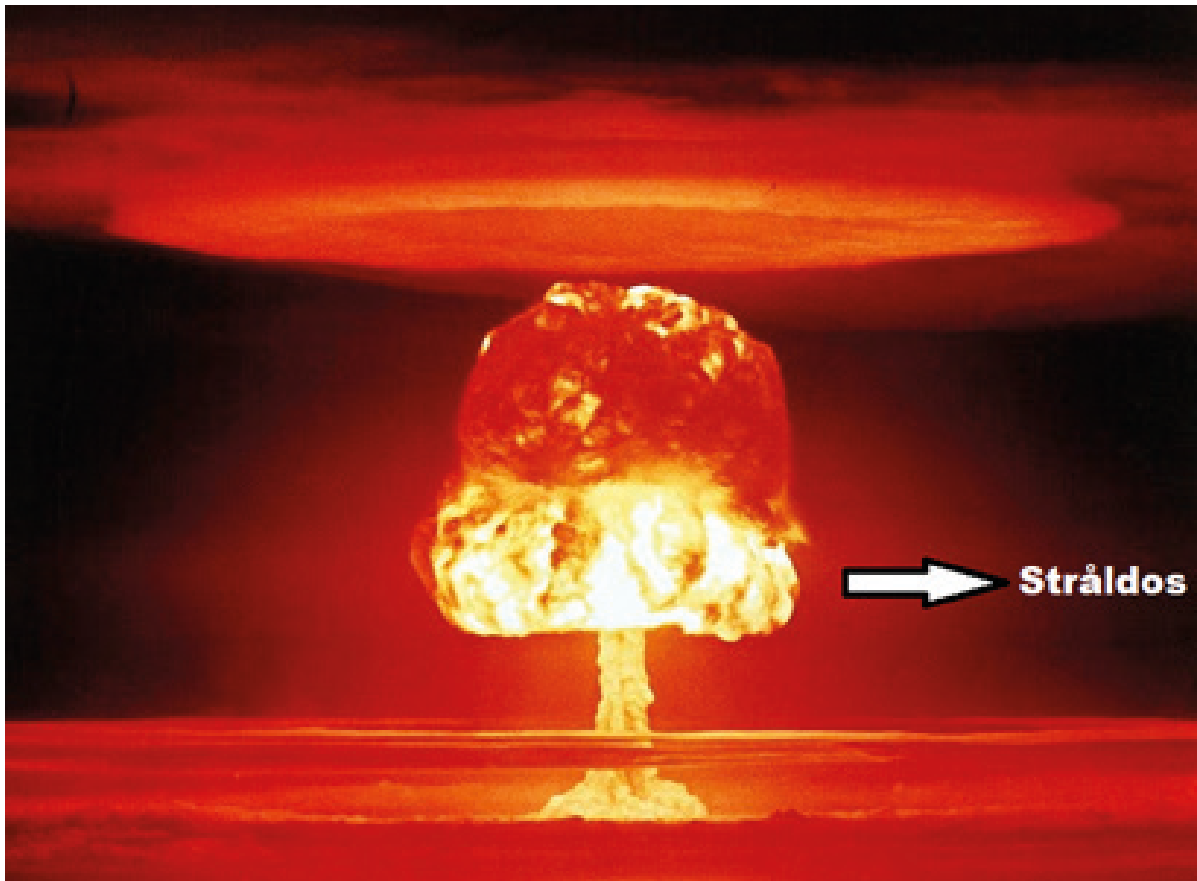


Stråldos via oralt intag av kontaminerat ytvatten

Radioaktivt nedfall efter en kärnvapenexplosion

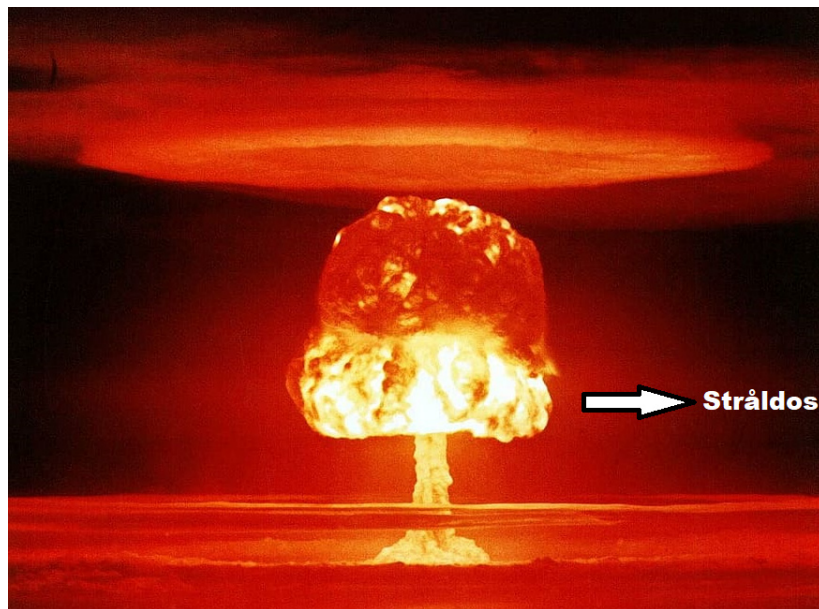
K. LIDSTRÖM, T. NYLÉN OCH A. TOVEDAL



K. Lidström, T. Nylén och A. Tovedal

Stråldos via oralt intag av kontaminerat ytvatten.

Radioaktivt nedfall efter en kärnvapenexplosion



Cover image: modified image from Wallpaperflare (<https://www.wallpaperflare.com>)

Titel	Stråldos via oralt intag av kontaminerat ytvatten. – Radioaktivt nedfall efter en kärnvapenexplosion
Title	Radiation dose via oral intake of contaminated surface water. - Radioactive fallout from a nuclear explosion
Rapportnr/Report no	FOI-R--5346—SE
Månad/Month	April
Utgivningsår/Year	2023
Antal sidor/Pages	18
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	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
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen

Bild/Cover: modified image from Wallpaperflare (<https://www.wallpaperflare.com>)

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

Rapporten beskriver stråldosen till människa via intag av vatten ur ett öppet kärl som exponerats av nedfall från en kärnvapenexplosion. Beräkningarna är utförda vid olika tidpunkter efter fissionsögonblicket och gäller för de radioaktiva nuklider som bildas vid fission av ^{235}U . Resultatet anges relativt innehållet av aktivitet ^{137}Cs i nedfallet och gäller för ett öppet kärl med vattendjupet 40 centimeter. I de antagna förutsättningarna gäller att utblandningen i den specificerade volymen sker momentant och fördelningen av nukliderna blir homogen med avseende på aktivitetskoncentration och nuklidinnehåll. Stråldoserna anges i form av effektiv stråldos under 50 år. Och har beräknats för intag vid ett antal tidpunkter mellan 30 minuter och 12 timmar efter fission. Samtliga beräkningsresultat normeras till en deposition av 10^5 Bq/m^2 ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,05$ år).

Beräkningarna visar att om 1 liter vatten konsumeras 30 minuter efter fission blir den interna stråldosen över 50 år 130 mSv, medan motsvarande nedfall 30 minuter efter fission skulle generera en extern stråldoshastighet av 3,8 Sv/h. Detta innebär att externdosen är den huvudsakliga källan till den totala stråldosen. I ett extremfall däremot där vattendjupet i kärlet istället varit endast 1 centimeter skulle den interna stråldosen bli drygt 5 Sv. Detta visar att intag av vatten från grunda vattenpölar direkt efter nedfall kan ge en betydande del av den totala stråldosen.

Nyckelord: radioaktiva ämnen, fissionsprodukter, ^{235}U , oralt intag, intern stråldos.

Summary

The report describes the radiation dose to humans via oral intake (ingestion) of one litre water from an open vessel that has been exposed to fallout from a nuclear explosion. The calculations are performed at different times after the moment of fission and apply to the radioactive nuclides that are formed during the fission of ^{235}U . Resulting radiation doses are stated relative to the content of activity ^{137}Cs in the fallout and apply to a vessel with an open surface of 1.1 square meters. The total volume of the water in the vessel is estimated at 448 litres, which corresponds to a water depth of 40 cm. We assume mixing is instantaneous and the distribution of the nuclides becomes homogeneous with regard to activity concentration and nuclide content per share of volume. Since the total amount of activity in the fallout is reduced with time after the event, the radiation dose will also be reduced. The internal radiation dose is given in the form of lifetime effective radiation dose (50 years). The calculations of internal radiation dose are carried out for oral intake at alternative times between 30 minutes and 12 hours after time of fission.

All results are normalized to a fallout of 10^5 Bq/m^2 of ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30 \text{ yr}$).

The results show that if 1 litre of water is consumed 30 minutes after fission, the internal radiation dose over 50 years will be 130 mSv, while the corresponding fallout would generate an external radiation dose rate of 3.8 Sv/h. However, had the water depth been only 1 centimetre, the internal radiation dose would be just over 5 Sv. As a comparison, the external radiation dose amount to about 2 Sv if a person enters the area 30 minutes after fission and stays there for 1 hour.

Keywords: radioactive material, fission products, ^{235}U , oral intake, internal exposure, effective dose, radiation.

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	Material och metod.....	7
2.1	Nuklidsammansättning	7
2.2	Dosfaktorer.....	7
2.2.1	Intern stråldos via oralt intag.....	7
2.2.2	Externt bidrag till stråldos.....	7
2.3	Begränsning av antalet radionuklider	8
2.4	Deposition och normering till ¹³⁷ Cs.....	10
2.5	Ytvattenkälla.....	10
2.6	Stråldos	10
2.6.1	Stråldos från oralt intag.....	10
2.6.2	Stråldos från extern exponering.....	11
3	Resultat	13
4	Diskussion och slutsatser	16
5	Referenser.....	18

1 Inledning

En av effekterna av en kärnladdningsexplosion är stråldoser från den kvarvarande strålningen. Under de första dygnen efter en explosion kommer antalet radioaktiva ämnen (radionuklider) att vara flera hundra [1]. Flertalet sönderfaller relativt snabbt till stabila ämnen medan några bildar nya radionuklider. Efter en marknära explosion kommer strålningsnivåerna, i de områden som drabbas av det lokala nedfallet, inledningsvis att vara höga [2]. Förutom förhöjd cancerrisk kan höga stråldoser under denna tidsrymd (minuter till veckor) ge upphov till akuta vävnadsskador (deterministiska skador). Stråldosen beror bl.a. på hur en människa exponeras: via extern exponering från omgivningen eller via intern exponering från radionuklider som kommit in i kroppen via t.ex. inandning eller oralt intag.

För en person som befinner sig i närområdet efter en kärnladdningsexplosion, och som undgått de direkta effekterna från värme- och stötvåg samt initialstrålning, kommer de första dagarna ändå att innebära avsevärda risker och påfrestningar. Förutom t.ex. bränder och förstörd infrastruktur kan höga nivåer av den kvarvarande strålningen utgöra en stor risk. Att skydda sig mot den externa strålningen och att ha tillgång till dricksvatten kommer att vara viktigt för överlevnaden.

Syftet med arbetet som redovisas i denna rapport, är att beräkna den interna stråldos som en vuxen människa, t ex räddningstjänst och militär personal, kan erhålla om denna dricker vatten från ett öppet kärl som utsatts för radioaktivt nedfall efter en kärnladdningsexplosion. Beräkningarna av stråldoserna baserades på fission av ^{235}U . Det innebär att det är de radionuklider som bildas vid fission av detta ämne (fissionsprodukter) samt de radioaktiva sönderfallsprodukterna från dessa som genererar den beräknade stråldosen. Det antogs också att alla fissionsprodukter sprids likformigt i såväl luften som i vattnet. Metoden gjordes skalbar så att stråldosen kan beräknas som funktion av olika depositionsnivåer (Bq/m^2), vattendjupet i kärlet, volymen vatten som personen dricker samt vid vilka tidpunkter intaget sker.

I rapporten redovisas den beräknade stråldosen vid antagandet att en person dricker en liter vatten ur ett 40 cm djupt kärl vid någon av nio olika tidpunkter (från 30 minuter till 12 dygn) efter explosionen. Beräkningarna baserades på en nuklidsammansättning som normerats till en deposition av $100 \text{ kBq}/\text{m}^2$ av ^{137}Cs . Som jämförelse beräknades också den externa dosraten som skulle genereras från samma nedfall, samma radionuklidsammansättning och aktivitet per ytenhet, som det kontaminerade vattnet.

2 Material och metod

2.1 Nuklidsammansättning

Beräkningarna i detta arbete baserades på de radioaktiva ämnen som bildas vid fission av ^{235}U och på de stråldoser dessa radionuklider genererar. Sammansättningen av radionuklider som användes för beräkningarna i detta arbete är en första ordningens approximation av de radionuklider som kan bildas vid en kärnladdningsexplosion. Endast fissionsprodukterna efter fission av ^{235}U med snabba neutroner ingår [1] och beräkningarna av dessa skedde med Nucleonica [3]. Neutroninducerad aktivitet som bildas vid explosionen, via neutronbestrålning av vapenmaterial och omgivning ingick inte. Vidare antogs att de radioaktiva ämnena sprids homogent, oberoende av fysikaliska och kemiska egenskaper. För att beskriva hur radionuklidernas inbördes förhållande förändras över tid togs endast hänsyn till ämnenas sönderfallskedjor och fysikaliska halveringstider. Radionuklidernas sammansättning användes sedan för att beräkna den relativa stråldosbidraget från varje enskild nuklid vid de givna tidpunkterna efter fissionsögonblicket. Fler beräkningar av relativa bidrag från fissionsprodukter från ^{235}U finns beskrivna i rapporten [4].

2.2 Dosfaktorer

2.2.1 Intern stråldos via oralt intag

Det bildas nästan 1000 nuklider vid fission av ^{235}U varav ett hundratal inte är radioaktiva. För bestämning av dosfaktorer för oralt intag ($D_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$) användes mjukvaran IMBA [5]. IMBA i sin tur refererar till referensvärden tagna ur ICRP 68 [6]. IMBA med referenser från ICRP 68 har kapacitet att beräkna den interna stråldosen orsakat av oralt intag från ca 200 av dessa radionuklider. De övrigt förekommande radionukliderna är inte implementerade i ICRPs referensverk och har därför inte beaktats.

2.2.2 Externt bidrag till stråldos

För att ge en jämförelse till den interna stråldosen beräknades även den externa stråldoshastigheten med samma nuklidsammansättning och deposition. Stråldosfaktorer för extern bestrålning hämtades från FGR 12 [7]. Den modell som valdes för extern exponering innebär att fissionsprodukterna är homogent deponerade på en plan oändlig markyta. I FGR 12 återfinns stråldosfaktorer för 188 av de aktuella fissionsprodukterna. Dosfaktorerna ges för en punkt 1 meter ovan mark i form av effektiv dos per tidsenhet per aktivitet per ytenhet ($(\text{Sv/s})/(\text{Bq/m}^2)$). När det gäller dosfaktorer för specifikt ^{137}Cs finns det en skillnad mellan referensdata i ICRP 68 och FGR 12. FGR 12 särredovisar dosfaktorerna för ^{137}Cs och dess sönderfallsprodukt $^{137\text{m}}\text{Ba}$ vilket innebär att deras bidrag måste beräknas var för sig (se tabell 1). Notera att det är 94,4 % av sönderfallen hos ^{137}Cs som sönderfaller via dotternukliden $^{137\text{m}}\text{Ba}$ d.v.s. grenkvoten (p) är 0,944 (94,4 %) [8].

Notera också skillnaderna mellan intern stråldos och extern stråldos. Bidraget till den externa stråldosen anges som stråldoshastighet (Sv/h), d.v.s. för att beräkna erhållen stråldos från extern exponering måste även vistelsetiden tas med i beräkningarna.

Tabell 1. Dosfaktorer för oralt intag ($D_{\text{Oral}}(^{137}\text{Cs})$) samt extern bestrålning från mark för de enskilda nukliderna ^{137}Cs ($D_{\text{Yta}}(^{137}\text{Cs})$) och $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($D_{\text{Yta}}(^{137\text{m}}\text{Ba})$). För oralt intag beräknades dessa i IMBA och för mark med oändlig ytbeläggning hämtades de från FGR 12. Enheten för dosfaktor för oralt intag (Oral) är Sv/Bq medan det för oändlig ytbeläggning (Yta) är Sv/(Bq s /m²). Dosfaktor för oralt intag, $D_{\text{Oral}}(^{137}\text{Cs})$, innefattar både bidraget från ^{137}Cs och $^{137\text{m}}\text{Ba}$ medan dosfaktorena för extern stråldos från mark ges specifikt för modernuklid ^{137}Cs ($D_{\text{Yta}}(^{137}\text{Cs})$) respektive sönderfallsprodukt $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($D_{\text{Yta}}(^{137\text{m}}\text{Ba})$)

	Intern stråldosfaktor [Sv/Bq]	Extern stråldoshastighetsfaktor [Sv/(Bq s /m ²)]
$D_{\text{Yta}}(^{137}\text{Cs})$		$2,85 \cdot 10^{-19}$
$D_{\text{Yta}}(^{137\text{m}}\text{Ba})$		$5,86 \cdot 10^{-16}$
$D_{\text{Oral}}(^{137}\text{Cs})$	$1,36 \cdot 10^{-08}$	

2.3 Begränsning av antalet radionuklider

För att ta reda på vilka fissionsprodukter som bidrar mest till den interna stråldosen, och därmed kunna begränsa antalet radionuklider, beräknades varje enskild radionuklids relativa bidrag till den totala stråldosen vid oralt intag (ekvation 3). Beräkningarna genomfördes för tidpunkterna: 30 minuter, 1 timme, 3, 6, 12 och 24 timmar, 3, 6, och 12 dygn. Respektive nuklids bidrag till stråldosen vid de antagna tidpunkterna samt summan från alla bidragande nuklider beräknades enligt ekvation 1 och 2.

$$E_{\text{Oral}}(\text{Nuklid}) = A_{\text{Nuklid}} \cdot D_{\text{Oral}}(\text{Nuklid}) \quad (1)$$

och

$$E_{\text{OralTot}} = \sum E_{\text{Oral}}(\text{Nuklid}) \quad (2)$$

där $D_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$ är dosfaktor för oralt intag för 1 Bq (Sv/Bq) av en given radionuklid, A_{Nuklid} är det orala intaget av aktivitet (Bq), $E_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$ är stråldosen från den givna radionukliden under 50-års intern exponering, och E_{OralTot} är summan av alla radionuklidernas enskilda bidrag till effektiva stråldosen vid oralt intag (Sv).

Slutligen beräknades det relativa stråldosbidragen, $R_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$ för varje nuklid vid en given tidpunkt enligt:

$$R_{\text{Oral}}(\text{Nuklid}) = E_{\text{Oral}}(\text{Nuklid}) / E_{\text{OralTot}} \quad (3)$$

Ett exempel på resultatet från en sådan beräkning ses i tabell 2. Här återfinns resultat för respektive radionuklids relativa bidrag till den interna stråldosen vid oralt intag vid tidpunkten 30 minuter efter kärnladdningsexplosionen. Endast nuklider som beräknades bidra med 0,1 % eller mer till den interna stråldosen togs med i de efterföljande beräkningarna.

Tabell 2. Radionuklidernas relativa bidrag till intern stråldos ($R_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$) via oralt intag 30 minuter efter fission. I tabellen inkluderades de radionuklider som bidrar med 0,1 % och mer till denna stråldos. Kolumnen *Ackumulerat stråldosbidrag* ger det summerade stråldosbidraget, räknat från toppen av tabellen.

Nuklid	Relativt stråldosbidrag ($R_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$) (%)	Ackumulerat stråldosbidrag (%)
⁹² Sr	7,84	7,8
⁹⁷ Zr	6,34	14,2
¹³³ I	5,64	19,8
⁹³ γ	5,44	25,3
¹³⁵ I	5,40	30,7
¹³⁸ Cs	4,96	35,6
⁹⁴ γ	4,90	40,5
¹⁴² La	4,37	44,9
¹³⁴ Te	4,02	48,9
¹⁴¹ Ba	3,78	52,7
¹³⁹ Ba	3,62	56,3
⁹¹ Sr	3,41	59,7
^{133m} Te	3,35	63,1
¹⁴¹ La	2,94	66,0
¹³⁴ I	2,92	68,9
¹⁴³ La	2,66	71,6
⁸⁹ Rb	2,23	73,8
¹⁴⁵ Pr	2,06	75,9
⁹⁵ γ	2,04	77,9
¹⁰¹ Mo	1,93	79,9
¹³¹ Sb	1,83	81,7
¹⁰⁴ Tc	1,76	83,5
¹⁴² Ba	1,37	84,8
¹³² Te	1,36	86,2
¹⁴³ Ce	1,24	87,4
¹⁰¹ Tc	1,21	88,6
¹³³ Te	1,00	89,6
¹³¹ Te	0,97	90,6
⁹⁹ Mo	0,92	91,5
¹³⁰ Sb	0,87	92,4

Nuklid Forts.	Relativt stråldosbidrag ($R_{\text{Oral}}(\text{Nuklid})$) (%)	Ackumulerat stråldosbidrag (%)
⁸⁴ Br	0,87	93,3
⁹² γ	0,81	94,1
⁸⁸ Rb	0,67	94,8
¹⁴⁷ Pr	0,63	95,4
¹³¹ I	0,63	96,0
¹⁰⁵ Ru	0,58	96,6
¹²⁹ Sb	0,54	97,1
¹⁴⁹ Nd	0,53	97,7
¹²⁸ Sn	0,43	98,1
¹⁴⁰ Ba	0,42	98,5
¹³¹ Te	0,18	98,7
¹²⁷ Sn	0,14	98,8
⁸³ Se	0,13	99,0
¹²⁸ Sb	0,11	99,1
¹⁵¹ Nd	0,10	99,2

2.4 Deposition och normering till ^{137}Cs

Deposition av fissionsprodukterna normerades till 10^5 Bq/m^2 av ^{137}Cs dels för att ^{137}Cs är en relativt välkänd radionuklid men framför allt för dess långa halveringstid ($T_{1/2}=30,05$ år, [8]). Den långa halveringstiden innebär att aktiviteten ^{137}Cs är i det närmaste konstant under den korta tidsperiod som behandlas i denna rapport¹. Att använda ^{137}Cs som långlivad referensnuklid underlättar också vid dosrekonstruktion långt tid efter att händelsen skett. Kort tid efter fissionsögonblicket är den relativa aktivitetsandelen ^{137}Cs liten i förhållande till övriga fissionsprodukter för att succesivt öka över tid när många kortlivade radionuklider sönderfallit. I tabell 2 finns inte ^{137}Cs representerat eftersom den bidrar med mindre än 0,1 % till den totala interna stråldosen (oralt intag) vid tidpunkten 30 minuter efter fission. Först 12 dagar efter fissionsögonblicket kommer ^{137}Cs upp i ett relativt bidrag ($R_{\text{Oral}(^{137}\text{Cs})}$) om 0,1 % eller $1 \cdot 10^{-3}$ i relativa tal till den totala stråldosen från alla radionuklider vid oralt intag, se tabell 3.

En deposition av 10^5 Bq/m^2 av ^{137}Cs skulle, tillsammans med bidragen från övriga fissionsprodukter, generera en extern stråldoshasighet på ca 2 Sv/h (se tabell 4 nedan) vid tidpunkten 1 timme efter explosion. Detta är en nivå som väl överensstämmer med andra liknande scenarier [2].

2.5 Ytvattenkälla

Beräkningarna som avser intern stråldos via oralt intag baserades på att vattnet tas ur ett öppet, av nedfallet kontaminerat, kärl. Volymen och ytan av detta kärl valdes att efterlikna ett badkar, d.v.s. ett typiskt kärl som används t.ex. till utfodring av hästar och andra kreatur i beteshagar. Antagna dimensioner är $160 \cdot 70 \cdot 40$ cm (längd · bredd · höjd). Detta motsvarar en volym av 448 liter samt en exponerad yta (topparea) av $1,12 \text{ m}^2$. Den beräknade koncentrationen i badkarsvattnet av ^{137}Cs blev $(100\,000 \cdot 1,12)/448 = 250 \text{ Bq/l}$ (homogent fördelat).

2.6 Stråldos

Med stråldos menas i denna rapport effektiv stråldos (Sv), viktad för strålslag och organ, dvs. stråldos till hela kroppen hos en människa. Interndosen från en liter vatten är beräknad på 50 års exponeringstid från de radionuklider som hamnat i kroppen via dricksvattnet medan den externa effektiva dosen (Sv/h) från vistelse i strålfältet från det radioaktiva nedfallet är beräknad för en timmes exponering.

2.6.1 Stråldos från oralt intag

Dosfaktor för ^{137}Cs för intern stråldos via oralt intag ($D_{\text{Oral}(^{137}\text{Cs})}$) är oberoende av tiden men koncentrationen av radioaktivitet kommer som tidigare nämnts att förändras. Den totala interna stråldosen vid oralt intag för en antagen tidpunkt och vid konsumtion av 1 liter ytvatten beräknades enligt ekvation 4.

$$E_{\text{OralTot}} = A_{(^{137}\text{Cs})} \cdot D_{\text{Oral}(^{137}\text{Cs})} / R_{\text{Oral}(^{137}\text{Cs})} \quad (4)$$

där E_{OralTot} är den effektiva stråldosen (Sv), $A_{(^{137}\text{Cs})}$ är aktiviteten ^{137}Cs (Bq) i 1 liter vatten i kärlet ($A_{(^{137}\text{Cs})} = 250 \text{ Bq}$ vid depositionen 100 kBq/m^2 ^{137}Cs), $D_{\text{Oral}(^{137}\text{Cs})}$ är stråldosfaktorn

¹ ^{137}Cs bildas i huvudsak via sönderfall av ^{137}Xe ($T_{1/2} = 3,8$ min). Processen är snabb och under de första 30 min efter fissionsögonblicket har > 99% av allt ^{137}Cs bildats.

(Sv/Bq) för oralt intag av 1 Bq ^{137}Cs (se tabell 1) och $R_{\text{Oral}(\text{Cs}^{137})}$ är det relativa bidraget från ^{137}Cs till den totala effektiva stråldosen vid tiden t (se tabell 3).

I nedanstående beräkningsexempel beskrivs stråldosen vid ett intag av 1 liter vatten vid tidpunkten 30 minuter efter fission.

Beräkningsexempel:

$$E_{\text{OralTot}} = 250 \cdot 1,36 \cdot 10^{-08} / 2,628 \cdot 10^{-05} = 129 \text{ mSv}$$

Resultat för fler tidpunkter finns angivna i tabell 4.

2.6.2 Stråldos från extern exponering

För att ge en jämförelse till den interna stråldosen beräknades även den externa stråldoshastigheten med samma nuklidvektor och deposition. Även här begränsades antalet nuklider till de som beräknades bidra med 0,1 % eller mer till den totala stråldosen.

Stråldoshastigheten från respektive nuklid ($E_{Y_{\text{ta}}(\text{Nuklid})}$) samt den totala stråldosen ($E_{Y_{\text{ta}}\text{Tot}}$) beräknades på liknande sätt som vid oralt intag (Ekv. 1-3) fast med en dosfaktor ($D_{Y_{\text{ta}}}$) som anger stråldoshastigheten (Sv/s per Bq/m²) 1 meter ovan mark. Stråldosfaktorerna gäller för en modell där nedfallet är homogent fördelat över en oändlig yta.

Ekvationerna blir då för en given tidpunkt enligt följande:

$$E_{Y_{\text{ta}}(\text{Nuklid})} = A_{(\text{Nuklid})} \cdot D_{Y_{\text{ta}}(\text{Nuklid})} \quad (5)$$

$$E_{Y_{\text{ta}}\text{Tot}} = \sum E_{Y_{\text{ta}}(\text{Nuklid})} \quad (6)$$

$$R_{Y_{\text{ta}}(\text{Nuklid})} = E_{Y_{\text{ta}}(\text{Nuklid})} / E_{Y_{\text{ta}}\text{Tot}} \quad (7)$$

I kolumnen för extern exponering i tabell 3 ges den relativa andelen av stråldosbidraget från en homogen ytbeläggning av ^{137}Cs ($R_{Y_{\text{ta}}(137\text{Cs})}$) samt dotternukliden $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($R_{Y_{\text{ta}}(137\text{mBa})}$). Observera att dessa beräkningar av effektiv stråldoshastighet ges i enheten Sv/h. $A_{(\text{Nuklid})}$ är ytaktivitet i Bq/m².

Den totala stråldoshastigheten ($E_{Y_{\text{ta}}\text{Tot}}$) vid en given tidpunkt efter fission och relaterat till ^{137}Cs ges av:

$$E_{Y_{\text{ta}}\text{Tot}} = (A_{(137\text{Cs})} \cdot D_{Y_{\text{ta}}(137\text{Cs})} / R_{Y_{\text{ta}}(137\text{Cs})}) + (A_{(137\text{Cs})} \cdot p \cdot D_{Y_{\text{ta}}(137\text{mBa})} / R_{Y_{\text{ta}}(137\text{mBa})}) \quad (8)$$

Där p är grenkvoten för de sönderfall av ^{137}Cs som bildar $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Observera att enheten för doshastighetsfaktorn är Sv/(Bq s /m²) d.v.s. denna anger stråldoshastigheten per sekund. Nedan ges ett räkneexempel för den totala stråldoshastigheten vid tidpunkten 30 minuter efter fission med en specifik ytaktivitet av 100 kBq/m² ^{137}Cs .

$$E_{Y_{\text{ta}}\text{Tot}} = (3600 \cdot 10^5 \cdot 2,85 \cdot 10^{-19} / 5,319 \cdot 10^{-11}) + (3600 \cdot 10^5 \cdot 0,944 \cdot 5,86 \cdot 10^{-16} / 1,065 \cdot 10^{-07}) = 3,8 \text{ Sv/h}$$

Tabell 3. Bidraget från ^{137}Cs och $^{137\text{m}}\text{Ba}$ till den totala stråldosen i relativa tal för interna stråldosen (Oral) respektive den totala stråldoshastigheten för extern exponering från oändlig yta (Yta).

Tid	Oral Oralt intag (Relativa tal)	Yta Extern exponering (Relativa tal)	
	$R_{\text{Oral}(^{137}\text{Cs})}$	$R_{\text{Yta}(^{137}\text{Cs})}$	$R_{\text{Yta}(^{137\text{m}}\text{Ba})}$
30 minuter	$2,63 \cdot 10^{-5}$	$5,32 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$
60 minuter	$3,34 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-10}$	$1,96 \cdot 10^{-7}$
3 timmar	$4,91 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-10}$	$7,83 \cdot 10^{-7}$
6 timmar	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$
12 timmar	$9,35 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-9}$	$6,11 \cdot 10^{-6}$
24 timmar	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$7,52 \cdot 10^{-9}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
3 dygn	$3,92 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^{-8}$	$6,02 \cdot 10^{-5}$
6 dygn	$6,77 \cdot 10^{-4}$	$6,43 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$
12 dygn	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-8}$	$2,56 \cdot 10^{-4}$

3 Resultat

Tabell 4 redovisar de effektiva stråldoser från oralt intag (E_{OralTot}) av 1 liter vatten från det beskrivna kärlet samt de externa doshastigheter (E_{YtaTot}) som beräknades för respektive tidpunkter. Beräkningarna är genomförda enligt ekvation 1 till 7 med underlag från tabell 1 och 3 och med en deposition som är normerad till 10^5 Bq/m^2 av ^{137}Cs . Anledningen till valet av normeringsnuklid (^{137}Cs) är som tidigare nämnts bl.a. dess långa halveringstid vilket möjliggör att mätningar av markdepositionen av ^{137}Cs långt efter nedfallet kan korrigeras till en historisk tidpunkt. Med hjälp av ekvation 4 och tabell 1 och 3 kan sedan den totala effektiva stråldosen beräknas vid de beskrivna tidpunkterna. De relativa bidragen till total intern stråldos finns angivna som exempel för tidpunkten 30 minuter efter fission (tabell 2).

Tabell 4. I kolumn två redovisas de effektiva stråldoser (Sv) som erhålls om en person dricker 1 liter vatten ur det beskrivna kärlet. I kolumn tre redovisas den erhållna stråldosraten (doshastigheten) för en person som befinner sig på platsen. Resultaten gäller för en antagen deposition av 10^5 Bq/m^2 ^{137}Cs .

Tidpunkt efter fission	Oralt intag	Extern exponering
	E_{OralTot} [Sv]	E_{YtaTot} [Sv/h]
30 minuter	$1,29 \cdot 10^{-1}$	3,80
60 minuter	$1,02 \cdot 10^{-1}$	2,03
3 timmar	$6,93 \cdot 10^{-2}$	$5,09 \cdot 10^{-1}$
6 timmar	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-1}$
12 timmar	$3,64 \cdot 10^{-2}$	$6,52 \cdot 10^{-2}$
24 timmar	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,73 \cdot 10^{-2}$
3 dygn	$8,67 \cdot 10^{-3}$	$6,63 \cdot 10^{-3}$
6 dygn	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$
12 dygn	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$

För att jämföra resultaten med den funktion för extern stråldoshastighet efter en kärnvapenexplosion som anges i referens [9]:

$$E_{\text{Ref}} = E_{(t=1h)} \cdot t^{-1,2} \quad (9)$$

anpassades datapunkterna i tabell 4 till motsvarande funktionsform (diagram 1 och 2). Jämförelsen mellan funktionerna redovisas i tabell 5 och diagram 3

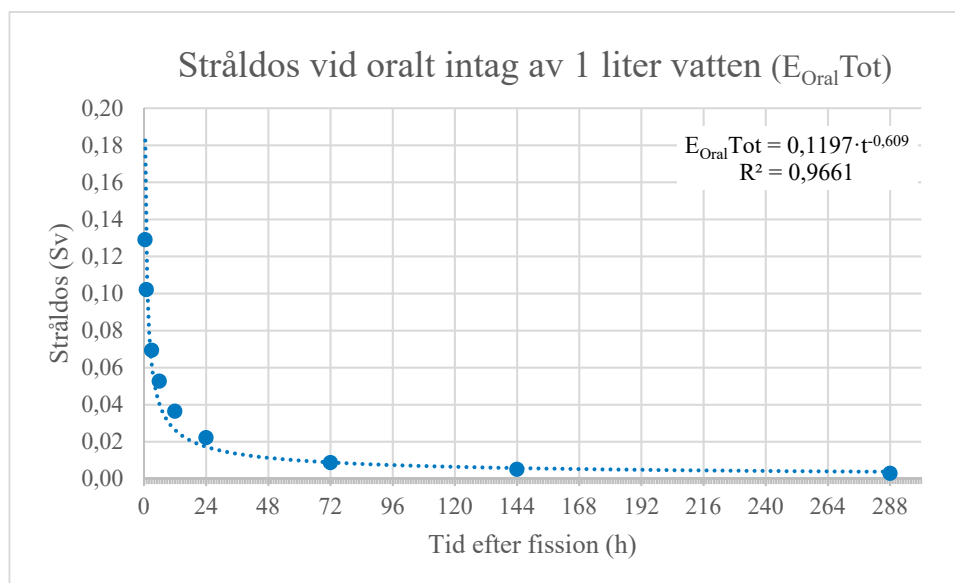


Diagram 1. Stråldos vid oralt intag av 1 liter vatten vid alternativa tidpunkter efter kärnladdningsexplosionen (se tabell 4).

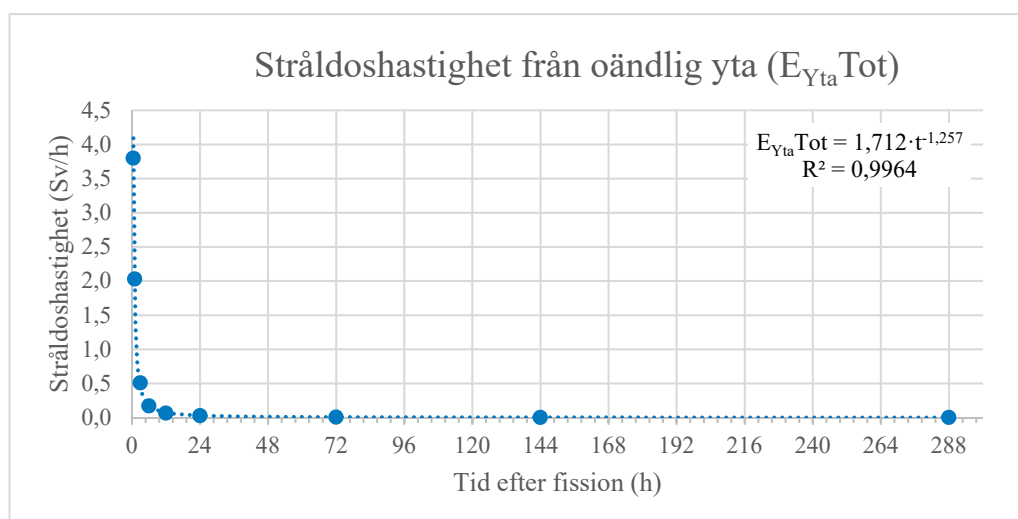


Diagram 2. Stråldoshastighet från extern bestrålning från mark där depositionen ligger uniformt fördelat på en oändlig yta (se även tabell 4).

Tabell 5. En jämförelse mellan anpassade funktioner för stråldos orsakat av oralt intag ($E_{\text{Oral Tot}}$), stråldoshastighet orsakat av bestrålning från mark ($E_{\text{Yta Tot}}$) samt den av referens givna anpassningsfunktion för avtagandet av extern stråldoshastighet efter en kärnvapenexplosion ($E_{\text{Ref}} = E_{(t=1h)} \cdot t^{-1,2}$).

Jämförelse	Funktion för avtagande
$E_{\text{Oral Tot}}$ [Sv]	$E_{\text{Oral Tot}} = 0,1197 \cdot t^{0,609}$
$E_{\text{Yta Tot}}$ [Sv/h]	$E_{\text{Yta Tot}} = 1,712 \cdot t^{1,257}$
Referens (ENW)	$E_{\text{Ref}} = E_{(t=1h)} \cdot t^{-1,2}$

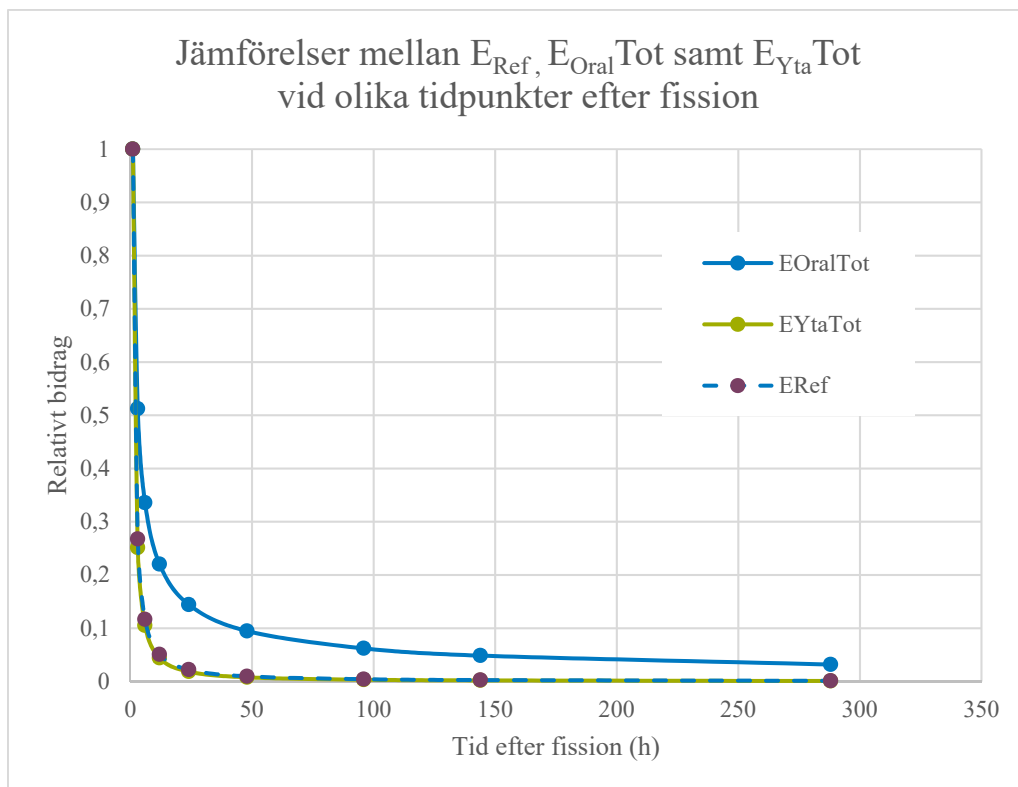


Diagram 3. Jämförelse mellan anpassningsfunktioner för stråldos orsakat av oralt intag, $E_{OralTot}$, (vid alternativa tidpunkter), extern stråldoshastighet orsakat av strålning från markbeläggning (E_{YtaTot}) samt den av referens givna anpassningsfunktion (E_{Ref}) för avtagandet av stråldoshastigheten efter en kärnvapenexplosion. Samtliga funktioner är normerade till 1 vid tiden 1h.

4 Diskussion och slutsatser

Om en människa har klarat sig undan de direkta effekterna från en kärnladdnings-explosion kommer strålskydd och tillgång till dricksvatten vara av stor vikt. Tillgången till rent dricksvatten kan komma att vara begränsat och vatten från öppna kärl, vattendrag eller pölar kan vara det enda som finns att tillgå. Detta kan särskilt gälla för personal som befinner sig i fält. Resultaten visar att ett oralt intag av vatten ur det beskrivna kärlet (30 minuter efter fission) ger ca 130 mSv räknat över 50 års levnad. Dessa beräkningar baserades på att vattendjupet i kärlet var 40 centimeter. Om vattensamlingen istället hade varit 1 centimeter djup hade stråldosen varit 40 gånger högre eller dryga 5 Sv. Baserat på uppgifter i referensverk ICRP 60 [10] beräknas risken att drabbas av dödlig cancer inom en 50 årsperiod vara 5 % per Sv.

Eftersom huvuddelen av den interna stråldosen erhålls under kort tid (tabell 4) bör en intern stråldos av 5 Sv rendera i deterministiska skador. Denna fråga har inte utretts i detta arbete utan får adresseras till kommande verksamhet.

Vid en nuklidsammansättning motsvarande den som ligger till grund för föreliggande arbete beskriver tabell 4 en snabbt avtagande stråldos via oralt intag under den närmaste tiden efter fission. Redan efter 12 dygn erhålls endast ca 1/50 av den interna stråldosen för intaget av 1 liter vatten i jämförelse med ett intag efter 30 minuter.

När det gäller den externa stråldoshastigheten påvisar beräkningarna mycket höga nivåer. I denna miljö bör en människa söka strålskydd så fort som möjligt. Om en vistelsetid av en timme antas mellan tiden 30 minuter efter fission till 1,5 timmar efter densamma erhålls approximativt 2 Sv i stråldos. Detta kan generera akuta strålskador hos människa och enligt referenser [11,12] beskrivs följande symptom i händelse av doser mellan 1,6 – 3 Gy²: ett mildt till moderat övergående illamående, kräkningar hos 20-70 % av personalen samt mild till moderat trötthet och orkeslöshet hos 25 – 60 % av personalen. Symptomen beskrivs uppstå två timmar efter bestrålning och kan pågå i två veckor. Slutligen så anges att medicinsk behandling kan behövas i 3 – 5 veckor för 10 – 50 % av personalen för behandling av infektioner, blödning och feber.

I de angivna referenserna [7,10] för dosfaktorer återfanns endast en delmängd av de radioaktiva fissionsprodukterna. Uppgifter om vilken betydelse de övriga har för den totalt erhållna effektiva stråldosen får adresseras till kommande arbeten.

Stråldosbidrag via inandning har inte tagits med i beräkningarna, dvs. det har antagits att det radioaktiva molnet har passerat. Frågeställningarna gällande inhalation finns belysta i ett tidigare arbete [13].

Detta arbete visar att ett oralt intag av vatten från öppna grunda kärl i ett tidigt skede kan ge ett betydande bidrag till stråldos jämte bidraget från extern bestrålning.

Den avslutande jämförelsen som beskrivs i slutet av föregående stycke (Resultat, Diagram 3)) visar att avtagandet i doshastighet för de beräknade extern doshastigheterna från fission av ²³⁵U (oändlig ytbeläggning) väl följer E_{Ref}. Om man väntar 50 timmar med att gå ut i den exponerade miljön reduceras den externa stråldoshastigheten med ca 99 %.

Gällande funktionen för stråldosen beräknad på oralt intag har den också en liknande form men den ska dock inte förväxlas med stråldoshastighet som momentant gäller vid varje enstaka tillfälle och vilken man kan avstyra genom att gå ner i skyddsrum, eller lämna det kontaminerade området. Dricker man vatten som kontaminerats med radioaktiva ämnen kommer de att uppehållas i kroppen under en tid vilket varierar beroende på grundämnets biologiska- och isotopens halveringstid. Man bär alltså med sig kontaminationen och kan

² Här anges enheten Gray (absorberad dos). I föreliggande arbete är antagandet att exponering från fissionsprodukterna sker företrädesvis genom gamma- och betastrålning vilket innebär att absorberad dos approximativt kan likställas med effektiv dos. Vidare beskrivning av detta finns i referenser [10,13].

inte skydda sig mot denna på samma sätt som mot den externa strålningen. Man kan däremot vänta med att dricka radioaktivt kontaminerat vatten. Den effektiva stråldosen över 50 år kan reduceras med ca 90 % om man väntar 50 timmar efter kärnvapenexplosionen med att dricka det kontaminerade vattnet.

5 Referenser

- [1] A.Tovedal, M. Goliath, P. Lagerkvist, T. Nylén, Approximativa källtermer för kärnladdningsexplosioner, FOI Memo 7177, 2020
- [2] Goliath M., Lidström K., Nylén T., Sivertsson S. Kärnvapenscenario för räddningstjänst. FOI R—5131—SE.
- [3] Nucleonica GmbH, Fission Yields, Nucleonica Nuclear Science Portal (www.nucleonica.com), Version 3.0.65, Karlsruhe (2017)
- [4] K. Lidström, Relativa stråldosbidrag till människa från fissionsprodukter av U-235, manus, 2022.
- [5] Birchall A1, Puncher M, James AC, Marsh JW, Jarvis NS, Peace MS, Davis K, King DJ. 2003. IMBA Expert: internal dosimetry made simple, Radiat. Prot. Dosim. 105: 421-425 (2003).
- [6] ICRP 68, International Commission on Radiological Protection Publication 68, 1994
- [7] FEDERAL GUIDANCE REPORT NO. 12, EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER, AND SOIL, Keith F. Eckerman and Jeffrey C. Ryman, September 1993. EPA-402-R-93-081.
- [8] DDEP, Decay Data Evaluation Project (DDEP), 2014.
http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- [9] ENW The Effects of Nuclear Weapons, Samuel Glasstone and Philip J. Dolan, Third Edition, 1977.
- [10] ICRP 60, 1990 Recommendation of the International Commission of Radiation Protection, Publication 60, 1990
- [11] STANAG 2083, Edition 5, 1986-09-19
- [12] ATP-3.8.1 VOLUME I, CBRN DEFENCE ON OPERATIONS, 2010 January
- [13] Lidström K, Nylén T, Tovedal A, Grahn H, Ekvivalent och effektiv stråldos via inandning, 2021, FOI-R—4969—SE

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. 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