te131m
149.71	5.2	Te131m
149.72	68.8	Te131
150.10	0.009	Pm151
150.40	0.03	I133
151.10	0.17	Te131
151.20	0.08	Te131m
152.60	0.5	Sb128
153.25	5.75	Cs136
154.30	0.14	Sb127
155.50	0.025	Pm151
155.90	0.039	Te131m
156.18	0.149	Pm151
158.78	0.01892	Mo99
159.66	0.13	Te131m
160.20	0.01028	Eu156
162.37	0.01189	Mo99
162.65	0.01	I135
162.66	6.22	Ba140
162.94	0.88	Pm151
163.58	1.55	Pm151
163.92	3.39	Cs136
165.74	0.032	I135
166.58	0.37	Cs136
167.75	8.3	Pm151
168.39	0.92	Pm151
169.70	0.032	Te131m
172.00	0.012	Te131m
172.72	0.198	Sb125
173.54	0.127	La140
176.31	6.82	Sb125
176.52	0.86	Pm151
176.60	10	Cs136

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
176.97	0.078	I133
177.16	3.8	Pm151
177.20	0.067	Te131m
177.21	0.27	I131
178.00	0.049	Nb97
178.84	0.029	Sb125
181.07	5.99	Mo99
182.25	0.75	Te131m
182.25	0.85	Te131m
182.90	0.032	Zr97
183.11	0.158	Te131m
183.60	0.138	I132
184.49	0.0237	I135
186.59	0.18	Pm151
187.29	0.36	Cs136
188.13	0.217	Te131m
189.76	0.51	Te131m
190.16	0.01649	Eu156
190.52	0.118	Te131m
192.90	0.007425	Pm151
195.50	0.027	Pm151
196.64	0.204	Nd147
197.19	0.033	I135
198.65	0.01362	Sb125
199.22	0.74	Eu156
200.63	7.7	Te131m
201.96	0.88	Pm151
202.50	0.029	Zr97
203.40	0.02	Te131m
203.70	0.00435	I133
204.12	0.028	Nb95
204.12	2.3	Nb95m
204.14	0.326	Sb125
204.17	0.1131	Pm151
204.40	1	Sb128
205.70	0.009	Pm151
206.70	0.036	Pm151
207.00	0.007425	Pm151
207.50	0.039	Te131m
208.08	0.241	Sb125
208.28	0.001457	Pm149
208.96	0.18	Te129
209.00	1.73	Pm151
210.30	0.016	Te131m
210.66	0.001309	Te129
211.90	0.012	Te131m
213.98	0.434	Te131m
214.80	1	Sb128
215.30	0.009	Pm151
215.70	0.013	Eu156
218.90	0.168	Zr97
220.50	1.76	I135
221.57	0.033	Te131
227.18	0.34	Pm151
227.30	1.5	Sb128
227.70	0.016	Te131m
227.81	0.05	Pm151
227.89	0.13	Sb125

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
228.16	88	Te132
229.01	0.023	Pm151
229.72	0.2428	I135
230.65	0.197	Te131m
231.55	2.05	Ce143
232.30	0.095	Te131m
232.43	1.03	Pm151
232.70	0.088	Pm151
233.50	0.08	Cs136
234.30	0.03	I132
235.00	0.016	Te131m
235.00	0.3	Sb128
235.69	0.294	Zr95
236.20	0.095	Pm151
236.60	0.16	Pm151
236.70	0.19	Pm151
237.10	0.52	Pm151
238.40	0.049	Nb97
240.09	3.8	Pm151
240.93	7.74	Te131m
241.88	0.01802	Ru103
241.93	0.414	La140
242.29	0.002547	Mo99
244.70	0.009	Eu156
245.95	0.035	I133
247.10	0.018	Pm151
247.50	0.029	I135
247.80	0.029	Pm151
249.03	0.003882	Mo99
249.70	0.6	Sb128
249.74	90	Xe135
250.50	0.009	Pm151
250.62	0.38	Te129
250.80	0.011	I132
252.40	8.2	Sb127
253.17	0.663	Te131m
254.17	1.14	Zr97
254.28	0.169	Pm151
254.57	0.00527	Pm149
254.74	0.023	I135
255.10	0.01	I132
255.10	0.237	I132
255.44	0.316	Te131m
258.11	0.56	Pm151
261.20	0.45	Sr91
261.40	0.016	Te131m
261.40	0.011	Pm151
262.70	0.359	I133
262.90	1.28	I132
263.23	0.00961	Pm149
264.26	0.185	I135
266.54	0.466	La140
266.90	7.3	Y93
267.17	0.117	I133
267.20	0.016	Te131m
267.50	0.004	Te131
269.20	0.06	Te131m
269.20	0.06	Te131m

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
270.37	0.00462	Te129
270.72	0.068	Pm151
272.40	0.23	Zr97
272.60	0.26	Sr91
273.00	0.071	Y93
273.65	11.1	Cs136
274.68	0.003	Te131
274.70	1.03	Sr91
275.21	6.8	Pm151
275.37	0.8	Nd147
277.09	0.02883	Pm149
277.62	0.061	Pm151
278.17	0.098	Te131
278.20	0.008	Pm151
278.30	0.6	Sb128
278.40	0.025	I132
278.43	0.57	Te129
278.56	1.82	Te131m
280.09	0.232	Pm151
280.17	0.017	Te131
280.40	0.64	Sb127
281.24	0.00744	Pm149
281.26	0.165	Te129
281.40	0.036	Te131m
281.40	0.00776	Eu156
281.70	0.00154	Te129
283.20	0.39	Te131m
284.30	6.14	I131
284.90	0.71	I132
285.00	0.001125	Pm151
285.95	3.1	Pm149
287.00	0.075	Y93
288.45	3.12	I135
290.27	0.306	I135
290.30	0.079	Te131m
290.49	0.00873	Eu156
290.75	0.83	Pm151
290.80	1.94	Sb127
292.40	0.011	Pm151
293.27	42.8	Ce143
294.75	0.002408	Te131
294.80	0.08	Zr97
294.80	0.014	Pm151
294.98	0.303	Ru103
295.20	0.016	Pm151
296.80	0.051	Te131m
297.09	0.007	Te131
297.09	0.043	Te131
297.20	0.066	Zr97
297.80	0.038	Pm151
298.60	0.006	Pm151
299.94	0.039	Te131
301.80	0.014	Pm151
302.00	0.01	I132
302.40	0.03	Cs136
302.50	0.027	Pm151
302.70	0.039	Te131m
302.80	0.025	Pm151

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
303.90	0.039	Te131m
304.85	4.29	Ba140
304.91	0.032	I135
305.10	0.028	Zr97
305.22	0.002573	Pm149
305.83	0.096	I135
306.10	5.1	Rh105
306.70	0.06	I132
306.70	0.06	I132
306.74	0.239	Pm151
306.90	0.025	La140
308.97	0.081	Pm151
309.47	0.38	Te131m
310.00	0.25	Sb127
310.10	0.05	I132
310.40	0.05	I132
310.80	0.017	Pm151
310.80	0.036	Pm151
314.10	61	Sb128
314.92	0.063	Pm151
315.10	0.007875	Pm151
315.50	0.02	Cs136
316.70	0.128	I132
317.30	0.06	Eu156
317.70	3	Sb128
317.77	0.019	Ru103
318.90	19.1	Rh105
319.41	1.95	Nd147
319.91	0.5	Cs136
321.03	0.411	Sb125
321.87	0.097	Pm151
322.30	3	Sb128
323.70	0.016	Te131m
323.94	1.22	Pm151
323.95	0.001519	Pm149
325.20	0.015	Pm151
325.79	0.274	I131
325.80	0.106	Pm151
326.00	0.002312	I135
327.53	0.00372	Pm149
328.76	20.3	La140
329.00	0.014	Pm151
329.75	0.221	Pm151
330.43	0.143	Zr97
331.20	0.032	Te131m
333.60	0.038	I135
334.27	9.7	Te131m
335.44	0.138	Te131m
335.69	0.01019	Eu156
340.08	22.5	Pm151
340.55	42.2	Cs136
341.00	0.074	Pm151
341.50	0.044	Y93
342.54	0.00847	Te129
342.88	0.049	Te129
342.92	0.39	Te131m
342.95	0.702	Te131
343.70	0.089	I132

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
344.90	2.12	Pm151
345.43	0.104	I133
345.60	0.014	Te131
345.90	0.1	Te131m
346.10	0.038	Pm151
348.27	0.01358	Eu156
348.80	0.009225	Pm151
349.81	0.142	Pm151
350.62	3.23	Ce143
350.71	0.001488	Pm149
351.30	0.213	Te131m
351.48	0.023	Te131
351.80	0.079	I132
352.30	0.016	Pm151
353.32	0.106	Pm151
353.50	0.08	Te131m
353.58	0.019	Te131
354.20	0.01455	Eu156
354.70	0.233	Te131m
355.40	2.09	Zr97
356.90	0.008	Pm151
357.00	1.5	Sb128
357.40	0.02	Te131m
358.40	0.015	Pm151
359.10	0.05	Sr91
359.57	0.001488	Pm149
360.90	0.011	Pm151
361.09	0.11	I133
361.85	0.188	I135
362.30	0.08	Te131m
363.34	0.49	I132
364.49	81.7	I131
366.10	1.5	Sb128
366.42	1.191	Mo99
369.00	0.016	Pm151
371.29	0.025	Ce143
372.05	0.01	I133
374.20	0.022	Pm151
375.80	0.012	Te131m
376.90	0.016	Pm151
377.80	0.02	Te131m
377.80	0.02	Te131m
378.50	0.01	Pm151
379.30	0.02	Te131m
379.86	0.95	Pm151
379.90	0.147	Sr91
380.13	0.01043	Mo99
380.45	1.52	Sb125
381.20	0.02	Pm151
381.59	0.045	I133
383.90	0.21	Te131m
384.06	0.894	Te131
386.85	0.059	I133
387.50	0.008	Y93
387.90	0.17	I132
389.64	0.03638	Ce143
390.67	0.054	Pm151
391.70	0.003154	Mo99

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
391.80	0.92	Sb127
393.00	0.05	Sr91
395.63	0.043	Pm151
397.52	0.073	La140
398.15	0.87	Nd147
398.90	0.032	Pm151
400.42	0.245	Zr97
400.50	0.007	Pm151
402.36	0.007	Te131
403.03	0.234	I135
403.30	0.032	Te131m
403.30	0.007	Te131
404.30	1	Sb128
404.74	0.065	Pm151
407.03	0.187	Pm151
408.07	0.184	Sb125
408.20	0.06	Te131m
410.00	0.07	Zr97
410.27	0.001941	Mo99
410.48	0.14	Nd147
410.75	0.063	Pm151
411.49	0.01456	Mo99
412.10	3.7	Sb127
414.83	0.303	I135
415.70	0.022	Pm151
416.80	0.016	Pm151
416.80	0.47	I132
417.40	0.284	Te131m
417.60	0.154	I133
417.63	3.55	I135
420.65	0.056	Pm151
421.32	0.042	Te131
422.91	0.311	I133
423.72	3.15	Ba140
424.55	0.05	Pm151
425.60	0.01	Pm151
427.25	0.063	Pm151
427.88	29.6	Sb125
428.40	0.071	Ru106
429.10	0.016	Pm151
429.93	0.306	I135
431.80	0.47	I132
432.40	0.67	Te131m
432.49	2.9	La140
433.00	0.159	Ce143
433.74	0.558	I135
434.25	0.0202	Ru106
434.40	0.209	Eu156
437.58	1.929	Ba140
438.30	0.007	Te131
438.50	0.039	La140
438.87	0.04	I133
439.20	0.01265	Ru106
439.89	1.2	Nd147
440.85	1.51	Pm151
441.00	0.7	Sb127
443.55	0.302	Sb125
443.80	0.023	Pm151

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
443.80	0.345	Ru103
445.00	0.05	I132
445.10	4.17	Sb127
445.68	4	Pm151
445.70	1.5	Sb128
446.02	0.015	Ce143
446.20	0.6	I132
447.45	0.06	Ce143
448.70	0.02	Pm151
451.00	0.18	Sb127
451.40	0.29	Pm151
451.63	0.318	I135
452.20	0.014	Pm151
452.30	1.6	Te131m
452.32	18.2	Te131
454.40	0.014	Pm151
454.50	1.5	Sb128
455.84	0.001334	Mo99
456.00	0.11	Sb127
456.05	0.038	Pm151
457.50	0.0045	Pm151
457.60	0.008127	Mo99
459.50	1.5	Sb128
459.60	7.7	Te129
459.60	0.001217	Te129m
462.24	0.036	Pm151
462.92	1.85	Te131m
463.36	10.5	Sb125
463.80	0.009	Pm151
467.20	0.011	Pm151
468.16	0.32	Te131m
469.63	0.002669	Mo99
469.70	0.015	Te131
470.50	0.018	Pm151
471.30	0.018	Pm151
471.40	0.014	Pm151
472.70	0.145	Eu156
473.00	24.7	Sb127
473.50	0.07	Zr97
473.60	0.17	I132
473.80	0.007	Pm151
477.75	0.095	Pm151
478.20	0.17	I132
486.50	0.08	Sr91
487.02	45.5	La140
487.10	0.017	Pm151
487.39	1.42	Te129
488.00	0.23	I132
488.00	0.23	I132
489.24	0.153	Nd147
490.00	0.08	Cs136
490.26	0.126	Pm151
490.34	0.16	Eu156
490.37	2.16	Ce143
490.53	0.001092	Mo99
491.93	0.001155	Te129
492.65	0.08	Te131m
492.66	4.83	Te131

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
494.85	0.076	Te131
494.90	0.011	Pm151
494.90	0.015	Eu156
495.50	0.014	Pm151
496.23	0.034	Te131
497.08	91	Ru103
497.81	0.045	Ce143
498.88	0.066	Eu156
502.80	0.74	Sb127
503.00	0.36	I131
503.70	0.0045	Pm151
505.79	4.94	I132
506.70	0.043	Sr91
506.80	0.091	Te131m
507.19	0.97	Cs136
507.27	0.047	Pm151
507.64	5.03	Zr97
510.10	0.009	Pm151
510.53	1.83	I133
510.80	0.004	I133
513.41	0.55	Zr97
514.60	0.01138	Ru103
516.25	0.194	Pm151
520.80	0.033	Sr91
521.10	0.032	Pm151
522.40	0.04	I133
522.65	16	I132
524.80	0.138	Te131m
526.50	45	Sb128
526.56	80.5	Xe135m
528.79	0.057	Mo99
529.87	87	I133
530.70	0.107	Te131m
530.80	0.032	I135
531.02	13.1	Nd147
531.61	0.001488	Pm149
531.83	0.088	Te129
532.50	0.034	Pm151
533.90	0.077	Sr91
535.40	0.51	I132
535.90	0.01147	Pm149
537.26	24.39	Ba140
537.65	0.045	Pm151
537.73	0.036	I133
537.79	0.003275	Mo99
541.40	0.114	Te131m
543.30	2.8	Sb127
544.27	0.00248	Pm149
544.88	0.427	Te131
546.56	7.2	I135
546.70	0.039	Te131m
547.17	0.001612	Pm149
547.20	1.14	I132
549.25	0.049	Nb97
550.40	0.028	Te131
550.70	0.016	Pm151
551.50	0.003542	Te129
551.98	0.001386	Te129

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
554.20	0.016	Pm151
554.66	0.017	Eu156
555.57	94.9	Y91m
556.17	0.02	I133
556.65	0.12	Te129m
556.87	0.03167	Ce143
557.04	0.868	Ru103
558.00	0.028	Zr97
558.10	0.024	Te131m
558.37	0.01519	Pm149
559.70	0.089	I132
560.05	0.006083	Te129
561.88	0.013	Nb95
562.10	0.019	Pm151
565.00	0.353	Pm151
567.10	0.003	I133
567.33	0.103	Te131
568.36	0.0186	Pm149
571.08	0.002418	Pm149
572.50	0.052	Pm151
572.50	0.059	I132
572.70	0.043	Te131m
573.20	0.029	Pm151
574.90	0.031	Te131
574.97	0.117	Pm151
575.10	0.002925	Pm151
575.97	0.13	I135
579.80	0.079	Te131m
580.51	0.003154	Mo99
581.10	0.0045	Pm151
581.30	0.00097	Mo99
582.07	0.055	Nb95m
582.90	1	Sb128
583.10	0.026	Pm151
584.20	0.32	Sb127
584.90	0.00855	Pm151
585.90	0.047	Eu156
586.30	2.01	Te131m
587.20	0.267	Ce143
588.28	0.052	I135
590.88	0.069	Pm149
591.10	0.05	I132
591.10	0.05	I132
593.10	0.094	Sr91
593.60	0.01013	Pm151
594.30	1	Sb128
594.80	0.265	Nd147
597.00	0.051	Te131m
597.70	0.079	Pm151
598.00	0.009	Pm151
599.10	0.008	Pm151
599.47	2.08	Eu156
599.60	0.002062	Mo99
600.00	0.08	I132
600.00	0.08	I132
600.60	0.09	Zr97
600.60	17.9	Sb125
602.04	4.19	Te131

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
602.09	0.32	Te131m
602.37	1.38	Zr97
603.00	0.011	Pm151
603.00	1.7	Sb128
603.50	4.27	Sb127
604.00	0.0081	Pm151
605.55	0.117	Te131
605.90	0.01	Pm151
606.72	5.03	Sb125
609.25	0.047	Pm151
609.40	0.142	Te131m
609.80	0.039	I132
610.33	5.76	Ru103
612.02	0.107	Ru103
613.92	0.01488	Pm149
614.22	0.01198	Ce143
616.22	0.75	Ru106
616.90	0.038	I135
617.97	0.544	I133
618.12	0.037	La140
620.03	0.002305	Mo99
620.10	1.77	Sr91
620.60	0.072	Pm151
620.90	0.39	I132
621.20	1.58	I132
621.77	0.02584	Mo99
621.93	9.93	Ru106
624.00	0.064	Sb127
624.34	0.097	Te129
624.70	0.001127	Pr144
626.00	0.022	Eu156
626.80	0.043	Sr91
628.70	31	Sb128
630.19	13.3	I132
631.30	0.55	Sr91
632.79	0.039	Eu156
635.95	11.3	Sb125
636.20	1.42	Pm151
636.20	36	Sb128
636.50	0.0093	Pm149
636.99	7.17	I131
637.30	0.016	Te131m
637.80	0.42	Sb127
642.10	0.047	Sb125
642.20	0.02	I132
642.72	0.217	I131
646.29	6.3	Eu156
648.76	0.057	I133
649.85	0.46	I135
650.50	2.57	I132
652.30	0.35	Sb127
652.30	3	Sr91
652.90	8	Sr91
653.00	0.37	Sr91
654.20	17	Sb128
654.25	0.241	Pm151
654.26	1.527	Te131
655.60	0.011	Pm151

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
656.09	0.075	I135
657.20	0.032	Te131m
657.94	98.23	Nb97
660.00	0.014	Eu156
661.66	85.1	Cs137
663.50	0.095	Pm151
664.57	5.69	Ce143
665.05	4.42	Te131m
665.80	0.003	Eu156
667.10	2.5	Sb128
667.50	0.71	Sb127
667.72	98.7	I132
668.50	0.003375	Pm151
668.70	0.36	Pm151
669.20	0.29	Pm151
669.80	4.6	I132
670.10	0.043	I133
671.28	0.9	Pm151
671.40	3.5	I132
671.45	1.79	Sb125
671.84	0.025	Te129m
678.30	0.045	Pm151
678.70	0.022	I133
679.22	0.055	I135
680.20	0.66	Y93
680.25	0.65	I133
680.25	0.01102	Ru106
681.90	0.032	Te131m
682.30	0.53	Sb127
683.90	3	Sb128
684.40	0.08	I132
684.60	0.023	I135
685.70	35.3	Sb127
685.90	0.158	Te131m
685.90	0.81	Nd147
687.80	0.039	I132
689.60	0.000425	Mo99
690.13	0.13	I135
690.52	0.183	Zr97
692.90	2	Sb128
695.62	0.41	Te131m
695.88	3	Te129m
696.19	0.179	Te131
696.51	1.342	Pr144
698.50	3.49	Sb127
699.00	0.019	Pm151
699.20	0.101	Zr97
701.10	0.001309	Te129
701.70	0.025	Te129m
702.50	0.399	Te131m
702.70	0.008	Te131
703.76	1.01	Zr97
704.24	0.34	Pm151
705.52	0.005148	Te129m
706.40	0.02	I132
706.58	1.51	I133
707.10	0.065	Eu156
707.40	0.032	Zr97

E_{γ} (keV)	I_{γ} (%)	Radionuklid
707.92	0.66	I135
709.25	0.137	Pm151
709.86	0.88	Eu156
712.00	0.095	Pm151
713.10	1.46	Te131m
713.40	0.009	Pm151
714.40	0.017	Y93
717.72	4.1	Pm151
719.00	0.011	Pm151
719.53	0.09	Nb97
721.93	5.39	Ce143
722.20	1.8	Sb127
722.91	1.77	I131
723.47	5.4	Eu156
724.20	44.17	Zr95
727.00	0.468	Te131
727.00	0.00675	Pm151
727.00	2.2	I132
727.20	3.2	I132
727.60	4	Sb128
728.40	1.6	I132
729.57	0.001232	Te129
729.57	0.7	Te129m
732.62	0.001309	Te129
733.00	0.02	Cs136
736.12	0.47	Pm151
738.80	0.067	Te131m
739.50	12.13	Mo99
740.80	0.023	Pm151
740.96	0.037	Te129
740.96	0.027	Te129m
743.30	100	Sb128
743.36	93.06	Zr97
743.40	97.9	Nb97m
744.20	1.62	Te131m
744.40	0.008	Te131
749.00	0.016	Te131m
749.80	23.6	Sr91
751.64	4.33	La140
752.82	1.28	Pm151
754.00	100	Sb128
755.00	0.00675	Pm151
756.73	54.46	Zr95
758.50	0.009	Pm151
761.40	0.57	Sr91
761.77	0.0004	Mo99
763.70	0.07	Sb127
765.81	99.81	Nb95
768.38	0.46	I133
768.56	0.087	Eu156
768.77	0.004235	Te129
768.77	0.002808	Te129m
769.10	0.106	Pm151
771.70	0.02	I132
772.00	0.24	Zr97
772.60	75.6	I32
772.76	0.9	Pm151
773.70	1.5	Sb128

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
774.10	0.55	Te131m
775.00	0.1861	Zr97
777.92	4.26	Mo99
778.00	0.026	Eu156
780.00	1.18	I132
782.49	7.93	Te131m
783.70	14.5	Sb127
784.14	0.049	Eu156
784.40	0.38	I132
785.10	0.221	Pm151
785.48	0.153	I135
786.16	0.016	Nb95m
789.59	0.05	I133
791.07	0.01327	Ce143
791.20	0.099	I132
792.80	0.00225	Pm151
793.60	0.063	Sr91
793.75	14.1	Te131m
795.50	0.023	I135
795.74	0.059	Pm151
797.71	0.17	I135
797.73	0.109	Eu156
801.60	0.02	Te131m
802.10	0.192	Te129
802.70	1.2	Sb128
804.52	0.61	Zr97
804.60	0.022	Te129
805.57	0.014	Te131
805.60	0.2792	Zr97
806.34	0.02868	Ce143
807.20	0.046	I135
807.90	0.56	Pm151
808.11	0.01643	Pm149
809.50	2.6	I132
809.98	0.03124	Ce143
811.77	9.7	Eu156
811.80	0.068	Pm151
812.00	5.5	I132
813.60	13	Sb128
815.77	23.28	La140
817.00	0.39	Sb127
817.04	0.09	Te129m
817.70	0.09	Pm151
817.70	0.17	Pm151
818.51	99.7	Cs136
820.36	0.169	Eu156
820.51	0.155	I133
820.60	0.21	Sb127
820.80	0.16	Sr91
822.45	0.034	Pm151
822.78	6.24	Te131m
822.97	0.133	Mo99
823.70	0.067	Sr91
825.00	0.028	Te131
829.79	0.239	Zr97
829.93	0.006391	Te129
830.53	0.033	Pm149
831.30	0.025	I132

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
833.28	0.045	Te129
833.40	0.033	Pm149
835.55	0.001085	Pm149
835.80	1	Sb128
836.52	0.081	Eu156
836.80	6.73	I135
839.00	0.03	Eu156
841.16	0.208	Eu156
841.99	0.2	Te131
844.81	0.034	Te129m
844.90	0.16	Te131m
845.80	2.5	Sb128
847.90	0.017	I132
848.65	0.281	Pm151
848.90	0.039	Te131m
852.21	0.39	Te131m
852.21	0.044	Te131
853.83	0.096	Te131
854.89	0.356	Zr97
856.05	0.63	Te131m
856.08	0.1131	Te131
856.20	0.006525	Pm151
856.28	1.24	I133
857.46	0.045	Nb97
858.36	0.205	Eu156
859.46	0.109	Pm149
859.80	0.008325	Pm151
860.80	0.4	Sb128
861.20	0.007	Mo99
863.00	0.56	I132
865.10	0.2	Te131m
865.80	0.188	Eu156
867.01	1.33	Eu156
867.10	0.002925	Pm151
867.85	5.5	La140
872.30	0.103	Te131m
872.39	0.04	Eu156
873.49	0.439	Ru106
875.33	4.51	I133
876.60	1.04	I132
877.70	0.101	Pm151
878.00	3.5	Sb128
879.70	0.187	Sr91
880.46	1.031	Ce143
881.15	0.025	Te131
881.60	0.036	Te131m
881.98	0.02387	Pm149
883.68	0.045	Pm151
887.60	0.0027	Pm151
888.70	0.021	I132
892.90	0.07	Sr91
894.10	0.0027	Pm151
898.54	0.138	Te131
898.58	0.02475	Pm151
901.30	0.094	Sr91
903.50	0.00315	Pm151
903.62	0.04	Eu156
904.40	0.013	I132

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
908.80	1	Sb128
909.55	0.04	Nb97
909.67	0.214	I133
910.00	3.35	Te131m
910.10	0.93	I132
911.25	0.026	Pm151
911.49	0.046	I133
916.40	0.032	Eu156
919.30	0.0018	Pm151
919.55	2.66	La140
920.62	1.22	Te131m
922.10	0.00135	Pm151
923.40	0.118	Te131m
924.40	0.49	Sb127
925.19	6.9	La140
925.80	3.8	Sr91
926.10	0.00405	Pm151
927.40	0.41	I132
928.80	0.028	Eu156
930.00	0.02	Te131m
933.90	0.003825	Pm151
934.47	13.9	Y92
934.48	0.874	Te131
937.82	0.02611	Ce143
939.80	0.003825	Pm151
941.27	0.8	Te131m
944.35	1.33	Eu156
947.10	2.1	Y93
947.20	0.044	I132
947.46	0.292	Eu156
948.54	2.26	Te131
948.72	0.35	Pm151
950.99	0.519	La140
951.39	0.33	Te131
953.41	0.097	Pm151
954.55	17.6	I132
959.70	0.063	Pm151
960.30	0.03	I135
960.50	1.45	Eu156
960.75	0.095	Mo99
961.00	0.15	Eu156
961.40	0.15	I135
962.30	0.012	Y93
963.00	0.034	Eu156
964.40	0.004725	Pm151
965.80	0.035	I132
968.90	0.01463	Pm151
969.83	0.37	Eu156
971.00	0.00675	Y93
971.34	0.278	Zr97
972.00	0.9	I135
972.30	1	Sb128
972.60	1.21	I135
973.90	0.04	Sr91
982.27	0.01602	Te129
984.20	0.59	I132
986.44	0.001456	Mo99
987.70	0.011	Y93

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
987.80	0.158	Te131m
992.20	0.043	Sr91
992.90	0.013	La140
995.09	0.16	I135
995.10	0.091	Te131m
995.80	0.03	I132
997.25	3.337	Te131
999.20	0.174	Te131m
999.26	0.028	Te131
1001.34	0.005459	Mo99
1002.50	0.016	I132
1002.85	0.07533	Ce143
1003.60	0.028	Te131m
1005.40	0.016	I132
1005.70	0.075	Te131m
1005.76	0.014	Te131
1007.96	0.798	Te131
1009.00	0.046	I132
1011.87	0.31	Eu156
1012.20	0.0036	Pm151
1013.57	0.001309	Te129
1017.00	0.000607	Mo99
1018.10	0.3722	Zr97
1018.10	0.006	I133
1018.50	0.084	Eu156
1019.43	0.002233	Te129
1021.20	1.01	Zr97
1022.43	0.017	Te129m
1023.60	0.063	Te131m
1024.30	33.4	Sr91
1024.40	1.09	Nb97
1026.70	0.2792	Zr97
1027.39	0.128	Eu156
1027.80	0.008	Te131m
1031.22	0.02012	Ce143
1035.00	0.51	I132
1035.40	0.107	Te131m
1035.50	0.002752	Te131
1035.60	0.0087	I133
1037.00	0.053	Eu156
1038.76	8.01	I135
1040.44	0.5	Eu156
1045.05	0.025	La140
1045.60	0.01326	Ru106
1046.78	0.01198	Ce143
1047.50	3.5	Sb128
1048.07	80	Cs136
1049.60	0.046	I132
1050.21	0.018	Te129m
1050.41	1.56	Ru106
1052.30	0.556	I133
1054.60	0.224	Sr91
1056.20	0.00108	Mo99
1059.69	1.58	Te131m
1060.07	0.138	I133
1060.22	0.03638	Ce143
1062.14	0.03203	Ru106
1065.14	4.9	Eu156

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
1066.80	0.006	Te131
1072.30	0.024	Te131m
1076.00	0.34	Eu156
1078.60	2	Sb128
1079.16	4.6	Eu156
1081.80	0.035	I132
1083.85	0.49	Te129
1086.20	0.079	I132
1087.71	0.01218	I133
1096.86	0.09	I135
1096.90	0.044	I132
1097.20	0.023	La140
1098.25	0.172	Te131
1101.58	1.62	I135
1101.80	0.042	Eu156
1103.25	0.415	Ce143
1108.30	0.024	Te131m
1110.44	0.093	Zr97
1111.64	0.191	Te129
1112.40	0.065	I32
1112.70	2	Sb128
1114.10	0.012	Te131m
1114.48	0.01183	Ru106
1115.78	0.05	Eu156
1117.02	0.085	Nb97
1124.00	3.64	I135
1125.46	11.6	Te131m
1126.50	0.03	I132
1127.96	0.99	Te131m
1128.07	0.404	Ru106
1129.47	0.135	Eu156
1129.60	0.8	Sb128
1131.51	22.74	I135
1134.20	0.008	Te131m
1136.00	3.01	I132
1140.51	0.283	Eu156
1140.80	0.127	Sr91
1141.60	0.35	Sb127
1143.30	1.35	I132
1146.96	4.95	Te131
1147.80	0.27	I132
1147.97	2.61	Zr97
1148.51	0.11	Te131
1148.60	0.049	Nb97
1148.89	0.3	Te131m
1148.89	1.5	Te131m
1148.90	0.062	Te131
1150.90	0.67	Te131m
1152.00	0.001445	I135
1153.67	6.8	Eu156
1154.08	4.7	Eu156
1155.20	0.039	Sb127
1155.80	0.004128	Te131
1156.00	0.1131	Eu156
1158.20	1.5	Sb128
1158.50	0.03	Y93
1159.90	0.104	I135
1162.70	0.028	Te131m

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
1164.20	0.065	Eu156
1165.50	0.142	Te131m
1168.60	0.011	Y93
1169.04	0.881	I135
1169.12	0.266	Eu156
1172.90	1.09	I132
1180.46	0.064	I135
1180.73	0.01448	Ru106
1181.40	0.012	Te131m
1181.60	4.5	Sb128
1183.50	0.048	Y93
1184.70	0.005504	Te131
1184.70	0.02	Y93
1187.30	0.015	Eu156
1194.54	0.05732	Ru106
1198.30	0.005504	Te131
1203.30	0.107	Y93
1204.67	0.3	Y91
1206.60	9.9	Te131m
1211.00	0.063	Te131m
1212.30	0.012	I132
1220.50	0.019	Eu156
1225.60	0.043	I135
1227.80	0.004	Te131m
1227.80	0.004	Te131m
1230.71	8	Eu156
1232.82	0.007469	Te129
1235.36	20	Cs136
1236.44	1.51	I133
1237.32	0.67	Te131m
1237.40	0.029	Y93
1240.47	0.91	I135
1242.42	6.6	Eu156
1242.60	0.004	I132
1250.50	1	Sb128
1254.10	0.059	I132
1254.20	0.028	Te131m
1254.80	0.004	I135
1258.03	0.095	Eu156
1259.50	1	Sb128
1260.41	28.9	I135
1260.63	0.01117	Te129
1263.60	0.027	I132
1264.16	0.008162	Te129
1265.20	0.004816	Te131
1268.62	0.147	Nb97
1272.80	0.168	I132
1276.07	0.94	Zr97
1277.43	2.89	Eu156
1277.44	0.118	Te131
1277.83	0.058	I135
1280.90	0.93	Sr91
1290.30	0.35	Sb127
1290.80	1.13	I132
1294.34	0.482	Te131
1295.10	1.88	I132
1297.91	0.89	I132
1297.98	0.004816	Te131

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
1298.22	2.35	I133
1303.50	0.042	La140
1305.30	0.017	Sr91
1308.10	0.00688	Te131
1308.70	0.035	I135
1314.00	0.059	I132
1315.16	0.71	Te131m
1315.77	0.066	I135
1316.20	0.1	Te131m
1317.93	0.118	I132
1318.30	0.039	Te131m
1321.60	0.05	Cs136
1327.40	0.04	Sr91
1333.80	0.055	Te131m
1334.80	0.032	I135
1339.80	1	Sb128
1340.60	0.103	Te131m
1343.66	0.078	I135
1350.38	0.15	I133
1350.91	0.061	Te131
1353.50	0.023	Sr91
1360.00	0.005922	I132
1361.00	0.6514	Zr97
1362.68	1.02	Zr97
1366.41	1.57	Eu156
1367.89	0.613	I135
1372.07	2.47	I132
1376.27	0.000389	Pr144
1376.80	0.043	Te131m
1377.90	0.07	Sb127
1378.00	1.8	Sb128
1386.15	0.009	I133
1389.60	0.016	Te131m
1390.70	0.015	I132
1394.83	0.111	Te131m
1398.57	7.01	I132
1401.36	0.003463	Te129m
1403.60	0.012	Te131m
1405.20	0.059	La140
1410.60	0.043	I132
1413.40	0.98	Sr91
1416.30	0.032	I135
1425.40	0.24	Y93
1427.14	0.105	Te131
1441.80	0.017	I135
1442.56	1.4	I132
1448.35	0.32	I135
1450.00	0.007896	I132
1450.50	0.33	Y93
1456.50	0.049	I132
1457.56	8.73	I135
1470.10	0.065	Y93
1473.80	0.167	Sr91
1476.70	0.13	I132
1486.40	0.013	Sr91
1489.16	0.278	Pr144
1496.33	0.02224	Ru106
1496.50	0.059	Te131m

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
1500.62	0.115	Te131
1502.79	1.08	I135
1515.66	0.122	Nb97
1519.60	0.079	I132
1521.99	0.038	I135
1527.73	0.057	Te131
1531.90	0.005922	I132
1538.09	0.1	Cs136
1542.30	0.01579	I132
1543.70	0.026	I135
1545.90	0.067	Sr91
1547.75	0.071	Te131m
1551.30	0.015	Cs136
1553.60	0.017	Sr91
1559.00	0.008883	I132
1560.97	0.000201	Pr144
1562.25	0.163	Ru106
1566.41	1.3	I135
1579.94	0.008256	Te131
1589.90	0.002958	I133
1592.90	0.047	I132
1593.20	0.5	Sb128
1596.21	95.4	La140
1613.75	0.026	I135
1617.90	0.01	I132
1618.90	0.007	I132
1626.29	0.046	Eu156
1626.80	0.013	Sr91
1629.09	0.025	Nb97
1636.50	0.008	I132
1639.10	0.007896	I132
1642.70	0.052	Y93
1644.00	0.013	I132
1646.00	0.003006	Sr91
1646.01	1.26	Te131m
1650.97	0.01238	Te131
1651.40	0.291	Sr91
1651.70	0.023	Y93
1661.40	0.016	I132
1671.30	0.022	I132
1678.03	9.62	I135
1679.30	0.005922	I132
1682.10	0.272	Eu156
1685.70	0.5	Sb128
1696.80	0.016	Te131m
1706.46	4.13	I135
1707.90	0.3	Sb128
1715.40	0.055	I132
1720.60	0.054	I132
1724.00	0.16	Sr91
1727.20	0.067	I132
1750.24	1.09	Zr97
1757.40	0.3	I132
1760.40	0.059	I132
1765.20	0.003	Te131
1766.25	0.03427	Ru106
1768.50	0.025	I132
1778.50	0.079	I132

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
1785.50	0.4	Sb128
1786.50	0.006	I132
1791.20	7.77	I135
1796.94	0.02774	Ru106
1800.68	0.00344	Te131
1814.00	0.016	I132
1827.80	0.023	Y93
1830.10	0.028	I132
1830.60	0.008	Te131m
1830.69	0.584	I135
1845.30	0.006	I135
1851.61	0.31	Zr97
1857.42	0.24	Eu156
1873.00	0.059	Eu156
1877.03	1.51	Eu156
1877.29	0.041	La140
1879.20	0.014	I132
1880.10	0.063	Te131m
1887.70	1.38	Te131m
1891.10	0.002752	Te131
1913.70	0.03	I132
1917.80	1.55	Y93
1921.08	1.23	I132
1923.60	0.00344	Te131
1924.10	0.003947	Te131m
1924.62	0.01336	La140
1925.70	0.001974	I132
1927.22	0.0153	Ru106
1927.30	0.298	I135
1936.15	0.075	Te131m
1937.71	1.94	Eu156
1939.50	0.004935	I132
1946.34	0.165	Eu156
1948.49	0.064	I135
1965.95	3.9	Eu156
1973.10	0.002064	Te131
1978.82	0.000872	Pr144
1980.30	0.032	Te131m
1985.64	0.01184	I132
1988.44	0.02611	Ru106
2000.94	2.05	Te131m
2002.20	1.14	I132
2016.00	0.004008	Sr91
2026.65	3.3	Eu156
2032.51	0.1131	Eu156
2040.80	0.00688	Te131
2045.88	0.88	I135
2046.30	0.000268	Pr144
2072.80	0.006192	Te131
2072.90	0.000228	Pr144
2083.20	0.01154	La140
2086.82	0.257	I132
2097.70	3.8	Eu156
2110.52	0.079	Eu156
2112.40	0.07	I135
2112.54	0.03448	Ru106
2116.49	0.114	Eu156
2121.30	0.004656	Eu156

E_γ (keV)	I_γ (%)	Radionuklid
2151.50	0.023	I135
2168.54	0.355	Te131m
2170.86	0.032	Eu156
2172.68	0.207	I132
2179.70	0.004046	I135
2180.91	2.14	Eu156
2184.60	0.157	Y93
2185.66	0.694	Pr144
2187.00	0.007	I132
2189.40	0.013	I135
2190.80	0.169	Y93
2204.20	0.002961	I132
2205.38	0.88	Eu156
2211.83	0.098	Eu156
2223.17	0.118	I132
2249.10	0.03356	I132
2255.46	0.618	I135
2255.50	0.006014	Eu156
2259.80	0.01145	Eu156
2269.90	1.03	Eu156
2270.65	0.391	Te131m
2290.60	0.003553	I132
2293.40	0.02241	Eu156
2301.00	0.01038	Eu156
2332.70	0.002763	Te131m
2344.30	0.003977	Eu156
2347.88	0.85	La140
2361.20	0.01678	Eu156
2366.04	0.02326	Ru106
2390.48	0.188	I132
2405.96	0.01448	Ru106
2408.60	0.009377	I132
2408.65	0.96	I135
2412.30	0.004342	Sr91
2416.90	0.001382	I132
2444.00	0.005626	I132
2452.80	0.009	I135
2454.80	0.002073	I132
2457.30	0.00675	Y93
2464.10	0.01145	La140
2466.07	0.072	I135
2473.80	0.01125	Y93
2477.10	0.001445	I135
2521.40	3.46	La140
2525.14	0.039	I132
2546.50	0.001579	I132
2547.34	0.101	La140
2569.80	0.004935	I132
2593.80	0.001184	I132
2603.20	0.001481	I132
2605.00	0.011	Y93
2614.50	0.003553	I132
2654.90	0.000148	Pr144
2717.50	0.003455	I132

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se